

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การผลิตท่อทองแดงขนาดเล็กพิเศษที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายในด้วย  
การใช้แมนเดรลของไหลในการดึงขึ้นรูป

FABRICATION OF ULTRA-SMALL INNER SPIRAL RIBBED COPPER TUBE  
USING FLUID MANDREL DRAWING



เลขหมู่ 2068  
เลขทะเบียน 141234  
วันเดือนปี 8 ส.ค. 2558

b.....  
i.....

12753063

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ KMITL-2015-EN-D-058-189 มอนูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FABRICATION OF ULTRA-SMALL INNER SPIRAL RIBBED COPPER TUBE  
USING FLUID MANDREL DRAWING



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2015

KMITL-2015-EN-D-058-189

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การผลิตท่อทองแดงขนาดเล็กพิเศษที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายในด้วยการใช้  
แมนเดรลของไหลในการดึงขึ้นรูป

Thesis Title Fabrication of Ultra-Small Inner Spiral Ribbed Copper Tube Using Fluid  
Mandrel Drawing

นักศึกษา นายธนิต แต่งศรี


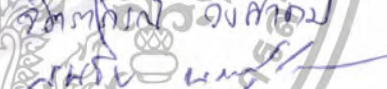

รหัสประจำตัว 53610203

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมชัย นรเศรษฐ์ไศยาน

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-D-058-189

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร	
รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข	
รศ.ดร.พรชัย นิเวศน์รังสรรค์	
ดร.จิตราภรณ์ วงศวงาม	
รศ.ดร.สมชัย นรเศรษฐ์ไศยาน	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 7 ตุลาคม พ.ศ. 2558 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องยกย่องคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่มีการนำไปใช้

วันที่ 7 ตุลาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตท่อทองแดงขนาดเล็กพิเศษที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายในด้วยการใช้แมนเดรลของไหลในการดัดขึ้นรูป
นักศึกษา	นายธนิต แต่งศรี
รหัสนักศึกษา	53610203
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับการพัฒนาท่อทองแดงขนาดเล็กพิเศษที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายใน ที่มีคุณภาพสูงในการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากความต้องการใช้ท่อขนาดเล็กพิเศษในเครื่องใช้ไฟฟ้าในปัจจุบันอยู่ในระดับสูงและจะมีมากขึ้นในอนาคต เทคโนโลยีที่ใช้ต้องช่วยให้การผลิตท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในที่ประณีตมีคุณสมบัติต่างๆ ดังเช่น ขนาดเล็ก คุณภาพสูง ฟังก์ชันการทำงานที่สูง และค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตต่ำ เพื่อตอบสนองความต้องการที่เพิ่มขึ้น วิธีการผลิตแบบเดิมนั้นเหมาะสมสำหรับท่อขนาดใหญ่ที่มีความสามารถในการดัดขึ้นรูปสูง แต่ไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตท่อพิเศษขนาดเล็กยาว เพราะความยากลำบากในการผลิตทั้งแมนเดรลที่มีสันขดเป็นเกลียวพิเศษขนาดเล็กและปลັกดแบบท่อนลวยทั้งสองอย่าง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอวิธีการดัดขึ้นรูป 4 แบบดังต่อไปนี้ การดัดขึ้นรูปแบบไม่ใช้แมนเดรล แบบใช้น้ำ น้ำมัน และซีฟิ่งเป็นแมนเดรล และนำเสนอการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ทั้ง 10 ค่า ได้แก่ ความเค้นดัดขึ้นรูป ความหนาของผนัง ความกว้างฐานสัน ช่องว่างฐานสัน ความกว้างปลายสัน ช่องว่างยอดสัน ความสูงสัน ระยะพิตซ์สัน ระยะกระจัด และมุมอีลิกซ์

ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า การดัดขึ้นรูปแบบท่อกลวงนั้นไม่เหมาะสมสำหรับการทำท่อทองแดงขนาดเล็กพิเศษที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายใน เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้คือ ความหนาของผนังที่หนามาก ผลของพารามิเตอร์ทั้งหมดมีความคล้ายคลึงกันในกรณีของ น้ำ น้ำมันและซีฟิ่ง ถึงแม้จะให้ผลลัพธ์ของผนังความหนาและมิติของสันที่เปลี่ยนแปลงไม่ดีเท่ากับกรณีใช้ซีฟิ่งเป็นแมนเดรล แต่ค่าที่ได้ก็ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่น้ำถูกเอาออกได้อย่างง่ายดายจากท่อทองแดงขนาดเล็กพิเศษที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายในเมื่อเทียบกับน้ำมันและซีฟิ่ง ดังนั้นการดัดขึ้นรูปโดยใช้น้ำเป็นแมนเดรลนั้นเหมาะสมมากที่สุดสำหรับการผลิตท่อทองแดงขนาดเล็กพิเศษที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายใน

<b>Thesis Title</b>	Fabrication of Ultra-Small Inner Spiral Ribbed Copper Tube Using Fluid Mandrel Drawing
<b>Student</b>	Mr.Tanit Tangsri
<b>Student ID.</b>	53610203
<b>Degree</b>	Doctor of Engineering
<b>Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2015
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Somchai Norasethasopon

## ABSTRACT

The thesis is concerned with the development of ultra-small inner spiral ribbed copper tubes with high-quality heat transfer. Since the demand for the ultra-small tubes in electrical appliances is currently high and will be greater in the future, the technology employed must enable the production of inner spiral ribbed fine tubes with various features, such as small size, high quality, high functionality, and low processing cost so as to meet the increasing demand. The conventional production method is suitable for large tubes with high drawability but is unsuitable for fabrication of long ultra-small tubes because of the difficulty to manufacture both an ultra-small spiral ribbed mandrel and a floating plug.

This thesis paper has proposed four drawing methods as follows: without mandrel, water, oil, and wax as mandrels and presented the comparison of ten parameters, i.e., drawing stress, wall thickness, ribbed base width, ribbed base gap, ribbed tip width, ribbed tip gap, ribbed height, ribbed pitch, displacement and ribbed spiral angle.

It was found that tube sinking was unfit for making the ultra-small inner spiral ribbed copper tubes due to the resulting high of wall thickness. The results of all the parameters were similar in the cases of water, oil and wax. Despite wall thickness and ribbed profiles not good for wax, it's still acceptable. Less impressive outcomes, water was easily removed from the ultra-small inner spiral ribbed copper tube compared to oil and wax. Thus, the tube drawing using water as mandrel was most suitable for the production of the ultra-small inner spiral ribbed copper tube.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สมชัย นรเศรษฐ์ โศภน ที่ให้ความช่วยเหลือและกรุณาดูแลเอาใจใส่อย่างดียิ่งในระหว่างศึกษาในหลักสูตร ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีในทุกๆด้าน แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆท่าน ที่ได้ให้การสนับสนุน ตลอดจนกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ข้อชี้แนะในวิทยานิพนธ์นี้ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้อย่างสมบูรณ์

ท้ายที่สุด สำหรับคุณประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ บิดา มารดา ทุกคนในครอบครัวของข้าพเจ้า ตลอดจนครู อาจารย์ ทั้งในอดีตและปัจจุบันที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ต่างๆ แก่ข้าพเจ้า

ธนิต แต่งศรี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **III** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XVI

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 โครงร่างวิทยานิพนธ์.....	4
1.6 การเผยแพร่ผลงานวิจัยที่เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์.....	5
1.6.1 ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ.....	5
1.6.2 ผลงานวิจัยนำเสนอในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ.....	6
1.6.3 ผลงานวิจัยนำเสนอในที่ประชุมวิชาการระดับชาติ.....	6
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.3 แนวทางการศึกษาวิจัย.....	43
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	44
3.1 บทนำ.....	44
3.2 การตั้งขึ้นรูปท่อ.....	44
3.3 ความเค้นและกระบวนการตั้งขึ้นรูปท่อ.....	46
3.4 การวิเคราะห์กระบวนการตั้งขึ้นรูปท่อ.....	50
3.5 ความเค้นตกค้างในโลหะแท่งกลม ลวด และท่อ.....	57

บทที่ 4 วิธีการทดลอง.....	60
4.1 บทนำ.....	60
4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **iv** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 วิธีทดลอง.....	68
4.2.1 วิธีทดลองการศึกษาการดึงขึ้นรูปแบบไม่ใช่แมนเดรลกรณีดึงขึ้นรูปแบบทีละเดียว (Single-pass drawing) และกรณีดึงขึ้นรูปแบบผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing).....	68
4.2.2 วิธีทดลองการศึกษาการดึงขึ้นรูปโดยใช้ซี่ผึ้ง น้ำ และน้ำมันคอมเพรสเซอร์เป็นแมนเดรล ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง(Multi-passes drawing).....	84
4.3 บทสรุป.....	91
บทที่ 5 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	92
5.1 บทนำ.....	92
5.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	92
5.3 โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (ABAQUS).....	93
5.3.1 วิธีการจำลองสถานการณ์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	93
บทที่ 6 ผลของการลดขนาด มิติของสัน และการเปลี่ยนแปลงแนวของท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบทอกลวง.....	98
6.1 บทนำ.....	98
6.2 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	99
6.2.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ ISRCT.....	99
6.2.2 การวิเคราะห์ความเค้น.....	100
6.2.3 การวิเคราะห์การลดลงของขนาดของสัน.....	100
6.2.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแนวแกนสันของ ISRCT.....	104
6.3 บทสรุป.....	107
บทที่ 7 การผลิตท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในขนาดเล็กด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบทอกลวง.....	109
7.1 บทนำ.....	109
7.2 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	109
7.2.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ ISRCT.....	109
7.2.2 การเปรียบเทียบ 7 พารามิเตอร์.....	110
7.3 บทสรุป.....	115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 8 อิทธิพลของความเค้นดึงขึ้นรูปในการลดพื้นที่หน้าตัดรวมและขนาดมิติ ของท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง.....	117
8.1 บทนำ.....	117
8.2 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	117
8.2.1 การวิเคราะห์ความเค้น.....	117
8.2.2 การเปลี่ยนรูปร่างของ ISRCT.....	121
8.3 บทสรุป.....	126
บทที่ 9 การใช้โปรแกรม 3D FEM เพื่อตรวจสอบท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายใน ขนาดเล็กพิเศษด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง.....	128
9.1 บทนำ.....	128
9.2 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล.....	128
9.3 บทสรุป.....	142
บทที่ 10 การประดิษฐ์ท่อทองแดงมีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็ก โดยการดึงขึ้นรูปด้วยแมนเดรลของไหล.....	144
10.1 บทนำ.....	144
10.2 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	146
10.2.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างภาคตัด ISRCT.....	146
10.2.2 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความเค้นดึงขึ้นรูป.....	146
10.2.3 การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการดึงขึ้นรูป ISRCT 4 วิธี.....	147
10.3 บทสรุป.....	151
บทที่ 11 การศึกษาอิทธิพลของความดันภายในที่มีต่อการดึงขึ้นรูปท่อทองแดง มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็ก.....	153
11.1 บทนำ.....	153
11.2 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล.....	154
11.3 บทสรุป.....	183
บทที่ 12 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	186
12.1 สรุปผลการทดลอง.....	186
12.1.1 ผลของการลดขนาด มิติของสัน และการเปลี่ยนแปลงแนวของ ท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง.....	186
12.1.1.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ ISRCT.....	186

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภารกิจการงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา VI ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
12.1.1.2 การวิเคราะห์ความเค้น.....	186
12.1.1.3 การวิเคราะห์การลดลงของขนาดของสัน.....	187
12.1.1.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแนวแกน ISRCT.....	187
12.1.2 ผลของการผลิตท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในขนาดเล็ก ด้วยวิธีการดัดขึ้นรูปแบบทอกลวง.....	188
12.1.2.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ ISRCT.....	188
12.1.2.2 การเปรียบเทียบ 7 พารามิเตอร์.....	188
12.1.3 อิทธิพลของความเค้นดัดขึ้นรูปในการลดพื้นที่หน้าตัดรวมและขนาดมิติ ของท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในด้วยวิธีการดัดขึ้นรูปแบบทอกลวง....	189
12.1.3.1 การวิเคราะห์ความเค้น.....	189
12.1.3.2 การเปลี่ยนรูปร่างของ ISRCT.....	189
12.1.4 การใช้โปรแกรม 3D FEM เพื่อตรวจสอบท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียว ภายในขนาดเล็กพิเศษด้วยวิธีการดัดขึ้นรูปแบบทอกลวง.....	190
12.1.4.1 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล.....	190
12.1.5 การประดิษฐ์ท่อทองแดงมีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็ก โดยการดัดขึ้นรูปด้วยแมนเดรลของไหล.....	192
12.1.5.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างภาคตัด ISRCT.....	192
12.1.5.2 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความเค้นดัดขึ้นรูป.....	193
12.1.5.3 การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการดัดขึ้นรูป 4 วิธี.....	193
12.1.6 การศึกษาอิทธิพลของความดันภายในที่มีต่อการดัดขึ้นรูปท่อ ทองแดงมีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็ก.....	194
12.1.6.1 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล.....	194
12.2 ข้อเสนอแนะ.....	197
เอกสารอ้างอิง.....	199
ภาคผนวก .....	208
ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	208
ประวัติผู้เขียน.....	260

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **vii** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	ค่าคุณสมบัติของดาวยที่ใช้ในการทดสอบทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ (อ้างอิงมาจาก: <a href="http://www.wesltd.com/divisions/.../TungstenCarbideBlog.html">www.wesltd.com/divisions/.../TungstenCarbideBlog.html</a> ).....62
4.2	ค่าองค์ประกอบธาตุของ ISRCT ที่ใช้ในการทดลอง (อ้างอิงมาจาก: P.S. Metal Works co.,Ltd.).....64
4.3	ค่าคุณสมบัติทางกลของ ISRCT ที่ใช้ในการทดลอง.....64
4.4	เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้ง (Reduction area per pass: RA/P) ของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านดาวยครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบท่อกกลาง.....71
4.5	ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านดาวย ครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบท่อกกลาง.....73
4.6	เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดรวม (Total reduction: ) ของ ISRCT ด้วยวิธี การดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านดาวยหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกกลาง.....76
4.7	ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านดาวย หลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกกลาง.....77
4.8	เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดรวม (Total reduction: $R_i$ %) ของ ISRCT ด้วย วิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านดาวยหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกกลาง.....79
4.9	ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านดาวย หลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกกลาง.....80
4.10	เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดรวม (Total reduction: $R_i$ %) ของ ISRCT ด้วย วิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านดาวยหลายครั้ง (Multi-passes drawing) ในการดึงขึ้นรูป แบบใช้ขี้ผึ้ง น้ำ และน้ำมันคอมเพรสเซอร์เป็นแมนเดรล.....86
4.11	ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆในการศึกษาการดึงขึ้นรูปแบบใช้ขี้ผึ้งเป็นแมนเดรล ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านดาวยหลายครั้ง (Multi-passes drawing).....87
4.12	ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆในการศึกษาการดึงขึ้นรูปแบบใช้น้ำเป็นแมนเดรล ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านดาวยหลายครั้ง (Multi-passes drawing).....88
4.13	ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆในการศึกษาการดึงขึ้นรูปแบบใช้น้ำมันคอมเพรสเซอร์ เป็นแมนเดรล ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านดาวยหลายครั้ง (Multi-passes drawing).....90
5.1	คุณสมบัติของ ISRCT ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์.....94
9.1	สรุปผลการเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของตัวแปรต่างๆ.....141
11.1	การเปลี่ยนแปลง ISRCT หลังจากการดึงขึ้นรูปผ่านดาวย 4 วิธีการ จำนวน 12 เทียว.....185

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	เครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปท่อโลหะ (a) แผนภาพแสดงรูปร่างของเครื่องจักร (b) ภาพตัดแสดงให้เห็นส่วนประกอบต่างๆของเครื่องจักรของ Tatsumi et al [1].....8
2.2	กระบวนการผลิตท่อถ่ายเทความร้อนที่มีสันขดเป็นเกลียวของ Keyes et al. [2].....9
2.3	การผลิตท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในท่อ ที่ผลิตขึ้นจากโลหะแข็ง (a) มุมมองภาพตัดของท่อและเครื่องมือที่ใช้การผลิต (b) ภาพตัดท่อหลังขึ้นรูปของ Reiger et al. [3].....10
2.4	กระบวนการผลิตท่อถ่ายเทความร้อนที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในของ Saeki et al. [4].....10
2.5	กระบวนการรีดเย็นสำหรับการผลิตท่อที่มีสันอยู่ภายในของ Kalkenings et al. [5].....11
2.6	ภาคตัดขวางแสดงโครงสร้างอุปกรณ์สำหรับผลิตท่อไร้ตะเข็บ ที่มีร่องสันที่ผิวภายในของ Hinaço et al. [6].....12
2.7	อุปกรณ์รีดท่อโดยลูกรีดภายในและภายนอกของ Zifferer et al. [7].....12
2.8	กระบวนการผลิตท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่ภายใน (a) แสดงรูปร่างของสัน (b) ภาคตัดของส่วนประกอบต่างๆของกระบวนการผลิต ท่อที่มีสันภายในของ Yamamoto et al. [8].....13
2.9	แผนภาพแสดงอุปกรณ์การหมุนปั่นขึ้นรูปชนิดใช้น้ำมันบรรจุภายใน และระบบการตรวจสอบฟิล์มน้ำมันของ Tang et al. [9].....14
2.10	สันครึ่งขนาดเล็กภายในท่อทองแดงของ Tang et al. [9].....14
2.11	ท่อที่มีครึ่งภายในที่ใช้ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของ Houfuku [10].....15
2.12	วิธีการผลิตท่อที่มีสันขดเป็นเกลียววิธีการที่ 1 ของ Houfuku [10].....16
2.13	วิธีการผลิตท่อที่มีสันขดเป็นเกลียววิธีการที่ 2 ของ Houfuku [10].....16
2.14	การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของท่อที่มีสันภายในของ Houfuku [10].....17
2.15	กระบวนการปั่นขึ้นรูปท่อที่มีสันตรงที่ใช้ในการทดลองของ Yong et al. [11].....18
2.16	แผนภาพแสดงลักษณะของท่อที่มีสันภายในโดยที่ $h$ เป็นความสูงของฟัน (ความลึกของร่องสัน) $D$ เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อทองแดง $\alpha$ เป็นมุมของร่องสัน $l_1$ เป็นความกว้างเฉลี่ยของร่องสัน $l_2$ เป็นความกว้างเฉลี่ยของฟัน และ $t$ เป็นความหนาของผนังท่อของ Tang et al. [12].....18
2.17	แผนภาพกระบวนการดึงขึ้นรูปและตาย (a) เครื่องดึงขึ้นรูป (b) ตายดึงขึ้นรูปของ Tang et al. [12].....19
2.18	การดึงขึ้นรูปเย็นของท่อเหล็กกล้าที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในโดย วิธีการสอดปลั๊กซึ่งมีลายสันเกลียวที่ผิวด้านนอกของ Beppu et al. [13].....19
2.19	แมนเดรลที่ใช้ในการขึ้นรูปชุดประกอบอุปกรณ์ต่อพ่วงของ Millet et al. [14].....20
2.20	แผนภาพแสดงภาคตัดตามแนวตั้งฉากและตามแนวยาวของท่อที่มีร่องสัน บนพื้นผิวภายในท่อของ Shinohara et al. [15].....22
2.21	แผนภาพ (a), (b)และ(c) แสดงพารามิเตอร์ของสัญลักษณ์ต่างๆและภาพขยาย

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
	มุมมองหน้าตัดของท่อที่มีร่องสันบนพื้นผิวภายในของ Shinohara et al. [15].....22
2.22	แผนภาพ (a) แสดงบางส่วนของพื้นที่หน้าตัด (b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของสัน อัตราการถ่ายเทความร้อนหรือความดันตกคร่อมในท่อของ Shinohara et al. [15].....22
2.23	แผนภาพ (a) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวของสันเกี่ยวกับ อัตราการถ่ายเทความร้อน (b) แสดงแผนผังการไหลของของไหลภายในท่อที่มีร่องสัน และไม่มีร่องสันภายในท่อของ Shinohara et al. [15].....24
2.24	แผนภาพ (a), (b) และ(c) แสดงภาคตัดของท่อที่มีร่องสันแต่ละรูปแบบที่มี ความสัมพันธ์กับขนาดของร่องสันและความหนาของฟิล์มของไหลที่ยึดติด ภายในท่อของ Shinohara et al. [15].....24
2.25	แผนภาพ (a) ถึง (d) แสดงภาคตัดของท่อที่มีร่องสันที่เกี่ยวกับลักษณะของสัน และร่องในแต่ละแบบของ Shinohara et al. [15].....26
2.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวของสันกับอัตราส่วนของ อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อที่มีสันท่อแบบต่างๆของ Shinohara et al. [15].....27
2.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ภาคตัดของร่องสันกับอัตราส่วน ของอัตราการถ่ายเทความร้อนหรือน้ำหนักของท่อต่อความยาวชนิดท่อ ที่มีร่องสันของ Shinohara et al. [15].....27
2.28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ภาคตัดของร่องสันกับอัตราส่วนของ อัตราการถ่ายเทความร้อนหรือน้ำหนักของท่อต่อความยาวชนิดท่อที่มีร่องสัน จากนั้นเปรียบเทียบกับท่อแบบดั้งเดิมของ Shinohara et al. [15].....28
2.29	แผนภาพ (a) แสดงแผ่นโลหะรีดร่องสัน (b) และ (c) แสดงภาคตัดขยายของ กระบวนการเชื่อมท่อแบบมีตะเข็บของ Masukawa et al. [16].....29
2.30	แผนภาพ (a) แสดงภาคตัดของท่อที่ผิวด้านใน (b) ภาพตัดด้านบน (c) ภาคตัดตามแนว III-III (d) ภาคตัดตามแนว IV-IV (e) กรรมวิธีการผลิตท่อ ถ่ายเทความร้อนที่มีสันบนผิวด้านในท่อของ Kim et al. [17].....30
2.31	กระบวนการ superplastic dieless tube drawing ของ Furushima et al. [18].....31
2.32	แบบจำลองกระบวนการดึงขึ้นรูปเย็นท่อ สแตนเลสผ่องบาง 316L ของ Palengat et al. [27].....35
2.33	รูปทรงของท่อแบบต่างๆในหน่วยมิลลิเมตร (a) ท่อผิวภายในเรียบ (b) สันท่อภายในวงแหวน (c) สันท่อภายในสี่เหลี่ยม และ (d) สันท่อภายในสี่เหลี่ยมคางหมูของ Selvaraj et al. [36].....39
2.34	แผนผังแสดงการทดลองของ Kattea et al. [37].....40
2.35	แผนผังแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของ Kaji et al. [38].....41
2.36	รูปแบบของท่อที่ใช้ในการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา Xจะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
	โดยใช้โปรแกรม ANSYS ของ Sainath et al. [39].....42
2.37	ผลของการจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรม ANSYS ของ Sainath et al. [39].....42
3.1	(a) เครื่องลากขึ้นรูป (b) ภาพตัดของตายที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป Dieter, G.E. [40].....45
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปหลอด Dieter, G.E. [40].....45
3.3	วิธีการดึงขึ้นรูป (a) แบบท่อกกลาง (b) แบบปลั๊กยึดติดกับที่ (c) แบบปลั๊กลอย (d) แบบแมนเดรลเคลื่อนที่ Dieter, G.E. [40].....47
3.4	องค์ประกอบของความเค้นในการดึงขึ้นรูปสามรูปแบบ Avitzur [45].....49
3.5	ความเค้นตกค้างตามแนวยาวของวัสดุในการดึงขึ้นรูปเย็น หลอดทองเหลือง ของ Linicus and Sachs [115].....58
4.1	ไดอะแกรมของเครื่องทดสอบแรงดึง.....61
4.2	เครื่อง Testometric Mico 500 และชุดอุปกรณ์เสริมที่ใช้ในการทดลอง.....61
4.3	ตายที่ใช้ในการทดสอบทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์.....61
4.4	กล้องส่องดูโครงสร้าง (a) Optical Microscope (Olympus DP11) (b) Scanning electron microscope (Olympus GX 71).....62
4.5	เครื่องวัดผิวหน้าชิ้นงานทดสอบ.....63
4.6	เครื่องวัดเลเซอร์เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของตาย (High-accuracy CCD micrometer).63
4.7	ท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายใน (Inner Spiral Ribbed Copper Tube: ISRCT) ที่ใช้ในการทดลอง.....64
4.8	ภาคตัดของสันท่อ ISRCT ก่อนดึงขึ้นรูป.....65
4.9	มุมยึดลิ้งค์ของสันท่อ ISRCT ตามแนวแกนก่อนดึงขึ้นรูป.....65
4.10	กราฟแสดงค่าความเค้น ความเครียดของท่อ ISRCT อยู่บนผิวภายในก่อนการทดลอง.....65
4.11	วิธีการดึงขึ้นรูปที่ใช้ในการทดลอง.....66
4.12	ภาคตัดแสดงรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ ทั้งแนวภาคตัดขวางและตามแนวยาว.....66
4.13	วิธีการทดลอง (a) แบบจำลองของการทดลอง (b) ชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาใช้ในการทดลอง.....67
4.14	วิธีการดึงขึ้นรูปท่อ (a) การดึงขึ้นรูปแบบเที่ยวเดียว (Single-pass drawing) (b) วิธีการดึงขึ้นรูปแบบผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing).....67
4.15	ชิ้นงานทดสอบการดึงขึ้นรูปแบบไม่ใช่แมนเดรล.....69
4.16	การวัดขนาดมิติพารามิเตอร์ของสันด้วย เครื่อง Scanning electron microscope (Olympus GX 71).....70
4.17	ชิ้นงานทดสอบการดึงขึ้นรูปแบบใช้ซีฟิ่ง น้ำ และ น้ำมันคอมเพรสเซอร์เป็นแมนเดรล.....84
5.1	ภาคตัดของ ISRCT.....93

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 (a) แสดงภาคตัดตามแนวขวางและตามแนวยาวของ ISRCT	
(b) รูปแบบจำลองของการดิ่งขึ้นรูปโดยแรงตามแนวแกนด้วยวิธีการดิ่งขึ้นรูปแบบทอกลง	
(c) แบบจำลองของ ISRCT และตายที่ใช้ในการจำลองการดิ่งขึ้นรูป.....	94
5.3 โหนดแบบ 3D โครงสร้างเอลิเมนต์ที่เป็นของแข็ง	
จาก ABAQUS user's manual [119].....	95
5.4 แบบจำลอง (a) รูปแบบโครงตาข่ายของ ISRCT และตาย	
(b) คู่ผิวสัมผัส (Contact pair ระหว่าง ISRCT และตาย	
(c) สภาวะที่ขอบเขตของ ISRCT และตาย	
(d) แผนภาพความเค้น-ความเครียดของ ISRCT.....	96
6.1 รอยแยกที่ด้านบนของสันและรอยแตกที่ขอบด้านล่างของสัน RA/P=49.76 เปอร์เซ็นต์.....	99
6.2 รูปร่างภาคตัดของท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวภายใน (ISRCT) ตามภาคตัดขวาง	
และภาคตัดตามแนวแกนโดยใช้วิธีการดิ่งขึ้นรูปแบบทอกลงที่มีค่าการลดขนาด	
พื้นที่หน้าตัดรวม 86.63 เปอร์เซ็นต์ และขนาดของครึ่งมุดาย 12 องศา.....	101
6.3 การเปลี่ยนแปลงของอัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อเที่ยว.....	102
6.4 การเปลี่ยนแปลงของแรงที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูป.....	102
6.5 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความเค้นในการดิ่งขึ้นรูป.....	103
6.6 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความหนาของผนังท่อ.....	103
6.7 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความสูงของสัน.....	105
6.8 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความกว้างของฐานสัน.....	105
6.9 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความกว้างของยอดสัน.....	106
6.10 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนระยะพิชต์ของสัน.....	106
6.11 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนมุมฮีลิคัลของสัน.....	107
6.12 ความเค้นในการดิ่งขึ้นรูปท่อ.....	108
7.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของภาคตัดตามแนวขวางและตามแนวแกนของ ISRCT.....	111
7.2 ภาคตัดบริเวณที่เกิดร่องและรอยแยกของ ISRCT.....	112
7.3 ความเค้นในการดิ่งขึ้นรูปและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม.....	112
7.4 อัตราส่วนความหนาผนังท่อและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม.....	113
7.5 อัตราส่วนความกว้างฐานสันและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม.....	113
7.6 อัตราส่วนความกว้างยอดสันและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม.....	114
7.7 อัตราส่วนความสูงสันและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม.....	114
7.8 อัตราส่วนระยะพิชต์ของสันและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม.....	115
7.9 อัตราส่วนมุมฮีลิคัลของสันและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม.....	115
7.10 รอยที่ผิวด้านบนของยอดสันและรอยแยกที่ด้านข้างของ Tang et al. [12].....	116
8.1 ภาพขยาย 5 เท่าของรูปร่างภาคตัดของท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวภายใน (ISRCT)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
	ตามภาคตัดขวางและภาคตัดตามแนวแกนโดยใช้วิธีการดิ่งขึ้นรูปแบบทอกลง.....119
8.2	รายละเอียดของรูปร่างภาคตัดของ ISRCT หลังจากการดิ่งขึ้นรูปแบบทอกลง ที่ $R_f\%$ 3 ค่าที่กำลังขยาย 5 เท่า.....120
8.3	อัตราส่วนความเค้นในการดิ่งขึ้นรูปต่อความเค้นคราก และเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวม.....123
8.4	ความหนาของผนังบวกความสูงสันต่อ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อและเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวม.....124
8.5	ความกว้างที่ฐานสันคูด้วยจำนวนสันทั้งหมดภายในท่อ หารด้วยความยาวตามแนวเส้นรอบวงที่ฐานสันของ ISRCT [ $w'_{rb} / (\pi d'_{rb} / n)$ ] และเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวม.....124
8.6	ความกว้างที่ยอดสันคูด้วยจำนวนสันทั้งหมดภายในท่อ หารด้วยความยาวตามแนวเส้นรอบวงที่ยอดสันของ ISRCT [ $w'_n / (\pi d'_n / n)$ ] และเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวม.....125
8.7	มุมอีลิคส์ของสันเกลียวตามแนวแกนและเปอร์เซ็นต์ การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวม.....125
8.8	การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทั้ง 5 ที่ใช้ในกระบวนการผลิตของ ISRCT.....126
9.1	การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของภาคตัดตามแนวขวางและตามแนวแกนของ ISRCT (a) ผลจากการทดลอง (b) ผลจากไฟไนต์เอลิเมนต์.....130
9.2	การกระจายความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นจากการดิ่งขึ้นรูปแบบทอกลง ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตั้งแต่เทียวกี่ 1 ถึงเทียวกี่ 12.....131
9.3	สรุปผลลัพธ์จากการดิ่งขึ้นรูปแบบทอกลงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตั้งแต่เทียวกี่ 1 ถึงเทียวกี่ 12 โดยที่ a) ความเค้นในการดิ่งขึ้นรูปด้วยวิธีการทดลอง (b) ภาคตัดโปรไฟล์ของ ISRCT (c) ความเค้น von Mises (d) เปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูปต่อเวลาจำลองการทำงานที่เปลี่ยนแปลงตาม ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วย FEM และผลการทดลอง ของ Lee, M. and Flom, D. G [120].....132
9.4	ความหนาผนังท่อและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....134
9.5	ความกว้างที่ฐานสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....135
9.6	ความกว้างที่ยอดสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....136
9.7	ช่องว่างฐานสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....136
9.8	ช่องว่างยอดสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....137
9.9	ความสูงของสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....138
9.10	ระยะพิตช์ของสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....138
9.11	ระยะกระจัดตามแนวแกนและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....139

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา XIII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.12 มุมฮิลิกส์ของสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....	140
9.13 อัตราส่วนความเค้นในการดิ่งขึ้นรูปต่อความเค้นคราก และเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....	140
10.1 (a) ภาคตัดขวางของท่อและสันเกลียว: 5X (b) ภาคตัดตามยาวท่อและมุมฮิลิกส์: 10X.....	146
10.2 อัตราส่วนความเค้นดิ่งขึ้นรูป และเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม.....	147
10.3 อัตราส่วนความหนาผนังท่อ และเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม.....	147
10.4 อัตราส่วนความกว้างของฐานสันเกลียว และเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม.....	148
10.5 อัตราส่วนความกว้างของยอดสันเกลียว และเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม.....	149
10.6 อัตราส่วนความสูงของสันเกลียว และเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม.....	149
10.7 อัตราส่วนระยะพิตซ์ของสันเกลียว และเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม.....	150
10.8 อัตราส่วนมุมฮิลิกส์ของสันเกลียว และเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม.....	150
11.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของภาคตัดตามแนวขวางและตามแนวแกนของ ISRCT โดยผลจาก 3D FEM ระหว่างการดิ่งขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีการ.....	155
11.2 การกระจายความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นจากการดิ่งขึ้นรูปแบบ ไม่มีความดันภายในด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตั้งแต่เที่ยวที่ 1 ถึงเที่ยวที่ 12.....	157
11.3 การกระจายความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นจากการดิ่งขึ้นรูปแบบมีความดัน ภายใน 1 bar ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตั้งแต่เที่ยวที่ 1 ถึงเที่ยวที่ 12.....	158
11.4 การกระจายความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นจากการดิ่งขึ้นรูปแบบมีความดัน ภายใน 2 bar ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตั้งแต่เที่ยวที่ 1 ถึงเที่ยวที่ 12.....	159
11.5 การกระจายความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นจากการดิ่งขึ้นรูปแบบมีความดัน ภายใน 3 bar ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตั้งแต่เที่ยวที่ 1 ถึงเที่ยวที่ 12.....	160
11.6 โหนดต่างๆบนภาคตัดมิติของ ISRCT.....	161
11.7 Von Mises stress zone บนโหนดต่างๆบนภาคตัดมิติของ ISRCT.....	161
11.8 Von Mises Stress บนภาคตัดมิติของ ISRCT ที่ความดันภายใน 0, 1, 2 และ 3 bar.....	162
11.9 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 1 (โหนด 512).....	164

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา xiv ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
11.10 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 2 (โหนด 5973).....	164
11.11 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 3 (โหนด 5974).....	165
11.12 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 4 (โหนด 5975).....	165
11.13 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 5 (โหนด 5976).....	166
11.14 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 6 (โหนด 390).....	166
11.15 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 7 (โหนด 33757).....	167
11.16 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 8 (โหนด 33885).....	167
11.17 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 9 (โหนด 33875).....	168
11.18 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 10 (โหนด 33686).....	168
11.19 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 11 (โหนด 33872).....	169
11.20 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 12 (โหนด 27043).....	169
11.21 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 13 (โหนด 26621).....	170
11.22 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 14 (โหนด 27044).....	170
11.23 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 15 (โหนด 27045).....	171
11.24 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 16 (โหนด 26622).....	171
11.25 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 17 (โหนด 27046).....	172
11.26 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 18 (โหนด 26623).....	172
11.27 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 19 (โหนด 27047).....	173
11.28 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 20 (โหนด 27048).....	173
11.29 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 21 (โหนด 26624).....	174
11.30 ความหนาผนังท่อและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....	175
11.31 ความกว้างที่ฐานสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....	176
11.32 ความกว้างที่ยอดสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....	177
11.33 ช่องว่างฐานสัน และเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....	178
11.34 ช่องว่างยอดสัน และเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....	179
11.35 ความสูงของสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....	180
11.36 ระยะพิทช์ของสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....	181
11.37 ระยะกระจัดตามแนวแกนและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....	182
11.38 มุมฮิลิกส์ของสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....	183

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$\alpha$	ครึ่งมุมตาย (องศา)
$\beta$	ครึ่งมุมปลັก (สำหรับปลັกทรงกระบอก $\beta = 0$ องศา)
$F$	แรง (นิวตัน)
$\sigma$	ความเค้น (นิวตันต่อตารางเมตร)
$\sigma_{xa}$	ความเค้นตามแนวแกน X (นิวตันต่อตารางเมตร)
$\sigma_y$	ความเค้นคราก (นิวตันต่อตารางเมตร)
$\sigma_u$	ความเค้นสูงสุด (นิวตันต่อตารางเมตร)
$\sigma_d$	ความเค้นออกแบบ (นิวตันต่อตารางเมตร)
$\bar{\sigma}$	ความเค้นเฉลี่ย (นิวตันต่อตารางเมตร)
$\sigma_T$	ความเค้นรวม (นิวตันต่อตารางเมตร)
$\sigma_H$	ความเค้นในวัสดุเนื้อเดียวกัน (นิวตันต่อตารางเมตร)
$\sigma_e$	ค่าความเค้นประสิทธิผล (นิวตันต่อตารางเมตร)
$\tau$	ความเค้นเฉือน (นิวตันต่อตารางเมตร)
$p$	ความดันปกติที่หน้าสัมผัส (นิวตันต่อตารางเมตร)
$\varepsilon$	ความเครียด
$\varepsilon_T$	ความเครียดรวม
$\varepsilon_H$	ความเครียดในวัสดุเนื้อเดียวกัน
$\dot{\varepsilon}$	ค่าอัตราความเครียดประสิทธิผล
$\varepsilon^{el}$	เป็นความเครียดของการเสียรูปในช่วงอีลาสติก
$\varepsilon^{pl}$	เป็นความเครียดของการเสียรูปในช่วงพลาสติก
$\mu$	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
$\mu_1$	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างผนังท่อและตาย
$\mu_2$	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างท่อและปลັก
$A$	พื้นที่ภาคตัดของท่อ (ตารางเมตร)
$A_f$	พื้นที่ภาคตัดของท่อหลังดิ่งขึ้นรูป (ตารางเมตร)
$A_b$	พื้นที่ภาคตัดของท่อก่อนดิ่งขึ้นรูป (ตารางเมตร)
$R_{oi}$	รัศมีภายนอกเริ่มต้น (เมตร)
$R_{ii}$	รัศมีภายในเริ่มต้น (เมตร)
$R_{of}$	รัศมีภายนอกสุดท้าย (เมตร)
$R_{if}$	รัศมีภายในสุดท้าย (เมตร)
$P$	ความดันเฉลี่ยบนพื้นผิวของตายและปลັก (นิวตันต่อตารางเมตร)
$E$	มอดูลัสของยัง (กิกะปาสคาล)
$E_T$	โมดูลัสสัมผัส (กิกะปาสคาล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XVI ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$k$	โมดูลัสของแรงบีบอัด: Bulk modulus (กิกะปาสคาล)
$G$	โมดูลัสของแรงเฉือน: Shear modulus (กิกะปาสคาล)
$\nu$	อัตราส่วนปัวซอง
$\rho$	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
$\psi$	มุมเลี้ยวของสัน (องศา)
$P_r$	ระยะพิตช์ของสัน (มิลลิเมตร)
$t_w$	ความหนาของผนังท่อ (มิลลิเมตร)
$h_r$	ความสูงของสัน (มิลลิเมตร)
$w_{rb}$	ความกว้างของฐานสัน (มิลลิเมตร)
$w_{rt}$	ความกว้างของปลายสัน (มิลลิเมตร)
$RA$	การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อ (เปอร์เซ็นต์)
$A_1$	ขนาดพื้นที่หน้าตัดสุดท้ายของท่อ (ตารางมิลลิเมตร)
$A_0$	ขนาดพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของท่อ (ตารางมิลลิเมตร)
$D_1$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสุดท้ายของท่อ (มิลลิเมตร)
$D_0$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของท่อ (มิลลิเมตร)
$R_r$	การลดพื้นที่หน้าตัดรวม (เปอร์เซ็นต์)
$A_R$	พื้นที่หน้าตัดของสัน (ตารางมิลลิเมตร)
$A_w$	พื้นที่หน้าตัดของผนัง (ตารางมิลลิเมตร)
$T$	จำนวนสัน (สัน)
$d_w$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฐานสัน (มิลลิเมตร)
$\lambda$	ความยาวยึด (มิลลิเมตร)
$F'$	เป็นแรงของการเสียรูปรวม
$F^{el}$	เป็นแรงของการเสียรูปในช่วงอีลาสติก
$F^{pl}$	เป็นแรงของการเสียรูปในช่วงพลาสติก
<b>ISRCT</b>	ท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวภายใน (Inner spiral ribbed copper tube)
<b>RAVP</b>	การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้ง (Reduction area per pass)

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ด้วยพัฒนาการของกระบวนการผลิตที่ก้าวหน้าในโลกปัจจุบันมีการเติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้ความต้องการพลังงานมาใช้ในกระบวนการผลิตและใช้ในการอุปโภค บริโภคมีปริมาณที่สูงขึ้น ภาครัฐ ภาคเอกชนและภาคอุตสาหกรรมทั่วโลกได้หันมาตระหนักถึงความสำคัญในการประหยัดและหาวิธีการใช้พลังงานให้คุ้มค่าอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ตัวแปรที่สำคัญอันเนื่องมาจากการแข่งขันทางธุรกิจ และจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้น เป็นเหตุให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เกิดมลพิษจากการใช้พลังงานอย่างไร้ประสิทธิภาพ สถานการณ์ภาวะโลกร้อน วิกฤติราคาเชื้อเพลิงตลอดจนก่อให้เกิดวิกฤติทางด้านเศรษฐกิจทั้งทางตรงและทางอ้อม จึงเป็นผลให้ความสำคัญทางด้านการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้นต้องมีความมุ่งมั่นและความเร่งด่วนอีกทั้งยังมีความต้องการความร่วมมือในการวิจัยค้นคว้าจากทุกภาคส่วนในการลดการใช้พลังงานในทุกประเทศทั่วโลก

ปัจจุบันการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรมตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่มีความจำเป็นอย่างเร่งด่วน การผลิตในงานอุตสาหกรรมได้นำเอาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางอีกทั้งมีการแข่งขันด้านการพัฒนาคุณภาพสินค้าหรือผลิตภัณฑ์มากขึ้น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงต้องมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นตามไปด้วย เทคโนโลยีในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจึงสำคัญอย่างยิ่งยวดต่อการออกแบบและประยุกต์ใช้งานได้อย่างมากมาย อาทิ เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แผงระบายความร้อนในอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องทำความเย็น เครื่องกลั่น เครื่องควบแน่น เป็นต้น หลักการออกแบบอุปกรณ์หรือระบบที่มีการถ่ายเทหรือแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดี ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติที่ต้องการ เช่น สามารถทำงานได้ตามความต้องการ ราคาถูก สมรรถนะในการถ่ายเทและแลกเปลี่ยนความร้อนสูง การเพิ่มสมรรถนะความร้อนสูง โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ขนาดกะทัดรัด อายุการใช้งานที่ยืนยาว ต้องการบำรุงรักษาซ่อมแซมน้อย รวมทั้งมีความน่าเชื่อถือและปลอดภัยสูง เพื่อให้บรรลุคุณลักษณะที่ต้องการเหล่านี้ พื้นฐานสำคัญ คือ การพัฒนาขีดความสามารถและศักยภาพของระบบถ่ายเทความร้อนให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด เพื่อลดการใช้พลังงาน มีขนาดที่เหมาะสมกะทัดรัด ทำให้ลดการใช้วัสดุและพื้นที่ติดตั้งใช้งาน ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน เพราะทำให้การจัดสรรและใช้ทรัพยากรเชื้อเพลิงและวัสดุอย่างคุ้มค่า รวมทั้งลดภาวะโลกร้อน

การเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 เป็นแบบ Active Techniques เป็นการนำเอาแหล่งพลังงานภายนอกเข้ามาช่วย เช่น อุปกรณ์ทางกล อุปกรณ์ทางไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้มีผลทำให้เกิดการสั่นของผิวทำให้ของไหลเกิดการสั่นสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น และ กลุ่มที่ 2 เป็นแบบ Passive Techniques เป็นการออกแบบลักษณะพื้นผิวของท่อแบบพิเศษ

ต่างไปจากผิวเรียบและปรับปรุงของไหลหรือสารทำงานเพื่อให้มีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีมากขึ้น โดยไม่มีพลังงานภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนวิธีที่นิยมกันส่วนมาก เรียกว่า Passive Method โดยการเพิ่มพื้นผิวในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบวิธีที่ได้ผลดีมากที่สุดอย่างหนึ่ง คือ การติดครีบบางขวางการไหลบนผนังภายในท่อ ทำให้ส่งผลต่อการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน แม้การเพิ่มพื้นผิวภายในท่อสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน แต่ทำให้ความเสียดทานภายในท่อมีเพิ่มขึ้นจึงทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในท่อด้วยเช่นกัน

ท่อความร้อน (Heat pipe) ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยแรกทีเดียวเริ่มต้นในด้านเทคโนโลยีอวกาศ ดาวเทียม โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ จนถึงปัจจุบันท่อความร้อนได้ถูกนำมาใช้ในการลดความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์หรือนำไปใช้ด้านประหยัดพลังงานและแลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรมทั่วไปการทำงานหรือวงจรความร้อน (Thermal cycle) ของท่อความร้อน

ในการผลิตอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในปัจจุบันนั้น ได้หันมาให้ความสนใจในการเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อสามารถแข่งขันและมีส่วนแบ่งการตลาด ตลอดจนทำกำไรให้ได้สูงสุด ในการผลิตอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นท่อที่ใช้มีผลอย่างมากในกระบวนการถ่ายโอนความร้อน จะเห็นได้จากผลของการศึกษาค้นคว้าด้านการถ่ายโอนความร้อนของนักวิจัยทั้งในและนอกประเทศ โดยเฉพาะในต่างประเทศได้มีการศึกษาค้นคว้ากันอย่างจริงจังทำให้เกิดท่อที่ใช้ในงานด้านความร้อนมากมาย จากท่อที่มีลักษณะผิวเรียบๆ ตรงๆ จนเป็นท่อที่มีลักษณะเป็นร่องหรือมีครีบบ การทำความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของท่อที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมมีความสำคัญมาก เนื่องจากจะได้นำไปเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาหรือการทำงานต่อไปในอนาคต

วิธีการผลิตท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในด้วยวิธีการดั้งเดิมที่ทำการผลิตอยู่นั้นได้เริ่มต้นขึ้นตั้งแต่ราวปี ค.ศ 1993 เป็นต้นมา ท่อดังกล่าวประกอบด้วยผนังทรงกระบอก ส่วนที่เป็นผิวท่อกภายในมีซี่ของโครงสันเกลียวหมุนวนอยู่ภายในจำนวนมาก ซี่ของโครงสันเกลียวภายในแต่ละสันมีมุมฮีลิกซ์ (Helix angle) ของเกลียวทำมุมกับแกนกลางของท่อมากกว่า 35 องศา วิธีการในการผลิตท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในประกอบด้วยขั้นตอนของการอัดรีดขึ้นรูปโลหะแผ่นแบนเรียบธรรมดาด้วยลูกรีดผิวเรียบและลูกรีดที่มีร่องซี่ของโครงสันเกลียว จากนั้นจึงขึ้นรูปแผ่นที่ถูกรีดให้เป็นสันไว้แล้วด้วยการม้วนให้ขอบแผ่นมาบรรจบกันเป็นรูปทรงของท่อตามแนวยาวของแผ่นโลหะ ต่อจากนั้นจึงเชื่อมขอบแผ่นที่บรรจบกันให้ประสานติดกันกลายเป็นท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในตลอดความยาวของท่อ

ในเวลาต่อมาได้มีการนำเสนอแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับวิธีการผลิตท่อเหล็กที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขึ้นอีกครั้ง หลังจากปี ค.ศ 2010 การขึ้นรูปดังกล่าวเป็นการขึ้นรูปสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในของท่อเหล็กด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปเย็นและใช้ปลั๊กแมนเดรลที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายใน หลังจากนั้นใช้วิธีการดึงขึ้นรูปโดยใช้แมนเดรลที่มีสันบนผิวมาใช้ในการผลิตท่อที่มีสันอยู่ภายในมาอย่างต่อเนื่องรวมทั้งการดึงขึ้นรูปท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในก็ใช้วิธีการดึงขึ้นรูปโดยใช้แมนเดรลที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในเช่นเดียวกัน

ในตลาดของอุปกรณ์ท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในนั้นท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในแบบไร้ตะเข็บและมีพื้นผิวด้านนอกเรียบโดยทั่วไปในท้องตลาดที่มีการผลิตขายจะมี

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 5.00 ถึง 15.00 มิลลิเมตร สันเกลียวภายในท่อนั้นจะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น การทำสันเกลียวไว้ภายในท่อนั้นเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนจากการควบแน่นหรือการกลายเป็นไอของสารทำความเย็นภายในท่อให้ดีขึ้น ตัวอย่างของการนำท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในไปประยุกต์ใช้ได้แก่ ท่อทองแดงของคอยล์เย็นและท่อทองแดงของคอนเดนเซอร์ของเครื่องปรับอากาศ ตู้แช่แข็ง และตู้เย็น เป็นต้น

ดังนั้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่างๆของกระบวนการผลิตท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในที่มีขนาดเล็กมากๆด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปด้วยการลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) โดยดึงขึ้นรูปท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดใหญ่ให้เป็นท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในที่มีขนาดเล็กลง ท่อเริ่มต้นที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปเป็นท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายใน (Inner spiral ribbed copper tube: ISRCT) ขนาดเล็กแบบไร้ตะเข็บขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร และนำเสนอพฤติกรรมการลดขนาดของท่อด้วยการดึงขึ้นรูปในหลายรูปแบบ จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลและสรุปผลการวิจัยเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในที่มีขนาดเล็กมากๆได้ ซึ่งจะประโยชน์อย่างมากต่อกระบวนการผลิต ISRCT ในอุตสาหกรรมที่ถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต้องการพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนที่จำกัด

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการลดขนาด มิติของสัน และการเปลี่ยนแปลงแนวสันของท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกกลาง

1.2.2 เพื่อศึกษาการผลิตท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในขนาดเล็กด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกกลาง

1.2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเค้นดึงขึ้นรูปในการลดพื้นที่หน้าตัดรวมและขนาดมิติของท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกกลาง

1.2.4 เพื่อศึกษาการนำไปโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการตรวจสอบท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในขนาดเล็กพิเศษด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกกลาง

1.2.5 เพื่อศึกษาการประดิษฐ์ท่อทองแดงมีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็กโดยการดึงขึ้นรูปด้วยแมนเดรลของไหล

1.2.6 เพื่อศึกษาการนำไปโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการตรวจสอบอิทธิพลของความดันภายในที่มีผลต่อการดึงขึ้นรูปท่อทองแดงมีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็ก

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ทำการศึกษาเชิงทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ABAQUS เพื่อหาอัตราการเปลี่ยนรูปของท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายใน (Inner spiral ribbed copper tube: ISRCT) ขนาดเล็กโดยการดึงขึ้นรูป อาทิเช่น ความเค้นดึงขึ้นรูป (Drawing stress) ความหนาของผนังท่อ (Wall thickness) ความกว้างฐานสันท่อ (Ribbed base width) ความกว้างปลายสันท่อ (Ribbed tip

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

width) ความสูงสันท่อ (Ribbed height) ระยะพิตช์ของสันท่อ (Ribbed pitch) และมุมอีลิคซ์ของสันท่อ (Helix angle) เป็นต้น

1.3.2 ท่อทองแดงที่ใช้ในการทดลองเป็นท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในแบบไร้ตะเข็บ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 5.00 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 3.71 มิลลิเมตร ความหนาของผนัง 0.364 มิลลิเมตร ความสูงของสัน 0.28 มิลลิเมตร ความกว้างของฐานสัน 0.33 มิลลิเมตร ความกว้างของยอดสัน 0.175 มิลลิเมตร ระยะพิตช์ของสัน 0.393 มิลลิเมตร มุมอีลิคซ์ของสันเกลียว 38 องศา และมีจำนวนสันเกลียว 45 สัน เป็นชิ้นงานทดสอบ

1.3.3 ทำการทดลองดัดขึ้นรูปท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายใน (Inner spiral ribbed copper tube: ISRCT) ขนาดเล็กโดยการดัดขึ้นรูป อาทิเช่น การดัดขึ้นรูปโดยไม่ใช้แมนเดรล (Tube sinking) ทำการดัดขึ้นรูปท่อโดยใช้น้ำ (Water) เป็นแมนเดรล ทำการดัดขึ้นรูปท่อโดยใช้น้ำมัน (Oil) เป็นแมนเดรล ทำการดัดขึ้นรูปท่อโดยใช้ขี้ผึ้ง (Wax) เป็นแมนเดรล เป็นต้น

1.3.4 ทำการจำลองสถานการณ์ดัดขึ้นรูปท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายใน (Inner spiral ribbed copper tube: ISRCT) ขนาดเล็กโดยใช้โปรแกรม ABAQUS อาทิเช่น การดัดขึ้นรูปที่ความดัน 0 bar เพื่อเปรียบเทียบกับการดัดขึ้นรูปโดยไม่ใช้แมนเดรล (Tube sinking) การดัดขึ้นรูปที่มีความดัน 1 bar, 2 bar และ 3 bar เพื่อเปรียบเทียบกับการดัดขึ้นรูปท่อโดยใช้น้ำ (Water) เป็นแมนเดรล

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 องค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับการดัดขึ้นรูปท่อโดยไม่ใช้แมนเดรล (Tube sinking) ดัดขึ้นรูปท่อโดยใช้น้ำ (Water) เป็นแมนเดรล ดัดขึ้นรูปท่อโดยใช้น้ำมัน (Oil) เป็นแมนเดรล ดัดขึ้นรูปท่อโดยใช้ขี้ผึ้ง (Wax) เป็นแมนเดรล ตามลำดับ

1.4.2 ทำให้เกิดเทคโนโลยีใหม่ในการดัดขึ้นรูปท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายใน (Inner Spiral Ribbed Copper Tube) ขนาดเล็ก และหลักการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต

1.4.3 เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนา และออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมประเภทอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์ต่างๆทางด้านไอที

1.4.4 ประหยัดพลังงาน ลดขนาด และการใช้วัสดุในการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน นำไปสู่การลดต้นทุนการผลิต เกิดประโยชน์ทั้งในแง่พื้นที่การติดตั้ง ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและราคาที่ต่ำลง

## 1.5 โครงร่างวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เรื่อง “การผลิตท่อทองแดงขนาดเล็กพิเศษที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายในด้วยการใช้แมนเดรลของไหลในการดัดขึ้นรูป” เล่มนี้ ได้แบ่งรายละเอียดของการนำเสนอออกเป็น 12 บท ดังนี้

1.5.1 บทที่ 1 ประกอบด้วย บทนำ ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์งานวิจัย ขอบเขตงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.2 บทที่ 2 นำเสนอการศึกษาวิจัยที่เคยศึกษาผ่านมาและแนวทางการศึกษาวิจัย ในหัวข้อการประดิษฐ์ท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.3 บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาและทำความเข้าใจในงานวิจัยนี้

1.5.4 บทที่ 4 การทดลองและทดสอบดึงขึ้นรูปท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็กโดยการดึงขึ้นรูปโดยไม่ใช้แมนเดรล (Tube sinking) การดึงขึ้นรูปท่อโดยใช้ น้ำ (Water) เป็นแมนเดรล การดึงขึ้นรูปท่อโดยใช้น้ำมัน (Oil) เป็นแมนเดรล การดึงขึ้นรูปท่อโดยใช้ขี้ผึ้ง (Wax) เป็นแมนเดรล ตามลำดับ รายละเอียดในส่วนเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการทดลองในแต่ละขั้นตอน และการเก็บข้อมูลเพื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง ตลอดจนสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ข้อมูล

1.5.5 บทที่ 5 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาและทำความเข้าใจในงานวิจัยนี้

1.5.6 บทที่ 6 นำเสนอผลของการลดขนาดมิติของสันและการเปลี่ยนแปลงแนวของท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบทอกลวงในงานวิจัยนี้

1.5.7 บทที่ 7 นำเสนอการผลิตท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในขนาดเล็กด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบทอกลวงในงานวิจัยนี้

1.5.8 บทที่ 8 นำเสนออิทธิพลของความเค้นดึงขึ้นรูปในการลดพื้นที่หน้าตัดรวมและขนาดมิติของท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบทอกลวงในงานวิจัยนี้

1.5.9 บทที่ 9 นำเสนอการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อตรวจสอบท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในขนาดเล็กพิเศษด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบทอกลวงในงานวิจัยนี้

1.5.10 บทที่ 10 นำเสนอการประดิษฐ์ท่อทองแดงมีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็กโดยการดึงขึ้นรูปด้วยแมนเดรลของไหลในงานวิจัยนี้

1.5.11 บทที่ 11 นำเสนอการศึกษาอิทธิพลของความดันภายในที่มีต่อการดึงขึ้นรูปท่อทองแดงมีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็กในงานวิจัยนี้

1.5.12 บทที่ 12 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะในงานวิจัยนี้

## 1.6 การเผยแพร่ผลงานวิจัยที่เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์

### 1.6.1 ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ

1. Tangsri, T., Norasethasopon, S. and Yoshida, K. 2014. "Fabrication of small size inner spiral ribbed copper tube by fluid mandrel drawing" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 70: 1923-1930.
2. Tangsri, T. and Norasethasopon, S. 2015. "Influences of total reduction of area on drawing stress and tube dimension in inner spiral ribbed copper tube sinking" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 77: 2269-2276.
3. Tangsri, T. and Norasethasopon, S. 2015. "3D FEM validation of ultra-small inner spiral ribbed copper tube using the tube sinking method" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. DOI 10.1007/s00170-015-7328-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.6.2 ผลงานวิจัยนำเสนอในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ

1. Tangsri, T. and Norasethasopon, S. 2013. "Fabrication of Small Size Inner Spiral Ribbed Copper Tube Using Tube Sinking Method" **Advanced Materials Research**. 802: 37-41.

### 1.6.3 ผลงานวิจัยนำเสนอในที่ประชุมวิชาการระดับชาติ

1. Tangsri, T. and Norasethasopon, S. 2013. "Effects of Rib Dimension Reduction and Orientation Change of Inner Spiral Ribbed Copper Tube Using Tube Sinking Method" **The 27th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NET)**, 16-18 October 2013, Chonburi. (Best paper award)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทรรศน์

#### 2.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการประดิษฐ์ท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายใน ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงการศึกษาและเทคนิคการประยุกต์ใช้ที่ทำให้เกิดเทคโนโลยีใหม่ๆ ในการตั้งขึ้นรูปท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายใน (Inner Spiral Ribbed Copper Tube: ISRCT) ขนาดเล็ก เพื่อนำไปประยุกต์หาแนวทางในการ พัฒนา ปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตที่สูงมากยิ่งขึ้น

#### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

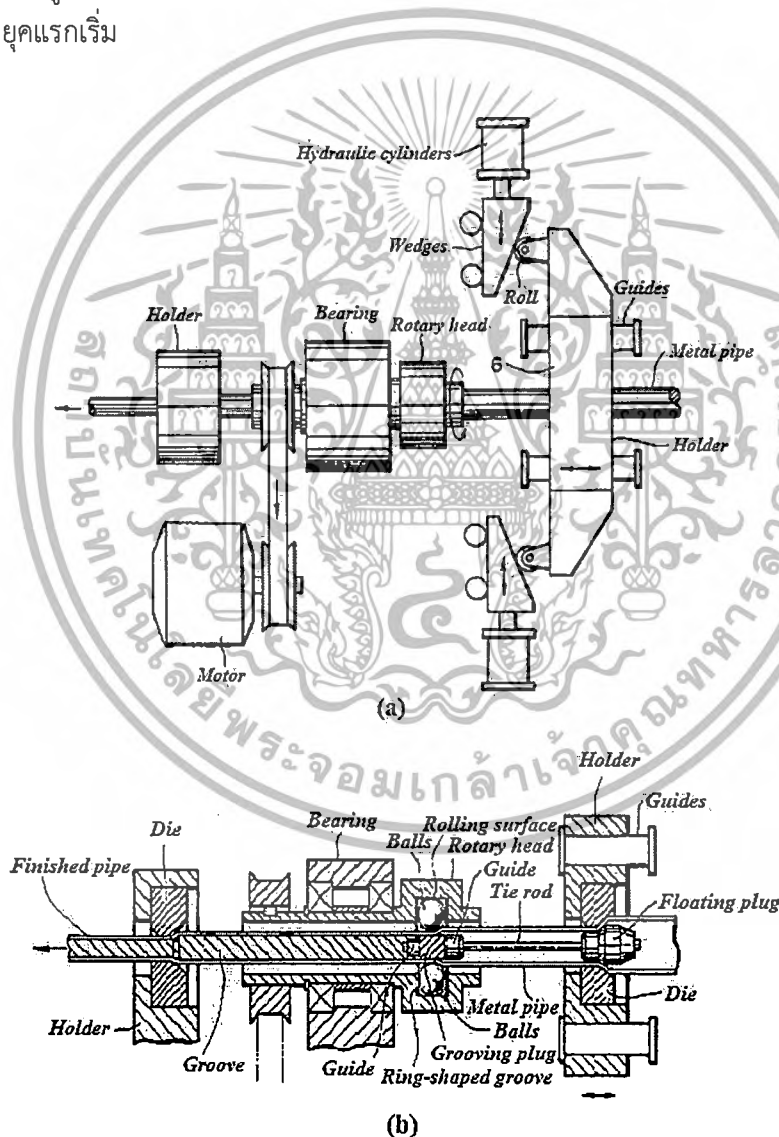
การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมมาก ทั้งในกระบวนการผลิตสินค้าอุปโภคและบริโภค ดังนั้นจึงมีนักวิจัยจำนวนมากทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศที่ให้ความสนใจเกี่ยวกับกระบวนการผลิตอุปกรณ์ในการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตามวิธีต่างๆ ด้วยเหตุผลเพื่อช่วยลดขนาดและต้นทุนการผลิตให้น้อยลงไปกว่าที่มีอยู่ในปัจจุบันนี้

โดยเฉพาะพัฒนาการของการผลิตท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายในของท่อขนาดเล็ก เพื่อใช้เป็นท่อที่มีคุณภาพในการถ่ายเทความร้อนสูง ความต้องการท่อเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในวงการเครื่องใช้ไฟฟ้ามีสูงมากในปัจจุบัน เทคโนโลยีที่ใช้ต้องสามารถทำการผลิตท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในท่อซึ่งมีคุณลักษณะเด่นหลายประการ เช่น ผลิตท่อขนาดเล็ก คุณภาพสูง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดี และมีค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ วิธีการผลิตที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเหมาะกับท่อที่มีขนาดใหญ่แต่ไม่เหมาะกับการผลิตท่อที่มีขนาดเล็กและยาว เพราะการทำแมนเดรลที่มีสันเกลียวบนผิวขนาดเล็กและอุปกรณ์แบบปลั๊กลอยได้อย่างสมบูรณ์แบบนั้นทำได้ยาก

ปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ มีแนวโน้มที่จะมีขนาดเล็กลงเป็นอย่างมากและจะยังคงมีขนาดเล็กลงอย่างต่อเนื่อง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาระบบการถ่ายเทความร้อนออกจากภายในชุดอุปกรณ์ที่ก่อให้เกิดความร้อนออกอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด สืบเนื่องมาจากอุปกรณ์ขนาดเล็กมากจึงจำเป็นต้องใช้ท่อถ่ายเทความร้อนออกจากภายในระบบ ดังนั้นการหาแนวทางในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนจากภายในอุปกรณ์ดังกล่าวด้วยการผลิตท่อขนาดเล็กที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในท่อจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและยังเป็นการลดการใช้พลังงานในอุปกรณ์ขนาดเล็กดังกล่าวอีกด้วย โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

### 2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกรรมวิธีการผลิตท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายใน

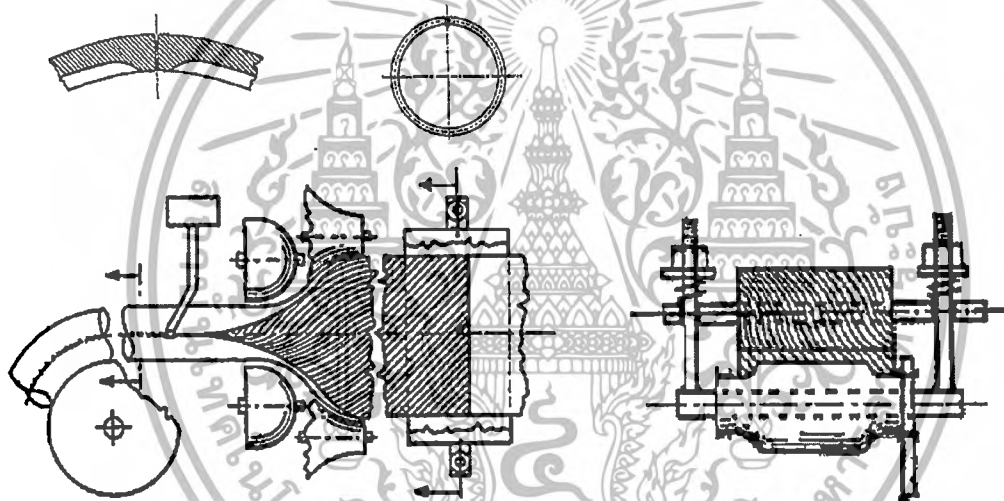
Tatsumi et al [1] ได้ศึกษาเครื่องจักรสำหรับการขึ้นรูปท่อเหล็กที่มีสันขดเป็นเกลียวที่ผิวภายใน โดยการปรับปรุงเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปท่อโลหะบางที่มีสันขดเป็นเกลียวจำนวนมากที่ผิวภายใน ปลั๊กที่มีร่องบนผิวภายนอกจะถูกสอดเข้าไปภายในท่อโลหะแล้วยึดติดกับท่อโลหะในแนวแกนตามทิศทางเดียวกันกับแนวแกนของท่อ ในขณะที่เคลื่อนที่ไปตามแนวแกนพร้อมกันนั้นก็จะถูกกดอัดด้วยลูกบอลทรงกลมซึ่งหมุนไปตามแนวเส้นรอบวงรอบผิวด้านนอกของท่อโลหะ ในตำแหน่งที่เป็นจุดเดียวกันกับตำแหน่งของปลั๊กที่มีร่องสันบนผิวภายนอกซึ่งเป็นกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่องในการขึ้นรูปท่อโลหะที่มีสันขดเป็นเกลียวที่ผิวภายใน ภายหลังจากนั้นท่อที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้วจะถูกดึงผ่านตาย เครื่องจักรดังกล่าวมีอัตราการกำลังการผลิตสูงในการผลิตท่อโลหะที่มีผิวด้านนอกเรียบและมีผิวด้านในที่มีสันขดเป็นเกลียวในงานอุตสาหกรรมในยุคแรกเริ่ม



รูปที่ 2.1 เครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปท่อโลหะ (a) แผนภาพแสดงรูปร่างของเครื่องจักร (b) ภาพตัดแสดงให้เห็นส่วนประกอบต่างๆของเครื่องจักรของ Tatsumi et al [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

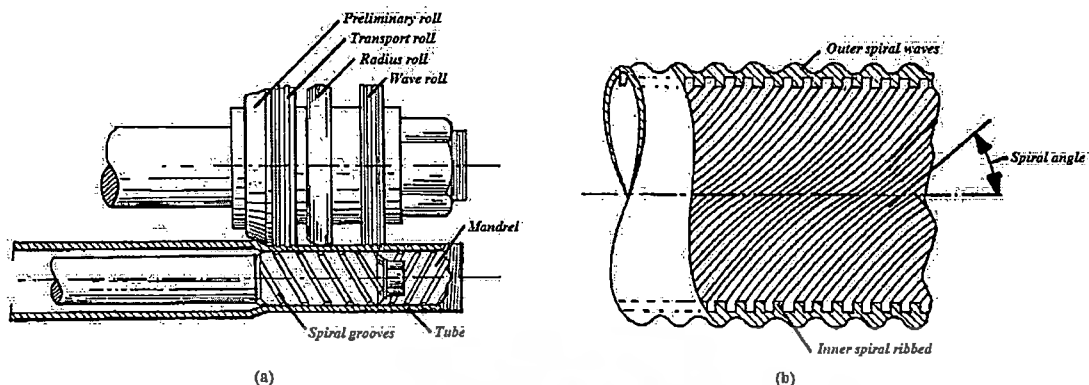
Keyes et al. [2] ได้ศึกษาท่อที่มีสันอยู่ภายในและวิธีการผลิตท่อสำหรับการถ่ายเทความร้อนที่ภายในมีสันขดเป็นเกลียวสำหรับใช้ในคอนเดนเซอร์และฮีวปอเรเตอร์ในเครื่องปรับอากาศที่มีผนังเป็นวงแหวนที่ผิวภายในท่อ ที่ผิวภายในท่อมีสันขดเป็นเกลียวจำนวนมาก มีมุมของสันอยู่ระหว่าง 0 ถึง 90 องศา ที่นิยมนำมาใช้งานนั้นอยู่ที่มุม 45 องศา ดังรูปที่ 2.2 วิธีการในการผลิตท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในประกอบด้วยขั้นตอนของการอัดรีดขึ้นรูปโลหะแผ่นแบนเรียบด้วยลูกรีดลูกที่ 1 ที่มีผิวเรียบที่ด้านล่างของแผ่นเรียบและลูกรีดที่ 2 ที่มีร่องสันขดเป็นเกลียวจำนวนมากบนผิวด้านนอกถูกกดรีดอัดที่ผิวด้านบนของแผ่นเรียบทำให้เกิดร่องสันบนผิวของแผ่นเรียบดังกล่าว จากนั้นจึงขึ้นรูปแผ่นโลหะที่ถูกรีดให้เป็นสันไว้แล้วด้วยการม้วนขอบให้ขอบด้านข้างของแผ่นโลหะมาสัมผัสแนบชิดติดกันเป็นรูปทรงของท่อตามแนวยาวของแผ่นโลหะ ต่อจากนั้นจึงทำการเชื่อมที่บริเวณขอบของแผ่นรีดที่สัมผัสแนบชิดติดกันให้ประสานเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกลายเป็นท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในตลอดความยาวของท่อ



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตท่อถ่ายเทความร้อนที่ภายในมีสันขดเป็นเกลียวของ Keyes et al. [2]

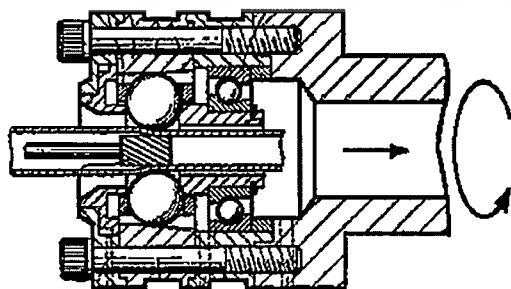
Reiger et al. [3] ได้ศึกษาท่อที่มีสันขดอยู่ภายในที่ทำจากโลหะแข็งและวิธีการเกี่ยวกับการผลิตอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายใน ดังรูปที่ 2.3 ท่อที่มีสันขดอยู่ภายในที่ผลิตขึ้นมาจากโลหะแข็งอาทิเช่น เหล็กกล้าไร้สนิม ไทเทเนียม หรือโลหะผสมระหว่างนิกเกิลกับเหล็ก และกรรมวิธีการผลิตท่อดังกล่าวสำหรับใช้ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ท่อนั้นมีผนังซึ่งเป็นรูปวงแหวนอยู่รอบๆผนังท่อภายในและที่ผิวด้านนอกของท่อมีลักษณะเป็นคลื่น ที่ผิวด้านในนั้นมีสันขดเป็นเกลียวจำนวนมากแต่ละสันมีมุมฮีติกส์ที่ทำมุมกับแนวแกนของท่อประมาณ 18 องศา วิธีการผลิตท่อดังกล่าวประกอบด้วยขั้นตอนหลายๆขั้นตอนในการขึ้นรูปคลื่นที่ผิวด้านนอกท่อและสันเกลียวภายในท่อนั้นถูกขึ้นรูปในเวลาเดียวกัน การเพิ่มขึ้นของความสูงแนวสันเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ขณะเดียวกันการดึงท่อในทิศทางตามแนวแกนก็ถูกกระทำอย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การผลิตท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในท่อที่ผลิตขึ้นจากโลหะแข็ง (a) มุมมองภาพตัดของท่อและเครื่องมือที่ใช้ในการผลิต (b) ภาพตัดท่อหลังขึ้นรูปของ Reiger et al. [3]

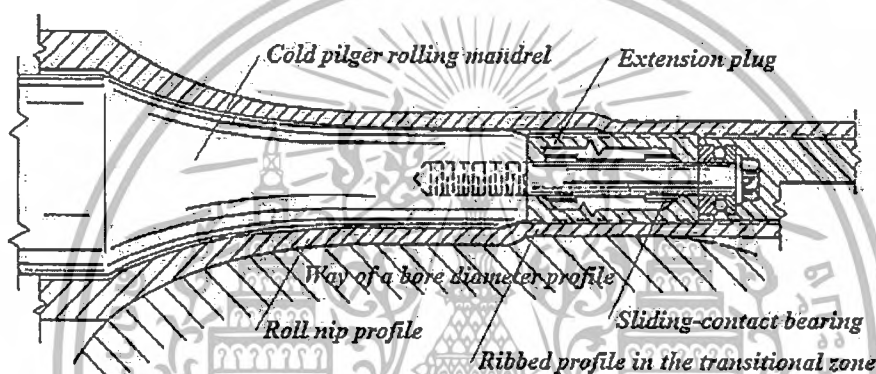
Saeki et al. [4] ได้ศึกษาเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปท่อที่มีสันอยู่ภายในท่อ ดังรูปที่ 2.4 อุปกรณ์ดังกล่าวมีความสามารถในการผลิตท่อที่มีสันอยู่ภายในที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ โดยขึ้นงานแต่ละชิ้นสามารถที่จะทำการลดน้ำหนักลงได้เป็นอย่างมากและยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงรูปต่อการหมุนกดอัดด้วยความเร็วสูงด้วยลูกบอลทรงกลมที่ทำหน้าที่แทนตายได้เป็นอย่างดี ส่วนปลั๊กที่ใช้ในการขึ้นรูปมีสันอยู่ที่ผิวภายนอกด้านบนซึ่งนำมาใช้เป็นแมนเดรล ขณะทำการขึ้นรูปแมนเดรลจะสัมผัสกับผนังท่อภายในที่มีผิวเรียบที่ไม่มีสันอยู่ภายในเป็นท่อกลวงธรรมดา ลูกบอลทรงกลมที่หมุนอยู่รอบๆผนังท่อด้านนอกนั้นจะสัมผัสกับผิวด้านนอกของท่อก่อนการขึ้นรูปแล้วกดอัดผนังท่อด้านนอกกับผิวภายนอกของแมนเดรล เป็นผลให้บริเวณพื้นผิวด้านนอกของท่อเรียบตามระยะกดอัดที่ปรับระยะห่างของลูกบอลไว้ที่ขนาดกำหนด ส่วนที่ผิวด้านในจะถูกกดอัดกับผิวด้านนอกของแมนเดรลเป็นเกลียวของสันหมุนวนไปตามทิศทางการหมุนของท่อ จากชุดจับท่อด้านหน้าจะมีแบริ่งเป็นอุปกรณ์รองรับการหมุนตามแนวเส้นรอบวง ในขณะเดียวกันท่อจะถูกดึงผ่านลูกบอลทรงกลมในทิศทางตามแนวแกนโดยชุดอุปกรณ์ที่ใช้ลากขึ้นรูปขึ้นส่วนรองรับที่จุดต่างๆทำจากวัสดุเซรามิก ที่ปลอกยึดลูกบอลทรงกลมทำจากเรซินสังเคราะห์ จึงมีผลให้น้ำหนักของชุดอุปกรณ์ทั้งหมดสามารถลดลงได้และมีความทนทานต่อการหมุนขึ้นรูปด้วยความเร็วรอบที่สูงมากๆได้ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.4 กระบวนการผลิตท่อถ่ายเทความร้อนที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในของ Saeki et al. [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

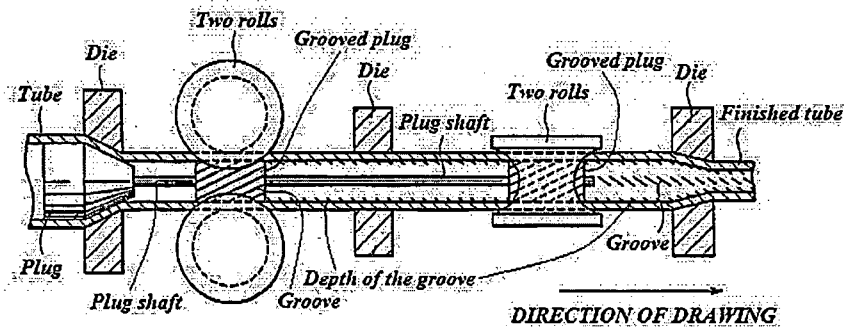
Kalkenings et al. [5] ได้ศึกษาอุปกรณ์ลูกรีดของเครื่องรีดเย็นสำหรับการผลิตท่อที่มีสันอยู่ภายใน โดยขั้นตอนการผลิตใช้กระบวนการรีดเย็น ดังรูปที่ 2.5 ขั้นตอนดังกล่าวใช้ลูกรีดที่ยึดติดกับแท่นรีดเคลื่อนที่กลับไปกลับมาตามทิศทางของแนวแกนของแท่งรีดและออกแบบให้การรีดเป็นแบบรีดเรียบ แท่นรีดจะทำการรีดวัสดุในทิศทางของการหมุนสลับไปสลับมาตามแนวแกนของแมนเดรล อุปกรณ์ต่างๆ ของแท่งรีดประกอบด้วยแมนเดรลแท่งเรียบที่มีสันเป็นร่องที่ผิวภายนอกส่วนลูกรีดจะทำการกดรีดลงบนผิวของท่อที่สวมอยู่กับแมนเดรลและใช้วิธีการรีดเย็น อุปกรณ์เสริมประกอบด้วยปลั๊กยึดติดร่วมแกนหมุนได้ที่ปลายของแมนเดรล จากนั้นแท่นรีดจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาถึงบดท่อเรียบให้เกิดสันลึกลงไปในร่องของแมนเดรล หลังจากนั้นท่อจะถูกดึงออกไปซึ่งเป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง วิธีการดังกล่าวถูกนำไปใช้เป็นเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตท่อที่มีสันร่องลึกภายในที่ใช้ในอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.5 กระบวนการรีดเย็นสำหรับการผลิตท่อที่มีสันอยู่ภายในของ Kalkenings et al. [5]

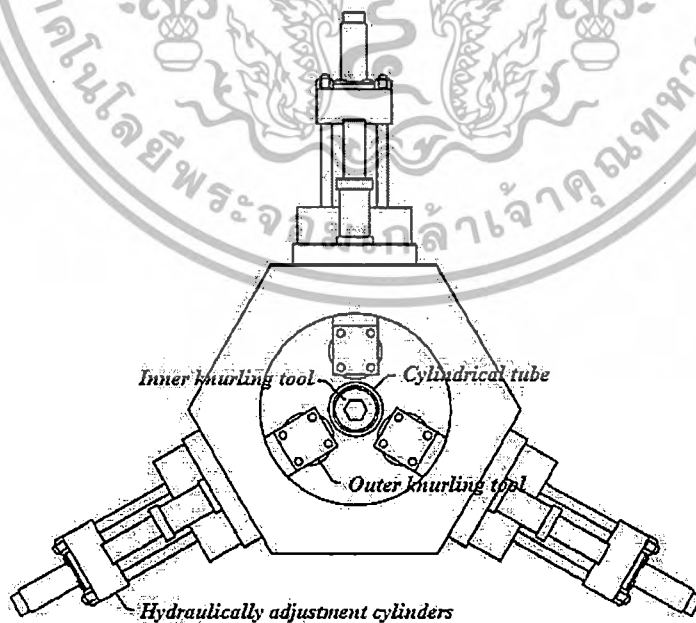
Hinago et al. [6] รูปที่ 2.6 ได้ศึกษาวิธีการผลิตท่อแบบไร้ตะเข็บซึ่งมีสันที่ผิวภายในท่อและแนะนำกระบวนการผลิตท่อไร้ตะเข็บซึ่งมีรูปทรงเป็นร่องสันอยู่ภายในด้วยวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงอีกทั้งยังมีต้นทุนต่ำอีกด้วย โดยทำการขึ้นรูปท่อที่มีผิวภายนอกของท่อเรียบและพื้นผิวภายในเป็นสันด้วยวิธีการกดอัดรีดลูกรีดและทำการกดอัดในสองตำแหน่ง โดยจะมีแมนเดรลที่มีร่องสันยื่นออกมาที่ผิวภายนอกและใช้ลูกรีดกดอัดลงบนผิวท่อด้านนอกในกระบวนการผลิตท่อไร้รอยตะเข็บที่มีร่องสันบนพื้นผิวด้านในท่อ ในขั้นตอนแรกท่อจะถูกลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในลงโดยการดึงผ่านตายและปลั๊กลอย ต่อจากนั้นผิวด้านนอกของท่อจะถูกกดอัดลงบนแมนเดรลที่สอดอยู่ด้านในของท่อซึ่งแมนเดรลดังกล่าวมีร่องสันที่ผิวด้านนอก โดยการรีดด้วยลูกรีดคู่เป็นผลให้เกิดการขึ้นรูปร่องสันที่ผิวด้านในของท่อ กระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดรูปทรงตามภาคตัดขวางของท่อในทิศทางการรีดตามแนวการกดอัดของลูกรีด ดังนั้นผิวด้านนอกของท่อถูกกดแนบกับร่องสันของปลั๊กโดยวิธีการกดอัดของลูกรีดคู่ถัดไปอีกครั้งหนึ่ง ขณะที่แกนของมันหมุนตั้งฉากกับการหมุนในแนวแกนเดิมก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตามร่องสันจะถูกขึ้นรูปที่พื้นผิวด้านในของท่อด้วยวิธีนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขั้นตอนสุดท้ายการกำหนดขนาดของท่อจะใช้ตายเป็นตัวกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปผ่านตายแบบท่อกว้างโดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างอุปกรณ์สำหรับผลิตท่อไร้ตะเข็บที่มีร่องสันที่ผิวภายในของ Hinago et al. [6]

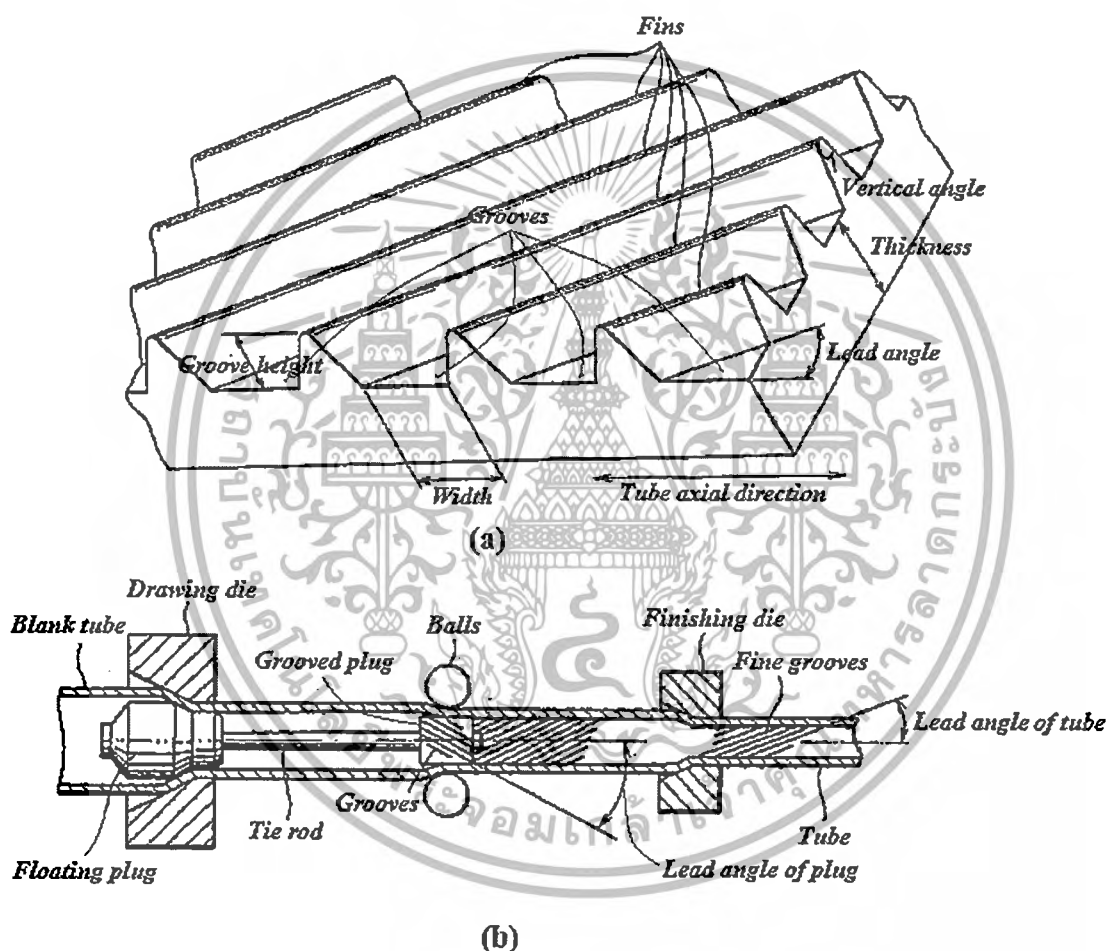
Zifferer et al. [7] ได้ศึกษาเครื่องจักรและวิธีการสำหรับการขึ้นรูปท่อที่มีลายเป็นสันทั้งภายนอกและภายใน ดังรูปที่ 2.7 เครื่องจักรที่สามารถทำการผลิตท่อที่มีลายเป็นสันที่ผิวทั้งภายนอกและภายในได้ในขั้นตอนเดียวกัน เครื่องมือที่เป็นสันและร่องที่ผิวทั้งด้านนอกและด้านในเป็นเกลียวลักษณะคล้ายลูกไม้ ถูกประดิษฐ์ขึ้นมาความลึกของสันที่ผิวด้านนอกและด้านในน้อยกว่า 0.035 นิ้ว มุมฮิลล์ตามแนวแกนน้อยกว่า 45 องศา มุมฮิลล์ของสันเกลียวใช้เป็นส่วนระบายความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน มุมฮิลล์ของสันเกลียวอาจจะวนทางด้านซ้ายหรือขวาก็ได้ เมื่อต้องการขึ้นรูปท่อเริ่มต้นจากนำท่อผิวเรียบสอดเข้าไปในแกนกลางของอุปกรณ์รีด จากนั้นชุดกัดอัดบริเวณด้านข้างซึ่งเป็นลูกรีดจะรีดไปบนผิวด้านนอกของท่อพร้อมกันนี้ผิวด้านในก็ถูกรีดอัดจากแกนรีดภายในท่อด้วย ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นท่อที่มีสันเกลียวทั้งด้านนอกและด้านในพร้อมกันตลอดแนวของการรีด การรีดลักษณะนี้เหมาะกับการรีดท่อที่มีขนาดใหญ่



รูปที่ 2.7 อุปกรณ์รีดท่อโดยลูกรีดภายในและภายนอกของ Zifferer et al. [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Yamamoto et al. [8] ได้ศึกษาวิธีการของการผลิตท่อที่มีสันภายใน ดังรูปที่ 2.8 กระบวนการผลิตท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่ภายในตามวิธีการผลิตในปัจจุบันรวมถึงขั้นตอนการนำปลั๊กที่มีร่องสันเกลียวสอดเข้าไปภายในท่อกลวงผิวเรียบธรรมดาพร้อมกับทำการหมุนกดอัดลงบนผิวภายนอกของท่อเปล่าเพื่อให้เกิดร่องสันเกลียวโดยมีลูกบอลทรงกลมอย่างน้อยหนึ่งคู่หมุนรอบตามแนวเส้นรอบวงของท่อกลวงผิวเรียบและมีปลั๊กที่มีร่องสันสอดอยู่ภายในตามแนวแกนของท่อ ขณะเดียวกันท่อจะถูกดึงจากท่อกลวงผิวเรียบไปในทิศทางเดียวกันจนกระทั่งถูกกดด้วยลูกบอลทรงกลม จำนวนของลูกบอลถูกจำกัดไว้ที่ 2-3 ลูกเท่านั้น มุมฮีลิกซ์ของสันเกลียวภายในท่อจากแนวแกนอยู่ระหว่าง 26-45 องศา

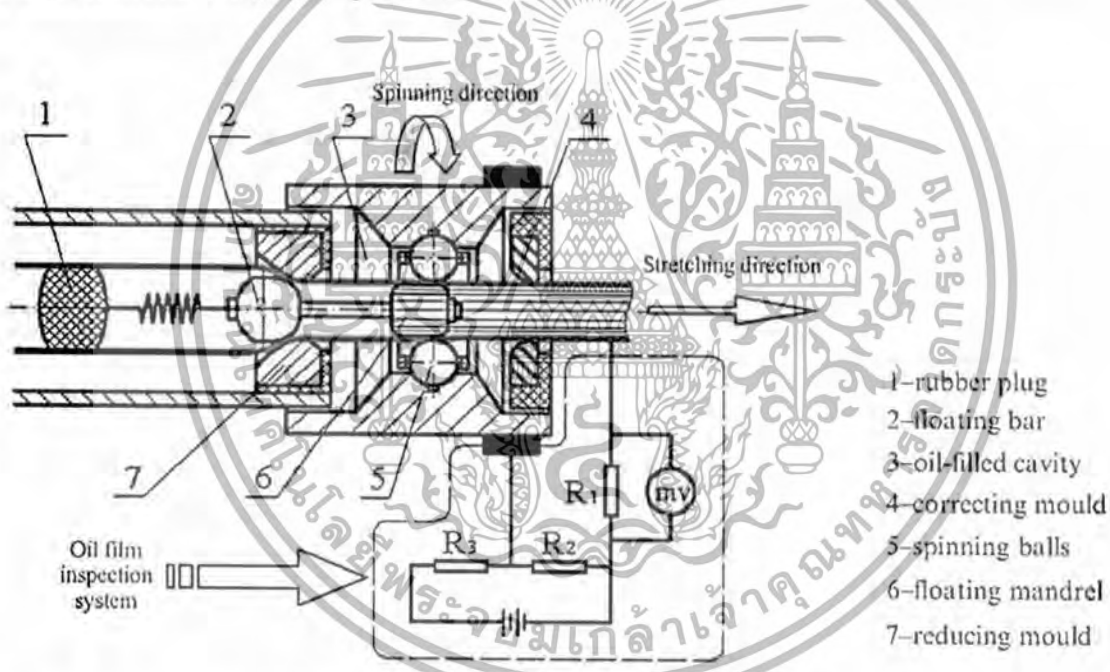


รูปที่ 2.8 กระบวนการผลิตท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่ภายใน (a) แสดงรูปร่างของสัน (b) แสดงภาคตัดของส่วนประกอบต่างๆของกระบวนการผลิตท่อที่มีสันภายในของ Yamamoto et al. [8]

Tang et al. [9] ได้ศึกษาและทำการทดลองกระบวนการหมุนปั่นขึ้นรูปที่ความเร็วสูงโดยมีน้ำมันหล่อลื่นอยู่ภายในท่อที่มีสันขนาดเล็กจู่ภายในท่อ กระบวนการหมุนปั่นขึ้นรูป (Spinning process) โดยเติมสารหล่อลื่นภายในช่องว่างระหว่างลูกบอลทรงกลมสัมผัสกับผิวภายนอกท่อในกระบวนการผลิตท่อที่มีสันอยู่ภายใน แรงดันฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมีความดันสูงถูกฉีดยื่นผิวภายนอกของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อนั้นสามารถเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนปั่นขึ้นรูปได้มากขึ้น แมนเดรลแบบปลั๊กลอย (Floating mandrel) ถูกค้นคิดขึ้นขึ้นด้านในของท่อก่อนการขึ้นรูปสันขนาดเล็กหรือครีบอย่างต่อเนื่อง ในการทดลองดังกล่าวสามารถวิเคราะห์อิทธิพลของแต่ละพารามิเตอร์ในกระบวนการที่มีคุณภาพและเหมาะสมได้ ผลลัพธ์ของการทดลองแสดงความดันแบบไดนามิกอย่างมีนัยสำคัญที่สามารถปรับปรุงผิวสำเร็จของท่อที่ผ่านกระบวนการปั่นขึ้นรูปให้มีเสถียรภาพและคุณภาพได้ ความหนาต่ำสุดของฟิล์มน้ำมันนั้นถูกกำหนดโดยความเร็วในการหมุนปั่นและความหนืดของน้ำมันโดยตรง ในกรณีที่มีน้ำมันหล่อลื่นแบบไดนามิกเต็มที่จะไม่เกิดรอยขีดข่วนที่เห็นได้ชัดบนพื้นผิวท่อ ปัจจัยหลักที่มีผลต่อความลึกของร่องและพื้นผิวที่ขรุขระนั้นเป็นอัตราส่วนระหว่างความหนาของผนังท่อของวัสดุท่อ อัตราส่วนของการดึงแบบหมุนปั่นขึ้นรูป ความเร็วในการหมุนปั่นขึ้นรูป และสภาวะในการหล่อลื่น ฯลฯ แรงดึงขึ้นรูปตามแนวแกนส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานระหว่างแมนเดรลแบบปลั๊กลอยและผนังภายในท่อ แรงเสียดทานระหว่างช่องของการลดรูปของตายกับพื้นผิวท่อด้านนอกประกอบกับความต้านทานการเสียดรูปอย่างถาวรในพื้นที่การลดรูปของตายและพื้นที่ของการหมุนปั่นขึ้นรูปได้เป็นอย่างดี



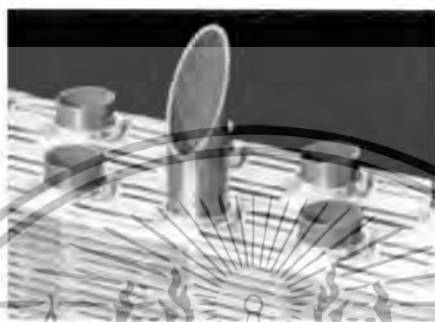
รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงอุปกรณ์การหมุนปั่นขึ้นรูปชนิดใช้น้ำมันบรรจุภายในและระบบการตรวจสอบฟิล์มน้ำมันของ Tang et al. [9]



รูปที่ 2.10 สันครีบบขนาดเล็กภายในท่อทองแดงของ Tang et al. [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Houfuku [10] ได้ศึกษาแนวทางการพัฒนาท่อที่มีสันภายในของอุตสาหกรรมในประเทศญี่ปุ่น ดังรูปที่ 2.11 แนวทางการใช้ท่อทองแดงที่มีสันอยู่ภายในและถูกใช้อย่างกว้างขวางประกอบด้วยท่อชนิดที่มีครีภายใน หลักการทำงานเช่นเดียวกับกับท่อผิวเรียบที่ใช้ถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์การทำความเย็นและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั่วไป ท่อที่มีครีอยู่ภายในถูกใช้งานและทำการผลิตเป็นอุตสาหกรรมต่อเนื่องออกสู่ท้องตลาดตั้งแต่ช่วงปลายปี ค.ศ 1970 เป็นต้นมา



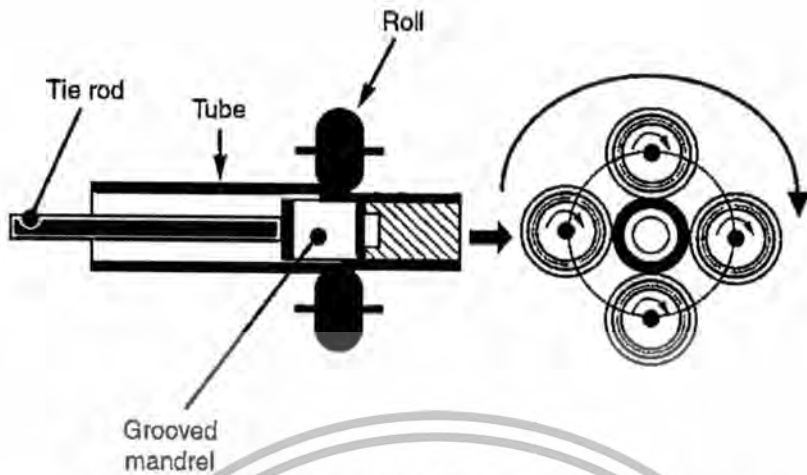
รูปที่ 2.11 ท่อที่มีครีภายในที่ใช้ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของ Houfuku [10]

ท่อที่อธิบายไว้ข้างต้นได้ถูกนำมาใช้ในประเทศญี่ปุ่นเริ่มต้นตั้งแต่ปี ค.ศ 1970 เนื่องจากเป็นที่รับรู้กันทั่วไปเกี่ยวกับด้านความคงทนและการประหยัดพลังงาน ตลอดจนประสิทธิภาพในการทำงานสูงที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศ เมื่อเรื้อรังนี้ความกังวลในปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้นกว่าสองเท่าจากที่เคยเป็นมา จึงเป็นประเด็นสำคัญที่จะต้องทำการพัฒนาและปรับปรุงท่อที่มีครีอยู่ภายในเหล่านี้ต่อไป

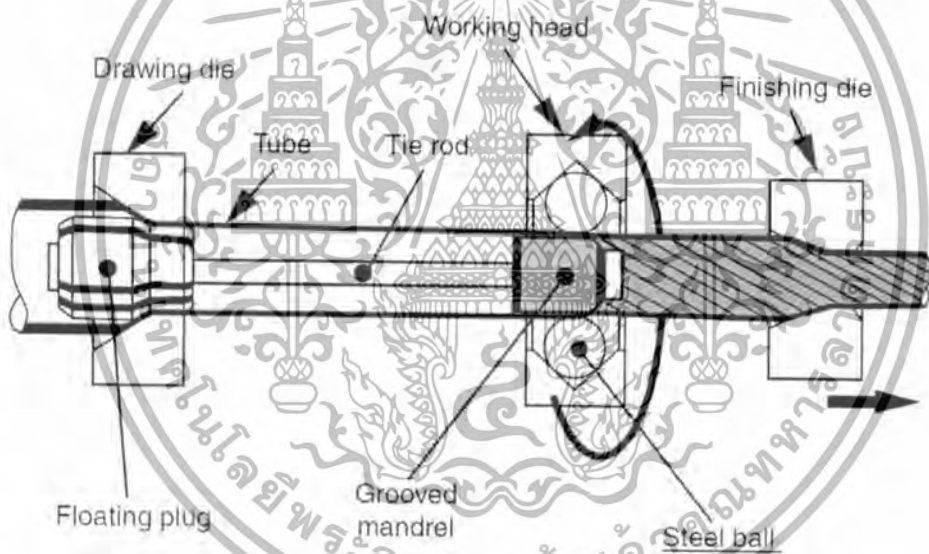
วิธีการเริ่มต้นของอุตสาหกรรมการผลิตท่อที่มีครีอยู่ภายในเริ่มต้นมาจากการสร้างแมนเดรลที่มีสันที่ผิวภายนอกนำมาจับยึดกับก้านยึดที่ปลายและหมุนโดยอิสระสอดเข้าไปในท่อ ขนาดของท่อจะถูกลดลงด้วยลูกรีดที่กดอัดอยู่รอบๆท่อในขณะที่ท่อจะถูกดึงเคลื่อนที่ไปข้างหน้าตามแนวแกนของท่อในเวลาเดียวกันและเกิดการขึ้นรูปเป็นสันอยู่ภายในของท่อดังแสดงในรูปที่ 2.12

หลังจากนั้นต่อมาได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตที่สามารถเอาชนะข้อจำกัดที่เกิดขึ้นจากวิธีการที่ 1 โดยการนำเอาแมนเดรลที่มีสันที่ผิวภายนอกและปลั๊กลอยยึดติดกันอยู่กับก้านยึด โดยที่ปลั๊กลอยจะถูกยึดอยู่ที่ทางเข้าของตาย วิธีการดังกล่าวสามารถทำการผลิตท่อที่มีขนาดยาวได้เป็นอย่างดีตลอดจนปรับปรุงการใช้ลูกรีดเปลี่ยนเป็นการกดรีดด้วยลูกบอลทรงกลมแทน จากการพัฒนากระบวนการทำให้สามารถใช้ความเร็วรอบที่สูงขึ้นขณะที่น้ำหนักกดลงบนผิวท่อลดลงทำให้สามารถเพิ่มน้ำหนักกดที่ลูกบอลทรงกลมได้มากขึ้นและยังสามารถลดแรงเสียดทานระหว่างลูกบอลเหล็กกล้าทรงกลมเมื่อเปรียบเทียบกับลูกรีดแต่เดิมดังแสดงในรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 วิธีการผลิตท่อที่มีเส้นขนาดเป็นเกลียววิธีการที่ 1 ของ Houfuku [10]



รูปที่ 2.13 วิธีการผลิตท่อที่มีเส้นขนาดเป็นเกลียววิธีการที่ 2 ของ Houfuku [10]

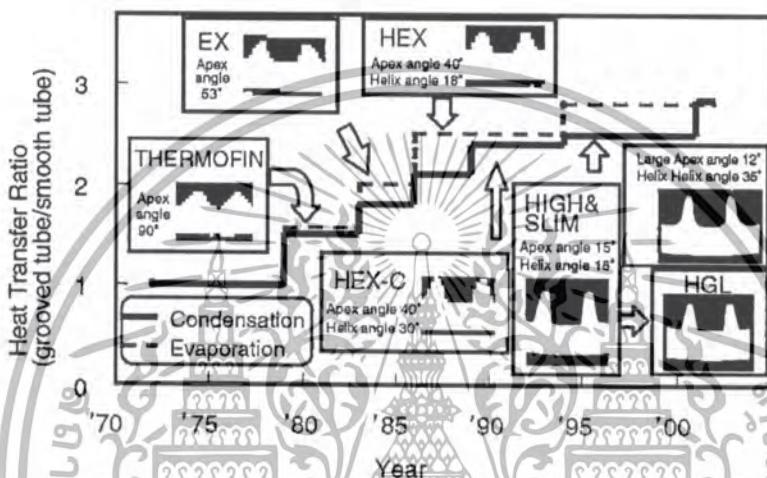
การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของท่อที่มีเส้นอยู่ภายใน คุณสมบัติจำเพาะของการถ่ายเทความร้อนนั้นดูได้จากอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวภายในของท่อแบบผิวเรียบสมมติว่ามีค่าเท่ากับ 1 ที่แสดงในรูปที่ 2.14 เป็นตัวอย่างของท่อที่มีเส้นอยู่ภายในจากหลายๆผู้ผลิตโดยเส้นทึบและเส้นประแสดงอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่นและเครื่องทำความเย็นตามลำดับ

ในระหว่าง ค.ศ 1980 เป็นต้นมา อุตสาหกรรมการผลิตท่อเริ่มแรกสันครีบมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมขนาดใหญ่ที่ยอดสันตรงมีมุม 90 องศา ภายหลังพัฒนามุมยอดของสันตรงลดลงเป็น 53 องศา หลังจากนั้นลดมุมยอดสันเป็น 40 องศา มุมฮิลิกส์ 18 องศาและมุมยอดสันเป็น 40 องศา มุมฮิลิกส์ 30 องศา เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

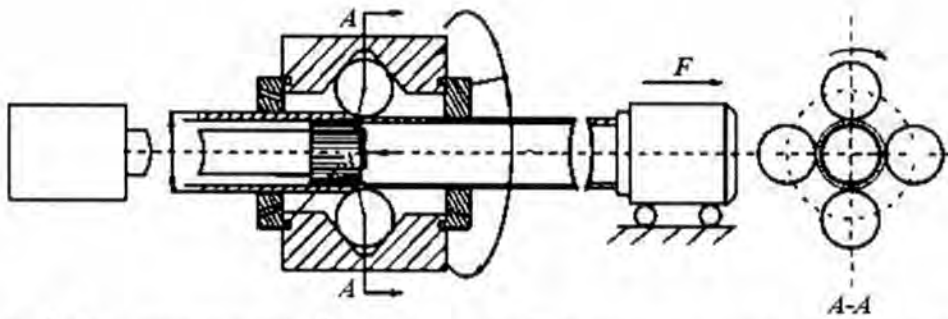
ในช่วงปี ค.ศ 1990 ได้พัฒนาสันภายในท่อให้มีความบางลงและความสูงของสันเพิ่มขึ้นเพื่อเป็นทางเลือกสำหรับเครื่องทำความเย็นในขณะนั้น เพื่อให้รูปแบบการทำงานมีความหลากหลายมากขึ้นภาคตัดของสันที่มีโครงสร้างที่บางลงเป็นช่วงที่สองของการพัฒนา

ต่อมาตั้งแต่ปี ค.ศ 2000 จะเห็นการพัฒนาและอุตสาหกรรมการผลิตที่ลดน้ำหนักของรูปทรงของสันได้อย่างเหมาะสมที่สุด เพื่อเป็นการปรับปรุงมุมอิลิกส์ของสันเกลียวให้โตขึ้นแสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนในแต่ละช่วงปีดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของท่อที่มีสันภายในของ Houfuku [10]

Yong et al. [11] ได้ศึกษาวิธีการขึ้นรูปท่อทองแดงสำหรับการถ่ายเทความร้อนที่มีสันขนาดเล็กจิวอยู่ภายในตามแนวแกนของท่อ กระบวนการดึงขึ้นรูปท่อที่มีสันภายในด้วยวิธีการปั้นหมุนลูกบอลทรงกลมในการรีดอัดด้วยความเร็วรอบสูงภายในช่องบรรจุด้วยน้ำมันหล่อลื่นเป็นการผลิตท่อถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการลากขึ้นรูปไปข้างหน้าทำให้เกิดสันตรงตามแนวแกนสามารถช่วยในการถ่ายเทความร้อนให้มีประสิทธิภาพและสมรรถนะที่สูงขึ้น กลไกในการขึ้นรูปของสันท่อขนาดเล็กภายในท่อถูกวิเคราะห์ปรับปรุงขึ้นมาใหม่ ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการกำหนดค่าของร่องสันขนาดเล็กนั้นถูกพิจารณากำหนดค่าความลึกที่แตกต่างกันระหว่าง 0.4 และ 0.5 มิลลิเมตร ที่ใช้ในการปั้นหมุนขึ้นรูป ความเร็วที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปอยู่ในช่วงระหว่าง 200 ถึง 450 มิลลิเมตรต่อนาที ความเร็วรอบมากกว่า 6000 รอบต่อนาทีและอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส การขึ้นรูปได้ท่อสันตรงที่มีคุณภาพและมีประสิทธิภาพสูง กระบวนการปั้นขึ้นรูปใช้วิธีการฉีดน้ำมันเพื่อให้เกิดฟิล์มน้ำมันคงที่ตลอดเวลาที่ปั้นขึ้นรูปเป็นผลให้สามารถลดแรงในการดึงขึ้นรูปและช่วยปรับปรุงคุณภาพผิวของท่อทองแดงที่มีแนวสันตรงภายใน



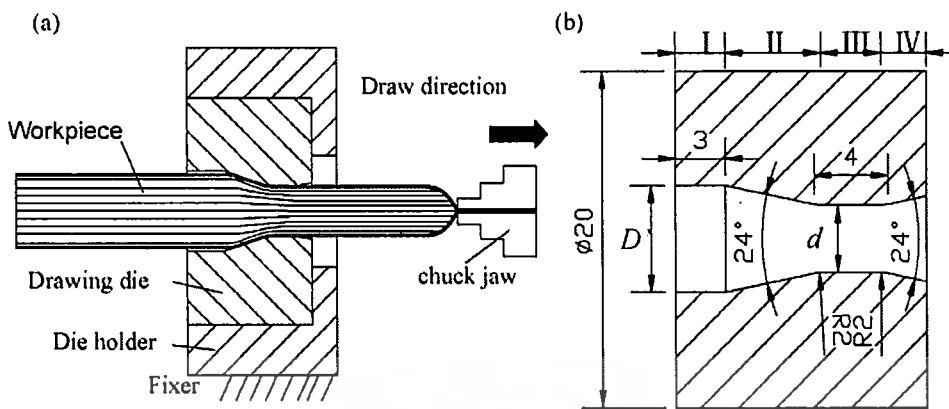
รูปที่ 2.15 กระบวนการปั่นขึ้นรูปท่อที่มีสันตรงที่ใช้ในการทดลองของ Yong et al. [11]

Tang et al. [12] ได้ศึกษาผลการทดลองและการจำลองสถานการณ์ของท่อที่มีสันขนาดเล็กของท่อทองแดงด้วยวิธีการดัดขึ้นรูปแบบท่อกลวง ดังรูปที่ 2.16 และ 2.17 โดยช่องว่างขนาดเล็กภายในท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกน้อยกว่า 6 มิลลิเมตร มีความต้องการเป็นอย่างมากสำหรับการผลิตท่อความร้อน ในกระบวนการดัดกล่าวประกอบด้วยการดัดขึ้นรูปในหลายๆขั้นตอนของการดัดขึ้นรูปแบบท่อกลวง (ไม่มีแมนเดรลภายใน) ในขั้นต้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6 มิลลิเมตร การจำลองสถานการณ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM simulation) วิธีการดัดกล่าวใช้ในการวิเคราะห์ความเค้น ความเครียดและการกระจายความเสียหายจากการกระชกขึ้นรูปโดยทำการเปรียบเทียบกับท่อทองแดงผิวเรียบที่ใช้ในการศึกษาการจำลองสถานการณ์ นอกจากนี้นำผลจากการทดลองมาใช้ในการตรวจสอบการเสียรูปอย่างถาวรของร่องและพื้นของท่อที่มีสันภายใน ผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงความเค้นและความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นที่บริเวณพื้นที่ของพื้นในขณะที่การเสียหายสูงสุดจะเกิดที่บริเวณด้านบนของพื้น อัตราส่วนความกว้างของร่องต่อความกว้างของพื้น นั้นลดลงตามจำนวนเที่ยวของการดัดขึ้นรูปท่อแบบหลายขั้นตอน รอยพับและรอยแตกที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าเป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในขณะที่ดัดขึ้นรูปและได้รับการกล่าวถึงในเวลาต่อมา



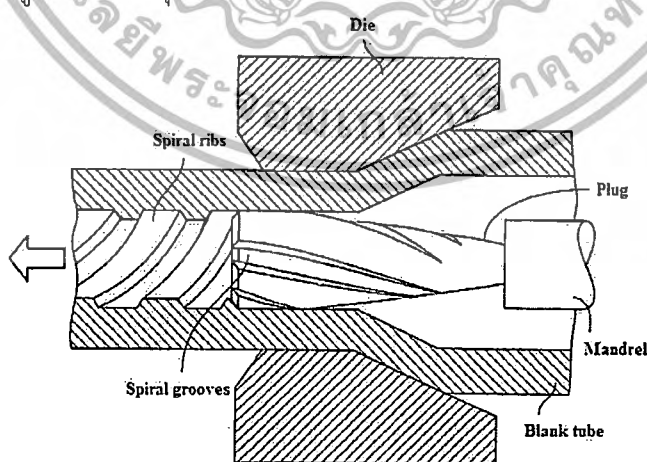
รูปที่ 2.16 แผนภาพแสดงลักษณะของท่อที่มีสันภายในโดยที่  $h$  เป็นความสูงของพื้น (ความลึกของร่องสัน)  $D$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อทองแดง  $\alpha$  เป็นมุมของร่องสัน  $l_1$  เป็นความกว้างเฉลี่ยของร่องสัน  $l_2$  เป็นความกว้างเฉลี่ยของพื้นและ  $t$  เป็นความหนาของผนังท่อของ Tang et al. [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แผนภาพกระบวนการดึงขึ้นรูปและตาย (a) เครื่องดึงขึ้นรูป (b) ตายดึงขึ้นรูปของ Tang et al. [12]

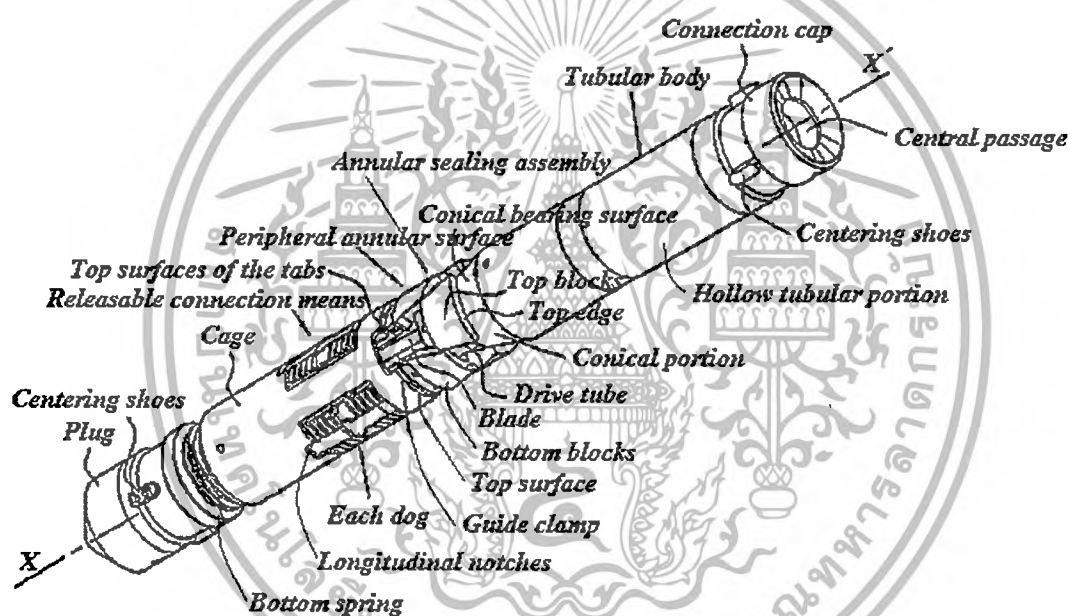
Beppu et al. [13] ได้ศึกษาวิธีการผลิตท่อเหล็กที่มีสันภายในและปลั๊กสำหรับการดึงขึ้นรูปวิธีการผลิตเกลียวสันท่อที่มีเสถียรภาพสูงและมีความสามารถในการขึ้นรูป ดังรูปที่ 2.18 โดยสามารถลดปัญหาในกระบวนการผลิตได้ทุกขั้นตอนในขณะที่ทำการขึ้นรูปเย็นท่อเหล็กกล้าที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่ภายในกระบวนการผลิตโดยวิธีการสอดปลั๊กซึ่งมีลายสันเกลียวที่ผิวด้านนอกซึ่งเป็นอุปกรณ์ต่อพ่วงอยู่ภายในของท่อในการดึงขึ้นรูปเย็น การดึงขึ้นรูปเริ่มต้นจากทำการอุ่นปลั๊กให้อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 50 ถึง 200 องศาเซลเซียส การขึ้นรูปสันเกลียวที่ผิวภายในของท่อกลางธรรมดา ในการขึ้นรูปใช้สารเคมีจุ่มเคลือบผิวภายในท่อโดยวิธีการชุบสังกะสีเพื่อขจัดการออกซิไดซ์และสนิมบนพื้นผิวภายในท่อ จากนั้นเคลือบสารหล่อลื่นทับท่อที่ชุบสังกะสีอีกทีหนึ่ง ดังนั้นท่อเหล็กกล้าที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในสามารถเพิ่มกำลังการผลิต อุณหภูมิและความดันของหม้อไอน้ำที่สูงขึ้นได้อย่างเหมาะสม เป็นเพราะว่าท่อเหล็กกล้ามีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดีและมีคุณภาพดีสำหรับใช้ในหม้อไอน้ำ



รูปที่ 2.18 การดึงขึ้นรูปเย็นของท่อเหล็กกล้าที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในโดยวิธีการสอดปลั๊กซึ่งมีลายสันเกลียวที่ผิวด้านนอกของ Beppu et al. [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Millet et al. [14] ได้ศึกษาและแนะนำแมนเดรลสำหรับการผลิตท่อไหลเวียนของไหลและอุปกรณ์การผลิตที่เกี่ยวข้องอาทิเช่น แมนเดรลที่ประกอบด้วยแกนตามแนวยาวร่วมกับชุดประกอบอุปกรณ์ต่อพ่วงที่ขยายออกตามแนวรัศมี ดังรูปที่ 2.19 ชุดประกอบตามแนวรัศมีดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงอุปกรณ์ต่อพ่วงที่ฝังตัวอยู่ในช่องเจาะและฝังลงเข้ากับลำตัวของแกนอุปกรณ์อีกทีหนึ่ง รอบๆแกนตามแนวยาวของชุดประกอบอุปกรณ์ต่อพ่วงจะขยายออกตามแนวรัศมีตลอดทั้งแนวแกน ในแต่ละชุดอุปกรณ์ต่อพ่วงจะทำงานสัมพันธ์กันประกอบด้วยผิวของแบร็งด์้านที่ 1 และด้านที่ 2 หรือทั้งสองด้านทำงานพร้อมกันตลอดเวลาในขณะที่ทำการขึ้นรูป โดยจะขยายตัวออกไปทางผิวด้านข้างของชุดประกอบอุปกรณ์ต่อพ่วงอย่างน้อยหนึ่งชุดที่อยู่ติดกัน ชุดอุปกรณ์ต่อพ่วงจะเคลื่อนที่อย่างสัมพันธ์กันกับชุดอุปกรณ์ชุดอื่นๆในระหว่างการกำหนดค่าการหดตัว-ขยายตัวตามแนวรัศมีและการกำหนดค่าร่วมกันของผิวแต่ละด้านของชุดประกอบอุปกรณ์ต่อพ่วงที่สัมผัสกับผิวด้านข้างของชุดประกอบอุปกรณ์ต่อพ่วงที่อยู่ติดกัน



รูปที่ 2.19 แมนเดรลที่ใช้ในการขึ้นรูปชุดประกอบอุปกรณ์ต่อพ่วงของ Millet et al. [14]

Shinohara et al. [15] ได้ศึกษาถ่ายเทความร้อนที่มีสันที่ผิวภายในท่อ การถ่ายเทความร้อนของท่อที่มีสันภายในผนังท่อปรับปรุงการไหลของของไหลในการเปลี่ยนแปลงสถานะการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อ ท่อที่มีสันภายในผนังท่อทำให้สามารถลดน้ำหนักเมื่อเปรียบเทียบกับหน่วยความยาวเป็นการปรับปรุงความสามารถในการทำงานและคุณลักษณะจำเพาะของท่อโดยมีขอบเขตที่มีนัยสำคัญอยู่ที่พื้นที่หน้าตัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของร่องและรูปทรงของสันนั้นถูกกำหนดโดยร่องระหว่างสันภายในของท่อ

ในขณะที่การปรับปรุงท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในได้พัฒนาขึ้นโดยการเพิ่มความลึกของสันท่อ รูปร่างและมุมอีลิกส์ของสัน เหตุผลสูงสุดก็เพื่อปรับปรุงอัตราส่วนคุณลักษณะจำเพาะในการถ่ายเทความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนต่อต้นทุนในการผลิตให้เหมาะสมที่สุด เป็นเพราะว่าท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในที่มีความละเอียด ในรูปทรงของโครงสร้างนั้นทำการผลิตได้ยากกว่าและจะทำให้มีคุณภาพที่คงที่ในกระบวนการรีดขึ้นรูปก็ทำได้ยากเช่นกัน อย่างไรก็ตามกระบวนการรีดขึ้นรูปท่อก็มีข้อจำกัดในเรื่องของความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เหมาะสมตลอดจนข้อจำกัดในเรื่องของค่าใช้จ่ายในการผลิตให้คงที่ด้วยเช่นกัน ในขณะที่ท่อชนิดไม่มีร่องสันภายในท่อสามารถทำการผลิตได้ด้วยความเร็วรอบที่สูงมากนั่นเอง ดังนั้นถ้าพิจารณาถึงอัตราส่วนคุณลักษณะจำเพาะในการถ่ายเทความร้อนต่อต้นทุนในการผลิตก็เป็นเรื่องยากที่จะทำการเปลี่ยนแปลงการใช้งานในเรื่องคุณสมบัติของข้อดีกับต้นทุนการผลิตของท่อชนิดที่ไม่มีร่องสันและที่มีร่องสันภายในท่อนั่นเอง ท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวแสดงในรูปที่ 2.20 และพารามิเตอร์ของร่องสันบนพื้นผิวภายในแสดงดังรูปที่ 2.21

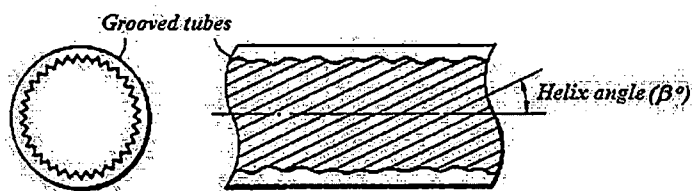
ท่อที่มีร่องสันแบบดั้งเดิมจะมีคุณลักษณะจำเพาะในการถ่ายเทความร้อนต่อต้นทุนต่ำเนื่องมาจากเหตุผลอยู่สองประการได้แก่

(1) เป็นที่ทราบกันดีว่าคุณลักษณะจำเพาะและประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับความลึกของร่องสันท่อ ข้อจำกัดของท่อที่มีสันอยู่ภายในท่อได้แก่ความดันตกคร่อมนั้นเพิ่มขึ้นสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับท่อที่มีสันแบบดั้งเดิม พบว่าอัตราส่วนความดันตกคร่อมระหว่างที่ของไหลไหลผ่านร่องสันที่อัตราส่วนความลึกของร่องสันต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเกิดขึ้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.02 ถึง 0.03 เมื่อเปรียบเทียบกับท่อมีสันแบบดั้งเดิมก็ยังคงมีความดันตกคร่อมอยู่ประมาณ 0.018 ความลึกของสันท่อแบบดั้งเดิมไม่ขยายเพิ่มขึ้นสูงเกินกว่าความเหมาะสมของข้อจำกัดที่ได้อ้างถึง โดยเหตุผลหลักในการไม่เพิ่มความสูงของสันท่อก็เนื่องมาจากค่าใช้จ่ายในการผลิตที่สูงขึ้นนั่นเอง

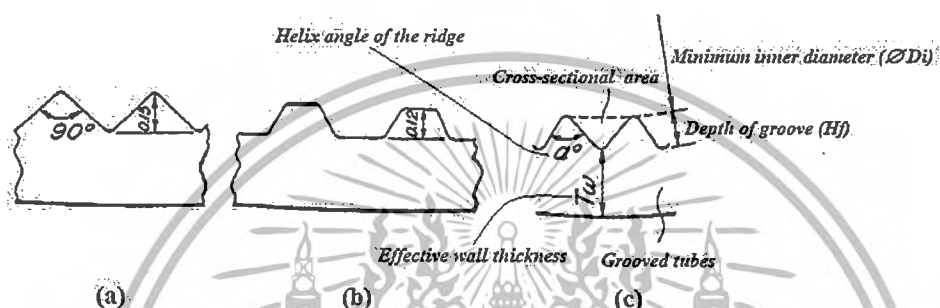
(2) ผลกระทบที่เป็นตัวแปรสำคัญในเรื่องคุณลักษณะจำเพาะของท่อนั้นได้แก่มุมแหลมแบบสามเหลี่ยมของร่องและสันที่ผิวด้านในนั้นทำให้มีข้อจำกัดในเรื่องของความลึกของสันท่อ ท่อที่มีสันแบบดั้งเดิมแสดงในรูปที่ 2.21(a) คุณลักษณะจำเพาะที่ขาดหายไปเมื่อพิจารณาจากภาพพื้นที่ภาคตัดของส่วนที่เป็นระยะห่างระหว่างสันท่อนั้นน้อยมากและมุมของปลายยอดสันนั้นโตมากนั่นเอง อย่างไรก็ตามภาพพื้นที่ภาคตัดของท่อในรูปที่ 2.21(b) นั้นโตกว่ารูปที่ 2.21(a) โดยค่าของคุณลักษณะจำเพาะจะเป็นไปตามรูปทรงของสี่เหลี่ยมคางหมูแทน

รูปที่ 2.22(a) แสดงให้เห็นรูปทรงของท่อทองแดงที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ขนาด 9.52 มิลลิเมตร และความหนาประสิทธิผลของผนังท่อขนาด 0.30 มิลลิเมตร โดยการขึ้นรูปร่องสันที่ผิวภายในของท่อทองแดงซึ่งมีสันรูปสามเหลี่ยมจำนวนทั้งสิ้น 60 ฟัน บนผิวด้านในท่อมีระยะช่องว่างกำหนดเป็นมุมสี่เหลี่ยมของสัน เท่ากับ 18 องศาตามแนวแกนของท่อ ผลจากการคำนวณข้อกำหนดต่างๆได้แสดงไว้ด้านล่างโดยทำการเปรียบเทียบกับท่อที่มีร่องสันแบบดั้งเดิม

ข้อมูลต่างๆที่แสดงจากนี้ไปเป็นผลจากการใช้น้ำยา R-22 ซึ่งใช้เป็นของไหลที่ไหลภายในท่อ ความดันไอมีค่า  $4 \text{ kg/cm}^2$  ตีกริชของความแห้งเฉลี่ย 0.6 ค่าพลังความร้อน  $10 \text{ kW/m}^2$  อัตราการไหลของสารทำความเย็น  $200 \text{ kg/m}^2\text{S}$  ความดันช่วงควบแน่น  $14.6 \text{ kg/cm}^2\text{S}$  อุณหภูมิไอร้อนยิ่งยวดภายใน 50 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิไอร้อนยิ่งยวดภายนอก 5 องศาเซลเซียส พื้นที่ผิวภายในท่อสามารถคำนวณอย่างง่ายได้ด้วยการใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดภายในท่อ



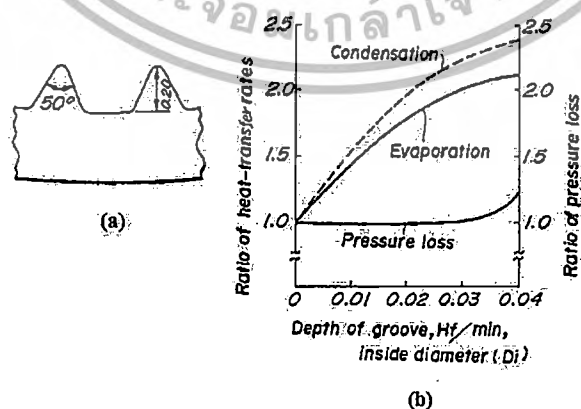
รูปที่ 2.20 แผนภาพแสดงภาคตัดตามแนวตั้งฉากและตามแนวยาวของท่อที่มีร่องสันบนพื้นผิวภายในท่อของ Shinohara et al. [15]



รูปที่ 2.21 แผนภาพ (a), (b) และ (c) แสดงพารามิเตอร์ของสัญลักษณ์ต่างๆ และภาพขยายมุมมองหน้าตัดของท่อที่มีร่องสันบนพื้นผิวภายในของ Shinohara et al. [15]

อันดับแรกผลกระทบของความลึกร่องสันบนพื้นผิวด้านในท่อถ่ายเทความร้อนโดยมีคุณสมบัติจำเพาะของท่อมีดังนี้

โดยทั่วไปใช้ท่อทองแดงที่มีร่องสันภายในมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 9.52 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8.52 มิลลิเมตร และมุมเอียงของสันเท่ากับ 18 องศา อัตราส่วนความลึกของร่องสันต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อนั้นแสดงเป็นกราฟตามแนวนอนและขนาดของอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนกับอัตราความดันตกคร่อมของของไหลในสันท่อแสดงเป็นกราฟตามแนวตั้งของรูปที่ 2.22(b)



รูปที่ 2.22 แผนภาพ (a) แสดงบางส่วนของพื้นที่หน้าตัด (b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของสัน อัตราการถ่ายเทความร้อนหรือความดันตกคร่อมในท่อของ Shinohara et al. [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

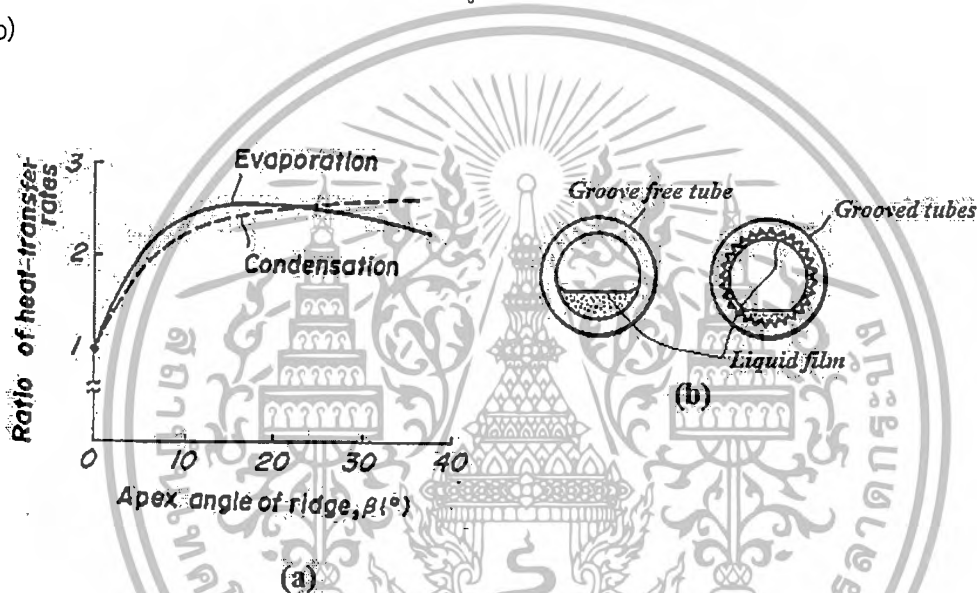
จากรูปที่ 2.22(b) อัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนตามร่องสันที่ค่าอัตราส่วนความลึกของร่องสันต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อในช่วง 0.02 ถึง 0.03 เพิ่มขึ้นทั้งในเครื่องควบแน่นและเครื่องทำความเย็น ในทำนองเดียวกันอัตราส่วนความดันตกคร่อมระหว่างที่ของไหลไหลผ่านร่องสันที่อัตราส่วนความลึกของร่องสันต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเกิดขึ้นมีค่า 0.03 ขึ้นไปจะมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นความดันตกคร่อมของท่อที่มีร่องสันภายในจะมีค่าความแตกต่างไม่มากนักช่วงประมาณอัตราส่วนของร่องสันต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่เกิน 0.03 เมื่อเปรียบเทียบกับท่อที่ไม่มีร่องสัน เพราะฉะนั้นในการเลือกช่วงที่มีประสิทธิภาพสูงเป็นไปได้ที่จะเลือกช่วงที่มีความดันตกคร่อมของท่อที่มีร่องสันที่มีความแตกต่างกันไม่มากนักกับท่อที่ไม่มีร่องสันดังกล่าว โดยควรที่จะเลือกที่อัตราส่วนของร่องสันต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.03 ข้างต้น

ต่อไปพิจารณาผลกระทบที่มุมฮีลิคส์ของสันของร่องสันบนผิวภายในตามแนวแกนของท่อ คุณลักษณะจำเพาะของท่อจะบรรยายไว้ในรูปที่ 2.23(a) ใช้ท่อทองแดงที่มีร่องสันภายในมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในนอก 9.52 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8.52 มิลลิเมตร ความลึกร่องสัน 0.22 มิลลิเมตร และมุมฮีลิคส์ของสันนั้นแสดงเป็นกราฟตามแนวนอนและขนาดของอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนของท่อที่มีร่องสันกับท่อที่ไม่มีร่องสันนั้นแสดงตามแนวตั้งของรูปที่ 2.23(a)

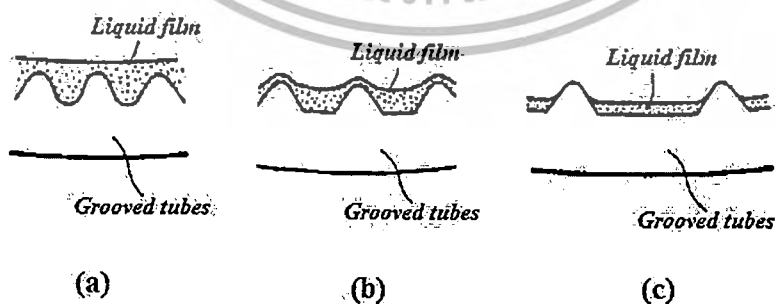
ขนาดของอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนลดลงต่ำสุดในช่วงใกล้ๆ 7 ถึง 20 องศา มุมฮีลิคส์ของสันขึ้นอยู่กับ การถ่ายเทความร้อนของของไหลในเครื่องทำความเย็น ขณะที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามมุมฮีลิคส์ของสันที่เพิ่มขึ้นและขึ้นอยู่กับ การถ่ายเทความร้อนของของไหลในเครื่องควบแน่นด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของมุมฮีลิคส์ของร่องสัน นั้นมีผลเสียได้แก่ความยุ่งยากในการผลิตท่อที่มีร่องสันภายในท่อจะมีความยุ่งยากเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ค่ามุมฮีลิคส์ของสันที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับ การเลือกค่ามุมฮีลิคส์ของสันให้อยู่ในช่วง 7 องศา ถึง 30 องศา ผลที่ได้พิจารณา มาจากเครื่องทำความเย็นและเครื่องควบแน่นด้วยกันทั้งสองประเภท คุณลักษณะจำเพาะของการถ่ายเทความร้อนมีความแตกต่างกันไม่มากนักเมื่อพิจารณาเฉพาะในเรื่องของมุมฮีลิคส์ของร่องสันท่อ

ต่อไปพิจารณาผลกระทบของพื้นที่หน้าตัดของร่องสันซึ่งเป็นคุณลักษณะจำเพาะของการถ่ายเทความร้อนประกอบด้วย (1) ผลกระทบของการเคลื่อนที่ของของไหลที่เคลื่อนที่อย่างไม่สม่ำเสมอบนพื้นผิวภายในท่อ (2) ผลกระทบของการเพิ่มพื้นที่ของผิวภายในท่อและ (3) ผลกระทบของฟิล์มของของไหลในส่วนที่ไม่สม่ำเสมอภายในท่อซึ่งขึ้นอยู่กับผลกระทบของการเคลื่อนที่ของของไหลที่ไม่สม่ำเสมอด้วยเช่นกัน โดยปราศจากข้อสงสัยที่เกี่ยวข้องกับขนาดความลึกของร่องสันซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญและความกว้างของร่องสันนั้นควรจะมีส่วนสำคัญมากกว่าในการที่จะปรับปรุงคุณลักษณะจำเพาะที่เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน อย่างไรก็ตามมีความเกี่ยวข้องกับผลกระทบที่เกิดขึ้นของการเปลี่ยนแปลงฟิล์มของของไหล กล่าวคือของไหลที่ไหลในอุปกรณ์ทำความเย็นที่ความเร็วสูงกว่าความเร็วที่จุดหนึ่งของไหลที่ไหลเข้าไปภายในร่องสันเนื่องจากช่องทางไหลผ่านของของไหลผ่านไปตามช่องเล็กๆของสันและแรงเฉื่อยที่ผิวของของไหลเป็นมูลเหตุที่มีผลต่อความเร็ว มีแนวโน้มที่จะกล่าวได้ว่าเป็นการไหลเวียนของของไหลเปียกรอบวงแหวนทั้งหมดของขอบด้านในของท่อ

รูปที่ 2.24(a) มีพื้นที่หน้าตัดเล็ก ๆ ของส่วนที่เป็นร่อง फिल्मของไหลหนาเกินไปมีผลให้ความต้านทานความร้อนระหว่างของไหลกับผนังท่อเพิ่มขึ้นและจะทำให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้นอีกดังแสดงในรูปที่ 2.24(b) นั้นพื้นที่หน้าตัดของท่อที่มีร่องสันที่มีพื้นผิวผนังทั้งหมดจะถูกปกคลุมด้วยฟิล์มของเหลวบางที่สุดเท่าที่จะทำได้ ในกรณีนี้ถ้ารูปแบบของสันแยกออกจากร่องสันเหมือนกัน พื้นที่ผิวภายในของท่อนั้นจะเป็นส่วนผกผันกันกับพื้นที่หน้าตัดของร่องสันโดยตรง ดังนั้นพิจารณาคุณลักษณะจำเพาะในการถ่ายเทความร้อนได้จากพื้นที่ผิวภายในท่อ ในขณะที่รูป 2.24(c) พื้นที่หน้าตัดส่วนที่เป็นร่องสันนั้นใหญ่มาก ฟิล์มของของไหลนั้นบางมากดังนั้นฟิล์มที่ยืดของสันนี้ไม่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นสันในรูปที่ 2.24(c) จะดีกว่าสันในรูปที่ 2.24(b) และสันในรูป 2.24(a) ดังนั้นจึงควรพิจารณาว่าโดยภาพรวมแล้วพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่างกรณีของพื้นที่ 2.24(a) และกรณีของพื้นที่ 2.24(b)



รูปที่ 2.23 แผนภาพ (a) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมฮิลิกส์ของสันเกลียวกับอัตราการถ่ายเทความร้อน (b) แสดงแผนผังการไหลของของไหลภายในท่อที่มีร่องสันและไม่มีร่องสันภายในท่อของ Shinohara et al. [15]



รูปที่ 2.24 แผนภาพ (a), (b) และ(c) แสดงภาคตัดของท่อที่มีร่องสันแต่ละรูปแบบที่มีความสัมพันธ์กับขนาดของร่องสันและความหนาของฟิล์มของไหลที่ยึดติดภายในท่อของ Shinohara et al. [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

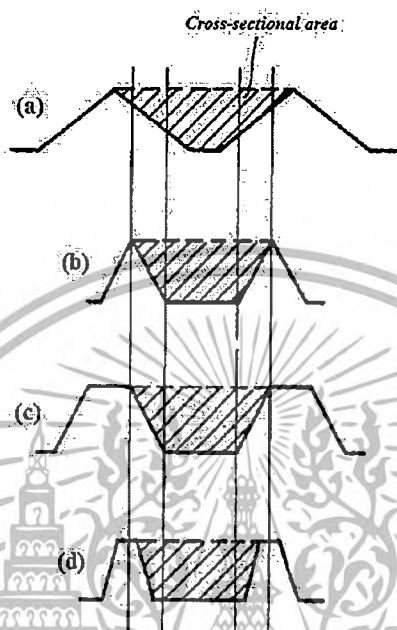
ในรูปที่ 2.25 แสดงตัวอย่างของภาคตัดสั้นที่ต่างกันตามรูปแบบที่เหมาะสมในแต่ละแบบ ภาคตัดแบบ 2.25(a) มีมุมยอดของสันที่ใหญ่กว่าภาคตัดแบบ 2.25(b) เป็นการผลิตแบบดั้งเดิมที่มีความสามารถในการผลิตท่อที่สูงกว่า อย่างไรก็ตามแต่เดิมภาคตัดแบบ 2.25(a) นั้นมีพื้นที่ภาคตัดที่ใหญ่กว่าภาคตัดแบบ 2.25(b) และมีผลให้ค่าน้ำหนักต่อความยาวท่อนั้นเพิ่มขึ้นและทำให้พื้นที่หน้าตัดรวมของพื้นผิวภายในท่อลดลงเป็นผลให้ลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นไม่ดี เช่นเดียวกับกับภาคตัดแบบ 2.25(c) ซึ่งมีรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูซึ่งมีค่าน้ำหนักต่อความยาวท่อนั้นเพิ่มขึ้นและทำให้พื้นที่หน้าตัดรวมของพื้นผิวภายในท่อลดลงเช่นกัน ในขณะที่ภาคตัดแบบ 2.25(d) ซึ่งมีมุมยอดของสันแคบและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นพื้นที่หน้าตัดรวมของพื้นผิวภายในโดยปราศจากการเพิ่มขึ้นของค่าน้ำหนักต่อความยาวท่อ อย่างไรก็ตามมุมยอดสันที่แคบมากเป็นผลให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตท่อดังกล่าวเพิ่มขึ้นในขณะที่ความสามารถในการผลิตด้อยลงไป

รูปที่ 2.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงหรือมุมยอดสันและขนาดของอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนของท่อที่มีร่องสันต่อท่อที่ไม่มีร่องสัน โดยการใช้ท่อทองแดงที่มีร่องสันบนพื้นผิวภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 9.52 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8.52 มิลลิเมตร ความลึกร่องสัน 0.22 มิลลิเมตร และมุมอีลิปส์ของสัน 18 องศา และจำนวนของร่องสัน 60 สัน มุมยอดสันที่แคบนั้นมีความสัมพันธ์เฉพาะของการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าทั้งในเครื่องทำความเย็นและเครื่องควบแน่นทั้งคู่ คุณสมบัติเฉพาะของสันท่อบางเหลี่ยมที่เล็กกว่าสันสี่เหลี่ยมคางหมู อย่างไรก็ตามมุมยอดสันที่แคบเป็นผลให้ความสามารถในการทำงานของท่อด้อยลงและยังเป็นสาเหตุให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตเพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังนั้นที่มีการใช้งานมากกว่านั้นมีมุมยอดสันอยู่ที่ 30 ถึง 60 องศา

รูปที่ 2.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของพื้นที่ภาคตัดของร่องสันต่อความลึกของร่องสัน และคุณสมบัติเฉพาะในการถ่ายเทความร้อน (อัตราส่วนของอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทองแดงที่มีร่องสันต่อท่อที่ไม่มีร่องสัน) หรือค่าน้ำหนักต่อความยาวท่อนที่มีร่องสัน โดยใช้ท่อทองแดงที่มีร่องสันภายในที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 9.52 มิลลิเมตร ความหนาประสิทธิภาพของผนังท่อขนาด 0.30 มิลลิเมตร ความลึกร่องสัน 0.20 มิลลิเมตร มุมอีลิปส์ของสัน 18 องศา และมุมยอดของสัน 50 องศา ตามลำดับ คุณสมบัติเฉพาะในการถ่ายเทความร้อนในเครื่องทำความเย็นเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนของพื้นที่ภาคตัดของร่องสันต่อความลึกของร่องสันแสดงให้เห็นถึงจุดสูงสุดที่มีค่าใกล้เคียง 0.3 และลดลงอย่างทันทีทันใดที่จุดดังกล่าว ในขณะที่ความสัมพันธ์คุณสมบัติเฉพาะในการถ่ายเทความร้อนในเครื่องควบแน่นพุ่งสูงขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนของพื้นที่ภาคตัดของร่องสันต่อความลึกลดลงและแสดงการพุ่งสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยที่มีค่าใกล้เคียง 0.2

ในภาพของแนวโน้มอาจสรุปได้ว่าค่าอัตราส่วนของพื้นที่ภาคตัดของร่องสันต่อความลึกที่มีค่าน้อยกว่านั้นมีค่าคุณสมบัติเฉพาะในการถ่ายเทความร้อนที่คงที่มากกว่า ในขณะที่เรื่องหนึ่งที่ต้องตระหนักคือค่าน้ำหนักต่อความยาวท่อในกรณีที่จำนวนของร่องสันเพิ่มขึ้นตามค่าความผกผันที่เพิ่มขึ้นของพื้นที่ภาคตัดของร่องสันต่อความลึก นั่นคือเมื่อปัจจัยอื่นๆเช่นจำนวนของสันเป็นตัวกำหนดในขณะที่ร่องสันนั้นคงที่ ค่าที่ลดลงของพื้นที่ภาคตัดของร่องสันต่อความลึกหมายถึงการเพิ่มขึ้นของจำนวนของสัน ดังนั้นค่าน้ำหนักต่อความยาวท่อเป็นผลให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตนั้นสูงขึ้น จึงพิจารณาปัจจัยเหล่านี้โดยรวม

อีกประการหนึ่งควรตรวจสอบสเปคที่เหมาะสมที่สุดสำหรับท่อที่มีร่องสัน ตัวอย่างของการประมาณค่าที่จะต้องพิจารณาโดยรวมในค่าใช้จ่ายซึ่งเป็นหนึ่งในวัตถุประสงค์ของการผลิตในปัจจุบันได้อธิบายไว้ด้านล่าง



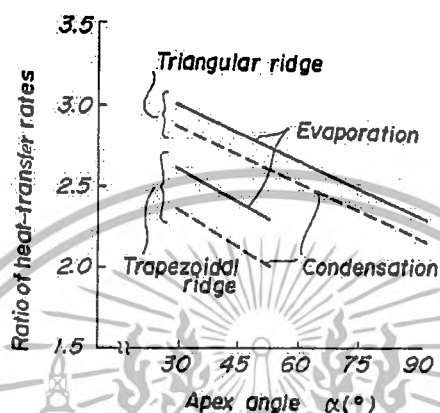
รูปที่ 2.25 แผนภาพ (a) ถึง (d) แสดงภาคตัดของท่อที่มีร่องสันที่เกี่ยวกับลักษณะของสันและร่องในแต่ละแบบของ Shinohara et al. [15]

สมมติว่าชนิดของครีบบดลดในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของแอร์คอนดิชันภายในบ้านซึ่งเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่ง ซึ่งสมมติว่าอัตราส่วนของความต้านทานความร้อนภายนอกของท่อรวมเป็นชนิดร่องครีบบดมุมมนี่จะสามารถต้านทานความร้อนภายในของท่อมีสันแบบดั้งเดิมที่ใช้คือ 75 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อท่อมีสันแบบดั้งเดิมได้แสดงในรูปที่ 2.21(a) ถูกแทนที่ด้วยท่อที่มีร่องสันที่มีการผลิตใช้ในปัจจุบัน ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 2.28

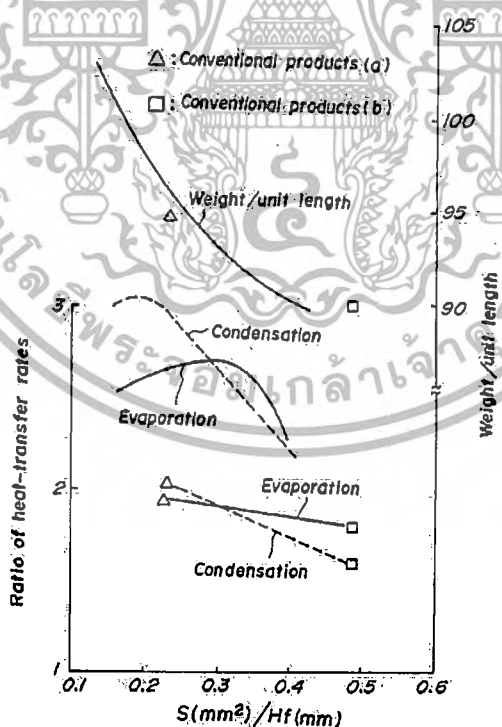
รูปที่ 2.28(b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการส่งถ่ายความร้อนซึ่งเปลี่ยนแปลงจากอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าของพื้นที่ภาคตัดของร่องสันต่อความลึก การดำเนินการเปรียบเทียบมีความคล้ายคลึงกันกับค่าน้ำหนักต่อความยาวท่อที่แสดงในรูปที่ 2.28(a) ในกรณีดังกล่าวท่อแบบดั้งเดิมนั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 9.52 มิลลิเมตร ความลึกร่องสัน 0.15 มิลลิเมตร มุมอีลิกส์ของสัน 25 องศา และมุมยอดของสัน 90 องศา และจำนวนของร่องสัน 65 สัน ตามลำดับ พิจารณาว่าความยาวเป็นแบบท่อสั้น ดังนั้นถ้าความยาวของท่อสั้นลงโดยอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นการเพิ่มขึ้นของค่าใช้จ่าย จำนวนของการลดลงของค่าน้ำหนักต่อความยาวท่อเป็นผลให้ค่าใช้จ่ายใกล้เคียงกับในอดีตก่อนหน้านี้ ดังนั้นสามารถที่จะกล่าวได้ว่าท่อถ่ายเทความร้อนซึ่งมีร่องสันที่ผิวภายในทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสของการไหลของของไหลภายในท่อและจำนวนของสันเกลียวที่มีมุมอีลิกส์ และมุมยอดสันที่ผิวภายในท่อ อัตราส่วนความลึกของร่องสันต่อเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเกิดขึ้นที่ผิวภายในของท่อมีร่องสันบนผิวภายในท่อ 0.02 ถึง 0.03 และมุมเอียงของร่องสัน 7 องศา ถึง 30 องศา ผลของการปรับปรุงรูปทรงสันแบบสี่เหลี่ยมคางหมูทำให้อัตราส่วนค่าของพื้นที่ภาคตัดของร่องสันต่อความลึกของพื้นที่หน้าตัดอยู่ในช่วง 0.15 ถึง 0.40 และมุมยอดสันอยู่ในช่วงระหว่าง 30 องศา ถึง 60 องศา ตามลำดับ

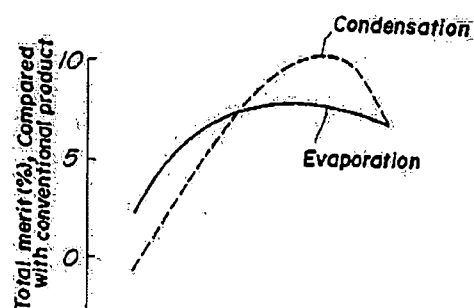


รูปที่ 2.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของสันกับอัตราส่วนของอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อที่มีสันท่อแบบต่างๆของ Shinohara et al. [15]

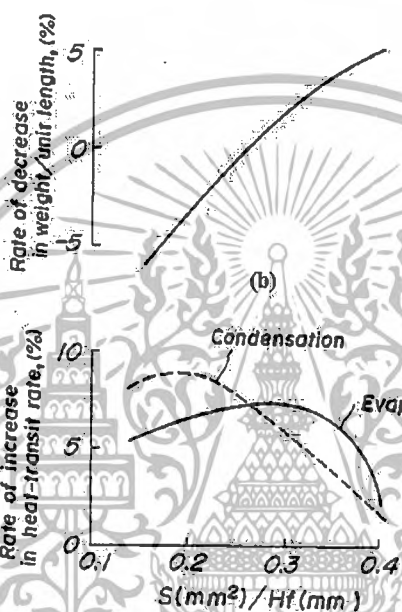


รูปที่ 2.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ภาคตัดของร่องสันกับอัตราส่วนของอัตราการถ่ายเทความร้อนหรือน้ำหนักของท่อต่อความยาวชนิดท่อที่มีร่องสันของ Shinohara et al. [15]

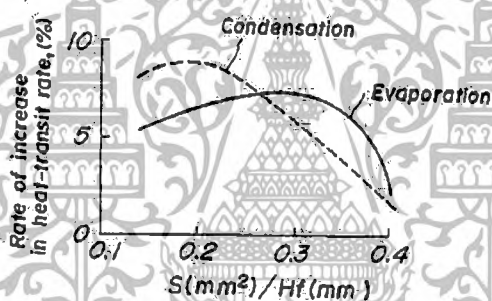
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

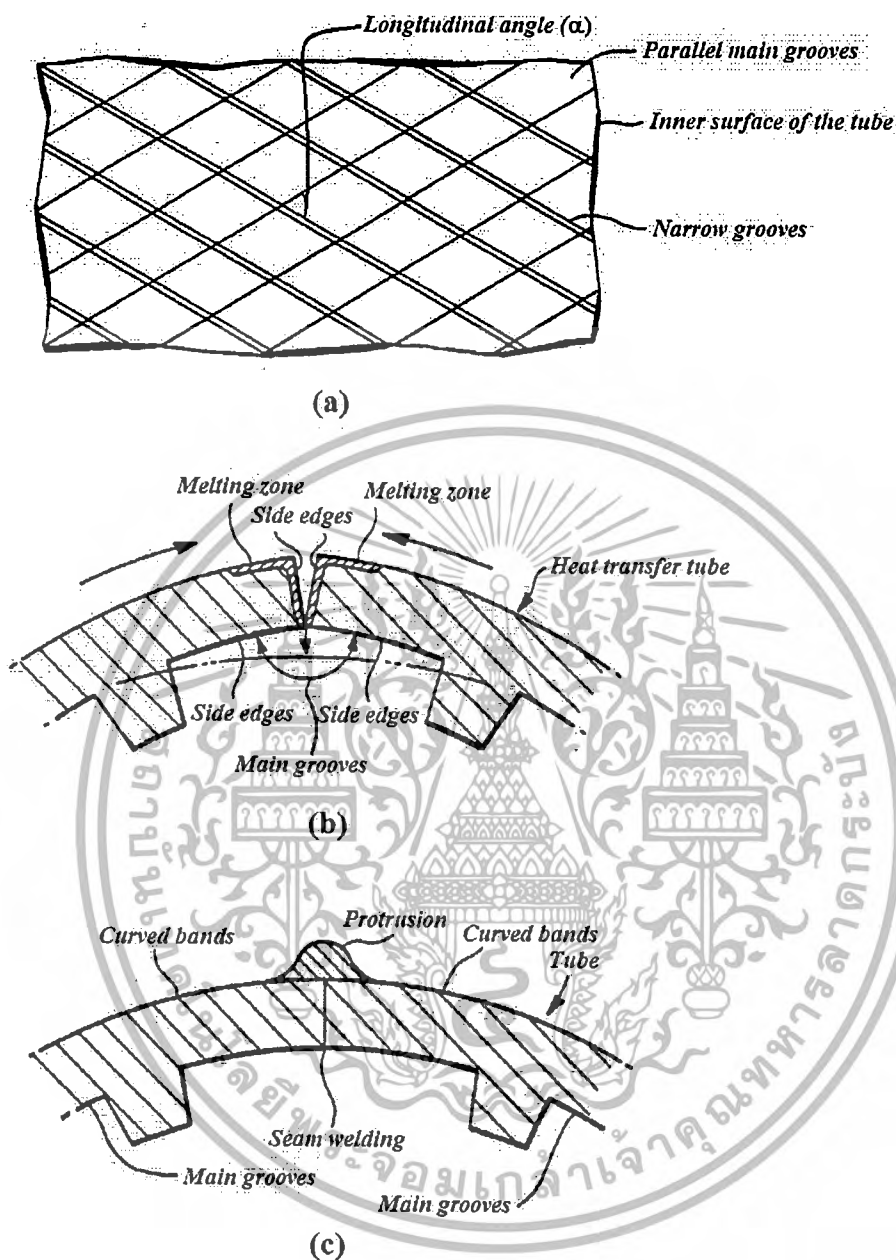


(c)

รูปที่ 2.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ภาคตัดของร่องสันกับอัตราส่วนของอัตราการถ่ายเทความร้อนหรือน้ำหนักของท่อต่อความยาวชนิดท่อที่มีร่องสันจากนั้นเปรียบเทียบกับท่อแบบดั้งเดิมของ Shinohara et al. [15]

Masukawa et al. [16] รูปที่ 2.29 ได้ศึกษาท่อถ่ายเทความร้อนและวิธีการที่ใช้ในกรรมวิธีการผลิตท่อที่มีสันภายในรูปสี่เหลี่ยมที่มีร่องขนานกันตลอดแนวสามารถทำการผลิตมุมร่องสันตามแนวแกนได้อยู่ระหว่าง 4 องศา ถึง 90 องศา มุมยอดของร่องสันสามารถผลิตได้อยู่ระหว่าง 0 องศา ถึง 9 องศา ที่ฐานของสันมีลักษณะเป็นร่องแคบๆที่ผิวด้านล่าง วิธีการผลิตท่อถ่ายเทความร้อนประกอบด้วย การเตรียมแผ่นโลหะตามขนาดที่กำหนดหลังจากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนการรีดโลหะแผ่นด้วยลูกรีดครั้งที่ 1 เพื่อให้เกิดร่องสันที่ผิวของแผ่นโลหะลักษณะของร่องสันเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีช่องว่างระหว่างแต่ละสันตลอดทั่วทั้งแผ่น จากนั้นทำการรีดครั้งที่ 2 ขวางทับรอยการรีดเดิมจะทำให้เกิดร่องสันที่ผิวของแผ่นโลหะที่สมบูรณ์ ถัดไปทำการม้วนขอบของแผ่นโลหะที่ทำการรีดสันเป็นที่เรียบร้อยแล้วให้ม้วนขอบเป็นวงกลมให้ขอบแผ่นโลหะชนกันแล้วทำการเชื่อมที่รอยต่อจะได้ท่อที่มีสันภายในท่ออย่างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

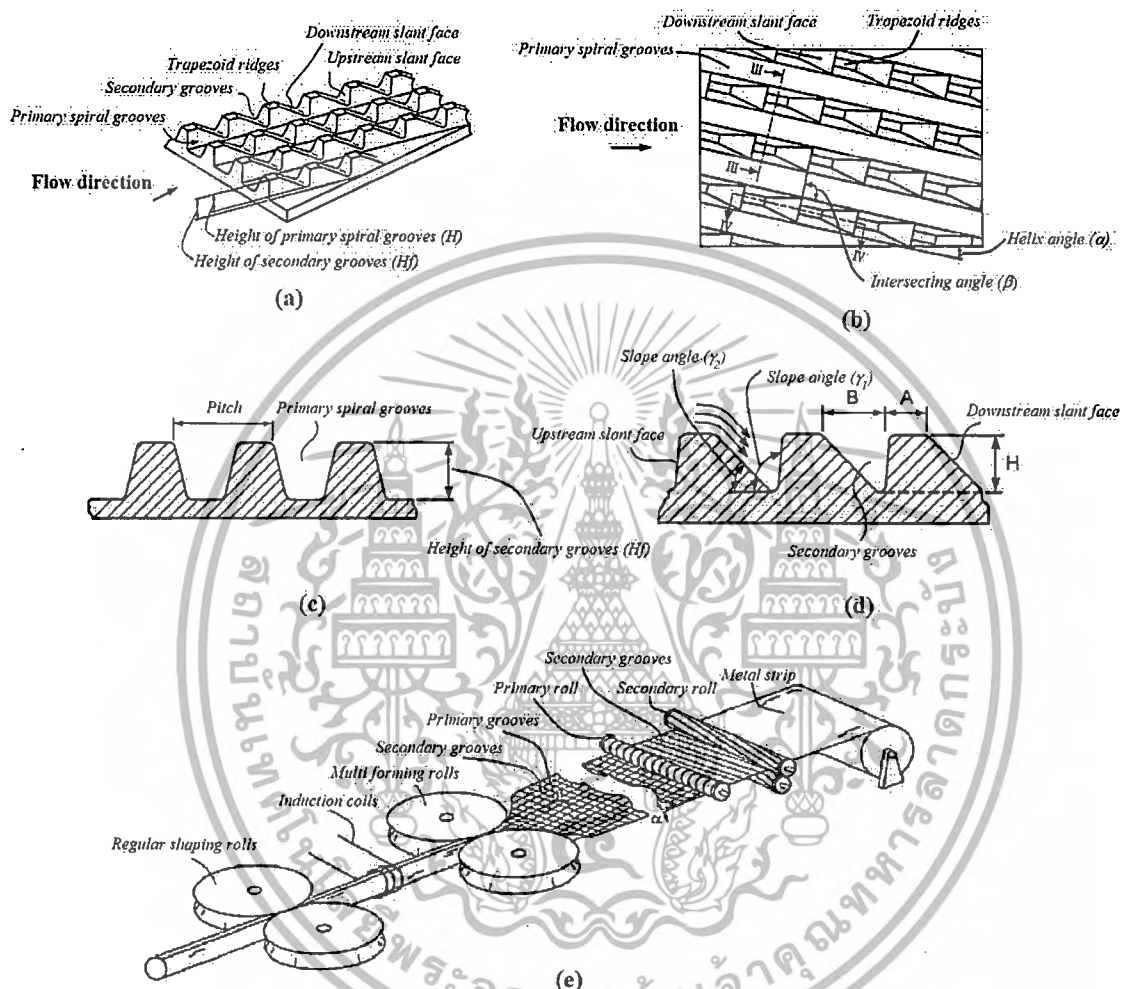


รูปที่ 2.29 แผนภาพ (a) แสดงแผ่นโลหะรีดร่องสัน (b) และ (c) แสดงภาคตัดขยายของกระบวนการเชื่อมท่อแบบมีตะเข็บของ Masukawa et al. [16]

Kim et al. [17] รูปที่ 2.30 ได้ศึกษาท่อถ่ายเทความร้อนซึ่งมีผิวภายในของสันแบบตัดขวางและวิธีการที่ใช้ในกระบวนการผลิต ท่อถ่ายเทความร้อนซึ่งมีผิวภายในท่อเป็นสันตัดขวางกันไปมาถูกนำไปใช้ในเครื่องทำความเย็น เครื่องปรับอากาศหรือที่มีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกันและกรรมวิธีการผลิตดังกล่าวได้ถูกเปิดเผยในเวลาต่อมา ท่อถ่ายเทความร้อนนั้นมีลักษณะเป็นมุมฮิลิกส์หมุนวนตามแนวแกนของท่อเอียง 10 องศา ถึง 40 องศา มุมตัดขวางระหว่างร่องสันทำมุมตัดกันอยู่ในช่วง 75 องศา ถึง 105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศา อัตราส่วนระหว่างความสูงของร่องสันต่อความสูงของสันอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1.0 มีมุมลาดเอียงแนวตั้งทำมุม อยู่ในช่วง 90 องศา ถึง 105 องศา ตามแนวมุมอีลิปส์ของสันและมีมุมลาดเอียงแนวนอนทำมุม อยู่ในช่วง 30 องศา ถึง 60 องศา ตามแนวมุมอีลิปส์ของสันเช่นกัน อัตราส่วนระยะห่างยอดสันต่อระยะห่างร่องสันอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 1.0

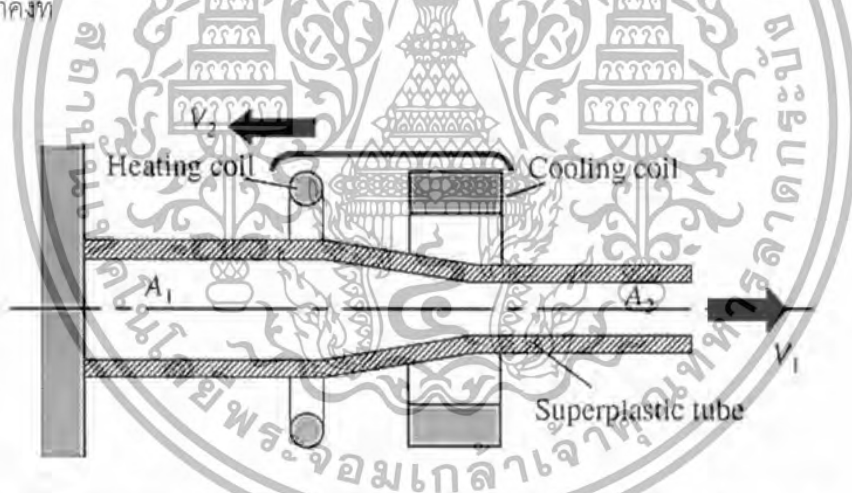


รูปที่ 2.30 แผนภาพ (a) แสดงภาคตัดของท่อที่ผิวด้านใน (b) ภาพตัดด้านบน (c) ภาคตัดตามแนว III-III (d) ภาคตัดตามแนว IV-IV (e) กระบวนการผลิตท่อถ่ายเทความร้อนที่มีสันบนผิวด้านในท่อของ Kim et al. [17]

Furushima et al. [18] ได้ศึกษาการประดิษฐ์ท่อขนาดจิ๋ว (Microtube) โดยใช้วิธีการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ superplastic dieless tube drawing แสดงในรูปที่ 2.31 วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการผลิตท่อผนังบางโดยใช้วิธีการยืดปลายข้างหนึ่งของท่อไว้มีฮีตเตอร์ (Heater) อยู่ที่ปลายด้านหนึ่งเพื่อให้วัสดุยืดออกหลังจากนั้นวัสดุที่ยืดออกจะถูกดึงผ่านคูลเลอร์ (Cooler) โดยที่ปลายท่อส่วนที่เป็นปลายอิสระถูกดึงด้วยความเร็ว  $V_1$  และในทางตรงข้ามขอบเขตของช่วงของการเปลี่ยนรูปของท่อเคลื่อนที่สวนทางผ่านความร้อนด้วยความเร็ว  $V_2$  ขณะในช่วงเวลาเดียวกัน พื้นที่หน้าตัดของท่อก่อนและหลังการเปลี่ยนรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แก่  $A_1$  และ  $A_2$  ตามลำดับ โดยสมมติให้การเปลี่ยนรูปอยู่ในช่วงสภาวะคงที่ ท่อขนาดจิว (Microtube) เป็นที่ต้องการและใช้โดยทั่วไป รายละเอียดของส่วนประกอบในระบบเทคโนโลยีขนาดเล็กจิวและระบบเครื่องกลไฟฟ้าขนาดเล็กจิว [micro-system technologies (MST) and micro electromechanical systems (MEMS)] กระบวนการประดิษฐ์ท่อขนาดเล็กจิวโดยใช้วิธี superplastic dieless tube drawing ด้วยวิธีการทดลอง โดย superplastic ที่ใช้เป็นท่ออัลลอยด์ Al-7Zn มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2 มิลลิเมตร และความหนาผนังท่อ 0.5 มิลลิเมตร เครื่องสำหรับทำความร้อนแบบอินดักชัน ความถี่สูงและกระบอกฉีดอากาศเย็นนั้นใช้ใน dieless drawing ในการอธิบายผลของการทดลองแบบเดี่ยวเดียวของวิธี dieless drawing ผลกระทบที่เกิดจากสภาวะของการขึ้นรูปดังเช่นอุณหภูมิในการขึ้นรูป ระยะห่างระหว่างฮีตเตอร์และคูลเลอร์ความเร็วในการดึงในการเปลี่ยนรูปหน้าตัดขึ้นงาน ยิ่งไปกว่านั้นในการ dieless drawing ถึง 3 เทียว ท่อขนาดเล็กจิวจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในขนาด 343 ไมโครเมตร และ 161 ไมโครเมตร ตามลำดับสามารถที่จะประดิษฐ์เป็นผลสำเร็จ ยิ่งไปกว่านั้นจากผลของการทดลองและตามหลักทฤษฎี ซึ่งสามารถยืนยันว่าเป็นความจริงได้ด้วยอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในต่อภายนอกของท่อในระหว่างการ dieless drawing ที่มีค่าคงที่ ในทำนองเดียวกันความคล้ายคลึงกันทางรูปทรงเรขาคณิตซึ่งมีขนาดมิติที่มีขนาดเล็กมาก ๆ นั้นหมดข้อสงสัยในกระบวนการนี้ ท้ายที่สุดพบว่าท่อขนาดเล็กจิวดังกล่าวมีผิวที่หยงบในกระบวนการ dieless drawing process ที่มีค่าคงที่



รูปที่ 2.31 กระบวนการ superplastic dieless tube drawing ของ Furushima et al. [18]

Furushima et al. [19] ได้ศึกษาการจำลองสถานการณ์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ควบคู่กับการวิเคราะห์ทางความร้อนเชิงกลของ superplastic dieless tube drawing โดยพิจารณาความไวของอัตราความเครียดที่เกิดขึ้น พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปใน superplastic dieless tube drawing โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ซึ่งวิธี FEM ควบคู่กับการวิเคราะห์ทางความร้อนเชิงกลโดยพิจารณาความไวของอัตราความเครียดที่เกิดขึ้นไปจนถึงการอธิบายผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสภาวะ dieless tube drawing อาทิเช่นความเร็วในการดึงขึ้นรูปและคุณสมบัติของวัสดุซึ่งเป็นพฤติกรรมในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของท่อ ในการคำนวณหาต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ โดยมีเงื่อนไขย่อยที่ต้องพิจารณาเป็นพิเศษได้แก่ ฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอุณหภูมิที่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการขึ้นรูป สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการพิจารณาอัตราการตอบสนองของอัตราความเครียดและความเครียดแข็งเพื่อหาผลเฉลยที่เกิดขึ้น ผลจาก FEM ได้แสดงทั้งเรื่องการถ่ายเทความร้อนและการเปลี่ยนรูปของท่อแสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ได้เป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นจึงเป็นผลที่ใช้ยืนยันความถูกต้องของ FEM ในการขึ้นรูปของ superplastic dieless drawing นั้นพิสูจน์ให้เห็น อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงผลกระทบทางด้านคุณสมบัติของวัสดุทางด้านค่าดัชนีความไวของอัตราความเครียด ( $m$ ) และสมมติฐานการประมาณค่าฟังก์ชันของอุณหภูมิ ( $n$ ) ในการเปลี่ยนรูปนั้นแสดงให้เห็นถึงผลของเชิงตัวเลข ผลลัพธ์ที่ได้ค่า  $m$  ที่สูงกว่าข้อจำกัดความไม่แน่นอนภายในช่วงของการเปลี่ยนรูปร่างในกรณีที่ค่า  $m$  สูงกว่าค่า  $n$  จะมีผลกระทบที่น้อยมากกับการเปลี่ยนรูปทรง ดังนั้นการพิจารณาวิเคราะห์ค่าการตอบสนองของความไวอัตราความเครียดนั้นเป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการทำนายพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปทรงของท่อในการขึ้นรูปแบบ dieless drawing

Sadok et al. [20] ได้ศึกษาสภาวะของความเครียดในกระบวนการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง (Tube sinking: ท่อที่ไม่มีแมนเดรลอยู่ด้านใน) จากการคำนวณด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ที่เกี่ยวข้องกับความเค้นในกระบวนการดึงขึ้นรูปและการแพร่ของความเครียดประสิทธิผลในกระบวนการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง วิธีการคำนวณได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆในกระบวนการดึงขึ้นรูปโดยประกอบด้วยวัสดุที่ใช้ในการทำท่อที่มีความแตกต่างกัน วิธีการทดสอบทำการตรวจสอบผลของการทดลองประกอบด้วย การดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงของวัสดุเหล็กกล้า 1H18N10T stainless steel seamless pipe (18 % Cr และ 10 % Ni) ใช้การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV5) บริเวณจุดต่างๆตามแนวภาคตัดขวางและแนวยาวในช่วงของการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรเช่นเดียวกันกับวิธีการผลิตท่อในอุตสาหกรรมทั่วไป มีการตรวจสอบการกระจายความเครียดประสิทธิผลโดยพิจารณาจากค่าที่วัดได้จากผลของการทดสอบความแข็งและนำผลที่ได้จากการทดลองไปพล็อตเป็นกราฟ ต่อจากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ข้อสรุปที่ได้จากการคำนวณสามารถยืนยันวิธีการดังกล่าวว่าอยู่บนพื้นฐานของการวัดความแข็งที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ขอบเขตของความเครียดในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง

Khalaf et al. [21] ได้ศึกษาการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของท่อที่มีแรงดันภายในในกระบวนการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง เกี่ยวกับการวิเคราะห์ในทางทฤษฎีถึงผลกระทบของแรงดันที่มีอยู่ภายในท่อด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง ผลกระทบของพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันอาทิเช่น ความดันภายใน รัศมีท่อ ความเค้นที่จุดคราก สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ครึ่งมุมตายและผลกระทบของอัตราส่วนรัศมีที่ทางออกต่อทางเข้าของความเค้นตามแนวแกนนั้นพิสูจน์ได้จากการคำนวณ พบว่าความเค้นตามแนวแกนนั้นลดลงซึ่งต่างจากครึ่งมุมตายและอัตราส่วนรัศมีที่ทางออกต่อทางเข้ากลับเพิ่มขึ้น ขณะที่พารามิเตอร์อื่นๆก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน หลังจากนั้นพบว่าความเค้นที่เกิดจากความดันภายในเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของครึ่งมุมตาย ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าข้อจำกัดค่าของความเค้นที่เกิดจากความดันภายในขึ้นอยู่กับผลของการคำนวณเช่นเดียวกัน

Swiatkowski et al. [22] ได้ศึกษาวิธีการประยุกต์ใช้ แก๊สและปรับปรุงเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อผนังบาง แนวคิดเกี่ยวกับโครงสร้างของเครื่องมือใหม่ๆที่ใช้ระหว่างการดึงขึ้นรูป

ท่อผนังบาง ( $D/d > 20$ ,  $t < 0.4$  มิลลิเมตร) โดยที่แนวคิดดังกล่าวตรงกับสถานะของกระบวนการผลิตจริงนั้นได้นำมาใช้ในการทดลอง โดยเฉพาะอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังท่อในช่วงการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงซึ่งอยู่ในสภาวะสมดุล แรงที่กระทำช่วงแรกก่อนที่จะเข้าสู่ช่วงที่สองของการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบปลีกลอยในเวลาต่อมา พิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปทรงทางเรขาคณิตของเครื่องมือที่ใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปรับปรุงช่วงที่ดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงให้สั้นลงสามารถช่วยปรับปรุงความเสถียรภาพของกระบวนการให้ดีขึ้นได้ ซึ่งมีความสำคัญมากในกรณีของการดึงขึ้นรูปแบบบางโดยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบปลีกลอย การปรับปรุงเครื่องมือใหม่ที่ใช้ดึงขึ้นรูปในกระบวนการผลิตและผลการทดลองดึงขึ้นรูปนั้นดำเนินการโดยใช้เครื่องลากขึ้นรูปที่มีแรงสูงสุด 40 กิโลนิวตัน และที่ความเร็วในการดึงขึ้นรูป 4 เมตรต่ออนาที การทดสอบนั้นสามารถยอมรับได้ในข้อพิสูจน์ของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณของการดึงขึ้นรูปในการผลิตท่อทองเหลือง CuZn37 และทองแดง OF-Cu ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีและผลของการทดลองพิสูจน์ได้ว่าข้อเสนอวิธีการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนั้นถูกต้อง ในทางปฏิบัติการปรับปรุงเครื่องมือแบบใหม่จะอยู่ในช่วงของการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การเพิ่มขึ้นของความหนาผนังท่อนั้นลดลงและประกันได้ว่าสมรรถนะในการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงจะมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น

Celentano et al. [23] ได้ศึกษาผลการทดลองและการจำลองสถานการณ์การดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงที่เข้ากันได้อย่างสมเหตุสมผล การวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลของท่อเหล็กกล้าในระหว่างการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง วิธีการประกอบด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอนได้แก่ อันดับแรกการทดสอบแรงดึง อันดับที่สองการดึงขึ้นรูปท่อในห้องปฏิบัติการเพื่อหาความแตกต่างของอัตราความเครียดและท้ายที่สุดศึกษาคุณลักษณะจำเพาะทางกลของวัสดุโดยการสร้างแบบจำลองและจำลองพฤติกรรม (Simulation) เริ่มต้นทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวัสดุเป็นวัสดุที่มีความแข็งเท่ากันในทุกทิศทาง (isotropic hardening) ผลที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมเป็นตัวเลขที่น่าพอใจเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองที่มีความสอดคล้องกัน ท้ายที่สุดได้ทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากครึ่งมุมตาย (Semiangle) ที่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปและความเค้นตกค้างในวัสดุที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในวิธีการและเครื่องมือที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้ต่อไป

Fodase et al. [24] ได้ศึกษาการวิเคราะห์การคืนความยืดหยุ่นบริเวณภาคตัดทอแบบไร้ตะเข็บด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปเย็น ผลกระทบของการคืนตัวกลับ (Spring-back) บริเวณภาคตัดขวางของท่อเหล็กไร้ตะเข็บที่พบในกระบวนการผลิตท่อแบบไร้ตะเข็บที่ใช้อยู่ในท้องตลาดของประเทศอินเดีย การศึกษาดำเนินการวิเคราะห์และปรับปรุงช่วงการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรเพื่อที่จะควบคุมการคืนตัวกลับบริเวณภาคตัดขวางของท่อเหล็กไร้ตะเข็บ เนื่องจากมีทั้งแรงดึงและแรงกดกระทำกับท่อในขณะที่ทำการดึงขึ้นรูป ดังนั้นการควบคุมขนาดความหนาของท่อให้ได้ขนาดตามที่กำหนดไว้จึงเป็นสิ่งจำเป็น ในกรณีของท่อเหล็กกล้าไร้ตะเข็บความสอดคล้องกันของหน้าตัดของแมนเดรลและหน้าตัดของตายจะต้องมีขนาดที่ถูกต้องเหมาะสมเท่านั้น โดยการทดสอบกระทำด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM simulation) ใช้โปรแกรม ANSYS ผลที่ได้จากการทดลองนำมาเปรียบเทียบกับผลของทฤษฎีและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ปรากฏว่าที่ความยาวช่วงการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร 10 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ 25.426 มิลลิเมตร ความหนาของผนังท่อ 3.06215 มิลลิเมตร เกิดการคืน

ตัวกลับ 0.0261 มิลลิเมตร และที่ความยาวช่วงการเปลี่ยนรูปร่างยาว 5 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ 25.4483 มิลลิเมตร ความหนาของผนังท่อ 3.066 มิลลิเมตร เกิดการคืนตัวกลับ 0.0483 มิลลิเมตร ตามลำดับ

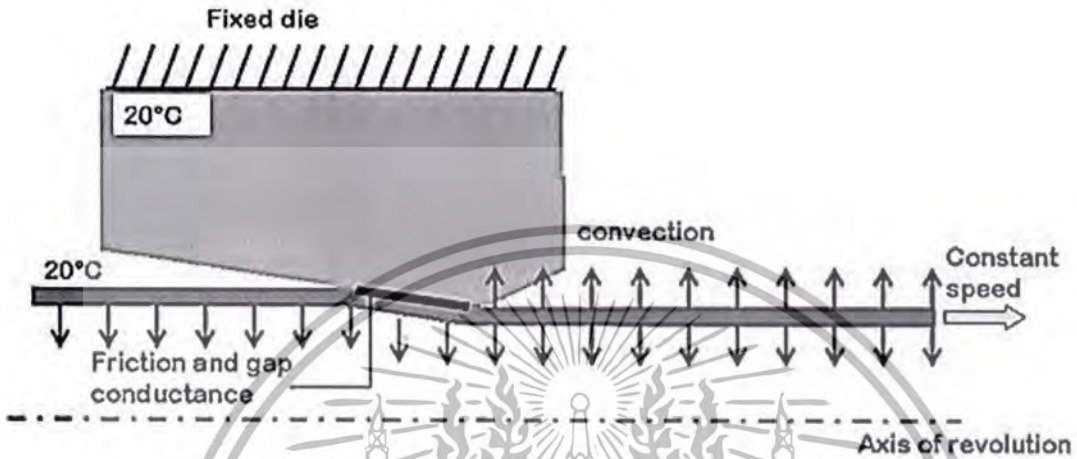
Nagarkar et al. [25] ได้ศึกษาการจำลองสถานการณ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงโดยใช้โปรแกรม ANSYS การสร้างแบบจำลองและการจำลองสถานการณ์กระบวนการขึ้นรูปโลหะนั้นแบบจำลองดังกล่าวมีความต้องการมากขึ้นในวงการอุตสาหกรรมและพบว่าเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการพิจารณาการเพิ่มประสิทธิภาพที่มีอยู่และการพัฒนาของกระบวนการผลิตใหม่ๆ โดยประยุกต์ใช้เทคนิคในการสร้างแบบจำลองและการจำลองสถานการณ์ เป็นไปได้ที่จะลดจำนวนของเวลาของการทดลองในการสร้างเครื่องต้นแบบ ท่อไร้ตะเข็บนั้นมีหลากหลายขนาดและรูปทรงในกระบวนการผลิตที่มีหลายกระบวนการอาทิเช่น การดึงขึ้นรูปโดยไม่ใช้แมนเดรล (Tube sinking) แบบปลั๊กยึดกับที่ (Fixed plug) แบบปลั๊กลอย (Floating plug) แบบแมนเดรลเคลื่อนที่ (Moving mandrel) อีกทั้งที่เป็น การขึ้นรูปเย็น (Cold working) และการขึ้นรูปร้อน (Hot working) ข้อเสนอการทำงานในปัจจุบันซึ่งเป็นการจำลองการทำงานของท่อกลมโดยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบไม่ใช้แมนเดรลโดยใช้โปรแกรม ANSYS ผลของการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของระยะกระจัดและความเค้น von Mises ข้อมูลดังกล่าวสามารถใช้ปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์และศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์เช่นมุมตาย เป็นต้น

Yoshida et al. [26] ได้ศึกษาการประดิษฐ์ท่อขนาดเล็กทางการแพทย์คุณภาพสูงโดยวิธีการใช้แมลเดรลของไหลในการดึงขึ้นรูป ซึ่งการพัฒนาเป็นปฏิบัติการทางการแพทย์ที่ก้าวหน้า ความต้องการในการใช้ท่อคุณภาพดีในทางการแพทย์ในปัจจุบันมีสูงมาก เทคโนโลยีที่ใช้จะต้องสามารถผลิตท่อที่ทำให้มีลักษณะสำคัญได้หลากหลาย 4 ประการต่อไปนี้ได้แก่ ขนาดเล็ก คุณภาพสูง สามารถนำไปใช้หลากหลาย และกระบวนการผลิตมีต้นทุนต่ำ ในการดึงขึ้นรูปโดยใช้แมนเดรลจากโลหะอ่อน ในการดึงขึ้นรูปซึ่งเป็นการดึงขึ้นรูปด้วยแมนเดรลแบบอ่อนตัวได้นั้นเป็นวิธีการที่ดีของท่อขนาดเล็กที่มีความสามารถในการดึงขึ้นรูปสูง อย่างไรก็ตามอาจจะไม่เหมาะสมนักสำหรับการประดิษฐ์ท่อที่มีความยาวเพราะการนำแมนเดรลออกจากท่อที่เสร็จแล้วนั้นทำได้ยาก ดังนั้นจึงได้มีการเสนอวิธีการใหม่ในการดึงขึ้นรูปโดยการใช้ของไหลอย่างเช่นน้ำเป็นแมนเดรล การดึงขึ้นรูปโดยใช้แมนเดรลของไหลที่เป็นน้ำนั้นจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตท่อ เพราะว่ามันสามารถที่จะนำออกไปจากผิวของท่อได้ง่ายกว่าน้ำมัน

Palengat et al. [27] ได้ศึกษาวิเคราะห์ผลของการทดลองและการจำลองสถานการณ์การดึงขึ้นรูปเย็นท่อสเตนเลสผนังบาง 316L ดังรูปที่ 2.32 โดยทำการศึกษาระบบการดึงขึ้นรูปท่อผนังบางที่ใช้ในการประดิษฐ์ท่อสำหรับการใช้งานทางการแพทย์ ในทางการแพทย์ต้องการขนาดที่ถูกต้อง ท่อที่มีผิวภายนอกและภายในที่มีผิวเรียบ งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับท่อสเตนเลส 316L ซึ่งเป็นกรรมวิธีการผลิตโดยใช้วิธีการดึงขึ้นรูปเย็นที่มีและไม่มีปลั๊ก (การดึงขึ้นรูปโดยใช้แมนเดรลและการดึงขึ้นรูปแบบไม่ใช้แมนเดรลตามลำดับ) ในการปรับปรุงคุณภาพของท่อสำเร็จรูปโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธีนี้ การศึกษาอนุกรมทางกลของกระบวนการดึงขึ้นรูปนั้นใช้ในการกำหนดพารามิเตอร์ทางกายภาพของการทดลอง การศึกษาครั้งนี้ได้เสนอที่จะประเมินผลพารามิเตอร์ที่แตกต่างของสมการที่เป็นส่วนประกอบอนุกรมและรูปแบบของแรงเสียดทานที่ใช้เป็นคุณลักษณะพิเศษในการทดสอบทดลองหรือโดยการใช้การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผกผันในกระบวนการดัดขึ้นรูป พารามิเตอร์ดังกล่าวนั้นผ่านการตรวจสอบโดยการวิเคราะห์โดยวิธีการดัดขึ้นรูปด้วยวิธีการอื่นๆ ท้ายที่สุดความสำคัญของพารามิเตอร์ทางกายภาพต่างๆที่เข้ากันกับขีดจำกัดของการดัดขึ้นรูปนั้นต้องให้ความสำคัญ โดยใช้ทฤษฎีความเสียหายของ Cockcroft-Latham



รูปที่ 2.32 แบบจำลองกระบวนการดัดขึ้นรูปเย็นทอสเตนเลสหนึ่งบาง 316L ของ Palengat et al. [27]

### 2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

Yamamoto et al. [28] ได้ศึกษาท่อถ่ายเทความร้อนขนาดจิ๋ว (Microtube) ที่มีประสิทธิภาพสูงเกี่ยวกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความต้องการที่สูงขึ้นและต้องการประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นด้วย ความร้อนที่มากขึ้นทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบระบายความร้อน ดังนั้นทางบริษัทฟูรากาว่า อิเล็กทรอนิกส์ได้รับข้อมูลทางการตลาดเกี่ยวกับแผงระบายความร้อนที่ใช้ร่วมกับท่อระบายความร้อนขนาดเล็กตั้งแต่ปี ค.ศ. 1995 เป็นต้นมา ในขณะที่จำนวนของผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายสำหรับค่ากำหนดต่างๆของชิ้นส่วนที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาต้องตอบสนองต่อความต้องการท่อระบายความร้อนขนาดเล็กมากขึ้นเรื่อยๆ และจากผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของท่อเพื่อให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้นตลอดมา เมื่อเร็ว ๆ นี้ท่อระบายความร้อนขนาดเล็กได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อที่จะรับมือกับความต้องการที่เพิ่มขึ้นตามที่ได้คาดหวังไว้ในอนาคต ผลการทดลองปรากฏว่าท่อที่มีครีระบายความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพสูงกว่าท่อธรรมดาที่มีใช้มาแต่เดิม ปรากฏว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นกว่าท่อธรรมดาแบบเดิม 160 ถึง 200 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิการทำงานอยู่ในช่วง 40 ถึง 70 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงรูปร่างท่อที่มีสันอยู่ภายในท่อมีสมรรถนะที่สูงมากและมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงสุด

Morris et al. [29] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการพาความร้อนในท่อที่มีสันอยู่ภายในแบบหมุนวน การถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการพาความร้อนแบบหมุนวนในท่อที่มีสันเป็นมุมฉากภายใน โดยทำการทดลองหาผลกระทบที่เกิดขึ้นภายในท่อที่เกิดจากการกระทำของของไหล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของสันและการถ่ายเทความร้อนที่ใบกังหันโรเตอร์แบบสามใบพัดแล้วเปรียบเทียบกับท่อที่มีผนังภายในเรียบและไม่มีการไหลวนของของไหล ผลลัพธ์ที่ได้แสดงผลจากรูปทรงของสันสามแบบของใบพัดที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ในช่องระบายความร้อนของใบกังหันโรเตอร์ การหมุนเหนี่ยวนำแบบเบี่ยงเบน (Coriolis-induced) เป็นผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นของของไหลที่บริเวณขอบของท่อ หลังจากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับผลกระทบที่ได้จากการตรวจสอบการลอยตัวที่บริเวณศูนย์กลางซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลรวมของแรงเบี่ยงเบน (Coriolis-forces) และแรงลอยตัวเข้าด้วยกัน ผลการทดลองปรากฏว่า การเปลี่ยนแปลงของนัสเซลต์นัมเบอร์ (Nusselt number) ของของไหลที่ไหลผ่านสันที่มีลักษณะเป็นฟันเลื่อย การกระจายอุณหภูมิเกิดขึ้นตลอดทั้งขอบเขตของผนังด้านในท่อที่มีค่าสูงโดยเฉพาะที่กลางของสันซึ่งการไหลแนบติดกับขอบของผนัง ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ก็ยังมีค่าสูงกว่าที่เกิดขึ้นกับท่อผนังเรียบธรรมดาเช่นกัน

Li et al. [30] ได้ศึกษาคุณสมบัติจำเพาะของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในท่อผิวหยาบที่มีสันหมุนวนอยู่ภายใน โดยใช้ท่อระบายความร้อนของน้ำที่ความเร็วต่ำ การระบายความร้อนของน้ำเสียภายในท่อของท่อระบายความร้อนโดยใช้ท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 15.54 มิลลิเมตร ท่อดังกล่าวมีสันขดเป็นเกลียวอยู่ภายในท่อ ความเร็วในการไหลของน้ำเสียใช้ความเร็วต่ำที่ 1.07 เมตรต่อวินาที ตลอดจนพารามิเตอร์ต่างๆ รูปทรงเรขาคณิตของสัน จำนวนฟันของสันโดยเริ่มต้นที่ 18 ถึง 45 สัน มุมอีลิคส์ของสัน 25 ถึง 45 องศาและความสูงของสันอยู่ระหว่าง 0.33 ถึง 0.55 มิลลิเมตรตามลำดับ รูปทรงเรขาคณิตเหล่านี้ช่วยให้เกิดการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายในท่อที่ใช้ในท่อระบายความร้อนที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ที่มีปริมาณเพิ่มจำนวนขึ้นเป็นอย่างมากในปัจจุบัน คุณลักษณะจำเพาะของน้ำเสียที่ไหลภายในท่อแบ่งออกเป็นสองช่วง ช่วงที่เป็นเชิงเส้นและที่ไม่เป็นเชิงเส้น อัตราส่วนของการปรับปรุงจากท่อธรรมดาที่ไม่มีสันความต้านทานการไหลของน้ำเสียนั้นจะเพิ่มขึ้นมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ในท่อดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอยู่ในช่วงที่เป็นเชิงเส้นและความสัมพันธ์เชิงเส้นจะหมดไปในเมื่อการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในช่วงที่ไม่เป็นเชิงเส้น อนุกรมของน้ำเสียในการวิเคราะห์เชิงกึ่งทฤษฎีมีความเกี่ยวข้องกับฟังก์ชันของพื้นที่ภายในของท่อ โดยชี้ให้เห็นถึงการเกิดการปรับปรุงและพัฒนาการเพิ่มรูปทรงทางเรขาคณิตของสันและเป็นประโยชน์อย่างมากที่ทำให้เกิดความแตกต่างของการระบายความร้อนของท่อระบายความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น อนุกรมดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องกันกับผลคูณแบบลดลอยซึ่งเป็นฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงของรูปทรงของสันและค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์นั้นก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน สำหรับค่าเฉลี่ยการเบี่ยงเบนของอนุกรมทั้งคู่ที่สัมพันธ์กันนั้นมีค่าเท่ากับ 4.4 เปอร์เซ็นต์ และ 4.8 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ได้โดยตรงในการประเมินศักยภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อน้ำเสียที่เพิ่มขึ้นของน้ำหล่อเย็น

Lohasz et al. [31] ได้ศึกษาคุณสมบัติการไหลเวียนในท่ออากาศที่มีการพัฒนาการไหลอย่างเต็มทีด้วยวิธีการ Large Eddy Simulation (LES) การจำลองสถานการณ์การไหลของของไหลแบบปั่นป่วนในท่อที่มีหน้าตัดเป็นสันเป็นตารางสี่เหลี่ยมโดยวิธีการ LES ระยะพิตช์ระหว่างยอดสันมีค่าคงที่เท่ากับอัตราส่วนระหว่างระยะพิตช์ต่อความสูงของสันเท่ากับ 10 ( $p/h=10$ ) พร้อมกันนั้นก็มีการกีดขวางการไหลสูงเท่ากับ 0.3 เท่าของค่าความสูงของสันต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของของไหลในท่อด้วยเหมือนกัน ( $0.3 h/D$ ) และค่าตัวเลขเรย์โนลด์ [กำหนดโดย bulk velocity ( $U$ ) and hydraulic diameter ( $D$ )] มีค่าเท่ากับ 40,000 พารามิเตอร์ต่างๆนั้นเลือกใช้มาจากค่าผลการทดลองของ Casarsa (2003) ความพยายามที่จะนำเสนอรายละเอียดของลักษณะทางกายภาพโดยใช้แนวคิดของกระแสที่พื้นผิว การตรวจสอบที่แกนกลางของกระแสของไหลวน ตลอดจนกระแสไหลตามผนังและแยกออกเป็นสองทางตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวด้านข้างของสัน นอกจากนี้ความรู้เกี่ยวกับลักษณะกายภาพของการไหลมาจากแนวความคิดเหล่านี้ เมื่อเทียบกับคุณภาพของพื้นผิวคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของความลาดชันของความเร็วรวม ได้แก่สนามของความเร็วเฉลี่ยและ/หรือสนามความเร็วอย่างทันทีทันใด แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างช่องทางไหลและสนามการไหลที่สันแบบสองมิติ ขณะที่ผลกระทบที่เกิดด้านข้างของผนังนั้นเป็นจุดเด่นเป็นส่วนที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการคงอยู่ของการไหลรองลงมาจากด้านทางเข้าที่มีความแรงกว่าของสันถูกแสดงโดยการสร้างภาพจำลองพื้นผิวกระแสการไหลผ่านผนังและแยกออกเป็นสองทางด้านข้างของสัน กระแสไหลวนครอบคลุมทั่วทั้งบริเวณของขอบเขตและพบว่าถูกแยกออกจากบริเวณที่พื้นผิวมีความสม่ำเสมอตามความลาดชันของสนามความเร็วรวมนั่นเอง การแสดงผลมีคุณค่าอย่างมากกับตำแหน่งของพื้นผิวกระแสการไหลและวิธีการตรวจสอบที่สำคัญของกระแสการไหลวนที่ผนังด้านข้างของสันและใช้เป็นหลักฐานอ้างอิง ผลกระทบของผนังด้านข้างแนวเส้นทางการไหลผ่านของสันนั้นถูกบ่อนลงในฐานข้อมูลแยกวิเคราะห์ต่างหากของสนามความเร็วเฉลี่ย จากบริเวณสัน ช่องว่างของสันและลักษณะของเครื่องมือวัดการไหล  $\Lambda$  คล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Dubief & Delcayre (2000) ผลสรุปแสดงให้เห็นความสามารถในการปรับปรุงค่าเฉลี่ยของการจำลองสถานการณ์การไหลของของไหลที่กระทำซ้ำและกระบวนการไหลอย่างต่อเนื่องที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในอนาคต

Liao et al. [32] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในแบบ 3 มิติของท่อถ่ายเทความร้อนที่มีครีบบนภายใน โดยทดลองหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในแบบ 3 มิติ ภายในครีบบนของท่อเหล็กที่ใช้ส่งถ่ายความร้อนด้วยน้ำนั้นถูกดำเนินการในโครงการนี้ พารามิเตอร์หลักทั้งหมดมีอิทธิพลที่มีนัยสำคัญของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อถ่ายเทความร้อน ดังเช่น อุณหภูมิการใช้งาน ค่าพลาซิกซ์ความร้อน ค่าของมุมเอียง อัตราการบรรจุของไหลทำงาน (กำหนดโดยปริมาณการระเหยของอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน) นั้นถูกยกเป็นตัวอย่าง ภายใต้สภาวะของการทดลอง (อุณหภูมิทำงานอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียส ถึง 95 องศาเซลเซียส ค่าพลาซิกซ์ความร้อน  $5.0 \text{ kW/m}^2$  ถึง  $40 \text{ kW/m}^2$  มุมเอียงมีค่า 2 ถึง 90 องศา) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในระบบ 3 มิติ ของอุปกรณ์ทำความเย็นและเครื่องควบแน่นของครีบบนในท่อถ่ายเทความร้อนนั้นพบว่าเพิ่มขึ้น 50 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ และ 100 ถึง 200 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับท่อที่มีผิวเรียบภายใต้สภาวะที่เหมือนกัน โดยประกอบด้วยโครงสร้างพิเศษของครีบบน 3 มิติ บนผนังด้านในสามารถลดลงอย่างมีนัยสำคัญในเรื่องของความต้านทานอุณหภูมิภายในของท่อถ่ายเทความร้อนและเสริมประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น

Wei Li. [33] ได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองของอนุภาคน้ำเสียที่ไหลด้านข้างสันภายในท่อที่มีสันหมุนวนอยู่ด้านใน ความเร่งของอนุภาคของน้ำเสียในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 15.54 มิลลิเมตร จำนวน 5 ท่อ เป็นท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในท่อมีความแตกต่างของความเข้มข้นของน้ำเสียที่บรรจุอยู่ภายในและความเร็ว สัดส่วนของพารามิเตอร์รูปทรงของสันนั้นเริ่มต้นที่จำนวนสันตั้งแต่ 18 ถึง 45 สัน มุมเอียงของสันอยู่ที่ 25 ถึง 45 องศา และความสูงของสัน 0.33 ถึง 0.55 มิลลิเมตร อนุภาคของอลูมิเนียมออกไซด์อยู่ที่ 3.0 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ยของน้ำเสีย รูปทรงของท่อที่ถูกจัดเตรียมไว้เป็นชนิดใหม่มีการเพิ่มขึ้นของสันภายในท่อซึ่งเป็นท่อที่ใช้ในทางการค้าของหอระบายความร้อนทั่วไป ในรูปแบบเชิงกึ่งทฤษฎีนั้นถูกพัฒนา แบบจำลองซึ่งใช้เป็นข้อกำหนดของดัชนีที่ใช้ในการ

ทดลองเชิงประสิทธิภาพ  $[(j/j_p)/(f/f_p)]$  โดยที่  $j = St Pr^{2/3}$  ค่า  $f$  เป็นแฟกเตอร์ของฟังก์ชัน ตัวห้อย  $p$  อ้างถึงอัตราส่วนของค่าพื้นฐานค่าแฟกเตอร์ของน้ำเสีย โดยขึ้นอยู่กับความแตกต่างของท่อที่ใช้ อ้างอิง ความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น อัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นไปจนถึงท่อธรรมดา เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพดัชนี ท่อที่เพิ่มขึ้นในท่อที่ 4 ซึ่งมีจำนวนของสันเริ่มต้น 10 สัน และมุมฮิลิกส์ของสัน 45 องศา ความสูงของสัน 0.43 มิลลิเมตร นั้นเป็นที่นิยมสูงสุด ท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวภายใน ปัจจุบันที่ใช้กับหอระบายความร้อน การวิเคราะห์ในเชิงกึ่งทฤษฎีของการแบ่งอัตราส่วนค่าแฟกเตอร์ของน้ำเสียภายในดัชนีกระบวนการกำจัดน้ำเสียและดัชนีของประสิทธิภาพนั้นเป็นการลดความยุ่งยากอย่างมีนัยสำคัญในการวิเคราะห์ค่าความสกปรกของน้ำเสีย

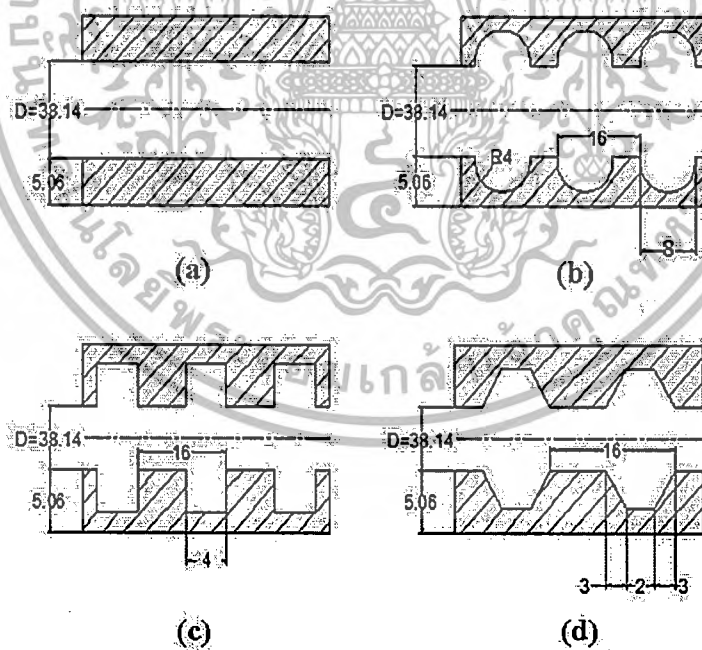
Elnaggar et al. [34] ได้ศึกษาการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของครีบบนของหอระบายความร้อนแบบตัว U ในเครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ การทดลองนั้นดำเนินการโดยการติดตั้งระบบระบายความร้อนแบบแนวตั้งที่ด้านบนมีแหล่งกำเนิดความร้อนที่ติดตั้งอยู่ภายในกล่องสี่เหลี่ยมมีช่องระบายอากาศและโดยใช้เครื่องเป่าอากาศช่วยในการพาความร้อนแบบบังคับ ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวม ( $R_t$ ) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้นใช้การประมาณค่าโดยเปรียบเทียบการพาความร้อนแบบอิสระกับการพาความร้อนแบบบังคับภายใต้สภาวะคงที่ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนที่จ่ายเข้าไปในระบบที่ 4 วัตต์ ถึง 24 วัตต์ และใช้ความเร็วลมเป่าที่ 1 เมตรต่อวินาที ไปจนถึง 4 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ อุณหภูมิของการหล่อเย็นและความร้อนที่ถ่ายเทออกไปที่ทำให้ค่า  $R_t$  ต่ำสุดนั้นพบว่าสอดคล้องกับค่าการนำความร้อนประสิทธิผลที่ได้จากการคำนวณ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นชั่วขณะกระจายตัวออกไปตามครีบบนระบายความร้อนของท่อนั้นหาค่าได้ด้วยเหมือนกัน การค้นพบที่ได้จากการทดลองนั้นถูกตรวจสอบโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม ANSYS 10 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงค่าความเร็วของอากาศ กำลังวัตต์ที่ใช้และการปรับค่าต่างๆของท่อถ่ายเทความร้อนนั้นมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของครีบบนระบายความร้อน ในขณะที่ความร้อนที่เข้าไปในระบบและอุณหภูมิของอากาศที่เพิ่มขึ้น ความต้านทานอุณหภูมิรวมกลับลดลง ค่าต่ำสุดของความต้านทานอุณหภูมิรวมที่ได้นั้นมีค่า  $0.181^\circ\text{C/W}$  เมื่อความร้อนที่ใส่เข้าไปมีค่า 24 วัตต์ และความเร็วของอากาศ 3 เมตรต่อวินาที ผลของการทดลองและการจำลองสถานการณ์นั้นพบว่าอยู่ในแนวโน้มน่าดี

Munoz et al. [35] ได้ศึกษาข้อมูลทางเทคนิคเกี่ยวกับการใช้ท่อรูปโค้งพาราโบลาที่มีครีบบนอยู่ภายในเป็นรางน้ำที่ใช้ดูดซับพลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังค์ความร้อนที่เข้ามาแตกต่างกันไปในท่อรูปโค้งพาราโบลาที่มีครีบบนอยู่ภายในเป็นรางน้ำที่ใช้ดูดซับพลังงานจากแสงอาทิตย์สร้างความแตกต่างของอุณหภูมิอย่างมากในแต่ละส่วนของท่อ ครีบบนในที่ขดเป็นวงสามารถลดผลกระทบของอุณหภูมิซึ่งมีความสัมพันธ์อย่างเดียวกันกับเส้นรอบนอกของรูปทรงและการลดลงของอุณหภูมิความเค้นที่มีข้อเสียหายที่เกิดจากความดันลดที่เพิ่มขึ้น ผลกระทบอื่น ๆ นั้นเกิดจากอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกกลับลดลงและการสูญเสียอุณหภูมิ การปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนสะสม การประยุกต์ใช้ท่อที่มีครีบบนอยู่ภายในสำหรับการออกแบบท่อรูปโค้งพาราโบลานั้นทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือจากการคำนวณเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของของไหล วิธีการเชิงตัวเลขผ่านการทดสอบด้วยการประมาณค่าจากการคำนวณและรายงานข้อมูลจากการทดลองเกี่ยวกับปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ท่อที่มีครีบบนและการฉายรังสีแสงอาทิตย์ที่สะสมอยู่ในท่อรูปโค้งพาราโบลา การประยุกต์ใช้ท่อที่มีครีบบนอยู่ภายในสำหรับการออกแบบท่อรูปโค้งพาราโบลาต้องคำนึงถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาของสาเหตุที่เกี่ยวกับการสูญเสียความดัน อุณหภูมิที่สูญเสีย ความเค้นเชิงกลจากอุณหภูมิและความถี่ที่เกิดจากอุณหภูมิด้วยเหมือนกัน การวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงความสามารถที่ซ่อนเร้นอยู่ภายในท่อรูปโค้งพาราโบลาเกี่ยวกับประสิทธิภาพโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยการประยุกต์ใช้ท่อที่มีครีบอกอยู่ภายใน

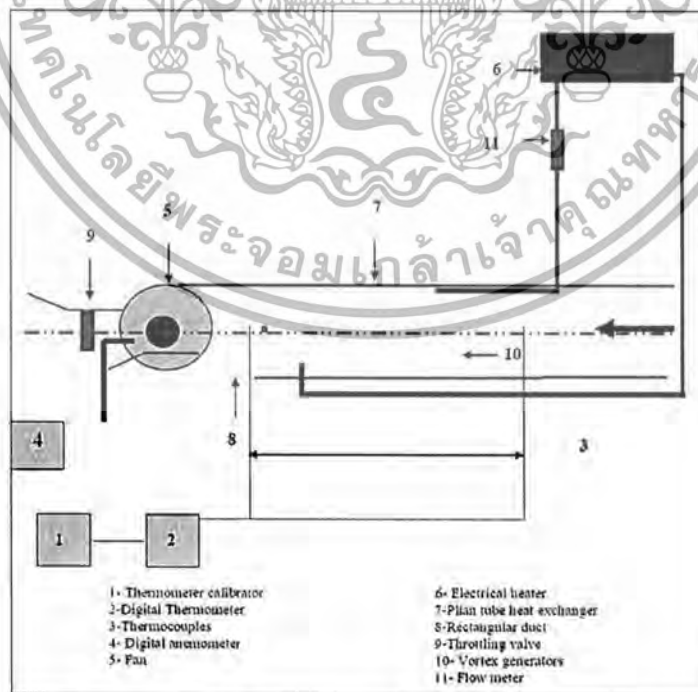
Selvaraj et al. [36] ได้ศึกษาคุณลักษณะจำเพาะการถ่ายเทความร้อนและปัจจัยแรงเสียดทานของไหลผสมของน้ำและเอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol) ในท่อที่มีสันอยู่ภายใน โดยรายงานผลการทดสอบที่ได้จากการทดลองของค่าแฟกเตอร์สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน นัสเซิลนัมเบอร์และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของอุปกรณ์ท่อซึ่งทำการปรับปรุงรูปร่างของสันภายในท่อใน 3 รูปแบบ ดังรูปที่ 2.33 ของไหลทำงานได้แก่ของผสมระหว่างน้ำและเอทิลีนไกลคอลในอัตราส่วน 90:10 โดยน้ำหนัก การถ่ายเทความร้อนภายในโดยการพาความร้อนแบบบังคับจากท่อแบบที่มีผิวภายในเรียบและท่อที่มีสันภายในโดยทำการตรวจสอบสำหรับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) ในช่วง 4,900 ถึง 13,300 การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับในของผสมระหว่างน้ำและเอทิลีนไกลคอล ผลลัพธ์ที่ได้จากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายใต้การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) นั้นได้รายงานให้ทราบในกลุ่มของท่อที่มีสันการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับสำหรับการไหลของน้ำและเอทิลีนไกลคอลที่ผสมกันเพิ่มขึ้นถึง 36 เปอร์เซ็นต์ สำหรับสันที่เป็นวงแหวน 55 เปอร์เซ็นต์ สำหรับสันที่เป็นสี่เหลี่ยม และ 10 เปอร์เซ็นต์ สำหรับสันที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูเมื่อเทียบกับท่อที่มีผิวภายในเรียบ



รูปที่ 2.33 รูปทรงของท่อแบบต่างๆในหน่วยมิลลิเมตร (a) ท่อผิวภายในเรียบ (b) สันท่อภายในวงแหวน (c) สันท่อภายในสี่เหลี่ยม และ (d) สันท่อภายในสี่เหลี่ยมคางหมูของ Selvaraj et al. [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

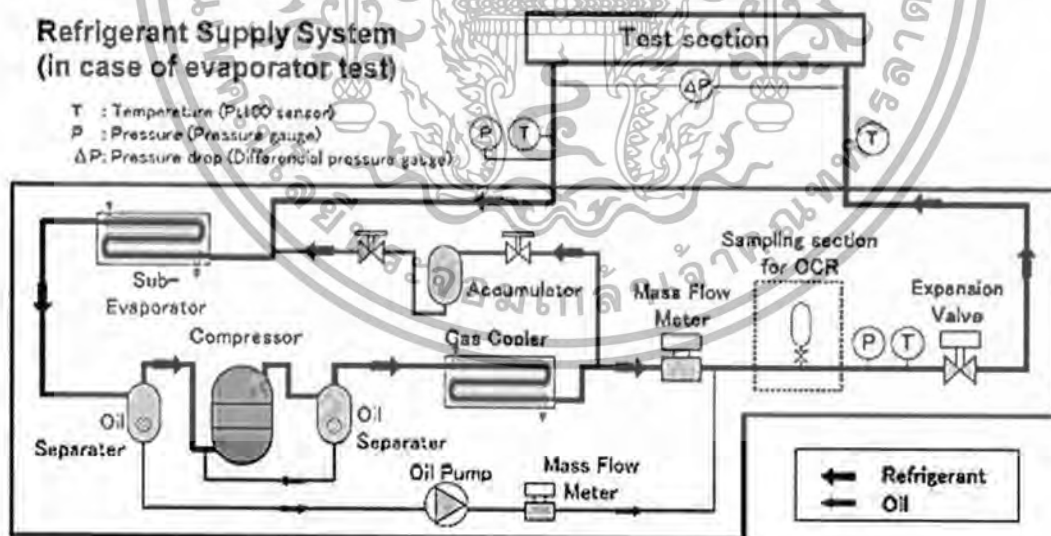
Kattee et al. [37] รูปที่ 2.34 ได้ศึกษาทดลองถึงผลกระทบของรูปทรงของช่องการไหลของของไหลและตำแหน่งการกำเนิดของกระแสไหลวนของของไหลก่อนการแลกเปลี่ยนความร้อน การทดลองนั้นดำเนินการเกี่ยวกับผลกระทบของการกำเนิดกระแสไหลวน (วงแหวนและสี่เหลี่ยม) ของการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ ( $X=0.5, 1.5, 2.5$  เซนติเมตร) ช่วงหน้าของการถ่ายเทความร้อนซึ่งมีค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) อยู่ระหว่าง  $62,000 < Re < 125,000$  และฟลักซ์ความร้อน (heat flux) อยู่ในช่วง  $3,000 \leq q \leq 8,000 \text{ W/m}^2$  ในการตรวจสอบผลการทดลองเครื่องมือทดสอบถูกตั้งค่าความเร็วและอุณหภูมิโดยรอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ผลลัพธ์ที่ได้มีผลกระทบต่อกรกำเนิดกระแสไหลวนในอุปกรณ์โดยขึ้นอยู่กับรูปทรงของช่องการไหลของของไหลและตำแหน่งของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยเหมือนกัน ช่องการไหลของของไหลรูปวงแหวนพบว่ารูปทรงที่ดีที่สุดสำหรับการถ่ายเทความร้อนอยู่ที่ตำแหน่ง  $X_m=0.5$  เซนติเมตร ระยะก่อนที่จะแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดสำหรับการถ่ายเทความร้อน สำหรับช่องการไหลของของไหลสี่เหลี่ยมนี้รูปทรงที่ดีที่สุดสำหรับการถ่ายเทความร้อนอยู่ที่ตำแหน่ง  $X_m=2.5$  เซนติเมตร ระยะก่อนที่จะแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดสำหรับการถ่ายเทความร้อน สำหรับผลของการไหลเหนือช่องการไหลของของไหลของการกำเนิดกระแสไหลวนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นเปรียบเทียบกับกรไหลแบบราบเรียบ การถ่ายเทความร้อนรอบๆอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นเพิ่มขึ้น (56, 50, 36 เปอร์เซ็นต์) ที่ตำแหน่ง ( $X=0.5, 1.5, 2.5$  เซนติเมตร) ตามลำดับโดยใช้การกำเนิดกระแสไหลวนของกรไหลรูปวงแหวนที่ปราศจากการไหลแบบปั่นป่วน กรถ่ายเทความร้อนรอบๆอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นเพิ่มขึ้น (39, 42, 51 เปอร์เซ็นต์) ที่ตำแหน่ง ( $X=0.5, 1.5, 2.5$  เซนติเมตร) ตามลำดับโดยใช้การกำเนิดกระแสไหลวนของกรไหลของของไหลรูปสี่เหลี่ยมที่ปราศจากการไหลแบบปั่นป่วน



รูปที่ 2.34 แผนผังแสดงการทดลองของ Kattee et al. [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Kaji et al. [38] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนถึงผลกระทบของท่อที่มีสันอยู่ภายในของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระบายความร้อนด้วยอากาศเย็นของระบบปั๊มความร้อนด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ดังรูปที่ 2.35 ในระบบปั๊มความร้อนด้วย CO<sub>2</sub> ใช้น้ำมันโพลีอัลคิลไกลคอล [Poly alkylene glycol (PAG)] ถูกใช้โดยทั่วไปในการหล่อลื่นเครื่องคอมเพรสเซอร์ ขณะที่การรายงานเกี่ยวกับน้ำมันหล่อลื่น PAG นั้นมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากเข้ากันไม่ได้และต่อต้าน CO<sub>2</sub> ภายใต้สภาวะทำงานของมัน งานทดลองนั้นได้ดำเนินการตรวจสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีบและท่อถ่ายเทความร้อนโดยใช้ CO<sub>2</sub> เป็นสารทำความเย็นที่มีการใช้น้ำมัน PAG ที่ใช้ในการอธิบาย จากการศึกษาก่อนหน้านี้ก็กลับพบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญทั้งการระเหยของสารทำความเย็นในอีวาโปเรเตอร์และเครื่องทำความเย็นด้วยก๊าซทั้งสองสภาวะเมื่อผสมกับน้ำมัน งานวิจัยนี้นำเสนอผลการทดลองในสามประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยอากาศเย็นในท่อที่มีผิวเรียบและที่มีร่องสันอยู่ภายในท่อ พบว่าอัตราการเสื่อมประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนซึ่งเกิดจากน้ำมันนั้นแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตที่ผิวด้านในของท่อที่มีร่องสันภายในท่อ เพื่อทำความเข้าใจสำหรับการมองการไหลภายในท่อเหล่านี้ยังได้มองผ่านส่วนประกอบที่มีความโปร่งใสที่ทำจากแก้วซึ่งสามารถทนต่อแรงดันสูง ซึ่งได้รับการยืนยันว่าพฤติกรรมของน้ำมันที่อยู่ภายในท่อนั้นมีความเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสามารถที่จะปรับปรุงโดยการใช้ท่อที่มีร่องสันอยู่ภายในซึ่งเป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่จะเอาน้ำมันออกจากพื้นผิวภายในท่อเหล่านี้มีประสิทธิภาพในการพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงสำหรับระบบปั๊มความร้อนด้วย CO<sub>2</sub>

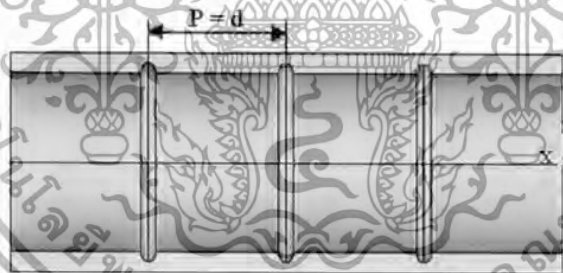


รูปที่ 2.35 แผนผังแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของ Kaji et al. [38]

Sainath et al. [39] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิในท่อที่มีร่องสันภายใน ดังรูปที่ 2.36 และ 2.37 ทำการเปรียบเทียบกับท่อที่ไม่มีสันด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกระบวนการของการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลวสองชนิดที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการของการนำความร้อน การพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อนในเครื่องทำความเย็นและเครื่องควบแน่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีประโยชน์ในกระบวนการทางวิศวกรรมหลายประเภทอาทิเช่น การทำความเย็นและระบบปรับอากาศ ระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบกระบวนการผลิตอาหารและเครื่องปฏิกรณ์ทางเคมี การถ่ายเทความร้อนและความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิในท่อที่มีร่องสันภายในของอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขจากการดำเนินการวิเคราะห์ห้วงสุดท้ายที่ใช้ทำท่อส่งถ่ายความร้อนที่แตกต่างกัน 4 ชนิดที่แตกต่างกันอาทิเช่น อลูมิเนียม เหล็กหล่อ ทองเหลือง ทองแดงและเหล็กกล้า อุณหภูมิคงที่ถูกนำมาใช้ที่พื้นผิวภายนอกของท่อและอุณหภูมิของน้ำที่ช่องท่อน้ำเข้าและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของเหลวกับผนังคังที่นั้นนำมาใช้สำหรับการประมาณค่าความร้อนของรูปทรงของท่อ ผลของความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นสำหรับใช้ในการประมาณการค่าการกระจายความเค้น Von Mises หลังจนวนและสมการการไหลได้รับการแก้ไขโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ใช้ในการคำนวณสนามความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ กล่าวได้ว่าค่าความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิในวัสดุที่แตกต่างกันนั้นมีความแตกต่างกัน เป็นผลให้ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิสูงสุดเกิดขึ้นในวัสดุอลูมิเนียมเพราะว่าอลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูง ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิขึ้นกับค่าการนำความร้อนของวัสดุโดยตรง ตำแหน่งของอัตราความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิสูงสุดภายในท่อนั้นถูกระบุโดยค่าสูงสุดในกรณีทั้งหมดของการทดสอบ ค่าความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิสูงสุดนั้นเกิดขึ้นที่ผิวด้านบนของร่องสันในวัสดุทุกชนิดที่ใช้ทดลอง



รูปที่ 2.36 รูปแบบของท่อที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ANSYS ของ Sainath et al. [39]



รูปที่ 2.37 ผลของการจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรม ANSYS ของ Sainath et al. [39]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 แนวทางการศึกษาวิจัย

จากงานวิจัยข้างต้นที่กล่าวมาส่วนใหญ่มุ่งสนใจที่จะศึกษาการขึ้นรูปท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งในปัจจุบันการผลิตท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายใน (Inner spiral ribbed copper tube: ISRCT) ขนาดเล็กพิเศษ เพื่อใช้เป็นท่อถ่ายเทความร้อนที่มีคุณภาพสูง ในปัจจุบันมีความต้องการที่สูงมากสำหรับท่อ ISRCT เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในวงการเครื่องใช้ไฟฟ้า เทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการผลิตในปัจจุบันต้องสามารถทำการผลิตท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในของท่อขนาดเล็กพิเศษเพื่อสนองความต้องการดังกล่าว โดย ISRCT ต้องมีลักษณะเด่นหลายๆประการ เช่น ท่อที่ผลิตได้ต้องมีขนาดเล็ก คุณภาพทางกายภาพสูง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดี และมีค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ โดยที่วิธีการผลิตที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนั้นเหมาะสำหรับการผลิตท่อที่มีขนาดใหญ่แต่ไม่เหมาะกับการผลิตท่อที่มีขนาดเล็กและยาว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาวิธีการผลิตท่อทองแดงมีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายใน (Inner spiral ribbed copper tube: ISRCT) ขนาดเล็กด้วยวิธีการดึงขึ้นรูป เพื่อศึกษาพฤติกรรมและการเสียรูปของ ISRCT ที่เกิดขึ้นโดยใช้ผลการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองสถานการณ์ในระบบสามมิติด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

2.3.1 ศึกษาการลดขนาด มิติของสัน และการเปลี่ยนแปลงแนวสันของท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายครั้งเดียว (Single-pass drawing)

2.3.2 ศึกษาการผลิตท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในขนาดเล็กด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกวาง

2.3.3 ศึกษาอิทธิพลของความเค้นดึงขึ้นรูปในการลดพื้นที่หน้าตัดรวมและขนาดมิติของท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกวาง

2.3.4 ศึกษาการนำโปรแกรม 3D FEM มาใช้ในการตรวจสอบท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในขนาดเล็กพิเศษด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกวาง

2.3.5 ศึกษาการประดิษฐ์ท่อทองแดงมีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็กโดยการดึงขึ้นรูปด้วยแมนเดรลของไหล

2.3.6 ศึกษาการนำโปรแกรม 3D FEM มาใช้ในการตรวจสอบอิทธิพลของความดันภายในที่มีผลต่อการดึงขึ้นรูปท่อทองแดงมีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็กเพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดึงขึ้นรูปด้วยแมนเดรลของไหล

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า งานวิจัยนี้จึงมีผลดีต่อการพัฒนาวิธีการผลิตท่อทองแดงมีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายใน (Inner spiral ribbed copper tube: ISRCT) ขนาดเล็กพิเศษที่ไม่สามารถกระทำได้จากอดีตที่ผ่านมา เป็นองค์ความรู้ใหม่ต่อการพัฒนากระบวนการผลิต สามารถลดต้นทุนการผลิตและมีผลดีต่อการผลิตในอนาคตต่อไป

## บทที่ 3

# ทฤษฎี

### 3.1 บทนำ

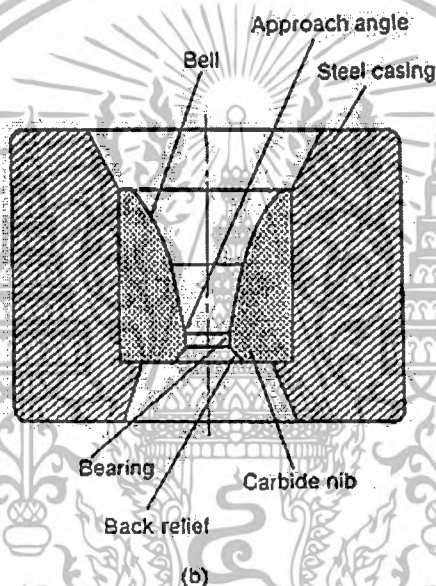
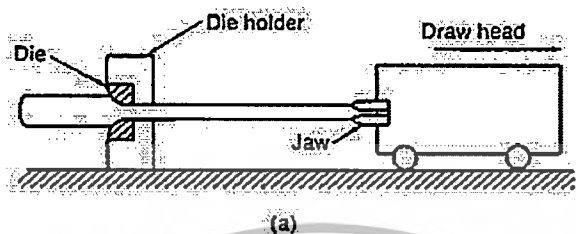
บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ Dieter, G.E. [40] กระบวนการดึงขึ้นรูป (Drawing Process) เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูป โดยการดึงขึ้นงานให้มีขนาดเล็กลง แต่มีความยาวเพิ่มขึ้นโดยการดึงผ่านตาย (Dies) การเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติกนั้นเกิดจากแรงอัดที่เพิ่มขึ้นที่กระทำต่อโลหะผ่านตาย โดยทั่วไปโลหะที่ดึงขึ้นรูปมีรูปทรงกลมแต่อาจไม่ใช่ก็ได้ ในขณะที่การดึงขึ้นรูปท่อแบบดึงขึ้นรูปผ่านตาย โดยไม่มีแมนเดรลอยู่ภายในท่อเรียกว่าการดึงขึ้นรูปแบบท่อกว้าง (Tube sinking) เมื่อแมนเดรลหรือปลั๊กถูกใช้ในการกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อภายในซึ่งถูกใช้ตลอดเวลาของการดึงขึ้นรูปผ่านตาย กระบวนการดังกล่าวถูกเรียกว่าเป็นกระบวนการดึงขึ้นรูป (Tube drawing)

### 3.2 การดึงขึ้นรูปท่อ

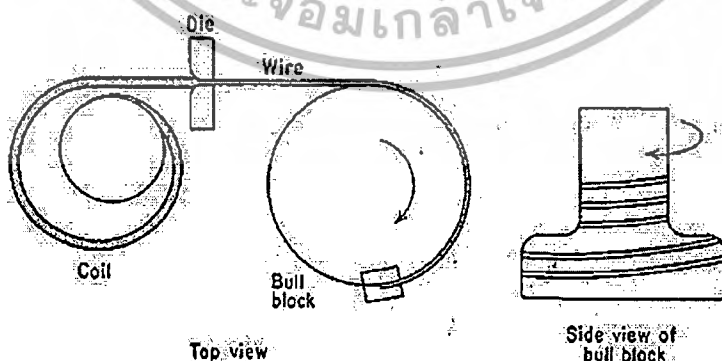
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการดึงขึ้นรูปแท่งสี่เหลี่ยม แท่งกลมหรือการดึงขึ้นรูปหลอดนั้นมีพื้นฐานที่ใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปนั้นจะมีขนาดรูปทรงที่แตกต่างกันก็ตาม โลหะแท่งกลมและท่อนั้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถมีวงเป็นขดได้ (รูปที่ 3.1a) หัวจับของเครื่องลากขึ้นรูปนั้นเคลื่อนที่โดยชุดลากที่ผูกยึดติดกับโซ่ขับหรือกลไกของระบบไฮดรอลิกส์ ความเร็วที่ใช้ในการลากขึ้นรูปนั้นเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 150 ถึง 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที

ชิ้นงานถูกดึงขึ้นรูปผ่านตายที่มีช่องทางเข้าเป็นรูปกรวยตลอดทั้งชิ้นงาน (รูปที่ 3.1b) ช่วงทางเข้าของตาย (คล้ายระฆัง) และช่วยเพิ่มการไหลของสารหล่อลื่นเข้าไปในตาย มุมทางเข้าของตายนั้นเป็นส่วนสำคัญของตายที่จะใช้ในการที่จะทำให้เกิดการลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานได้ ครึ่งมุมตาย ( $\alpha$ ) นั้นเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญในกระบวนการดึงขึ้นรูป ส่วนที่เป็นช่วงที่เกิดการเปลี่ยนรูปทรงตามขนาดกำหนด (Bearing) นั้นไม่ได้เป็นสาเหตุของการลดรูปแต่เป็นช่วงที่เกิดแรงเสียดทานจากการผลิตชิ้นงานที่เป็นหลอดที่เกิดจากการลากขึ้นรูป ฟังก์ชันที่สำคัญที่สุดของช่วงแบร์ริงนั้นเป็นส่วนที่ยอมรับได้สำหรับผิวสำเร็จของชิ้นงานที่ผ่านมาจากช่วงมุมกรวยของตาย (เพื่อลดความเสียหายที่ผิวบนทรงกรวยของตาย) โดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงขนาดที่ช่องทางออกของตาย การสปริงตัวกลับของโลหะนั้นขยายออกน้อยมากในขณะที่เส้นหลอดผ่านตายออกไป มีความเป็นไปได้น้อยมากของการถลอกเป็นรอยที่จะเกิดขึ้น ส่วนใหญ่ของตายที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปนั้นทำมาจากวัสดุประเภทสารประกอบคาร์ไบด์หรือตายเพชรที่ใช้ในอุตสาหกรรม (สำหรับหลอดที่ต้องการผิวละเอียดมาก) ส่วนที่เป็นขอบสัมผัสกับผิวชิ้นงานของตายจะถูกสวมอยู่ในบล็อกเหล็กกล้าสำหรับส่วนลำตัวของตาย ความแตกต่างระหว่างหลอดและโลหะแท่งกลมนั้นค่อนข้างที่จะไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่นอน โดยทั่วไปในส่วนของหลอดนั้นมักจะมองว่ามีขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางที่น้อยกว่า 5 มิลลิเมตร ลงไปซึ่งอาจจะใช้วิธีการดึงขึ้นรูปอย่างรวดเร็วในเครื่องดึงขึ้นรูปหลอดแบบใช้ตายจำนวนมากที่ดึงขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 3.1 (a) เครื่องลากขึ้นรูป (b) ภาพตัดของตายที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป Dieter, G.E. [40]



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปหลอด Dieter, G.E. [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

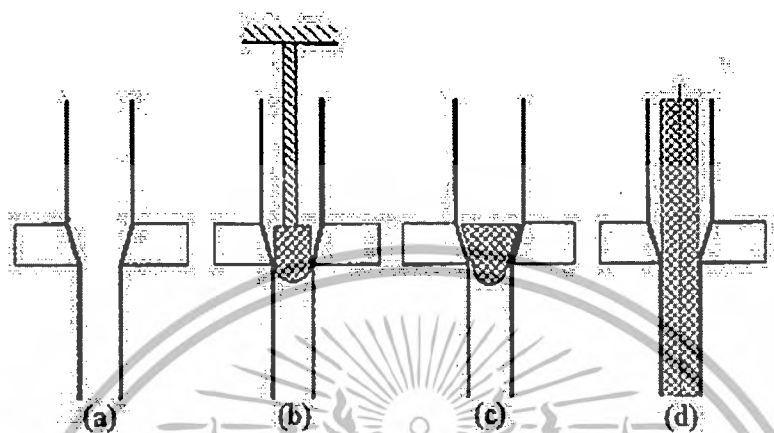
โดยปกติการดึงขึ้นรูปหลอด ดังแสดงในรูปที่ 3.2 นั้นเริ่มต้นจากเหล็กแท่งกลมที่ผ่านกระบวนการดึงขึ้นรูปร้อนที่มีมวลมาเป็นขีด เริ่มแรกทำการล้างโดยการจุ่มลงในสารกัดกร่อนเพื่อกำจัดคราบสนิมที่ผิวของมวลเหล็กแท่งกลมซึ่งเป็นผิวของแท่งเหล็กที่มีความบกพร่องออกไปก่อนหรือส่วนที่จะทำให้ผิวของช่วงทางเข้าของมุดตายเกิดความเสียหายได้เกิดรอยขีดข่วนหรือรอยถลอกได้ ขั้นตอนต่อจากนั้นเป็นการจัดเตรียมการเคลือบสารหล่อลื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน ซึ่งวัสดุที่มีความแข็งมาๆจะทำการเคลือบผิวด้วยวัสดุที่อ่อนกว่า อาทิเช่น ทองแดงหรือสังกะสีเพื่อใช้เป็นสารหล่อลื่น ชนิดที่ใช้อย่างแพร่หลายได้แก่เกลือซัลเฟต (Sulfates) หรือเกลือเคมี (Oxalates) ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นสารหล่อลื่นสำหรับโลหะที่เป็นแท่งกลมที่ใช้ในการดึงหลอดที่ใช้ร่วมกันกับสารหล่อลื่นได้ ตัวอย่างเช่นสบู่ที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปแบบแห้ง สำหรับการดึงขึ้นรูปแบบเปียกนั้นตายและแท่งโลหะกลมจะถูกจุ่มอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นอย่างสมบูรณ์ ในการดึงขึ้นรูปท่อต้องพิจารณาถึงการเปลี่ยนรูปโดยการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลงถึง 50 เปอร์เซ็นต์ นั้นมีความสำคัญมาก ปัญหาของการออกแบบเครื่องมือและการจัดเตรียมท่อถือว่ามีความสำคัญมากยิ่งขึ้นกว่ากรรมวิธีการผลิตหลอดเสียอีก ท่อสำเร็จที่ผ่านกระบวนการดึงขึ้นรูปร้อนมาแล้วเป็นท่อแบบไร้ตะเข็บถูกใช้เป็นวัสดุเริ่มต้นในการดึงขึ้นรูปท่อ จากนั้นก็ตัดกรวดหรือพันทรายร้อนตามมาด้วยการเคลือบสารหล่อลื่นเป็นขั้นตอนที่ปฏิบัติเบื้องต้น อย่างไรก็ตามในขณะที่เปอร์เซ็นต์ของข้อบกพร่องภายในเนื้อวัสดุที่เกิดจากการกระทำดังกล่าวนี้จะลดลงเมื่อวัสดุที่นำมาใช้ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูปมากกว่า วัสดุที่เป็นแผ่นรีดขึ้นรูป ซึ่งจะดีกว่าถ้าใช้เหล็กแท่งหล่อมาผ่านกระบวนการดัดขึ้นรูปเป็นท่อและท่อที่หล่อมาจากกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องจากนั้นใช้วิธีการตีขึ้นรูปแบบโรตารี (Rotary swaging) ซึ่งสามารถกำหนดขนาดได้โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 175 มิลลิเมตร และความยาว 3.75 เมตร ซึ่งเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการดึงขึ้นรูปเย็นต่อไป

อย่างไรก็ตามเพื่อเริ่มต้นกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อจะต้องทำการลดขนาดปลายท่อเพื่อให้สามารถสอดผ่านเข้าไปในตายแล้วจับปลายท่อด้วยปากจับยึดของเครื่องลากขึ้นรูปแล้วดึงขึ้นรูปผ่านตาย การดำเนินการอื่นๆอาจใช้วิธีการตีขึ้นรูปแบบโรตารีที่มีหัวดอกหมุนตอกขึ้นรูปโดยรอบๆซึ่งงานด้วยแรงกระทำที่ลำตัวของท่อเพื่อให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตามขนาดที่ต้องการ การดำเนินการของทั้งสองกระบวนการต้องให้แรงกระทำเลยจุดครากของวัสดุกระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดความเครียดแข็งสะสมอยู่ในเนื้อวัสดุ ดังนั้นก่อนที่จะนำไปดึงขึ้นรูปต่อไปเพื่อให้วัสดุลดความเครียดแข็งหรือความเค้นตกค้างในวัสดุออกไปก่อนด้วยการนำวัสดุไปทำการอบอ่อน ต่อจากนั้นจึงนำท่อที่ผ่านการอบอ่อนไปทำการดึงขึ้นรูปต่อไป แต่การอบอ่อนก็ทำให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

### 3.3 ความเค้นและกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อ

การผลิตท่อที่มีลักษณะกลวงนั้นเริ่มต้นจากกระบวนการขึ้นรูปร้อนตัวอย่างเช่น การดันอัดขึ้นรูป (Extrusion) การแทงเจาะขึ้นรูป (Piercing) และการรีดขึ้นรูป (Rolling) หลังจากนั้นจะใช้กระบวนการขึ้นรูปเย็นเพื่อเก็บรายละเอียดของขนาดและผิวสำเร็จของท่ออีกครั้งหนึ่ง การขึ้นรูปเย็นนั้นใช้ในการกำหนดระยะพิคัดความเผื่อของมิติรูปทรงและความเรียบของผิวที่ดีกว่า อีกทั้งยังช่วยในการเพิ่มคุณสมบัติทางกลของท่อที่เกิดจากความเครียดแข็งในเนื้อวัสดุอีกด้วย สำหรับการผลิตท่อที่มีผนังบางและเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กกว่าที่จะสามารถทำได้จากกระบวนการขึ้นรูปร้อนและยังสามารถทำการผลิตท่อที่มีรูปทรง

อื่นๆที่ไม่ใช่ท่อกลมได้อีกด้วย รูปแบบพื้นฐานของกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อที่ใช้ในการผลิตมี 3 รูปแบบด้วยกันได้แก่ การดึงขึ้นรูปท่อแบบท่อกลวง (Tube sinking) การดึงขึ้นรูปท่อแบบใช้ปลั๊ก (Plug drawing) และการดึงขึ้นรูปท่อแบบใช้แมนเดรล (Mandrel drawing)



รูปที่ 3.3 วิธีการดึงขึ้นรูป (a) แบบท่อกลวง (b) แบบปลั๊กยึดติดกับที่ (c) แบบปลั๊กลอย (d) แบบแมนเดรลเคลื่อนที่ Dieter, G.E. [40]

โดยที่การดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงนั้นภายในของท่อขณะทำการดึงขึ้นรูปปราศจากสิ่งรองรับที่อยู่ด้านในของท่อ (รูปที่ 3.3a) ความหนาของผนังท่อและผิวภายในของท่อไม่สามารถควบคุมได้เป็นเพราะว่าความเค้นเฉือนที่ทางเข้าและทางออกของดายนั้นสูงมาก ความเครียดที่กระทำซ้ำๆนั้นมีค่าสูงมากสำหรับการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงและขีดจำกัดของการเปลี่ยนรูปของท่อที่แมนย่านั้นต่ำกว่ากระบวนการดึงขึ้นรูปท่อด้วยวิธีการอื่นๆ ถ้าทั้งเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกของท่อถูกควบคุมด้วยปลั๊กและดายนในการดึงขึ้นรูป (รูปที่ 3.3b) ปลั๊กดังกล่าวอาจจะเป็นแท่งทรงกระบอกหรือเป็นกรวยตันก็ได้ทั้งสองอย่าง ปลั๊กนั้นใช้ควบคุมรูปทรงและขนาดภายในของท่อได้เป็นอย่างดีแต่สำหรับการผลิตท่อที่มีขนาดใหญ่กว่าจะใช้วิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงจะมีความเหมาะสมกว่า เป็นเพราะว่าค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการใช้ปลั๊กนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น การลดพื้นที่หน้าตัดในการดึงขึ้นรูปนั้นไม่ควรมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ ที่สำคัญควรระมัดระวังในการใช้วิธีการดึงขึ้นรูปแบบปลั๊กลอยบริเวณส่วนด้านหน้าของคอคอดให้เข้ากันกับดายนได้อย่างเหมาะสม (รูปที่ 3.3c) สมบัติจำเพาะในการออกแบบปลั๊กลอยนั้นสามารถที่จะอนุญาตให้ใช้ค่าการลดพื้นที่หน้าตัดของท่อได้ถึง 45 เปอร์เซ็นต์ และการลดขนาดของแรงในการดึงขึ้นรูปให้ต่ำกว่าแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีแบบปลั๊กยึดติดกับที่ ลักษณะเด่นที่สำคัญของการออกแบบนั้นมันสามารถที่จะทำการดึงและม้วนเป็นขดได้ในเวลาเดียวกันในการดึงขึ้นรูปท่อที่มีความยาวมากๆได้ อย่างไรก็ตามการออกแบบเครื่องมือและการหล่อลื่นในการดึงขึ้นรูปนั้นต้องใช้ความพิถีพิถันเป็นพิเศษ ปัญหาในเรื่องของแรงเสียหายขณะทำการดึงขึ้นรูปท่อนั้นน้อยที่สุดในการดึงขึ้นรูปท่อแบบใช้แมนเดรลที่มีความยาวและเคลื่อนที่ไปพร้อมกับท่อในขณะที่ทำการดึงขึ้นรูป (รูปที่ 3.3d) แมนเดรลนั้นทำจากแท่งวัสดุหรือลวดที่มีความแข็งมากที่มีความยาวที่สอดใส่เข้าไปภายในท่อพร้อมกับการดึงท่อผ่านดายนตลอดขั้นตอนของการดึงท่อแบบแมนเดรลเคลื่อนที่ดังกล่าว แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปท่อแบบแมนเดรลเคลื่อนที่นั้นถูกถ่ายทอดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังขึ้นส่วนของโลหะโดยการดึงขึ้นรูปผ่านช่องทางออกของด้ายโดยที่แรงเสียดทานที่ถ่ายทอดให้กันและกันตลอดความยาวระหว่างท่อกับแมนเดรลในขณะที่ทำการดึงขึ้นรูป ดังนั้นแมนเดรลจะถูกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เท่ากันตลอดระยะทางการดึงขึ้นรูปท่อไปจนถึงช่องทางออกของด้าย ดังนั้นความเร็วของท่อที่ถูกดึงที่ทางออกจะสูงกว่าช่วงที่ท่อสัมผัสกับด้ายจึงทำให้ความเสียดทานเกิดการลากเคลื่อนที่ไปข้างหน้าที่ผิวระหว่างแมนเดรลซึ่งนำไปสู่การไม่เกิดการลากเคลื่อนที่ย้อนกลับระหว่างส่วนของด้ายที่ไม่เคลื่อนที่และท่อ อย่างไรก็ตามภายหลังจากการดึงขึ้นรูปจะต้องนำเอาแมนเดรลออกจากท่อในขั้นตอนสุดท้ายโดยใช้วิธีการรีดป็น (Reeling) ซึ่งจะเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและกระทบกับค่าพิคัดความเผื่อด้านรูปทรงของท่อบ้างเล็กน้อย

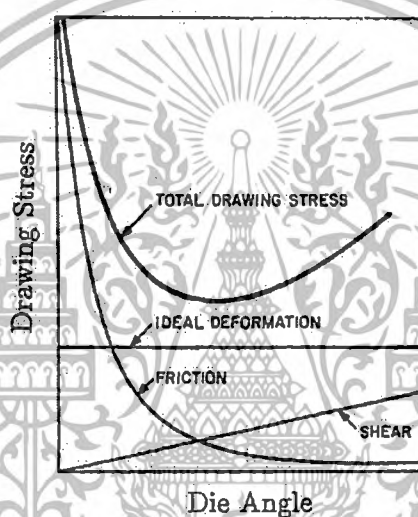
กระบวนการดึงขึ้นรูปท่อเป็นเพียงหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่ใช้ในการผลิตท่อ กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบอื่นๆที่ใช้ในการผลิตท่อได้แก่ การหล่อ การเจาะ การตัดและการอัดขึ้นรูป ข้อได้เปรียบของกระบวนการดึงขึ้นรูปที่เหนือกว่ากระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบอื่น ๆ คือการผลิตท่อที่มีผนังบางขึ้น การผลิตท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กขึ้น การผลิตท่อที่มีความยาวมากขึ้น การผลิตท่อที่มีพื้นผิวสำเร็จที่ดีขึ้น การผลิตท่อที่มีความคลาดเคลื่อนทางด้านขนาดมิติน้อยลง การผลิตท่อที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น รูปทรงการผลิตอื่นที่ไม่ใช่ทรงกลม การผลิตท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน ความหนาของผนังตั้งแต่ต้นจนจบ การผลิตท่อขนาดเล็กที่มีขนาดหลากหลายจำนวนมากและไม่ต้องปรับแก้เครื่องมือวัดที่ใช้ในการผลิตสำหรับการรีดร้อน McGannon [41]

เป้าหมายสูงสุดในการบวนการผลิตคือการผลิตสินค้าที่มีคุณภาพสูงสุดในราคาที่ต่ำสุด กระบวนการขึ้นรูปโลหะทั่วไปเป็นการเปลี่ยนรูปร่างในวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันในชิ้นงานเสมอไป เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีสภาวะความเครียดเชิงในรูปแบบของความเค้นตกค้างหลงเหลืออยู่ ความเค้นตกค้างที่เหลืออยู่เปลี่ยนเป็นความเค้นภายในวัสดุด้วยตัวของมันเองซึ่งอยู่ในรูปแบบวัตถุอิสระในกรณีที่ไม่มีการกระทบจากปัจจัยภายนอก การกระจายตัวของความเค้นตกค้างโดยธรรมชาติเป็นผลมาจากพฤติกรรมของความล้าลักษณะจำเพาะของการกัดกร่อนเนื่องจากความเค้นและเสถียรภาพทางด้านมิติจากการขึ้นรูปด้วยเครื่องจักร Srinivasan [42] ความเค้นตกค้างนั้นมีทั้งที่เป็นอันตรายและที่เป็นประโยชน์กับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วย หากชิ้นงานขึ้นรูปมาจากเครื่องจักร การกำจัดความเค้นตกค้างนำไปสู่การเปลี่ยนรูปในเนื้อวัสดุซึ่งเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มขึ้นตามขนาดของความเค้น ความแข็งแรงจากความล้าของโลหะนั้นมากขึ้นเมื่อความเค้นตกค้างบนพื้นผิวด้านนอกเป็นความเค้นอัดมากกว่าความเค้นดึง Richards [43] ความเค้นอัดตกค้างประสิทธิผลบนพื้นผิวเปลี่ยนเป็นความเค้นดึงในระดับที่ไม่ทำให้เกิดรอยแตกและความเสียหายลดลง ความเค้นดึงตกค้างประสิทธิผลยกระดับขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและนำไปสู่การเกิดการแตกหักขึ้นได้โดยไม่คาดคิด Wu [44] ในการขึ้นรูปเย็นความเค้นจุดครากนั้นสูงกว่าความเค้นจุดครากของชิ้นงานจากการขึ้นรูปร้อน ดังนั้นความเค้นตกค้างในวัสดุชิ้นงานในการขึ้นรูปเย็นนั้นมีค่าสูงกว่า ความเค้นตกค้างนั้นสามารถเกิดขึ้นได้จากการชุบแข็ง การขึ้นรูปด้วยเครื่องจักรหรือจากการเชื่อมด้วยเช่นกัน

ความเค้นในการดึงขึ้นรูปนั้นเป็นความเค้นตามแนวยาวของผนังท่อที่ทางออกของด้ายและปลักหาได้จากการนำแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปท่อที่ผ่านด้ายและปลักหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่อ รูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบของความเค้นในการดึงขึ้นรูปสามรูปแบบและการเปลี่ยนแปลงของมุมด้าย มุมด้ายคือมุมที่วัดจากแนวกึ่งกลางของท่อกับพื้นผิวของด้าย ความเค้นในการดึงขึ้นรูปที่ต้องการนั้นเป็นความเค้นใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนรูปในอุดมคติ สิ่งจำเป็นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านมิติรูปร่างนั้นเป็นอิสระจากผลกระทบของมุมตาย ความเค้นในการดึงขึ้นรูปที่ต้องการที่จะเอาชนะแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างตายกับชิ้นงานนั้นสูงมากเมื่อค่าของมุมตายต่ำมากและอธิบายได้ว่าเข้าใกล้มุมตายที่เหมาะสม เพราะนี่คือการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวสัมผัสในมุมตายที่มีขนาดเล็ก ความเค้นที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปในการเปลี่ยนรูปของท่อนั้นไม่ใช่การขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกันหรือความเค้นเฉือนที่สลับไปมาจากมุมตายที่เริ่มต้นจากศูนย์องศาและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเป็นเชิงเส้น ความเค้นเฉือนที่สลับไปมานั้นเพิ่มขึ้นตามความยาวของท่อเป็นผลให้การเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง ความเค้นในการดึงขึ้นรูปรวมนั้นหาได้จากการรวมความเค้นอุดมคติจากการขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Ideal deformation) แรงเสียดทาน (Friction) และความเค้นจากแรงเฉือน (Shear) สลับไปมารวมเข้าด้วยกันในการเปลี่ยนรูปของท่อ [45]



รูปที่ 3.4 องค์ประกอบของความเค้นในการดึงขึ้นรูปสามรูปแบบ Dieter, G.E. [45]

วิธีการของการกำหนดความเค้นในการดึงขึ้นรูปและความเค้นตกค้างในเนื้อวัสดุนั้นได้จากผลของการทดลอง การวิเคราะห์เชิงตัวเลข วิธีการทดลองนั้นมีค่าใช้จ่ายที่สูงมากและต้องใช้เวลา การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสามารถใช้กำหนดค่าความเค้นในการดึงขึ้นรูป อย่างไรก็ตามความเค้นตกค้างในเนื้อวัสดุไม่สามารถที่จะกำหนดได้ ความเค้นดึงขึ้นรูปและความเค้นตกค้างสามารถหาได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขดังเช่นวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นเป็นเทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างที่ใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองการตอบสนองของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงขนาดของแรงและสภาวะแวดล้อมที่หลากหลายในชิ้นงาน

การดำเนินงานขึ้นรูปโลหะที่มีความหลากหลาย ความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตนั้นเกิดจากการเปลี่ยนรูปของวัสดุในช่วงพลาสติก สิ่งจำเป็นในการทำงานคือการเอาชนะแรงเสียดทาน ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุและทำให้เกิดความเค้นที่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การวิเคราะห์เชิงความร้อนนั้นมีความซับซ้อนหรือสัมพันธ์กับคุณสมบัติเชิงกลและการเปลี่ยนรูปทางความร้อนรวมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การวิเคราะห์กระบวนการดิ่งขึ้นรูปท่อ

ในกระบวนการดิ่งขึ้นรูปท่อโดยใช้ปลັกดและแมนเดรลนั้นเกิดขึ้นในการเปลี่ยนรูปร่างขณะการลดขนาดความหนาของผนังท่อมากที่สุด โดยปกติเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อนั้นลดลงจำนวนเท่าๆกับที่ต้องการจากการสอดใส่ปลັกดหรือแมนเดรลเข้าไปภายในท่อก่อนการดิ่งขึ้นรูป ดังนั้นความเครียดที่เกิดจากแรงดันภายในท่อ Hoffman และ Sachs [46] จึงไม่เกิดขึ้นและจากการวิเคราะห์สามารถที่จะกำหนดเป็นสถานะพื้นฐานของความเครียดในแนวระนาบได้ การดิ่งขึ้นรูปโดยใช้ปลັกดนั้นความเค้นในการดิ่งขึ้นรูปสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

$$\sigma_{xa} = \sigma_0'' \frac{1+B'}{B'} \left[ 1 - \left( \frac{h_a}{h_b} \right)^{B'} \right] \quad (3.1)$$

โดยที่  $B' = \frac{\mu_1 + \mu_2}{\tan \alpha - \tan \beta}$

และ  $\sigma_{xa}$  = ความเค้นตามแนวแกน x (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

$\sigma_0''$  = ความเค้นที่จุดคราก (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

$\mu_1$  = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างผนังท่อและด้าย

$\mu_2$  = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างท่อและปลັกด

$\alpha$  = ครึ่งมุมด้าย (องศา)

$\beta$  = ครึ่งมุมปลັกด (สำหรับปลັกดทรงกระบอก  $\beta = 0$ ) (องศา)

$h_a$  = ความหนาผนังท่อที่ทางออก (มิลลิเมตร)

$h_b$  = ความหนาผนังท่อที่ทางเข้า (มิลลิเมตร)

ในกระบวนการดิ่งขึ้นรูปท่อโดยใช้ปลັกดลายนั้นสมการที่ใช้ในการออกแบบปลັกดลายนั้นมีความสำคัญมากกว่าค่าความเค้นในการดิ่งขึ้นรูป เห็นได้จากที่บรรยายไว้โดย Blazynski [47]

ในกระบวนการดิ่งขึ้นรูปท่อโดยใช้แมนเดรลแบบเคลื่อนที่นั้นแรงเสียดทานที่ส่งถ่ายในระหว่างท่อและด้ายมีทิศทางไปข้างหน้าตามช่วงทางเข้าของด้ายนั้นมีค่าคงที่เช่นเดียวกับการดิ่งขึ้นรูปลวดและการดิ่งขึ้นรูปท่อโดยใช้ปลັกด อย่างไรก็ตามที่ได้บรรยายไว้ก่อนหน้านี้ว่าแรงเสียดทานที่ส่งถ่ายในระหว่างท่อและแมนเดรลนั้นมีทิศทางไปข้างหน้าของช่วงทางออกของด้าย ดังนั้นการใช้แมนเดรลเคลื่อนที่  $B'$  จะเปลี่ยนเป็น

$$B' = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\tan \alpha - \tan \beta}$$

ค่าความเค้นในการดัดขึ้นรูปในสมการที่ 3.1 ค่าของ  $B'$  เมื่อ  $\mu_1 = \mu_2$  นั้นอาจจะเป็นกรณีที่เกิดขึ้นบ่อยๆ เมื่อ  $B' = 0$  สมการดิฟเฟอเรนเชียลแบบสมมูลในกรณีทั่วไปจะได้

$$hd\sigma_x + (\sigma_x + p)dh = 0$$

ซึ่งอินทิเกรตสมการโดยตรงสำหรับการเปลี่ยนรูปแบบอุดมคติของวัสดุที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน อย่างไรก็ตามเป็นไปได้ที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานทั้งหมดบนแมนเดรล  $\mu_2$  นั้นมีค่ามากกว่าของตาย  $\mu_1$  ดังนั้นมี  $B'$  ค่าติดลบ ผลลัพธ์ดังกล่าวจึงทำให้แรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปมีค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็นโดยสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานในการเปลี่ยนรูปร่างแบบอุดมคติมีค่าเล็กน้อย สำหรับการดัดขึ้นรูปแบบทอกลวงนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อลดลง ถึงแม้ว่ามันจะไม่สนใจถึงผลกระทบในการเปลี่ยนรูปร่างจวบจนถึงทุกวันนี้ก็ตาม บางทีการลดลงของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อนั้นก็เป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการดัดขึ้นรูปท่อด้วยเช่นกัน

ความเค้นที่เกิดขึ้นในการดัดขึ้นรูปแบบทอกลวงนั้นสามารถทำการวิเคราะห์ที่ได้โดยใช้สมมติฐานว่าความหนาของผนังท่อหลังการดัดขึ้นรูปแบบทอกลวงนั้นมีค่าคงที่ Suchs และ Baldwin [48] สมการความเค้นในการดัดขึ้นรูปที่ทางออกของตายนั้นมีความคล้ายคลึงกับสมการที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปหลอดเช่นกัน พื้นที่ภาคตัดของท่อนั้นสัมพันธ์กับรัศมีกลางท่อ  $r$  และความหนาของผนังท่อ  $h$  โดยที่  $A = 2\pi rh$

$$\sigma_{xa} = \sigma_0'' \frac{1+B}{B} \left[ 1 - \left( \frac{A_f}{A_b} \right)^B \right] \quad (3.2)$$

โดยที่  $B = \mu \cot \alpha$   
 และ  $\mu =$  สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระหว่างท่อกับผนังตาย  
 $\alpha =$  ครึ่งมุมตาย (องศา)  
 $\sigma_{xa} =$  ความเค้นตามแนวแกน  $x$  (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)  
 $\sigma_0'' =$  ความเค้นที่จุดคราก (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)  
 $\sigma_0 =$  ความเค้นตั้งฉาก (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)  
 $A_f =$  พื้นที่ทางออกหลังดัดขึ้นรูป (ตารางมิลลิเมตร)  
 $A_b =$  พื้นที่ทางเข้าก่อนดัดขึ้นรูป (ตารางมิลลิเมตร)

ความเค้นที่จุดคราก  $\sigma_0''$  นั้นเท่ากับ  $1.1\sigma_0$  โดยขนาดของความเค้นเกี่ยวข้องกันกับการดัดขึ้นรูปแบบทอกลวง Swift [49]

การดัดขึ้นรูปนั้นถูกศึกษาในครั้งแรกในปี 1935 โดย Siebel และ Weber [50] ได้ศึกษาลงไปที่สมการที่ใช้ทำนายความเค้นที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปโดยใช้วิธีการเปลี่ยนรูปพลังงานแบบสม่ำเสมอ งานที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปนั้นกำหนดโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_d = \int \bar{\sigma} d\epsilon \quad (3.3)$$

$\bar{\sigma}$  คือ ความเค้นเฉลี่ยที่จุดคราก วิธีการเปลี่ยนรูปพลังงานแบบสม่ำเสมอถือว่าการไหลของความเค้นคงที่ ความเครียดในการเปลี่ยนรูปเกิดขึ้นในแนวระนาบ ไม่นำค่าแรงเสียดทานมาพิจารณาและการทำงานที่กระทำซ้ำๆ การประยุกต์ใช้สมการของการทำงานสำหรับการเปลี่ยนรูปสำหรับปลั๊กเรียวยืดติดกับที่จะสามารถทำนายความเค้นในการดัดขึ้นรูปได้โดย Siebel และ Weber [50]

$$\sigma_d = \bar{\sigma} \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left( \frac{R_{oi}^2 - R_{ii}^2}{R_{of}^2 - R_{if}^2} \right) \quad (3.4)$$

โดยที่  $R_{oi}$  คือ รัศมีภายนอกเริ่มต้น  $R_{ii}$  คือ รัศมีภายในเริ่มต้น  $R_{of}$  คือ รัศมีภายนอกสุดท้าย  $R_{if}$  คือ รัศมีภายในสุดท้าย

Thomsen, Yang และ Kobayashi [51] ได้ปรับปรุงงานของ Siebel และ Weber ในปี ค.ศ 1965 โดยคิดค่าแรงเสียดทานในการดัดผ่านพื้นผิวภายในและภายนอกของท่อ มีผลให้สมการสำหรับการดัดขึ้นรูปเปลี่ยนรูปเป็น

$$\sigma_d = \bar{\sigma} \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left( \frac{R_{oi}^2 - R_{ii}^2}{R_{of}^2 - R_{if}^2} \right) + \frac{P\mu}{R_{of}^2 - R_{if}^2} \left[ \cot \beta (R_{ii}^2 - R_{if}^2) + \cot \alpha (R_{ii}^2 - R_{if}^2) \right] \quad (3.5)$$

โดยที่  $P$  คือ ความดันเฉลี่ยบนพื้นผิวของด้ายและปลั๊ก มุมของด้ายและปลั๊กคือ  $\alpha$  และ  $\beta$  ตามลำดับ ความดันเฉลี่ยบนพื้นผิวของด้ายและปลั๊กนั้นกำหนดโดยการสมมติให้เป็นวัสดุที่ไม่สามารถยึดตัวได้ (วัสดุเกร็ง) และความเครียดในการเปลี่ยนรูปเป็นแนวระนาบจะได้

$$P + \sigma_z = \sigma_0 \quad (3.6)$$

โดยที่  $\sigma_z$  คือ ความเค้นตามแนวยาวของท่อ  $\sigma_0$  คือ ความเค้นตั้งฉาก และ  $\bar{\sigma}$  คือ ความเค้นเฉลี่ยที่จุดคราก ค่าความเค้นเฉลี่ยที่จุดครากนั้นเป็นค่าความเค้นเฉลี่ยหลังการเปลี่ยนรูปที่จุดคราก

Sachs, Lubahn และ Tracy [52] ประยุกต์ Slab Method ในการดัดขึ้นรูปท่อเพื่อทำนายความเค้นออกแบบ ( $\sigma_d$ ) ในการดัดขึ้นรูปในชิ้นงานโดยใช้สมการ

$$\sigma_d = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma} \frac{1 + \beta^*}{\beta^*} \left[ 1 - \left( \frac{R_{of} - R_{oi}}{R_{if} - R_{ii}} \right)^\beta \right] \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$\beta^* = \frac{2\mu}{\tan \alpha - \tan \beta}$$

ผลกระทบของแรงเสียดทานได้รวมอยู่ในความเค้นในการดิ่งขึ้นรูปแต่ไม่ซ้ำซ้อนกับงานที่กระทำซ้ำๆ

Collins และ Williams [53] ได้ประยุกต์ใช้ Slip-Line Field Theory ในกรณีการดิ่งขึ้นรูปท่อแบบสมมาตรตามแนวแกน วิธีการ Slip-Line นั้นใช้ในการแก้ปัญหาการไหลในช่วงพลาสติกที่ซับซ้อนโดยการสร้างแนวสนามความเค้นสูงสุด แนวเฉือนนั้นเป็นคุณลักษณะจำเพาะของสมการดิฟเฟอเรนเชียลสมมูลแบบอยู่นิ่งโดยยอมให้อัตราความเครียดและการกระจายอัตราความเครียดเกิดขึ้นได้ เนื่องจากลักษณะสมมาตรตามแนวแกนของการดิ่งขึ้นรูปท่อ การใช้สมการดิฟเฟอเรนเชียลแบบไม่เชิงเส้นเพื่อสร้างสมการทั่วไปสำหรับความเค้นในการดิ่งขึ้นรูปนั้นไม่สามารถกระทำได้ วิธีการแก้ปัญหาโดยวิธีของ Collins และ Williams นั้นโดยใช้วิธีการ Slip-Line โดยใช้เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง

การวิเคราะห์ด้วยวิธี upper-bound และ lower-bound นั้นออกแบบมาเพื่อให้การใช้พลังงานที่เกิดขึ้นจริงหรือความเค้นในการขึ้นรูปที่ต้องการนั้นโดยวิธี upper-bound จะมีค่าน้อยกว่าที่คาดการณ์และจะมีค่ามากกว่าที่คาดการณ์โดยวิธี lower-bound สำหรับพื้นฐานในการพัฒนาการวิเคราะห์ upper-bound และ lower-bound ทั้งคู่แบ่งขึ้นส่วนออกเป็นส่วนๆ ในแต่ละโซน สำหรับสนามความเร็วใช้วิธี upper-bound และสนามความเค้นใช้วิธี lower-bound จะเหมาะสมกว่าโดยเลือกโซนและสนามที่เหมาะสม ความถูกต้องของผลเฉลยนั้นเป็นค่าที่เกิดขึ้นจริงโดย Kiuchi [54] สำหรับ lower-bound ถูกนำเสนอโดย Durban [55] ความเค้นในการดิ่งขึ้นรูปนั้นแสดงโดย

$$\sigma_d = 2 \left( 1 + \frac{\mu}{(\alpha - \beta + \mu)Q - \mu} \right) \left( 1 + \frac{E_T}{\sigma_0} \right) \ln \phi \quad (3.8)$$

โดยที่  $E_T$  คือ โมดูลัสสัมผัส

$$Q = \frac{\frac{1}{2}(\phi^2 - 1) \left( 1 + \frac{E_T}{\sigma_0} \right) - \frac{E_T}{\sigma_0} \ln \phi}{\left( 1 + \frac{E_T}{\sigma_0} \ln \phi \right) \ln \phi}$$

และ

$$\phi = \frac{R_{oi}}{\sin \alpha}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hartley [56] ประยุกต์ใช้วิธีการ upper-bound สำหรับกระบวนการดิ่งขึ้นรูปท่อโดยสมมติว่าเป็นวัสดุเกร็งที่อยู่ในช่วงพลาสติกอย่างสมบูรณ์แบบ Bramley [57] ได้นำวิธีการ upper-bound มาใช้แก้ปัญหาสำหรับหาค่าความเค้นในการดิ่งขึ้นรูป Bramley สามารถนำรูปแบบที่เกี่ยวข้องกับความเครียดแข็งมาใช้และเหตุผลที่เกิดจากงานที่กระทำซ้ำๆ Hartley [58] ได้นำวิธีการ upper-bound มาใช้พิสูจน์หามุมปลีกที่เหมาะสมสำหรับมุมตายโดยเฉพาะ การลดพื้นที่หน้าตัดของท่อและความเสียหายซึ่งเกิดความเค้นในการดิ่งขึ้นรูปที่ต่ำที่สุด

กระบวนการดิ่งขึ้นรูปท่อนั้นโดยทั่วไปกระทำอยู่ที่อุณหภูมิห้องและเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดคร่าวๆ ทำให้เกิดความร้อนขึ้น Lange [59] คำนวณหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta T$ ) ได้ โดยสมมติว่าการขึ้นรูปเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน

$$\Delta T = \sigma_d \ln \frac{A_0}{A_1} \left( \frac{1}{c\rho} \right) \quad (3.9)$$

โดยที่  $c$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะ ( $J/kg \cdot ^\circ C$ ) และ  $\rho$  คือ ค่าความหนาแน่น ( $kg/m^3$ )

ค่าความเค้นในการดิ่งขึ้นรูปนั้นกำหนดได้ด้วยวิธีการทดลองจากขั้นตอนการดิ่งขึ้นรูปท่อและวัดค่าแรงที่เกิดขึ้น สำหรับงานที่ทำการทดลอง Blazynski [60] ได้ทำการพัฒนาปัจจัยการทำงานที่ซ้ำซ้อนการทำงานที่ซ้ำซ้อนนั้นเป็นวิธีการรวมพลังงานในการเปลี่ยนรูปที่สม่ำเสมอหรือใช้วิธีการ Slab method โดยกำหนดให้ปัจจัยของความเครียดซ้ำซ้อน (Redundant strain factor:  $\phi$ ) จะได้

$$\phi = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_H} \quad (3.10)$$

หรือปัจจัยของความเค้นซ้ำซ้อน (Redundant stress factor:  $\Phi$ )

$$\Phi = \frac{\sigma_T}{\sigma_H} \quad (3.11)$$

โดยที่  $\varepsilon_T$  เป็นความเครียดรวม (Total strain)  $\varepsilon_H$  เป็นความเครียดในวัสดุเนื้อเดียวกัน (Homogenous strain)  $\sigma_T$  เป็นความเค้นรวม (Total stress) และ  $\sigma_H$  เป็นความเค้นในวัสดุเนื้อเดียวกัน (homogenous stress)

จากการทดลองวัดค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้น Noyan [61] เนื่องจากไม่มีแรงลัพธ์ของความเค้นตกค้างในเนื้อวัสดุที่หลงเหลือจากการผลิต การกำจัดความเค้นตกค้างที่เหลือในวัสดุออกไปที่เหลืออยู่จะเป็นรูปทรงและขนาดของท่อที่ผ่านการขึ้นรูปมาแล้ว หนึ่งในวิธีที่นิยมใช้ในการวัดความเค้นตกค้างได้แก่วิธีการเจาะรูหรือการแบ่งส่วนโดยใช้วิธีการทำรูเจาะหรือร่องที่ถูกตัดเฉียงในชิ้นงาน ความเค้นตกค้างในบริเวณรอบๆ รูนำไปสู่การแยกตัวหรือบิดตัวของชิ้นงาน ความเค้นตกค้างที่เหลืออยู่จากการบิดเบี้ยวทำการตรวจวัดได้จากการใช้สเตรนเกจเป็นเครื่องมือวัด วิธีการเจาะรูหรือวิธีการแบ่งส่วนสามารถใช้ในการ

ผลิตท่อที่มีขนาดใหญ่ เมื่อรูเจาะหรือร่องที่ถูกตัดนำไปสู่การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่ไม่พึงประสงค์ในช่วงที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนรูอย่างถาวร Messnager [62] เสนอวิธีการแบ่งส่วนและต่อมาได้รับการพัฒนาโดย Sachs [63] และ Lambert [64] วิธีการแบ่งส่วนนั้นแสดงโดย Richards [65] ทำการวัดความเค้นตกค้างในโลหะแผ่น ท่อกลวงและแท่งทรงกระบอก

อีกวิธีที่พบบ่อยของการวัดความเค้นตกค้างนั้นทำการคายความเค้นออกจากวัสดุโดยใช้วิธีการเคลือบผิวโลหะด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อตรวจสอบความเค้นตกค้างจากการวัดความเครียดบนพื้นผิววัสดุด้านตรงข้ามกับพื้นผิวที่วัสดุที่จะถูกคายความเค้นออกไป เครื่องจักรกลไฟฟ้าเคมีสามารถปฏิบัติการได้อย่างรวดเร็ว ควบคุมง่ายและเป็นวิธีการอิสระในการลดความเสียหายวัสดุ Srinivasan [66] และ Rasty [67, 68, 69] ใช้วิธีการเคลือบผิวโลหะด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีในการกำหนดค่าความเค้นตกค้างในการดึงขึ้นรูปท่อ Midha [70] เปรียบเทียบวิธีการเจาะรูกับวิธีการเคลือบผิวโลหะด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อวัดค่าความเค้นตกค้างในแท่งโลหะตันและทำการสรุปผลของการวัดจากทั้งสองกระบวนการในการหาค่าความเค้นตกค้างที่จุดครากซึ่งผลที่ได้มีค่าน้อยมาก ๆ

การทำงานในช่วงแรกของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มได้แก่ การประยุกต์ใช้วิธีการของนักคณิตศาสตร์ วิศวกรและนักฟิสิกส์ ความคิดที่ได้รับการพัฒนาในแต่ละกลุ่มเหล่านี้เป็นไปอย่างอิสระในแนวคิดของแต่ละกลุ่มก็มีจุดประสงค์ที่แตกต่างกัน นักคณิตศาสตร์กำลังมองหาวิธีการที่จะหาค่าโดยประมาณที่เป็นคุณลักษณะเฉพาะที่ถูกต้องของขอบเขตบนและล่าง วิศวกรกำลังมองหาวิธีการที่เป็นตัวแทนของพฤติกรรมของระนาบความเค้นในระนาบเฉือนของแฉงครีบและสันในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ นักฟิสิกส์มองหาวิธีการสร้างฟังก์ชันโดยประมาณเพื่อที่จะหาค่าตอบที่เกี่ยวข้องกับปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง Key [71]

การทบทวนวรรณกรรมการประยุกต์ทางด้านคณิตศาสตร์ เป็นหนึ่งในจำนวนระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งบันทึกไว้ในหมายเหตุโดย Courant [72] อ้างว่าได้รับแรงบันดาลใจจากงานของ Euler [73] ในอีกประมาณ 9 ปีหลังจากนั้นได้มีบันทึกเนื้อหาเพิ่มขึ้นโดย Polya [74, 75], Hersh [76] และ Weinberger [77, 78] Weinberger อ้างสิทธิ์ถึงแนวคิดที่สามารถตีพิมพ์ในปี 1938 ที่ผ่านมาโดยแนวคิดของ Collatz [79] Polya, Hersh, และ Weinberger ทำการพัฒนาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการสร้างสมการทางพีชคณิตขึ้นมาแต่รูปทรงเรขาคณิตที่ไม่สมมาตรไม่สามารถกำหนดจำนวนช่องตาข่ายอย่างมีกฎเกณฑ์ได้ ในปี 1962 Friedrichs [80] ทำการประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วงยืดหยุ่นในแนวระนาบและ White [81] ตัดสินใจที่จะใช้วิธีการดิฟเฟอเรนเชียลผันแปรและใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมเป็นเครื่องมือเรียกว่าตาข่ายแบบ “odd” ต่อจากนั้น Birkhoof, Schultz, และ Vagus [82] ตีพิมพ์เอกสารระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีปลายแหลมเป็นรูปกรวยแยกออกจากวิธีการทางคณิตศาสตร์ประยุกต์ทั้งหมด

ในการทบทวนวรรณกรรมทางด้านฟิสิกส์ประยุกต์ Synge [83] ต้องนำเทคนิคการแก้ปัญหาโดยประมาณสำหรับทฤษฎีขอบเขตของเขา ดังนั้นความคิดของการกำหนดฟังก์ชันเชิงเส้นแบบสามเหลี่ยมได้รับการพัฒนา McMahon [84] ทำงานของเขาภายใต้แนวคิดของ Synge ตีพิมพ์แก้ปัญหาสามมิติโดยใช้องค์ประกอบรูปทรงสี่หน้าหรือรูปกรวยสามเหลี่ยมและการตั้งสมมติฐานว่าเป็นการเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบเชิงเส้น ในปี 1967 ผลงานของ Syngge และเพื่อนร่วมงานของเขาได้ถูกสรุปไว้ในหนังสือโดย Richlymer และMorton [85]

ในการแยกประเภทเอกสารออกมาเอกสารองค์ประกอบที่ใช้ในปี 1959 โดย Greenstadt [86] เมื่อเทียบกับจุดบนตาข่าย Greenstadt ถือว่าสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นส่วนที่แตกต่างกันทั้งหลายนั้นหมดไป ทำให้สมมติฐานต่างๆขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระในแต่ละส่วนและจากนั้นผู้ก่อตัวแปรอิสระเหล่านั้นเข้าด้วยกันอย่างต่อเนื่อง

อุตสาหกรรมการบินในช่วงต้นปี 1950 ใช้สิ่งที่เป็นรูปแบบเดิมทำการถอดแบบมาจากตำราสำหรับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ในการวิเคราะห์โครงสร้างและพัฒนาระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับคนและโครงข้อแข็งสำหรับปัญหาช่วงยืดหยุ่นแบบสองมิติ คำอธิบายของวิธีการต่างๆได้รับจาก Argyris และ Kelsey [87] และ Turner [88] ในปี 1960 รายละเอียดของการใช้งานเริ่มต้นของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการที่ได้จาก Clough [89] รายละเอียดคำอธิบายของวิธีการของ Ritz เมื่อนำไปใช้กับปัญหาแบบต่อเนื่องจะใช้วิธีการของ Melosh [90] แทน วิธี Ritz ใช้หลักการพลังงานหรือหลักการแปรผัน ในปี 1964 Jones [91] มองไปที่แนวตลอดขอบเขตของเอลิเมนต์อย่างต่อเนื่อง ในช่วงปลายปี 1960 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับการยอมรับกันอย่างแพร่หลายสำหรับการแก้ปัญหาในรูปแบบที่แตกต่างกันในงานทางด้านวิศวกรรม

การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้ปัญหาช่วงการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (ช่วงพลาสติก) ของวัสดุ ภายหลังปี 1960 เมื่อมีความชัดเจนของเมทริกซ์ที่เกี่ยวข้องกับความเค้น-ความเครียดช่วงพลาสติกกำเนิดขึ้นในการวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ งานนี้ได้กระทำโดย Yamada et al., [92] Zienkiewicz [93] และ Marcal [94] งานที่เกิดขึ้นในช่วงพลาสติกนั้นถูกจำกัดโดยผลรวมของความเครียดมีขนาดน้อยกว่า  $10^{-3}$  เป็นเพราะว่าการสะสมของความผิดพลาดในการคำนวณที่กระทำซ้ำๆซึ่งอาจจะเกิดขึ้นเป็นเวลาหลายร้อยรอบในระหว่างการทำงาน ในปี 1977 Lee [95, 96] ประสบความสำเร็จเมื่อนำไปใช้ปรับปรุงสูตรการรองรับกับปัญหาที่เกิดขึ้นในช่วงพลาสติก

สำหรับการพัฒนาสมการประกอบสองวิธี วิธีแรกได้แก่สมการ Rigid-plastic ที่พัฒนาโดย Lee และ Kobayashi [97] สมมติว่าเป็นการเสียรูปในช่วงยืดหยุ่นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ การเสียรูปในช่วงพลาสติกซึ่งมีค่าความเครียดที่สูงมากจึงสามารถตัดทิ้งได้ ต่อมา Shah et al. [98] ใช้วิธี Rigid-plastic เพื่อบีบอัดถังทรงกลมยาว แท่งทรงกระบอกระหว่างแผ่นขนานผ่านตาย Matsumoto [99] การบีบอัดขึ้นรูปวงแหวน Chen [100] การดันขึ้นรูปและการดึงขึ้นรูปโดยสมมาตรตามแนวแกน Chen [101] การตีขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ปิด Oh [102] ความเครียดระนาบในการตัดโลหะแผ่น สมการ Rigid-plastic โดยทั่วไปจะนำไปสู่การตั้งค่าเป็นแบบไม่เชิงเส้นมากขึ้น ประโยชน์ที่สำคัญของการวิเคราะห์แบบ Rigid-plastic นั้นมักจะต้องการใช้เวลาในการคำนวณให้น้อยลงโดยอนุญาตให้ใช้ขนาดของขั้นตอนในการคำนวณที่ใหญ่ขึ้นได้ อุปสรรคสำคัญของมันคือรูปแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและไม่มีความสามารถในการหารูปแบบของความเค้นตกค้าง

วิธีที่สองได้แก่สมการความสัมพันธ์แบบ Elastic-plastic นั้นถูกพัฒนาโดย Hill [103, 104, 105] และต่อมา Hibbit et al. [106] แนะนำสมการไฟไนต์เอลิเมนต์หาค่าความเครียดที่สมบูรณ์เป็นครั้งแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

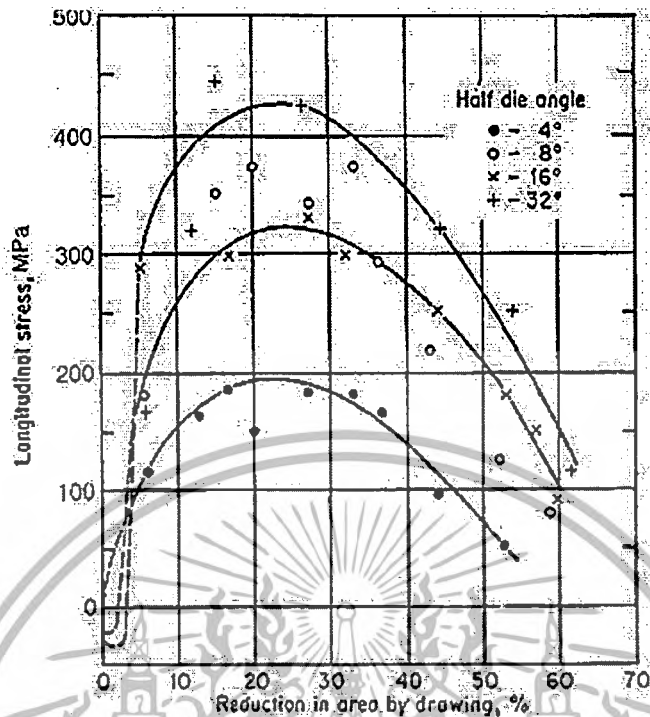
แต่ไม่มีตัวอย่างการคำนวณค่า Lee และ Mallet [107] วิเคราะห์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ความสัมพันธ์แบบ Elastic-plastic ใช้ศึกษาความเครียดระนาบสำหรับการดัดขึ้นรูปและการดึงขึ้นรูป

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกใช้ครั้งแรกโดย Tekkaya และ Lange [108] ทำการวัดค่าความเค้นตกค้างในชิ้นงานที่ผ่านการดัดขึ้นรูป Tekkaya และ Gerhardt [109] ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาวิธีการหาความเค้นตกค้างโดยอาจจะนำผลจากการทดลองในกระบวนการอัดขึ้นรูปโดยการเปลี่ยนมุมตายมาเปรียบเทียบกับ Dehghani [110] ใช้ซอฟต์แวร์ ABAQUS หาค่าการกระจายความเค้นตกค้างในกระบวนการดัดขึ้นรูปตามแนวแกนและพบว่ามันเป็นไปตามผลที่ได้จากวิธีการทดลอง ในปี 1987 Gerhardt และ Tekkaya [111] จำลองสถานการณ์การดึงขึ้นรูปลวดผ่านตาย 2 ตัวโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษาค่าความเค้นตกค้างต่ำสุดในการดึงลวดโดยการปรับระยะจากตายตัวแรกถึงตัวที่สองและการลดพื้นที่หน้าตัด ในปี 1987 Rasty [112] ดำเนินการศึกษาตัวแปรของการดึงขึ้นรูปท่อ โดยมุ่งศึกษาที่มุมตายและปลีกที่เหมาะสมและความเค้นในการดึงขึ้นรูปของการลดพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสม โดยมีค่าความเค้นตกค้างในเนื้อวัสดุที่น้อยที่สุด ในปี 1989 Pietrzyk [113] ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการกำหนดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการดึงขึ้นรูปแบบทอกลวงตามแนวแกน ในปี 1990 Sawamiphakdi [114] ศึกษาผลกระทบของรูปทรงเรขาคณิตของตายและการลดพื้นที่หน้าตัด ขนาดและการกระจายของความเค้นตกค้างตลอดพื้นที่ภาคตัดที่ทางออกของตาย

### 3.5 ความเค้นตกค้างในโลหะแท่งกลม ลวด และท่อ

รูปแบบของความเค้นตกค้างในเนื้อวัสดุที่แตกต่างกัน 2 แบบนั้นพบในการขึ้นรูปเย็นโลหะแท่งกลมและลวดขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งของการลดพื้นที่หน้าตัด โดยแบบแรกการลดพื้นที่ลงต่อครั้งประมาณ 1% ความเค้นตกค้างตามยาวของวัสดุนั้นเป็นความเค้นอัดที่ผิวและความเค้นดึงตามแนวแกน ความเค้นตามแนวรัศมีนั้นเป็นความเค้นดึงที่แกนกลางและลดลงจนมีค่าเป็น 0 ที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุ ขณะที่ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันกับความเค้นตกค้างตามแนวยาวของวัสดุ โดยการลดพื้นที่หน้าตัดลงที่ใช้ในทางการค้าที่ลดลงครั้งละมากกว่านั้นรูปแบบของความเค้นกลับมีนัยสำคัญที่ทำให้การกระจายตัวของความเค้นตกค้างนั้นตรงกันข้ามกันกับแบบแรกอย่างสมบูรณ์ ในกรณีของความเค้นตามแนวยาวของวัสดุนั้นเป็นความเค้นดึงที่ผิวและความเค้นอัดตามแนวแกนในเนื้อวัสดุของแท่งโลหะกลม ความเค้นตามแนวรัศมีเป็นเป็นความเค้นอัดที่เกิดขึ้นตามแนวแกนและความเค้นตามแนวเส้นรอบวงก็มีรูปแบบที่คล้ายคลึงกันกับความเค้นตามแนวยาวของวัสดุ แบบแรกรูปแบบของความเค้นตกค้างนั้นเป็นคุณลักษณะจำเพาะของขั้นตอนการขึ้นรูปวัสดุโดยการเปลี่ยนรูปของวัสดุนั้นถูกจำกัดอยู่ในชั้นของพื้นผิววัสดุ

ผลกระทบของมุมตายและจำนวนของการลดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้งความเค้นตามแนวยาวของวัสดุในการดึงขึ้นรูปเย็นลวดทองเหลืองนั้นพิจารณาโดย Linicus and Sachs [115] รูปที่ 3.5 แสดงการลดลงของพื้นที่ที่ทำให้เกิดความเค้นตกค้างตามแนวยาวของวัสดุที่เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของครึ่งมุมตาย ค่าสูงสุดของความเค้นตกค้างนั้นเกิดขึ้นในช่วงการลดลงของพื้นที่ 15 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.5 ความเค้นตกค้างตามแนวยาวของวัสดุในการดึงขึ้นรูปเป็นลวดทองเหลือง Linicus and Sachs [115]

การผลิตท่อด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงภายใต้สภาวะของการเปลี่ยนรูปนั้นมีความสัมพันธ์ที่เป็นแบบเดียวกันตลอดทั่วทั้งผนังของท่อ ความเค้นตกค้างตามแนวยาวของท่อได้แก่ความเค้นดิ่งที่ผิวด้านนอกและความเค้นอัดที่ผิวด้านในของท่อ ความเค้นตกค้างตามทิศทางในแนวเส้นรอบรูปก็มีรูปแบบที่คล้ายคลึงกันขณะที่ความเค้นตามทิศทางในแนวรัศมีมีค่าติดลบ จากการวัดค่าโดยประมาณของ Crampton [116] ความเค้นตามแนวเส้นรอบรูปที่ผิวด้านนอกของท่อกลวงแสดงให้เห็นค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นตามการลดลงของเส้นผ่านศูนย์กลางตามอัตราที่เพิ่มขึ้นของความเค้นที่เหมือนกันซึ่งค่าความเค้นที่จุดครากนั้นเพิ่มขึ้นโดยวิธีการขึ้นรูปเย็น

Misra และ Polakowski [117] ได้ศึกษาความเค้นตกค้างในผลิตภัณฑ์ท่อโดยการดึงขึ้นรูปด้วยปลั๊กและแมนเดรลแสดงการกระจายตัวของความเค้นตกค้างที่เหมือนกันกับการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง ผลลัพธ์ที่สำคัญนั้นพิสูจน์ให้เห็นถึงการลดลงของระดับความเค้นตกค้างที่สามารถใช้ในกระบวนการผลิตได้ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง (Tandem drawing) โดยที่การลดลงของพื้นที่หน้าตัด (2 เปอร์เซ็นต์) นั้นทำได้โดยตายตัวที่ 2 โดยทันทีตามแนวการขึ้นรูปที่เป็นไปอย่างต่อเนื่องกัน การจัดการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการดึงขึ้นรูปท่อด้วยการกำหนดวิธีการดังกล่าวนั้นถูกนำเสนอโดย Meadows และ Lawrence [118] โดยพื้นฐานของการพัฒนาเพื่อเป็นบรรทัดฐานในการที่จะทำให้ความเค้นตกค้างตามแนวเส้นรอบรูปมีค่าลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 บทสรุป

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่มีผู้ทำการศึกษามาก่อนหน้าเกี่ยวกับการดึงขึ้นรูปท่อเป็นกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อผ่านตาย (Dies) ค่าความเค้นในการดึงขึ้นรูปท่อนั้นสามารถสรุปได้ดังนี้

[1] ความเค้นในการดึงขึ้นรูปท่อเป็นความเค้นที่เกิดขึ้นในกระบวนการดึงขึ้นรูปผ่านตายตามแนวแกนของท่อ โดยเฉพาะการดึงขึ้นรูปแบบไม่ใช้แมนเดรล ตัวแปรที่สำคัญที่ทำให้ค่าความเค้นเปลี่ยนแปลงได้แก่ สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระหว่างท่อกับผนังตาย ขนาดของครึ่งมุมตาย ความเค้นที่จุดคราก ความเค้นตั้งฉาก พื้นที่ทางออกหลังดึงขึ้นรูปและพื้นที่ทางเข้าก่อนดึงขึ้นรูป เป็นต้น การหาค่าความเค้นในแต่ละวิธีได้แสดงไว้ในบทที่ 3 ข้างต้น

[2] วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ทำการศึกษานในงานวิจัยครั้งนี้ได้แสดงไว้ในบทที่ 5 โดยใช้โปรแกรม ABAQUS เพื่อหาอัตราการเปลี่ยนรูปของมิติท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายใน

[3] พารามิเตอร์ที่นำมาวิเคราะห์ในงานวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย ความเค้น ความหนาของผนังท่อ ความกว้างฐานสันท่อ ความกว้างยอดสันท่อ ช่องว่างฐานสัน ช่องว่างยอดสัน ความสูงสันท่อ ระยะพิชต์ของสันท่อ ระยะกระจัดตามแนวแกนและมุมเอียงของสันท่อ

[4] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อเที่ยว (Reduction area per pass: RA/P) ที่ใช้วิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบท่อกว้างในบทที่ 6

[5] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของการลดพื้นที่หน้าตัดรวม (Total of the reduction area: R<sub>t</sub>%) ที่ใช้วิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกว้างในบทที่ 7

[6] ศึกษาอิทธิพลของความเค้นดึงขึ้นรูปในการลดพื้นที่หน้าตัดรวมและขนาดมิติของท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกว้างในบทที่ 8

[7] ศึกษาการนำโปรแกรม ABAQUS มาใช้ในการตรวจสอบท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในขนาดเล็กพิเศษด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกว้างในบทที่ 9

[8] ศึกษาการประดิษฐ์ท่อทองแดงมีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็กโดยการดึงขึ้นรูปด้วยแมนเดรลของไหลในบทที่ 10

[9] ศึกษาการนำโปรแกรม 3D FEM มาใช้ในการตรวจสอบอิทธิพลของความดันภายในที่มีผลต่อการดึงขึ้นรูปท่อทองแดงมีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็กเพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดึงขึ้นรูปด้วยแมนเดรลของไหลในบทที่ 11

## บทที่ 4

### วิธีการทดลอง

#### 4.1 บทนำ

วิธีการทดลองในการวิจัยการผลิตท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในประกอบด้วย 3 วิธีการ ดังนี้

วิธีการที่ 1. วิธีทดลองการศึกษาการดึงขึ้นรูปแบบไม่ใช้แมนเดรลกรณีดึงขึ้นรูปแบบเดี่ยวเดียว (Single-pass drawing) การดึงขึ้นรูปแบบเดี่ยวเดียวได้แก่การดึงขึ้นรูปท่อผ่านตายในครั้งเดียวตามเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดที่กำหนด

วิธีการที่ 2. วิธีทดลองการศึกษาการดึงขึ้นรูปแบบไม่ใช้แมนเดรล ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) การดึงขึ้นรูปแบบดึงขึ้นรูปผ่านตายหลายครั้งเริ่มต้นจากการดึงขึ้นรูปผ่านตายครั้งแรกตามเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดที่กำหนดผ่านพ้นไปแล้ว จากนั้นนำชิ้นงานเดิมไปดึงขึ้นรูปซ้ำโดยลดเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดที่กำหนดเป็นครั้งที่สอง ทำซ้ำจนครบจำนวนครั้งที่กำหนด จากนั้นนำเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดมารวมกันเป็นการลดพื้นที่รวมของวิธีการดังกล่าว

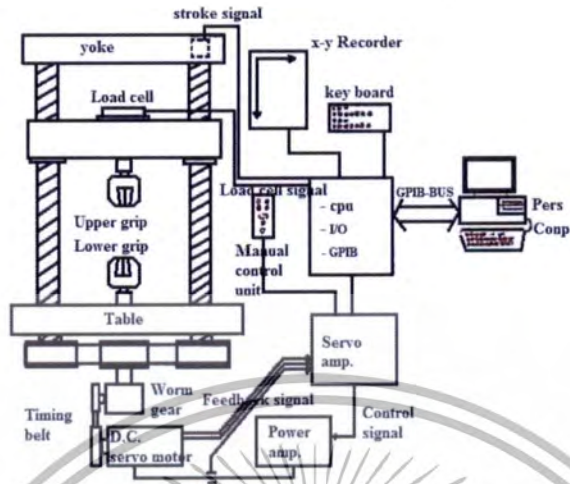
วิธีการที่ 3. วิธีทดลองการศึกษาการดึงขึ้นรูปโดยใช้แมนเดรลขี้ผึ้ง แมนเดรลน้ำ และแมนเดรลน้ำมันคอมเพรสเซอร์เป็นของไหลที่บรรจุภายในของท่อ วิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) วิธีการเดียวกับวิธีการที่ 2 แต่ชิ้นงานทดสอบภายในบรรจุด้วยแมนเดรลขี้ผึ้งในกรณีศึกษาที่ 1 ชิ้นงานทดสอบภายในบรรจุด้วยแมนเดรลน้ำในกรณีศึกษาที่ 2 ชิ้นงานทดสอบภายในบรรจุด้วยแมนเดรลน้ำมันคอมเพรสเซอร์ในกรณีศึกษาที่ 3 จากนั้นนำของไหลออกจากภายในท่อแล้วทำการตรวจสอบ ประเมินผลและสรุปผลดังกล่าว

##### 4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ประกอบการทดลองประกอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ระบบขับเคลื่อน วัสดุผล และบันทึกผลควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ แรงดึงสูงสุด 100 กิโลนิวตัน มีไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 4.1

2. เครื่อง Testometric Mico 500 ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ส่งกำลังผ่านชุดเกียร์ทดรอบและชุดอุปกรณ์เสริมเพื่อใช้จับยึดตายขณะทำการทดลอง ตายที่ใช้ทดลองมีบล็อกตาย 2 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร และ 100 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2

3. ชุดของตัวตาย (Die) ที่ใช้ในการทดสอบทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีขนาดของครึ่งมุมตาย 12 องศา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของตาย 0.5 มิลลิเมตร ถึง 25 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 ไดอะแกรมของเครื่องทดสอบแรงดึง



รูปที่ 4.2 เครื่อง Testometric Mico 500 และชุดอุปกรณ์เสริมที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.3 คายที่ใช้ในการทดสอบทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าคุณสมบัติของตายที่ใช้ในการทดสอบทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ (อ้างอิงมาจาก: [www.wesltd.com/divisions/.../TungstenCarbideBlog.html](http://www.wesltd.com/divisions/.../TungstenCarbideBlog.html))

GRADE	WC (%)	CO (%)	HARDNESS (HRA)	T.R.S (kg/mm <sup>2</sup> )	PARTICLE SIZE (μm)
E10	94	6	89.6-90.7	260 over	3

4. กล้องส่องดูโครงสร้าง Optical Microscope (Olympus DP11) เพื่อตรวจสอบและบันทึกภาพมิติภาคตัดของท่อตามแนวภาคตัดขวางและภาคตัดตามแนวแกนของท่อความละเอียดของภาพถ่าย 1280 × 1024-pixel กำลังขยายสูงสุด 100 เท่า ส่วนกล้อง Scanning electron microscope (Olympus GX 71) มีกำลังขยายสูงมากถึง 500,000 เท่า มีโปรแกรมที่ใช้ในการตรวจวัดขนาดมิติต่างๆ จึงนำมาใช้ในการวัดขนาดของสันและแนวแกนของท่อก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 4.4



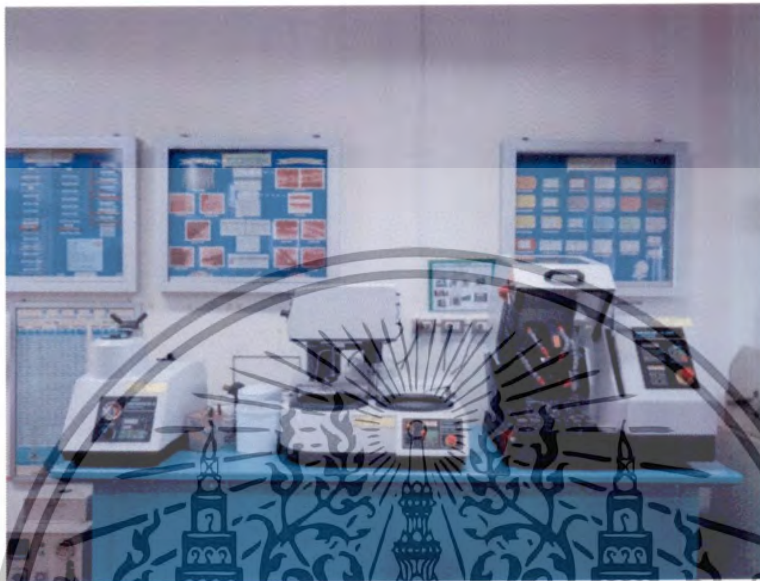
รูปที่ 4.4 กล้องส่องดูโครงสร้าง (a) Optical Microscope (Olympus DP11) (b) Scanning electron microscope (Olympus GX 71)

5. หลังจากการทดลองสิ้นสุดลง จากนั้นจึงนำ ISRCT ที่ผ่านการดัดขึ้นรูปจากการทดลองมาทำการตัดออกตามแนวตั้งฉากกับแนวแกนและตามแนวขนานกับแนวแกน จากนั้นนำไป Mount กับ Bakelite ขึ้นตอนต่อไปขัดผิวให้เรียบด้วยกระดาษทราย โดยค่อย ๆ เพิ่มความละเอียดของกระดาษทราย จนกระทั่งผิวของชิ้นงานเรียบไม่มีรอยขีดข่วน เป็นเครื่องขัดชนิดจานคู่ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 มิลลิเมตร จานขัดขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ส่งกำลัง ควบคุมการทำงานด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ มีระบบน้ำหล่อเย็นขณะขัดชิ้นงาน พร้อมวาล์วเปิด - ปิด ปรับระดับความแรงของน้ำได้ เครื่องขัดผิวหน้าชิ้นงานทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.5

6. เครื่องวัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของตายด้วยแสงเลเซอร์ (High-accuracy CCD micrometer) ใช้สำหรับวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตายเพื่อความถูกต้องแม่นยำในการกำหนดขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อภายหลังการดิ่งขึ้นรูป โดยความละเอียดของการวัดมีความละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่งของหน่วยมิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.6



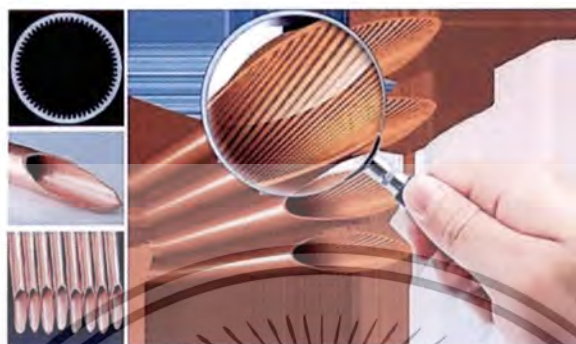
รูปที่ 4.5 เครื่องตัดผิวหน้าชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 4.6 เครื่องวัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของตายด้วยแสงเลเซอร์ (High-accuracy CCD micrometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายใน (Inner Spiral Ribbed Copper Tube: ISRCT) ที่ใช้ในการทดลอง ใช้ท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในแบบไร้ตะเข็บ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายใน (Inner Spiral Ribbed Copper Tube: ISRCT) ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ค่าองค์ประกอบธาตุของ ISRCT ที่ใช้ในการทดลอง (อ้างอิงมาจาก: P.S. Metal Works co.,Ltd.)

GRADE (JIS H3300)	Copper (%) minimum	Phosphorus (%)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
C12200/TP2/CU-DHP	99.90	0.015 - 0.040	8300

ตารางที่ 4.3 ค่าคุณสมบัติทางกลของ ISRCT ที่ใช้ในการทดลอง

Mechanical Properties	ISRCT
Young's modulus, E (GPa)	110
Bulk modulus, k (GPa)	114.58
Shear modulus, G (GPa)	41.045
Tangent modulus, E <sub>t</sub> (GPa)	1
Yield stress, $\sigma_y$ (MPa)	79
Ultimate stress, $\sigma_u$ (MPa)	180
Poisson's ratio, $\nu$	0.33
Die half-angle, $\alpha$ (deg)	12
Coefficient of friction, $\mu$	0.02
Density, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	8300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ภาคตัดของส้นท่อ ISRCT ตามแนวตั้งฉากกับแนวแกนก่อนดิ่งขึ้นรูปมีขนาดมิติต่างๆอาทิ เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5.00 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3.71 มิลลิเมตร ความหนาของผนัง 0.364 มิลลิเมตร ความสูงของส้น 0.28 มิลลิเมตร ความกว้างของฐานส้น 0.33 มิลลิเมตร ความกว้างของยอดส้น 0.175 มิลลิเมตรและมีจำนวนส้นเกลียว 45 ส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ภาคตัดของส้นท่อ ISRCT ตามแนวตั้งฉากกับแนวแกนก่อนดิ่งขึ้นรูป

9. ภาคตัดของส้นท่อ ISRCT ตามแนวแกนก่อนดิ่งขึ้นรูปมีระยะพิตช์ของส้น 0.393 มิลลิเมตรและมุมอีลิคซ์ (Helix angle) ของส้นเกลียว 38 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 มุมอีลิคซ์ของส้นท่อ ISRCT ตามแนวแกนก่อนดิ่งขึ้นรูป

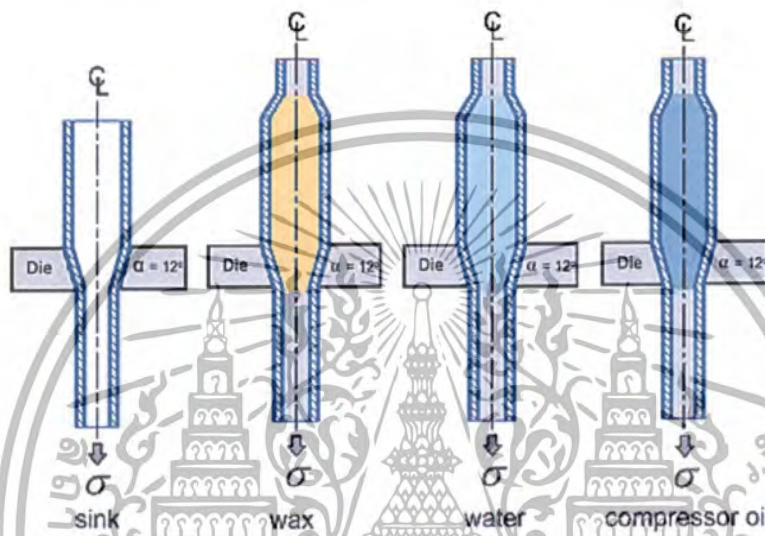


รูปที่ 4.10 ตัวอย่างกราฟแสดงค่าความเค้น-ระยะยืดของท่อ ISRCT มีส้นขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายใน ท่อก่อนการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการดึงขึ้นรูปที่ใช้ในการทดลองมี 4 วิธี คือ

1. การดึงขึ้นรูปแบบไม่ใช้แมนเดรล (Tube Sinking)
2. การดึงขึ้นรูปโดยใช้ขี้ผึ้งเป็นแมนเดรล (Wax Mandrel)
3. การดึงขึ้นรูปโดยใช้น้ำเป็นแมนเดรล (Water Mandrel)
4. การดึงขึ้นรูปโดยใช้น้ำมันคอมเพรสเซอร์เป็นแมนเดรล (Compressor Oil Mandrel)



รูปที่ 4.11 วิธีการดึงขึ้นรูปท่อที่ใช้ในการทดลอง

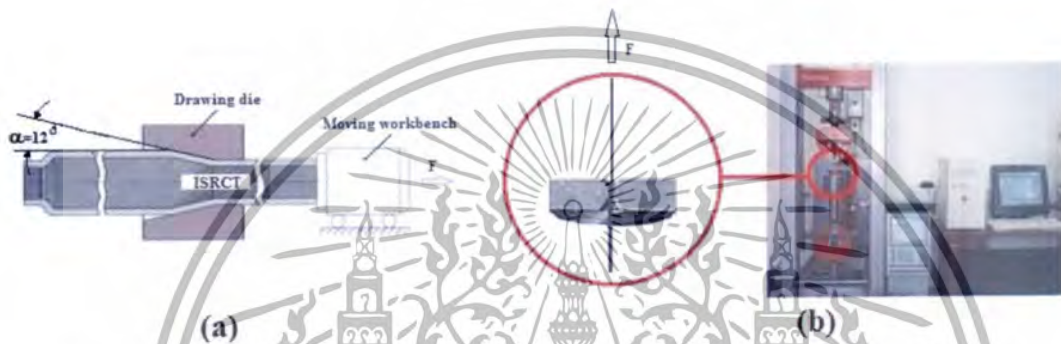


รูปที่ 4.12 ภาคตัดแสดงรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ ทั้งแนวภาคตัดขวางและตามแนวยาว

รูปที่ 4.12 เป็นภาคตัดของท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในท่อ แสดงรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆทั้งแนวภาคตัดขวางและตามแนวยาว โดยกำหนดเป็นพารามิเตอร์ต่างๆดังต่อไปนี้

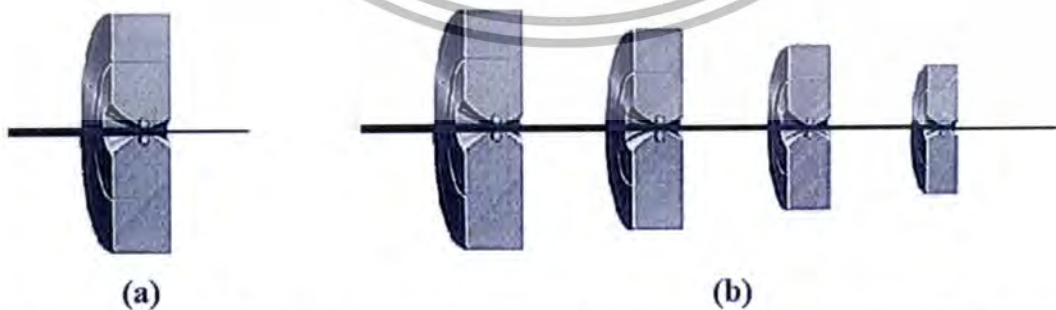
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $\psi$  = มุมฮิลิกส์ของเส้น (องศา)  
 $P_r$  = ระยะพิตช์ของเส้น (มิลลิเมตร)  
 $t_w$  = ความหนาของผนังท่อ (มิลลิเมตร)  
 $h_r$  = ความสูงของเส้น (มิลลิเมตร)  
 $w_{rb}$  = ความกว้างของฐานเส้น (มิลลิเมตร)  
 $w_{rt}$  = ความกว้างของปลายเส้น (มิลลิเมตร)



รูปที่ 4.13 วิธีการทดลอง (a) แบบจำลองของการทดลอง (b) ชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาใช้ในการทดลอง

รูปที่ 4.13 วิธีการทดลอง (a) แบบจำลองของการทดลอง เริ่มต้นจากการนำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปลายข้างหนึ่งให้เล็กกว่าขนาดรูในเส้นผ่านศูนย์กลางของตายสอดเข้าไปในรูช่องว่างของตาย ต่อจากนั้นหัวจับชิ้นงานจะทำการจับที่ปลายชิ้นงานด้านที่สอดผ่านตายดังกล่าวดึงให้ท่อเคลื่อนที่ผ่านครีชมุมตายเข้าสู่ช่วงการเปลี่ยนรูปและเมื่อผ่านพ้นตายจะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ถูกดึงมีขนาดเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูในของตาย (b) เป็นชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาใช้ในการทดลองโดยนำมาเป็นอุปกรณ์เสริมต่อพ่วงกับชุดหัวจับของเครื่องทดสอบแรงดึง



รูปที่ 4.14 วิธีการดึงขึ้นรูปท่อ (a) การดึงขึ้นรูปแบบเที่ยวเดียว (Single-pass drawing) (b) วิธีการดึงขึ้นรูปแบบผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.14 เป็นวิธีการดึงขึ้นรูปท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในท่อ (a) วิธีการดึงขึ้นรูปแบบเที่ยวเดียว (Single-pass drawing) เป็นการการดึงขึ้นรูปชิ้นงานผ่านตายเพียงครั้งเดียว เมื่อได้ชิ้นงานตามขนาดกำหนดแล้วจึงสามารถนำมาคำนวณหาขนาดการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้ง (Reduction area per pass; RAVP) ได้ (b) วิธีการดึงขึ้นรูปแบบผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) เมื่อท่อถูกดึงผ่านตายครั้งที่ 1 แล้วนำมาดึงผ่านตายตัวที่ 2 และตัวที่ 3, 4 ไปเรื่อยๆจนครบตามขนาดกำหนดที่กำหนดไว้ จากนั้นจึงสามารถนำมาคำนวณหาขนาดการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม (Total reduction:  $R_T$ ) ได้โดยนำเอาพื้นที่หน้าตัดที่ลดลงแต่ละครั้งที่ผ่านตายมารวมกันทั้งหมด

สำหรับเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่สามารถหาได้จากสมการ

$$RA = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100 \quad [\%] \quad (4.1)$$

- $RA$  = การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อ (เปอร์เซ็นต์)  
 $A_1$  = ขนาดพื้นที่หน้าตัดสุดท้ายของท่อ (ตารางมิลลิเมตร)  
 $A_0$  = ขนาดพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของท่อ (ตารางมิลลิเมตร)

## 4.2 วิธีทดลอง

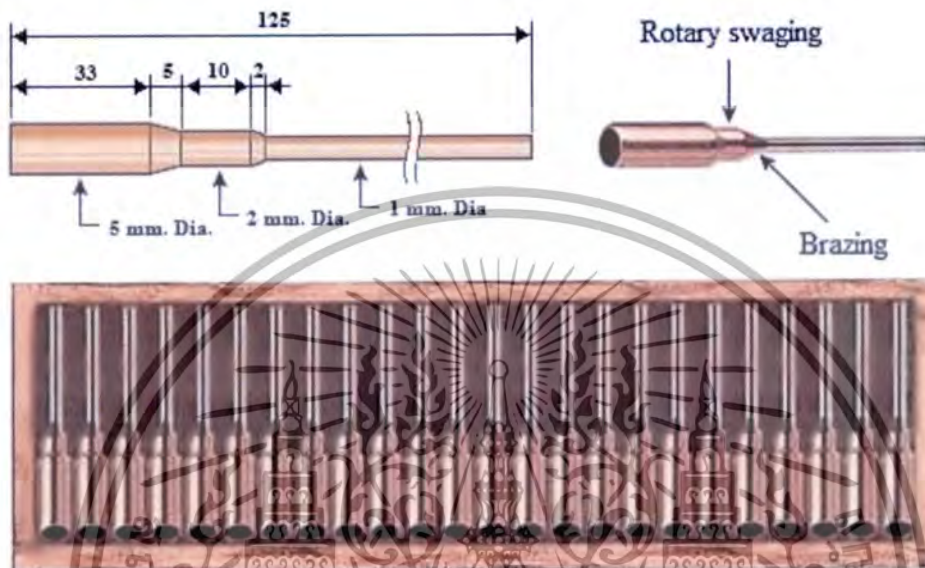
### 4.2.1 วิธีทดลองการศึกษากการดึงขึ้นรูปแบบไม่ใช้แมนเดรลกรณีดึงขึ้นรูปแบบเที่ยวเดียว (Single-pass drawing) และกรณีดึงขึ้นรูปแบบผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing)

เริ่มต้นทำการติดตั้งเครื่องมือจับยึดตายที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการดึงขึ้นรูปท่อมาเป็นพิเศษทั้งหมดลงบนเครื่อง Testometric Mico 500 หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเรียบร้อยแล้วทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำความสะอาดพื้นผิว และเคลือบด้วยสารหล่อลื่นเทฟลอนเรซินแล้วจึงดึงขึ้นรูปท่อโดยใช้น้ำมันสบู่หล่อลื่นโซเดียมสเตียเรท (Sodium stearate) เป็นสารหล่อลื่นลดแรงดึงผิว จากนั้นทำการตั้งค่าต่างๆในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก่อนที่จะทำการทดสอบโดยการตั้งค่าต่างๆที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. ค่าความเร็วในการทดลองที่ 150 มิลลิเมตรต่อวินาที
2. กำหนดสเกลวัดแรงดึงสูงสุดไว้ที่ 50 กิโลนิวตัน
3. ตั้งชนิดการทดสอบไว้เป็นทดสอบแรงดึง
4. ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียสคงที่

จากรูปที่ 4.15 ชิ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ถูกตัดตามความยาวประมาณ 50 มิลลิเมตร หลังจากนั้นใช้วิธีการโดยใช้แม่พิมพ์หมุนได้ซึ่งขยับเข้าๆออกๆ บีบรัดชิ้นงานตลอดเวลาอย่างรวดเร็ว ปลายของท่อจะถูกทำให้เป็นมุมเอียงหรือมีขนาดลดลงได้ โดยการอัดและการกระแทกหลายๆ ครั้ง (Rotary swaging) ที่ปลายด้านหนึ่งลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลงเหลือ 2 มิลลิเมตร ความยาวประมาณ 17 มิลลิเมตร เพื่อให้สอดเข้าไปในตาย (Die) จากนั้นใช้ลวดทองแดงขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ความยาวประมาณ 80 มิลลิเมตร สอดเข้าไปความลึกประมาณ 5 มิลลิเมตร จากนั้นทำการบัดกรีแข็ง (Brazing) เพื่อยึดติดกับเส้นลวดทองแดงและจะใช้เป็นส่วนที่ถูกหัวจับของเครื่องทดสอบแรงดึงขึ้นรูปในการทดลอง วิธีการจับยึดชิ้นงานสอดเข้าไปในอุปกรณ์เสริมดังกล่าวมาข้างต้น



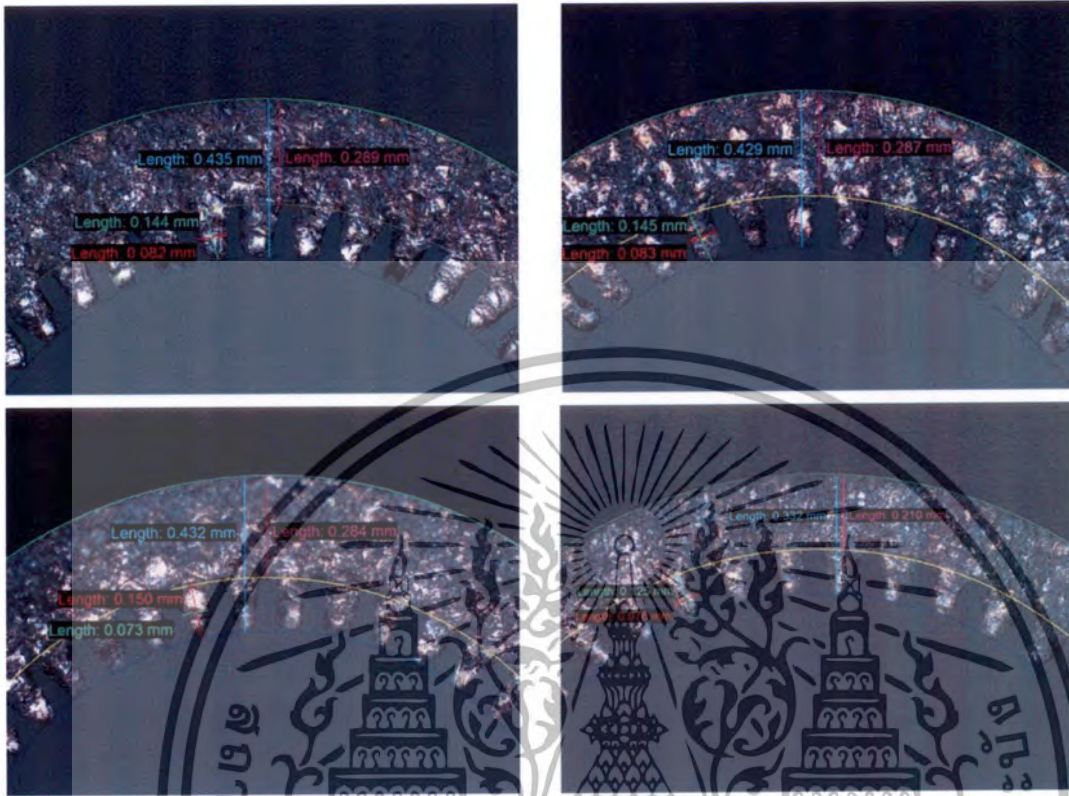
รูปที่ 4.15 ชิ้นงานทดสอบการดึงขึ้นรูปแบบไม้ใช้แมนเดรล

ขั้นตอนต่อไปทำการดึงขึ้นรูปท่อที่ใช้ในการทดลองแบบไม้ใช้แมนเดรล โดย ISRCT ที่ใช้ในการทดลองดังกล่าวกระทำซ้ำในแต่ละตัวอย่างจำนวน 10 ครั้ง เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยการดึงขึ้นรูปแต่ละครั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนดึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังดึงและเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้ง (Reduction area per pass: RAVP) แสดงในตารางที่ 4.4

หลังจากการทดลองสิ้นสุดลง จากนั้นจึงนำท่อทองแดงที่มีเส้นขนาดอยู่ภายในที่ผ่านการดึงขึ้นรูปจากการทดลองมาทำการตัดออกตามแนวตั้งฉากกับแนวแกนและตามแนวขนานกับแนวแกน จากนั้นนำไป Mount กับ Bakelite ขั้นตอนต่อไปขัดผิวให้เรียบด้วยกระดาษทราย โดยค่อย ๆ เพิ่มความละเอียดของกระดาษทราย จนกระทั่งผิวของชิ้นงานเรียบไม่มีรอยขีดข่วน ต่อจากนั้นจึงนำชิ้นงานทดลองไปส่องกล้องเพื่อวัดขนาดของมิติหน้าตัดของชิ้นงานและมุมเอียงของชิ้นงานตามตัวแปรต่างๆเพื่อทำการศึกษาต่อไป

การวัดขนาดมิติพารามิเตอร์ของเส้นด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (Olympus GX 71) ซึ่งสามารถวัดขนาดออกมาเป็นตัวเลขตามจุดที่กำหนดโดยใช้โปรแกรมที่เป็นมาตรฐานของเครื่องวัดตามรูปทรงของชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบ หลังจากวางชิ้นงานที่ตัดออกมาแล้วใช้เมาส์ชี้วัดขนาดระยะห่างระหว่างจุด 2 จุด โปรแกรมจะทำการคำนวณและแสดงผลเป็นตัวเลขออกมา จากนั้นจึงทำการบันทึกค่าที่วัดได้ลงในตารางแสดงผล ดังแสดงในรูปที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 การวัดขนาดมิติพารามิเตอร์ของเส้นด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (Olympus GX 71)

ในการหาพื้นที่หน้าตัดของท่อ ISRCT ภายหลังจากการตั้งขึ้นรูปท่อสามารถทำได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$A_R = \frac{1}{2}(w_{rb} + w_{ri})h_r \times n \quad (4.2)$$

$$A_w = \frac{\pi}{4}(D_0^2 - d_w^2) \quad (4.3)$$

$$d_w = D_0 - (t_w \times 2) \quad (4.4)$$

$$A = A_R + A_w \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $A_R$  = พื้นที่หน้าตัดของเส้น (ตารางมิลลิเมตร)  
 $A_W$  = พื้นที่หน้าตัดของผนัง (ตารางมิลลิเมตร)  
 $w_{rb}$  = ความกว้างของฐานเส้น (มิลลิเมตร)  
 $w_{rt}$  = ความกว้างของยอดเส้น (มิลลิเมตร)  
 $h_r$  = ความสูงของเส้น (มิลลิเมตร)  
 $n$  = จำนวนเส้น (เส้น)  
 $D_0$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ ISRCT (มิลลิเมตร)  
 $d_w$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฐานเส้น (มิลลิเมตร)  
 $t_w$  = ความหนาของผนัง ISRCT (มิลลิเมตร)

ตารางที่ 4.4 เป็นผลจากการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้ง (Reduction area per pass: RA/P) ของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านด้ายครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบทอกลง โดยค่าที่ได้จะนำไปใช้ในการแสดงผลในบทที่ 6 ต่อไป

ตารางที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้ง (Reduction area per pass: RA/P) ของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านด้ายครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบทอกลง

ครั้งที่	$D_0$ (mm)	$D_1$ (mm)	RA/P (%)	ครั้งที่	$D_0$ (mm)	$D_1$ (mm)	RA/P (%)
1	5.00	4.87	2.52	12	5.00	3.16	44.10
2	5.00	4.74	5.18	13	5.00	2.95	49.76
3	5.00	4.61	7.99	14	5.00	2.74	55.66
4	5.00	4.47	11.05	15	5.00	2.50	61.08
5	5.00	4.33	14.25	16	5.00	2.29	66.39
6	5.00	4.18	17.57	17	5.00	2.05	71.20
7	5.00	4.03	21.20	18	5.00	1.83	75.78
8	5.00	3.87	25.08	19	5.00	1.64	79.88
9	5.00	3.70	29.37	20	5.00	1.47	83.49
10	5.00	3.53	34.10	21	5.00	1.31	86.63
11	5.00	3.35	38.80				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 เป็นค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการวัดขนาดมิติพารามิเตอร์ของสันด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (Olympus GX 71) ซึ่งสามารถวัดขนาดออกมาเป็นตัวเลขตามจุดที่กำหนดและการคำนวณด้วยวิธีการตั้งขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบทอกลวง โดยค่าที่ได้จะนำไปใช้ในการแสดงผลในบทที่ 6 ต่อไป

#### ความหมายสัญลักษณ์ต่างๆที่ใช้ในตารางที่ 4.4 ถึง 4.7

$RA/P\%$	= เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้ง (เปอร์เซ็นต์)
$R_t\%$	= เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดรวม (เปอร์เซ็นต์)
$D_0$	= ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนดึงขึ้นรูป (มิลลิเมตร)
$D_1$	= ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังดึงขึ้นรูป (มิลลิเมตร)
$A_0$	= พื้นที่หน้าตัดก่อนดึงขึ้นรูป (ตารางมิลลิเมตร)
$A_1$	= พื้นที่หน้าตัดหลังดึงขึ้นรูป (ตารางมิลลิเมตร)
$F$	= แรงดึงขึ้นรูป (นิวตัน)
$\sigma$	= ความเค้นก่อนดึงขึ้นรูป (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
$\sigma'$	= ความเค้นหลังดึงขึ้นรูป (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
$t_w$	= ความหนาผนังท่อนดึง (มิลลิเมตร)
$t'_w$	= ความหนาผนังท่อนหลังดึง (มิลลิเมตร)
$h_r$	= ความสูงสันก่อนดึง (มิลลิเมตร)
$h'_r$	= ความสูงสันหลังดึง (มิลลิเมตร)
$w_{rb}$	= ความกว้างฐานสันก่อนดึง (มิลลิเมตร)
$w'_{rb}$	= ความกว้างฐานสันหลังดึง (มิลลิเมตร)
$w_{rt}$	= ความกว้างยอดสันก่อนดึง (มิลลิเมตร)
$w'_{rt}$	= ความกว้างยอดสันหลังดึง (มิลลิเมตร)
$P_r$	= ระยะพิตช์ก่อนดึง (มิลลิเมตร)
$P'_r$	= ระยะพิตช์หลังดึง (มิลลิเมตร)
$\psi$	= มุมอีลิคซ์ก่อนดึง (องศา)
$\psi'$	= มุมอีลิคซ์หลังดึง (องศา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบท่อกลวง

RA/P (%)	$D_0$ (mm)	$D_1$ (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )	$A_1$ (mm <sup>2</sup> )	$F$ (N)	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma'$ (N/mm <sup>2</sup> )
2.52	5.00	4.87	8.30	8.09	236	27.577	29.168
5.18	5.00	4.74	8.30	7.87	252	27.577	32.020
7.99	5.00	4.61	8.30	7.64	272	27.577	35.616
11.05	5.00	4.47	8.30	7.38	297	27.577	40.227
14.25	5.00	4.33	8.30	7.12	326	27.577	45.805
17.57	5.00	4.18	8.30	6.84	360	27.577	52.616
21.20	5.00	4.03	8.30	6.54	398	27.577	60.856
25.08	5.00	3.87	8.30	6.22	440	27.577	70.762
29.37	5.00	3.70	8.30	5.86	484	27.577	82.565
34.10	5.00	3.53	8.30	5.47	531	27.577	97.075
38.80	5.00	3.35	8.30	5.08	580	27.577	114.173
44.10	5.00	3.16	8.30	4.64	626	27.577	134.913
49.76	5.00	2.95	8.30	4.17	669	27.577	160.431
55.66	5.00	2.74	8.30	3.68	704	27.577	191.304
61.08	5.00	2.50	8.30	3.23	740	27.577	229.102
66.39	5.00	2.29	8.30	2.79	770	27.577	275.985
71.20	5.00	2.05	8.30	2.39	800	27.577	334.728
75.78	5.00	1.83	8.30	2.01	820	27.577	407.960
79.88	5.00	1.64	8.30	1.67	835	27.577	500.000
83.49	5.00	1.47	8.30	1.37	850	27.577	620.438
86.63	5.00	1.31	8.30	1.11	865	27.577	779.279

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบท่อกกลาง (ต่อ)

RA/P (%)	$t_w$ (mm)	$t'_w$ (mm)	$h_r$ (mm)	$h'_r$ (mm)	$w_{rb}$ (mm)	$w'_{rb}$ (mm)
2.52	0.364	1.032	0.28	0.269	0.33	0.325
5.18	0.364	1.046	0.28	0.267	0.33	0.316
7.99	0.364	1.060	0.28	0.265	0.33	0.305
11.05	0.364	1.065	0.28	0.263	0.33	0.293
14.25	0.364	1.077	0.28	0.260	0.33	0.280
17.57	0.364	1.087	0.28	0.258	0.33	0.266
21.20	0.364	1.102	0.28	0.255	0.33	0.251
25.08	0.364	1.118	0.28	0.250	0.33	0.234
29.37	0.364	1.132	0.28	0.245	0.33	0.216
34.10	0.364	1.146	0.28	0.239	0.33	0.199
38.80	0.364	1.154	0.28	0.228	0.33	0.182
44.10	0.364	1.156	0.28	0.217	0.33	0.158
49.76	0.364	1.164	0.28	0.190	0.33	0.144
55.66	0.364	1.172	0.28	0.174	0.33	0.130
61.08	0.364	1.186	0.28	0.158	0.33	0.116
66.39	0.364	1.193	0.28	0.128	0.33	0.093
71.20	0.364	1.207	0.28	0.099	0.33	0.069
75.78	0.364	1.211	0.28	0.074	0.33	0.050
79.88	0.364	1.222	0.28	0.053	0.33	0.035
83.49	0.364	1.234	0.28	0.036	0.33	0.021
86.63	0.364	1.257	0.28	0.023	0.33	0.004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบท่อกลวง (ต่อ)

RA/P (%)	$w_{rt}$ (mm)	$w'_{rt}$ (mm)	$P_r$ (mm)	$P'_r$ (mm)	$\psi$ (degree)	$\psi'$ (degree)
2.52	0.175	0.170	0.393	0.390	38	37
5.18	0.175	0.164	0.393	0.386	38	36
7.99	0.175	0.158	0.393	0.381	38	35
11.05	0.175	0.150	0.393	0.375	38	34
14.25	0.175	0.140	0.393	0.368	38	33
17.57	0.175	0.132	0.393	0.365	38	32
21.20	0.175	0.124	0.393	0.354	38	31
25.08	0.175	0.116	0.393	0.349	38	29
29.37	0.175	0.107	0.393	0.340	38	27
34.10	0.175	0.098	0.393	0.331	38	25
38.80	0.175	0.089	0.393	0.318	38	23
44.10	0.175	0.078	0.393	0.297	38	21
49.76	0.175	0.071	0.393	0.283	38	19
55.66	0.175	0.062	0.393	0.258	38	17
61.08	0.175	0.051	0.393	0.233	38	15
66.39	0.175	0.047	0.393	0.205	38	13
71.20	0.175	0.039	0.393	0.173	38	11
75.78	0.175	0.034	0.393	0.136	38	9
79.88	0.175	0.029	0.393	0.093	38	6
83.49	0.175	0.023	0.393	0.048	38	3
86.63	0.175	0.016	0.393	0.008	38	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนต่อไปทำการดึงขึ้นรูปท่อที่ใช้ในการทดลองแบบไม่ใช้แมนเดรล ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกว้าง ในการทดลองดังกล่าวกระทำซ้ำในแต่ละตัวอย่างจำนวน 10 ครั้ง เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนดึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังดึงและเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดรวม (Total reduction:  $R_t$ %) แสดงในตารางที่ 4.6 โดยค่าที่ได้จะนำไปใช้ในการแสดงผลในบทที่ 7 ต่อไป

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดรวม (Total reduction:  $R_t$ %) ของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกว้าง

ครั้งที่	$D_0$ (mm)	$D_1$ (mm)	$R_t$ (%)	ครั้งที่	$D_0$ (mm)	$D_1$ (mm)	$R_t$ (%)
1	5.00	4.47	20.88	7	2.56	2.29	62.79
2	4.47	4.00	27.38	8	2.29	2.05	68.81
3	4.00	3.58	33.89	9	2.05	1.83	73.39
4	3.58	3.20	41.47	10	1.83	1.64	77.36
5	3.20	2.86	47.25	11	1.64	1.47	80.97
6	2.86	2.56	56.41	12	1.47	1.31	84.10

หลังจากการทดลองสิ้นสุดลง จากนั้นจึงนำ ISRCT ที่ผ่านการดึงขึ้นรูปจากการทดลองมาทำการตัดออกตามแนวตั้งฉากกับแนวแกนและตามแนวขนานกับแนวแกน จากนั้นนำไป Mount กับ Bakelite ขั้นตอนต่อไปขัดผิวให้เรียบด้วยกระดาษทราย โดยค่อย ๆ เพิ่มความละเอียดของกระดาษทราย จนกระทั่งผิวของชิ้นงานเรียบไม่มีรอยขีดข่วน ต่อจากนั้นจึงนำชิ้นงานทดลองไปส่องกล้องเพื่อวัดขนาดของมิติหน้าตัดของชิ้นงานและมุมยึดลึกลงของชิ้นงานตามตำแหน่งต่างๆที่ทำการศึกษาต่อไป

ตารางที่ 4.7 เป็นค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากกล้องวัดขนาดมิติพารามิเตอร์ของส้นด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (Olympus GX 71) ซึ่งสามารถวัดขนาดออกมาเป็นตัวเลขตามจุดที่กำหนดและการคำนวณด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกว้าง โดยค่าที่ได้จะนำไปใช้ในการแสดงผลในบทที่ 7 ต่อไป ความหมายสัญลักษณ์ต่างๆที่ใช้ในตารางที่ 4.7 เหมือนกันกับความหมายที่ใช้ในตารางที่ 4.5 และ 4.6 ข้างต้น

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบทอกลวง

$R_t$ (%)	$F$ (N)	$A$ (mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma'$ (N/mm <sup>2</sup> )	$t_w$ (mm)	$t'_w$ (mm)	$w_{rb}$ (mm)	$w'_{rb}$ (mm)
20.88	237	6.75	0.00	35.11	0.347	0.351	0.197	0.197
27.38	201	6.22	35.11	32.32	0.351	0.357	0.197	0.189
33.89	175	5.59	32.32	31.31	0.357	0.365	0.189	0.173
41.47	149	4.94	31.31	30.16	0.365	0.375	0.173	0.151
47.25	125	4.24	30.16	29.48	0.375	0.387	0.151	0.128
56.41	106	3.69	29.48	28.73	0.387	0.403	0.128	0.104
62.79	92	3.17	28.73	29.02	0.403	0.422	0.104	0.081
68.81	76	2.71	29.02	28.04	0.422	0.444	0.081	0.060
73.39	65	2.31	28.04	28.14	0.444	0.469	0.061	0.043
77.36	54	1.98	28.14	27.27	0.469	0.498	0.043	0.029
80.97	43	1.67	27.27	25.75	0.498	0.531	0.029	0.019
84.10	32	1.36	25.75	23.53	0.531	0.570	0.019	0.012

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบทอกลวง (ต่อ)

$R_t$ (%)	$w_{rt}$ (mm)	$w'_{rt}$ (mm)	$h_r$ (mm)	$h'_r$ (mm)	$P_r$ (mm)	$P'_r$ (mm)	$\psi$ (degree)	$\psi'$ (degree)
20.88	0.138	0.138	0.263	0.263	0.393	0.393	38	37
27.38	0.138	0.133	0.263	0.255	0.393	0.378	37	35
33.89	0.133	0.123	0.255	0.239	0.378	0.356	35	31
41.47	0.123	0.109	0.239	0.217	0.356	0.331	31	27
47.25	0.109	0.091	0.217	0.189	0.331	0.300	27	23
56.41	0.091	0.073	0.189	0.158	0.300	0.262	23	19
62.79	0.073	0.057	0.159	0.128	0.262	0.221	19	15
68.81	0.057	0.042	0.129	0.099	0.221	0.177	15	11.5
73.39	0.042	0.03	0.100	0.074	0.177	0.129	11.5	8
77.36	0.029	0.02	0.074	0.053	0.129	0.084	8	5
80.97	0.02	0.013	0.053	0.036	0.084	0.048	5	2.8
84.10	0.013	0.008	0.036	0.023	0.048	0.023	2.8	1.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 เป็นค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการวัดขนาดมิติพารามิเตอร์ของสันด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (Olympus GX 71) ซึ่งสามารถวัดขนาดออกมาเป็นตัวเลขตามจุดที่กำหนดและการคำนวณด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบ ท่อกลวง โดยค่าที่ได้จะนำไปใช้ในการแสดงผลในบทที่ 8 ต่อไป

#### ความหมายสัญลักษณ์ต่างๆที่ใช้ในตารางที่ 4.8 ถึง 4.9

$F$	= แรงดึงขึ้นรูป (นิวตัน)
$A_1$	= พื้นที่หน้าตัดหลังดึงขึ้นรูป (ตารางมิลลิเมตร)
$\sigma_d$	= ความเค้นดึงขึ้นรูป (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
$VHN$	= Brinell Hardness Number (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
$\sigma_y = \frac{VHN}{3}$	= ความเค้นคราก (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
$D_0$	= ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนดึงขึ้นรูป (มิลลิเมตร)
$D_1$	= ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังดึงขึ้นรูป (มิลลิเมตร)
$D_2$	= ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังดึงขึ้นรูป (มิลลิเมตร)
$R_f\%$	= เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดรวม (เปอร์เซ็นต์)
$h'$	= ความสูงสันหลังดึง (มิลลิเมตร)
$d_{rb}$	= เส้นผ่านศูนย์กลางฐานสัน (มิลลิเมตร)
$\pi d_{rb}$	= เส้นรอบวงฐานสัน (มิลลิเมตร)
$w'_{rb}$	= ความกว้างฐานสันหลังดึง (มิลลิเมตร)
$n$	= จำนวนสัน (สัน)
$d_{rt}$	= เส้นผ่านศูนย์กลางยอดสัน (มิลลิเมตร)
$w'_{rt}$	= ความกว้างยอดสันหลังดึง (มิลลิเมตร)
$\psi'$	= มุมอีลิปส์หลังดึง (องศา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดรวม (Total reduction:  $R_t$ %) ของ ISRCT ด้วยวิธีการดึง  
ขั้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกลวง

ครั้งที่	$D_0$ (mm)	$D_1$ (mm)	$R_t$ (%)	ครั้งที่	$D_0$ (mm)	$D_1$ (mm)	$R_t$ (%)
1	5.00	4.87	2.52	13	3.16	2.95	49.76
2	4.87	4.74	5.18	14	2.95	2.74	55.66
3	4.74	4.61	7.99	15	2.74	2.50	61.08
4	4.61	4.47	11.05	16	2.50	2.29	66.39
5	4.47	4.33	14.25	17	2.29	2.05	71.20
6	4.33	4.18	17.57	18	2.05	1.83	75.78
7	4.18	4.03	21.20	19	1.83	1.64	79.88
8	4.03	3.87	25.08	20	1.64	1.47	83.49
9	3.87	3.70	29.37	21	1.47	1.31	86.63
10	3.70	3.53	34.10	22	1.31	1.16	88.00
11	3.53	3.35	38.80	23	1.16	1.02	90.54
12	3.35	3.16	44.10				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบทอกลวง

$R_t$ (%)	$F$ (N)	$A_1$ (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_d$ (N/mm <sup>2</sup> )	$VHN$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_d/\sigma_y$
2.52	220	8.30	26.49	183.76	61.25	0.43
5.18	240	8.09	29.66	194.69	64.90	0.45
7.99	250	7.89	31.67	203.83	67.94	0.47
11.05	255	7.64	33.39	214.91	71.64	0.47
14.25	270	7.38	36.57	222.98	74.33	0.49
17.57	280	7.12	39.34	233.05	77.68	0.51
21.20	295	6.84	43.12	242.12	80.71	0.53
25.08	311	6.55	47.45	253.19	84.40	0.56
29.37	330	6.22	53.07	264.26	88.09	0.60
34.10	340	5.86	58.00	273.33	91.11	0.64
38.80	350	5.47	63.98	284.41	94.80	0.67
44.10	378	4.99	75.81	293.48	97.82	0.78
49.76	395	4.56	86.58	303.55	101.18	0.86
55.66	420	4.14	101.50	314.62	104.87	0.97
61.08	430	3.68	116.98	319.69	106.56	1.10
66.39	450	2.789	161.35	320.76	106.92	1.51
71.20	470	2.39	196.65	333.84	111.28	1.77
75.78	485	2.01	241.29	342.91	114.30	2.11
79.88	498	1.67	298.20	352.98	117.66	2.53
83.49	508	1.37	370.80	364.05	121.35	3.06
86.63	519	1.11	467.56	400.12	133.37	3.51
88.00	531	0.996	533.13	402.34	134.11	3.98
90.54	543	0.875	620.57	409.42	136.47	4.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกลม (ต่อ)

$R_t$ (%)	$D_0$ (mm)	$D_1$ (mm)	$t'_w$ (mm)	$h'_r$ (mm)	$t'_w + h'_r$ (mm)	$(t'_w + h'_r) / D$
2.52	5.00	3.71	0.645	0.280	0.925	0.185
5.18	4.87	3.59	0.640	0.269	0.909	0.186
7.99	4.74	3.44	0.650	0.266	0.916	0.193
11.05	4.61	3.31	0.650	0.266	0.916	0.198
14.25	4.47	3.17	0.650	0.267	0.917	0.205
17.57	4.33	3.01	0.660	0.268	0.928	0.214
21.20	4.18	2.88	0.650	0.269	0.919	0.219
25.08	4.03	2.71	0.660	0.269	0.929	0.230
29.37	3.87	2.52	0.675	0.270	0.945	0.244
34.10	3.70	2.34	0.680	0.270	0.950	0.256
38.80	3.53	2.16	0.685	0.267	0.952	0.269
44.10	3.35	1.99	0.680	0.263	0.943	0.281
49.76	3.16	1.80	0.680	0.256	0.936	0.296
55.66	2.95	1.60	0.675	0.253	0.928	0.314
61.08	2.74	1.42	0.660	0.252	0.912	0.332
66.39	2.50	1.23	0.635	0.252	0.887	0.354
71.20	2.29	1.08	0.605	0.251	0.856	0.373
75.78	2.05	0.95	0.550	0.250	0.800	0.390
79.88	1.83	0.82	0.507	0.249	0.756	0.413
83.49	1.64	0.73	0.455	0.248	0.703	0.428
86.63	1.47	0.64	0.415	0.247	0.662	0.450
88.00	1.31	0.58	0.365	0.246	0.611	0.466
90.54	1.16	0.50	0.330	0.220	0.550	0.474

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านด้ายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบทอกลวง (ต่อ)

$R_t$ (%)	$\pi d_{rb}$ (mm)	$w'_{rb}$ (mm)	$n$ (ribs)	$w'_{rb}/(\pi d_{rb}/n)$	$d_{rt}$ (mm)	$\pi d_{rt}/n$ (mm)
2.52	0.298	0.230	45	0.771	3.71	0.259
5.18	0.288	0.224	45	0.776	3.59	0.251
7.99	0.277	0.217	45	0.782	3.44	0.240
11.05	0.268	0.213	45	0.794	3.31	0.231
14.25	0.259	0.208	45	0.804	3.17	0.221
17.57	0.248	0.202	45	0.816	3.01	0.210
21.20	0.239	0.198	45	0.829	2.88	0.201
25.08	0.227	0.191	45	0.842	2.71	0.189
29.37	0.214	0.183	45	0.856	2.52	0.176
34.10	0.201	0.176	45	0.875	2.34	0.163
38.80	0.188	0.168	45	0.893	2.16	0.151
44.10	0.176	0.160	45	0.911	1.99	0.139
49.76	0.162	0.150	45	0.929	1.80	0.126
55.66	0.147	0.140	45	0.952	1.60	0.112
61.08	0.134	0.130	45	0.967	1.42	0.099
66.39	0.121	0.119	45	0.983	1.23	0.086
71.20	0.111	0.110	45	0.991	1.08	0.075
75.78	0.101	0.101	45	0.995	0.95	0.066
79.88	0.092	0.092	45	1.000	0.82	0.057
83.49	0.086	0.086	45	1.000	0.73	0.051
86.63	0.079	0.079	45	1.000	0.64	0.045
88.00	0.075	0.075	45	1.000	0.58	0.041
90.54	0.066	0.066	45	1.000	0.50	0.035

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านด้ายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกลวง (ต่อ)

$R_t$ (%)	$w'_{rt}$ (mm)	$w'_{rt}/(\pi d_{rt}/n)$ (mm)	$(w'_{rb}/w'_{rt})/2$ (mm)	$\tan \frac{\psi'}{2}$ (degree)	$\frac{\psi'}{2}$ (degree)	$\psi'$ (degree)
2.52	0.175	0.675	0.078	0.344	19.00	38.00
5.18	0.170	0.679	0.077	0.344	18.98	37.95
7.99	0.165	0.688	0.075	0.336	18.58	37.17
11.05	0.161	0.695	0.072	0.324	17.93	35.87
14.25	0.155	0.701	0.069	0.310	17.24	34.47
17.57	0.150	0.714	0.065	0.294	16.38	32.77
21.20	0.144	0.717	0.061	0.277	15.45	30.91
25.08	0.139	0.733	0.056	0.256	14.36	28.72
29.37	0.133	0.754	0.051	0.232	13.07	26.15
34.10	0.126	0.772	0.045	0.207	11.70	23.40
38.80	0.119	0.792	0.039	0.184	10.44	20.87
44.10	0.113	0.809	0.035	0.162	9.18	18.36
49.76	0.105	0.835	0.028	0.133	7.59	15.18
55.66	0.097	0.868	0.021	0.102	5.82	11.64
61.08	0.089	0.897	0.016	0.078	4.45	8.90
66.39	0.081	0.937	0.010	0.054	3.10	6.21
71.20	0.073	0.964	0.006	0.034	1.92	3.85
75.78	0.065	0.972	0.003	0.019	1.08	2.15
79.88	0.057	1.000	0.000	0.000	0.00	0.00
83.49	0.051	1.008	0.000	0.000	0.00	0.00
86.63	0.046	1.022	0.000	0.000	0.00	0.00
88.00	0.042	1.027	0.000	0.000	0.00	0.00
90.54	0.036	1.031	0.000	0.000	0.00	0.00

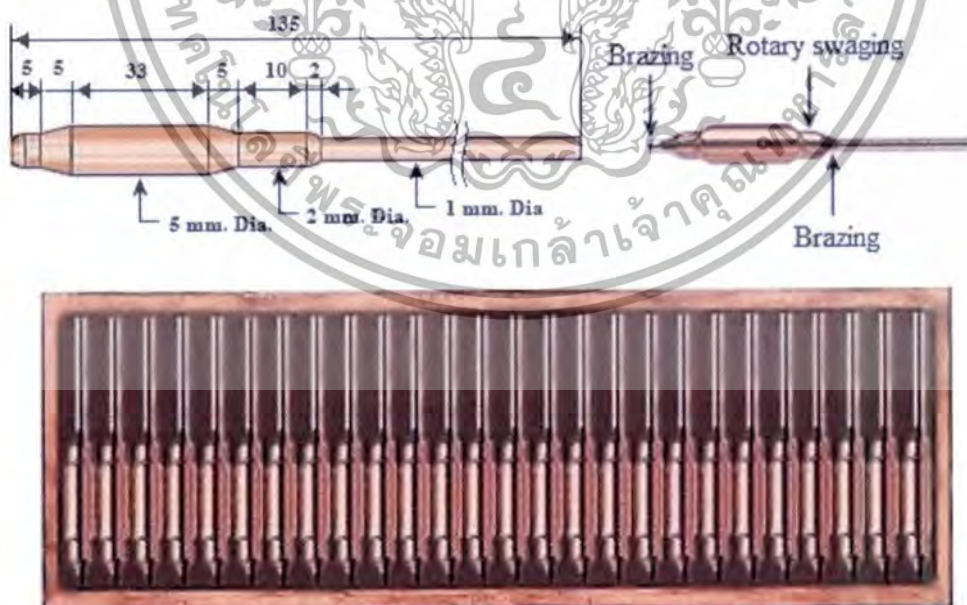
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 วิธีทดลองการศึกษาการดึงขึ้นรูปโดยใช้ผง น้ำ และน้ำมันคอมเพรสเซอร์เป็นแมนเดรล ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing)

เริ่มต้นทำการติดตั้งเครื่องมือจับยึดตายที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการดึงขึ้นรูปท่อมาเป็นพิเศษทั้งหมดลงบนเครื่อง Testometric Mico 500 หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเรียบร้อยแล้วทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำความสะอาดพื้นผิว และเคลือบด้วยสารหล่อลื่นเทฟลอนเรซินแล้วจึงดึงขึ้นรูปท่อใช้น้ำมันสบู่หล่อลื่นโซเดียมสเตียเรต (Sodium stearate) เป็นสารหล่อลื่นลดแรงดึงผิว จากนั้นทำการตั้งค่าต่างๆในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก่อนที่จะทำการทดสอบโดยการตั้งค่าต่างๆที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. ค่าความเร็วในการทดลองที่ 150 มิลลิเมตรต่อวินาที
2. กำหนดสเกลวัดแรงดึงสูงสุดไว้ที่ 50 กิโลนิวตัน
3. ตั้งชนิดการทดสอบไว้เป็นทดสอบแรงดึง
4. ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียสคงที่

จากรูปที่ 4.17 ชิ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ถูกตัดตามความยาวประมาณ 60 มิลลิเมตร หลังจากนั้นใช้วิธีการอัดและถากระแทกหลายๆ ครั้ง ที่ปลายทั้งสองข้างเพื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลงเหลือ 2 มิลลิเมตร ความยาวประมาณ 27 มิลลิเมตร เพื่อให้สอดเข้าไปในตาย (Die) ที่ปลายด้านหนึ่งใช้ลวดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ความยาวประมาณ 80 มิลลิเมตร สอดเข้าไปความลึกประมาณ 5 มิลลิเมตร และที่ปลายอีกด้านหนึ่งบรรจุด้วยแมนเดรล (ใช้ผง น้ำ และน้ำมันคอมเพรสเซอร์) ที่ใช้เป็นแมนเดรล จากนั้นทำการอัดปลายให้สนิทด้วยลวดทองแดงไม่ให้เกิดรอยรั่วซึมแล้วทำการบัดกรีแข็งเพื่อยึดติดปลายเส้นลวดทั้งสองด้าน ปลายด้านที่มีก้านยาวยื่นออกมาจะใช้เป็นส่วนที่ถูกหัวจับของเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ดึงขึ้นรูปในการทดลอง



รูปที่ 4.17 ชิ้นงานทดสอบการดึงขึ้นรูปแบบใช้ผง น้ำ และน้ำมันคอมเพรสเซอร์เป็นแมนเดรล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนต่อไปทำการดึงขึ้นรูปท่อที่ใช้ในการทดลองแบบใช้ซี่ผึ้ง น้ำ และน้ำมันคอมเพรสเซอร์เป็นแมนเดรล ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) โดย ISRCT ที่ใช้ในการทดลองดังกล่าวกระทำซ้ำในแต่ละตัวอย่างจำนวน 10 ครั้ง เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยการดึงขึ้นรูปแต่ละครั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนดึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังดึงและเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดรวม (Total reduction:  $R_t\%$ ) แสดงดังตารางที่ 4.10 โดยค่าที่ได้จะนำไปใช้ในการแสดงผลในบทที่ 10 ต่อไป

หลังจากการทดลองสิ้นสุดลง จากนั้นจึงนำท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายใน (Inner Spiral Ribbed Copper Tube: ISRCT) ที่ผ่านการดึงขึ้นรูปจากการทดลองมาทำการตัดออกตามแนวตั้งฉากกับแนวแกนและตามแนวขนานกับแนวแกน จากนั้นนำไป Mount กับ Bakelite ขั้นตอนต่อไปขัดผิวให้เรียบด้วยกระดาษทราย โดยค่อย ๆ เพิ่มความละเอียดของกระดาษทราย จนกระทั่งผิวของชิ้นงานเรียบไม่มีรอยขีดข่วน ต่อจากนั้นจึงนำชิ้นงานทดลองไปส่องกล้องเพื่อวัดขนาดของมิติหน้าตัดของชิ้นงานและมุมเอียงของชิ้นงานตามตัวแปรต่างๆที่ทำการศึกษาต่อไป

ความหมายสัญลักษณ์ต่างๆที่ใช้ในตารางที่ 4.10 ถึง 4.13

$R_t\%$	= เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดรวม (เปอร์เซ็นต์)
$D_0$	= ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนดึงขึ้นรูป (มิลลิเมตร)
$D_1$	= ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังดึงขึ้นรูป (มิลลิเมตร)
$A_0$	= พื้นที่หน้าตัดก่อนดึงขึ้นรูป (ตารางมิลลิเมตร)
$A_1$	= พื้นที่หน้าตัดหลังดึงขึ้นรูป (ตารางมิลลิเมตร)
$F$	= แรงดึงขึ้นรูป (นิวตัน)
$\sigma$	= ความเค้นก่อนดึงขึ้นรูป (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
$\sigma'$	= ความเค้นหลังดึงขึ้นรูป (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
$t_w$	= ความหนาผนังท่อนดึง (มิลลิเมตร)
$t'_w$	= ความหนาผนังท่อหลังดึง (มิลลิเมตร)
$h_r$	= ความสูงสันก่อนดึง (มิลลิเมตร)
$h'_r$	= ความสูงสันหลังดึง (มิลลิเมตร)
$w_{rb}$	= ความกว้างฐานสันก่อนดึง (มิลลิเมตร)
$w'_{rb}$	= ความกว้างฐานสันหลังดึง (มิลลิเมตร)
$w_r$	= ความกว้างยอดสันก่อนดึง (มิลลิเมตร)
$w'_r$	= ความกว้างยอดสันหลังดึง (มิลลิเมตร)
$P_r$	= ระยะพิตช์ก่อนดึง (มิลลิเมตร)
$P'_r$	= ระยะพิตช์หลังดึง (มิลลิเมตร)
$\psi$	= มุมเอียงก่อนดึง (องศา)
$\psi'$	= มุมเอียงหลังดึง (องศา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดรวม (Total reduction:  $R_t$ , %) ของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) ในการดึงขึ้นรูปแบบใช้ซี่ผึ้ง น้ำ และน้ำมันคอมเพรสเซอร์เป็นแมนเดรล

ครั้งที่	$D_0$ (mm)	$D_1$ (mm)	$R_t$ (%)	ครั้งที่	$D_0$ (mm)	$D_1$ (mm)	$R_t$ (%)
1	5.00	4.47	20.88	7	2.56	2.29	62.79
2	4.47	4.00	27.38	8	2.29	2.05	68.81
3	4.00	3.58	33.89	9	2.05	1.83	73.39
4	3.58	3.20	41.47	10	1.83	1.64	77.36
5	3.20	2.86	47.25	11	1.64	1.47	80.97
6	2.86	2.56	56.41	12	1.47	1.31	84.10

ตารางที่ 4.10 เป็นค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากกราฟวัดขนาดมิติพารามิเตอร์ของเส้นด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (Olympus GX 71) ซึ่งสามารถวัดขนาดออกมาเป็นตัวเลขตามจุดที่กำหนดและการคำนวณด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบใช้ซี่ผึ้งเป็นแมนเดรล โดยค่าที่ได้จะนำไปใช้ในการแสดงผลในบทที่ 10 ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆในการศึกษาการดึงขึ้นรูปแบบใช้ซี่ผึ้งเป็นแมนเดรล ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านด้ายหลายครั้ง (Multi-passes drawing)

$R_t$ (%)	$F$ (N)	$A_1$ (mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma'$ (N/mm <sup>2</sup> )	$t_w$ (mm)	$t'_w$ (mm)	$w_{rb}$ (mm)	$w'_{rb}$ (mm)
20.88	250	6.27	0.00	39.87	0.305	0.306	0.330	0.210
27.38	214	5.82	39.87	36.77	0.306	0.308	0.210	0.202
33.89	188	5.12	36.77	36.71	0.308	0.310	0.202	0.186
41.47	162	4.48	36.71	36.16	0.310	0.313	0.186	0.164
47.25	138	3.83	36.16	36.03	0.313	0.3165	0.164	0.141
56.41	119	3.17	36.03	37.54	0.3165	0.3205	0.141	0.117
62.79	105	2.62	37.54	40.08	0.3205	0.3249	0.117	0.094
68.81	89	2.16	40.08	41.20	0.3249	0.330	0.094	0.073
73.39	78	1.82	41.20	42.86	0.330	0.336	0.073	0.056
77.36	67	1.52	42.86	44.08	0.336	0.342	0.056	0.042
80.97	56	1.29	44.08	43.41	0.342	0.349	0.042	0.031
84.10	45	1.10	43.41	40.91	0.349	0.357	0.0305	0.022

ตารางที่ 4.11 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆในการศึกษาการดึงขึ้นรูปแบบใช้ซี่ผึ้งเป็นแมนเดรล ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านด้ายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) (ต่อ)

$R_t$ (%)	$w_n$ (mm)	$w'_n$ (mm)	$h_n$ (mm)	$h'_n$ (mm)	$p_n$ (mm)	$p'_n$ (mm)	$\psi$ (degree)	$\psi'$ (degree)
20.88	0.151	0.151	0.273	0.273	0.406	0.406	38	37
27.38	0.151	0.145	0.273	0.265	0.406	0.391	37	36.4
33.89	0.145	0.136	0.265	0.249	0.391	0.369	36.4	32.4
41.47	0.136	0.122	0.249	0.227	0.369	0.344	32.4	28.4
47.25	0.122	0.104	0.227	0.199	0.344	0.313	28.4	24.4
56.41	0.104	0.086	0.199	0.168	0.313	0.275	24.4	20.4
62.79	0.086	0.07	0.168	0.138	0.275	0.234	20.4	16.4
68.81	0.07	0.055	0.138	0.109	0.234	0.190	16.4	12.9
73.39	0.055	0.042	0.108	0.084	0.190	0.142	12.9	9.4
77.36	0.042	0.031	0.083	0.063	0.138	0.097	9.4	6.4
80.97	0.031	0.022	0.0621	0.046	0.094	0.061	6.4	4.2
84.10	0.022	0.015	0.0455	0.033	0.060	0.036	4.2	2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 เป็นค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการวัดขนาดมิติพารามิเตอร์ของเส้นด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (Olympus GX 71) ซึ่งสามารถวัดขนาดออกมาเป็นตัวเลขตามจุดที่กำหนดและการคำนวณด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบใช้น้ำเป็นแมนเดรล โดยค่าที่ได้จะนำไปใช้ในการแสดงผลในบทที่ 10 ต่อไป

ตารางที่ 4.12 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆในการศึกษาการดึงขึ้นรูปแบบใช้น้ำเป็นแมนเดรล ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing)

$R_t$ (%)	$F$ (N)	$A$ (mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma'$ (N/mm <sup>2</sup> )	$t_w$ (mm)	$t'_w$ (mm)	$w_{rb}$ (mm)	$w'_{rb}$ (mm)
20.88	241	6.47	0.00	37.25	0.332	0.334	0.201	0.201
27.38	205	5.99	37.25	34.22	0.334	0.337	0.201	0.193
33.89	179	5.30	34.22	33.77	0.337	0.341	0.193	0.177
41.47	153	4.58	33.77	33.41	0.341	0.346	0.177	0.155
47.25	129	3.88	33.41	33.25	0.346	0.352	0.155	0.132
56.41	110	3.24	33.25	33.95	0.352	0.36	0.132	0.108
62.79	96	2.71	33.95	35.42	0.360	0.369	0.108	0.085
68.81	80	2.26	35.42	35.40	0.369	0.379	0.085	0.064
73.39	69	1.90	35.40	36.32	0.379	0.391	0.065	0.047
77.36	58	1.61	36.32	36.02	0.391	0.404	0.048	0.034
80.97	47	1.39	36.02	33.81	0.404	0.419	0.034	0.023
84.10	36	1.17	33.81	30.77	0.419	0.436	0.0228	0.015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆในการศึกษาการดึงขึ้นรูปแบบใช้น้ำเป็นแมนเดรล ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) (ต่อ)

$R_r$ (%)	$w_{r1}$ (mm)	$w'_{r1}$ (mm)	$h_r$ (mm)	$h'_r$ (mm)	$P_r$ (mm)	$P'_r$ (mm)	$\psi$ (degree)	$\psi'$ (degree)
20.88	0.142	0.142	0.267	0.267	0.397	0.397	38	37
27.38	0.142	0.136	0.267	0.259	0.397	0.382	37	35.5
33.89	0.136	0.127	0.259	0.243	0.382	0.360	35.5	31.5
41.47	0.127	0.113	0.243	0.221	0.360	0.335	31.5	27.5
47.25	0.113	0.095	0.221	0.193	0.335	0.304	27.5	23.5
56.41	0.097	0.077	0.193	0.162	0.304	0.266	23.5	19.5
62.79	0.079	0.061	0.162	0.132	0.266	0.225	19.5	15.5
68.81	0.0625	0.046	0.132	0.103	0.225	0.181	15.5	12
73.39	0.0468	0.033	0.103	0.078	0.181	0.133	12	8.5
77.36	0.0333	0.022	0.0781	0.057	0.133	0.088	8.5	5.5
80.97	0.0224	0.014	0.057	0.04	0.088	0.052	5.5	3.3
84.10	0.014	0.008	0.04	0.027	0.052	0.027	3.3	1.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 เป็นค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการวัดขนาดมิติพารามิเตอร์ของเส้นด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (Olympus GX 71) ซึ่งสามารถวัดขนาดออกมาเป็นตัวเลขตามจุดที่กำหนดและการคำนวณด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบใช้น้ำมันคอมเพรสเซอร์เป็นแมนเดรล โดยค่าที่ได้จะนำไปใช้ในการแสดงผลในบทที่ 10 ต่อไป

ตารางที่ 4.13 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆในการศึกษาการดึงขึ้นรูปแบบใช้น้ำมันคอมเพรสเซอร์เป็นแมนเดรล ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing)

$R_t$ (%)	$F$ (N)	$A$ (mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma'$ (N/mm <sup>2</sup> )	$t_w$ (mm)	$t'_w$ (mm)	$w_{rb}$ (mm)	$w'_{rb}$ (mm)
20.88	244	6.41	0.00	38.07	0.323	0.325	0.204	0.204
27.38	208	5.93	38.07	35.08	0.325	0.328	0.204	0.196
33.89	182	5.27	35.08	34.54	0.328	0.332	0.196	0.180
41.47	156	4.59	34.54	33.99	0.332	0.337	0.180	0.158
47.25	132	3.89	33.99	33.93	0.337	0.343	0.158	0.135
56.41	113	3.26	33.93	34.66	0.343	0.350	0.135	0.111
62.79	99	2.72	34.66	36.40	0.350	0.358	0.111	0.088
68.81	83	2.27	36.40	36.56	0.358	0.367	0.088	0.067
73.39	72	1.91	36.56	37.70	0.367	0.378	0.067	0.050
77.36	61	1.61	37.70	37.89	0.378	0.390	0.051	0.037
80.97	50	1.37	37.89	36.50	0.390	0.404	0.037	0.026
84.10	39	1.16	36.50	33.62	0.404	0.419	0.026	0.018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆในการศึกษาการดึงขึ้นรูปแบบใช้น้ำมันคอมเพรสเซอร์เป็นแมนเดรล ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) (ต่อ)

$R_r$ (%)	$w_r$ (mm)	$w'_r$ (mm)	$h_r$ (mm)	$h'_r$ (mm)	$P_r$ (mm)	$P'_r$ (mm)	$\psi$ (degree)	$\psi'$ (degree)
20.88	0.145	0.145	0.270	0.270	0.400	0.400	38	37
27.38	0.145	0.139	0.270	0.262	0.400	0.385	37	35.8
33.89	0.139	0.13	0.262	0.246	0.385	0.363	35.8	31.8
41.47	0.13	0.116	0.246	0.224	0.363	0.338	31.8	27.8
47.25	0.116	0.098	0.224	0.196	0.338	0.307	27.8	23.8
56.41	0.098	0.08	0.196	0.165	0.307	0.269	23.8	19.8
62.79	0.08	0.064	0.165	0.135	0.269	0.228	19.8	15.8
68.81	0.064	0.049	0.135	0.106	0.228	0.184	15.8	12.3
73.39	0.049	0.036	0.106	0.081	0.183	0.136	12.3	8.8
77.36	0.036	0.025	0.081	0.060	0.135	0.091	8.8	5.8
80.97	0.025	0.017	0.060	0.043	0.092	0.055	5.8	3.6
84.10	0.017	0.011	0.043	0.030	0.055	0.03	3.6	2

### 4.3 บทสรุป

จากผลการทดลองดังกล่าวมาข้างต้น ข้อมูลที่ได้มาทั้งหมดเก็บบันทึกไว้ในตารางสรุปผลและได้นำมาวิเคราะห์ผล สามารถสรุปได้ดังนี้

[1] ค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้จากการวัดขนาดรูปทรงมิติของชิ้น วัดด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (Olympus-GX 71) ซึ่งสามารถวัดขนาดออกมาเป็นตัวเลขตามจุดที่กำหนด การวัดขนาดเช่นเดียวกับการวัดขนาดในโปรแกรมเขียนแบบคอมพิวเตอร์ทั่วไป

[2] ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการทดลองนำมาประยุกต์ใช้ในการนำเสนอในบทที่ 6, 7, 8 และบทที่ 10 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### 5.1 บทนำ

วิธีการที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้นำโปรแกรม ABAQUS [119] ซึ่งเป็นโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการจำลองสถานการณ์กระบวนการดึงขึ้นรูปท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายใน (ISRCT) ในบทนี้จะแนะนำวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์พื้นฐานและอธิบายวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ใน ABAQUS ตลอดจนโมเดลและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

### 5.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์หาการกระจัด ความเค้น ความเครียดในกระบวนการผลิตด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่นิยมใช้กันมากขึ้นในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการผลิตที่มีความซับซ้อนที่ไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีธรรมดา ปัจจุบันเครื่องคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาให้มีขีดความสามารถในการคำนวณมากขึ้น จึงทำให้การวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำได้ละเอียด ถูกต้อง รวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่าย

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เข้ามามีอิทธิพลต่อการออกแบบงานทางวิศวกรรมเป็นอย่างมากในปัจจุบันวิศวกรในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ส่วนนำการใช้งานไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์เพื่อป้องกันถึงปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการออกแบบได้โดยตรงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยไม่ต้องลงมือทดลอง ถูกตั้งเช่นที่เคยทำกันมาในอดีต กระบวนการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยทั่วไปประกอบด้วย การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ การเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ การประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ การรวมสมการไฟไนต์เอลิเมนต์เข้าด้วยกันแล้วแก้สมการระบบใหญ่และการคำนวณหาค่าอื่น ๆ ที่เหลือ อย่างไรก็ตามการที่จะได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องเที่ยงตรงนั้น ผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องมีองค์ความรู้ในหลาย ๆ ด้าน นับตั้งแต่คณิตศาสตร์ขั้นสูง ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ความเข้าใจในส่วนโปรแกรมคอมพิวเตอร์และประสบการณ์การใช้กราฟิกส์ซอฟต์แวร์บนเครื่องคอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วย การเรียกใช้โปรแกรม การสร้างโมเดลและวิเคราะห์โมเดล การกำหนดชนิดวัสดุ การสร้างและการกำหนดส่วนของคุณสมบัติของวัสดุ การประกอบโมเดล การวิเคราะห์ การกำหนดผลลัพธ์ที่จะแสดงผลออกมา การกำหนดค่าสภาวะขอบกับภาระกระทำ การสร้าง Mesh ให้กับโมเดล การสร้าง analysis Job และการ Run การดูผลลัพธ์จากการวิเคราะห์

จากข้อมูลที่ได้จากการคำนวณและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำการสรุปผลลัพธ์ที่ได้ตามตัวแปรในกระบวนการผลิตที่ทำการศึกษาและแก้ปัญหาทางวิศวกรรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ABAQUS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

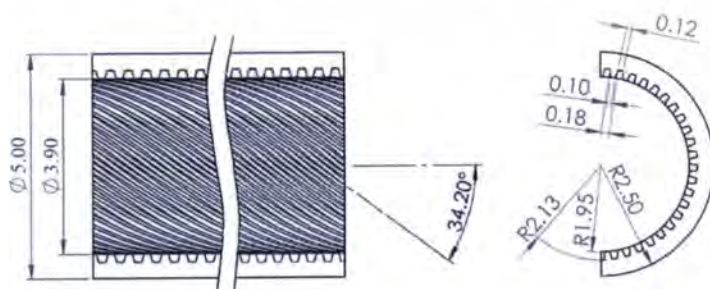
### 5.3 โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (ABAQUS)

ABAQUS นั้นเป็นโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกออกแบบและพัฒนาให้เป็นเครื่องมือที่มีความยืดหยุ่นสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบโครงสร้างแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น โครงสร้างของโปรแกรมนี้อาจมีประสิทธิภาพมากสำหรับการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดที่พบในกระบวนการขึ้นรูปโลหะ แบบจำลองและพารามิเตอร์ต่างๆถูกป้อนลงในโปรแกรม ABAQUS ข้อมูลของแบบจำลองที่กำหนดประกอบด้วยโหนด เอลิเมนต์ คุณสมบัติของวัสดุ เงื่อนไขสภาวะเริ่มต้นและเงื่อนไขที่ขอบเขต ฯลฯ ข้อมูลต่างๆเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดการกระทำของรูปแบบจำลองที่ต้องการในการแก้ปัญหา โดยถูกแบ่งออกเป็นขั้นเป็นตอน การกำหนดประเภทของการวิเคราะห์ โหลดที่กระทำ การทำซ้ำ เป็นวิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหาเพื่อให้ผลลัพธ์เข้าสู่สมดุล

ABAQUS สามารถแก้ปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้น 2 รูปแบบ รูปแบบแรกผู้ใช้เลือกการควบคุมโดยตรง โดยที่การควบคุมโดยตรงจะเป็นประโยชน์เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลเป็นลักษณะการกระทำแบบซ้ำ ๆ และผู้ใช้สามารถคาดการณ์การตอบสนองได้เอง รูปแบบที่สองคือการควบคุมโดยอัตโนมัติที่ผู้ใช้กำหนดพิกัดของข้อผิดพลาดและโปรแกรมจะเลือกการทำซ้ำที่ขั้นตอนอย่างอัตโนมัติ วิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพเมื่อเวลาหรือโหลดเพิ่มขึ้นไม่คงที่ในแต่ละช่วงเวลา

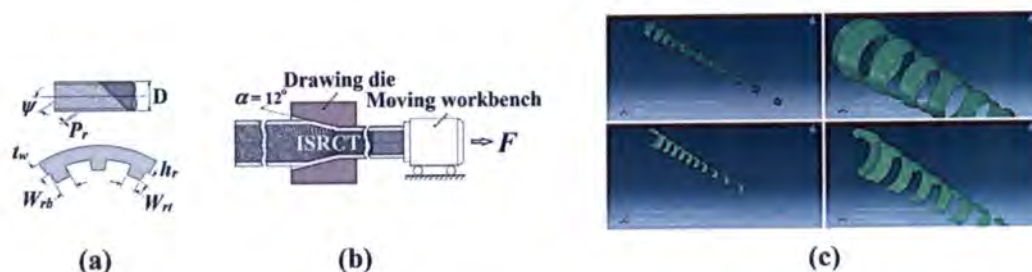
#### 5.3.1 วิธีการจำลองสถานการณ์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองสถานการณ์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นท่อทองแดงที่มีเส้นขดเป็นเกลียวอยู่ภายใน (Inner spiral ribbed copper tubes, ISRCT) แบบไร้ตะเข็บ โปรแกรม ABAQUS ถูกนำมาใช้ในการจำลองสถานการณ์ครั้งนี้ แบบจำลอง ISRCT ที่ใช้ในการจำลองการทำงานเป็นแบบ 3D มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5.00 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3.90 มิลลิเมตร ความหนาของผนัง 0.37 มิลลิเมตร ความสูงของสัน 0.18 มิลลิเมตร ความกว้างของฐานสัน 0.18 มิลลิเมตร ช่องว่างที่ฐานสัน 0.12 มิลลิเมตร ความกว้างของยอดสัน 0.10 มิลลิเมตร ช่องว่างที่ยอดสัน 0.20 มิลลิเมตร ระยะพิทช์ของสัน 0.27 มิลลิเมตร มุมยิลิกของสันเกลียว 34.20 องศา และมีจำนวนสันเกลียว 45 สัน แบบจำลองของตายเป็นแบบวัตถุเกร็ง (Rigid body) มีค่าครึ่งมมตาย 12 องศา ใช้ความเร็วในการดึงขึ้นรูปคงที่ 150 มิลลิเมตรต่อวินาที การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้ง (Re/P) อยู่ในช่วง 7 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ หน้าตัดของ ISRCT นั้นแสดงในรูปที่ 5.1 และได้ทำการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุและเงื่อนไขในการดึงขึ้นรูปต่างๆที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ไว้ในตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ภาคตัดของ ISRCT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 (a) แสดงภาคตัดตามแนวขวางและตามแนวยาวของ ISRCT (b) รูปแบบจำลองของการดึงขึ้นรูปโดยแรงตามแนวแกนด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง (c) แบบจำลองของ ISRCT และตายที่ใช้ในการจำลองการดึงขึ้นรูป

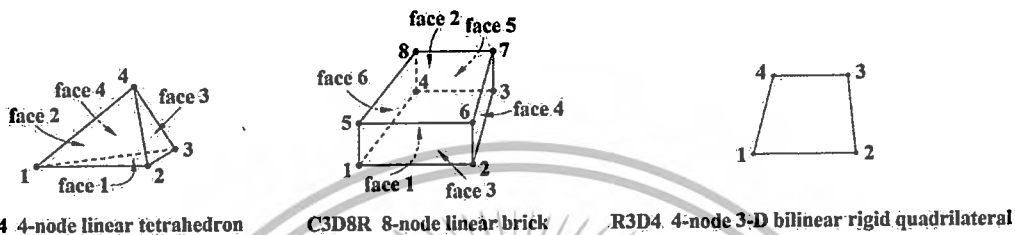
ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของ ISRCT ที่ใช้ในควรรจำลองสถานการณ์

คุณสมบัติ	ISRCT
Young's modulus, E (GPa)	110
Bulk modulus, k (GPa)	114.58
Shear modulus, G (GPa)	41.045
Tangent modulus, E <sub>t</sub> (GPa)	1
Yield stress, $\sigma_y$ (MPa)	150
Ultimate stress, $\sigma_u$ (MPa)	250
Poisson's ratio, $\nu$	0.34
Die half-angle, $\alpha$ (degree)	12
Coefficient of friction, $\mu$	0.02
Density, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	8300

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ (3D FEM) ใช้เทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการแก้ปัญหาที่เหมาะสมกับความหลากหลายของปัญหาทางวิศวกรรม ระเบียบวิธี 3D FEM เป็นวิธีการของการวิเคราะห์ความเค้นและขั้นตอนการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุชิ้นงานโดยใช้สมการพีชคณิตจำนวนมากพร้อมๆกันซึ่งถูกสร้างและแก้ไขได้โดยใช้เทคนิคการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ โดยการแปลงระบบทางกายภาพซึ่งมีตัวไม่รู้ค่าในระบบที่มีจำนวนมากของตัวแปร ซอฟต์แวร์ ABAQUS ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาทาง FEM และสมการอนุพันธ์ย่อย การสร้างแบบจำลองทาง FEM ของ ISRCT และตายสำหรับวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงโดยการสร้างรูปจำลองทางเรขาคณิตในซอฟต์แวร์ ABAQUS โดยแบ่งออกเป็นแบบจำลอง 3 มิติของ ISRCT และตายทั้งสองส่วน โดยกฎแจกจ่ายที่ถูกร่างขึ้นนั้นได้แก่ เส้นรูปทรงและพื้นที่ของแบบจำลอง โดยที่ภาคตัดของ ISRCT นั้นเคลื่อนที่ตามแนวแกน x มีโครงตาข่ายของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองรูปจัตุรมุขเชิงเส้น (linear tetrahedron) รูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์เชิงเส้น (linear brick) รูปสี่เหลี่ยมเชิงเส้น (Quadrilateral linear) และรูปสี่เหลี่ยมเชิงเส้นด้านไม่เท่า (Bilinear rigid quadrilateral) ตลอดแนวภาคตัดตามแนวขวางและตามแนวยาวของ ISRCT แบบจำลองนั้นรับแรงตามแนวแกนในการตั้งขึ้นรูปแบบท่อกลวง แบบจำลอง 3 มิติของ ISRCT และตายที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แสดงในรูปที่ 5.3



C3D4 4-node linear tetrahedron

C3D8R 8-node linear brick

R3D4 4-node 3-D bilinear rigid quadrilateral

รูปที่ 5.3 โหนดแบบ 3D โครงสร้างเอลิเมนต์ที่เป็นของแข็ง จาก ABAQUS user's manual [119]

การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของการขึ้นรูป ISRCT นั้น ในการวิจัยครั้งนี้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ซอฟต์แวร์ ABAQUS ขอบเขตที่ใช้กำหนดโครงตาข่าย (Mesh) ที่ตำแหน่งต่างๆของรูปแบบจำลองนั้นใช้เฉพาะเอลิเมนต์ที่รองรับและเหมาะสมกับการแก้ปัญหาเฉพาะทางเท่านั้น เอลิเมนต์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่รองรับการจำลองการทำงานในการขึ้นรูป ISRCT เป็นเอลิเมนต์แบบเปลือก (shell) ที่เป็นตัวแทนของรูปร่างของชิ้นงาน จำนวนของโหนดและจุดร่วมต่างๆที่นำมาใช้สำหรับแบบจำลอง 3 มิติที่มีจำนวนโหนดทั้งหมด 104,814 เป็นเอลิเมนต์ของแข็งสี่มุมประกอบด้วย 2 ส่วนหลักดังนี้ โดยบริเวณของสัน ISRCT ประกอบด้วย C3D4 เป็นแบบ 4-โหนดจัตุรมุขเชิงเส้น (linear tetrahedron) มีจำนวน 84074 โหนด เอลิเมนต์ของแข็งมีโหลดของแรงกระทำบริเวณขอบเขตของสันเป็นโหลดความเฉื่อย (Inertia load) ในการวิเคราะห์ความเค้น/ระยะกระจัดในงานวิจัยครั้งนี้ใช้เอลิเมนต์ลำดับที่หนึ่งจัตุรมุข (First-order tetrahedral element) C3D4 โดยกำหนดให้มีความเค้นคงที่ โดยแต่ละเอลิเมนต์แสดงให้เห็นถึงการลู่เข้าหากันอย่างช้าๆในการปรับจำนวนของช่องตาข่าย (Mesh) การใช้จำนวนของช่องตาข่ายให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้นั้นเป็นสิ่งที่ควรระวังหลีกเลี่ยง เอลิเมนต์ที่นำมาใช้นั้นจะให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีทั่วไปซึ่งนิยมใช้ช่องของตาข่ายขนาดเล็ก ในเอลิเมนต์ที่ใช้ขนาดของช่องตาข่ายสำหรับ ISRCT นั้น C3D4 ถูกนำมาใช้สำหรับบริเวณขอบเขตที่เกรเดียนท์ของความเค้น (stress gradient) อยู่ในระดับต่ำ สำหรับบริเวณผนังของ ISRCT นั้นมีจำนวน 20,740 เอลิเมนต์เป็นเอลิเมนต์ของแข็ง C3D8R เป็นแบบ 8 โหนดสี่เหลี่ยมลูกบาศก์เชิงเส้น (linear brick) และลดรูปรวมกันเป็นลักษณะการควบคุมแบบนาฬิกาทราย (Hourglass control) การควบคุมในลักษณะนี้เป็นเอลิเมนต์ที่ดีและเหมาะสำหรับการผสมผสานกันในรูปแบบ 3D และจำลองสถานการณ์การขึ้นรูป ในโปรแกรม Abaqus/Explicit มีสูตรสำหรับแก้ปัญหาทางจลนศาสตร์แบบสองทางเลือกโดยเอลิเมนต์ของแข็ง C3D8R นั้นสามารถลดทรัพยากรที่ใช้ในการคำนวณลงได้มาก เอลิเมนต์ของส่วนที่เป็นตาย (Die) นั้นเป็นเอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยมเชิงเส้น (Quadrilateral linear) จำนวน 1683 เอลิเมนต์ โดยที่ R3D4 นั้นเป็นแบบ 4 โหนด 3D รูปสี่เหลี่ยมเชิงเส้นแบบสี่เหลี่ยมเชิงเส้นด้านไม่เท่า (Bilinear rigid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

quadrilateral) เอลิเมนต์แบบ R3D4 สามารถกำหนดความหนาของเอลิเมนต์ให้เป็นเอลิเมนต์แบบผนังบางได้ ต่อจากนั้นจึงนำเอลิเมนต์แบบวัตถุแข็งเกร็งมาประกอบเข้าด้วยกัน ประเภทของโหนดที่เกี่ยวข้องนั้นก็ถูกสร้างขึ้นในแบบวัตถุแข็งเกร็งด้วยเช่นกัน เมื่อเชื่อมต่อเอลิเมนต์เข้าด้วยกันการสร้างโหนดนั้นจึงขึ้นอยู่กับระดับความเป็นอิสระ (Degree of freedom) และการใช้งานที่เหมาะสมสำหรับประเภทการเชื่อมต่อของโหนดเหล่านั้น เมื่อเชื่อมต่อเอลิเมนต์เข้าด้วยกันนั้นการไหลของ ISRCT จะขึ้นอยู่กับระดับความเป็นอิสระที่โหนดประกอบกันเป็นแบบวัตถุแข็งเกร็ง การไหลของ ISRCT ตลอดแนวของตายที่เป็นโครงแข็งเกร็งนั้นถูกจำกัดโดยการเคลื่อนที่ผ่านวัตถุแข็งเกร็ง โดยแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แบบจำลอง (a) รูปแบบโครงตาข่ายของ ISRCT และตาย (b) คู่ผิวสัมผัส (Contact pair) ระหว่าง ISRCT และตาย (c) สภาพที่ขอบเขตของ ISRCT และตาย (d) แผนภาพความเค้น-ความเครียดของ ISRCT

โครงตาข่ายของ ISRCT และตายสำหรับวิธีการตั้งขึ้นรูปแบบทอกลวงนั้นทำได้โดยใช้โหนดแบบ 3D เป็นเอลิเมนต์แบบโครงแข็ง (Structural solid element) คุณสมบัติของ ISRCT เป็นวัสดุแบบไม่เชิงเส้น แสดงในรูปที่ 5.4 (a) การวิเคราะห์ที่เกี่ยวกับข้อสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างผิวภายในของตายและผิวภายนอกของ ISRCT คู่ผิวสัมผัส (Contact pair) นั้นสร้างขึ้นโดยใช้ตัวช่วยสร้างการสัมผัสและแรงเสียดทาน ในการสร้างแบบจำลองที่เกิดจากการสัมผัสนั้นเรียกว่าสัมผัสประสิทธิภาพเสียดทานในแบบจำลองใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.02 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างท่อและตายที่เคลือบสารหล่อลื่นต่างๆมีค่าอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 0.10 จากการทดลองของ Lee, M. and Flom, D. G [120] ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานขึ้นอยู่กับสารหล่อลื่นที่ผิวสัมผัสของ ISRCT และตาย คู่ผิวสัมผัสระหว่าง ISRCT และตายแสดงในรูปที่ 5.4 (b) ในการจำลองการทำงานด้วยถูกกำหนดให้อยู่กับที่และ ISRCT เคลื่อนที่ผ่านตายตลอดแนวแกนตามแนวยาวของท่อ สภาพที่ขอบเขตนั้นประยุกต์ใช้ที่บริเวณโหนด โดยที่จำนวนของตัวไม่รู้ค่าสมการเมตริกซ์ของเวกเตอร์แรงมากกว่าเวกเตอร์ของระยะกระจัด หลังจากประยุกต์สภาพที่ขอบเขตจำนวนของตัวแปรที่ไม่รู้ค่าลดลงเท่ากันหรือน้อยกว่าจำนวนของสมการ สภาพที่ขอบเขตของ ISRCT และตายแสดงในรูปที่ 5.4 (c) ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ของ ISRCT ในกระบวนการตั้งขึ้นรูปแบบทอกลวงมีค่าเท่ากับ 110,000 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และค่าอัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson's ratio) มีค่าเท่ากับ 0.34 ในการวิเคราะห์กำหนดให้การสัมผัสเป็นแบบไม่เชิงเส้นระหว่างผิวภายในของตายและผิวภายนอกของ ISRCT ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการศึกษาครั้งนี้เป็นธรรมชาติของวัสดุที่ไม่เชิงเส้น รูปที่ 5.4 (d) แสดงแผนภาพความเค้น-ความเครียดเป็นพฤติกรรมของวัสดุแบบไม่เชิงเส้นของ ISRCT ในการศึกษาครั้งนี้ทำการวิเคราะห์ที่ ISRCT เพียงอย่างเดียวและไม่วิเคราะห์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาย เนื่องจากสมมติให้ตายเป็นวัตถุแข็งเกร็งมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่สูงมาก ๆ มีค่าเท่ากับ  $2.1 \times 10^9$  นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และค่าอัตราส่วนปัวซองมีค่าเท่ากับ 0.3 ดังนั้นค่าความเค้นและเวลาในการจำลองการทำงานแสดงค่าแต่เฉพาะที่ ISRCT เท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# ผลของการลดขนาด มิติของเส้น และการเปลี่ยนแปลงแนวของท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง

### 6.1 บทนำ

ในบทที่ 6 จะกล่าวถึงพัฒนาการการใช้ท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่ภายใน (Inner spiral ribbed copper tube: ISRCT) ขนาดเล็กที่มีคุณภาพสูงในการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากความซับซ้อนที่เพิ่มขึ้นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้าสมัยใหม่ เทคโนโลยีการผลิตของ ISRCT นั้นต้องมีขนาดเล็กคุณภาพสูง ฟังก์ชันการทำงานที่สูงและมีต้นทุนในกระบวนการผลิตต่ำ วิธีการดึงเดิมนั้นเหมาะที่จะทำการผลิต ISRCT ขนาดใหญ่ที่มีความสามารถในการผลิตสูงแต่ไม่เหมาะกับการผลิตท่อที่มีขนาดเล็กที่มีความยาวมากๆ เพราะว่าเทคโนโลยีการผลิตท่อแบบดึงเดิมนั้นการทำแมนเดลที่มีสันเกลียวบนผิวขนาดเล็กและอุปกรณ์แบบปลั๊กลอยได้อย่างสมบูรณ์แบบนั้นทำได้ยาก ในบทที่ 6 นี้ได้แสดงให้เห็นว่าค่าการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อเที่ยว (Reduction area per pass: RA/P) ที่ใช้กระบวนการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบท่อกลวงนั้นมีผลกระทบต่ออัตราการลดของมิติที่หน้าตัดของเส้นภายในของ ISRCT ในการทดลองนั้นชิ้นงานทดสอบที่ใช้เป็น ISRCT จำนวนทั้งสิ้น 21 ตัวอย่าง (ในการทดลองแต่ละตัวอย่างใช้ชิ้นงานทดสอบตัวอย่างละ 5 ชิ้น) คุณลักษณะจำเพาะของ ISRCT นั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5.00 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3.71 มิลลิเมตร ความหนาของผนังท่อ 0.364 มิลลิเมตร ความสูงของสัน 0.28 มิลลิเมตร ความกว้างฐานสัน 0.33 มิลลิเมตร ความกว้างยอดสัน 0.175 มิลลิเมตร มุมฮิลิกส์ของสัน 38 องศา ระยะพิตช์ของสัน 0.393 มิลลิเมตร และมีจำนวนสันทั้งสิ้น 45 สัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ในการทดลองนั้นทำการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้ง (Reduction area per pass; RA/P) วิธีการพื้นที่หน้าตัดของท่อ ISRCT ก่อนและหลังจากการดึงขึ้นรูปท่อสามารถหาได้จากสมการที่ 4.1 ในบทที่ 4 ที่ผ่านมา การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อเที่ยว RA/P สำหรับแต่ละตัวอย่างของ ISRCT อย่างต่อเนื่องดังนี้ RA/P=2.52 เปอร์เซ็นต์ ในการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดในชิ้นงานตัวอย่างครั้งที่ 1, RA/P=5.18 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดในชิ้นงานตัวอย่างครั้งที่ 2 และเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆจนกระทั่ง RA/P=86.63 เปอร์เซ็นต์ ในการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดในชิ้นงานตัวอย่างครั้งที่ 21 จากนั้นทำการวิเคราะห์ตัวแปรในกระบวนการผลิตทั้งหมด 9 ตัวแปรด้วยกัน คือ อัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้ง แรงดึงขึ้นรูป อัตราส่วนความเค้นดึงขึ้นรูป อัตราส่วนความหนาของผนังท่อ อัตราส่วนความสูงสันท่อ อัตราส่วนความกว้างฐานสันท่อ อัตราส่วนความกว้างปลายสันท่อ อัตราส่วนระยะพิตช์ของสันท่อ และอัตราส่วนมุมฮิลิกส์ของสันท่อ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้งที่เหมาะสมที่สุดในกรณีของการผลิตท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็กมีค่า RA/P เท่ากับ 49.76เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 ผลการทดลองและการอภิปรายผล

### 6.2.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ ISRCT

พฤติกรรมของ ISRCT ที่มีสันบนผิวภายในท่อภายหลังจากการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบท่อกลวงนั้น ขนาดของพื้นที่ภาคตัดของ ISRCT ที่มีสันบนผิวภายในท่อนั้นเปลี่ยนแปลงหลังการเสียรูปในระหว่างการดึงขึ้นรูปภายในท่อกลวง ผลลัพธ์ที่ได้แสดงรายละเอียดของพื้นที่ภาคตัดของสันและพื้นผิวภายในของท่อซึ่งผ่านการดึงขึ้นรูปจากค่าการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อเทียวดำสุดที่  $RA/P=2.52$  เปอร์เซ็นต์ ไปจนถึงค่าการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อเทียวสูงสุดที่  $RA/P=86.63$  เปอร์เซ็นต์ เป็นผลที่ได้จากการทดลอง ในขณะที่  $RA/P=49.76$  เปอร์เซ็นต์ นั้นพบว่าเกิดรอยแยกที่ด้านบนของสันและรอยแตกที่ขอบด้านล่างของสันที่เกิดขึ้นในหลายๆสัน อย่างไรก็ตามก็พบว่ามีร่องและรอยแยกรอบๆบริเวณขอบด้านข้างของหลายๆสันที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ขนาดมิติที่แตกต่างกันนั้น อาจจะไม่เป็นรูปร่างที่เหมือนกันในการกระจายตัวของรอยแยกทั่วทั้งบริเวณของสันและขยายออกไปเรื่อยๆทั่วพื้นที่เป็นวงกว้าง ซึ่งการลู่แรงกระทำบีบอัดเข้าไปในสันและรูปทรงของสันจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของสันภายหลังจากการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงดังแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 รอยแยกที่ด้านบนของสันและรอยแตกที่ขอบด้านล่างของสัน  $RA/P=49.76$  เปอร์เซ็นต์

ขนาดของมิติที่ภาคตัดขวางและมุมฮีลิคซ์ของสันนั้นเปลี่ยนแปลงภายหลังจากการดึงขึ้นรูป ผลลัพธ์ที่ได้ นั้นแสดงให้เห็นว่าความหนาของผนังนั้นจะเพิ่มขึ้นหลังจากการดึงขึ้นรูปผ่านพ้นไปแต่ก็ไม่เหมือนกันเสมอไป ความสูงของสัน (Ribbed height) ความกว้างที่ฐานสัน (Ribbed base width) ความกว้างที่ยอดสัน (Ribbed tip width) ระยะพิตช์ของสัน (Ribbed pitch) มุมฮีลิคซ์ของสัน (Ribbed spiral angle) จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลงอย่างต่อเนื่องซ้ำแล้วซ้ำอีกหลังจากการลดลงของพื้นที่ภาคตัดทุกๆครั้งที่เวลาเปลี่ยนแปลงไป อย่างไรก็ตามสำหรับที่สันหนึ่งสันเดียวการขยายตัวของความเครียดจะแตกต่างกันไปจากบริเวณฐานของสันไปจนถึงที่ด้านบนของสัน ความเครียดที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นที่ส่วนหลักของสันมากกว่าที่ยอดสัน ดังนั้นการเปลี่ยนรูปทรงของสันเกิดขึ้นที่บริเวณฐานของสันมากกว่าที่บริเวณยอดสันและการเปลี่ยนแปลงของมุมอีลิปซของสันนั้นเปลี่ยนแปลงทำให้มุมอีลิปซของสันลดลงเป็นเชิงลบดังแสดงในรูปที่ 6.2

### 6.2.2 การวิเคราะห์ความเค้น

กระบวนการดิ่งขึ้นรูปแบบท่อกลวงนั้นเกิดขึ้นจากความเค้นต่างๆ ประกอบด้วยความเค้นตามแนวแกน (Axial stress,  $\sigma_a$ ) ความเค้นตามแนวรัศมี (Radial stress,  $\sigma_r$ ) และความเค้นวงแหวน (Hoop stress,  $\sigma_h$ ) หรือความเค้นในแนวเส้นรอบวง (Circumferential Tensile Stress) ของ ISRCT ความเค้นตามแนวแกนนั้นเป็นความเค้นดึงซึ่งเกิดขึ้นในพื้นที่ของผนังท่อและกระจายอย่างรวดเร็วเข้าสู่พื้นที่ของสันภายในท่อ ความเค้นอัดตามแนวรัศมีนั้นเป็นความเค้นอัดในขอบเขตที่เป็นผนังของท่อแต่จะเปลี่ยนแปลงเป็นความเค้นดึงในพื้นที่ของสัน ความเค้นวงแหวนหรือความเค้นในแนวเส้นรอบวงนั้นเป็นความเค้นอัดและจะแพร่อย่างรวดเร็วในแนวรัศมีของผนังท่อแต่กลับลดลงอย่างรวดเร็วในขอบเขตของสัน ค่าสูงสุดของความเครียดประสิทธิผลครอบคลุมผสมผสานกลมกลืนกันในขอบเขตภายในสันของท่อ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อเทียวก์ (พื้นที่หน้าตัดก่อนดิ่งขึ้นรูป/พื้นที่หน้าตัดหลังดิ่งขึ้นรูป:  $A_0/A_1$ ) และการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้งนั้นแสดงในรูปที่ 6.3

อัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อเทียวก์จะลดลงอย่างต่อเนื่องเป็นเพราะว่าการลดลงของภาคตัดนั้นลดลงในทิศทางที่เหมือนกันหลังจากการขึ้นรูปของชิ้นงานทดสอบจำนวน 21 ชุดของชิ้นทดสอบ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและขนาดมิติของสันนั้นลดลงคล้ายคลึงกันกับแรงที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูปที่ใช้ในท่อทดสอบทั้งหมด 21 ชุดดังกล่าว เป็นเพราะว่าแรงในการดิ่งขึ้นรูปนั้นถูกกระทำในทิศทางตามแนวแกนจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การลดลงของพื้นที่ของภาคตัดนั้นจะลดลงโดยคิดเป็นร้อยละของการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูปและการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้งนั้นแสดงในรูปที่ 6.4

อัตราส่วนความเค้นในการดิ่งขึ้นรูปและการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นเพราะว่าพื้นที่ภาคตัดนั้นลดลง แต่แรงที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูปนั้นเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ของการลดพื้นที่หน้าตัดรวม ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความเค้นในการดิ่งขึ้นรูปที่เกิดขึ้นด้วยตัวเอง อัตราส่วนความเค้นในการดิ่งขึ้นรูปนั้นมีค่ามากกว่า 1 เป็นเพราะว่าค่าความเค้นดังกล่าวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดการดิ่งขึ้นรูปทั้ง 21 ชิ้นงานทดสอบ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นในการดิ่งขึ้นรูป (ความเค้นหลังดิ่งขึ้นรูป/ความเค้นก่อนดิ่งขึ้นรูป:  $\sigma'/\sigma$ ) และการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้งนั้นแสดงในรูปที่ 6.5

### 6.2.3 การวิเคราะห์การลดลงของขนาดของสัน

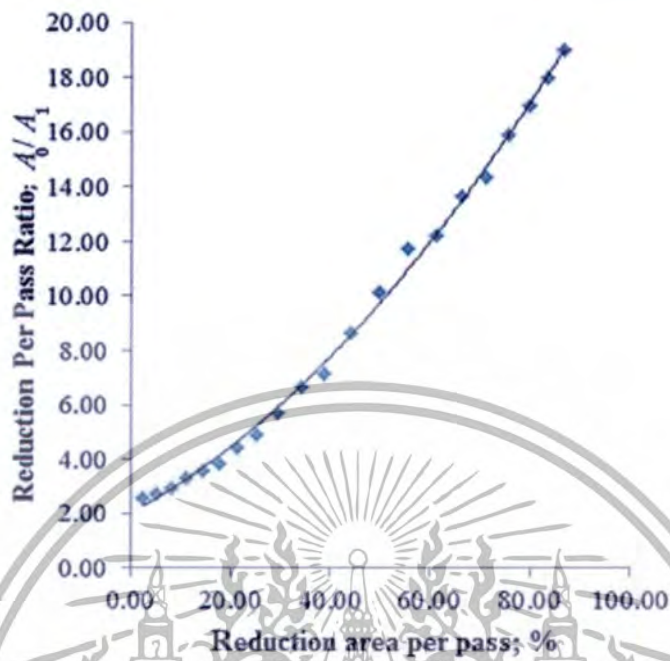
อัตราส่วนความหนาของผนังท่อและการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวมนั้นเพิ่มขึ้นจาก RA/P=2.52 เปอร์เซ็นต์ ในการลดขนาดในชิ้นงานตัวอย่างชิ้นที่ 1, RA/P=5.18 เปอร์เซ็นต์สำหรับการลดขนาดใน

ชิ้นงานตัวอย่างชิ้นที่ 2 และเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆจนกระทั่ง RA/P=86.63 เปอร์เซนต์ ในการลดขนาดใน ชิ้นงานตัวอย่างชิ้นที่ 21 หรือชิ้นทดสอบชิ้นสุดท้าย เป็นเพราะว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ ISRCT นั้นลดลงในขณะที่ภายในท่อเองนั้นไม่มีความดันต้านจากภายในท่อและไม่มีความเค้นอัดในทิศทางตาม แนวเส้นรอบวงของ ISRCT ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาของผนังท่อ (ความหนาผนังท่อหลัง ดึง/ความหนาผนังท่อก่อนดึง:  $t_w' / t_w$ ) และการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้งนั้นแสดงในรูปที่ 6.6

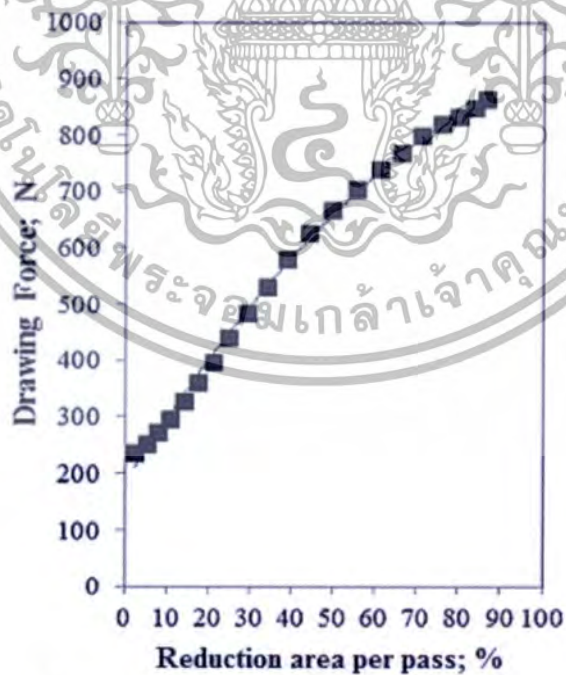


รูปที่ 6.2 รูปร่างภาคตัดของท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวภายใน (ISRCT) ตามภาคตัดขวางและภาคตัดตามแนวแกนโดยใช้วิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงที่มีค่าการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม 86.63 เปอร์เซนต์ และขนาดของครี้งมตาย 12 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 การเปลี่ยนแปลงของอัตราการผลิตขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อเที่ยว

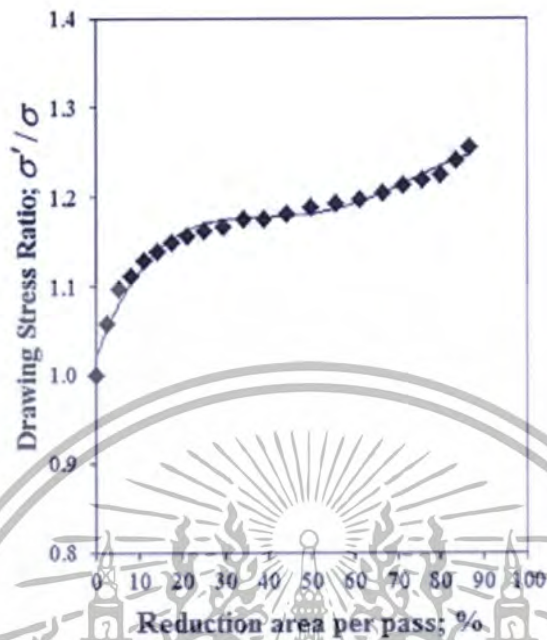


รูปที่ 6.4 การเปลี่ยนแปลงของแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป

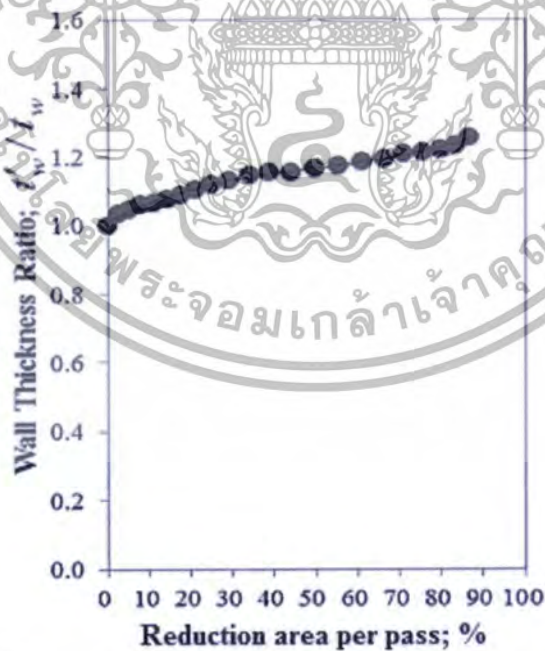
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความเค้นในการดึงขึ้นรูป



รูปที่ 6.6 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความหนาของผนังท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

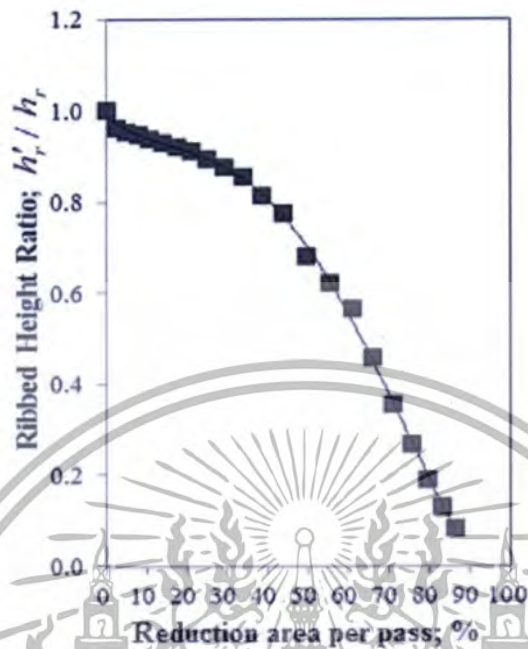
อัตราส่วนความสูงของสันและการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดนั้นลดลงเนื่องจากถูกความเค้นอัดในแนวรัศมีกระทำที่ผนังของ ISRCT ที่กระทำซ้ำอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลงความหนาของผนังเพิ่มขึ้นแต่ภายในท่อไม่มีแรงดันต้านการเสีรูปจึงทำให้ส่วนที่เป็นช่องว่างที่ฐานสันเสีรูปมากกว่าที่บริเวณสันและมีความหนาเพิ่มขึ้นมากกว่าส่วนที่เป็นสัน ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความสูงของสัน (ความสูงสันหลังดึง/ความสูงสันก่อนดึง:  $h'_r/h_r$ ) และการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้งนั้นแสดงในรูปที่ 6.7

อัตราส่วนความกว้างของฐานสันและอัตราส่วนความกว้างของยอดสันมีแนวโน้มที่จะลดลงเนื่องจากการความเครียดอัดในทิศทางตามแนวเส้นรัศมีของท่อและไม่มีควมดันต้านทานการเปลี่ยนรูปภายในของท่อด้วยเช่นกัน ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความกว้างของฐานสัน (ความกว้างฐานสันหลังดึง/ความกว้างฐานสันก่อนดึง:  $w'_b/w_b$ ) และการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้ง และอัตราส่วนความกว้างยอดสัน (ความกว้างยอดสันหลังดึง/ความกว้างยอดสันก่อนดึง:  $w'_t/w_t$ ) และการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้งนั้นแสดงในรูปที่ 6.8 และ 6.9 ตามลำดับ

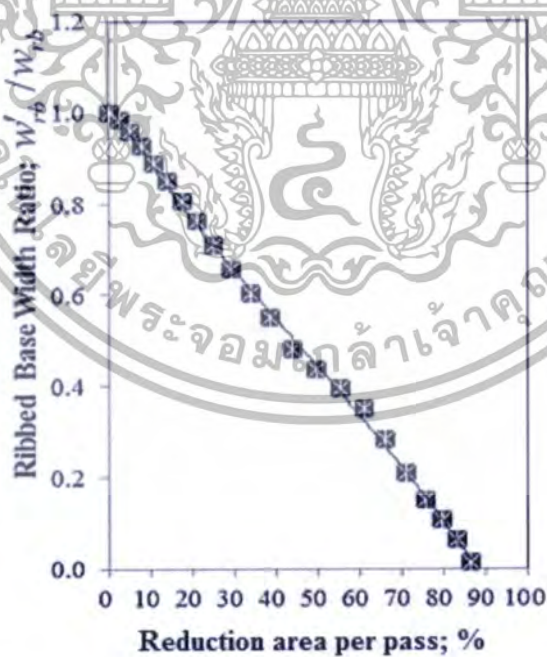
#### 6.2.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแนวแกนสันของ ISRCT

อัตราส่วนระยะพิชของสันและการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของสันนั้น ระยะพิชของสันลดลงอย่างต่อเนื่องเป็นเพราะว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อลดลงในขณะที่ท่อนั้นได้รับความเค้นอัดในแนวเส้นรัศมีและเปลี่ยนแปลงเป็นความเค้นดึงตามแนวแกนทำให้ท่อเกิดระยะกระจัดมีผลให้อัตราส่วนของระยะพิชของสันลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระยะพิชของสัน (ระยะพิชหลังดึง/ระยะพิชก่อนดึง:  $P'_r/P_r$ ) และการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้งนั้นแสดงในรูปที่ 6.10

อัตราส่วนมุมอีลิคซ์ของสันและการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวมของสันนั้นมีขนาดลดลงอย่างต่อเนื่องเป็นเพราะว่าระยะกระจัดในทิศทางตามแนวแกนจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเค้นดึงตามแนวแกนที่เปลี่ยนแปลงมาจากความเค้นอัดในแนวรัศมี เป็นผลให้อัตราส่วนมุมอีลิคซ์ของสันนั้นลดลงหลังจากเปอร์เซ็นต์ของ RA/P เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องการดึงขึ้นรูปตลอดทั้ง 21 ขึ้นงานทดสอบ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนมุมอีลิคซ์ของสัน (มุมอีลิคซ์หลังดึง/มุมอีลิคซ์ก่อนดึง:  $\psi'/\psi$ ) และการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้งนั้นแสดงในรูปที่ 6.11

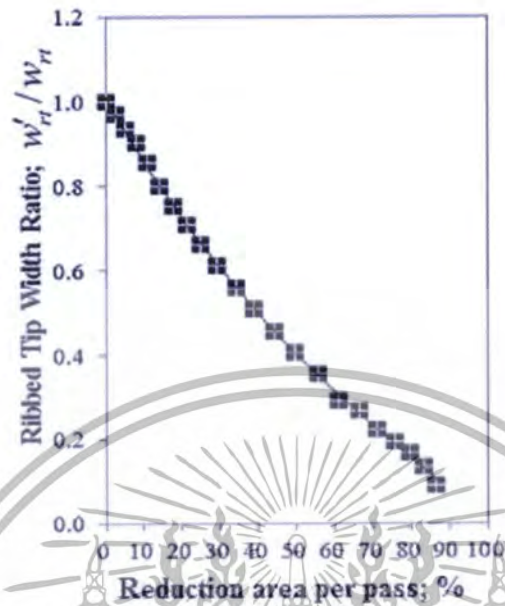


รูปที่ 6.7 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความสูงของสัน

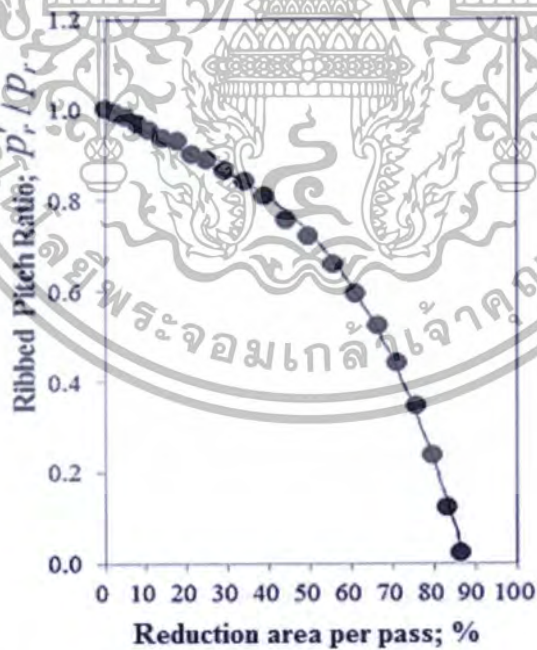


รูปที่ 6.8 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความกว้างของฐานสัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

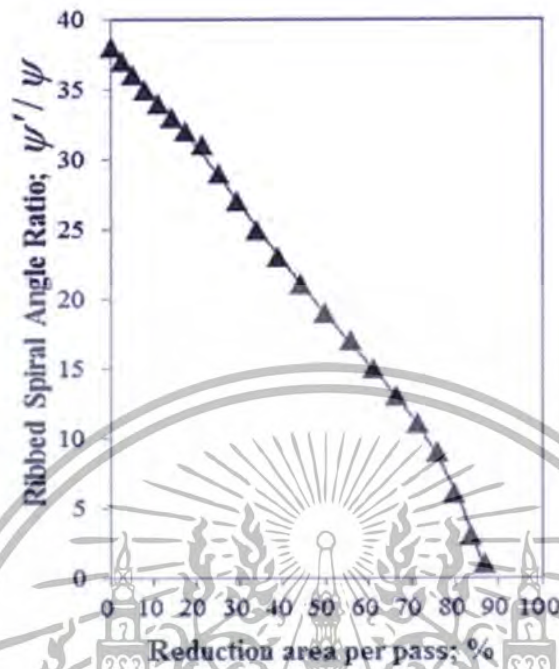


รูปที่ 6.9 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความกว้างของยอดค้ำ



รูปที่ 6.10 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนระยะพิทช์ของค้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.11 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนมุมฮิลิกซ์ของสัน

### 6.3 บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงผลกระทบของการลดมิติของสันและทิศทางของครีเปอร์เปลี่ยนแปลงของท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่ภายในโดยใช้วิธีการดัดขึ้นรูปแบบท่อกดง ผลการทดลองอธิบายไว้ด้านล่างดังนี้

[1] กระบวนการดัดขึ้นรูปแบบท่อกดงนั้นเกิดขึ้นจากความเค้นต่างๆ ประกอบด้วยความเค้นตามแนวแกน (Axial stress,  $\sigma_a$ ) ความเค้นตามแนวรัศมี (Radial stress,  $\sigma_r$ ) และความเค้นวงแหวน (Hoop stress,  $\sigma_h$ ) หรือความเค้นในแนวเส้นรอบวง (Circumferential Tensile Stress) ของ ISRCT ความเค้นอัดจะเกิดขึ้นบริเวณผนังของท่อแต่จะเปลี่ยนเป็นความเค้นดึงภายในพื้นที่ของสัน ความเค้นอัดนั้นเป็นค่าที่เกิดขึ้นจริงที่กระจายอยู่ในช่วงของรัศมีของผนังท่อและลดลงภายในพื้นที่ของสันและจะมีค่าเดียวกันกับที่เกิดขึ้นในพื้นที่ของผนังท่อและขยายตัวอย่างรวดเร็วในพื้นที่ของสัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.12 ความเค้นในการดึงขึ้นรูปท่อ

[2] เกี่ยวกับการขยายตัวของความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าวนั้นจะมีค่าสูงสุดที่แทรกเข้าสู่ขอบเขตระหว่างเส้นและมุมอีลิกซ์ของเส้น ในพื้นที่ของเส้นนั้นจะมีความละเอียดอ่อนและเพราะบางกว่าบริเวณพื้นผิวของผนังท่อขณะที่ใช้วิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกว้าง

[3] ระหว่างที่ใช้การดึงขึ้นรูปแบบท่อกว้างมุมอีลิกซ์ของเส้นนั้นเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมาก ประกอบด้วยความหนาของผนังท่อซึ่งเพิ่มขึ้นช้าแล้วช้าอีกและต่อเนื่อง แต่ความสูงของเส้น ความกว้างฐานเส้น ความกว้างยอดเส้น ระยะพิตซ์ของเส้นและมุมอีลิกซ์ของเส้นนั้นลดลงภายหลังที่มีมุมอีลิกซ์ของเส้นนั้นจะเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมาก

[4] ในการทดลองด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกว้างนั้นในกรณีของท่อทองแดงที่มีเส้นอยู่ภายใน ที่เหมาะสมที่สุดการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้งจะต้องไม่เกิน 49.76 เปอร์เซ็นต์ เป็นเพราะว่าจะมีร่องและรอยแยกที่ด้านข้างของเส้น

จากบทสรุปในบทที่ 6 จะเห็นว่าค่าความเค้นในการดึงขึ้นรูปขึ้นอยู่กับการลดลงของพื้นที่หน้าตัดของท่อ ในการดึงขึ้นรูปท่อผ่านตายเพียงเที่ยวเดียว (Single-pass drawing) เป็นผลให้มีมิติของเส้นและการเปลี่ยนแปลงแนวของเส้นท่อเสียรูปสูงมาก ดังนั้นจึงเปลี่ยนวิธีการดึงขึ้นรูปเป็นแบบการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) เนื่องจากท่อถูกดึงผ่านตายในครั้งแรกมีการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดไม่มากนัก เมื่อท่อได้รับความเค้นจากแรงดึงผ่านตายทำให้ความเค้นบางส่วนตกค้างอยู่ในเนื้อวัสดุ แต่ความเค้นบางส่วนจะคลายออกจากเนื้อวัสดุคืนความสามารถในการดึงขึ้นรูปกลับคืนมา ดังนั้นการดึงขึ้นรูปผ่านตายหลายครั้งจะทำให้ความเค้นตกค้างในเนื้อวัสดุน้อยกว่าการดึงขึ้นรูปแบบเที่ยวเดียวลดพื้นที่หน้าตัดครั้งละมากๆ จึงเป็นเหตุผลให้ทำการดึงขึ้นรูปแบบลดขนาดผ่านตายหลายครั้งในบทที่ 7 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของมิติของเส้นและการเปลี่ยนแปลงแนวของเส้นท่อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

# การผลิตท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในขนาดเล็ก ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง

### 7.1 บทนำ

ในบทที่ 7 จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพัฒนาการของท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่ภายใน (Inner spiral ribbed copper tube: ISRCT) ขนาดเล็กที่มีคุณภาพและประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนที่สูงมาก ดังนั้นความต้องการที่จะใช้ท่อขนาดเล็กในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้าในปัจจุบันนั้นสูงมากและจะมากขึ้นไปอย่างต่อเนื่องในอนาคต เทคโนโลยีการผลิตของ ISRCT นั้นต้องมีขนาดเล็ก คุณภาพสูง พึงกั้นการทำงานที่สูงและมีต้นทุนในกระบวนการผลิตต่ำเพื่อตอบสนองความต้องการที่เพิ่มขึ้น วิธีการดั้งเดิมนั้นเหมาะที่จะทำการผลิต ISRCT ขนาดใหญ่ที่มีความสามารถในการผลิตสูงแต่ไม่เหมาะกับการผลิตท่อที่มีขนาดเล็กที่มีความยาวมากๆ เพราะเทคโนโลยีการผลิตท่อแบบดั้งเดิมนั้นการทำให้แกนเคลือบที่มีสันเกลียวบนผิวขนาดเล็กและอุปกรณ์แบบปลั๊กลอยได้อย่างสมบูรณ์แบบนั้นทำได้ยาก งานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกลวง และนำเสนอการเปรียบเทียบตัวแปรในกระบวนการผลิตหลัก 7 ตัว ประกอบด้วยความเค้นในการดึงขึ้นรูป อัตราส่วนความหนาของผนังท่อ อัตราส่วนความกว้างฐานสันท่อ อัตราส่วนความกว้างยอดสันท่อ อัตราส่วนความสูงสันท่อ อัตราส่วนระยะพิชชิ่งของสันท่อ และอัตราส่วนมุมฮีลิคัลของสันท่อ ในการทดลองนั้นพบว่าการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงนั้นมีความเป็นไปได้ที่จะผลิต ISRCT ขนาดเล็ก ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวมในขนาดที่เหมาะสมในกรณีดังกล่าว การลดพื้นที่หน้าตัดรวมที่เหมาะสมที่สุดจะต้องไม่เกิน 68.81 เปอร์เซ็นต์ และจะลดลงภายหลังการดึงขึ้นรูปในครั้งที่ 8

### 7.2 ผลการทดลองและการอภิปรายผล

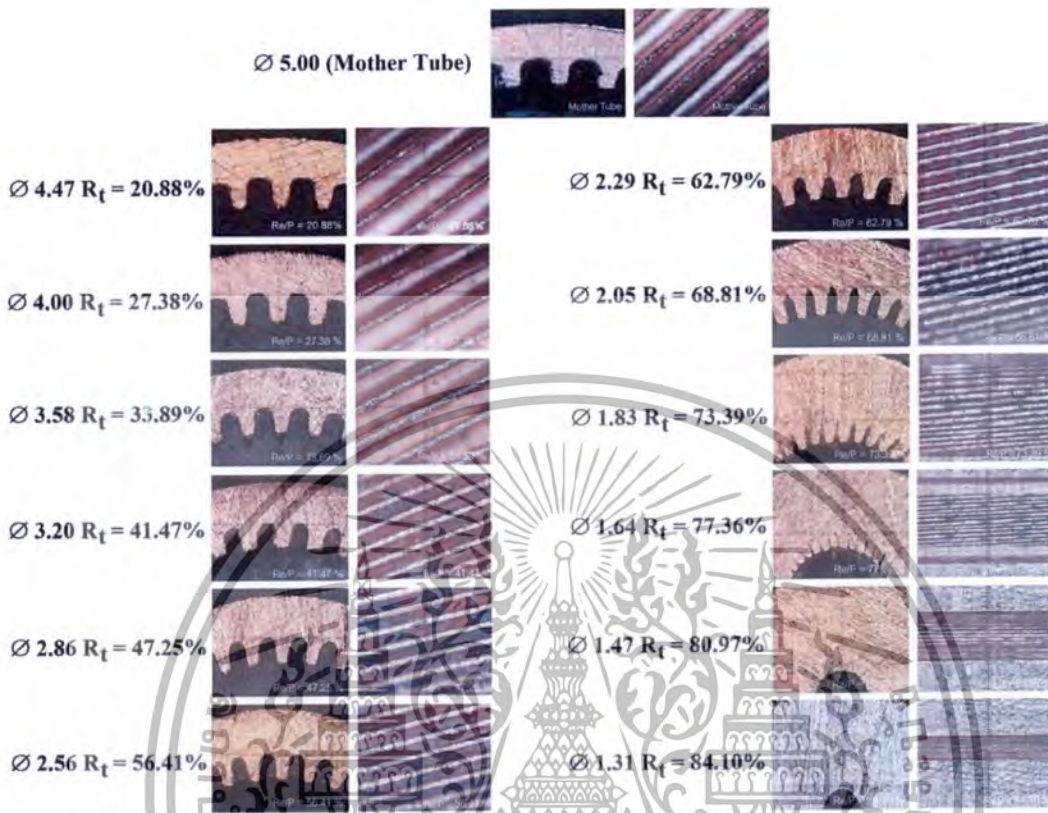
#### 7.2.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ ISRCT

หลังจากการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลงผ่านพันไป 12 เที้ยว โดยใช้ครึ่งมุมตาย 12 องศา ลักษณะการเปลี่ยนรูปและวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงของท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในนั้นดังแสดงในรูปที่ 7.1 พฤติกรรมของ ISRCT ที่มีสันบนผิวภายในท่อภายหลังจากการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงนั้น ขนาดของพื้นที่ภาคตัดของ ISRCT ที่มีสันบนผิวภายในท่อนั้นเปลี่ยนแปลงหลังการเสียรูปในระหว่างการดึงขึ้นรูปภายในท่อกลวง แสดงให้เห็นว่าการดึงขึ้นรูปที่ผ่านไปแต่ละเที้ยวจำนวนทั้งหมด 12 เที้ยวในการทดลองครั้งนี้และการดึงขึ้นรูปผ่านตายเรียงลำดับตามขนาดของตาย ตั้งแต่การดึงผ่านตายเที้ยวที่ 1 เสร็จแล้วนำชิ้นงานที่ผ่านการดึงเที้ยวที่ 1 มาดึงลดขนาดต่อในเที้ยวที่ 2, 3, 4,.....จนถึงเที้ยวที่ 12 ตามลำดับ โดยการลดขนาดนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางของตายที่ใช้เรียงลำดับดังนี้ 4.47, 4.00, 3.58, 3.20, 2.86, 2.56, 2.29,

2.05, 1.83, 1.64, 1.47 และ 1.60 มิลลิเมตร ตามลำดับ การลดพื้นที่หน้าตัดรวม (Total reduction:  $R_t$ %) นั้นมีค่า 73.39 เปอร์เซ็นต์ หลังจากการดัดขึ้นรูปในเที่ยวที่ 9 พบว่ามีร่องที่ผิวด้านบนของยอดสัน และรอยแยกขยายแนวกว้างออกที่ด้านข้างของแต่ละสันเกิดขึ้นในการทดลองครั้งนี้ โดยที่ในการทดลอง ตั้งแต่เที่ยวที่ 1 ถึง 8 เมื่อพิจารณาในรูปของเปอร์เซ็นต์พบว่าเมื่อลดพื้นที่หน้าตัดรวมไม่เกิน 68.81 เปอร์เซ็นต์ ไม่เกิดปัญหาดังกล่าว นอกจากนี้ยังพบว่ามันมีร่องและรอยแยกรอบขอบเขตในหลายๆสันซึ่งเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันขนาดมิติที่แตกต่างกันอาจจะไม่เหมือนกันรูปแบบการกระจายของรูปแบบดังกล่าว ก็อาจจะไม่เหมือนกันและไม่เป็นรูปแบบเดียวกันทั่วตลอดทั้งแนวสัน มันขยายร่องและรอยแยกออกไป จนกว่าความกว้างที่ขยายออกไปนั้นขยายออกทั่วทั้งพื้นที่ทั้งหมดของสัน ที่บริเวณสันนั้นจะเกิดการกัดกัด และรูปร่างของสันจะเกิดการเปลี่ยนรูปนั้นดังแสดงในรูปที่ 7.2 จากภาพดังกล่าวเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอกนั้นลดลง มุมฮิลิกซ์ของสันและระยะพิชชันนั้นหดตัวและแคบลงขณะที่ผิวด้านบนจะมีผิวที่หยาบ และไม่สม่ำเสมอ อันเป็นผลมาจากความหนาของผนังที่เพิ่มขึ้นแตกต่างจากไปจากความสูงของสัน ความกว้างฐานสัน ความกว้างยอดสัน ระยะพิชชันและมุมฮิลิกซ์ของสันซึ่งลดลงในการดัดขึ้นรูปที่ผ่านไปแต่ละเที่ยว การกระจายความเครียดที่บริเวณสันนั้นไม่สม่ำเสมอจากฐานสันไปยังยอดสันและเกิดการบีบอัดจนชิดติดกันของยอดสัน การเปลี่ยนรูปร่างที่ฐานสันนั้นเกิดขึ้นมากกว่าที่เกิดขึ้นที่ยอดสันขณะที่มุมฮิลิกซ์ของสัน ก็ลดลงเช่นเดียวกัน

#### 7.2.2 การเปรียบเทียบ 7 พารามิเตอร์

ความเค้นในการดัดขึ้นรูปของกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบทอกลวงเป็นสาเหตุมาจากความเค้นตามแนวแกน (Axial stress) ความเค้นตามแนวรัศมี (Radial stress) และความเค้นวงแหวน (Hoop stress) ความเค้นตามแนวแกนนั้นเป็นความเค้นดัดบนผนังท่อและพื้นที่ของสันของ ISRCT ความเค้นตามแนวรัศมีนั้นเป็นความเค้นอัดซึ่งเกิดขึ้นในส่วนที่เป็นผนังท่อ และความเค้นวงแหวนนั้นเป็นความเค้นที่มีสาเหตุมาจากแรงดันภายในซึ่งเป็นความเค้นอัด การดัดขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายในแต่ละครั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ ISRCT ลดลงจากครั้งที่หนึ่งมาดัดขึ้นรูปผ่านตายในครั้งที่สองเป็นผลให้ขนาดของ RAVP ในครั้งที่สอง ลดลงน้อยกว่าครั้งที่หนึ่ง ดังนั้นการดัดขึ้นรูปผ่านตายจำนวน 12 ครั้งจึงเป็นผลให้ขนาดของ RAVP ลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกครั้งที่ถูกดัดผ่านตาย ความเค้นในการดัดขึ้นรูปขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่หน้าตัด ความเค้นในการดัดขึ้นรูปนั้นจะมีค่า 35.11 เมกะปาสคาล ในการดัดผ่านตายเที่ยวแรกพื้นที่หน้าตัดลง 20.88 เปอร์เซ็นต์ และความเค้นในการดัดขึ้นรูปนั้นจะมีค่า 23.53 เมกะปาสคาล ในการดัดผ่านตายเที่ยวสุดท้ายพื้นที่หน้าตัดลง 2.22 เปอร์เซ็นต์ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในการดัดขึ้นรูปและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวมนั้นแสดงในรูปที่ 7.3

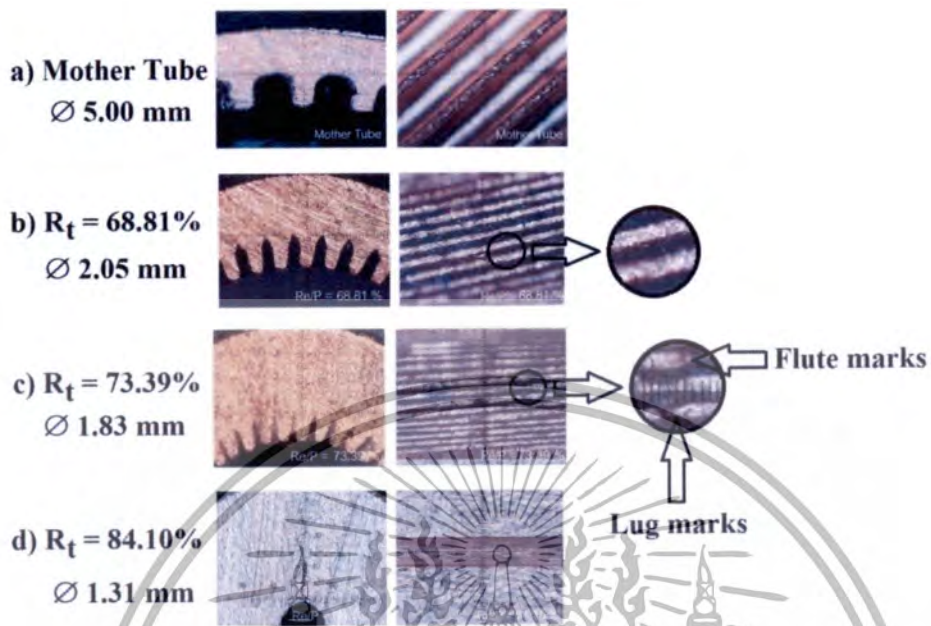


รูปที่ 7.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของภาคตัดตามแนวขวางและตามแนวแกนของ ISRCT

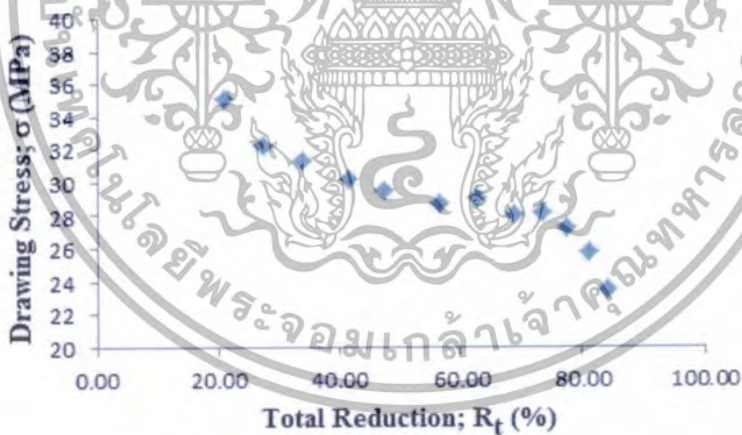
อัตราส่วนความหนาผนังท่อที่เพิ่มขึ้นในแต่ละเที่ยวที่ตั้งขึ้นรูปโดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกนั้นลดลง ความเครียดอัดที่เกิดขึ้นในท่อทิศทางตามแนวเส้นรอบวงนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความหนาผนังท่อ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาผนังท่อและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวมนั้นแสดงในรูปที่ 7.4

อัตราส่วนความกว้างฐานสันท่อ อัตราส่วนความกว้างปลายสันท่อ อัตราส่วนความสูงสันท่อ อัตราส่วนระยะพิทช์ของสันท่อ และอัตราส่วนมุมฮิลิกส์ของสันท่อนั้นจะลดลงคล้ายคลึงกันที่เกิดจากความเครียดอัดในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของท่อและไม่มีความดันภายในของท่อที่ดำเนินการเปลี่ยนรูปของท่อ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความกว้างฐานสันท่อ อัตราส่วนความกว้างปลายสันท่อ อัตราส่วนความสูงสันท่อ อัตราส่วนระยะพิทช์ของสันท่อ และอัตราส่วนมุมฮิลิกส์ของสันท่อและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวมนั้นแสดงในรูปที่ 7.5, 7.6, 7.7, 7.8, และ 7.9 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

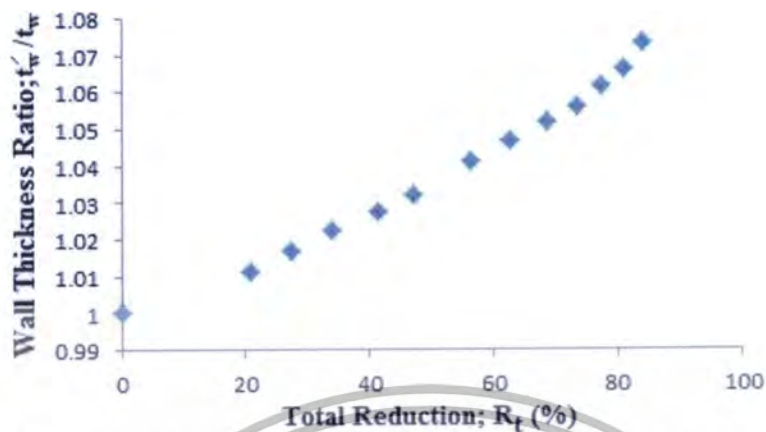


รูปที่ 7.2 ภาพตัดบริเวณที่เกิดร่องและรอยแยกของ ISRCT

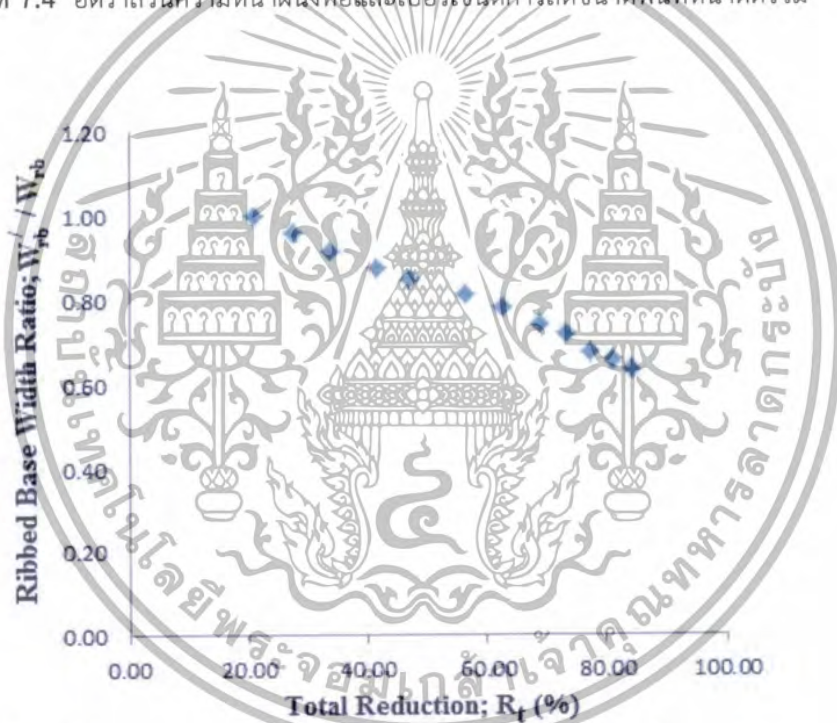


รูปที่ 7.3 ความเค้นในการดึงขึ้นรูปและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

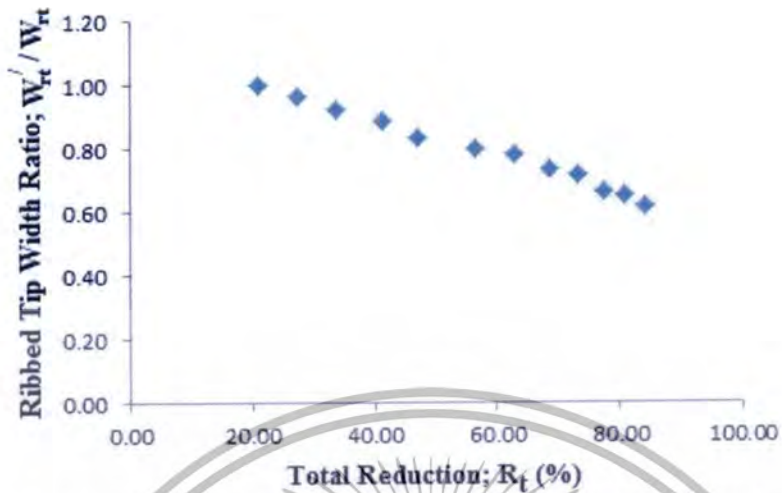


รูปที่ 7.4 อัตราส่วนความหนาผนังท่อและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม

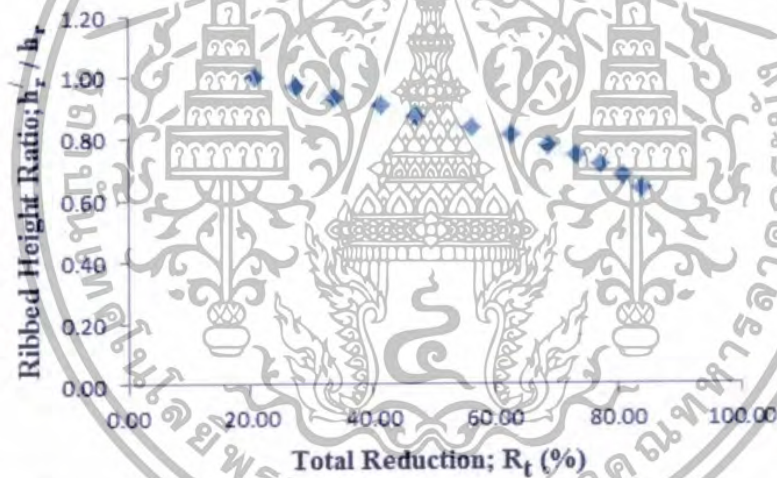


รูปที่ 7.5 อัตราส่วนความกว้างฐานสันและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

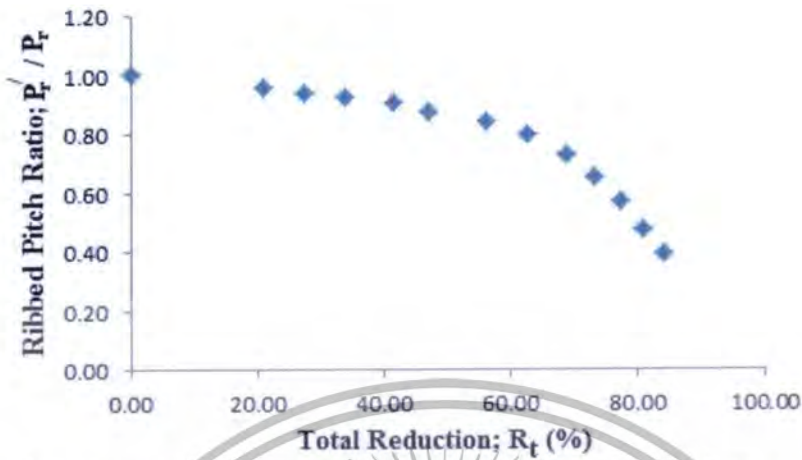


รูปที่ 7.6 อัตราส่วนความกว้างยอดสันและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม

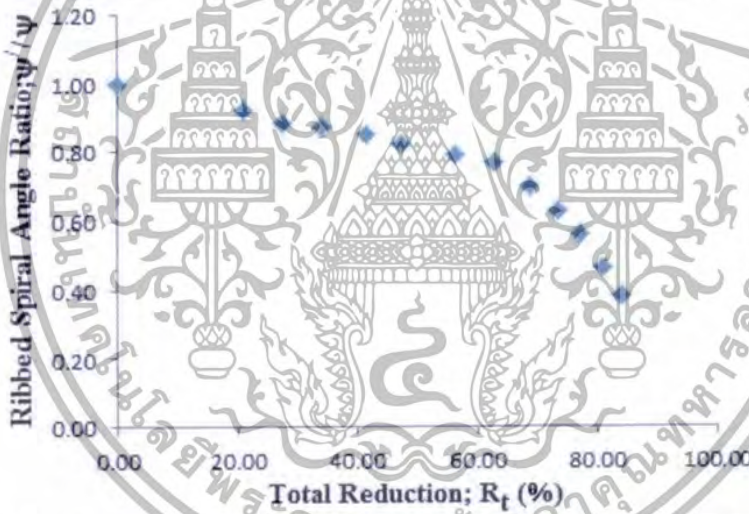


รูปที่ 7.7 อัตราส่วนความสูงสันและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.8 อัตราส่วนระยะพิทช์ของสันและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม



รูปที่ 7.9 อัตราส่วนมุมฮีลิคส์ของสันและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม

### 7.3 บทสรุป

การวิจัยครั้งนี้เกี่ยวข้องกับการพัฒนาท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่ภายใน (ISRCT) ซึ่งประกอบด้วยด้านคุณภาพและประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนดังต่อไปนี้

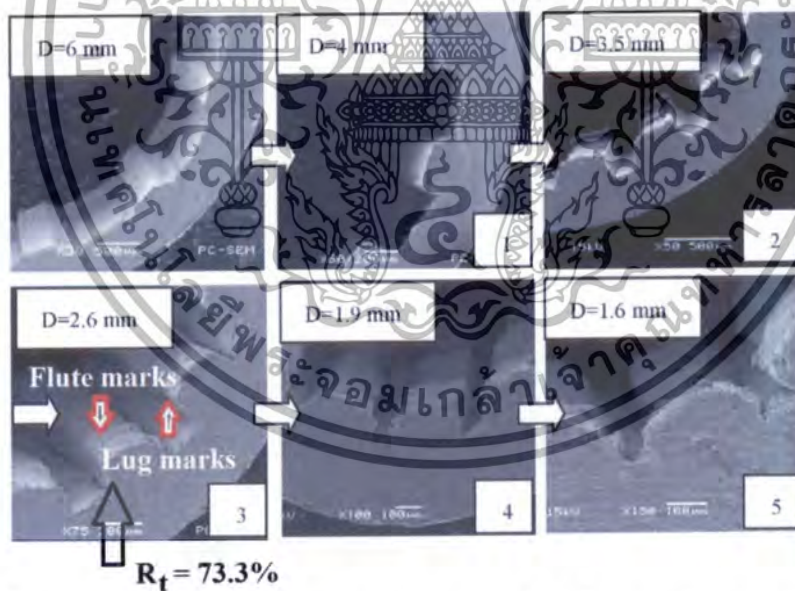
[1] กระบวนการดัดขึ้นรูปแบบท่อกลวงซึ่งประกอบด้วยความเค้นตามแนวแกน (Axial stress) ความเค้นตามแนวรัศมี (Radial stress) และความเค้นวงแหวน (Hoop stress) ซึ่งความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นมีปริมาณที่สูงมาก การขยายตัวของความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเสียรูปอย่างสูงและมีค่าสูงสุดเกิดขึ้นในขอบเขตระหว่างสันและมุมฮีลิคส์ของสัน ในพื้นที่สันจะมีผลกระทบมากกว่าและเปราะบางง่ายต่อการเสียรูปมากกว่าพื้นผิวของผนังท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[2] ขณะที่การใช้วิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลมมุมอีลิกซ์ของส้นนั้นเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมาก ประกอบด้วยความหนาของผนังท่อซึ่งเพิ่มขึ้นซ้ำแล้วซ้ำอีกและต่อเนื่อง แต่ความสูงของส้น ความกว้างฐานส้น ความกว้างยอดส้น ระยะพิตซ์ส้นและมุมอีลิกซ์ของส้นซึ่งลดลงอย่างมาก ถ้าการลดพื้นที่หน้าตัดรวมมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปมุมอีลิกซ์ของส้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว

[3] จากผลการทดลองดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 73.39 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 7.2c) ภายหลังจากดึงขึ้นรูปผ่านไปในเที่ยวที่ 9 มีร่องที่ผิวด้านบนของยอดส้นและรอยแยกที่ด้านข้างของแต่ละส้นเกิดขึ้น ขณะที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 68.81 เปอร์เซ็นต์ ภายหลังจากดึงขึ้นรูปผ่านไปในเที่ยวที่ 8 (รูปที่ 7.2b) ไม่พบปัญหาดังกล่าว

ในบทที่ 6 การดึงขึ้นรูปผ่านตายครั้งเดียว (Single-pass drawing) การเกิดรอยที่ผิวด้านบนของยอดส้นและรอยแยกที่ด้านข้างของแต่ละส้นเกิดที่เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 49.76 เปอร์เซ็นต์ ในบทที่ 7 การลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) เกิดที่เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 68.81 เปอร์เซ็นต์ ทำการเปรียบเทียบกับการดึงขึ้นรูปแบบลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) ท่อทองแดงที่มีเส้นตรงของ Tang et al. [12] พบว่าเกิดรอยที่ผิวด้านบนของยอดส้นและรอยแยกที่ด้านข้างของแต่ละส้นที่เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 73.3 เปอร์เซ็นต์ เป็นเพราะการเสีรูบของส้นตรงเมื่อเกิดความเค้นตามแนวแกนมีทิศทางกับแนวของส้นจึงเสีรูบน้อยกว่า ส้นท่อทองแดงที่มีส้นขดเป็นเกลียวอยู่ภายในนั่นเอง



รูปที่ 7.10 รอยที่ผิวด้านบนของยอดส้นและรอยแยกที่ด้านข้างของ Tang et al. [12]

จากเหตุผลทั้งหมดที่เกิดขึ้นจึงเป็นเหตุผลให้ทำการศึกษาเพื่อหาอิทธิพลของความเค้นดึงขึ้นรูปในการลดพื้นที่หน้าตัดรวมและขนาดมิติของท่อภายหลังจากดึงขึ้นรูปเพื่อตัดสินใจเลือกหาเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปผ่านตายหลายครั้งในบทที่ 8 ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 8

# อิทธิพลของความเค้นดึงขึ้นรูปในการลดพื้นที่หน้าตัดรวมและขนาดมิติของท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลาง

### 8.1 บทนำ

การวิจัยครั้งนี้เป็นเรื่องเกี่ยวกับพัฒนาการของการผลิตท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวภายใน (Inner spiral ribbed copper tube: ISRCT) ขนาดเล็กที่มีคุณภาพและประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนที่สูงมาก เทคโนโลยีการผลิตของ ISRCT นั้นต้องมีขนาดเล็ก คุณภาพสูง ฟังก์ชันการทำงานที่สูงและมีต้นทุนในกระบวนการผลิตต่ำ ผลการทดลองพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญและรูปร่างภาคตัดของ ISRCT ภายหลังจากการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลาง (Tube sinking) พารามิเตอร์เหล่านี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นสิ่งบ่งชี้และคาดการณ์เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดรวม (Total Reduction:  $R, \%$ ) และกำหนดความสำเร็จในกระบวนการผลิต ISRCT การวิเคราะห์นี้ใช้ในการกำหนดพารามิเตอร์ของกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการผลิต ISRCT ในวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลางและเพื่อให้บรรลุผลสูงสุดของ  $R, \%$  ที่มีผลกระทบของมิติสัน อาทิเช่น อัตราส่วนของความเค้นดึงขึ้นรูปต่อความเค้นคราก ( $\sigma_u / \sigma_y$ ) อัตราส่วนของความหนาผนังท่อบวกกับความสูงสันต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ  $[(t'_u + h'_u) / D]$  อัตราส่วนความกว้างฐานสันต่ออัตราส่วนของความยาวเส้นรอบวงที่ฐานสันต่อจำนวนสันภายในของท่อ  $[w'_{ub} / (\pi d'_{ub} / n)]$  อัตราส่วนความกว้างยอดสันต่ออัตราส่วนของความยาวเส้นรอบวงที่ยอดสันต่อจำนวนสันภายในของท่อ  $[w'_{ut} / (\pi d'_{ut} / n)]$  และมุมฮิลิกส์ของสันต่อตามแนวแกน ( $\mu$ ) จากนั้นเปรียบเทียบค่า  $R, \%$  ที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ทั้ง 5 ค่าที่กล่าวมาข้างต้น จากผลลัพธ์ของค่า  $R, \%$  ที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการดึงขึ้นรูปของ ISRCT แบบท่อกลางนั้นจะต้องมีค่าไม่เกิน 57 เปอร์เซ็นต์ และขนาดของ ISRCT จะต้องมีย่อว่างที่ความแม่นยำด้วยระหว่างที่ฐานสันและยอดสัน มุมฮิลิกส์ของสันเกลียวตามแนวแกนจะต้องไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าค่า  $R, \%$  ที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในกระบวนการผลิต ISRCT นั้นแนะนำให้ใช้ค่า  $R, \%$  ที่ต่ำกว่า 57 เปอร์เซ็นต์

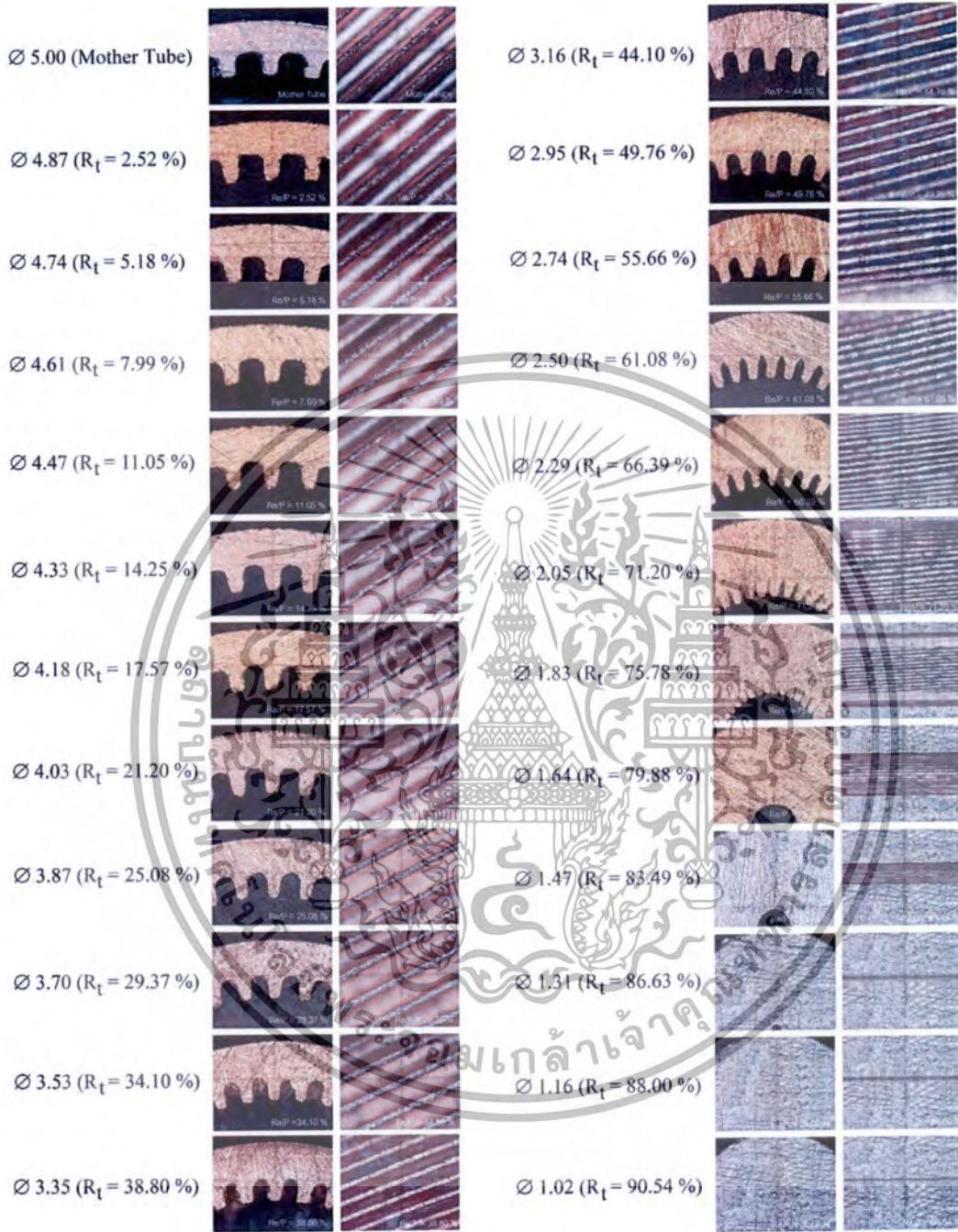
### 8.2 ผลการทดลองและการอภิปรายผล

#### 8.2.1 การวิเคราะห์ความเค้น

หลังจากการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกลาง ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลงผ่านพื้นที่ 23 เทียว โดยใช้เครื่องมุดตาย 12 องศา พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปและวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลางของท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในนั้นดังแสดงในรูปที่ 8.1

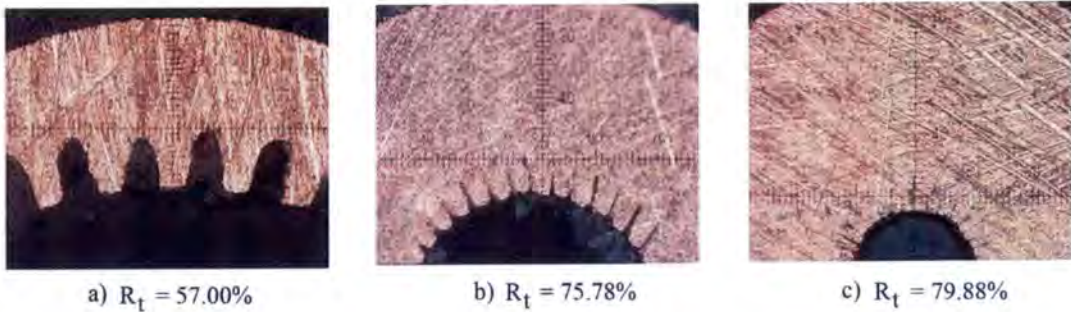
ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลงนั้นมุมฮีลิกส์ภายในของสันและระยะพิทช์นั้นบีบตัวแคบลงในขณะที่พื้นผิวด้านในไม่สม่ำเสมอ อัตราการหดตัวที่แตกต่างกันสำหรับค่า  $R_1\%$  ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการเพิ่มความหนาของผนังท่อไม่เท่ากัน พารามิเตอร์อื่นๆ เช่น ความสูงสัน ( $h_r$ ) ความกว้างฐานสัน ( $w_{rb}$ ) ความกว้างยอดสัน ( $w_{rt}$ ) มุมฮีลิกส์ตามแนวแกนของสัน ( $\mu$ ) ลดลงตามการลดพื้นที่หน้าตัดที่ผ่านไปในแต่ละเที่ยว จุดสำคัญที่ต้องพิจารณาได้แก่การสูญเสียรูปทรงภายหลังจากการลดลงของ  $R_1\%$  อย่างต่อเนื่องนั้นผลที่ได้มีค่าเป็นเชิงลบ มุมฮีลิกส์ของสันเกลียวตามแนวแกนนั้นลดลงหลังจากการตั้งขึ้นรูปแบบที่กลวงที่ผ่านไปแต่ละเที่ยวจากท่อเริ่มต้นก่อนการตั้งขึ้นรูป

กระบวนการตั้งขึ้นรูปแบบที่กลวงนั้นเกิดขึ้นจากความเค้นต่างๆ ประกอบด้วยความเค้นตามแนวแกน (Axial stress,  $\sigma_a$ ) ความเค้นตามแนวรัศมี (Radial stress,  $\sigma_r$ ) และความเค้นวงแหวน (Hoop stress,  $\sigma_h$ ) หรือความเค้นในแนวเส้นรอบวง (Circumferential Tensile Stress) ของ ISRCT (ดังรูปที่ 6.12) ความเค้นตามแนวแกนนั้นเป็นความเค้นดึงซึ่งเกือบจะเหมือนกับค่าที่เกิดขึ้นในพื้นที่ของผนังท่อและกระจายอย่างรวดเร็วเข้าสู่พื้นที่ของสันภายในท่อ ความเค้นอัดตามแนวรัศมีนั้นเป็นความเค้นอัดในขอบเขตที่เป็นผนังของท่อแต่จะเปลี่ยนแปลงเป็นความเค้นดึงในพื้นที่ของสัน ความเค้นวงแหวนหรือความเค้นในแนวเส้นรอบวงนั้นเป็นความเค้นอัดที่เกิดจากความดันภายใน ค่าสัมบูรณ์ของความเค้นจะเพิ่มขึ้นบนพื้นผิวด้านในแต่ลดลงอย่างรวดเร็วจากฐานสันไปยังที่ปลายสันของ ISRCT ดังนั้นความเค้นประสิทธิผลจะแตกต่างกันระหว่างผนังของท่อและบริเวณที่เป็นสันโดยจะเพิ่มขึ้นจากบริเวณเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกไปจนถึงผิวด้านในของผนังท่อและจะลดลงจากบริเวณฐานสันไปสิ้นสุดที่ยอดสัน การกระจายตัวของความเครียดประสิทธิผลนั้นคล้ายคลึงกับความเค้นประสิทธิผล ความเครียดถึงค่าสูงสุดบริเวณช่องว่างของสันและขยายตัวเข้าไปภายในพื้นที่ของสันใน ISRCT ความเครียดเฉลี่ยในช่องว่างระหว่างสันนั้นสูงกว่าภายในพื้นที่ของสัน การเสียรูปบริเวณช่องว่างของสันนั้นจึงรุนแรงกว่าด้านในของบริเวณพื้นที่สัน



รูปที่ 8.1 ภาพขยาย 5 เท่าของรูปร่างภาคตัดของท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวภายใน (ISRCT) ตามภาคตัดขวางและภาคตัดตามแนวแกนโดยใช้วิธีการตั้งขึ้นรูปแบบท่อกลวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.2 รายละเอียดของรูปร่างภาคตัดของ ISRCT หลังจากการตั้งขึ้นรูปแบบที่อุณหภูมิที่  $R_t$  % 3 ค่าที่ กำลังขยาย 5 เท่า

การเปลี่ยนแปลงมิติของ ISRCT หลังจากการตั้งขึ้นรูปโดยวิธีการตั้งขึ้นรูปแบบที่อุณหภูมิที่  $R_t$  % 3 ค่าที่ กำลังขยาย 5 เท่า การเปลี่ยนรูปของความสูงสัน ความกว้างฐานสัน ความกว้างยอดสันและมุมเอียงของสันตามแนวแกน ความสูงสันและมุมเอียงของสันนั้นลดลงภายหลังผ่านการตั้งขึ้นรูป ความกว้างฐานสันจะเสียรูปมากกว่าที่ยอดสัน การเสียรูปที่บริเวณขอบเขตของว่างของสันนั้นรุนแรงกว่าบริเวณพื้นที่สัน อย่างไรก็ตามในสันเดี่ยวๆความเครียดจะกระจายตัวแตกต่างกันไปจากฐานสันไปยังปลายสัน ความเครียดในบริเวณฐานสันนั้นมีค่ามากกว่าบริเวณยอดสัน การเสียรูปของฐานสันรุนแรงกว่าปลายสัน มุมเอียงของสันตามแนวแกนจะเปลี่ยนแปลงมีค่าลดลงจนทำยที่สคมมุมเอียงของสันจะมีค่าเป็นศูนย์

ค่า  $R_t$  % ที่เพิ่มขึ้นเกิดขึ้นพร้อมกันกับการลดลงของพื้นที่หน้าตัดในทุกๆครั้งที่ท่อทดสอบ ISRCT ถูกตั้งขึ้นรูปผ่านตายตลอดการทดสอบจำนวนทั้งสิ้น 23 ท่อ โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและขนาดมิติของสันนั้นลดลง อัตราส่วนความเค้นในการตั้งขึ้นรูปต่อความเค้นคราก ( $\sigma_d / \sigma_y$ ) เพิ่มขึ้นโดยที่พื้นที่หน้าตัดนั้นลดลง ความเค้นตั้งขึ้นรูปเพิ่มขึ้นไปด้วยกับการเพิ่มขึ้นของ  $R_t$  % และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความเค้นในการตั้งขึ้นรูปต่อความเค้นคราก กรรมวิธีการผลิตของ ISRCT จะต้องพิจารณาและเปรียบเทียบกับกับค่าของ  $\sigma_d / \sigma_y$  ซึ่งเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการตั้งขึ้นรูปแบบที่อุณหภูมิที่  $R_t$  % เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนั้นถูกตรวจวัดค่าเพื่อให้มีความถูกต้องและทำการเปรียบเทียบโดยใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบค่าของ  $\sigma_d / \sigma_y$  ค่าที่ได้นั้นจะต้องมีค่าน้อยกว่า 1 การเสียรูปของท่อหลังจากการตั้งขึ้นรูปผ่านตายนั้นจะอยู่ในช่วงอีลาสติก (Elastic range) เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อนั้นกำหนดโดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของตายและจะมีความเที่ยงตรงและแม่นยำเมื่อค่าของ  $\sigma_d / \sigma_y$  มีค่าน้อยกว่า 1 แต่เมื่อค่าของ  $\sigma_d / \sigma_y$  มีค่ามากกว่า 1 การเสียรูปของท่อหลังจากการตั้งขึ้นรูปผ่านตายนั้นจะอยู่ในช่วงพลาสติก (Plastic range) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อไม่สามารถกำหนดได้ด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของตายมันเกิดจากการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรขณะที่ท่อถูกตั้งขึ้นรูปผ่านตายแล้วไม่สปริงกลับตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของตายนั้นเอง การเปลี่ยนรูปดังกล่าวทำให้การผลิตท่อขาดความแม่นยำดังนั้นจึงทำให้ค่าของ  $\sigma_d / \sigma_y$  มีค่ามากกว่า 1 เป็นวิธีการที่ไม่สามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต ISRCT ได้ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นในการตั้งขึ้นรูปต่อความเค้นครากและเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวมกันนั้นแสดงในรูปที่ 8.3 เพราะฉะนั้นควร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดวิธีการผลิตท่อ ISRCT ที่ใช้วิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงจะต้องไม่ลดค่า  $R_f\%$  ให้มากกว่า 57 เปอร์เซ็นต์ (รูปร่างภาคตัดของ ISRCT สามารถดูได้จากรูปที่ 8.2a) เมื่อ  $\sigma_w/\sigma_r$  ในการทดลองมีค่าสูงสุดนั้นเท่ากับ 4.55 ค่า  $R_f\%$  เท่ากับ 90.54 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อเท่ากับ 1.02 มิลลิเมตร สันของท่อจะถูกบีบอัดจนไม่หลงเหลือสภาพของ ISRCT อีกเลย

เมื่อค่า  $R_f\%$  เพิ่มขึ้นนั้นสามารถใช้กระบวนการอบอ่อน (Annealing process) เพื่อกำจัดค่าความเค้นตกค้างในวัสดุท่อภายหลังจากกระบวนการดึงขึ้นรูปเย็นลงได้และพบว่าขณะที่  $R_f\%$  เพิ่มขึ้นจนถึง 57 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อหลังการดึงขึ้นรูปยังคงมีขนาดที่ถูกต้องและค่ามุมอีลิปส์ของสันตามแนวแกน  $\psi$  จะมีค่าเท่ากับ 30 องศาซึ่งอยู่ในช่วงที่สามารถใช้งานได้ดี ดังนั้นในอุตสาหกรรมการผลิตท่อ ISRCT ขนาดเล็กสามารถที่จะกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและมุมอีลิปส์ของสันท่อตามแนวแกนของท่อเริ่มต้น (Mother tube) ก่อนดึงขึ้นรูปได้เพื่อทำนายผลที่ได้จากกระบวนการผลิตท่อ ISRCT ที่ต้องการภายหลังจากกระบวนการผลิตได้อย่างถูกต้องและแม่นยำนั่นเอง

### 8.2.2 การเปลี่ยนรูปร่างของ ISRCT

ท่อทองแดงที่มีสันเป็นมุมอีลิปส์ตามแนวแกนที่ผิวภายในของท่อหลังจากการดึงขึ้นรูป รูปร่างของพื้นที่ภาคตัดของ ISRCT นั้นเปลี่ยนแปลง การเสียรูปของท่อนั้นเกิดขึ้นตามทิศทางในแนวแกน การเสียรูปในทิศทางตามแนวรัศมีที่บริเวณสันและร่องสันนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อลดลงทีละน้อยๆไปข้างหน้าไปยังบริเวณจุดสิ้นสุดของช่วงการเปลี่ยนรูปของตาย ผลลัพธ์ที่ได้ทำให้ความหนาของผนังท่อ ISRCT และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกนั้นลดลงไปตามขนาดกำหนด ในขณะที่ท่อถูกดึงเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลงและความหนาของผนังท่อเพิ่มขึ้นหลังจากดึงขึ้นรูปผ่านไปในแต่ละเที่ยว ท่อจะได้รับความเครียดอัดในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงซึ่งเป็นผลให้ความหนาผนังท่อเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนรูปของท่อนั้นไม่มีความดันด้านอยู่ภายในท่อ ความสูงของสันลดลงเกิดจากความเครียดอัดในแนวเส้นรอบวง ขีดจำกัดของ ISRCT ที่ผ่านการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงผ่านตายนั้นเมื่อความหนาของผนังท่อบวกกับความสูงของสันต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก  $[(r'_w + h'_r)/D]$  นั้นมีค่าเท่ากับ 0.50 คือ  $[(r'_w + h'_r)/D = 0.50]$  และค่า  $R_f\%$  มีค่าเท่ากับ 90.54 เปอร์เซ็นต์ ที่จุดดังกล่าวรูภายในท่อไม่สามารถใช้ในการส่งถ่ายของไหลในทุกกรณีโดยที่ปลายท่อนั้นปิด เมื่อ  $[(r'_w + h'_r)/D]$  มีค่าสูงกว่า 0.50 คือ  $[(r'_w + h'_r)/D > 0.50]$  ท่อจะเกิดการหักและแตกเร็วที่สุดในที่สุด ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของผนังท่อบวกความสูงสันต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อและเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวมนั้นแสดงในรูปที่ 8.4

ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างที่ฐานสันคูณด้วยจำนวนสันทั้งหมดภายในท่อหารด้วยความยาวตามแนวเส้นรอบวงที่ฐานสันของ ISRCT  $[w'_b / (\pi d'_b / n)]$  และเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวมนั้นแสดงในรูปที่ 8.5 หลังจากการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงผ่านไปเที่ยวแรกเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อและพื้นที่หน้าตัดของท่อนั้นลดลงด้วยกันทั้งคู่ ความกว้างช่องว่างของสันที่ฐานสันนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงมากกว่าบริเวณความหนาของสัน นั้นหมายความว่าขนาดมิติของความกว้างช่องว่างสันนั้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จากการดึงขึ้นรูปผ่านไปเที่ยวที่สองเป็นต้นไปเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อลดลง ความหนาผนังท่อเพิ่มขึ้นและผลกระทบของส่วนโค้งเว้าที่จุดเริ่มต้นในมุมมองด้านข้างของความ

กว้างช่องว่างที่ฐานสัณฐานนั้นก็แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนมากขึ้น หลังจากผ่านการดึงขึ้นรูปมากเทียบขึ้นทำให้แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปมากขึ้นตามไปด้วยและมีผลกระทบต่อส่วนโค้งเว้าเพิ่มขึ้นด้วย มิติภายในของ ISRCT จะไม่สม่ำเสมอและคุณภาพของความกว้างด้านข้างของช่องว่างบริเวณฐานสันและผิวภายในมุมสี่เหลี่ยมของสันนั้นได้รับผลกระทบมากขึ้น ท้ายที่สุดก็จะเกิดความเสียหายกับ ISRCT ได้ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.83 มิลลิเมตร ขณะที่  $R_r = 75.78$  เปอร์เซ็นต์ รูปร่างภาคตัดของ ISRCT นั้นแสดงในรูปที่ 8.2b ระยะห่างระหว่างช่องว่างที่ฐานสัณฐานนั้นลดลงไปจนถึงไม่มีช่องว่างเหลืออยู่เลย เมื่อนำเอาขนาดความกว้างที่ฐานสันคูณด้วยจำนวนสันทั้งหมดภายในท่อและหารด้วยความยาวตามแนวเส้นรอบวงที่ฐานสันของ ISRCT มีค่าเท่ากับ 1.00 คือ  $[w'_{rb}/(\pi d'_{rb}/n)=1.00]$  การถ่ายเทความร้อนจากบริเวณช่องว่างของฐานสัณฐานนั้นจะหมดประสิทธิภาพลงทันที

ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างที่ยอดสันคูณด้วยจำนวนสันทั้งหมดภายในท่อหารด้วยความยาวตามแนวเส้นรอบวงที่ยอดสันของ ISRCT  $[w'_r/(\pi d'_r/n)]$  และเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวม นั้นแสดงในรูปที่ 8.6 คล้ายคลึงกันกับความกว้างของช่องว่างที่ยอดสันนั้นก็เปลี่ยนแปลงมากกว่าความสูงของสัน มิติภายในของความกว้างของช่องว่างที่ยอดสันของ ISRCT นั้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.64 มิลลิเมตร ขณะที่  $R_r = 79.88$  เปอร์เซ็นต์ รูปร่างภาคตัดของ ISRCT นั้นแสดงในรูปที่ 8.2c ระยะห่างระหว่างช่องว่างที่ยอดสันนั้นลดลงไปจนถึงไม่มีช่องว่างเหลืออยู่เลย ดังนั้นเมื่อนำเอาขนาดความกว้างที่ยอดสันคูณด้วยจำนวนสันทั้งหมดภายในท่อและหารด้วยความยาวตามแนวเส้นรอบวงที่ยอดสันของ ISRCT มีค่าเท่ากับ 1.00 คือ  $[w'_r/(\pi d'_r/n)=1.00]$  ระยะห่างระหว่างช่องว่างที่ยอดสันนั้นลดลงไปจนถึงไม่มีช่องว่างเหลืออยู่เลยและของไหลไม่สามารถไหลผ่านช่องว่างของสันตลอดแนวของสันได้อีกต่อไป บริเวณช่องว่างของสันจะมีค่าเท่ากับท่อที่ไม่มีสันทั่วไป

มุมสี่เหลี่ยมของสันตามแนวแกน ( $\psi$ ) ภายในท่อนั้นเปลี่ยนแปลงหลังจากการดึงขึ้นรูปแบบท่อกว้างผ่านตายไปแต่ละเที่ยวและขึ้นอยู่กับค่า  $R_r\%$  ของการลดลงของพื้นที่ภาคตัดของท่อด้วย ค่ามุม  $\psi$  ของท่อเริ่มต้น (Mother tube) ก่อนการทดลองมีค่าเท่ากับ 38 องศา หลังท่อเริ่มต้นถูกดึงขึ้นรูปผ่านตายค่าของมุม  $\psi$  ก็จะลดลงอย่างต่อเนื่องหลังจากการดึงขึ้นรูปผ่านตายในแต่ละเที่ยว ท่อ ISRCT ที่ผ่านการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกว้างนั้นเกิดการเสียรูปได้อย่างอิสระเนื่องจากขาดความต้านทานที่เกิดจากความดันภายในท่อ การเสียรูปที่ฐานสัณฐานนั้นมากกว่าที่ยอดสันเป็นเหตุให้มุม  $\psi$  นั้นลดลงในเวลาเดียวกัน การลดพื้นที่หน้าตัดต่อครั้ง (Reduction area per pass: Re/P) ที่ 49.76 เปอร์เซ็นต์ สำหรับวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายครั้งเดียว (Single-pass drawing) นั้นสอดคล้องกับอีกวิธีการที่เป็นวิธีที่สองของวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) วิธีที่สองในการทดลองครั้งนี้ ค่า  $R_r\%$  ที่ 2.52 เปอร์เซ็นต์ ในการดึงขึ้นรูปในท่อทดลองครั้งที่ 1 และที่ 5.18 เปอร์เซ็นต์ ในการดึงขึ้นรูปในท่อทดลองครั้งที่ 2 และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ขณะที่  $R_r\%$  ที่ 68.81 เปอร์เซ็นต์ นั้นพบว่ารอยแตกเกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของยอดสันและเกิดรอยแยกตามแนวที่ด้านข้างของฐานสัน เป็นเหตุให้ขณะที่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.83 มิลลิเมตร ที่  $R_r = 75.78$  เปอร์เซ็นต์ ทำให้มุม  $\psi$  นั้นถูกบีบอัดจนมีค่าเป็นศูนย์องศาสำหรับความเครียดนั้นกระจายแพร่ออกไปยังบริเวณขอบเขตของสัน มุม  $\psi$  นั้นลดลงอย่างต่อเนื่องและถูกบีบอัดจนกระทั่งปิดไปในที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณทางด้านเรขาคณิตวิเคราะห์ที่ได้จากสมการ

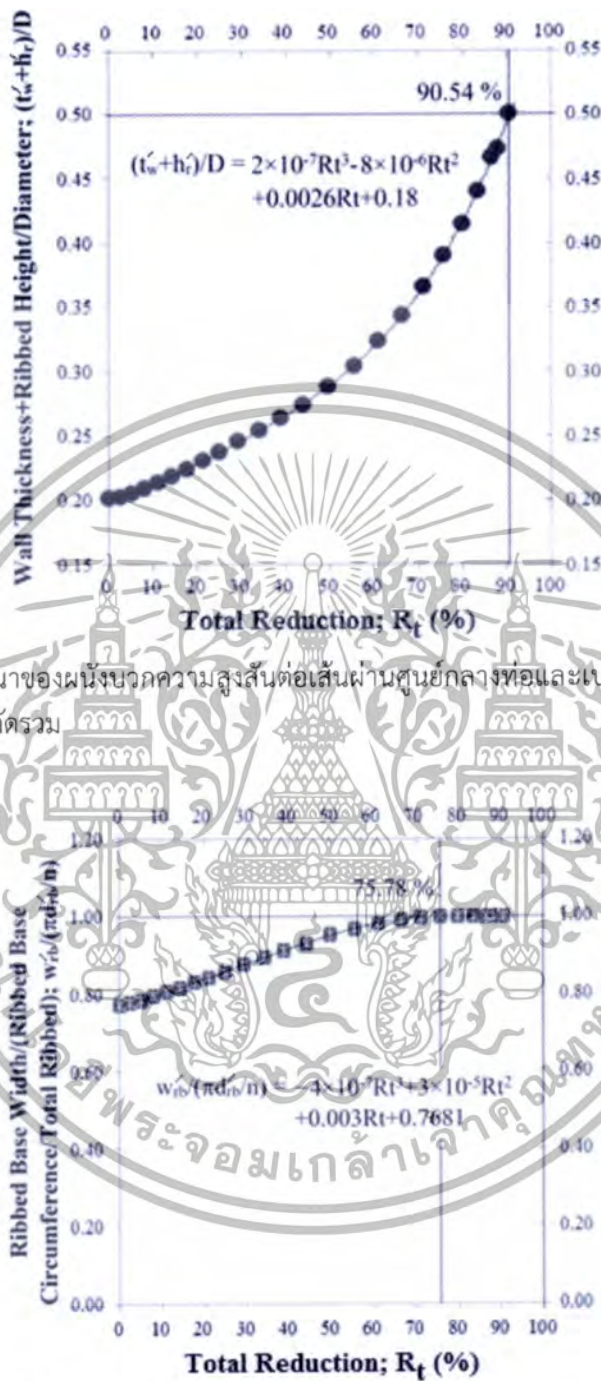
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\psi' = [(180 \times (\tan^{-1}(((w'_{rb} - w'_{rt})/2)/h'_r)))/\pi] \times 2$  ในขณะที่มุม  $\psi'$  ของท่อเริ่มต้นเท่ากับ 38 องศา การไหลของของไหลที่บริเวณพื้นผิวระหว่างร่องของสันนั้นเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) และเป็นผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนนั้นสูงชันมาก ซึ่งการดึงขึ้นรูปผ่านตายในแต่ละเที่ยวมุม  $\psi'$  กลับลดลงอย่างต่อเนื่องและประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนนั้นก็ลดลงตามไปด้วย โดยที่มุม  $\psi'$  มีค่าเป็น 0 องศา การไหลของของไหลที่บริเวณพื้นผิวระหว่างร่องของสันนั้นเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบปั่นป่วนเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนนั้นลดลง ดังนั้นประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะต่ำกว่าที่มุม  $\psi'$  สูง เมื่อ  $\psi'$  มีค่าเป็นศูนย์การถ่ายเทความร้อนนั้นมีผลเหมือนกันกับท่อที่มีสันตรง ความสัมพันธ์ระหว่างมุมอีลิปส์ของสันเกลียวตามแนวแกนและเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวมนั้นแสดงในรูปที่ 8.7 และทำการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทั้ง 5 ที่ใช้ในกระบวนการผลิตของ ISRCT นั้นแสดงในรูปที่ 8.8 เพื่อเปรียบเทียบความเป็นไปได้ในการออกแบบการผลิตที่คำนึงถึงเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานเป็นหลัก



รูปที่ 8.3 อัตราส่วนความเค้นในการดึงขึ้นรูปต่อความเค้นครากและเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวม

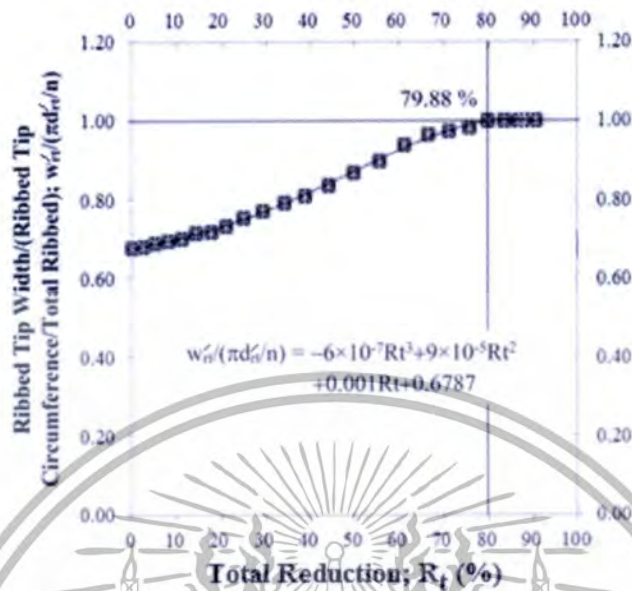
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



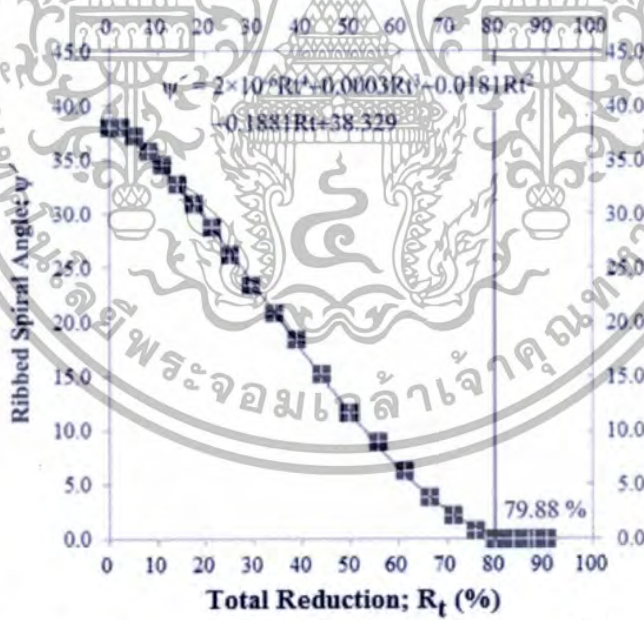
รูปที่ 8.4 ความหนาของผนังบวกความสูงสันต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อและเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวม

รูปที่ 8.5 ความกว้างที่ฐานสันคู่ด้วยจำนวนสันทั้งหมดภายในท่อหารด้วยความยาวตามแนวเส้นรอบวงที่ฐานสันของ ISRCT [ $w'_{rb}/(\pi d'_{rb}/n)$ ] และเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

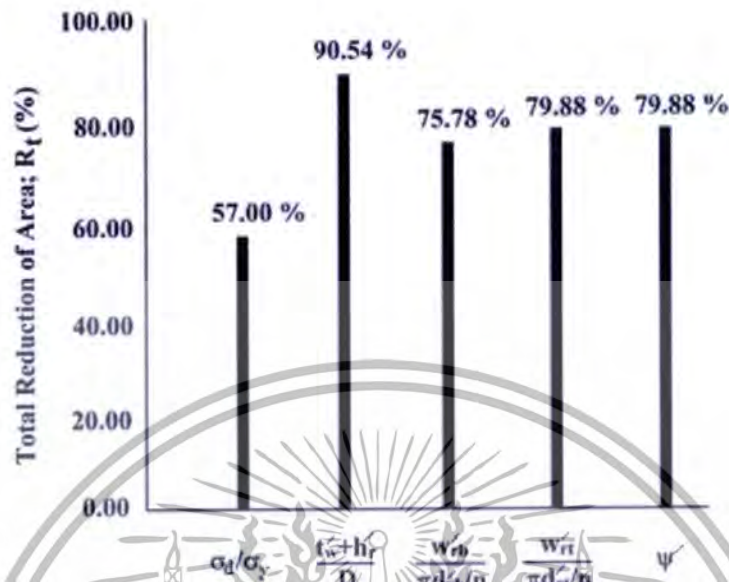


รูปที่ 8.6 ความกว้างที่ยอดสันคูลด้วยจำนวนสันทั้งหมดภายในท่อหารด้วยความยาวตามแนวเส้นรอบวงที่ยอดสันของ ISRCT [ $w_n' / (\pi d_n' / n)$ ] และเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวม



รูปที่ 8.7 มุมสปีริคัลของสันเกลียวตามแนวแกนและเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.8 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทั้ง 5 ที่ใช้ในกระบวนการผลิตของ ISRCT

### 8.3 บทสรุป

การวิจัยครั้งนี้เกี่ยวข้องกับอิทธิพลของความเค้นดึงขึ้นรูปในการลดพื้นที่หน้าตัดรวมและขนาดมิติของท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบทอกลางพบว่า

[1] ความเค้นในการดึงขึ้นรูปได้มาจากความเค้นตามแนวแกน (Axial stress) ความเค้นตามแนวรัศมี (Radial stress) และความเค้นวงแหวน (Hoop stress) ในการผลิต ISRCT อัตราส่วนความเค้นในการดึงขึ้นรูปต่อความเค้นครากมีค่าเท่ากับ 1.00 คือ  $[(\sigma_d/\sigma_y) = 1.00]$  นั้นสามารถที่จะกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในนอกท่อหลังการดึงขึ้นรูปได้ ใช้สำหรับกำหนดขนาดมาตรฐานในออกแบบที่ถูกต้องและสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต ISRCT

[2] ความสูงของสันนั้นลดลงเกิดจากความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงและไม่มี ความดันด้านการเปลี่ยนรูปของ ISRCT ภายในท่อ เมื่อความหนาของผนังบวกความสูงสันต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่มีค่าเท่ากับ 0.5 คือ  $[(t'_w + h'_r)/D = 0.50]$  ดังนั้นรูในของท่อจะปิดตันและไม่สามารถส่งของไหลใด ๆ ได้อีก

[3] เมื่อความกว้างที่ฐานสันคูณด้วยจำนวนสันทั้งหมดภายในท่อและหารด้วยความยาวตามแนวเส้นรอบวงที่ฐานสันของ ISRCT มีค่าเท่ากับ 1.00 คือ  $[w'_{rb}/(\pi d'_{rb}/n) = 1.00]$  การถ่ายเทความร้อนจากบริเวณช่องว่างของสันนั้นจะหมดประสิทธิภาพลงทันที

[4] เมื่อนำเอาขนาดความกว้างที่ยอดสันคูณด้วยจำนวนสันทั้งหมดภายในท่อและหารด้วยความยาวตามแนวเส้นรอบวงที่ยอดสันของ ISRCT มีค่าเท่ากับ 1.00 คือ  $[w'_{rt}/(\pi d'_{rt}/n) = 1.00]$  ระยะห่างระหว่างช่องว่างที่ยอดสันนั้นลดลงไปจนถึงไม่มีช่องว่างเหลืออยู่เลยและของไหลก็ไม่สามารถไหลผ่านช่องว่างของสันตลอดแนวของสันได้อีกต่อไป บริเวณช่องว่างของสันจะมีค่าเท่ากับท่อที่ไม่มีสันทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[5] การเสียรูปที่ฐานสัณฐานนั้นมากกว่าที่ยอดสันเป็นเหตุให้มุม  $\psi$  นั้นลดลงอย่างต่อเนื่องและมีแนวโน้มที่จะทำให้มุม  $\psi$  ลดลงในเชิงลบ เมื่อ  $\psi$  มีค่าเป็นศูนย์การถ่ายเทความร้อนนั้นมีผลเหมือนกันกับท่อที่มีสันตรง

[6] ISRCT หลังจากผ่านการดัดขึ้นรูปผ่านตายนั้นมีขนาดที่แม่นยำ ช่องว่างระหว่างบริเวณฐานของสันและบริเวณยอดสันตลอดจนมุมเอียงของสันตามแนวแกนนั้นอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้ดีนั้น ค่าการลดลงของพื้นที่ภาคตัดในการดัดขึ้นรูป ISRCT จะต้องมีย่าน้อยกว่า 57 เปอร์เซ็นต์

จากบทสรุปในบทที่ 8 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนความเค้นในการดัดขึ้นรูปต่อความเค้นครากมีนัยสำคัญที่  $(\sigma_x/\sigma_y)=1.00$  โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหลังการดัดขึ้นรูปจะได้ขนาดตามที่กำหนดไว้สามารถที่จะกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อหลังการดัดขึ้นรูปได้และสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตได้ โดยการลดลงของพื้นที่หน้าตัดในการดัดขึ้นรูปจะต้องมีย่าน้อยกว่า 57 เปอร์เซ็นต์ มีผลให้มิติของสันท่อไม่เกิดรอยที่ผิวด้านบนของยอดสันและรอยแยกที่ด้านข้างของแต่ละสัน รูในท่อไม่ปิดตัน การถ่ายเทความร้อนจากบริเวณช่องว่างร่องสันมีประสิทธิภาพและมุมเอียงของสันยังคงอยู่ประมาณ 10 องศา ซึ่งยังมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Shinohara et al. [21] ที่แสดงผลไว้ว่ามุมเอียงที่เอียงที่เหมาะสมในการถ่ายเทความร้อนทั้งเครื่องควบแน่นและเครื่องทำความเย็นอยู่ระหว่าง 7 องศา ถึง 30 องศา เพื่อให้ผลการทดลองมีความแม่นยำและทราบค่าความเค้นในแต่ละจุดบนพื้นที่หน้าตัดของท่อจึงได้ทำการจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อตรวจสอบในเชิงลึกที่การทดลองไม่สามารถทำได้โดยง่าย การจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ได้แสดงไว้ในบทที่ 9 ต่อไป

## บทที่ 9

# การใช้โปรแกรม 3D FEM เพื่อตรวจสอบท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในขนาดเล็กพิเศษด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง

### 9.1 บทนำ

ในบทที่ 9 จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพัฒนาการของท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่ภายใน (Inner spiral ribbed copper tube: ISRCT) ขนาดเล็กที่มีคุณภาพและประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนที่สูงมาก พฤติกรรมการเสียรูปของ ISRCT นั้นถูกนำมาศึกษาในครั้งนี้ แบบจำลองสามมิติไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นออกแบบมาเพื่อหาพารามิเตอร์กระบวนการต่างๆได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของภาคตัดโปรไฟล์ (Cross-section profiles) ของสันและมุมฮีลิกซ์ของ ISRCT โดยการดึงขึ้นรูปผ่านตายจำนวน 12 เที้ยวใช้วิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง จากนั้นศึกษาผลกระทบของมุมฮีลิกซ์ของสันและการเปลี่ยนแปลงของภาคตัดโปรไฟล์ของสัน การสร้างแบบจำลองและเทคนิคการจำลองสถานการณ์นั้นดำเนินการโดยใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ ABAQUS ที่จะเรียนรู้ไม่ว่าจะเป็นพื้นผิวมิติของ ISRCT เพิ่มขึ้นหรือลดลงโดยใช้วิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ผลของการดึงขึ้นรูปผ่านตายในหลายๆเทยวนั้นสรุปและนำมาเทียบกับผลการทดลอง วิธีการจำลอง FEM นั้นใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของ 10 พารามิเตอร์ได้แก่ ความเค้น von Mises ความหนาของผนังท่อ ความกว้างฐานสันท่อ ความกว้างยอดสันท่อ ช่องว่างฐานสัน ช่องว่างยอดสัน ความสูงสันท่อ ระยะพิทช์ของสันท่อ ระยะกระจัดตามแนวแกนและมุมฮีลิกซ์ของสันท่อ ขั้นตอนนี้สามารถใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์และเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นประโยชน์มากสำหรับนักวิจัยและวิศวกรสำหรับการออกแบบในอนาคตของ ISRCT ขนาดเล็กพิเศษเพื่อปรับปรุงคุณภาพและประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อน

### 9.2 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์พื้นฐานและวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ใน ABAQUS ในการจำลองกระบวนการดึงขึ้นรูป ISRCT พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองจะได้อธิบายไว้ในบทที่ 5 การเสียรูปของสันและช่องว่างระหว่างการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกลวง จากนั้นวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการทั้งสองวิธีการได้แก่วิธีการทดลองและวิธีการจำลองสถานการณ์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ความเค้นในการดึงขึ้นรูป von Mises แสดงผลการจำลองสถานการณ์โดยใช้ซอฟต์แวร์ ABAQUS เป็นวิธีการทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การทดสอบด้วยการทดลองใช้วิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกลวง โดยการดึงขึ้นรูปผ่านตายจำนวน 12 เที้ยว จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์จากทั้งวิธีการทดลองและวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ พารามิเตอร์ของมิติที่แตกต่างกันนั้นได้รับการประเมินผลเป็นตัวเลข การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม ( $R_f\%$ ) นั้นเพิ่มขึ้นทุกครั้งที่ในแต่ละเที้ยวของขึ้นทดสอบที่ถูกดึงผ่านตาย การดึงผ่านตายในเที้ยวที่ 1 การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 11.05

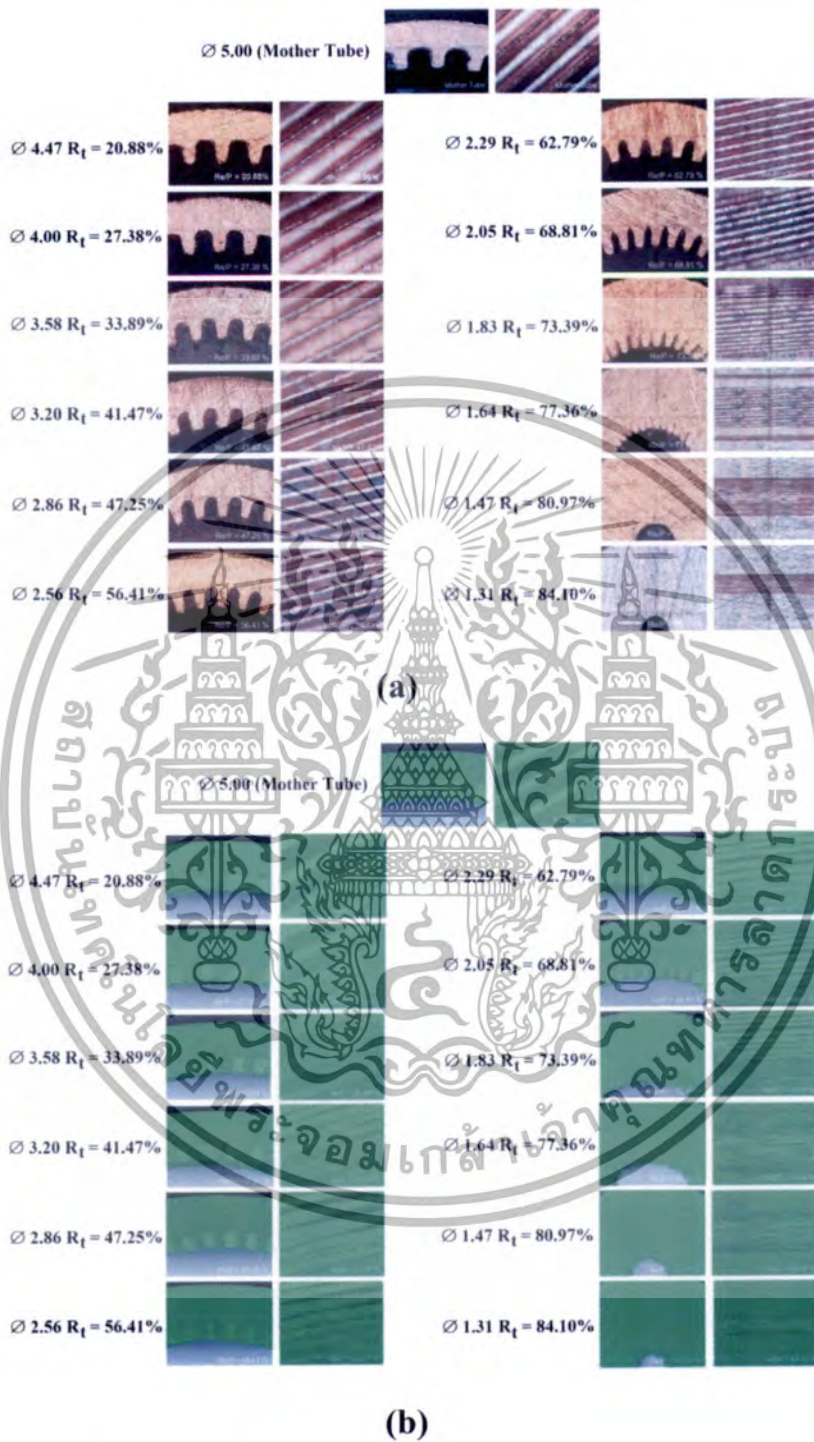
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์ การดึงผ่านตายในเที่ยวที่ 2 การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 27.38 เปอร์เซ็นต์ การดึงผ่านตายในเที่ยวที่ 3, 4,...เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงการดึงผ่านตายในเที่ยวที่ 12 การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 84.10 เปอร์เซ็นต์ในเที่ยวสุดท้าย สำหรับการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง เปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวมที่เพิ่มขึ้นนั้นมีผลให้ภาคตัดมิติของ ISRCT เปลี่ยนแปลงและถูกนำมาวิเคราะห์ผล

พฤติกรรมการเสียรูปของ ISRCT ด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบทอกลวง ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลง มุมฮิลิกส์และระยะพิทช์ของสัณก็ลดลงด้วย การเพิ่มขึ้นของผนังท่อและระยะกระจัดตามแนวแกน ตรงกันข้ามกับ ความกว้างฐานสันท่อ ความกว้างยอดสันท่อ ช่องว่างฐานสัน ช่องว่างยอดสัน ความสูงสันท่อ ระยะพิทช์ของสันท่อ และมุมฮิลิกส์ของสันท่อหลังจากการดึงขึ้นรูปผ่านตายในแต่ละเที่ยวนั้นกลับลดลงอย่างต่อเนื่อง

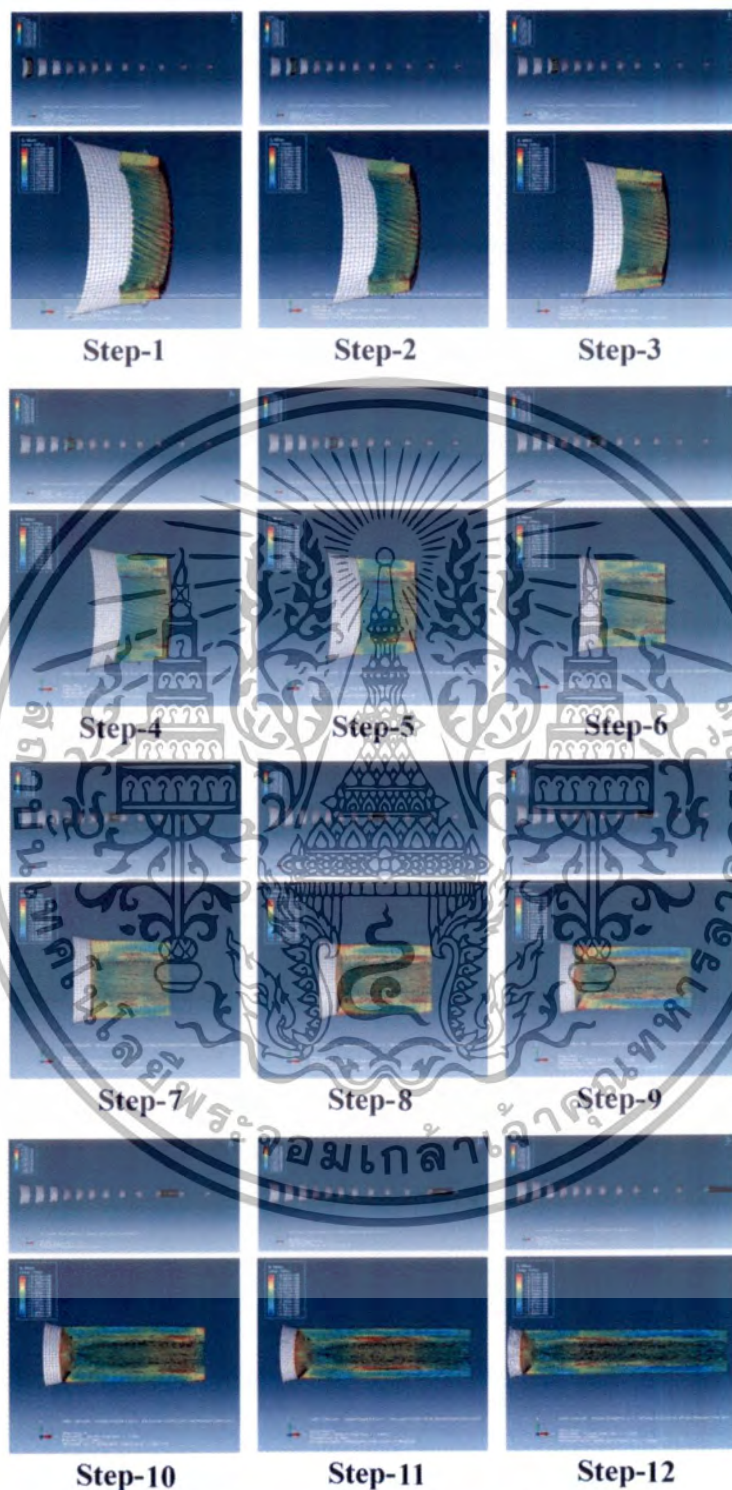
การกระจายตัวของความเครียดในส่วนที่เป็นสันนั้นไม่สม่ำเสมอจากฐานสันไปจนถึงยอดสัน ในขณะที่ยอดสันนั้นแนบชิดติดกันความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นสูงมากและมากที่สุดเกิดที่บริเวณของฐานสัน การเสียรูปที่ฐานสันนั้นมากกว่าที่ยอดสัน ขณะที่มุมฮิลิกส์ของสันนั้นจะลดลงหลังจากการดึงขึ้นรูปผ่านตายในแต่ละเที่ยว กระบวนการดึงขึ้นรูปแบบทอกลวงแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆที่สูงมากที่สุดภาคตัดมิติของ ISRCT จากผลการทดลองและการจำลองการทำงานแบบ 3D FEM นั้นแสดงในรูปที่ 9.1

เส้น Mesh การกระจายความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้น ในกรณีของเอลิเมนต์ของตายจะแสดงผลเป็นสีเทา เอลิเมนต์ดังกล่าวเป็นเอลิเมนต์ที่ไม่มีผลกระทบของความเค้นมากกระทำเป็นเพราะว่าตายนั้นถูกกำหนดว่ามีผิวเป็นวัตถุเกร็ง ดังนั้นจึงไม่มีผลที่เกิดจากความเค้นแสดงออกมา ส่วนผลที่เกิดกับชิ้นงานจำลองที่เป็น ISRCT หลังกระบวนการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบทอกลวง โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS จะทำการประเมินผลค่าความเค้น von Mises และแสดงผลค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากการดึงขึ้นรูปแบบทอกลวงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตั้งแต่เที่ยวที่ 1 ถึงเที่ยวที่ 12 แสดงในรูปที่ 9.2



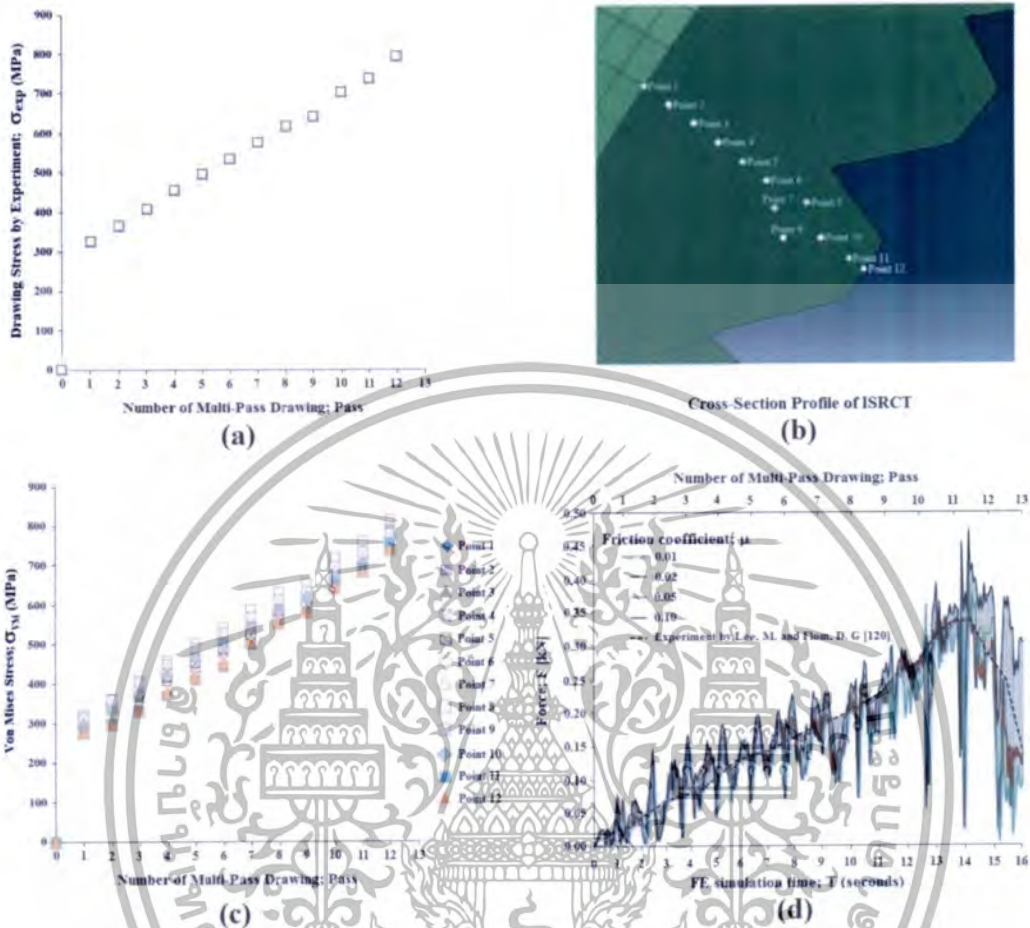
รูปที่ 9.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของภาคตัดตามแนวขวางและตามแนวแกนของ ISRCT (a) ผลจากการทดลอง (b) ผลจากไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.2 การกระจายความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นจากการดิ่งขึ้นรูปแบบท่อกลวงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตั้งแต่เที่ยวที่ 1 ถึงเที่ยวที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.3 สรุปผลลัพธ์จากการดึงขึ้นรูปแบบทอกลางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตั้งแต่เที่ยวที่ 1 ถึงเที่ยวที่ 12 โดยที่ (a) ความเค้นในการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีการทดลอง b) ภาคตัดโปรไฟล์ของ ISRCT c) ความเค้น von Mises d) เปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปต่อเวลาจำลองการทำงานที่เปลี่ยนแปลงตามค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วย FEM และผลการทดลองของ Lee, M. and Flom, D. G [120]

รูปที่ 9.3 แสดงผลลัพธ์ของความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นในการดึงขึ้นรูปในแต่ละเที่ยวและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบกระบวนการดึงขึ้นรูปแบบทอกลางสำหรับการขึ้นรูปท่อที่มีสันขดอยู่ภายในขนาดเล็กพิเศษได้ ค่าความเค้น von Mises ต่ำสุดเกิดระหว่างการดึงขึ้นรูปในเที่ยวที่ 1 แม้ว่ารูปร่างชิ้นงานที่ผ่านการดึงในเที่ยวที่ 1 จะทำให้ความเค้น von Mises เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและภายใต้สภาวะของโหลดที่กระทำอย่างต่อเนื่องซึ่งความเค้น von Mises นั้นจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ชิ้นงานที่ผ่านการดึงในเที่ยวที่ 12

ผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ FEM สันนิษฐานความเค้น von Mises นั้นแสดงให้เห็นว่าการดึงขึ้นรูปผ่านตายในหลายๆเที่ยวจนถึงเที่ยวที่ 12 รูปแบบของความเค้น von Mises (von Mises stress หรือ

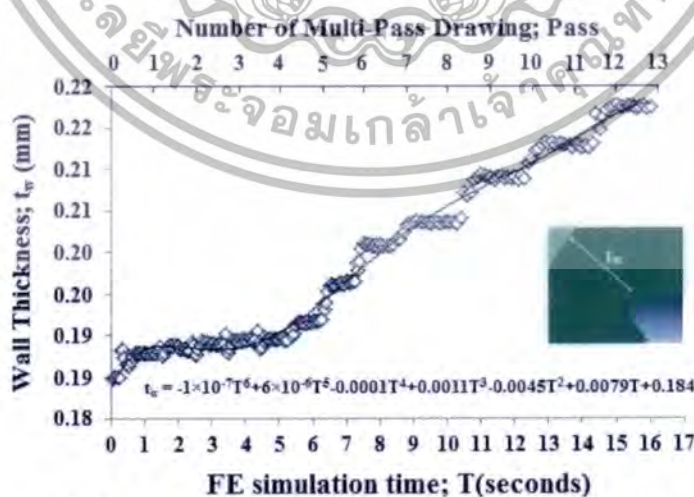
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

equivalent stress) สำหรับจุดในตำแหน่งของภาคตัดโปรไฟล์ของ ISRCT สามารถอธิบายได้ รูปที่ 9.3(a) แสดงค่าความเค้นในการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีการทดลอง รูปที่ 9.3(b) แสดงภาคตัดโปรไฟล์ของ ISRCT เพื่อตรวจสอบผลของการจำลองสถานการณ์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จุดใดๆ อาทิเช่น จุดที่ 1 (โหนด 512), จุดที่ 2 (โหนด 5973), จุดที่ 3 (โหนด 5974), จุดที่ 4 (โหนด 5975), จุดที่ 5 (โหนด 5976), จุดที่ 6 (โหนด 390), จุดที่ 7 (โหนด 33757), จุดที่ 8 (โหนด 33885), จุดที่ 9 (โหนด 33875), จุดที่ 10 (โหนด 33686), จุดที่ 11 (โหนด 33872) และจุดที่ 12 (โหนด 27043) ถ้าพิจารณาในส่วนของการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้น von Mises ที่เหลืออยู่จากการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงที่มีการผ่านการดึงขึ้นรูปผ่านตายในหลายๆ เทียว ความเค้น von Mises เพิ่มขึ้นที่บริเวณโหนดต่างๆ หลังจากผ่านกระบวนการดึงขึ้นรูปจนถึง 12 เทียว ในการจำลองการทำงานความเค้น von Mises นั้นสูงที่สุดเกิดที่จุดที่ 8 (โหนด 33885) ที่บริเวณขอบเขตของฐานสันและจุดที่มีค่าความเค้น von Mises ปานกลางได้แก่จุดที่ 1 และจุดที่ 2 (โหนด 512 และ 5973) ที่บริเวณขอบเขตของผิวด้านนอกของ ISRCT และที่มีค่าความเค้น von Mises ต่ำที่สุดได้แก่จุดที่ 4 (โหนด 5975) ที่กึ่งกลางความหนาผนังท่อและจุดที่ 12 (โหนด 27043) ที่ขอบเขตบริเวณยอดสันตามลำดับ ความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นในความกว้างบริเวณฐานสันเป็นเพราะว่าความเค้นทั้งสามรูปแบบ (ความเค้นตามแนวแกน ความเค้นตามแนวรัศมีและความเค้นตามแนวเส้นรอบวงหรือความเค้นวงแหวน) เป็นความเค้นรวมที่จุดนั้นๆ ความเค้นตามแนวรัศมีระหว่างกลางที่เกิดขึ้นนั้นเกิดที่ผิวด้านนอกของ ISRCT ที่จุดสัมผัสกับผิวของตายและลดลงเป็นความเค้นตามแนวแกนอย่างรวดเร็วในผนังท่อ ความเค้นต่ำสุดเกิดขึ้นที่กึ่งกลางของความหนาผนังท่อของท่อกลวงและที่ยอดสันเป็นเพราะว่าไม่มีความเค้นวงแหวนที่เกิดจากความดันภายในท่อ ISRCT ในกระบวนการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง รูปที่ 9.3(c) แสดงความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการดึงขึ้นรูปผ่านตายในหลายๆ เทียวโดยการจำลองการทำงานเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างผลการทดลองและการจำลองสถานการณ์ความเค้นในการดึงขึ้นรูปผ่านตายนั้นคล้ายกัน การศึกษาสมมติให้สภาวะคงที่ (Steady state) ขึ้นงานทดสอบเป็นท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายใน ISRCT ที่เป็นวัสดุอีลาสติก-พลาสติก (Elastic-plastic) นำมาใช้ในการจำลองสถานการณ์โดยใช้ซอฟต์แวร์ FEM ตามกฎของ Isotropic hardening law เกณฑ์ของ von Mises ซึ่งใช้การป้อนกลับในแนวรัศมี การไหลของความเค้น และวัสดุนั้นพิจารณาว่าเป็นวัสดุที่มีอัตราความเครียดแบบอิสระ ABAQUS user's manual [119]

มีการทดสอบหาค่าแรงเสียดทานที่เหมาะสมในการทดลองและไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ 0.06 เพราะใช้สารหล่อลื่นระหว่างท่อและตายจากงานวิจัยของ Tang et al. [12] ในแบบจำลองใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.02 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างท่อและตายที่เคลือบสารหล่อลื่นต่างๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 0.10 จากการทดลองของ Lee, M. and Flom, D. G [120] ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานขึ้นอยู่กับสารหล่อลื่นที่ผิวสัมผัสของ ISRCT และตายในการจำลองสถานการณ์นี้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าคงที่ขึ้นอยู่กับช่วงความเค้นหนึ่ง หลังจากนั้นตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้เพื่อที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เหมาะสมระหว่างผลการทดลองและระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ใช้สอบเทียบเป็นค่าที่แยกกันอย่างอิสระ 4 ค่าได้แก่ 0.01, 0.02, 0.05 และ 0.1 เป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างตายและ ISRCT ( $\mu_{die/ISRCT}$ ) หลักการสำคัญของการวิเคราะห์แบบแปรผันนั้นเพื่อจำลองการทดสอบการดึงขึ้นรูป ซึ่งจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานค่า

หนึ่งที่มีค่าเท่ากับผลจากการทดลอง รูปที่ 9.3(d) เปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปต่อเวลาจำลองการทำงานที่เปลี่ยนแปลงตามค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วย FEM และผลการทดลอง ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีผลกระทบต่อแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามการแพร่ของแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะสม่าเสมอถ้าเป็นวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน แผนภาพเปรียบเทียบค่าสูงสุดของแรงที่กระทำจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีผลกระทบต่อแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปแบบทอกลวง ดังนั้นแรงเสียดทานในวัสดุที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้แรงในการดึงขึ้นรูปเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แต่ไม่มากนัก ช่วงการจำลองสถานการณ์ที่ดีที่สุดนั้นพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะต่ำกว่า 0.02 เนื่องจากมีสารหล่อลื่นอยู่ระหว่าง ISRCT และตาย เนื่องจากผิวสัมผัสระหว่างท่อและตายมีขนาดเล็กมากๆและมีสารหล่อลื่นตลอดเวลาจึงสมมติฐานว่ามีความเสียดทานน้อยมากๆ ดังนั้นในการจำลองการทำงานในครั้งนี้นจึงเลือกค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.02 ดังกล่าว

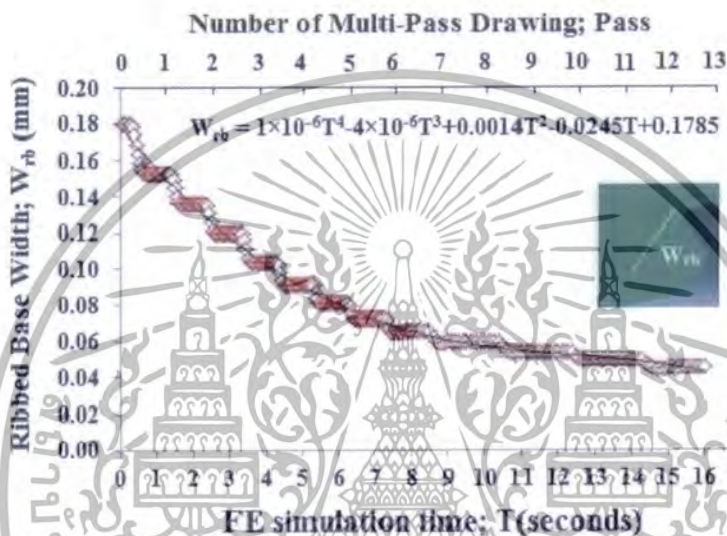
รูปที่ 9.4 อธิบายให้เห็นแนวโน้มที่เกิดขึ้นว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลของการทดลอง ถึงแม้ว่าจะไม่มีขนาดและมิติที่เหมือนกันทุกประการ ก็เนื่องจากตัวแปรต่างในการทดลองนั้นไม่สามารถกำหนดให้เท่ากันทุกประการกับการจำลองสถานการณ์ ดังนั้นผลลัพธ์ที่แสดงในรูปที่ 9.4 จึงเป็นแนวโน้มที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันในกระบวนการดึงขึ้นรูปแบบทอกลวง พฤติกรรมของท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในภายหลังจากการดึงขึ้นรูปนั้นขนาดของพื้นที่ภาคตัดของสันเกลียวบนผิวภายในของท่อนั้นเปลี่ยนแปลงหลังจากการเปลี่ยนรูป โดยการดึงขึ้นรูปผ่านตายจำนวน 12 เที้ยวแบบทอกลวง ผลลัพธ์ที่ได้แสดงพื้นที่ภาคตัดของสันเกลียวบนผิวภายในของท่อนั้นเปลี่ยนแปลงจากการดึงขึ้นรูปตัวสุดท้ายที่การดึงขึ้นรูปครั้งที่ 1 ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 11.05 เปอร์เซ็นต์ ไปจนถึงค่าสูงสุดที่การดึงขึ้นรูปครั้งที่ 12 ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 84.10 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ระหว่างผลการทดลองและการจำลองสถานการณ์มาเปรียบเทียบกัน ขนาดของมิติภาคตัดของสัน มุมฮิลล์ส์ของสันภายในท่อเกิดการเปลี่ยนแปลงภายหลังจากการดึงขึ้นรูปแบบทอกลวงที่ผ่านไปในแต่ละเที้ยว



รูปที่ 9.4 ความหนาผนังท่อและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาผนังท่อและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้นแสดงในรูปที่ 9.4 ความหนาของผนังท่อจะเพิ่มขึ้น เป็นเพราะว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ ISRCT นั้นลดลงขณะที่มีความเครียดอัดที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุที่ใช้ทำท่อ และเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกันกับความเค้นในแนวเส้นรอบวงของท่อด้วยเหมือนกัน ท้ายที่สุดวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงนั้นทำให้ความหนาของผนังท่อ ISRCT เพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งของการดึงขึ้นรูปผ่านตายในแต่ละเที่ยวและเวลาที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ในแต่ละครั้งของการดึงขึ้นรูปผ่านตายนั่นเอง

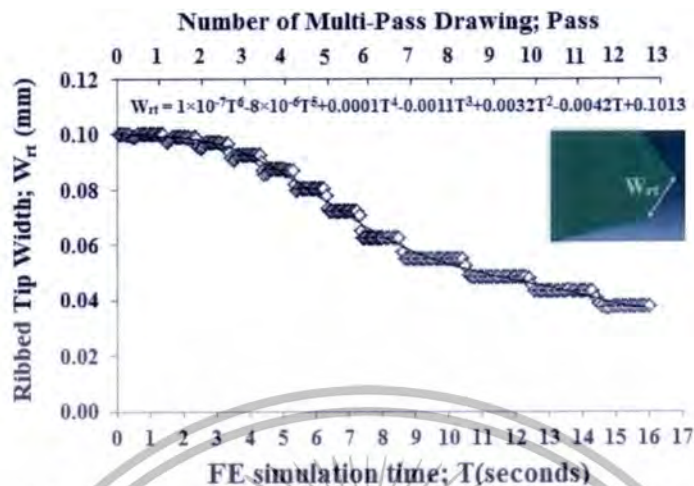


รูปที่ 9.5 ความกว้างที่ฐานสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

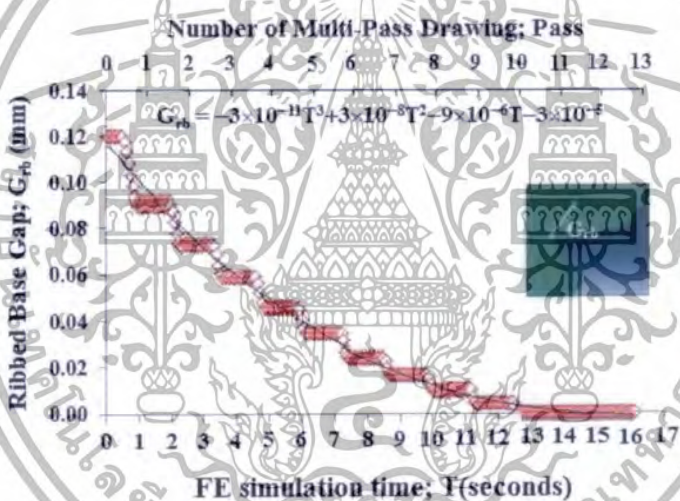
ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างที่ฐานสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้นแสดงในรูปที่ 9.5 ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองและการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ความกว้างที่ฐานสันและความกว้างที่ยอดสันนั้นจะลดลงเกิดขึ้นมาจากความเครียดอัดในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของ ISRCT และเนื่องจากไม่มีความดันภายในท่อที่ทำให้การต่อต้านการเปลี่ยนรูปของ ISRCT ด้วยสิ่งทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรขึ้น ความกว้างที่ฐานสันค่อยๆ ลดลงระหว่างกระบวนการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงแบบการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ ISRCT ลดลง 1.64 มิลลิเมตร ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 77.36 เปอร์เซ็นต์ ในการดึงขึ้นรูปผ่านตายในเที่ยวที่ 10 ผลปรากฏว่าความกว้างที่ฐานสันแนบชิดติดกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างที่ยอดสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้นแสดงในรูปที่ 9.6 เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ ISRCT ลดลง 1.47 มิลลิเมตร ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 80.97 เปอร์เซ็นต์ ในการดึงขึ้นรูปผ่านตายไปในเที่ยวที่ 11 ผลปรากฏว่าความกว้างที่ยอดสันแนบชิดติดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.6 ความกว้างที่ยอดสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

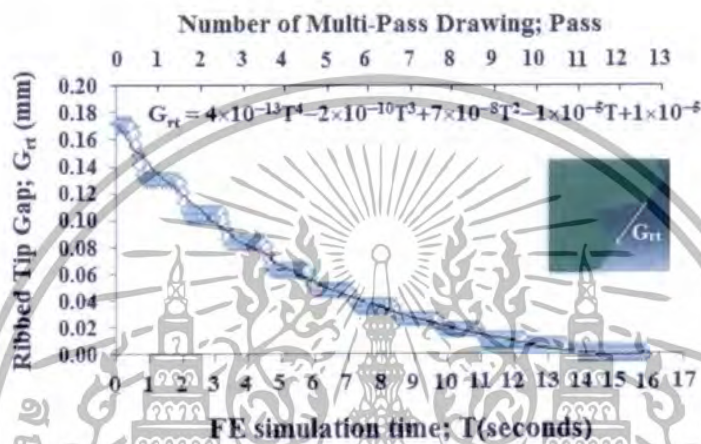


รูปที่ 9.7 ช่องว่างฐานสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างฐานสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้นแสดงในรูปที่ 9.7 ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองและการจำลองสถานการณ์ของ ISRCT ผลที่ได้แสดงการเสียรูปที่ไม่สามารถควบคุมได้และเป็นการยากที่จะสังเกตอีกทั้งยังไม่สามารถทำให้หมดข้อสงสัยที่เกี่ยวกับพฤติกรรมการเสียรูปของช่องว่างระหว่างสันภายในของ ISRCT และพื้นที่ของสันในระหว่างกระบวนการดึงขึ้นรูปแบบการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้งแบบทอกลง เพื่อที่จะตรวจสอบความเค้นและความเครียดนั้นการแพร่ของความเครียดประสิทธิผลนั้นคล้ายคลึงกันกับความเค้นประสิทธิผล ความเครียดสูงสุดจะกลืนเข้าด้วยกันตลอดทั่วทั้งขอบเขตระหว่างร่องสันและส่วนที่เป็นสันของ ISRCT ค่าความเครียดเฉลี่ยในส่วนที่เป็นร่องสันนั้นมีค่าสูงกว่าในพื้นที่ของสัน การเสียรูปที่ร่องสันนั้นจึงเข้มข้นมากขึ้นกว่าที่บริเวณส่วนที่เป็นพื้นที่ของสัน ร่องที่อยู่ตามแนวของสันจะเปลี่ยนแปลงมีลักษณะของร่องสันที่แคบลงในรูปแบบเป็นเชิงลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ ISRCT ลดลง 2.05 มิลลิเมตร ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 68.81 เปอร์เซ็นต์ ในการดึงขึ้นรูปผ่านตายไปในเที่ยวที่ 8 ปรากฏจุดเริ่มต้นของร่องที่กลางผิวด้านบนของยอดสันและรอยแยกที่ด้านข้างของแต่ละสัน ช่องว่างที่เกิดขึ้นนั้นจะบิดตัวพับที่ในบริเวณขอบสันยกเว้นในช่วงกลางของช่องว่างระหว่างสัน ขนาดมิติเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ขอบสันด้วย นอกจากนี้ช่องว่างที่บิดพับเกิดขึ้นพร้อมกันตลอดแนวเส้นรอบวงของเส้นฐานสัน ขนาดมิติของสันนั้นไม่ได้เท่ากันทั้งหมดและกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอตลอดแนวทั่วทั้งเส้นรอบวงของพื้นที่ภาคตัดของสันที่ติดกัน



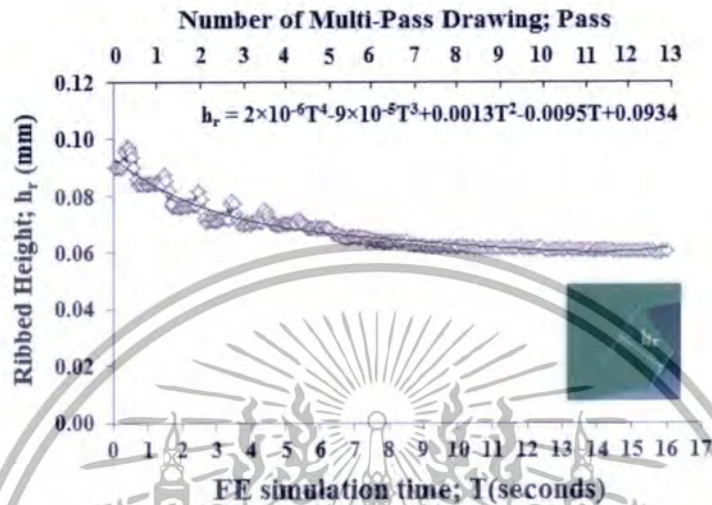
รูปที่ 9.8. ช่องว่างยอดสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างยอดสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้นแสดงในรูปที่ 9.8 คล้ายคลึงกับช่องว่างที่ฐานสัน ความเครียดบนช่องว่างยอดสันจะแผ่ขยายกลมกลืนเข้าด้วยกันตลอดทั่วทั้งขอบเขตระหว่างร่องสันและส่วนที่เป็นพื้นที่สันของ ISRCT ความเครียดเฉลี่ยและการเสียรูปในช่องว่างของสันนั้นจึงรุนแรงมากขึ้นกว่าที่บริเวณส่วนที่เป็นพื้นที่ของสัน ส่วนที่เป็นช่องว่างของสันเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยเหมือนกันในรูปแบบเป็นเชิงลบ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ ISRCT ลดลง 1.47 มิลลิเมตร ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 80.97 เปอร์เซ็นต์ ในการดึงขึ้นรูปผ่านตายไปในเที่ยวที่ 11 ช่องว่างยอดสันหายไปและไม่มีช่องว่างหลงเหลืออยู่อีกเลย เว้นเสียแต่ว่าสามารถนำ ISRCT ไปใช้ประโยชน์กับพื้นที่ผิวที่ขรุขระภายในท่อได้ ดังนั้นค่าดังกล่าวข้างต้นควรจะได้รับการออกแบบอย่างระมัดระวังในกระบวนการดึงขึ้นรูปแบบที่ตกลงที่ดึงผ่านตายในหลายๆเที่ยวสำหรับกรรมวิธีการผลิต ISRCT

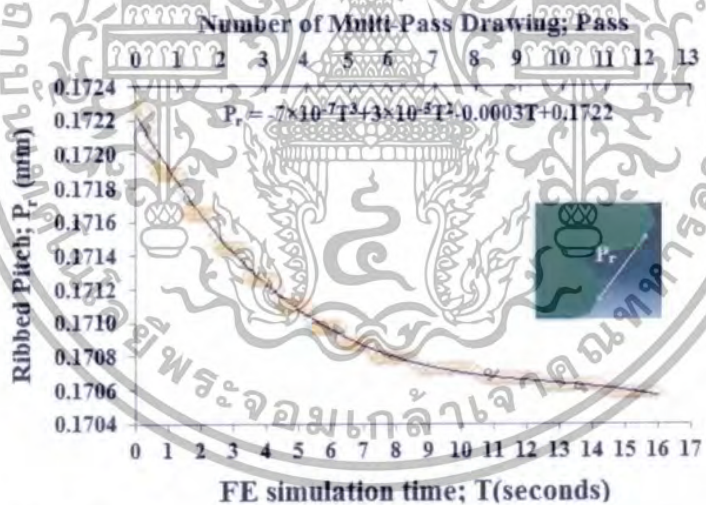
ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้นแสดงในรูปที่ 9.9 ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองและการจำลองสถานการณ์ของ ISRCT ผลที่ได้สำหรับการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวมนั้นแสดงการเสียรูปสูงมากในส่วนที่เป็นสัน เนื่องจากไม่มีความต้านทานจากแรงดันภายในช่วงที่มีการเสียรูปของ ISRCT ในช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติก (Elastic-plastic) ซึ่งเป็นวิธีการดึงขึ้นรูปแบบที่ตกลงที่ดึงผ่านตายในหลายๆเที่ยว ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลงความหนาของผนังเพิ่มขึ้นและภายในท่อไม่มีแรงดันต้านการเสียรูปจึงทำให้ส่วนที่เป็นช่องว่างที่ฐานสันเสียรูปมากกว่าที่บริเวณฐานสัน ดังนั้นทิศทางในแนวเส้นรอบวงตลอดแนวความสูงของพื้นที่สันนั้นถูกบีบอัดความหนาที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างที่ฐานสันจะเพิ่มขึ้นมากกว่าส่วนที่เป็นสัน อย่างไรก็ตามความสูงของสันนั้นจะลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาเดียวกัน



รูปที่ 9.9 ความสูงของสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

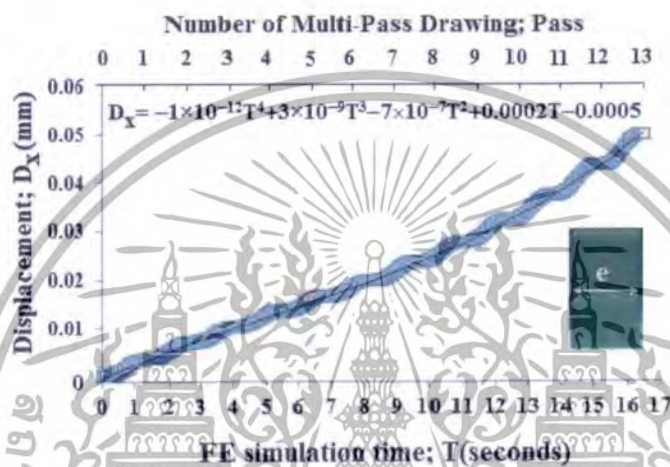


รูปที่ 9.10 ระยะพิตช์ของสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะพิตช์ของสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้นแสดงในรูปที่ 9.10 ระยะพิตช์สันนั้นลดลงอย่างต่อเนื่องโดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลงเพื่อให้สอดคล้องกับการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม โดยที่ความเค้นอัดในท่อตามแนวเส้นรอบวงของ ISRCT นั้นขึ้นอยู่กับจำนวนของการดึงขึ้นรูปผ่านตายในแต่ละเที่ยวที่เพิ่มจำนวนครั้งขึ้นและเวลาที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระหว่างการดำเนินการจำลองสถานการณ์นั้นได้ดำเนินการปรับแก้รูปทรงของช่องตายในแบบจำลองให้เหมาะสมกับการแสดงผลซึ่งในเวลาเดียวกันจุดต่างๆบน ISRCT ที่บริเวณของโหนดนั้นต้องทำการปรับแก้ให้เหมาะสมกับสถานการณ์จำลอง ขึ้นตอนจากจุดเริ่มต้นไปจนถึงสิ้นสุดการจำลองสถานการณ์มันไม่ได้อยู่ในเวลาเดียวกันในทุกๆโหนดตลอดขั้นตอนการดำเนินการค่าของระยะกระจัดและพิกัดที่ตำแหน่งปัจจุบันจะเป็นตัวแทนของการเคลื่อนไหวของทุกๆโหนดโดยไม่จำเป็นต้องวัดระยะกระจัดทุกโหนดใน ISRCT ก็ได้

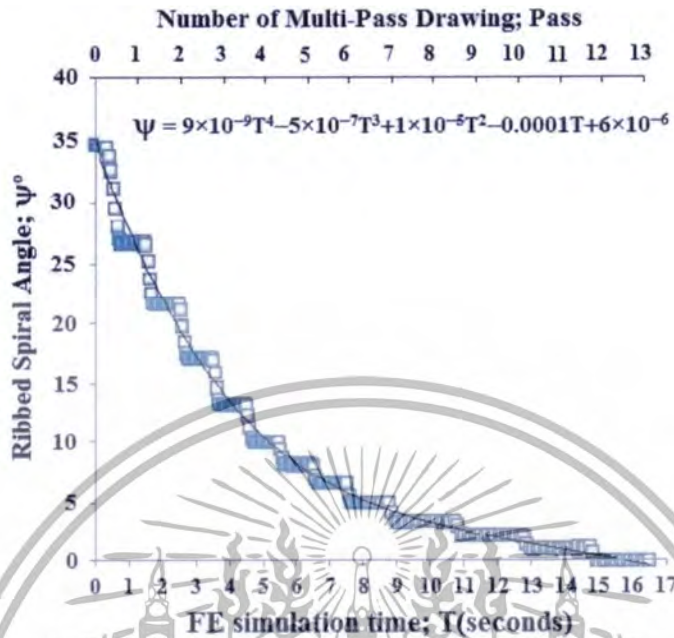


รูปที่ 9.11 ระยะกระจัดตามแนวแกนและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

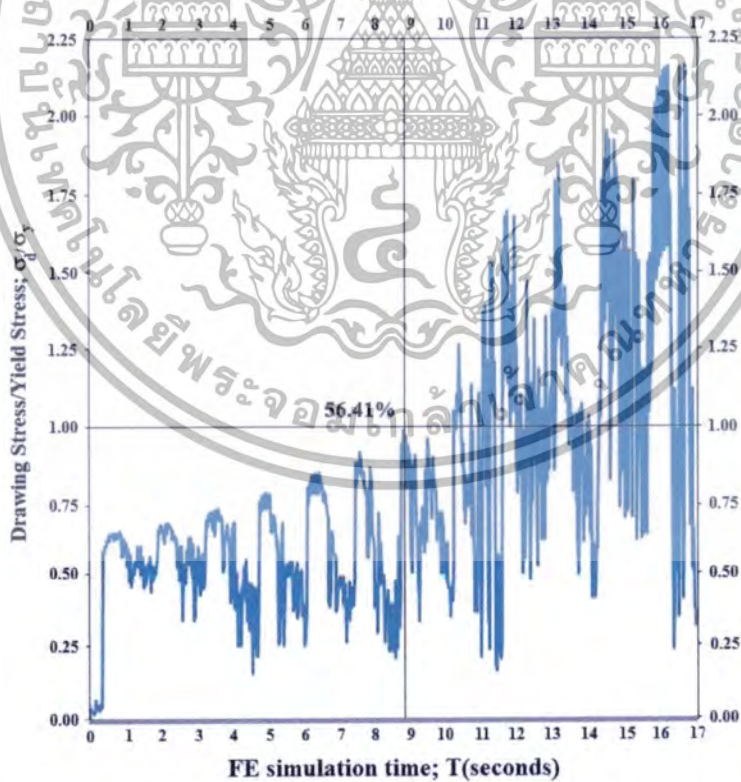
ความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระจัดตามแนวแกนและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้นแสดงในรูปที่ 9.11 ผลลัพธ์นี้ให้ความสำคัญของค่าระยะกระจัดที่เกิดจากการยึดตัวของ ISRCT ที่โหนดที่ระดับของวัตถุอิสระ (Degree of freedom) โดยที่ระยะกระจัดจะเพิ่มขึ้นในแต่ละเที่ยวตามจำนวนครั้งที่ ISRCT ผ่านตายในการขึ้นรูป เนื่องจากความเค้นดึงตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงที่โหนดในลักษณะของระยะกระจัดนั้นจะมีค่าเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตรในการดึงขึ้นรูปผ่านตาย 12 เที่ยว

ความสัมพันธ์ระหว่างมุมฮิลิกส์ของสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้นแสดงในรูปที่ 9.12 มุมฮิลิกส์ของสันจะลดลงหลังจากการดึงขึ้นรูปผ่านตายทั้งสิ้นครบ 12 เที่ยว ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวมของ ISRCT มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด ขนาดที่ลดลงนั้นเป็นเพราะว่าระยะกระจัดตามแนวแกนมีทิศทางเดียวกันกับมุมฮิลิกส์ของสันเกลียวด้วย อย่างไรก็ตามในสันเดี่ยวๆค่าการกระจายความเครียดจะมีความแตกต่างกันจากบริเวณฐานสันไปจนถึงบริเวณยอดสัน ความเครียดที่ขอบเขตของฐานสันและการเสียรูปนั้นมีค่ามากกว่าที่เกิดขึ้นในขอบเขตของบริเวณยอดสัน มุมฮิลิกส์ที่ฐานสันและที่ยอดสันทั้งคู่เปลี่ยนแปลงไปในเชิงลบ ผลลัพธ์ที่ได้จะคล้ายคลึงกันทั้งจากผลของการทดลองและผลจากการจำลองสถานการณ์ มุมฮิลิกส์ของสันจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและจะลู่เข้าจนมีค่าเป็นศูนย์ในการดึงขึ้นรูปผ่านตาย 12 เที่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.12 มุมฮิลิกซ์ของเส้นและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน



รูปที่ 9.13 อัตราส่วนความเค้นในการดึงขึ้นรูปต่อความเค้นครากและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มขึ้นของพื้นที่หน้าตัดรวมเกิดขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและขนาดมิติของสันท่อนั้นลดลง อัตราส่วนความเค้นในการดึงขึ้นรูปต่อความเค้นคราก ( $\sigma_d / \sigma_y$ ) เพิ่มขึ้น ความเค้นดึงขึ้นรูปเพิ่มขึ้นไปด้วยกับการเพิ่มขึ้นของ  $R$ , % และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความเค้นในการดึงขึ้นรูปต่อความเค้นคราก กรรมวิธีการผลิตของ ISRCT จะต้องพิจารณาและเปรียบเทียบกับค่าของ  $\sigma_d / \sigma_y$  ซึ่งเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการดึงขึ้นรูปแบบไม่ใช่แมนเดรล เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนั้นจะมีความถูกต้องเมื่อค่าของ  $\sigma_d / \sigma_y$  มีค่าน้อยกว่า 1 การเสียรูปของท่อหลังจากการดึงขึ้นรูปผ่านตายนั้นจะอยู่ในช่วงอีลาสติก (Elastic range) เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อนั้นกำหนดโดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของตายและจะมีความเที่ยงตรงและแม่นยำ แต่เมื่อค่าของ  $\sigma_d / \sigma_y$  มีค่ามากกว่า 1 การเสียรูปของท่อหลังจากการดึงขึ้นรูปผ่านตายนั้นจะอยู่ในช่วงพลาสติก (Plastic range) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อไม่สามารถกำหนดได้ด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของตายมันเกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างของท่อที่ถูกดึงยึดผ่านตายแล้วไม่สปริงกลับตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของตายนั่นเอง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นในการดึงขึ้นรูปต่อความเค้นครากและเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวมนั้นแสดงในรูปที่ 9.13 เพราะฉะนั้นควรกำหนดวิธีการผลิตท่อ ISRCT ที่ใช้วิธีการดึงขึ้นรูปแบบไม่ใช่แมนเดรลจากการจำลองการทำงานมีค่า  $R$ , % เท่ากับ 56.41 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในบทที่ 8 ซึ่งมีค่า  $R$ , % เท่ากับ 57 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นอัตราส่วนความเค้นในการดึงขึ้นรูปต่อความเค้นครากที่ไม่ใช่แมนเดรลจึงไม่ควรลดค่า  $R$ , % ลงโดยประมาณไม่มากกว่า 57 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 9.1 สรุปผลการเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของตัวแปรต่างๆที่ทำการศึกษา

	Number of Multi-Pass Drawing; Pass											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Von Mises stress</b>	O	O	O	O	O	O	O	O	Δ	Δ	Δ	Δ
<b>Wall thickness</b>	O	O	O	O	O	O	O	O	Δ	×	×	×
<b>Ribbed base width</b>	O	O	O	O	O	O	O	O	Δ	×	×	×
<b>Ribbed tip width</b>	O	O	O	O	O	O	O	O	Δ	×	×	×
<b>Ribbed base gap</b>	O	O	O	O	O	O	O	O	Δ	×	×	×
<b>Ribbed tip gap</b>	O	O	O	O	O	O	O	O	Δ	×	×	×
<b>Ribbed height</b>	O	O	O	O	O	O	O	O	Δ	×	×	×
<b>Ribbed pitch</b>	O	O	O	O	O	O	O	O	Δ	×	×	×
<b>Ribbed spiral angle</b>	O	O	O	O	O	O	O	O	Δ	×	×	×
<b>Axial displacement</b>	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O

(O Good, Δ Possible, × Impossible)

ตารางที่ 9.1 สรุปผลการเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของตัวแปรต่างๆที่ทำการศึกษาและแสดงให้เห็นว่าการผลิตท่อ ISRCT ให้ผลลัพธ์ของตรวจสอบออกมาว่าการดึงขึ้นรูปท่อ ISRCT ผ่านตายในครั้งที่ 8 ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 68.81 เปอร์เซ็นต์ เป็นครั้งและเปอร์เซ็นต์ที่ดีที่สุดที่จะสามารถทำการลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นที่หน้าตัดที่ทำให้พารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดีตามวัตถุประสงค์ของการผลิตท่อ ISRCT

### 9.3 บทสรุป

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขและแบบจำลองสถานการณ์ทั้งคู่นั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบของการตรวจสอบ ในงานวิจัยนี้กล่าวถึง การใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อตรวจสอบท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในขนาดเล็กพิเศษด้วยวิธีการดัดขึ้นรูปแบบท่อกว้าง ข้อมูลผลของการทดลองจะถูกเก็บนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ ซึ่งผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวพบว่า

[1] แรงแ้งที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปนั้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของสารหล่อลื่นที่มีอยู่ระหว่างการดัดขึ้นรูปของ ISRCT และตาย ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนี้จากการเปรียบเทียบกับผลการทดลองมีค่า 0.02

[2] วิธีการดัดขึ้นรูปแบบท่อกว้างนั้นเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นจากความเค้นในการดัดขึ้นรูป ประกอบด้วยความเค้นตามแนวแกน ความเค้นตามแนวรัศมีและความเค้นที่เกิดจากความดันภายใน ความเค้นที่เพิ่มขึ้นในผนังของ ISRCT นั้นจะกระจายตัวอย่างรวดเร็วลงไปสู่ขอบเขตพื้นผิวของสันที่อยู่ภายในท่อ ความเค้น von Mises ที่ทำการตรวจสอบหลังจากการดัดขึ้นรูปผ่านตายผ่านพื้นไปจำนวน 12 เทียนั้นแตกต่างกันสำหรับแต่ละตำแหน่งของ ISRCT ความเค้นนั้นจะมีค่าสูงที่สุดเกิดขึ้นบริเวณฐานสันปานกลางที่ผิวด้านนอกของผนังท่อและต่ำสุดที่กึ่งกลางความหนาของผนังท่อและที่ปลายยอดสันท่อตามลำดับ

[3] การขยายตัวของความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นในขณะที่เกิดการแพร่ของความเครียดเข้าสู่ขอบเขตของ ISRCT ในระหว่างการดัดขึ้นรูปแบบท่อกว้างซึ่ง ISRCT นั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นเป็นอย่างมาก ความเค้น von Mises ความหนาของผนังและระยะกระจัดตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สำหรับความกว้างที่ฐานสัน ความกว้างที่ยอดสัน ช่องว่างที่ฐานสัน ช่องว่างที่ยอดสัน ความสูงของสัน ระยะพิชต์ของสันและมุมอีลิกส์ของสันนั้นกลับลดลงหลังจากการดัดขึ้นรูปผ่านตายผ่านพื้นไปจำนวน 12 เทียน

[4] ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองและการจำลองสถานการณ์นั้นตรงกันในการดัดขึ้นรูปแบบท่อกว้าง ดังแสดงข้างต้น การวิเคราะห์ผลสรุปจากพารามิเตอร์ทั้ง 10 ค่าของการดัดขึ้นรูป ISRCT ขนาดเล็กพิเศษ ผลปรากฏว่าการลดพื้นที่หน้าตัดรวมที่เหมาะสมที่สุดจะต้องไม่เกิน 68.81 เปอร์เซ็นต์ เป็นเพราะว่าช่องว่างของสันจะหายไป และรอยแยกจะเกิดขึ้นที่ด้านข้างของสัน ผลลัพธ์ที่ได้สามารถใช้ในการพยากรณ์เส้นผ่านศูนย์กลางของ ISRCT เริ่มต้นก่อนการดัดขึ้นรูปแบบท่อกว้างเพื่อกำหนดขนาดท่อภายหลังการดัดขึ้นรูปที่ต้องการได้อย่างแม่นยำสำหรับกระบวนการผลิตท่อทองแดงที่มีสันขดอยู่ภายในขนาดเล็กพิเศษด้วยวิธีการดัดขึ้นรูปแบบท่อกว้าง

[5] ในการจำลองการทำงานอัตราส่วนความเค้นในการดัดขึ้นรูปต่อความเค้นครากและเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวมในการผลิตท่อ ISRCT ที่ใช้วิธีการดัดขึ้นรูปแบบไม่ใช้แมนเดรล จากการจำลองการทำงานค่าของ  $\sigma_r/\sigma_y$  จะต้องมีค่าน้อยกว่า 1 ที่ค่า  $R_y\%$  เท่ากับ 56.41 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในบทที่ 8 ซึ่งมีค่า  $R_y\%$  เท่ากับ 57 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นอัตราส่วนความเค้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการดิ่งขึ้นรูปต่อความเค้นครากที่ไม่ใช้แมนเดรลจึงไม่ควรลดค่า  $R, \%$  ลงโดยประมาณไม่มากกว่า 57 เปอร์เซ็นต์

จากบทที่ 6, 7, 8 และ 9 ที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าวิธีการดิ่งขึ้นรูปแบบท่อกลวง (Tube sinking) นั้นมีข้อบกพร่องในเรื่องของมิติของสันภายในท่อที่มารเปลี่ยนแปลงในทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็นความหนาของผนังท่อที่เพิ่มขึ้น ความกว้างฐานสัน ความกว้างยอดสัน ช่องว่างฐานสัน ช่องว่างยอดสัน ความสูงสัน ระยะพิชต์สันและมุมฮีติกส์ของสันนั้นลดลงอย่างมาก จึงมีแนวคิดที่ว่าถ้ามีความดันด้านการเสีรูปอยู่ภายในจะทำให้การเสีรูปที่กล่าวมาข้างต้นดีขึ้นและเหมาะที่จะนำมาใช้ในการดิ่งขึ้นรูปท่อที่มีสันอยู่ภายในขนาดเล็ก จึงขอแนะนำวิธีการผลิตท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในท่อขนาดเล็ก โดยการดิ่งขึ้นรูปด้วยแมนเดรลของไหลในบทที่ 10 ต่อไป



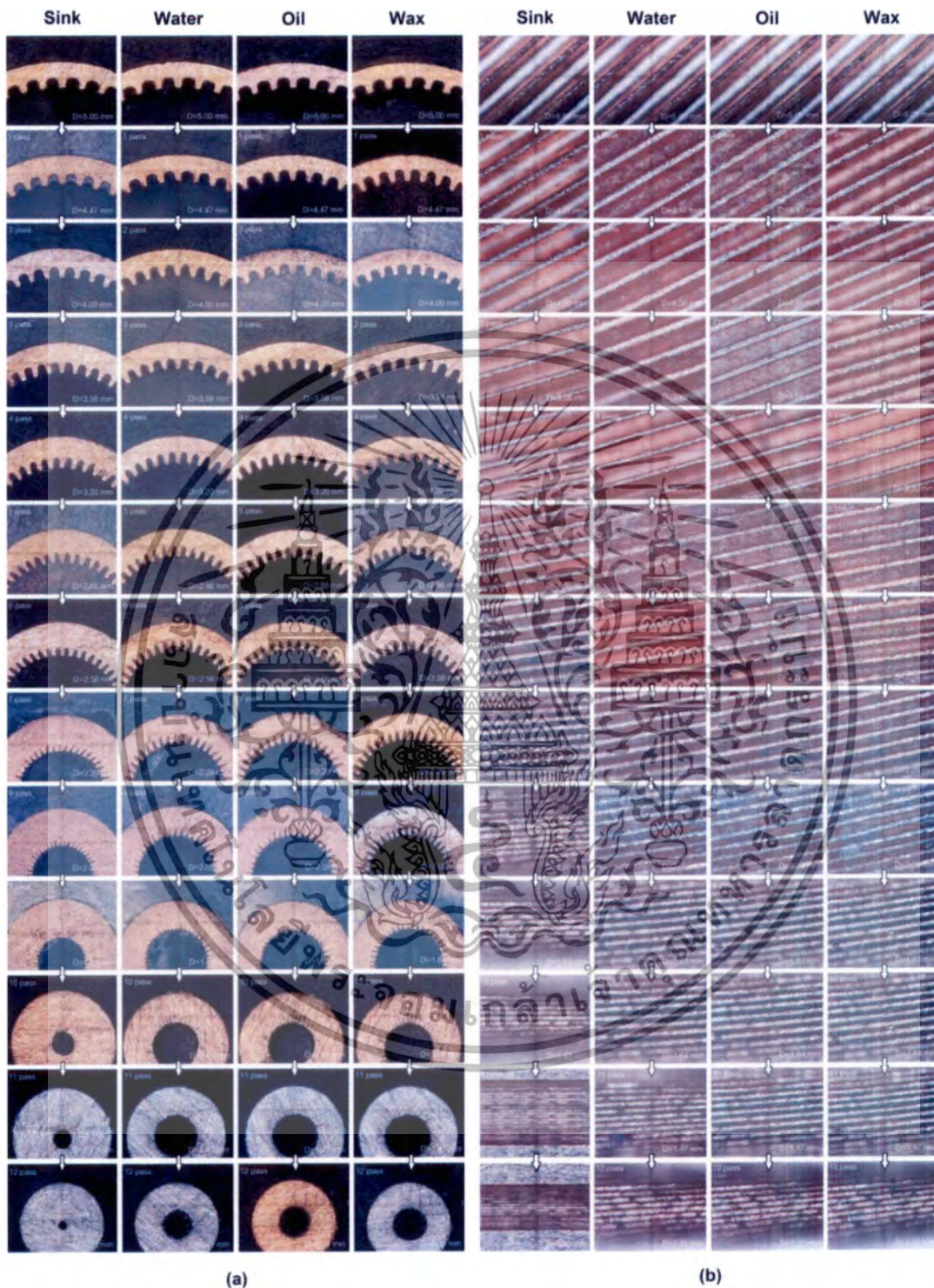
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 10

# การประดิษฐ์ท่อทองแดงมีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็ก โดยการดึงขึ้นรูปด้วยแมนเดรลของไหล

### 10.1 บทนำ

บทที่ 10 นี้นำเสนอพัฒนาการของการประดิษฐ์ท่อทองแดงขนาดเล็กพิเศษที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายใน (Inner spiral ribbed copper tube: ISRCT) เพื่อใช้เป็นท่อถ่ายเทความร้อนที่มีคุณภาพสูง ในปัจจุบันมีความต้องการท่อ ISRCT ดังกล่าวเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในวงการเครื่องใช้ไฟฟ้ามีสูงมาก เทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการผลิตจึงต้องสามารถทำการผลิตท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในของท่อเพื่อสนองความต้องการดังกล่าวโดย ISRCT ต้องมีลักษณะเด่นหลายๆประการ เช่น ท่อที่ผลิตได้ต้องมีขนาดเล็ก คุณภาพทางกายภาพสูง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดี และมีค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ โดยที่วิธีการผลิตที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนั้นเหมาะสำหรับการผลิตท่อที่มีขนาดใหญ่แต่ไม่เหมาะกับการประดิษฐ์ท่อที่มีขนาดเล็กและยาว เนื่องจากการทำแมนเดรลขนาดเล็กซึ่งมีสันเป็นเกลียวบนผิวให้มีคุณภาพดีสมบูรณ์แบบนั้นทำได้ยาก งานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำเสนอพฤติกรรมการลดขนาดของท่อด้วยการดึงขึ้นรูป ISRCT 4 วิธี คือ วิธีการดึงขึ้นรูปท่อโดยไม่ใช้แมนเดรล (Tube sinking) วิธีการดึงขึ้นรูปท่อโดยใช้น้ำ (Water) เป็นแมนเดรล วิธีการดึงขึ้นรูปท่อโดยใช้น้ำมัน (Oil) เป็นแมนเดรล และวิธีการดึงขึ้นรูปท่อโดยใช้ขี้ผึ้ง (Wax) เป็นแมนเดรล หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าตัวแปรที่สำคัญ 7 ค่า ได้แก่ อัตราส่วนความเค้นดึงขึ้นรูป (Drawing stress ratio) อัตราส่วนความหนาของผนังท่อ (Wall thickness ratio) อัตราส่วนความกว้างฐานสันท่อ (Ribbed base width ratio) อัตราส่วนความกว้างปลายสันท่อ (Ribbed tip width ratio) อัตราส่วนความสูงสันท่อ (Ribbed height ratio) อัตราส่วนระยะพิชชของสันท่อ (Ribbed pitch ratio) และอัตราส่วนมุมอีลิคส์ของสันท่อ (Ribbed spiral angle ratio) จากผลการวิจัยพบว่าวิธีการดึงขึ้นรูปท่อโดยไม่ใช้แมนเดรลนั้นไม่เหมาะสมกับการผลิตท่อทองแดงขนาดเล็กที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายในของท่อเนื่องจากอัตราส่วนความหนาของผนังท่อมีค่าสูงมาก นอกเหนือจากนั้นพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับกรณีใช้น้ำเป็นแมนเดรลนั้นมีความคล้ายคลึงกันกับกรณีใช้น้ำมันและขี้ผึ้งเป็นแมนเดรล แต่การนำแมนเดรลซึ่งเป็นน้ำออกจากท่อภายหลังจากการดึงขึ้นรูปนั้นทำได้ง่ายมากกว่าน้ำมันและขี้ผึ้ง ดังนั้นการดึงขึ้นรูปโดยใช้น้ำซึ่งเป็นของไหลทำหน้าที่เป็นแมนเดรลจึงเหมาะสมที่สุดในกระบวนการประดิษฐ์ท่อทองแดงขนาดเล็กที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายใน



รูปที่ 10.1 (a) ภาคตัดขวางของท่อและสันเกลียว: 5X (b) ภาคตัดตามยาวท่อและมุมฮีลิกส์: 10X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 10.2 ผลการทดลองและการอภิปรายผล

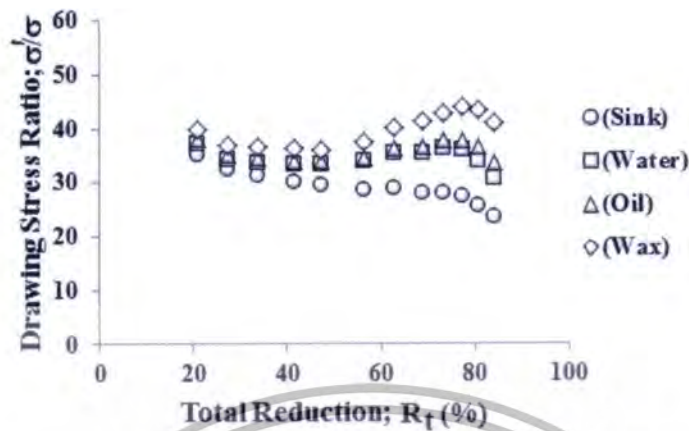
### 10.2.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างภาคตัด ISRCT

จากผลการทดลองดิ่งขึ้นรูปลดขนาดท่อลงจำนวน 12 เที้ยว โดยใช้ครึ่งมุมตาย 12 องศา พบว่าพฤติกรรมการเสียรูปของท่อและมุมอีลิคส์ของสันเกลียวในการดิ่งขึ้นรูปท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายใน (ISRCT) ทั้ง 4 วิธีนั้นแสดงในรูปที่ 4.11 ในบทที่ 4 จากรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าจะปรากฏรอยยุบเป็นลอนที่กึ่งกลางของสันเกลียวและร่องเกิดที่ขอบด้านข้างของสันเกลียว ในเวลาต่อมาสันเกลียวดังกล่าวจะบีบเข้าหากันเมื่อผ่านการดิ่งลดขนาดท่อให้เล็กลง ขนาดมิติของสันและการขยายตัวของมุมอีลิคส์ของสันเกลียวจะแตกต่างกันไป ขนาดหน้าตัดและมุมสันเกลียวด้านในจะมีการเปลี่ยนแปลงหลังการดิ่งขึ้นรูปที่ผ่านพ้นไปในแต่ละเที้ยว ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นนั้นแสดงให้เห็นว่าความหนาของผนังจะเพิ่มขึ้นแต่จะไม่เท่ากันในแต่ละวิธีในการดิ่งขึ้นรูปทั้ง 4 วิธี ความสูงของสัน ความกว้างของฐานสัน ความกว้างของยอดสัน ระยะพิตช์ของสันเกลียวและมุมอีลิคส์ของสันเกลียว จะลดลงอย่างต่อเนื่องหลังการดิ่งขึ้นรูปท่อในแต่ละเที้ยว ซึ่งการลดลงดังกล่าวยังแตกต่างกันไปตามวิธีการดิ่งขึ้นรูปท่ออีกด้วย การกระจายความเครียดจะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดจากฐานสันไปจนถึงยอดสันเกลียว ความเครียดของสันจะเพิ่มมากขึ้น การเสียรูปที่บริเวณฐานสันเกลียวจะสูงกว่าที่ยอดสันเกลียว มุมอีลิคส์ของสันเกลียวจะลดลงอย่างต่อเนื่องหลังการดิ่งขึ้นรูปท่อในแต่ละเที้ยว วิธีการดิ่งขึ้นรูปท่อโดยไม่ใช้แมนเดรลจะมีการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ดังกล่าวสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีดิ่งขึ้นรูปท่อแบบใช้ของไหลและซีพิ้งเป็นแมนเดรลตามลำดับสำหรับการเปลี่ยนแปลงภาคตัดขวางของท่อและสันเกลียวและภาคตัดตามยาวท่อและมุมอีลิคส์แสดงดังรูปที่ 10.1

### 10.2.2 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความเค้นดิ่งขึ้นรูป

ในแต่ละวิธีการดิ่งขึ้นรูปท่อนั้นอัตราส่วนความเค้นดิ่งขึ้นรูปเกิดขึ้นจากความเค้นตามแนวแกน ความเค้นในแนวรัศมี และความเค้นจากความดันภายในท่อ ความเค้นตามแนวแกนนั้นเป็นความเค้นดิ่งซึ่งเกิดขึ้นบนพื้นที่ของผนังท่อและสันเกลียว ความเค้นในแนวรัศมีนั้นเป็นความเค้นอัดที่เกิดขึ้นในโซนของผนังท่อ ส่วนความเค้นที่เกิดจากความดันภายในนั้นเป็นความเค้นอัด พบว่าวิธีการดิ่งขึ้นรูปท่อแบบไม่ใช้แมนเดรลนั้นอัตราส่วนความเค้นดิ่งขึ้นรูปจะมีค่าต่ำที่สุด

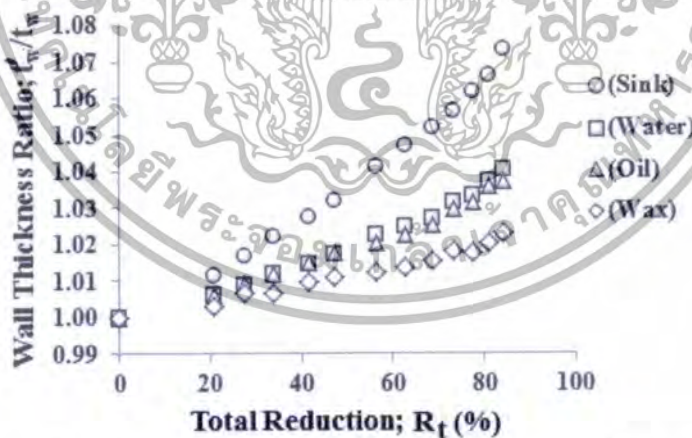
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นดิ่งขึ้นรูปและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวมเป็นดังแสดงในรูปที่ 10.2 ในขณะที่กรณีใช้ของไหล (น้ำและน้ำมัน) เป็นแมนเดรลจะมีอัตราส่วนความเค้นดิ่งขึ้นรูปสูงชันคล้ายคลึงกัน และกรณีใช้ซีพิ้งเป็นแมนเดรลนั้นจะมีอัตราส่วนความเค้นดิ่งขึ้นรูปสูงที่สุด



รูปที่ 10.2 อัตราส่วนความเค้นดึงขึ้นรูปและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม

### 10.2.3 การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการดึงขึ้นรูป ISRCT 4 วิธี

กรณีการดึงขึ้นรูปท่อแบบไม่ใช้แมนเดรล อัตราส่วนความหนาของผนังเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการดึงขึ้นรูปในแต่ละเที่ยว ทั้งนี้เพราะว่าขณะที่เส้นรอบวงศูนย์กลางภายนอกดลงนั้นท่อได้รับความเครียดอัดเป็นอย่างมากตามแนวทิศทางของเส้นรอบวงจึงส่งผลให้ผนังท่อนหนาขึ้น ดังนั้นวิธีการดึงขึ้นรูปแบบไม่ใช้แมนเดรลจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้สำหรับดึงขึ้นรูปท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในเนื่องจากความหนาของผนังเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากจนเป็นสาเหตุให้เกิดการขัดขวางการไหลของของไหลภายในท่อขนาดเล็กได้ ดังแสดงในรูปที่ 10.3



รูปที่ 10.3 อัตราส่วนความหนาผนังท่อและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม

สำหรับกรณีการดึงขึ้นรูปท่อแบบใช้ขี้ผึ้งเป็นแมนเดรลนั้นอัตราส่วนความหนาของผนังท่อไม่เปลี่ยนแปลงมากนักหลังจากการดึงขึ้นรูป ผลที่ได้ออกมาค่อนข้างดี แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ก็

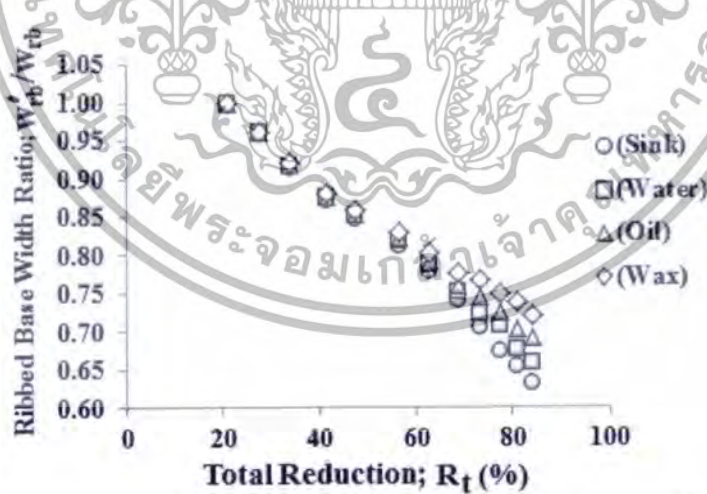
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความยุ่งยากสำหรับการนำซีฟิ่งออกจากท่อภายหลังการดัดขึ้นรูปจึงเป็นการยากที่จะนำมาใช้ในกระบวนการผลิตท่อที่มีความยาวมากๆ

ในกรณีการดัดขึ้นรูปแบบใช้ของไหลเป็นแมนเดรลนั้นภายในท่อถูกบรรจุด้วยน้ำหรือน้ำมันอยู่เต็มบริเวณปลายท่อปิดสนิท อัตราส่วนความหนาของผนังท่อหลังจากการดัดขึ้นรูปเพิ่มขึ้นไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของท่อเริ่มต้นแม้หลังจากผ่านการดัดขึ้นรูปซ้ำหลายๆเที่ยว สิ่งที่สำคัญ คือ การเอาของไหลออกจากท่อภายหลังการดัดขึ้นรูปด้วยวิธีการตัดปลายทั้งสองข้างของท่อออก วิธีนี้สามารถทำได้ง่ายกว่าในกรณีของการดัดขึ้นรูปแบบใช้ซีฟิ่งเป็นแมนเดรล

ผลการวิจัยข้างต้นชี้ให้เห็นว่าวิธีการดัดขึ้นรูปแบบใช้ของไหลเป็นแมนเดรลนั้นสามารถนำมาใช้ได้เป็นอย่างดีกับการดัดขึ้นรูปท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายใน การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความหนาของผนังท่อเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาได้ว่าวิธีดังกล่าวเป็นวิธีการประดิษฐ์ท่อสำหรับถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพอย่างยิ่ง

การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความกว้างของฐานสันเกลียวดังแสดงในรูปที่ 10.4 อัตราส่วนความกว้างของฐานสันนั้นมีแนวโน้มที่จะลดลงในการดัดขึ้นรูปท่อในทุกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้น เนื่องมาจากความเค้นอัดจะเกิดขึ้นตามแนวเส้นรอบวงของท่อและจะเกิดขึ้นมากกว่าวิธีการดัดขึ้นรูปแบบไม่ใช้แมนเดรล ทั้งนี้เป็นเพราะว่าไม่มีความต้านทานที่เกิดจากความดันภายในท่อซึ่งแตกต่างจากในกรณีใช้ซีฟิ่งและของไหลเป็นแมนเดรลซึ่งมีความดันภายใน ซีฟิ่งและของไหลที่อยู่ภายในผนังของท่อจึงทำหน้าที่ให้ความดันแก่ผนังด้านในของท่อหรือเป็นแมนเดรลนั่นเอง ซึ่งความดันดังกล่าวมีทิศทางในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวของผนังท่อที่สัมผัสกับของไหลและซีฟิ่ง ผลของการเปลี่ยนแปลงจะมีค่าน้อยที่สุดในกรณีการดัดขึ้นรูปแบบใช้ซีฟิ่งเป็นแมนเดรล ตามมาด้วยวิธีการดัดขึ้นรูปแบบใช้ของไหล (น้ำและน้ำมัน) เป็นแมนเดรล

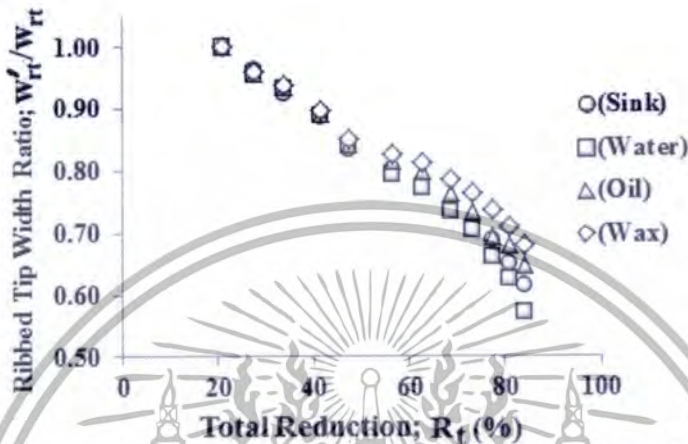


รูปที่ 10.4 อัตราส่วนความกว้างของฐานสันเกลียวและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม

สำหรับอัตราส่วนความกว้างของยอดสัน วิธีการดัดขึ้นรูปแบบไม่ใช้แมนเดรลนั้นความกว้างของยอดสันเกลียวจะมากกว่าในกรณีการดัดขึ้นรูปแบบใช้ของไหลและซีฟิ่งเป็นแมนเดรล ทั้งนี้เพราะว่าอิทธิพลของ

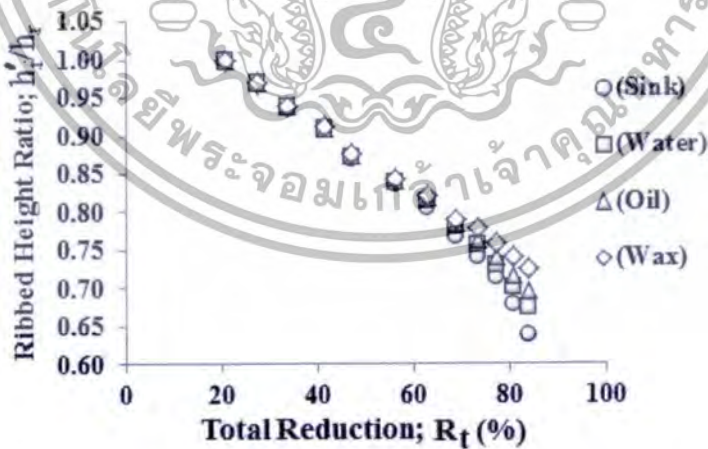
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันภายในท่อมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปด้วยเช่นกัน ผลของการเปลี่ยนแปลงจะมีค่าน้อยที่สุด ในกรณีการดึงขึ้นรูปแบบใช้ซีฟิ่งเป็นแมนเดรล ตามมาด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบใช้ของไหล (น้ำและน้ำมัน) เป็นแมนเดรล ดังแสดงในรูปที่ 10.5



รูปที่ 10.5 อัตราส่วนความกว้างของยอดสันเกลียวและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม

ผลกระทบอัตราส่วนความสูงของสันเกลียวมีความคล้ายคลึงกับอัตราส่วนความกว้างของฐานสันและอัตราส่วนความกว้างของยอดสันสำหรับกรณีการดึงขึ้นรูปแบบใช้ของไหลและซีฟิ่งเป็นแมนเดรล โดยความดันภายในที่ต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดีกว่าวิธีการดึงขึ้นรูปแบบไม่ใช้แมนเดรล ดังแสดงในรูปที่ 10.6



รูปที่ 10.6 อัตราส่วนความสูงของสันเกลียวและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระยะพิตช์ของสันสำหรับกรณีการดิ่งขึ้นรูปแบบไม่ใช่แมนเดรลนั้นมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเนื่องจากความหนาของผนังได้เพิ่มขึ้น อัตราส่วนระยะพิตช์ของสันเกลียวลดลงสำหรับการดิ่งขึ้นรูปแบบใช้ของไหลและซีเมนต์เป็นแมนเดรลซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังน้อยกว่า ความต้านทานที่เกิดจากความดันภายในท่อทำให้การเปลี่ยนแปลงของระยะพิตช์ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 10.7



รูปที่ 10.7 อัตราส่วนระยะพิตช์ของสันเกลียวและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม

รูปที่ 10.8 อัตราส่วนมุมอีลิคส์ของสันเกลียวและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม

อัตราส่วนมุมอีลิคส์ของสันเกลียวภายในท่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นหลังจากการดิ่งขึ้นรูปตามเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัด ขณะที่ท่อเริ่มต้นมีมุมอีลิคส์ของสันเกลียวภายใน 38 องศาหลังจากที่ผ่านการขึ้นรูปผ่านตายในแต่ละเที่ยวทำให้มุมอีลิคส์ของสันเกลียวภายในลดลง พบว่ามุมอีลิคส์ของสันเกลียวภายในจากกรณีการดิ่งขึ้นรูปแบบไม่ใช่แมนเดรลลดลงมากกว่าการเปลี่ยนแปลงมุมอีลิคส์ของสัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกลียวภายในที่เกิดจากการดัดขึ้นรูปแบบใช้ของไหลและซีฟิ่งเป็นแมนเดรลเมื่อเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ขนาดใกล้เคียงกัน วิธีการดัดขึ้นรูปแบบไม่ใช่แมนเดรลนั้นการเปลี่ยนรูปร่างของท่อจะเป็นไปอย่างอิสระโดยไม่มีการต้านทานจากภายในท่อซึ่งจะแตกต่างจากการดัดขึ้นรูปแบบใช้ของไหลและซีฟิ่งเป็นแมนเดรลเพราะว่ามีของไหลและซีฟิ่งบรรจุอยู่ในท่อซึ่งเป็นระบบปิด ดังนั้นของไหลและซีฟิ่งที่มีอยู่ภายในจึงทำหน้าที่ต้านทานการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว มุมฮิลิกส์ของสันเกลียวภายในมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าวิธีการดัดขึ้นรูปแบบไม่ใช่แมนเดรล ดังแสดงในรูปที่ 10.8 กรณีการดัดขึ้นรูปแบบไม่ใช่แมนเดรลนั้นมุมฮิลิกส์ของสันเกลียวภายในจะเป็นศูนย์เมื่อผ่านการดัดขึ้นรูปมากกว่า 9 เที้ยวขึ้นไปและเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดัดขึ้นรูปแบบใช้ของไหลและซีฟิ่งเป็นแมนเดรลมุม ฮิลิกส์ของสันเกลียวภายในจะเป็นศูนย์เมื่อผ่านการดัดขึ้นรูปมากกว่า 12 เที้ยวขึ้นไป

### 10.3 บทสรุป

จากผลการวิจัยการพัฒนาการประดิษฐ์ท่อขนาดเล็กที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายใน (ISRCT) เพื่อใช้เป็นท่อที่มีคุณภาพการถ่ายเทความร้อนสูงโดยการดัดขึ้นรูปแบบไม่ใช่แมนเดรล และการดัดขึ้นรูปแบบใช้ของไหลและซีฟิ่งเป็นแมนเดรล พบว่า

[1] การดัดขึ้นรูปแบบไม่ใช่แมนเดรลนั้นไม่เหมาะสมสำหรับการประดิษฐ์ท่อขนาดเล็กเพื่อใช้ในการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากความหนาของผนังท่อหลังจากการดัดขึ้นรูปเพิ่มขึ้นอย่างมากในขณะที่มุมฮิลิกส์ของสันเกลียวภายในท่อกลับลดลงอย่างมาก ดังนั้นการผลิตท่อที่มีมุมฮิลิกส์ของสันเกลียวภายในลักษณะนี้จึงเป็นไปได้

[2] การดัดขึ้นรูปแบบใช้ซีฟิ่งเป็นแมนเดรลเป็นวิธีการที่ดีในการผลิตท่อขนาดเล็กเพื่อใช้ในการถ่ายเทความร้อน อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังไม่เหมาะสมสำหรับการประดิษฐ์ท่อที่มีความยาวมาก ๆ เนื่องจากมีความยุ่งยากในการนำซีฟิ่งออกจากท่อภายหลังการดัดขึ้นรูป

[3] การดัดขึ้นรูปแบบใช้ของไหลเป็นแมนเดรลนั้นมีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการประดิษฐ์ท่อขนาดเล็กเพื่อการถ่ายเทความร้อนที่มีความยาวมาก ๆ เนื่องจากสามารถระบายของไหลเหล่านั้นออกได้ง่ายดายกว่าภายหลังการดัดขึ้นรูป

[4] ความหนาของผนังท่อหลังการดัดขึ้นรูปสำหรับกรณีการดัดขึ้นรูปแบบใช้ของไหลเป็นแมนเดรลนั้นแตกต่างกันเล็กน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของของไหลที่บรรจุอยู่ในท่อ แต่จะไม่แตกต่างไปจากท่อเริ่มต้นมากนัก นอกจากนี้ลักษณะหน้าตัดขวางของท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายในนั้นลดลงเมื่อดัดขึ้นรูปผ่านไปแต่ละครั้ง แต่จะน้อยกว่าการดัดขึ้นรูปแบบไม่ใช่แมนเดรล

[5] การดัดขึ้นรูปแบบใช้ของไหลประเภทน้ำเป็นแมนเดรลจึงเหมาะสมที่สุดสำหรับการประดิษฐ์ผลิตภัณฑ์ท่อประเภทนี้เพราะว่าสามารถระบายน้ำออกได้ง่ายจากพื้นผิวท่อภายในได้มากกว่าน้ำมัน

จากบทสรุปท้ายบทที่ 10 จะเห็นได้ว่าการดัดขึ้นรูปท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็กโดยการดัดขึ้นรูปด้วยแมนเดรลของไหลนั้นมีผลตอบสนองที่ดีมากในการทดลองดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งการดัดขึ้นรูปแบบใช้ของไหลประเภทน้ำเป็นแมนเดรลนั้นเหมาะสมที่สุดในด้านการเสียรูปที่ลดลงและการนำแมนเดรลที่เป็นน้ำออกจากท่อภายหลังการดัดขึ้นรูป ทั้งนี้การเสียรูปที่น้อยลงเป็นผลมาจากความดันภายในของท่อที่เพิ่มขึ้นแต่ไม่ทราบว่าคุณสมบัติที่มีอิทธิพลต่อการเสียรูปนั้นมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่าใด จึงเป็นเหตุผลให้สนใจที่จะทำการศึกษาต่อในเรื่องของอิทธิพลของความดันภายในที่มีต่อการดิ่งขึ้นรูปท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็กในบทที่ 11 ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 11

# การศึกษาอิทธิพลของความดันภายในที่มีต่อการดึงขึ้นรูปท่อทองแดงมีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็ก

### 11.1 บทนำ

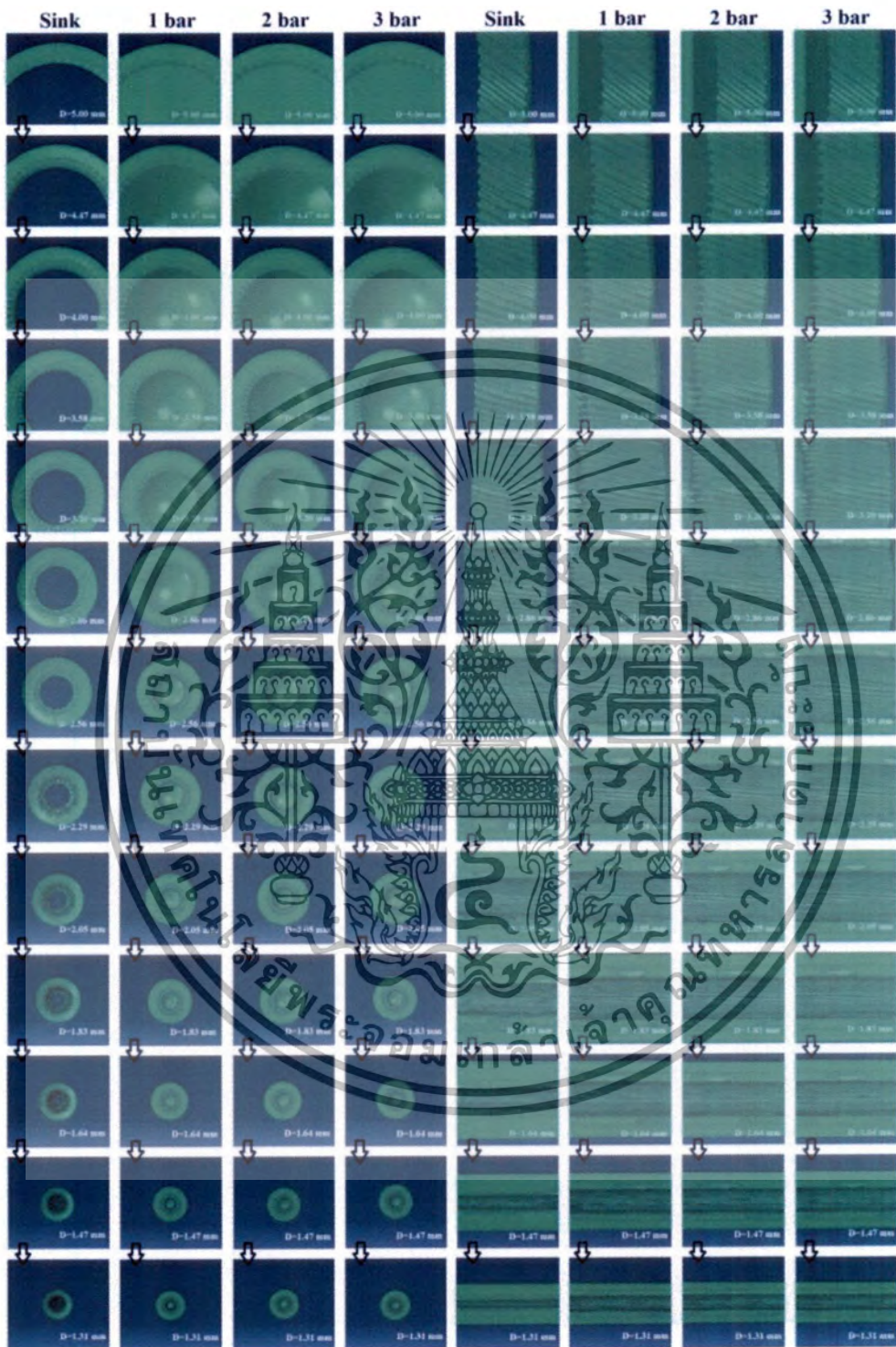
บทที่ 11 นี้นำเสนอผลกระทบของความดันภายในท่อทองแดงมีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายใน (Inner spiral ribbed copper tube: ISRCT) ขนาดเล็กด้วยการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของ ISRCT ที่เกิดขึ้นโดยใช้แบบจำลองสถานการณ์ในระบบสามมิติด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการสร้างแบบจำลองขึ้นมานั้นออกแบบมาเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกับผลของการทดลองการดึงขึ้นรูปโดยใช้แมนเดรลของไหลในบทที่ 10 ที่ผ่านมา หลังจากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ที่สอดคล้องกับผลของการทดลองมาทำการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นโดยพารามิเตอร์ต่างๆในกระบวนการจำลองสถานการณ์ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของภาคตัดโปรไฟล์ (Cross-section profiles) ของสันและมุมอีลิคส์สันของ ISRCT โดยการดึงขึ้นรูปผ่านตายจำนวน 12 เที้ยว จากนั้นทำการปรับแต่งค่าความดันภายในท่อ 4 วิธีการ ได้แก่ วิธีที่ 1 ใช้การดึงขึ้นรูป ISRCT โดยไม่มีความดันภายในท่อหรือวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง (Tube sinking) วิธีที่ 2 การดึงขึ้นรูป ISRCT โดยกำหนดค่าความดันภายในท่อ 1 bar วิธีที่ 3 การดึงขึ้นรูป ISRCT โดยกำหนดค่าความดันภายในท่อ 2 bar และวิธีที่ 4 การดึงขึ้นรูป ISRCT โดยกำหนดค่าความดันภายในท่อ 3 bar โดยวิธีที่ 2, 3 และ 4 กำหนดให้การดึงขึ้นรูปเป็นระบบปิดและมีความดันภายในคงที่ การสร้างแบบจำลองและเทคนิคการจำลองสถานการณ์นั้นดำเนินการโดยใช้โปรแกรม ABAQUS เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวโปรไฟล์ของ ISRCT โดยใช้วิธีการดึงขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีดังกล่าวข้างต้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ผลที่ได้จากวิธีการจำลอง FEM นั้นใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของ ISRCT หลังผ่านการดึงขึ้นรูปจำนวน 10 พารามิเตอร์ได้แก่ ความเค้น von Mises ตลอดภาคตัดของ ISRCT ความหนาของผนังท่อ ความกว้างฐานสันท่อ ความกว้างยอดสันท่อ ช่องว่างฐานสันท่อ ช่องว่างยอดสัน ความสูงสันท่อ ระยะพิทซ์ของสันท่อ ระยะกระจัดตามแนวแกนและมุมอีลิคส์ของสันท่อ ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการเทียบเคียงกับการดึงขึ้นรูปโดยใช้ของไหล (Fluid mandrel) อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์ในเชิงลึกในส่วนของความเค้นที่เกิดขึ้นตลอดจนพารามิเตอร์อื่นๆที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีการทดลอง ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตที่มีคุณภาพ อีกทั้งยังเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อนักวิจัยและวิศวกรสำหรับการออกแบบและปรับปรุงท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในขนาดเล็กที่มีคุณภาพและประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 11.2 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

การประยุกต์ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ใน ABAQUS ในการจำลองกระบวนการดึงขึ้นรูป ISRCT นั้น พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ได้อธิบายไว้ในบทที่ 5 การเสีรูรูปของสันและช่องว่างระหว่างการดึงขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีการนั้นวิเคราะห์ผลด้วยการเทียบเคียงกับการเสีรูรูปที่ได้จากวิธีการทดลอง ปรากฏว่าการเสีรูรูปของสันและมุมเอียงของสันด้วยการใช้ของไหลเป็นแมนเดรลนั้นมีค่าใกล้เคียงกับการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง (0 bar) ในช่วงเริ่มต้นเนื่องจากในช่วงแรกของการดึงขึ้นรูปไม่มีผลกระทบกับความดันในท่อ แต่หลังจากการดึงขึ้นรูปผ่านไปเี่ยวที่ 3 เป็นต้นไปการเสีรูรูปของสันและมุมเอียงเริ่มมีแนวโน้มใกล้เคียงกับวิธีการจำลองสถานการณ์แบบวิธีที่ 2 (1 bar) หลังจากนั้นการเสีรูรูปจะเข้าใกล้วิธีที่ 3 (2 bar) ตั้งแต่เี่ยวที่ 6 และวิธีที่ 4 (3 bar) ในเี่ยวที่ 10 ตามลำดับ วิธีการจำลองสถานการณ์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ความเค้นในการดึงขึ้นรูป von Mises แจกแจงโดยกระบวนการดึงขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีดังกล่าว ซอฟต์แวร์ ABAQUS เป็นระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ พารามิเตอร์ของโปรไฟล์ที่แตกต่างกันนั้นได้รับการประเมินเป็นตัวเลข การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม (Rt%) นั้นเพิ่มขึ้นทุกครั้งในแต่ละเี่ยวของขึ้นทดสอบเป็นไปอย่างต่อเนื่อง การดึงผ่านตายในเี่ยวที่ 1 การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 11.05 เปอร์เซ็นต์ การดึงผ่านตายในเี่ยวที่ 2 การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 27.38 เปอร์เซ็นต์ การดึงผ่านตายในเี่ยวที่ 3, 4,... เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงการดึงผ่านตายในเี่ยวที่ 12 การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 84.10 เปอร์เซ็นต์ในเี่ยวสุดท้าย เปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวมนั้นเพิ่มขึ้น และภาคตัดโปรไฟล์ ISRCT นั้นถูกนำมาพิจารณาหลังจากการดึงขึ้นรูปผ่านตายจำนวน 12 เี่ยว การลดลงของขนาดพื้นที่หน้าตัดรวมดังกล่าวใช้ครั้งมุดตาย 12 องศา พฤติกรรมการเสีรูรูปของ ISRCT ด้วยวิธีการขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีแสดงในรูปที่ 11.1 ในขณะที่เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลงมุมอีลิกส์ของสันและระยะพิชต์ลดลงด้วยขณะที่ผิวภายในไม่สามารถกำหนดได้ การเพิ่มขึ้นของผนังท่อ และระยะกระจัดตามแนวแกน ตรงกันข้ามกับ ความกว้างฐานสันท่อ ความกว้างยอดสันท่อ ช่องว่างฐานสัน ช่องว่างยอดสัน ความสูงสันท่อ ระยะพิชต์ของสันท่อ และมุมอีลิกส์ของสันท่อหลังจากการดึงขึ้นรูปผ่านตายในแต่ละเี่ยวนั้นลดลงอย่างต่อเนื่องแต่มีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากความดันภายในของท่อแต่ละวิธีการนั้นแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของภาคตัดตามแนวขวาง: 5X และตามแนวแกน: 10 X ของ ISRCT ผลจาก 3D FEM ระหว่างการดึงขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายตัวของความเครียดที่เกิดขึ้นนั้นไม่เท่ากันจากฐานสันไปจนถึงยอดสัน ยอดสันนั้นจะแนบชิดติดกันต่อเมื่อความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าสูงมากและมากที่สุดเกิดที่บริเวณขอบด้านข้างของฐานสันจากการจำลองสถานการณ์ทั้ง 4 วิธีการ การเสียรูปที่ฐานสันนั้นมากกว่าที่ยอดสัน ขณะที่มุมอีลิกส์ของสันนั้นจะลดลงหลังจากการดิ่งขึ้นรูปผ่านตายในแต่ละเที่ยว กระบวนการดิ่งขึ้นรูปแบบไม่มีความดันต้านอยู่ภายในแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าที่สูงมากและจะลดลงตามระดับของความดันต้านภายในท่อจากความดันต่ำไปถึงความดันสูงตามลำดับ ภาคตัดมิติของ ISRCT จากผลการจำลองการทำงานแบบ 3D FEM นั้นแสดงในรูปที่ 11.1

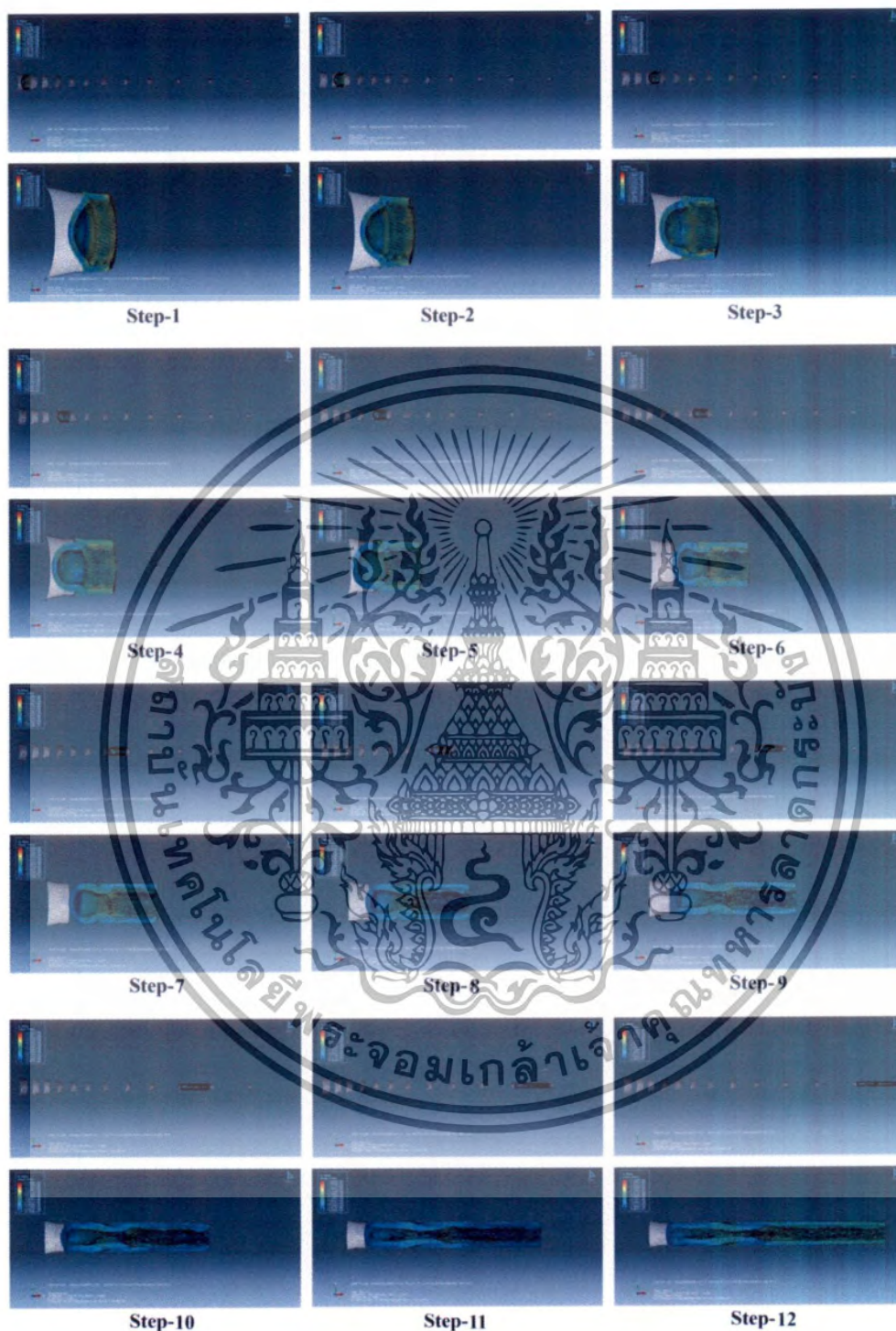
เส้นโครงร่างตาข่ายของโหนดสามารถวัดค่าการกระจายความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้น ในกรณีที่เป็นเอลิเมนต์ของตายจะแสดงผลเป็นสีเทาซึ่งไม่มีผลกระทบของความเค้นมากกระทำเป็นเพราะว่าตายนั้นถูกกำหนดว่ามีผิวเป็นวัตถุแข็ง ส่วนผลที่เกิดกับ ISRCT หลังกระบวนการดิ่งขึ้นรูปผ่านตายตั้งแต่เที่ยวที่ 1 ถึง 12 โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS จะทำการประเมินผลค่าความเค้น von Mises และแสดงผลค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากการดิ่งขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีการได้แก่ วิธีที่ 1 ใช้การดิ่งขึ้นรูป ISRCT โดยไม่มีความดันภายในท่อหรือวิธีการดิ่งขึ้นรูปแบบทอกลง (Tube sinking) วิธีที่ 2 การดิ่งขึ้นรูป ISRCT โดยกำหนดค่าความดันภายในท่อ 1 bar วิธีที่ 3 การดิ่งขึ้นรูป ISRCT โดยกำหนดค่าความดันภายในท่อ 2 bar และวิธีที่ 4 การดิ่งขึ้นรูป ISRCT โดยกำหนดค่าความดันภายในท่อ 3 bar โดยวิธีที่ 2, 3 และ 4 กำหนดให้การดิ่งขึ้นรูปเป็นระบบปิดและมีความดันภายในคงที่ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตั้งแต่เที่ยวที่ 1 ถึงเที่ยวที่ 12 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 11.2, 11.3, 11.4 และ 11.5 ตามลำดับ

ผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ FEM สนามความเค้น von Mises นั้นแสดงให้เห็นว่าการดิ่งขึ้นรูปในหลายๆเที่ยวจนถึงเที่ยวที่ 12 ในกรณีของกระบวนการดิ่งขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีการข้างต้น รูปแบบของความเค้น von Mises (von Mises stress หรือ equivalent stress) สำหรับจุดในตำแหน่งของภาคตัดโปรไฟล์ของ ISRCT เพื่อตรวจสอบผลของการจำลองความเค้น von Mises ที่ได้รับจากการจำลองสถานการณ์ที่จะสามารถระบุค่าความเค้นที่เกิดขึ้น ณ จุดใดๆ อาทิเช่น จุดที่ 1 (โหนด 512), จุดที่ 2 (โหนด 5973), จุดที่ 3 (โหนด 5974), จุดที่ 4 (โหนด 5975), จุดที่ 5 (โหนด 5976), จุดที่ 6 (โหนด 390), จุดที่ 7 (โหนด 33757), จุดที่ 8 (โหนด 33885), จุดที่ 9 (โหนด 33875), จุดที่ 10 (โหนด 33686), จุดที่ 11 (โหนด 33872), จุดที่ 12 (โหนด 27043), จุดที่ 13 (โหนด 26621), จุดที่ 14 (โหนด 27044), จุดที่ 15 (โหนด 27045), จุดที่ 16 (โหนด 26622), จุดที่ 17 (โหนด 27046), จุดที่ 18 (โหนด 26623), จุดที่ 19 (โหนด 27047), จุดที่ 20 (โหนด 27048) และจุดที่ 21 (โหนด 26624) ดังแสดงโหนดต่างๆบนภาคตัดมิติของ ISRCT ในรูปที่ 11.6



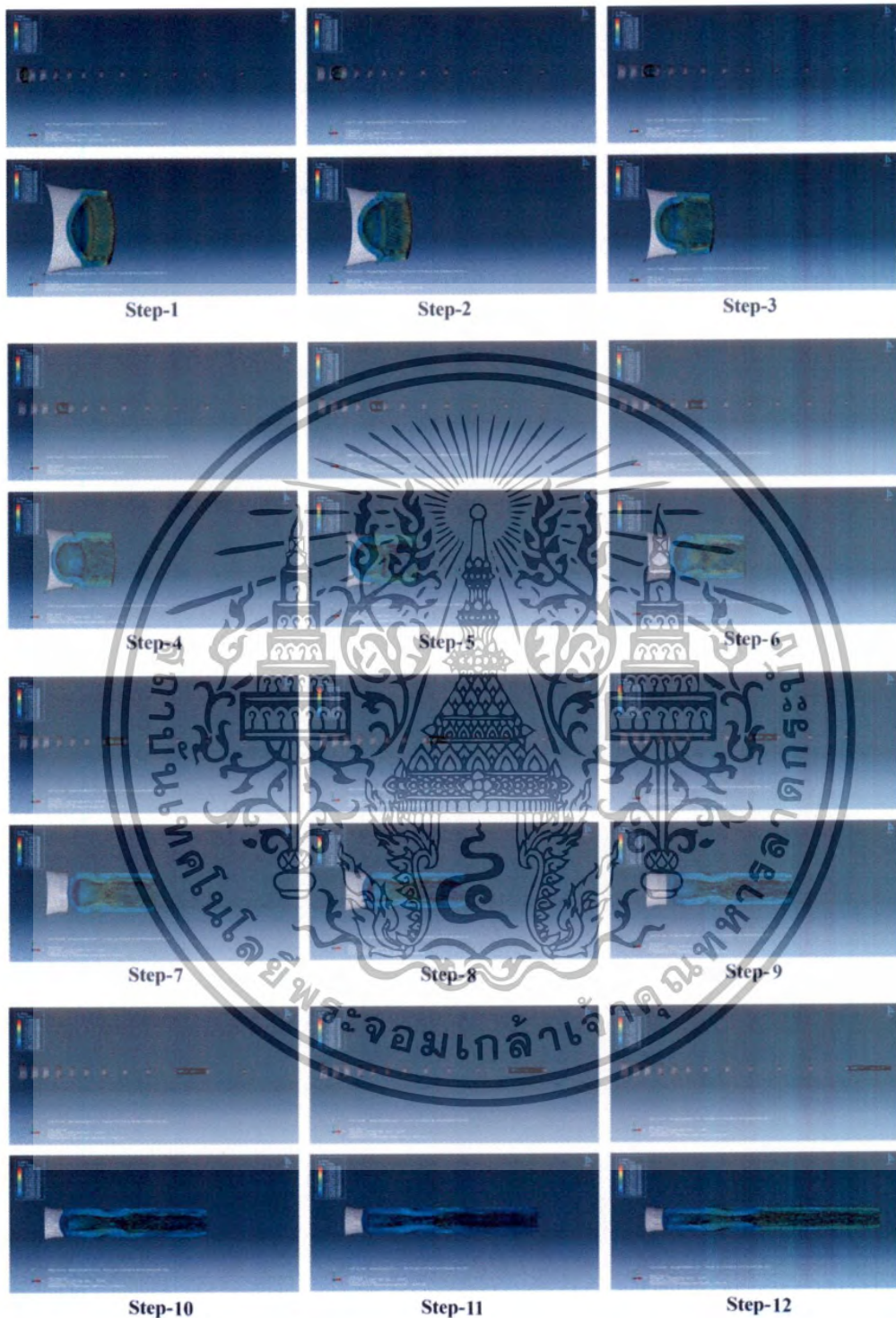
รูปที่ 11.2 การกระจายความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นจากการดิ่งขึ้นรูปแบบไม่มีความดันภายในด้วย  
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตั้งแต่เที่ยวที่ 1 ถึงเที่ยวที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11.3 การกระจายความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นจากการดิ่งขึ้นรูปแบบมีความดันภายใน 1 bar ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตั้งแต่เที่ยวที่ 1 ถึงเที่ยวที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



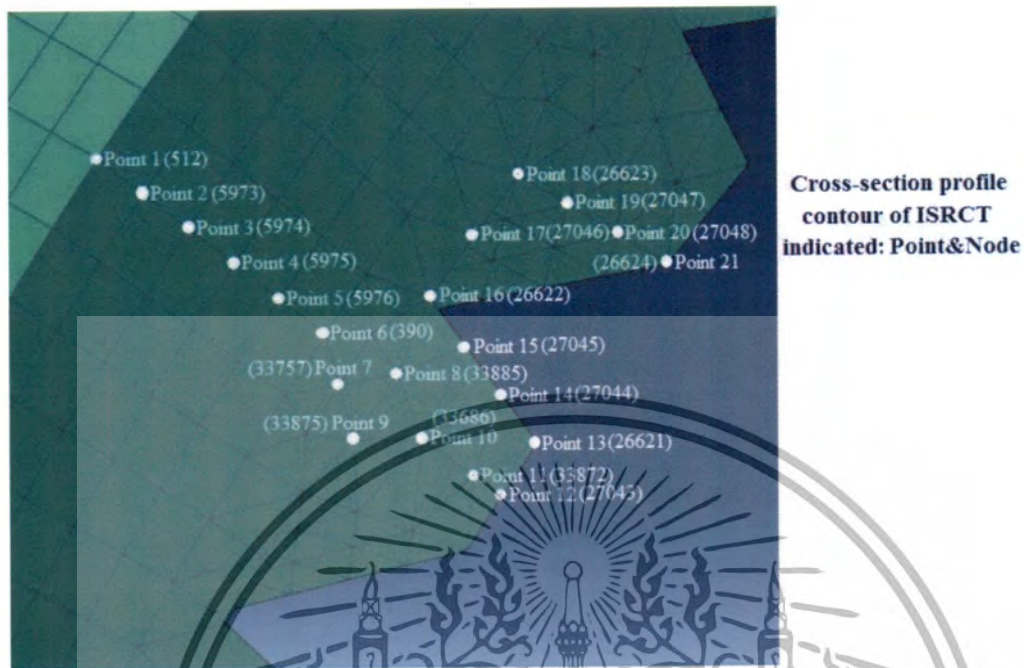
รูปที่ 11.4 การกระจายความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นจากการดิ่งขึ้นรูปแบบมีความดันภายใน 2 bar ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตั้งแต่เที่ยวที่ 1 ถึงเที่ยวที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

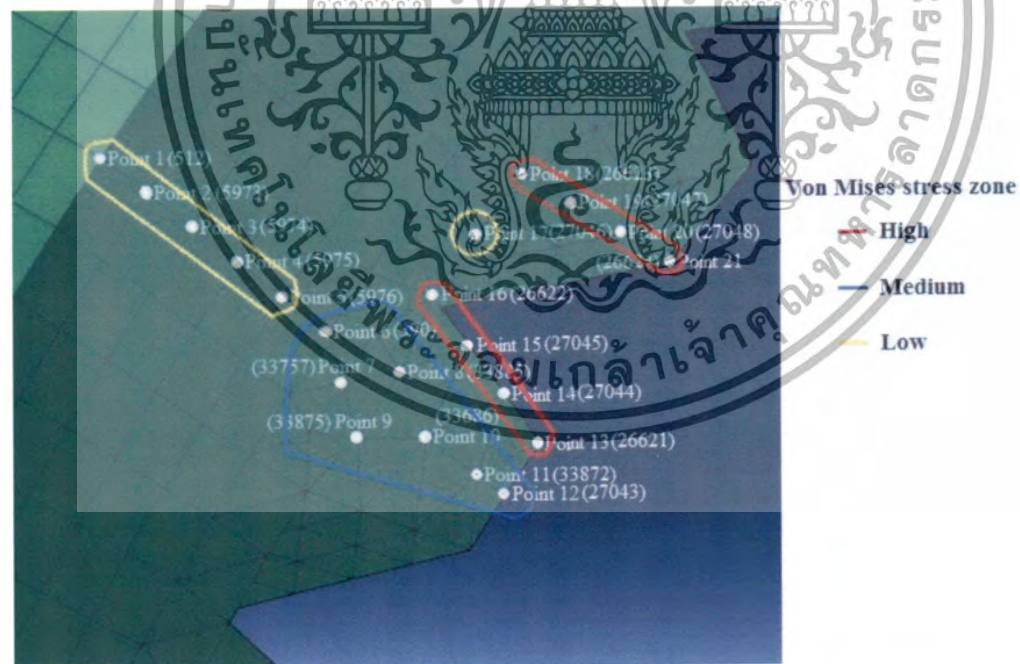


รูปที่ 11.5 การกระจายความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นจากการดิ่งขึ้นรูปแบบมีความดันภายใน 3 bar ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตั้งแต่เที่ยวที่ 1 ถึงเที่ยวที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

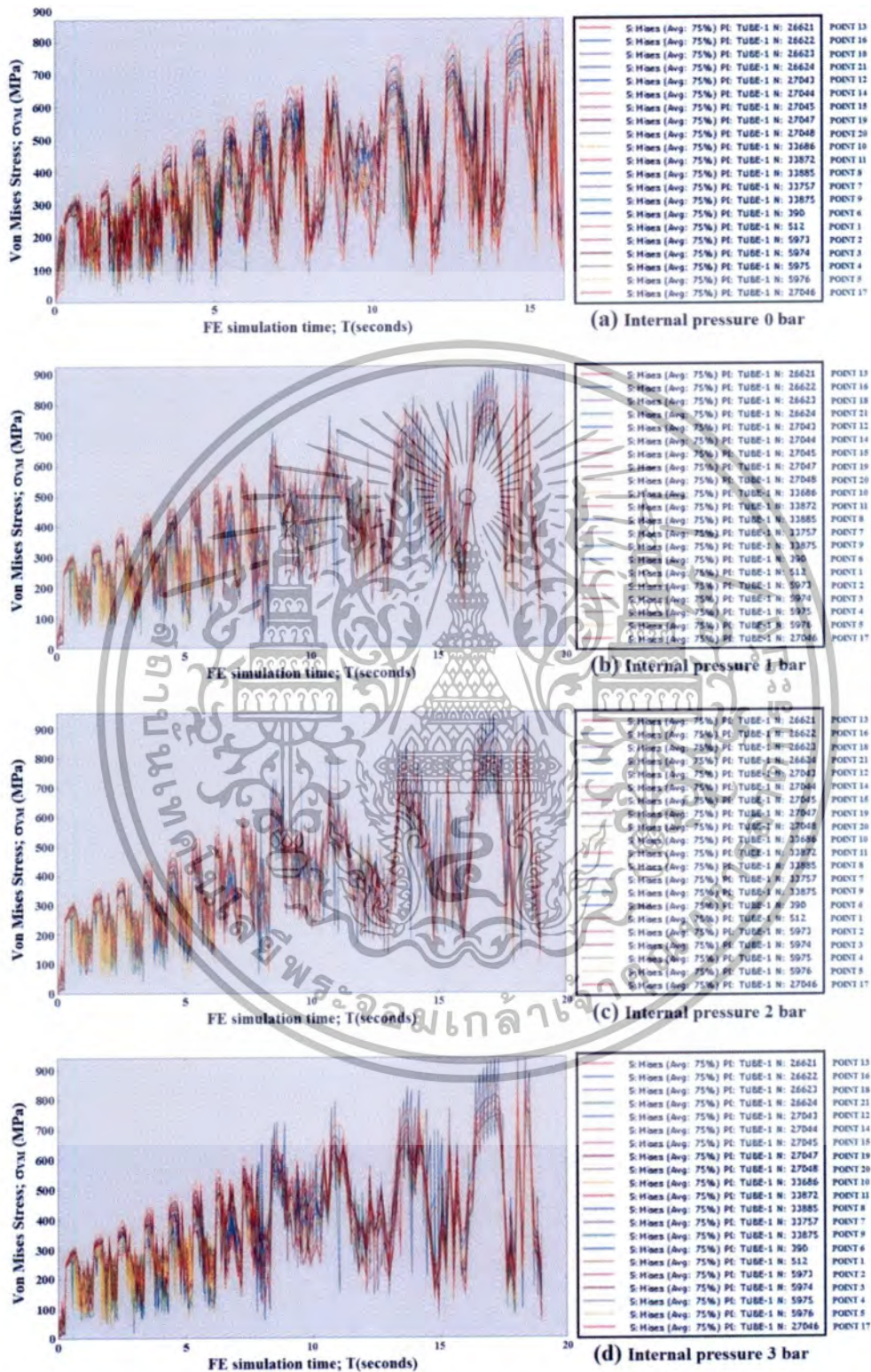


รูปที่ 11.6 โหนดต่างๆบนภาคตัดมิติของ ISRCT



รูปที่ 11.7 Von Mises stress zone บนโหนดต่างๆบนภาคตัดมิติของ ISRCT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



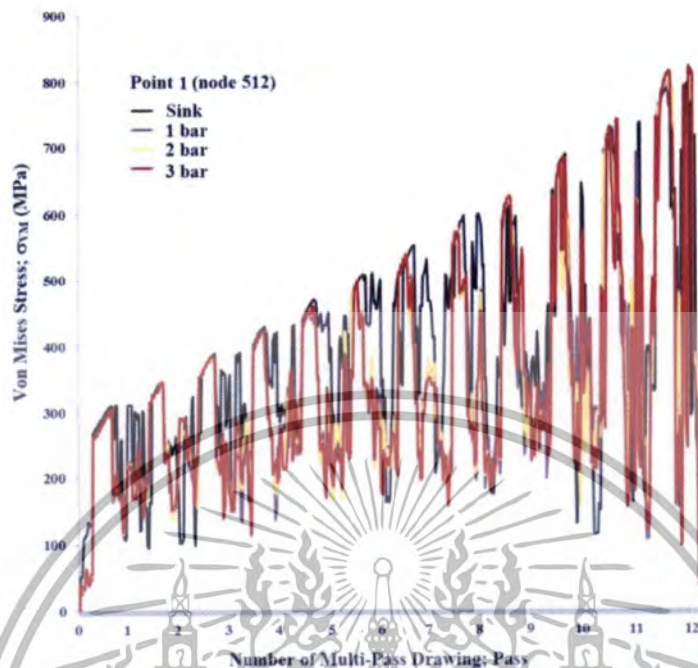
รูปที่ 11.8 Von Mises Stress บนภาคตัดมิติของ ISRCT ที่ความดันภายใน 0, 1, 2 และ 3 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

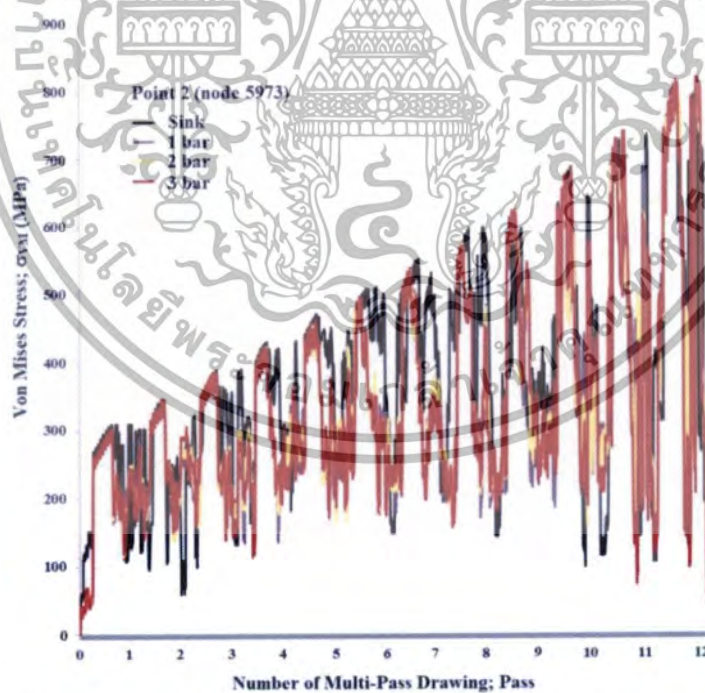
การวัดความเปลี่ยนแปลงความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นจากการดึงขึ้นรูปผ่านตายทั้ง 4 วิธีการ ที่มีการผ่านกระบวนการดึงขึ้นรูปผ่านตายมากกว่า 1 ครั้ง (Multi-pass) และมีมีการกระทำซ้ำที่เกิดขึ้นนั้น ความเค้น von Mises จะเพิ่มขึ้นในทุกครั้งที่ ISRCT ผ่านตายในทุกๆเที่ยว ในการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวข้างต้นทั้ง 4 วิธีการ มีแนวโน้มที่เป็นไปในแนวทางเดียวกันโดยความเค้น von Mises นั้นจะมีค่าสูงสุดในโซนที่อยู่บริเวณขอบด้านข้างของสันที่จุดที่ 13, 14, 15, 16, 18, 19, 20 และ 21 ตามลำดับ โซนที่มีค่าความเค้น von Mises ในระดับปานกลางนั้นอยู่บริเวณกึ่งกลางแนวแกนของสันจนถึงบริเวณยอดสันที่จุดที่ 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12 ตามลำดับ ส่วนโซนที่มีระดับความเค้น von Mises ต่ำสุดอยู่ที่จุดที่ 1, 2, 3, 4, 5 เริ่มจากที่ผิวด้านนอกของผนังท่อเข้าไปภายในผนังจนถึงหนึ่งในสามของความหนาผนัง และที่จุดที่เป็นกึ่งกลางของระยะห่างที่ฐานสันภายในผนังของ ISRCT ด้านใน โซนทั้งสามช่วงดังกล่าวแสดงในรูปที่ 11.7

ถ้าพิจารณาเจาะลึกลงไปในแต่ละโหนดเรียงลำดับตามระดับของความเค้นทั้ง 21 จุดตามภาคตัดมิติของ ISRCT จากการดึงขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีการ เรียงลำดับจากความเค้น von Mises สูงสุดไปจนถึงต่ำสุด ความเค้น von Mises สูงที่สุดเกิดที่จุดที่ 13 (โหนด 26621) จากนั้นเรียงลำดับจากสูงไปต่ำเริ่มที่จุดที่ 16 (โหนด 26622) จุดที่ 18 (โหนด 26623) จุดที่ 21 (โหนด 26624) จุดที่ 12 (โหนด 27043) จุดที่ 14 (โหนด 27044) จุดที่ 15 (โหนด 27045) จุดที่ 19 (โหนด 27047) จุดที่ 20 (โหนด 27048) จุดที่ 10 (โหนด 33686) จุดที่ 11 (โหนด 33872) จุดที่ 8 (โหนด 33885) จุดที่ 7 (โหนด 33757) จุดที่ 9 (โหนด 33875) จุดที่ 6 (โหนด 390) จุดที่ 1 (โหนด 512) จุดที่ 2 (โหนด 5973) จุดที่ 3 (โหนด 5974) จุดที่ 4 (โหนด 5975) จุดที่ 5 (โหนด 5976) และต่ำที่สุดที่จุดที่ 17 (โหนด 27046) ตามลำดับ ค่า Von Mises Stress บนภาคตัดมิติของ ISRCT จากการดึงขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีการนั้นแสดงในรูปที่ 11.8

กระบวนการดึงขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีการนั้นเป็นกระบวนการที่เกิดจากความเค้นใน 3 รูปแบบ ประกอบด้วยความเค้นดึงตามแนวแกน (Tensile stress) ความเค้นอัดตามแนวรัศมี (Compressive stress) และความเค้นวงแหวน (Hoop stress) หรือความเค้นในแนวเส้นรอบวง (Circumferential Tensile Stress) ความเค้นตามแนวแกนนั้นเป็นความเค้นดึงซึ่งเกือบจะเหมือนกับค่าที่เกิดขึ้นในพื้นที่ของผนังท่อและกระจายอย่างรวดเร็วเข้าสู่พื้นที่ของสันภายในท่อ ความเค้นอัดตามแนวรัศมีนั้นเป็นความเค้นอัดในขอบเขตที่เป็นผนังของท่อแต่จะเปลี่ยนแปลงเป็นความเค้นดึงในพื้นที่ของสัน ความเค้นวงแหวนหรือความเค้นในแนวเส้นรอบวงนั้นเป็นความเค้นอัดที่เกิดจากความดันภายใน ความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณขอบรอบฐานสันเป็นเพราะว่าความเค้นทั้งสามรูปแบบ (ความเค้นตามแนวแกน ความเค้นตามแนวรัศมี และความเค้นตามแนวเส้นรอบวง) เป็นความเค้นผสมรวมกันสูงสุดที่จุดดังกล่าว

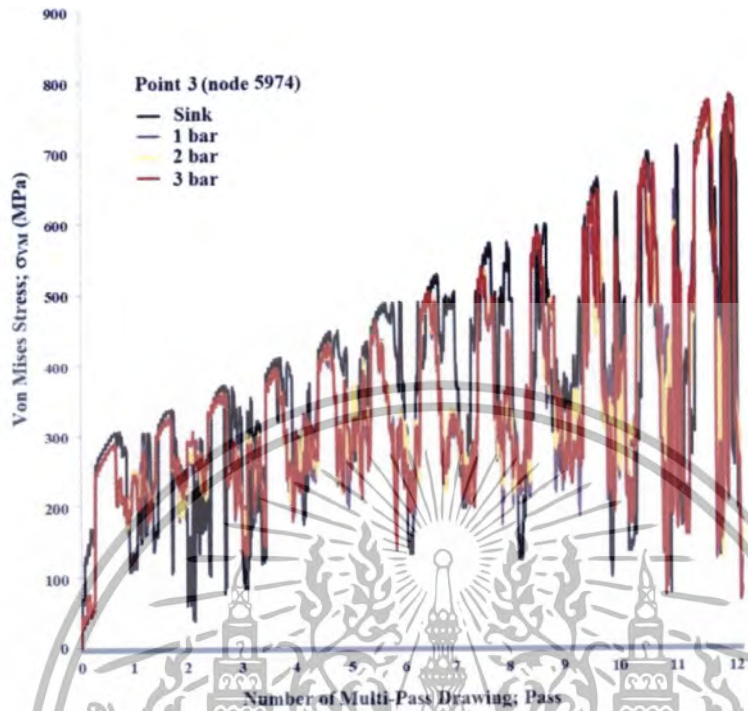


รูปที่ 11.9 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 1 (โหนด 512)

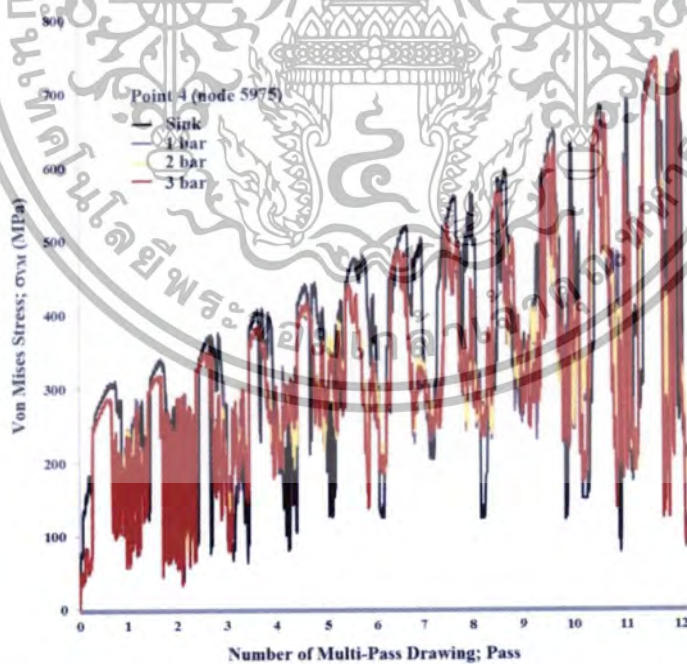


รูปที่ 11.10 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 2 (โหนด 5973)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

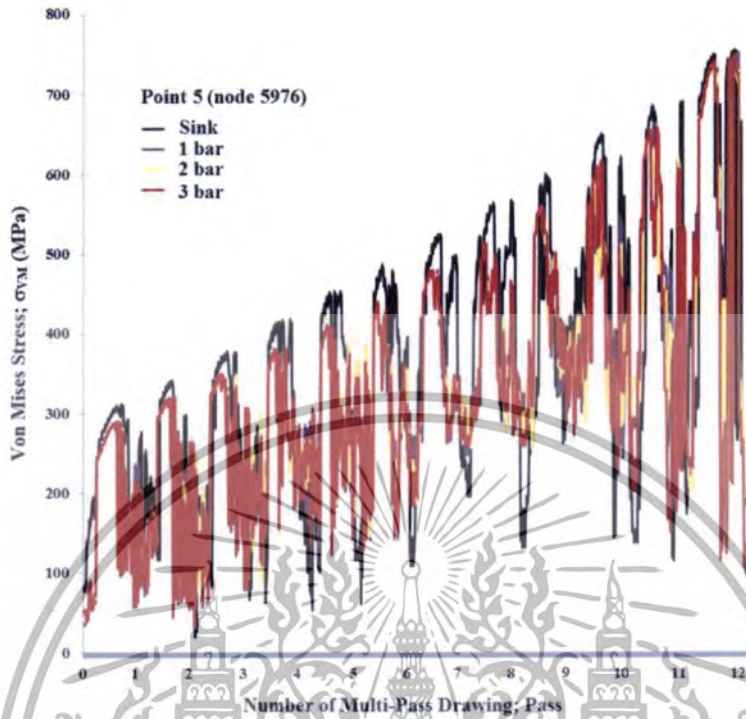


รูปที่ 11.11 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 3 (โหนด 5974)

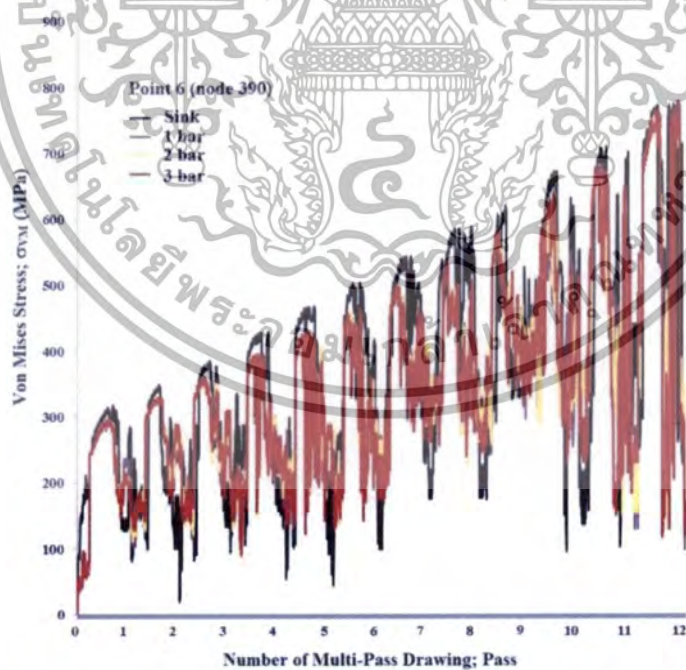


รูปที่ 11.12 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 4 (โหนด 5975)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

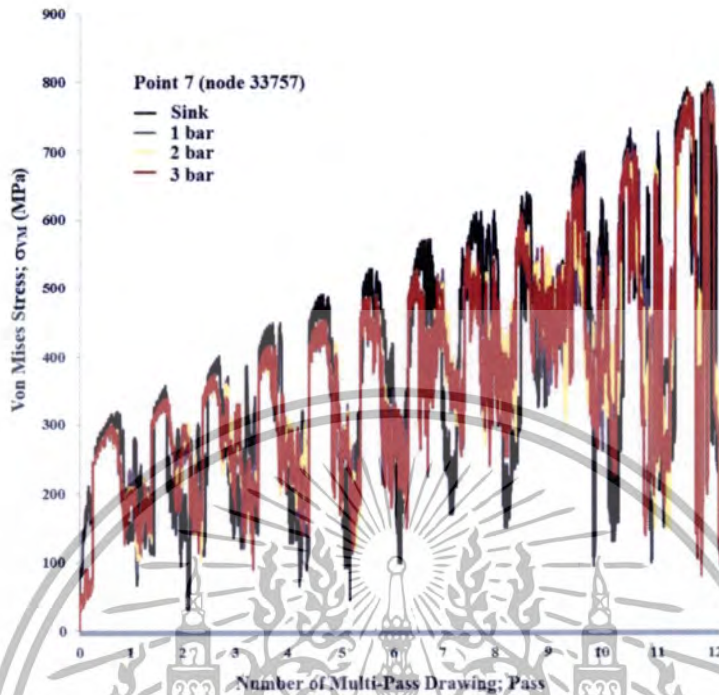


รูปที่ 11.13 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 5 (โหนด 5976)

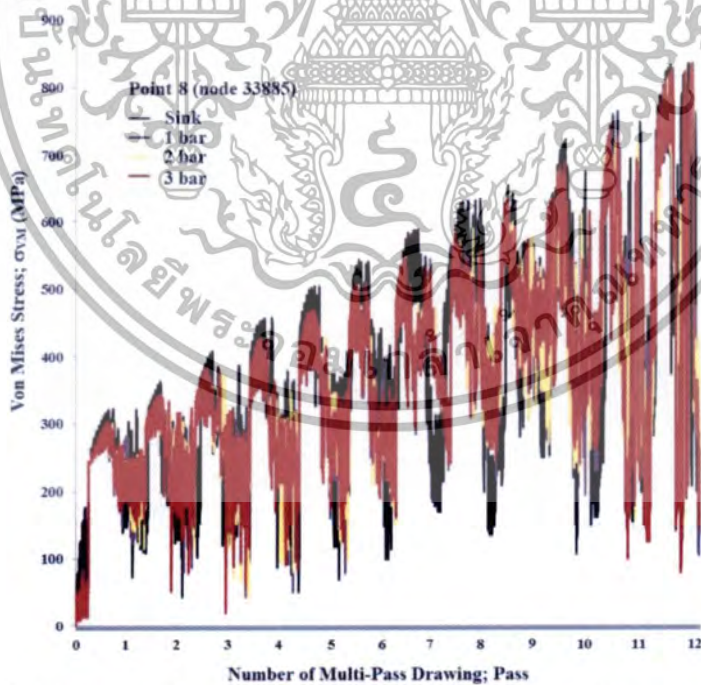


รูปที่ 11.14 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 6 (โหนด 390)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

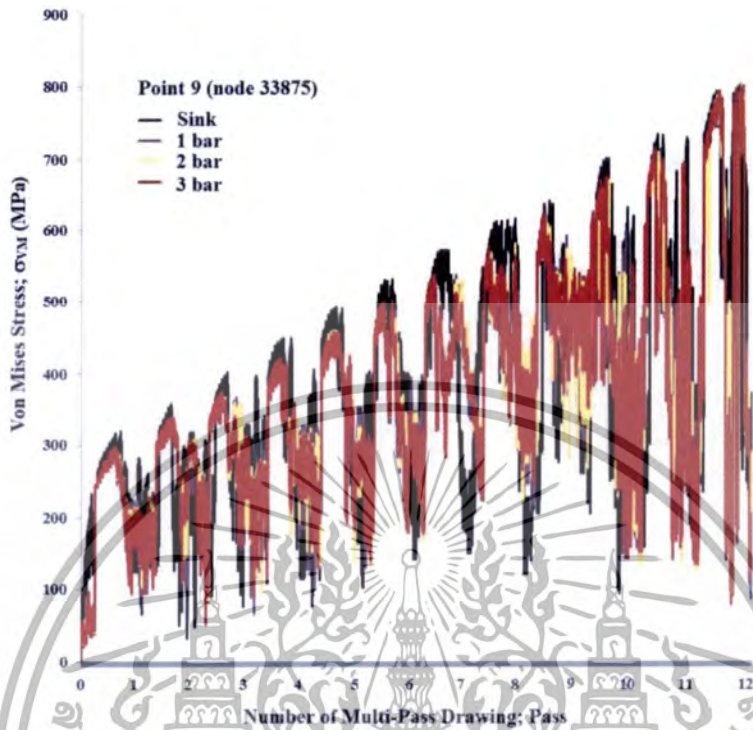


รูปที่ 11.15 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 7 (โหนด 33757)

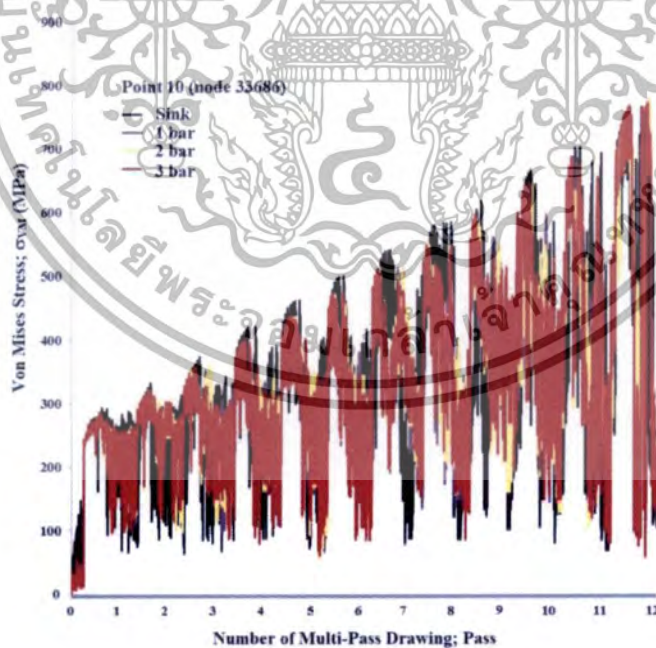


รูปที่ 11.16 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 8 (โหนด 33885)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

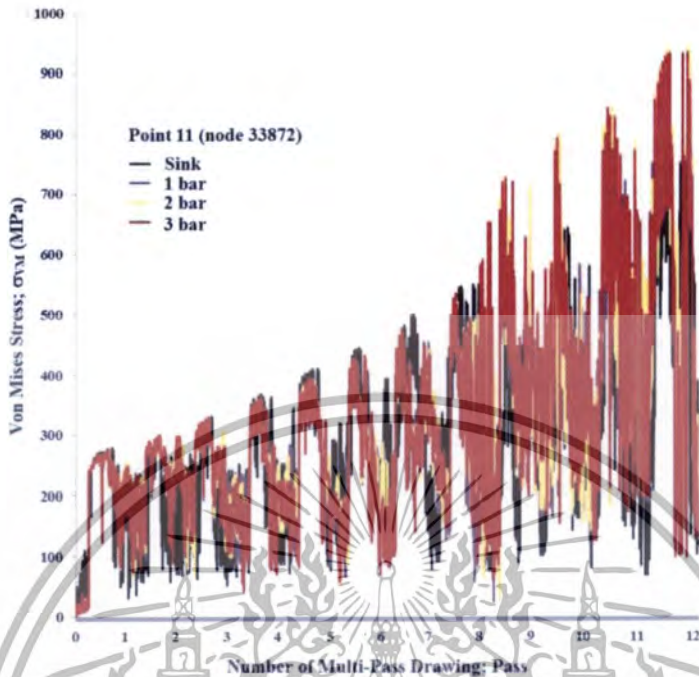


รูปที่ 11.17 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 9 (โหนด 33875)

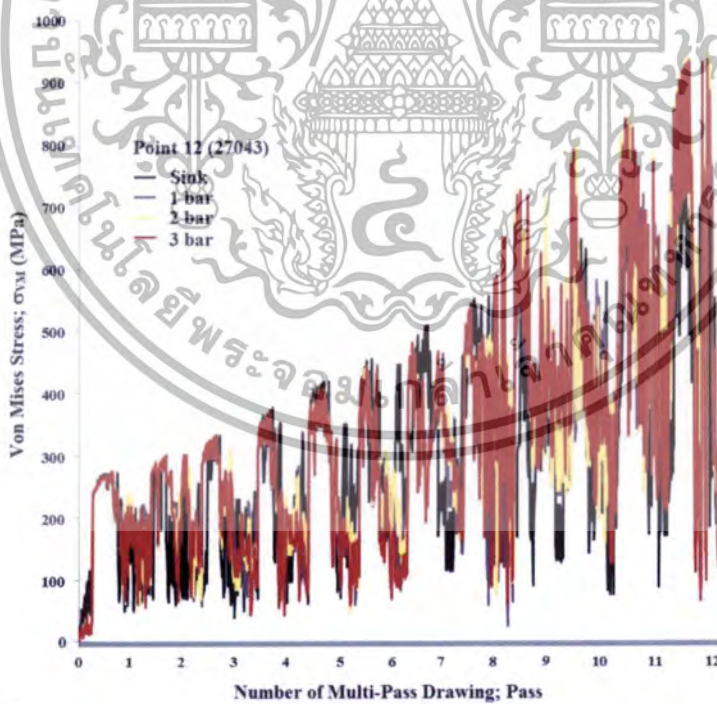


รูปที่ 11.18 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 10 (โหนด 33686)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

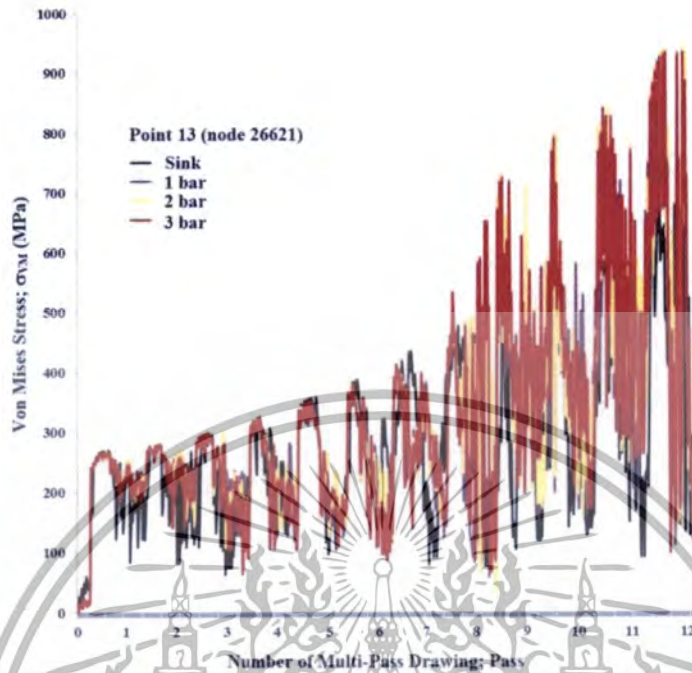


รูปที่ 11.19 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 11 (โหนด 33872)

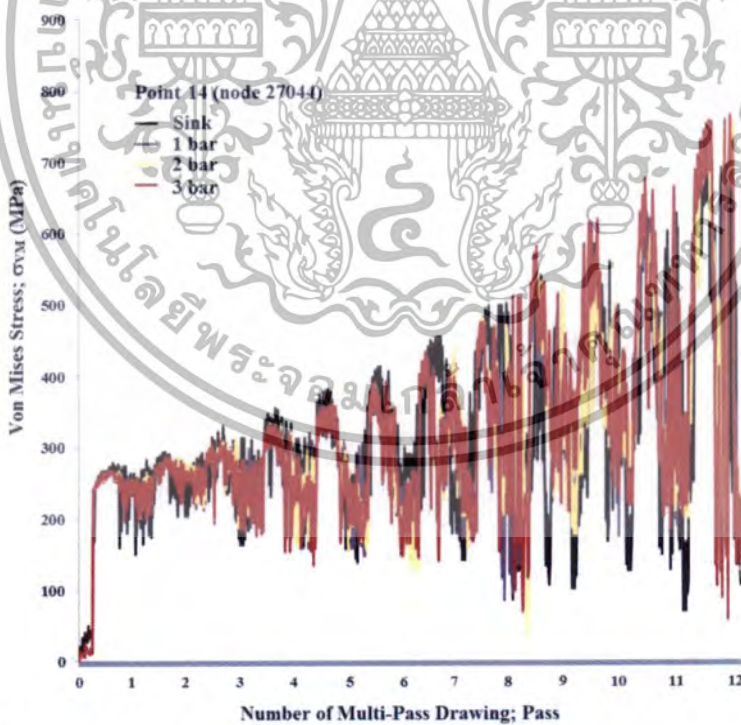


รูปที่ 11.20 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 12 (โหนด 27043)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

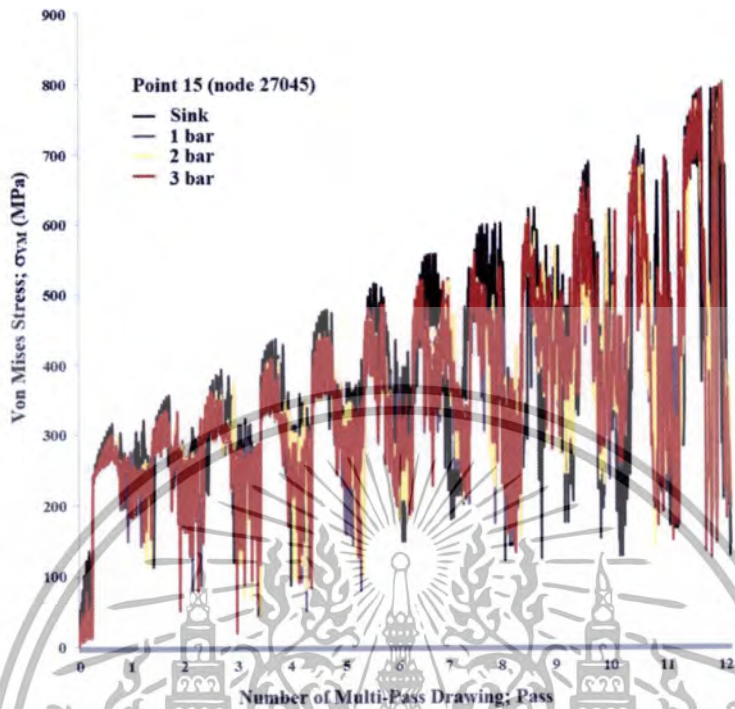


รูปที่ 11.21 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 13 (โหนด 26621)

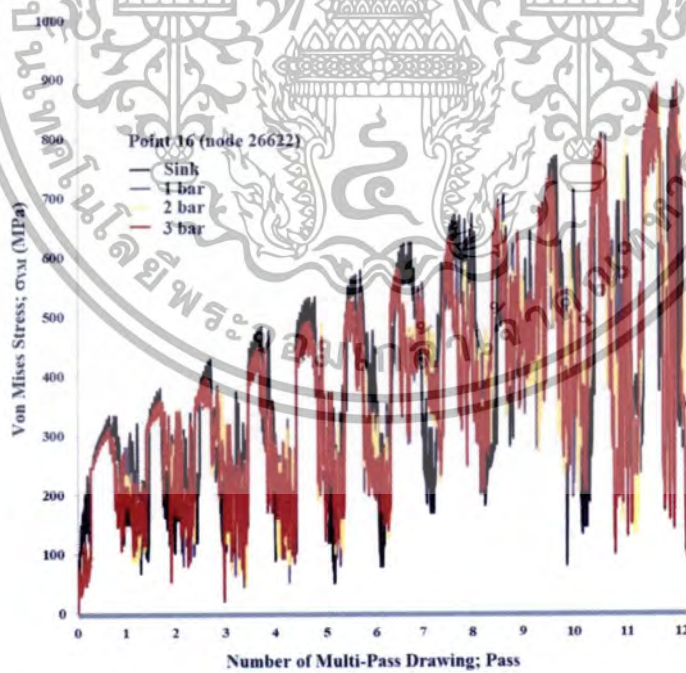


รูปที่ 11.22 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 14 (โหนด 27044)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

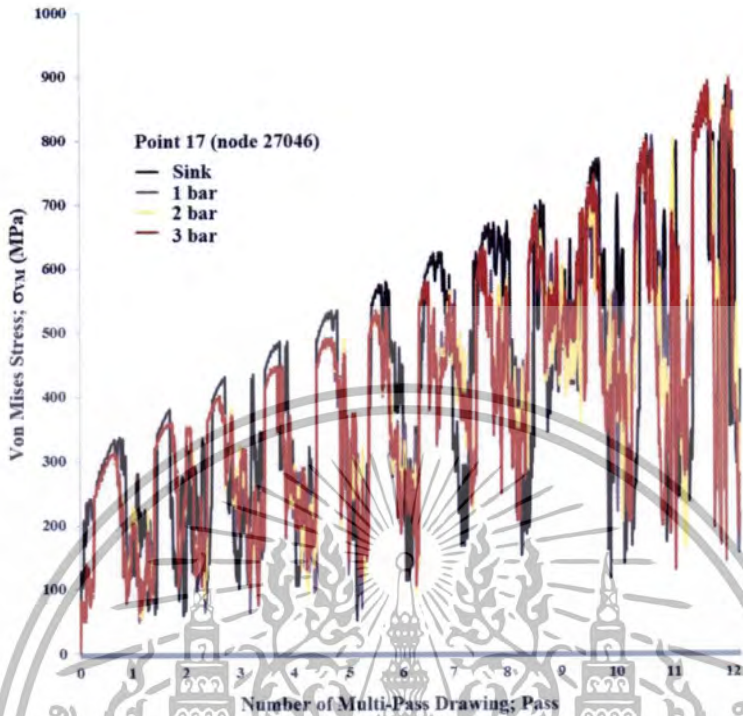


รูปที่ 11.23 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 15 (โหนด 27045)

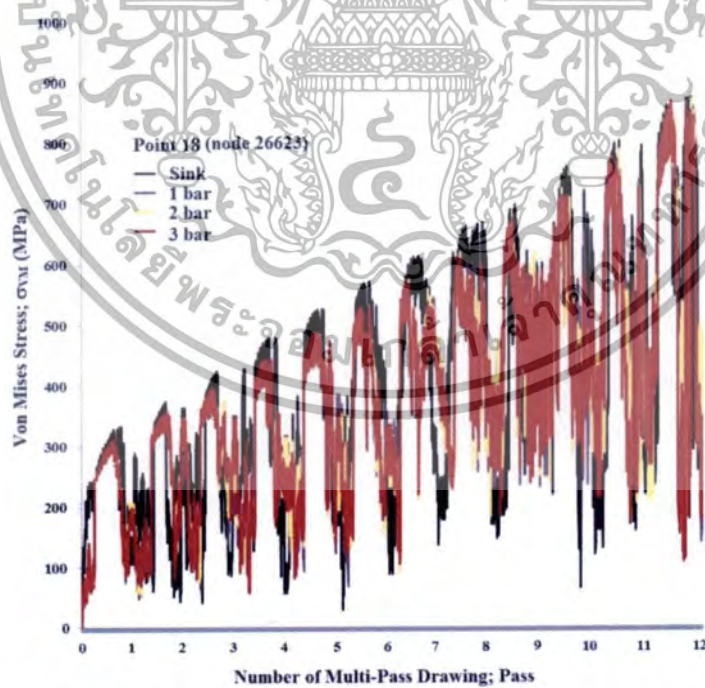


รูปที่ 11.24 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 16 (โหนด 26622)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

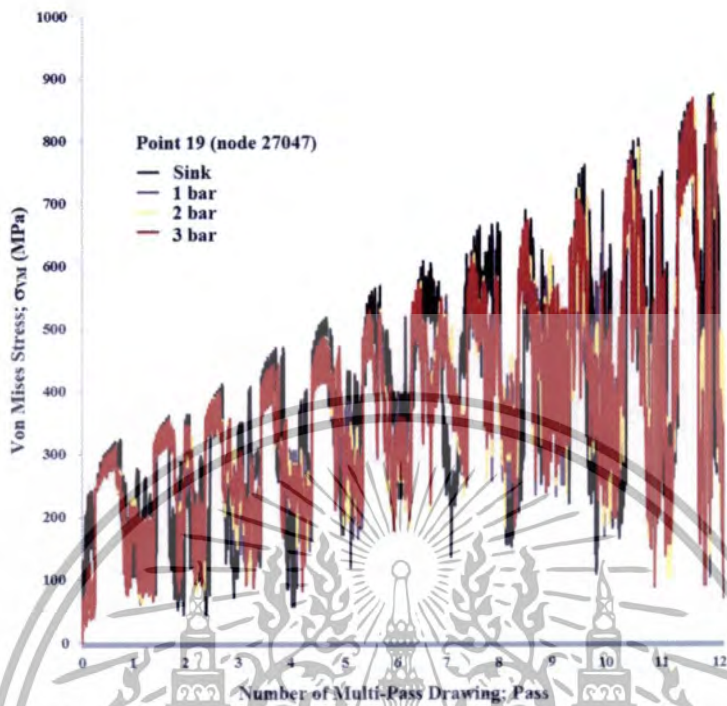


รูปที่ 11.25 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 17 (โหนด 27046)

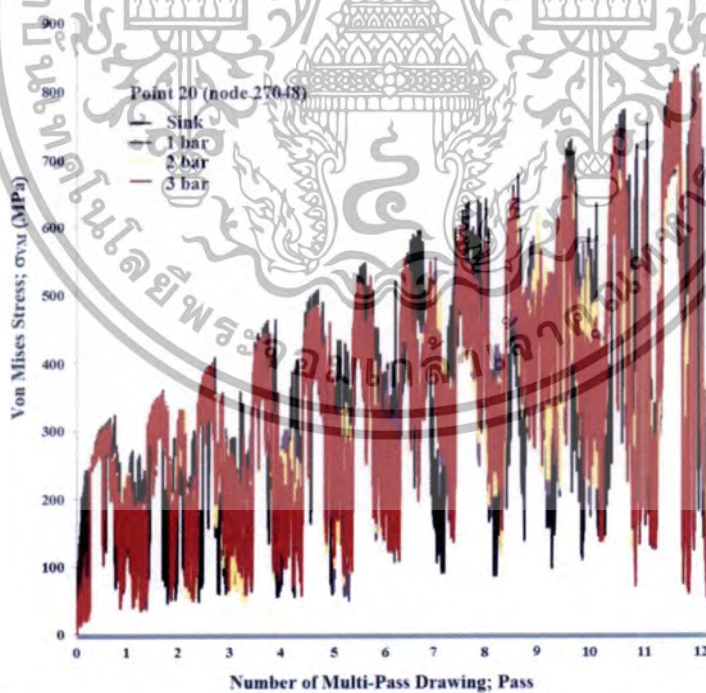


รูปที่ 11.26 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 18 (โหนด 26623)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

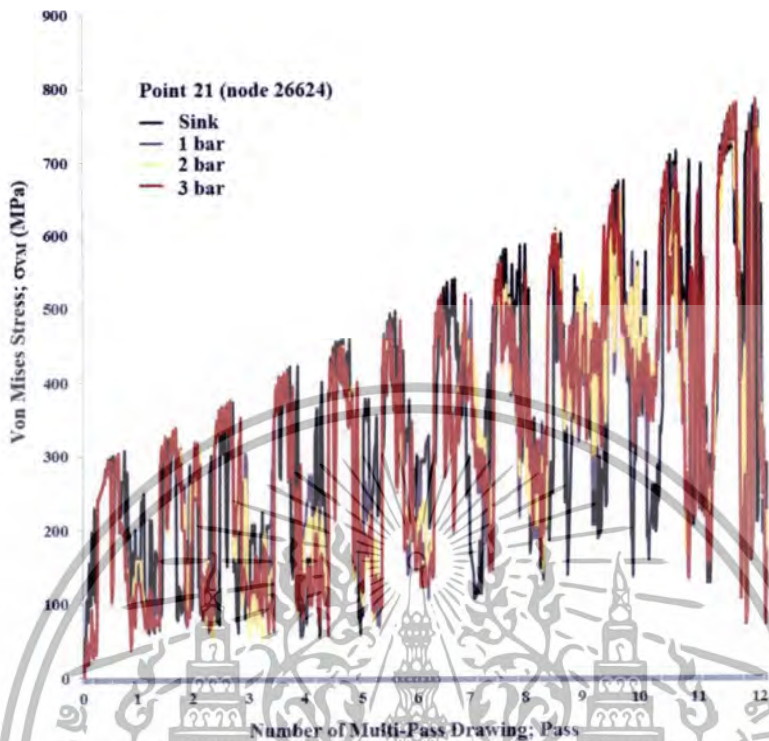


รูปที่ 11.27 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 19 (โหนด 27047)



รูปที่ 11.28 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 20 (โหนด 27048)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



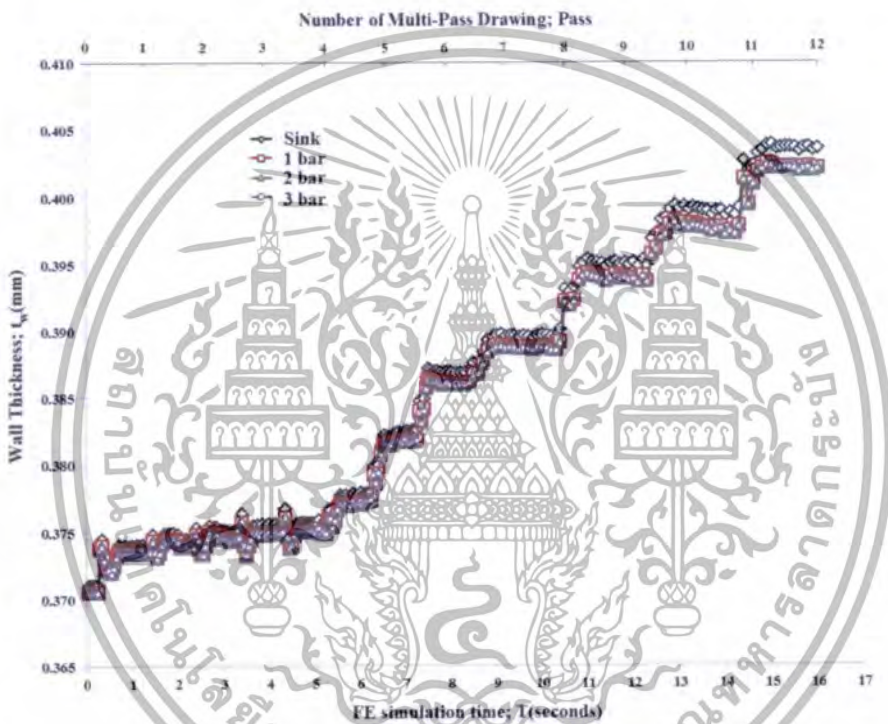
รูปที่ 11.29 การเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress ที่จุด 21 (โหนด 26624)

ผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ FEM ของสนามความเค้น von Mises นั้นแสดงให้เห็นว่าการดึงขึ้นรูปในหลายๆเที่ยวจนถึงเที่ยวที่ 12 ในกรณีของกระบวนการดึงขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีการ รูปแบบของความเค้น von Mises (von Mises stress หรือ equivalent stress) สำหรับจุดในตำแหน่งของภาคตัดมิติของ ISRCT สามารถอธิบายได้ โดยพิจารณาเจาะลึกลงไปในแต่ละโหนดแล้วทำการเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละพารามิเตอร์ของความดันภายในที่ 0 bar (Tube sinking), 1 bar, 2 bar และ 3 bar จากนั้นทำการแสดงผลการเปรียบเทียบออกมาเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Von Mises Stress ณ จุดต่างๆทั้ง 21 จุดแล้วแสดงผลออกมารูปที่ 11.9 ถึง 11.29 เรียงลำดับตามจุดที่พิจารณาในรูปที่ 11.6 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นในแต่ละโหนดนั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 4 วิธีการ และระดับความเค้น von Mises จะมากที่สุดที่ความดัน 0 bar และลดลงตามระดับของความดันภายใน แต่จากผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นทั้ง 4 วิธีการมีระดับใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากความเค้นทั้งสามรูปแบบ (ความเค้นตามแนวแกน ความเค้นตามแนวรัศมีและความเค้นตามแนวเส้นรอบวงหรือความเค้นวงแหวน) เป็นความเค้นรวมเมื่อความเค้นเนื่องจากความดันภายในเพิ่มขึ้นก็จะไปเพิ่มความเค้นตามแนวแกนให้เพิ่มมากขึ้นและลดความเค้นตามแนวรัศมีลงจึงทำให้ความเค้นรวมนั้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยและมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันกับความเค้นรวมที่ความดัน 0 bar เพียงแต่มีค่าต่ำกว่าเพียงเล็กน้อย การจำลองสถานการณ์การดึงขึ้นรูปผ่านดาายนั้น คล้ายกันกับการศึกษาในสภาวะคงตัว (Steady state) ท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวภายใน ISRCT ที่เป็นวัสดุอีลาสติก-พลาสติก (Elastic-plastic) นั้นใช้ในการจำลองการทำงานโดยใช้ซอฟต์แวร์ FEM ตามกฎของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Isotropic hardening law เกณฑ์ของ von Mises ซึ่งใช้การป้อนกลับในแนวรัศมี การไหลของความเค้น และวัสดุนั้นพิจารณาว่าเป็นวัสดุที่มีอัตราความเครียดที่เป็นอิสระ

มีหลายรูปแบบของแรงเสียดทานในแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการจำลองสถานการณ์นี้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าคงที่ ช่วงการจำลองสถานการณ์ที่ดีที่สุดนั้นพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะต่ำกว่า 0.02 เนื่องจากมีสารหล่อลื่นอยู่ระหว่าง ISRCT และตาย ในการจำลองการทำงานในครั้งนี้อาจเลือกค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.02 ดังกล่าว โดยใช้หลักการเดียวกันกับการพิจารณาหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เหมาะสมในบทที่ 9 ที่ผ่านมา

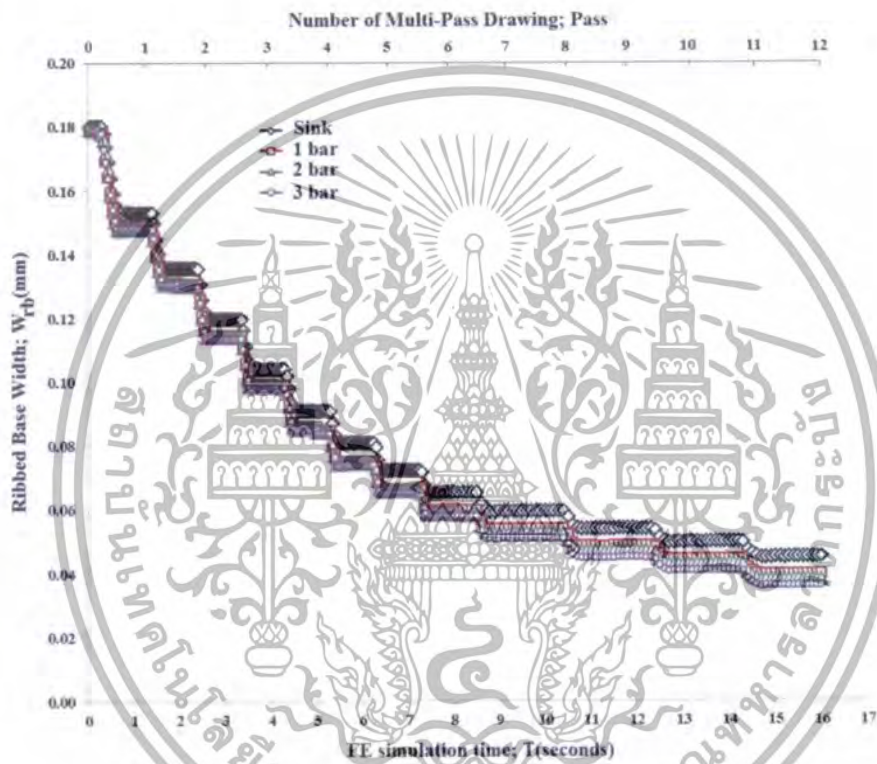


รูปที่ 11.30 ความหนาผนังท่อและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

ในกระบวนการดึงขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีการ พฤติกรรมของท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายใน ISRCT ภายหลังจากการดึงขึ้นรูปนั้นขนาดของพื้นที่ภาคตัดของสันเกลียวบนผิวภายในของท่อนั้นเปลี่ยนแปลงหลังจากการเปลี่ยนรูปโดยการดึงขึ้นรูป ISRCT ทั้ง 4 วิธีการ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงพื้นที่ภาคตัดของสันเกลียวบนผิวภายในของท่อนั้นเปลี่ยนแปลงจากการดึงขึ้นรูปต่ำสุดที่การดึงขึ้นรูปครั้งที่ 1 ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 11.05 เปอร์เซ็นต์ ไปจนถึงค่าสูงสุดที่การดึงขึ้นรูปครั้งที่ 12 ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 84.10 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้วิธีการการจำลองสถานการณ์นั้นขนาดของมิติภาคตัดของสันและมุมฮิลิกส์ของสันภายในท่อเกิดการเปลี่ยนแปลงภายหลังการดึงขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีการ ที่ผ่านไปในแต่ละเที่ยว และความหนาของผนังท่อก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยอย่างต่อเนื่อง เช่นกัน เป็นเพราะว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อนั้นลดลงขณะที่ ISRCT ก็มี ความเครียดอัดที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุที่ใช้ทำท่อ และเกิดขึ้นในทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดียวกันกับความเค้นในแนวเส้นรอบวงของท่อด้วยเหมือนกัน ท้ายที่สุด วิธีการดึงขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีการนั้น ทำให้ความหนาของผนังท่อ ISRCT เพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งของการดึงขึ้นรูปผ่านตายในแต่ละเที่ยวแต่จะเพิ่มขึ้นไม่เท่ากันโดยที่ความดัน 0 bar ความหนาของผนังท่อ ISRCT จะเพิ่มขึ้นมากที่สุดและจะลดลงตามความดันภายในที่เพิ่มขึ้น 1 bar, 2 bar และ 3 bar ตามลำดับ อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ในแต่ละครั้งของการดึงขึ้นรูปผ่านตายอีกด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาผนังท่อ ISRCT ทั้ง 4 วิธีการและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้นแสดงในรูปที่ 11.30

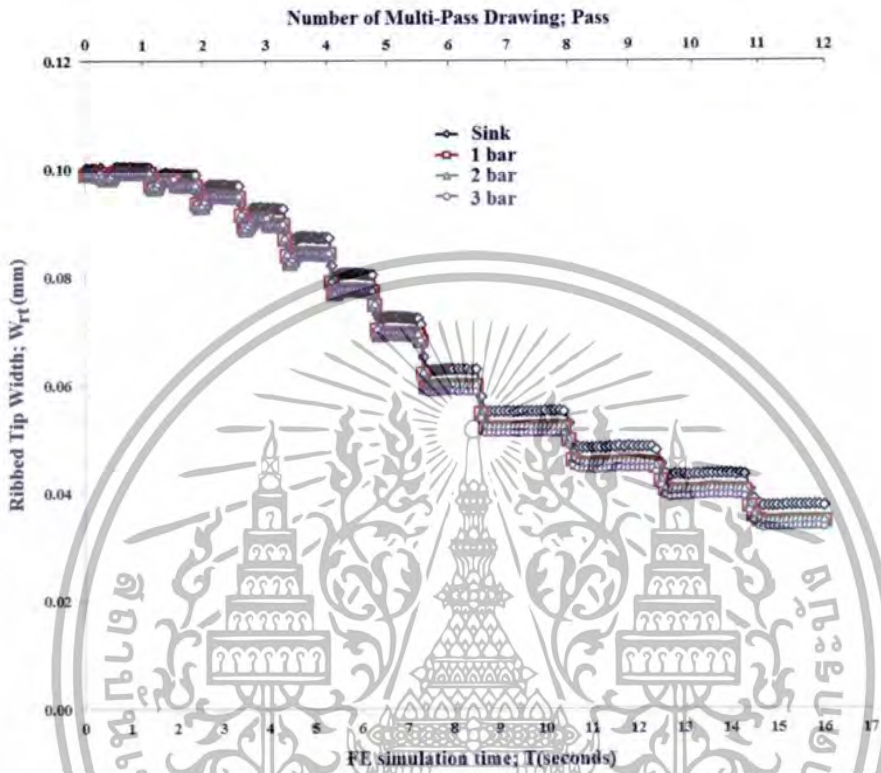


รูปที่ 11.31 ความกว้างที่ฐานสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ทั้ง 4 วิธีการ แสดงให้เห็นว่า ความกว้างที่ฐานสัน และความกว้างที่ยอดสันนั้นเป็นไปได้ที่จะลดลงเกิดขึ้นมาจากความเครียดอัดในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของ ISRCT และต่อต้านการเปลี่ยนรูปของท่อด้วยจึงทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรขึ้นได้ ความกว้างที่ฐานสันค่อยๆลดลงทีละน้อยๆระหว่างกระบวนการดึงขึ้นรูปในกรณีที่ไม่มีความดันภายในท่อ (0 bar) การดึงขึ้นรูปผ่านตายในหลายๆเที่ยว ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ ISRCT ลดลง 1.64 มิลลิเมตร ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 77.36 เปอร์เซ็นต์ ในการดึงขึ้นรูปผ่านตายไปในเที่ยวที่ 10 ผลปรากฏว่าความกว้างที่ฐานสันแบบขีดติดกันดังแสดงไว้ในบทที่ 9 แต่เมื่อความดันเพิ่มขึ้นเป็น 1 bar, 2 bar และ 3 bar ตามลำดับ ความกว้างที่ฐานสันจะมีขนาดแคบลงได้อีกเนื่องจากความดันภายในของ ISRCT มีแรงกระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

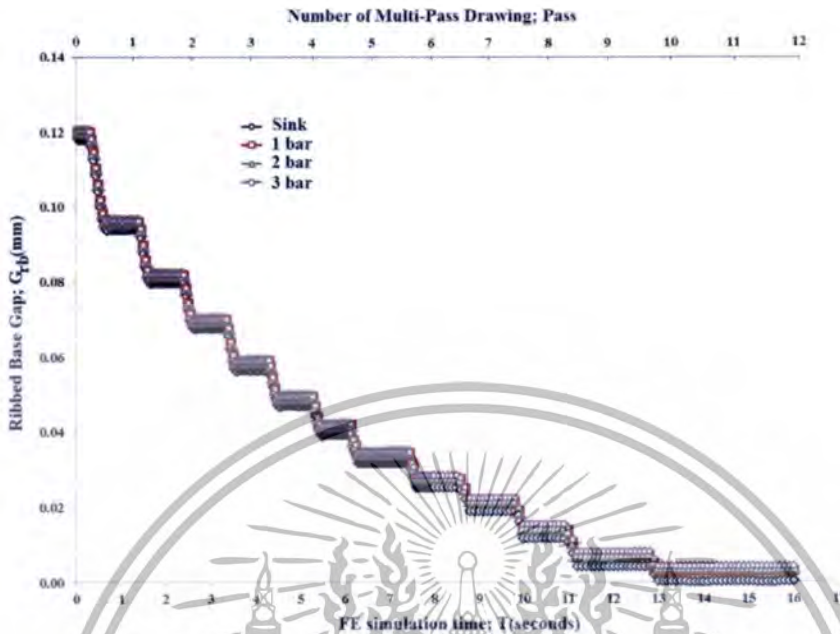
ที่ขอบของสันและบีบอัดให้แนวสันมีขนาดแคบลงเป็นผลให้ความกว้างที่ฐานสันนั้นลดลงได้อีก ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างที่ฐานสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้นแสดงในรูปที่ 11.31



รูปที่ 11.32 ความกว้างที่ยอดสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

ในทำนองเดียวกันกับความกว้างที่ฐานสัน ความกว้างที่ยอดสันก็จะลดลงเกิดขึ้นเนื่องมาจากความเครียดอัดในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของ ISRCT และต่อต้านการเปลี่ยนรูปของท่อด้วยจึงทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรขึ้นได้เช่นเดียวกัน ในกรณีที่ไม่มี ความดันภายในท่อ (0 bar) การดึงขึ้นรูปผ่านด้ายในหลายๆเที่ยว ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ ISRCT ลดลง 1.47 มิลลิเมตร ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 80.97 เปอร์เซ็นต์ ในการดึงขึ้นรูปผ่านด้ายไปในเที่ยวที่ 11 ผลปรากฏว่าความกว้างที่ยอดสันแนบชิดติดกันดังแสดงในบทที่ 9 แต่เมื่อความดันเพิ่มขึ้นเป็น 1 bar, 2 bar และ 3 bar ตามลำดับ ความกว้างที่ยอดสันจะมีขนาดแคบลงได้อีกเนื่องจากความดันภายในของ ISRCT มีแรงกระทำที่ขอบของสันและบีบอัดให้แนวสันมีขนาดแคบลงเป็นผลให้ความกว้างที่ยอดสันนั้นลดลงได้อีกเช่นเดียวกัน ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างที่ยอดสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้นแสดงในรูปที่ 11.32

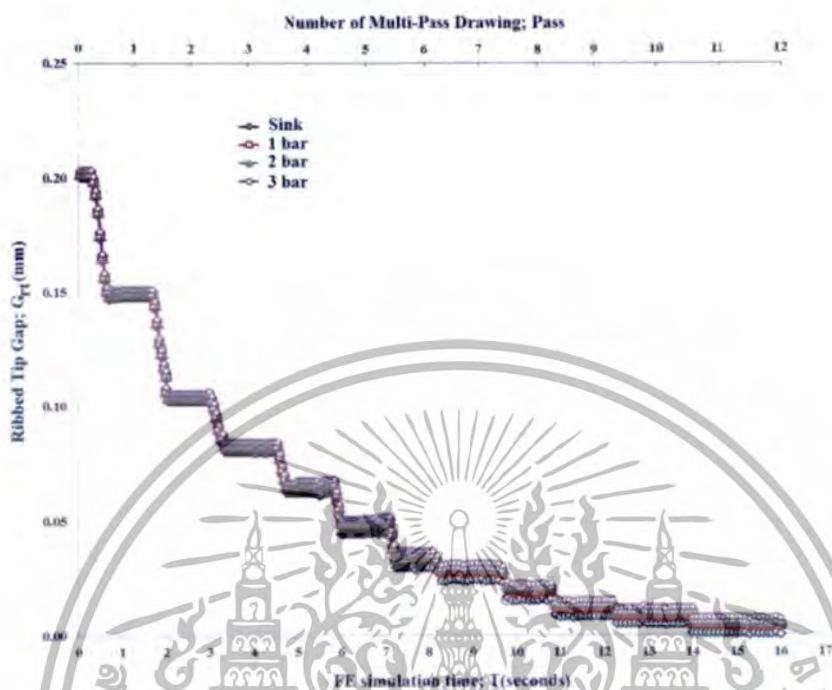
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11.33 ช่องว่างฐานสัน และเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองดึงขึ้นรูป ISRCT นั้น ผลที่ได้แสดงการเสีรูปร่างไม่สามารถควบคุมได้อย่างละเอียดถี่ถ้วนและเป็นการยากที่จะสังเกตในทุกแง่มุม อีกทั้งยังไม่สามารถทำให้หมดข้อสงสัยที่เกี่ยวกับพฤติกรรมการเสีรูปร่างของช่องว่างระหว่างสันภายในของ ISRCT และพื้นที่ของสันในระหว่างกระบวนการดึงขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีกร เพื่อที่จะตรวจสอบความเค้นและความเครียดนั้น การแพร่ของความเครียดประสิทธิภาพนั้นคล้ายคลึงกันกับความเค้นประสิทธิภาพ ความเครียดสูงสุดจะถูกกลืนเข้าด้วยกันตลอดทั่วทั้งขอบเขตระหว่างร่องสัน และส่วนที่เป็นสันของ ISRCT ค่าความเครียดเฉลี่ยในส่วนที่เป็นร่องสันนั้นมีค่าสูงกว่าในพื้นที่ของสัน การเสีรูปร่างที่ร่องสันนั้นจึงรุนแรงมากขึ้นกว่าที่บริเวณส่วนที่เป็นพื้นที่ของสัน ร่องที่อยู่ตามแนวของสันจะเปลี่ยนแปลงมีลักษณะของร่องสันที่แคบลงในรูปแบบเป็นเชิงลบ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ ISRCT ลดลง 2.05 มิลลิเมตร ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 68.81 เปอร์เซ็นต์ ในการดึงขึ้นรูปผ่านตายไปในเที่ยวที่ 8 ปรากฏจุดเริ่มต้นของร่องที่กลางผิวด้านบนของยอดสันและรอยแยกที่ด้านข้างของแต่ละสัน ช่องว่างที่เกิดขึ้นนั้นจะบิดตัวทับกันในบริเวณขอบสันยกเว้นในช่วงกลางของช่องว่างระหว่างสัน ขนาดมิติเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ขอบสันด้วย ขนาดมิติจะเพิ่มขึ้นด้วยการดึงขึ้นรูปแบบที่ไม่มี ความดันภายในท่อ (0 bar) นอกจากนี้ช่องว่างที่บิดทับเกิดขึ้นพร้อมกันตลอดแนวเส้นรอบวงของเส้นฐานสัน ขนาดมิติของสันนั้นไม่ได้เท่ากันทั้งหมดและกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอตลอดแนวทั่วทั้งเส้นรอบวงของพื้นที่ภาคตัดของสันชิดติดกัน แต่เมื่อความดันเพิ่มขึ้นเป็น 1 bar, 2 bar และ 3 bar ตามลำดับ ช่องว่างฐานสันจะมีขนาดกว้างขึ้นได้อีกเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มี ความดันภายใน เนื่องจากความดันภายในของ ISRCT มีแรงกระทำที่ขอบของสันและบีบอัดให้แนวสันมีขนาดแคบลงเป็นผลให้ช่องว่างระหว่างสันนั้นเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างฐานสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้น แสดงในรูปที่ 11.33

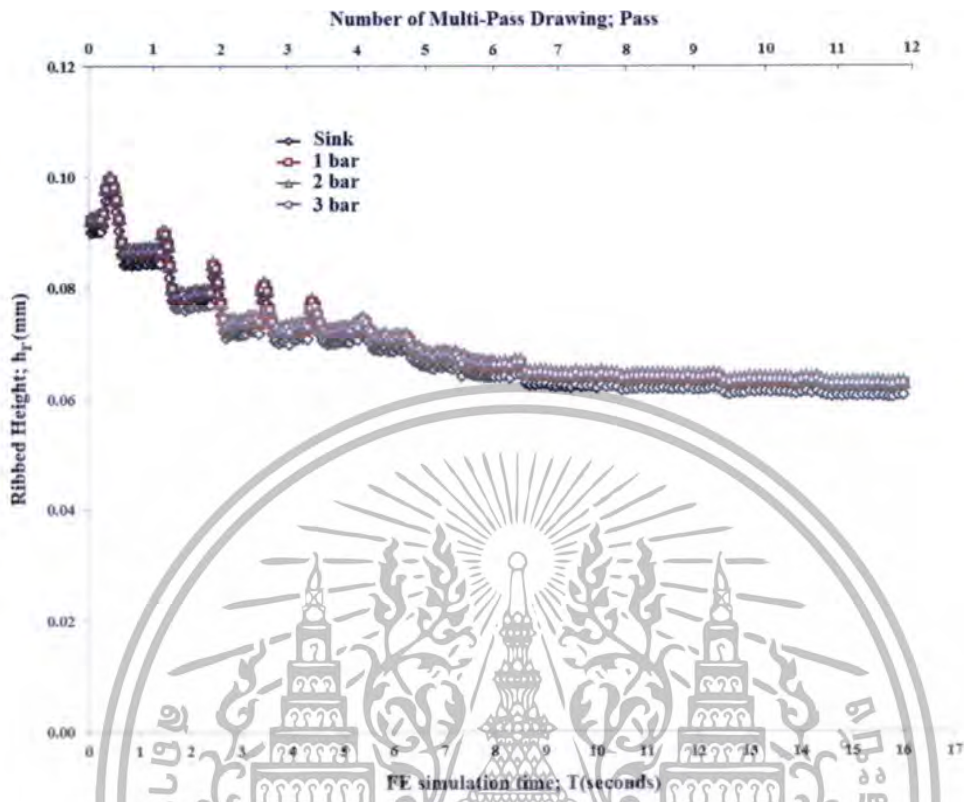
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11.34 ช่องว่างยอดสัน และเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

คล้ายคลึงกับช่องว่างที่ฐานสัน ความเครียดบนช่องว่างยอดสันจะแผ่ขยายกลมกลืนเข้าด้วยกันตลอดทั่วทั้งขอบเขตระหว่างร่องสันและส่วนที่เป็นพื้นที่สันของ ISRCT ความเครียดเฉื่อยและการเสียรูปในช่องว่างของสันนั้นจึงรุนแรงมากขึ้นกว่าที่บริเวณส่วนที่เป็นพื้นที่ของสัน ส่วนที่เป็นช่องว่างยอดสันเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยเหมือนกันในรูปแบบเป็นเชิงลบ ในกรณีที่ไม่มีความดันภายในท่อ (0 bar) เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของ ISRCT ลดลง 1.47 มิลลิเมตร ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 80.97 เปอร์เซ็นต์ ในการดึงขึ้นรูปผ่านตายไปในเที่ยวที่ 11 ช่องว่างหายไปและไม่มีช่องว่างหลงเหลืออยู่อีกเลยดังแสดงไว้ในบทที่ 9 แต่เมื่อความดันเพิ่มขึ้นเป็น 1 bar, 2 bar และ 3 bar ตามลำดับ ช่องว่างยอดสันจะมีขนาดกว้างขึ้นเพิ่มขึ้นได้อีกเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีความดันภายใน เนื่องจากความดันภายในของ ISRCT มีแรงกระทำที่ขอบของสันและบีบอัดให้แนวสันมีขนาดแคบลงเป็นผลให้ช่องว่างฐานสันเพิ่มขึ้น ผลที่ได้รับสามารถนำไปประยุกต์ใช้การออกแบบอย่างระมัดระวังในกระบวนการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลางที่ดึงผ่านตายในหลายๆเที่ยวสำหรับกรรมวิธีการผลิต ISRCT ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างยอดสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้นแสดงในรูปที่ 11.34

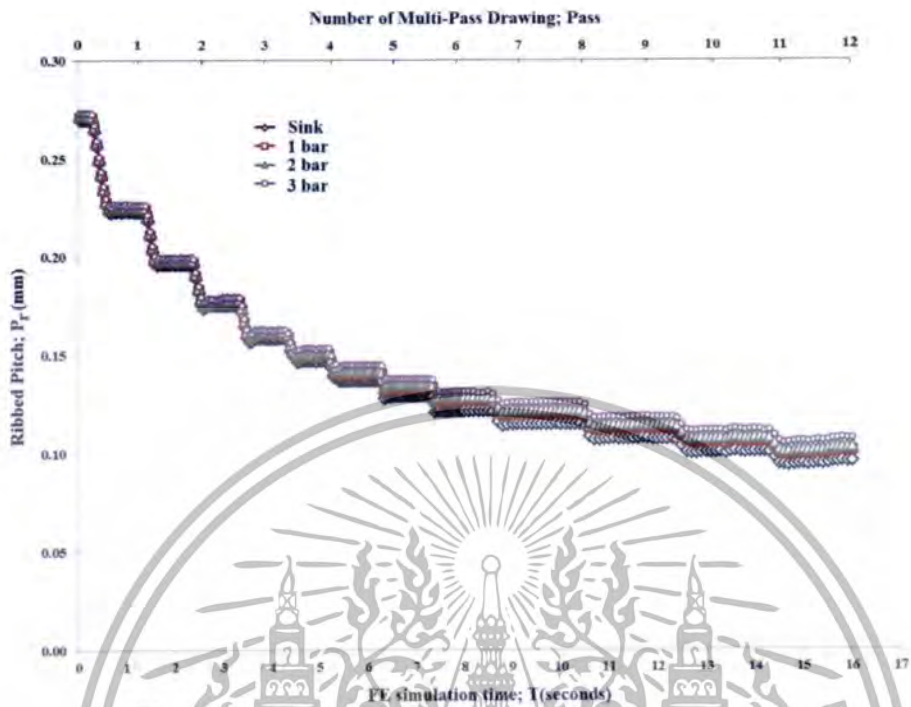
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11.35 ความสูงของสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ของ SRCT ผลที่ได้สำหรับการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม (Rt%) นั้นแสดงการเสียรูปที่สูงมากในส่วนที่เป็นสันในกรณีที่ไม่มีแรงดันภายในท่อ (0-bar) เนื่องจากไม่มีความต้านทานจากแรงดันภายในช่วงที่มีการเสียรูปของ SRCT ในช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติก (Elastic-plastic) ซึ่งเป็นวิธีการดึงขึ้นรูปแบนที่อลงที่ดึงผ่านตายในหลายๆเที่ยว ขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลงความเค้นอัดที่เกิดขึ้นภายในขอบเขตของสันท่อ SRCT นั้นมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นทิศทางในแนวเส้นรอบวงตลอดแนวความสูงของพื้นที่สันนั้นถูกบีบอัด อย่างไรก็ตามความสูงของสันนั้นจะลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาเดียวกัน สำหรับในกรณีความดันภายใน SRCT เพิ่มขึ้นเป็น 1 bar, 2 bar และ 3 bar ตามลำดับ ความสูงของสันมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากความดันส่วนใหญ่กระทำที่ขอบด้านข้างมากกว่าที่ยอดสันเป็นผลให้ความเค้นตามแนวแกนของสันเป็นความเค้นดึงที่สูงขึ้นมากกว่าที่ไม่มีแรงดัน ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้นแสดงในรูปแบบที่ 11.35

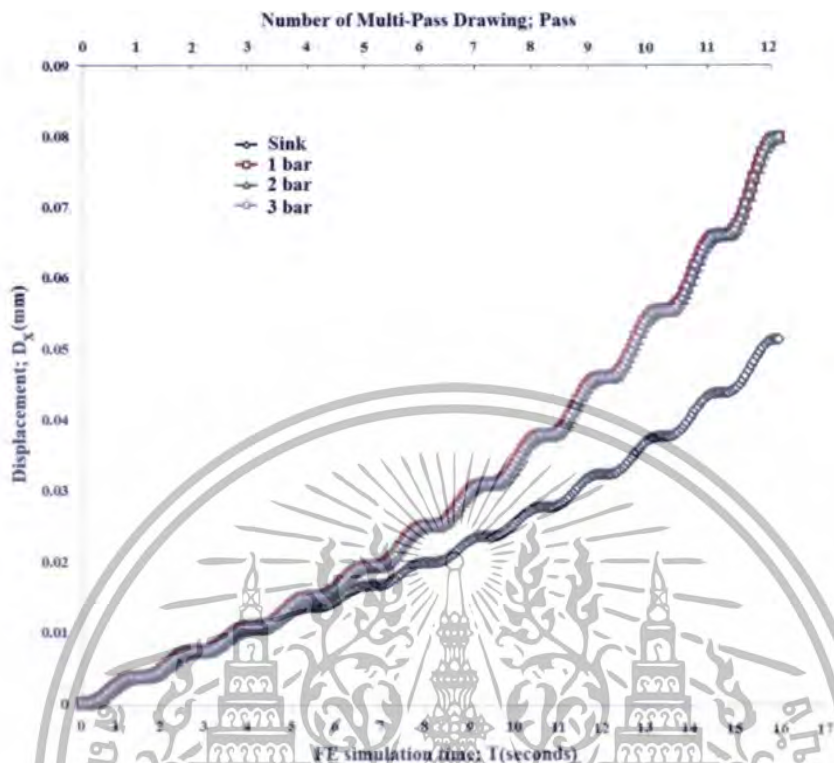
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11.36 ระยะพิตซ์ของสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

ระยะพิตซ์ของสันนั้นลดลงอย่างต่อเนื่องโดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลงเพื่อให้สอดคล้องกับการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม โดยที่ความเค้นอัดในท่อตามแนวเส้นรอบวงของ ISRCT นั้นขึ้นอยู่กับจำนวนของการดึงขึ้นรูปผ่านดวยในแต่ละเที่ยวที่เพิ่มจำนวนครั้งขึ้นและเวลาที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวข้างต้น ในกรณีที่ไม่มี ความดันภายในท่อ (0 bar) ระยะพิตซ์ของสันจะลดลงมากกว่าในกรณีความดันภายใน ISRCT เพิ่มขึ้นเป็น 1 bar, 2 bar และ 3 bar ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อความดันภายในท่อเพิ่มขึ้นจะมีความดันด้านที่ผิวสัมผัสภายในทำให้เกิดการเสียรูปบริเวณสันของ ISRCT เกิดขึ้นน้อยกว่าและเป็นผลให้ระยะพิตซ์เปลี่ยนแปลงน้อยกว่าในกรณีที่ไม่มี ความดันด้านภายในด้วยเช่นกัน ความสัมพันธ์ระหว่างระยะพิตซ์ของสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้นแสดงในรูปที่ 11.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

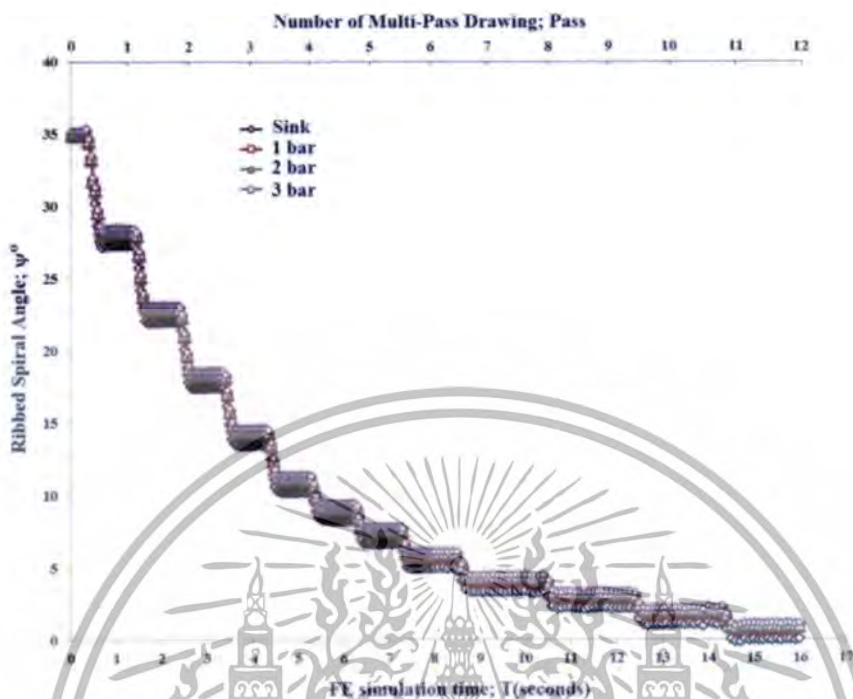


รูปที่ 11.37 ระยะกระจัดตามแนวแกนและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

ในระหว่างการดำเนินการจำลองสถานการณ์นั้นได้ดำเนินการปรับแก้รูปทรงของช่องตาข่ายในแบบจำลองให้เหมาะสมกับการแสดงผลซึ่งในเวลาเดียวกันจุดต่างๆบน ISRCT ที่บริเวณของโหนดนั้นขั้นตอนจากจุดเริ่มต้นไปจนถึงจุดการจำลองสถานการณ์นั้นไม่ได้อยู่ในเวลาเดียวกันในทุกๆโหนดตลอดขั้นตอนการดำเนินการค่าของระยะกระจัดและพิกัดที่ตำแหน่งปัจจุบันจะเป็นตัวแทนของการเคลื่อนไหวของทุกๆโหนดโดยไม่จำเป็นต้องวัดระยะกระจัดทุกโหนดใน ISRCT ก็ได้

ผลลัพธ์นี้ให้ความสำคัญของระยะกระจัดและโหนดที่ระดับของวัสดุอิสระ (Degree of freedom) โดยที่ระยะกระจัดเพิ่มขึ้นในแต่ละเที่ยวจะเกิดขึ้นตามจำนวนครั้งที่ ISRCT ผ่านตายในการขึ้นรูป นอกจากนี้จากการจำลองสถานการณ์ที่ผ่านมาการเปลี่ยนแปลงที่โหนดในลักษณะของรูปทรงเรขาคณิตของ ISRCT นั้นจะมีค่าเท่ากับ 0.051197 มิลลิเมตร ในกรณีที่ไม่มีความดันภายในท่อ (0 bar) ในกรณีความดันภายใน ISRCT เพิ่มขึ้นเป็น 1 bar, 2 bar และ 3 bar ระยะกระจัดของโหนดจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.079801 มิลลิเมตร 0.07847 มิลลิเมตร และ 0.079783 มิลลิเมตร ตามลำดับ เนื่องจากความดันภายในท่อซึ่งเป็นความเค้นอัดที่ผนังด้านในของท่อในขณะที่ขึ้นรูปผ่านตายจะกลายเป็นความเค้นดึงภายในพื้นที่ของ ISRCT ในที่สุดจึงเป็นผลให้ระยะกระจัดเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระจัดตามแนวแกนและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้นแสดงในรูปที่ 11.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11.38 มุมฮิลิกส์ของสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

มุมเอียงของสันจะลดลงหลังจากการดึงขึ้นรูปผ่านตายทั้งล้นครบ 12 เที้ยวในขณะที่เปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวมของ ISRCT มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด ขนาดที่ลดลงนั้นเป็นเพราะว่าระยะกระจัดตามแนวแกนมีทิศทางเดียวกันกับมุมฮิลิกส์ของสันเกลียวด้วย อย่างไรก็ตามในสันเดี่ยวๆค่าการกระจายความเครียดจะมีความแตกต่างกันจากบริเวณฐานสันไปจนถึงบริเวณยอดสัน ความเครียดที่ขอบเขตของฐานสันและการเสียรูปนั้นมีความมากกว่าที่เกิดขึ้นในขอบเขตของบริเวณยอดสัน มุมฮิลิกส์ที่ฐานสันและที่ยอดสันทั้งคู่เปลี่ยนแปลงไปในเชิงลบ ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ไม่มีความดันภายใน ISRCT (0 bar) และเพิ่มขึ้นเป็น 1 bar, 2 bar และ 3 bar นั้นมุมฮิลิกส์ของสันจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและจะลู่เข้าจนมีค่าเป็นศูนย์ในเวลาดึงขึ้นรูปผ่านตายครบ 12 เที้ยวมีลักษณะใกล้เคียงกัน ความสัมพันธ์ระหว่างมุมฮิลิกส์ของสันและเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้นแสดงในรูปที่ 11.38

### 11.3 บทสรุป

จากผลการวิจัยการพัฒนาการประดิษฐ์ท่อขนาดเล็กที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายใน (ISRCT) เพื่อใช้เป็นท่อที่มีคุณภาพการถ่ายเทความร้อนสูงโดยการใช้โปรแกรม 3D FEM เพื่อตรวจสอบท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในขนาดเล็กพิเศษด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปโดยพิจารณาที่ความดันภายใน ISRCT ทั้ง 4 วิธีการ (0 bar, 1 bar, 2 bar และ 3 bar) ตามลำดับพบว่า

[1] อิทธิพลของความดันภายในที่มีต่อการดึงขึ้นรูปท่อทองแดงมีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็กทั้ง 4 วิธีการนั้นเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นจากความเค้นในการดึงขึ้นรูป ประกอบด้วยความเค้นตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวแกน ความเค้นตามแนวรัศมี และความเค้นที่เกิดจากความดันภายใน ความเค้นที่เพิ่มขึ้นในผนังของ ISRCT นั้นจะกระจายตัวอย่างรวดเร็วสู่ขอบเขตพื้นที่ของสันที่อยู่ภายในท่อ ความเค้น von Mises ที่ทำการตรวจสอบหลังจากการดิ่งขึ้นรูปผ่านตายผ่านพันไปจำนวน 12 เทียนั้นแตกต่างกันสำหรับแต่ละตำแหน่งของโหนดภายในภาคตัดของ ISRCT ความเค้นนั้นจะมีค่าสูงที่สุดในโซนที่อยู่บริเวณขอบด้านข้างของสัน โซนที่มีค่าความเค้น von Mises ในระดับปานกลางนั้นอยู่บริเวณกึ่งกลางแนวแกนของสันจนถึงบริเวณยอดสัน ส่วนโซนที่มีระดับความเค้น von Mises ต่ำสุดอยู่ที่ผิวด้านนอกของผนังท่อเข้าไปภายในผนังจนถึงหนึ่งในสามของความหนาผนังและที่จุดที่เป็นกึ่งกลางของระยะห่างที่ฐานสันภายในผนังของ ISRCT ด้านใน ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละโหนดนั้นมีระดับการกระจายความเค้น von Mises ที่เหมือนกันทั้ง 4 วิธีการ แต่ค่าขนาดความเค้นที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ค่าความเค้นสูงสุดเรียงลำดับตามค่าความดันจาก 3 bar, 2 bar, 1 bar และ 0 bar ตามลำดับ

[2] การขยายตัวของความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นในขณะที่เกิดการแพร่ของความเครียดเข้าสู่ขอบเขตของ ISRCT ในระหว่างการดิ่งขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีการ หลังจากการดิ่งขึ้นรูปผ่านตายผ่านพันไปจำนวน 12 เทียนั้น การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับพารามิเตอร์มีดังต่อไปนี้ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของภาคตัดตามแนวขวางและตามแนวแกนของ ISRCT โดยผลจาก 3D FEM ระหว่างการดิ่งขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีการนั้นมีความคล้ายคลึงกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของภาคตัดตามแนวขวางและตามแนวแกนของ ISRCT โดยการดิ่งขึ้นรูปด้วยแมนเดรลของไหลในบทที่ 10

[3] ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แบบ 3D FEM นั้นวิธีการที่ใช้ความดันที่ 0 bar (ไม่มี ความดันภายใน ISRCT) การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับพารามิเตอร์ต่างๆตรงกันกับการดิ่งขึ้นรูปแบบท่อ กลวงในบทที่ 7 ส่วนวิธีการที่ใช้ความดันที่ 1 bar การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับพารามิเตอร์ต่างๆตรงกันกับการดิ่งขึ้นรูปโดยใช้แมนเดรลของไหลในระยะเริ่มต้น ส่วนวิธีการที่ใช้ความดันที่ 2 bar การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับพารามิเตอร์ต่างๆตรงกันกับการดิ่งขึ้นรูปโดยใช้แมนเดรลของไหลในระยะกลาง และวิธีการที่ใช้ความดันที่ 3 bar การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับพารามิเตอร์ต่างๆตรงกันกับการดิ่งขึ้นรูปโดยใช้แมนเดรลของไหลในระยะสุดท้ายที่แสดงไว้ในบทที่ 10

[4] การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของภาคตัดตามแนวขวางและตามแนวแกนของ ISRCT โดยผลจาก 3D FEM ระหว่างการดิ่งขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีการนั้นมีความคล้ายคลึงกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของภาคตัดตามแนวขวางและตามแนวแกนของ ISRCT โดยการดิ่งขึ้นรูปด้วยแมนเดรลของไหล การวิเคราะห์ผลสรุปจากพารามิเตอร์ทั้ง 10 ค่านั้นผลลัพธ์ที่ได้นั้นสามารถนำไปใช้ในการเทียบเคียงสำหรับการพยากรณ์เส้นผ่าศูนย์กลางของ ISRCT สุดท้ายที่แมนย่าสำหรับกระบวนการผลิตท่อทองแดงที่มีสันขดอยู่ภายในขนาดเล็กพิเศษด้วยวิธีการดิ่งขึ้นรูปแบบแมนเดรลของไหลได้

ตารางที่ 11.1 การเปลี่ยนแปลง ISRCT หลังการดิ่งขึ้นรูปผ่านตาย 4 วิธีการ จำนวน 12 เทียบ

ลำดับ	พารามิเตอร์	มากที่สุด	มาก	ปานกลาง	น้อยที่สุด
1	ความเค้น von Mises	3 bar	2 bar	1 bar	0 bar
2	ความหนาของผนัง	0 bar	1 bar	2 bar	3 bar
3	ความกว้างฐานสัน	0 bar	1 bar	2 bar	3 bar
4	ความกว้างยอดสัน	0 bar	1 bar	2 bar	3 bar
5	ช่องว่างฐานสัน	3 bar	2 bar	1 bar	0 bar
6	ช่องว่างที่ยอดสัน	3 bar	2 bar	1 bar	0 bar
7	ความสูงสัน	3 bar	2 bar	1 bar	0 bar
8	ระยะพิตซ์สัน	3 bar	2 bar	1 bar	0 bar
9	ระยะกระจัด	3 bar	2 bar	1 bar	0 bar
10	มุมอีลิคส์สัน	3 bar	2 bar	1 bar	0 bar

จากตารางที่ 11.1 แสดงให้เห็นว่าการดิ่งขึ้นรูปที่มีความดันภายในของ ISRCT มีผลลัพธ์ออกมาใกล้เคียงกับการดิ่งขึ้นรูปโดยใช้แมนเดรลของไหลในบทที่ 10 เป็นเพราะว่าการเปลี่ยนแปลงของภาคตัดโปรไฟล์ (Cross-section profiles) ของสันและมุมอีลิคส์สันของ ISRCT โดยการดิ่งขึ้นรูปผ่านตายจำนวน 12 เทียนั้นมีลักษณะใกล้เคียงกัน

จากผลที่เกิดขึ้นในบทที่ 6, 7, 8, 9, 10 และ 11 ที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการผลิตท่อทองแดงขนาดเล็กพิเศษที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายในด้วยการใช้แมนเดรลของไหลในการดิ่งขึ้นรูปนั้นเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตท่อในอนาคต โดยบทสรุปที่ได้จากงานวิจัยนี้แสดงไว้ในบทที่ 12 ต่อไป

## บทที่ 12

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 12.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาเชิงทดลองเพื่อหาวิธีการผลิตท่อทองแดงมีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายใน (Inner spiral ribbed copper tube: ISRCT) ขนาดเล็กด้วยวิธีการดัดขึ้นรูปเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสีรูปของ ISRCT ที่เกิดขึ้นโดยใช้ผลการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองสถานการณ์ในระบบสามมิติด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถสรุปได้ ดังต่อไปนี้

12.1.1 ผลของการลดขนาด มิติของสัน และการเปลี่ยนแปลงแนวของท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในด้วยวิธีการดัดขึ้นรูปแบบทอกลวง

#### 12.1.1.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ ISRCT

ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ ISRCT ด้วยวิธีการดัดขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบทอกลวง จำนวนทั้งสิ้น 21 ตัวอย่าง ศึกษาพื้นที่ภาคตัดของสันและมุมอีติคส์ของสันภายในของ ISRCT ซึ่งผ่านการดัดขึ้นรูป ในขณะที่การลดลงของพื้นที่หน้าตัดต่อครั้ง (RA/P) มีค่าเท่ากับ 49.76% นั้น พบว่าเกิดรอยแยกที่ด้านบนของสันและรอยแตกที่ขอบด้านล่างของสันที่เกิดขึ้นในหลาย ๆ สันในเวลาเดียวกัน ขนาดมิติที่แตกต่างกันนั้นอาจจะไม่เป็นรูปแบบที่เหมือนกันก็ได้ในการกระจายตัวของรอยแยกทั่วทั้งบริเวณของสัน และขยายออกไปเรื่อยๆทั่วทั้งพื้นที่เป็นวงกว้าง ซึ่งการถูกแรงกระทำบีบอัดเข้าไปในสันและรูปทรงของสันจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของสันภายหลังการดัดขึ้นรูป

#### 12.1.1.2 การวิเคราะห์ความเค้น

12.1.1.2.1 ผลกระทบของอัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อเที่ยวของ ISRCT ด้วยวิธีการดัดขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบทอกลวง พบว่า ในการดัดขึ้นรูปผ่านตายในแต่ละเที่ยวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลดลงพื้นที่หน้าตัดของท่อนั้นลดลงตามไปด้วย จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อเที่ยวของ ISRCT นั้นลดลงแปรผันโดยตรงตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกที่ลดลงในแต่ละเที่ยวจาก 5.00 มิลลิเมตร ลดลงเหลือ 1.31 มิลลิเมตร ในเที่ยวสุดท้าย พื้นที่หน้าตัดต่อเที่ยวสูงสุดที่ 86.63 เปอร์เซ็นต์

12.1.1.2.2 ผลกระทบของแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปของ ISRCT ด้วยวิธีการดัดขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบทอกลวง พบว่า แรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปนั้นเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดโดยแรงต่ำสุดในการดัดขึ้นรูปในเที่ยวแรกการลดลงของพื้นที่หน้าตัดต่อครั้ง 2.52 เปอร์เซ็นต์ และแรงดึงสูงสุดในการดัดขึ้นรูปในเที่ยวสุดท้ายการลดลงของพื้นที่หน้าตัดต่อครั้ง 86.63 เปอร์เซ็นต์

12.1.1.2.3 ผลกระทบของอัตราส่วนความเค้นในการดัดขึ้นรูปของ ISRCT ด้วยวิธีการดัดขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบทอกลวง พบว่า กระบวนการดัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นรูปแบบท่อกลวงนั้นประกอบด้วยความเค้นดึงตามแนวแกน (Tensile stress) ความเค้นอัดตามแนวรัศมี (Radial stress) และความเค้นวงแหวน (Hoop stress) หรือความเค้นในแนวเส้นรอบวง (Circumferential tensile stress) อัตราส่วนความเค้นในการดึงขึ้นรูปขึ้นอยู่กับการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด อัตราส่วนความเค้นในการดึงขึ้นรูปนั้นจะมีค่ามากกว่า 1 เป็นเพราะว่าค่าความเค้นนั้นเพิ่มมากขึ้นตามเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดตลอดการดึงขึ้นรูปทั้ง 21 ชั้นงานทดสอบ อัตราส่วนความเค้นในการดึงขึ้นรูปสูงสุดในการทดลองเท่ากับ 1.26

### 12.1.1.3 การวิเคราะห์การลดลงของขนาดของเส้น

12.1.1.3.1 ผลกระทบของอัตราส่วนความหนาของผนัง ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบท่อกลวง พบว่า อัตราส่วนความหนาของผนังท่อจะเพิ่มขึ้นตามการลดลงของพื้นที่หน้าตัด เป็นเพราะว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ ISRCT นั้นลดลงในขณะที่ภายในท่อเองนั้นไม่มีความดันด้านจากภายในท่อและไม่มีความเค้นอัดในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของ ISRCT ดังนั้นความหนาของผนังท่อจึงเพิ่มขึ้น อัตราส่วนความหนาของผนังเพิ่มขึ้นจาก 1.032 ในการดึงเที่ยวแรก และเพิ่มขึ้นเป็น 1.257 ในเที่ยวสุดท้าย

12.1.1.3.2 ผลกระทบของอัตราส่วนความสูงของเส้น ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบท่อกลวง พบว่า อัตราส่วนความสูงของเส้นจะลดลงตามการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด เนื่องจากถูกความเค้นอัดในแนวรัศมีกระทำที่ผนังของ ISRCT ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดความหนาของผนังเพิ่มขึ้นและภายในท่อไม่มีแรงดันด้าน การเสียรูปจึงทำให้ส่วนที่เป็นช่องว่างที่ฐานสันเสียรูปมากกว่าที่บริเวณฐานสัน ดังนั้นความหนาที่ช่องว่างที่ฐานสันจะเพิ่มขึ้นมากกว่าส่วนที่เป็นสัน ในการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนความสูงลดลงจาก 0.961 ในการดึงเที่ยวแรก และลดลงเหลือ 0.082 ในเที่ยวสุดท้าย

12.1.1.3.3 ผลกระทบของอัตราส่วนความกว้างของฐานสัน ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบท่อกลวง พบว่า อัตราส่วนความกว้างของฐานสันจะลดลงเนื่องจากการความเครียดอัดในทิศทางตามแนวรัศมีของท่อและไม่มีความดันด้าน ทาน การเปลี่ยนรูปภายในของท่อด้วยเช่นกัน อัตราส่วนความกว้างของฐานสันลดลงจาก 0.985 ในการดึงเที่ยวแรก และลดลงเหลือ 0.012 ในเที่ยวสุดท้าย

12.1.1.3.4 ผลกระทบของอัตราส่วนความกว้างของยอดสัน ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบท่อกลวง พบว่า อัตราส่วนความกว้างของยอดสันจะลดลงเนื่องจากการความเครียดอัดในทิศทางตามแนวรัศมีของท่อและไม่มีความดันด้าน ทาน การเปลี่ยนรูปภายในของท่อด้วยเช่นกัน อัตราส่วนความกว้างของยอดสันลดลงจาก 0.971 ในการดึงเที่ยวแรก และลดลงเหลือ 0.089 ในเที่ยวสุดท้าย

### 12.1.1.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแนวแกนสันของ ISRCT

12.1.1.4.1 ผลกระทบของอัตราส่วนระยะพิตซ์ของเส้น ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบท่อกลวง พบว่า อัตราส่วนระยะพิตซ์ของเส้นนั้นจะลดลงอย่างต่อเนื่องเป็นเพราะว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ ISRCT ลดลงขณะที่ท่อนั้นได้รับความเค้นอัดในแนวรัศมีและเปลี่ยนแปลงเป็นความเค้นดึงตามแนวแกนทำให้ท่อเกิดระยะกระจัดมีผลให้

อัตราส่วนของระยะพิตซ์ของสันลดลง โดยที่อัตราส่วนระยะพิตซ์ของสันลดลงจาก 0.992 ในการดึงเที่ยวแรก และลดลงเหลือ 0.021 ในเที่ยวสุดท้าย

12.1.1.4.2 ผลกระทบของอัตราส่วนมุมฮีลิกส์ของสัน ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายครั้งเดียว (Single-pass drawing) แบบท่อกลวง พบว่า ระยะกระจัดในทิศทางตามแนวแกนจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเค้นดึงตามแนวแกนที่เปลี่ยนแปลงมาจากความเค้นอัดในแนวรัศมี เป็นผลให้อัตราส่วนมุมฮีลิกส์ของสันนั้นลดลงหลังจากเปอร์เซ็นต์ของ RAVP เพิ่มขึ้น อัตราส่วนมุมฮีลิกส์ของสันลดลงจาก 0.97 ในการดึงเที่ยวแรก และลดลงเหลือ 0.03 ในเที่ยวสุดท้าย

12.1.2 ผลของการผลิตท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในขนาดเล็กด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง

#### 12.1.2.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ ISRCT

12.1.2.1.1 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกลวง หลังจากการดึงขึ้นรูปทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลงผ่านพื้นที่ 12 เทียว โดยใช้ครั้งมุดตาย 12 องศา การลดพื้นที่หน้าตัดรวม (Total of the reduction area:  $R_t$ %) นั้นมีค่า 73.3 เปอร์เซ็นต์ หลังจากการดึงขึ้นรูปในเที่ยวที่ 9 พบว่ามีร่องที่ผิวด้านบนของยอดสันและรอยแยกขยายแนวกว้างออกที่ด้านข้างของแต่ละสันโดยที่พฤติกรรมที่เกิดขึ้นคล้ายคลึงกับในหัวข้อ 12.1.1.1.1

#### 12.1.2.2 การเปรียบเทียบ 7 พารามิเตอร์

12.1.2.2.1 ผลกระทบของความเค้นในการดึงขึ้นรูปของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกลวง พบว่า กระบวนการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงนั้นประกอบด้วยความเค้นใน 3 รูปแบบดังกล่าวมาข้างต้น ดังนั้นการดึงขึ้นรูปผ่านตายจำนวน 12 ครั้งจึงเป็นผลให้ขนาดของ  $R_t$ % ลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกครั้งที่ถูกดึงผ่านตาย ความเค้นในการดึงขึ้นรูปขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่หน้าตัด ความเค้นในการดึงขึ้นรูปนั้นจะมีค่า 35.11 เมกะปาสคาล ในการดึงผ่านตายเที่ยวแรกพื้นที่หน้าตัดลดลง 20.88 เปอร์เซ็นต์ และความเค้นในการดึงขึ้นรูปนั้นจะมีค่า 23.53 เมกะปาสคาล ในการดึงผ่านตายเที่ยวสุดท้ายพื้นที่หน้าตัดลดลง 2.22 เปอร์เซ็นต์

12.1.2.2.2 ผลกระทบของอัตราส่วนความหนาผนังท่อของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกลวง พบว่า อัตราส่วนความหนาผนังท่อเพิ่มขึ้นในแต่ละเที่ยวที่ดึงขึ้นรูปโดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกนั้นลดลง ความเครียดอัดที่เกิดขึ้นในท่อทิศทางตามแนวเส้นรอบวงนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความหนาผนังท่อ อัตราส่วนความหนาของผนังเพิ่มขึ้นจาก 1.011 ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 20.88 เปอร์เซ็นต์ ในการดึงเที่ยวแรก และเพิ่มขึ้นเป็น 1.073 ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 84.10 เปอร์เซ็นต์ ในเที่ยวสุดท้าย

12.1.2.2.3 ผลกระทบของ 5 พารามิเตอร์ ของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกลวง พบว่า อัตราส่วนความกว้างฐานสันท่อ อัตราส่วนความกว้างปลายสันท่อ อัตราส่วนความสูงสันท่อ อัตราส่วนระยะพิตซ์ของสันท่อ และอัตราส่วนมุมฮีลิกส์ของสันท่อนั้นจะลดลงคล้ายคลึงกันที่เกิดจากความเครียดอัดในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของท่อและไม่มีความดันภายในของท่อที่ต้านการเปลี่ยนรูปของท่อ โดยที่ค่าที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวมสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

84.10 เปอร์เซ็นต์ ค่าผลกระทบของอัตราส่วนทั้ง 5 พารามิเตอร์ อัตราส่วนความกว้างฐานสันเท่ากับ 0.630 อัตราส่วนความกว้างปลายสัน 0.615 อัตราส่วนความสูงสัน 0.639 อัตราส่วนระยะพิชของสัน 0.391 และอัตราส่วนมุมฮีลิกซ์ของสัน 0.385 ตามลำดับ

**12.1.3 อิทธิพลของความเค้นดึงขึ้นรูปในการลดพื้นที่หน้าตัดรวมและขนาดมิติของท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง**

#### 12.1.3.1 การวิเคราะห์ความเค้น

12.1.3.1.1 ผลกระทบของความเค้นในการดึงขึ้นรูปของ ISRCT ด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกลวง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลงผ่านพันไป 23 ครั้ง พบว่า กระบวนการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวงนั้นเป็นกระบวนการความเค้นใน 3 รูปแบบดังกล่าวมาข้างต้น ค่าสัมบูรณ์ของความเค้นจะเพิ่มขึ้นบนพื้นผิวและลดลงอย่างรวดเร็วจากฐานสันไปยังที่ปลายสัน ความเครียดเฉลี่ยในช่องว่างระหว่างสันนั้นสูงกว่าภายในพื้นที่ของสัน กรรมวิธีการผลิตของ ISRCT จะต้องพิจารณาความเค้นในการดึงขึ้นรูปต่อความเค้นคราก  $\sigma_u/\sigma_y$  ซึ่งเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการดึงขึ้นรูปแบบท่อกลวง การตรวจสอบค่าของ  $\sigma_u/\sigma_y$  ค่าที่ได้นั้นจะต้องมีค่าน้อยกว่า 1 การเสียรูปของท่อหลังจากการดึงขึ้นรูปผ่านตายนั้นจะอยู่ในช่วงอีลาสติก (Elastic range) เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อจะมีความเที่ยงตรงและแม่นยำ แต่เมื่อค่าของ  $\sigma_u/\sigma_y$  มีค่ามากกว่า 1 การเสียรูปของท่อหลังจากการดึงขึ้นรูปผ่านตายนั้นจะอยู่ในช่วงพลาสติก (Plastic range) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อไม่สามารถกำหนดได้ด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของตาย ISRCT เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ขณะที่ ISRCT ถูกดึงยึดผ่านตายแล้วไม่สปริงกลับตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของตายนั้นเอง เพราะฉะนั้นจากผลของการทดลองค่า  $\sigma_u/\sigma_y$  ควรจะต้องมีการลดพื้นที่หน้าตัดรวมน้อยกว่า 57 เปอร์เซ็นต์

#### 12.1.3.2 การเปลี่ยนรูปร่างของ ISRCT

12.1.3.2.1 พิจารณาผลกระทบของความหนาของผนังบวกความสูงสันต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อและเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวม พบว่า ความหนาของผนังท่อบวกกับความสูงของสันต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก  $[(t'_w + h'_r)/D]$  นั้นมีค่าเท่ากับ 0.50 คือ  $[(t'_w + h'_r)/D = 0.50]$  และค่าการลดพื้นที่หน้าตัดรวม 90.54 เปอร์เซ็นต์ ที่จุดดังกล่าวรูภายในท่อไม่สามารถส่งถ่ายของไหลในทุกกรณีโดยที่ปลายท่อนั้นปิด เมื่อ  $[(t'_w + h'_r)/D]$  มีค่าสูงกว่า 0.50 คือ  $[(t'_w + h'_r)/D > 0.50]$  ท่อจะเกิดการหักและแตกเร็วที่สุดในที่สุด

12.1.3.2.2 พิจารณาผลกระทบของความกว้างที่ฐานสันคูณด้วยจำนวนสันทั้งหมดภายในท่อหารด้วยความยาวตามแนวเส้นรอบวงที่ฐานสันของ ISRCT  $[w'_{nb}/(\pi d'_{nb}/n)]$  และเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวม พบว่า เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.83 มิลลิเมตร ขณะที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 75.78 เปอร์เซ็นต์ รูปร่างภาคตัดของ ISRCT นั้นระยะห่างระหว่างช่องว่างที่ฐานสันนั้นลดลงไปจนกระทั่งไม่มีช่องว่างเหลืออยู่เลย เมื่อนำเอาขนาดความกว้างที่ฐานสันคูณด้วยจำนวนสันทั้งหมดภายในท่อและหารด้วยความยาวตามแนวเส้นรอบวงที่ฐานสันของ ISRCT มีค่าเท่ากับ 1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$[w'_{rb}/(\pi d'_{rb}/n)=1.00]$  การถ่ายเทความร้อนจากบริเวณช่องว่างที่ฐานของสัณฐานนั้นจะหมดประสิทธิภาพลงทันที

12.1.3.2.3 พิจารณาผลกระทบของความกว้างที่ยอดสันคู่ด้วยจำนวนสันทั้งหมดภายในท่อหารด้วยความยาวตามแนวเส้นรอบวงที่ยอดสันของ ISRCT  $[w'_n/(\pi d'_n/n)]$  และเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวม พบว่า เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.64 มิลลิเมตร ขณะที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 79.88 เปอร์เซ็นต์ รูปร่างภาคตัดของ ISRCT นั้นระยะห่างระหว่างช่องว่างที่ยอดสันนั้นลดลงไปจนถึงไม่มีช่องว่างเหลืออยู่เลย ดังนั้นเมื่อนำเอาขนาดความกว้างที่ยอดสันคู่ด้วยจำนวนสันทั้งหมดภายในท่อและหารด้วยความยาวตามแนวเส้นรอบวงที่ยอดสันของ ISRCT มีค่าเท่ากับ 1.00  $[w'_n/(\pi d'_n/n)=1.00]$  บริเวณช่องว่างของยอดสันจะมีค่าเท่ากับท่อที่ไม่มีสันทั่วไป

12.1.3.2.4 พิจารณาผลกระทบของมุมเอียงของสันเกลียว ( $\psi$ ) ตามแนวแกนและเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวม พบว่า หลังจากที่ตั้งขึ้นรูปผ่านพันดาทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงเท่ากับ 1.83 มิลลิเมตร การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 75.78 เปอร์เซ็นต์ ทำให้มุม  $\psi$  มีค่าเป็นศูนย์องศา สอดคล้องกับสมการ  $\psi = [(180 \times (\tan^{-1}((w'_{rb} - w'_n)/2)/h'_r))]/\pi \times 2$  ในขณะที่มุม  $\psi$  ของท่อเริ่มต้นเท่ากับ 38 องศา การไหลของของไหลที่บริเวณพื้นผิวระหว่างร่องของสัณฐานนั้นเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) และเป็นผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนนั้นสูงชันมาก ซึ่งการตั้งขึ้นรูปผ่านดาในแต่ละเหลี่ยมมุม  $\psi$  กลับลดลงอย่างต่อเนื่องและประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนนั้นก็ลดลงตามไปด้วย โดยที่มุม  $\psi$  มีค่าเป็น 0 องศา การไหลของของไหลที่บริเวณพื้นผิวระหว่างร่องของสัณฐานนั้นเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบปั่นป่วนเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนนั้นลดลง

12.1.3.2.5 พิจารณาผลกระทบจากหัวข้อ 12.1.3.2.1 ถึง 12.1.3.2.4 พบว่า การตั้งขึ้นรูปของ ISRCT ด้วยวิธีการตั้งขึ้นรูปลดขนาดผ่านดาหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกกลาง ขนาดที่แม่นยำ ช่องว่างระหว่างบริเวณฐานของสันและบริเวณยอดสันตลอดจนมุมเอียงของสันตามแนวแกนนั้นอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้ดีนั้น ค่าการลดลงของพื้นที่ภาคตัดในการตั้งขึ้นรูป ISRCT จะต้องมีค่าน้อยกว่า 57 เปอร์เซ็นต์

12.1.4 การใช้โปรแกรม 3D FEM เพื่อตรวจสอบท่อทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวภายในขนาดเล็กพิเศษด้วยวิธีการตั้งขึ้นรูปแบบท่อกกลาง

#### 12.1.4.1 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

12.1.4.1.1 ค่าความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นจากการตั้งขึ้นรูปลดขนาดผ่านดาหลายครั้ง (Multi-passes drawing) แบบท่อกกลาง พบว่า ความเค้น von Mises เพิ่มขึ้นที่บริเวณโหนดต่างๆหลังจากผ่านกระบวนการตั้งขึ้นรูปจนถึง 12 เที้ยว ในการจำลองสถานการณ์ความเค้น von Mises นั้นสูงที่สุดเกิดที่จุดที่ 8 (โหนด 33885) ที่บริเวณขอบเขตของฐานสันและจุดที่มีค่าความเค้น von Mises ปานกลางได้แก่จุดที่ 1 และจุดที่ 2 (โหนด 512 และ 5973) ที่บริเวณขอบเขตของผิวด้านนอกของ ISRCT และที่มีค่าความเค้น von Mises ต่ำที่สุดได้แก่จุดที่ 4 (โหนด 5975) ที่กึ่งกลางความหนาผนังท่อ และจุดที่ 12 (โหนด 27043) ที่ขอบเขตบริเวณยอดสันตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12.1.4.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีผลกระทบต่อแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปอย่างมีนัยสำคัญ แรงที่กระทำจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ใช้สอบเทียบเป็นค่าที่แยกกันอย่างอิสระ 4 ค่า ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างตายและ ISRCT ( $\mu_{die/ISRCT}$ ) ได้แก่ 0.01, 0.02, 0.03 และ 0.04 ตามลำดับ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.02 เป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ถูกต้องระหว่างผลการทดลองและการจำลองสถานการณ์

12.1.4.1.3 ความกว้างที่ฐานสันค้อยๆลดลงระหว่างกระบวนการดึงขึ้นรูปแบบทอกลวงแบบการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง พบว่า ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ ISRCT ลดลง 1.64 มิลลิเมตร ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 77.36 เปอร์เซ็นต์ ในการดึงขึ้นรูปผ่านตายในเทียวกที่ 10 ผลปรากฏว่าความกว้างที่ฐานสันแนบชิดติดกัน ความกว้างที่ฐานสันเริ่มต้นที่ 0.18 มิลลิเมตร ในช่วงเริ่มต้นและลดลงเหลือ 0.0472 ในเทียวกที่ 10

12.1.4.1.4 ความกว้างที่ยอดสันค้อยๆลดลงระหว่างกระบวนการดึงขึ้นรูปแบบทอกลวงแบบการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง พบว่า ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ ISRCT ลดลง 1.47 มิลลิเมตร ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 80.97 เปอร์เซ็นต์ ในการดึงขึ้นรูปผ่านตายไปในเทียวกที่ 11 ผลปรากฏว่าความกว้างที่ยอดสันแนบชิดติดกัน ความกว้างที่ยอดสันเริ่มต้นที่ 0.1 มิลลิเมตร ในช่วงเริ่มต้นและลดลงเหลือ 0.0406 ในเทียวกที่ 11

12.1.4.1.5 ช่องว่างฐานสันนั้นเกิดจากการเสีรูปที่ร่องสันมากกว่าพื้นที่ของสันร่องที่อยู่ตามแนวของสันจะเปลี่ยนแปลงมีลักษณะของร่องสันที่แคบลงในรูปแบบเป็นเชิงลบ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ ISRCT ลดลง 2.05 มิลลิเมตร ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 68.81 เปอร์เซ็นต์ ในการดึงขึ้นรูปผ่านตายไปในเทียวกที่ 8 พบว่า จะปรากฏจุดเริ่มต้นของร่องที่กลางผิวด้านบนของยอดสันและรอยแยกที่ด้านข้างของแต่ละสัน ช่องว่างที่เกิดขึ้นนั้นจะบิดตัวพับที่ในบริเวณขอบสันยกเว้นในช่วงกลางของช่องว่างระหว่างสัน และขนาดมิติเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ขอบสันด้วย ช่องว่างฐานสัน เริ่มต้นที่ 0.12 มิลลิเมตร ในช่วงเริ่มต้นและลดลงเหลือ 0.002 ในเทียวกที่ 8

12.1.4.1.6 ค่าช่องว่างยอดสันนั้นเกิดขึ้นจากความเครียดบนช่องว่างยอดสันและจะแผ่ขยายกลมกลืนเข้าด้วยกันตลอดทั่วทั้งขอบเขตระหว่างร่องสันและส่วนที่เป็นพื้นที่สันของ ISRCT ความเครียดเฉลี่ยและการเสีรูปในช่องว่างของสันนั้นจึงรุนแรงมากขึ้นกว่าที่บริเวณส่วนที่เป็นพื้นที่ของสันในรูปแบบเป็นเชิงลบ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ ISRCT ลดลง 1.47 มิลลิเมตร การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 80.97 เปอร์เซ็นต์ ในการดึงขึ้นรูปผ่านตายไปในเทียวกที่ 11 ช่องว่างยอดสันหายไปและไม่มีช่องว่างหลงเหลืออยู่อีกเลย ช่องว่างยอดสัน เริ่มต้นที่ 0.2 มิลลิเมตร ในช่วงเริ่มต้นและลดลงเหลือ 0.0049 ในเทียวกที่ 11

12.1.4.1.7 ค่าความสูงของสันเกิดจากการเสีรูปในส่วนที่เป็นสัน เนื่องจากไม่มีความต้านทานจากแรงดันภายในช่วงที่มีการเสีรูปของ ISRCT ในช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติก (Elastic-plastic) ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดความหนาของผนังเพิ่มขึ้นและภายในท่อไม่มีแรงดันต้านการเสีรูปจึงทำให้ส่วนที่เป็นช่องว่างที่ฐานสันเสีรูปมากกว่าที่บริเวณฐานสัน ดังนั้นทิศทางในแนวเส้นรอบวงตลอดแนวความสูงของพื้นที่สันนั้นถูกบีบอัด ความหนาที่ช่องว่างที่ฐานสันจะเพิ่มขึ้นมากกว่า

ส่วนที่เป็นสัน อย่างไรก็ตามความสูงของสันนั้นจะลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาเดียวกัน ความสูงของสันนั้นจะมีค่าเท่ากับ 0.0605 มิลลิเมตรในการดิ่งขึ้นรูปผ่านตาย 12 เทียว

12.1.4.1.8 ค่าระยะพิชชีสันนั้นลดลงอย่างต่อเนื่องโดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลงสอดคล้องกับการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม โดยความเค้นอัดในท่อตามแนวเส้นรอบวงของ ISRCT นั้นเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับจำนวนของการดิ่งขึ้นรูปผ่านตายในแต่ละเทียวที่เพิ่มจำนวนครั้งขึ้น ระยะพิชชีสันนั้นจะมีค่าเท่ากับ 0.0956 มิลลิเมตรในการดิ่งขึ้นรูปผ่านตาย 12 เทียว

12.1.4.1.9 ค่าระยะกระจัดที่เกิดจากการยึดตัวของ ISRCT ที่โหนดที่ระดับของ วัตถุอิสระ (Degree of freedom) โดยที่ระยะกระจัดจะเพิ่มขึ้นในแต่ละเทียวตามจำนวนครั้งที่ ISRCT ผ่านตายในการขึ้นรูป เนื่องจากความเค้นดึงตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงที่โหนดในลักษณะของระยะกระจัดนั้นจะมีค่าเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตรในการดิ่งขึ้นรูปผ่านตาย 12 เทียว

12.1.4.1.10 ค่ามุมอีลิคส์สันจะลดลงหลังจากการดิ่งขึ้นรูปผ่านตายทั้งสันครบ 12 เทียว ขนาดมุมอีลิคส์สันที่ลดลงนั้นเป็นเพราะว่าระยะกระจัดตามแนวแกนมีทิศทางเดียวกันกับมุมอีลิคส์ของสันเกลียวด้วย มุมอีลิคส์ที่ฐานสันและที่ยอดสันทั้งคู่เปลี่ยนแปลงไปในเชิงลบ มุมอีลิคส์ของสันจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและจะลู่เข้าจนมีค่าเป็นศูนย์ในการดิ่งขึ้นรูปผ่านตาย 12 เทียว

12.1.4.1.11 ในการจำลองการทำงานอัตราส่วนความเค้นในการดิ่งขึ้นรูปต่อความเค้นครากและเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดรวมในการผลิตท่อ ISRCT ที่ใช้วิธีการดิ่งขึ้นรูปแบบไม่ใช้แมนเดรล จากการจำลองการทำงานค่าของ  $\sigma_d / \sigma_c$  จะต้องมีค่าน้อยกว่า 1 ที่ค่า  $R_p$  % เท่ากับ 56.41 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในเบทที่ 8 ซึ่งมีค่า  $R_p$  % เท่ากับ 57 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นอัตราส่วนความเค้นในการดิ่งขึ้นรูปต่อความเค้นครากที่ไม่ใช้แมนเดรลจึงไม่ควรลดค่า  $R_p$  % ลงโดยประมาณไม่มากกว่า 57 เปอร์เซ็นต์

12.1.4.1.12 การเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของตัวแปรต่างๆที่ทำการศึกษา ทั้งสิ้นที่กล่าวมาในหัวข้อนี้ แสดงให้เห็นว่าการดิ่งขึ้นรูปแบบท่อกลวงแบบการดิ่งขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง ให้ผลลัพธ์ของตรวจสอบออกมาว่าการดิ่งขึ้นรูปท่อ ISRCT ผ่านตายในครั้งที่ 8 ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 68.81 เปอร์เซ็นต์ เป็นครั้งและเปอร์เซ็นต์ที่ดีที่สุดที่จะสามารถทำการลดพื้นที่หน้าตัดที่ทำให้พารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดีตามวัตถุประสงค์ของการผลิตท่อ ISRCT

12.1.5 การประดิษฐ์ท่อทองแดงมีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็กโดยการดิ่งขึ้นรูปด้วยแมนเดรลของไหล

#### 12.1.5.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างภาคตัด ISRCT

12.1.5.1.1 การลดขนาดของท่อด้วยการดิ่งขึ้นรูป ISRCT 4 วิธี คือ วิธีการดิ่งขึ้นรูปท่อโดยไม่ใช้แมนเดรล (Tube sinking) วิธีการดิ่งขึ้นรูปท่อโดยใช้น้ำ (Water) เป็นแมนเดรล วิธีการดิ่งขึ้นรูปท่อโดยใช้น้ำมัน (Oil) เป็นแมนเดรล และวิธีการดิ่งขึ้นรูปท่อโดยใช้ขี้ผึ้ง (Wax) เป็นแมนเดรล การดิ่งขึ้นรูปท่อโดยไม่ใช้แมนเดรลนั้นไม่เหมาะสมกับการผลิตท่อทองแดงขนาดเล็กที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายในของท่อเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมีค่าสูงมาก แตกต่างจากกรณีใช้น้ำ น้ำมันและขี้ผึ้งเป็นแมนเดรลที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภาคตัดที่น้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 12.1.5.2 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความเค้นดึงขึ้นรูป

12.1.5.2.1 ในแต่ละวิธีการดึงขึ้นรูปที่อัตราส่วนความเค้นดึงขึ้นรูปเกิดขึ้นจากความเค้นตามแนวแกน ความเค้นในแนวรัศมี และความเค้นจากความดันภายในท่อ ความเค้นตามแนวแกนนั้นเป็นความเค้นดึงซึ่งเกิดขึ้นบนพื้นที่ของผนังท่อและสันเกลียว ความเค้นในแนวรัศมีนั้นเป็นความเค้นอัดที่เกิดขึ้นในโซนของผนังท่อ ส่วนความเค้นที่เกิดจากความดันภายในนั้นเป็นความเค้นอัด พบว่าวิธีการดึงขึ้นรูปท่อแบบไม่ใช้แมนเดรลนั้นอัตราส่วนความเค้นดึงขึ้นรูปจะมีค่าต่ำที่สุด ในขณะที่กรณีใช้ของไหล (น้ำและน้ำมัน) เป็นแมนเดรลจะมีอัตราส่วนความเค้นดึงขึ้นรูปสูงชันคล้ายคลึงกัน และกรณีใช้ซีฟิ่งเป็นแมนเดรลนั้นจะมีอัตราส่วนความเค้นดึงขึ้นรูปสูงสุด

### 12.1.5.3 การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการดึงขึ้นรูป ISRCT 4 วิธี

12.1.5.3.1 การดึงขึ้นรูปท่อแบบไม่ใช้แมนเดรล อัตราส่วนความหนาของผนังเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการดึงขึ้นรูปในแต่ละเที่ยว ทั้งนี้เพราะว่าขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลงนั้นท่อได้รับความเครียดอัดเป็นอย่างมากตามแนวทิศทางของเส้นรอบวงจึงส่งผลให้ผนังท่อหนาขึ้น ดังนั้นวิธีการดึงขึ้นรูปท่อแบบไม่ใช้แมนเดรลจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้สำหรับดึงขึ้นรูปท่อที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในเนื่องจากความหนาของผนังเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากจนเป็นสาเหตุให้เกิดการขัดขวางการไหลของของไหลภายในท่อขนาดเล็กได้

12.1.5.3.2 การดึงขึ้นรูปท่อแบบใช้ซีฟิ่งเป็นแมนเดรลนั้นอัตราส่วนความหนาของผนังท่อไม่เปลี่ยนแปลงมากนักภายหลังจากการดึงขึ้นรูป ผลที่ได้ออกมาค่อนข้างดี แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ก็มีความยุ่งยากสำหรับการนำซีฟิ่งออกจากท่อภายหลังจากการดึงขึ้นรูปจึงเป็นการยากที่จะนำมาใช้ในกระบวนการผลิตท่อที่มีความยาวมากๆ

12.1.5.3.3 การดึงขึ้นรูปท่อแบบใช้ของไหลเป็นแมนเดรลนั้นภายในท่อถูกบรรจุด้วยน้ำหรือน้ำมันอยู่เต็มบริเวณปลายท่อปิดสนิท อัตราส่วนความหนาของผนังท่อหลังจากการดึงขึ้นรูปเพิ่มขึ้นไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของท่อเริ่มต้นแม้หลังจากผ่านการดึงขึ้นรูปซ้ำหลายๆเที่ยว สิ่งที่สำคัญ คือ การเอาของไหลออกจากท่อภายหลังจากการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีการตัดปลายทั้งสองข้างของท่อออก วิธีนี้สามารถทำได้ง่ายกว่าในกรณีของการดึงขึ้นรูปท่อแบบใช้ซีฟิ่งเป็นแมนเดรล

12.1.5.3.4 อัตราส่วนความกว้างของฐานสันนั้นมีแนวโน้มที่จะลดลงในการดึงขึ้นรูปท่อในทุกวิธีการที่กล่าวมาข้างต้น เนื่องมาจากความเค้นอัดจะเกิดขึ้นตามแนวเส้นรอบวงของท่อและจะเกิดขึ้นมากกับวิธีการดึงขึ้นรูปท่อแบบไม่ใช้แมนเดรล ทั้งนี้เป็นเพราะว่าไม่มีความต้านทานที่เกิดจากความดันภายในท่อซึ่งแตกต่างจากในกรณีใช้ซีฟิ่งและของไหลเป็นแมนเดรลซึ่งมีความดันภายใน ซีฟิ่งและของไหลที่อยู่ภายในผนังของท่อจึงทำหน้าที่ให้ความดันแก่ผนังด้านในของท่อหรือเป็นแมนเดรลนั่นเอง ซึ่งความดันดังกล่าวมีทิศทางในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวของผนังท่อที่สัมผัสกับของไหลและซีฟิ่ง ผลของการเปลี่ยนแปลงจะมีค่าน้อยที่สุดในกรณีการดึงขึ้นรูปท่อแบบใช้ซีฟิ่งเป็นแมนเดรล ตามมาด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปท่อแบบใช้ของไหล (น้ำและน้ำมัน) เป็นแมนเดรล

12.1.5.3.5 อัตราส่วนความกว้างของยอดสัน วิธีการดึงขึ้นรูปท่อแบบไม่ใช้แมนเดรลนั้นความกว้างของยอดสันเกลียวจะมากกว่าในกรณีการดึงขึ้นรูปท่อแบบใช้ของไหลและซีฟิ่งเป็นแมนเดรล ทั้งนี้เพราะว่าอิทธิพลของความดันภายในท่อมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปด้วยเช่นกัน ผลของ

การเปลี่ยนแปลงจะมีค่าน้อยที่สุดในกรณีการดึงขึ้นรูปแบบใช้ซีฟิ่งเป็นแมนเดรล ตามมาด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบใช้ของไหล (น้ำและน้ำมัน) เป็นแมนเดรล

12.1.5.3.6 อัตราส่วนความสูงของสันเกลียวมีความคล้ายคลึงกับอัตราส่วนความกว้างของฐานสันและอัตราส่วนความกว้างของยอดสันสำหรับกรณีการดึงขึ้นรูปแบบใช้ของไหลและซีฟิ่งเป็นแมนเดรล โดยความดันภายในนั้นต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดีกว่าวิธีการดึงขึ้นรูปแบบไม่ใช่แมนเดรล

12.1.5.3.7 อัตราส่วนระยะพิตช์ของสันสำหรับกรณีการดึงขึ้นรูปแบบไม่ใช่แมนเดรลนั้นมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเนื่องจากความหนาของผนังได้เพิ่มขึ้น อัตราส่วนระยะพิตช์ของสันเกลียวลดลงสำหรับการดึงขึ้นรูปแบบใช้ของไหลและซีฟิ่งเป็นแมนเดรลซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังน้อยกว่า ความต้านทานที่เกิดจากความดันภายในท่อทำให้การเปลี่ยนแปลงของระยะพิตช์ลดลง

12.1.5.3.8 อัตราส่วนมุมฮิลิกส์ของสันเกลียวภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นหลังจากการดึงขึ้นรูปตามเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัด ขณะที่ท่อเริ่มต้นมีมุมฮิลิกส์ของสันเกลียวภายใน 38 องศาหลังจากที่ผ่านการขึ้นรูปผ่านด้วยในแต่ละเที่ยวทำให้มุมฮิลิกส์ของสันเกลียวภายในลดลง พบว่ามุมฮิลิกส์ของสันเกลียวภายในจากการดึงขึ้นรูปแบบไม่ใช่แมนเดรลลดลงมากกว่าการเปลี่ยนแปลงมุมฮิลิกส์ของสันเกลียวภายในที่เกิดจากการดึงขึ้นรูปแบบใช้ของไหลและซีฟิ่งเป็นแมนเดรลเมื่อเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ขนาดใกล้เคียงกัน กรณีการดึงขึ้นรูปแบบไม่ใช่แมนเดรลนั้นมุมฮิลิกส์ของสันเกลียวภายในจะเป็นศูนย์เมื่อผ่านการดึงขึ้นรูปมากกว่า 9 เที่ยวขึ้นไป และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการดึงขึ้นรูปแบบใช้ของไหลและซีฟิ่งเป็นแมนเดรล มุมฮิลิกส์ของสันเกลียวภายในจะเป็นศูนย์เมื่อผ่านการดึงขึ้นรูปมากกว่า 12 เที่ยวขึ้นไป

12.1.5.3.8 พารามิเตอร์ต่างๆสำหรับกรณีใช้น้ำเป็นแมนเดรลนั้นมีความคล้ายคลึงกันกับกรณีใช้น้ำมันและซีฟิ่งเป็นแมนเดรล แต่การนำแมนเดรลซึ่งเป็นน้ำออกจากท่อภายหลังการดึงขึ้นรูปนั้นทำได้ง่ายกว่าน้ำมันและซีฟิ่ง ดังนั้นการดึงขึ้นรูปโดยใช้น้ำซึ่งเป็นของไหลทำหน้าที่เป็นแมนเดรลจึงเหมาะสมที่สุด เนื่องจากไม่ต้องทำความสะอาดภายในท่อหลังจากผ่านการดึงขึ้นรูป ดังนั้นการดึงขึ้นรูปโดยใช้น้ำเป็นแมนเดรลจึงเหมาะสมที่สุดในกระบวนการประดิษฐ์ท่อทองแดงขนาดเล็กที่มีสันขดเป็นเกลียวอยู่บนผิวภายใน

12.1.6 การศึกษาอิทธิพลของความดันภายในที่มีต่อการดึงขึ้นรูปท่อทองแดงมีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายในขนาดเล็ก

12.1.6.1 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

12.1.6.1.1 การเสียรูปของสันและช่องว่างระหว่างการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing) โดยวิธีการกำหนดความดันภายในที่ระหว่างการดึงขึ้นรูปที่ความดัน 0 bar, 1 bar, 2 bar และ 3 bar ตามลำดับ จากนั้นวิเคราะห์ผลด้วยการเทียบเคียงกับการเสียรูปที่ได้จากวิธีการทดลองการใช้แมนเดรลของไหล (น้ำ) เป็นแมนเดรล ปรากฏว่าการเสียรูปของสันและมุมฮิลิกส์ของสันด้วยการใช้ของไหลเป็นแมนเดรลนั้นมีค่าใกล้เคียงกับการดึงขึ้นรูปแบบทอกลวง (0 bar) ในช่วงเริ่มต้นเนื่องจากในช่วงแรกของการดึงขึ้นรูปไม่มีผลกระทบกับความดันในท่อแต่หลังจากการดึงขึ้นรูปผ่านไปเที่ยวที่ 3 เป็นต้นไป การเสียรูปของสันและมุมฮิลิกส์เริ่มมีแนวโน้มใกล้เคียงกับวิธีการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานการณ์แบบวิธีที่ 2 (1 bar) หลังจากนั้นการเสียรูปจะเข้าใกล้วิธีที่ 3 (2 bar) ตั้งแต่เที่ยวที่ 6 และวิธีที่ 4 (3 bar) ในเที่ยวที่ 10 ตามลำดับ

12.1.6.1.2 ความเค้น von Mises ตลอดภาคตัดของ ISRCT โครงร่างตาข่ายของโหนดสามารถวัดค่าการกระจายความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นได้ ในกรณีที่เป็นเอลิเมนต์ของตายจะแสดงผลเป็นสีเทาซึ่งไม่มีผลกระทบต่อความเค้นมากกระทำเป็นเพราะว่าตายนั้นถูกกำหนดว่ามีผิวเป็นวัตถุเกร็ง ส่วนผลที่เกิดกับชิ้นงานจำลองที่เป็น ISRCT หลังกระบวนการดึงขึ้นรูปผ่านตายตั้งแต่เที่ยวที่ 1 ถึง 12 โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS จะทำการประเมินผลค่าความเค้น von Mises และแสดงผลค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากการดึงขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีการในการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวข้างต้น มีแนวโน้มที่เป็นไปในแนวทิศทางเดียวกัน โดยความเค้น von Mises นั้นจะมีค่าสูงที่สุดในโซนที่อยู่บริเวณขอบด้านข้างของสันที่จุดที่ 13, 14, 15, 16, 18, 19, 20 และ 21 ตามลำดับ โซนที่มีค่าความเค้น von Mises ในระดับปานกลางนั้นอยู่บริเวณกึ่งกลางแนวแกนของสันจนถึงบริเวณยอดสันที่จุดที่ 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12 ตามลำดับ ส่วนโซนที่มีระดับความเค้น von Mises ต่ำสุดอยู่ที่จุดที่ 1, 2, 3, 4, 5 เริ่มจากที่ผิวด้านนอกของผนังท่อเข้าไปภายในผนังจนถึงหนึ่งในสามของความหนาผนังและที่จุดที่เป็นกึ่งกลางของระยะห่างที่ฐานสันภายในผนังของ ISRCT ด้านใน ถ้าพิจารณาเจาะลึกลงไปในแต่ละโหนดเรียงลำดับตามระดับของความเค้นทั้ง 21 จุดตามภาคตัดมิติของ ISRCT จากการดึงขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีการ เรียงลำดับจากความเค้น von Mises สูงสุดไปจนถึงต่ำสุด ความเค้น von Mises สูงที่สุดเกิดที่จุดที่ 13 (โหนด 26621) จากนั้นเรียงลำดับจากสูงไปต่ำเริ่มที่จุดที่ 16 (โหนด 26622) จุดที่ 18 (โหนด 26623) จุดที่ 21 (โหนด 26624) จุดที่ 12 (โหนด 27043) จุดที่ 14 (โหนด 27044) จุดที่ 15 (โหนด 27045) จุดที่ 19 (โหนด 27047) จุดที่ 20 (โหนด 27048) จุดที่ 10 (โหนด 33686) จุดที่ 11 (โหนด 33872) จุดที่ 8 (โหนด 33885) จุดที่ 7 (โหนด 33757) จุดที่ 9 (โหนด 33875) จุดที่ 6 (โหนด 390) จุดที่ 1 (โหนด 512) จุดที่ 2 (โหนด 5973) จุดที่ 3 (โหนด 5974) จุดที่ 4 (โหนด 5975) จุดที่ 5 (โหนด 5976) และต่ำที่สุดที่จุดที่ 17 (โหนด 27046) ตามลำดับ

12.1.6.1.3 ความหนาของผนังท่อ ISRCT เพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งของการดึงขึ้นรูปผ่านตายในแต่ละเที่ยวแต่จะเพิ่มขึ้นไม่เท่ากันโดยที่ความดัน 0 bar ความหนาของผนังท่อ ISRCT จะเพิ่มขึ้นมากที่สุดและจะลดลงตามความดันภายในที่เพิ่มขึ้น 1 bar, 2 bar และ 3 bar ตามลำดับ

12.1.6.1.4 ความกว้างฐานสันค่อยๆลดลงทีละน้อยๆระหว่างกระบวนการดึงขึ้นรูปในกรณีที่ไม่มีความดันภายในท่อ (0 bar) การดึงขึ้นรูปผ่านตายในหลายๆเที่ยว ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ ISRCT ลดลง 1.64 มิลลิเมตร ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 77.36 เปอร์เซ็นต์ ในการดึงขึ้นรูปผ่านตายไปในเที่ยวที่ 10 ผลปรากฏว่าความกว้างที่ฐานสันแนบชิดติดกัน แต่เมื่อความดันเพิ่มขึ้นเป็น 1 bar, 2 bar และ 3 bar ตามลำดับ ความกว้างที่ฐานสันจะมีขนาดแคบลงได้อีกเนื่องจากความดันภายในของ ISRCT มีแรงกระทำที่ขอบของสันและบีบอัดให้แนวสันมีขนาดแคบลงเป็นผลให้ความกว้างที่ฐานสันนั้นลดลงได้อีก

12.1.6.1.5 ความกว้างที่ยอดสันก็จะลดลงเกิดขึ้นเนื่องมาจากความเครียดอัดในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของ ISRCT และต่อต้านการเปลี่ยนรูปของท่อด้วยจึงทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรขึ้นได้เช่นเดียวกัน ในกรณีที่ไม่มีความดันภายในท่อ (0 bar) การดึงขึ้นรูปผ่านตายในหลายๆเที่ยว

ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ ISRCT ลดลง 1.47 มิลลิเมตร ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 80.97 เปอร์เซ็นต์ ในการดึงขึ้นรูปผ่านตายไปในเที่ยวที่ 11 ผลปรากฏว่าความกว้างที่ยอดสันแนบชิดติดกัน แต่เมื่อความดันเพิ่มขึ้นเป็น 1 bar, 2 bar และ 3 bar ตามลำดับ ความกว้างที่ยอดสันจะมีขนาดแคบลงได้อีก เนื่องจากความดันภายในของ ISRCT มีแรงกระทำที่ขอบของสันและบีบอัดให้แนวสันมีขนาดแคบลงเป็นผลให้ความกว้างที่ยอดสันนั้นลดลงได้อีกเช่นเดียวกัน

12.1.6.1.6 ค่าช่องว่างฐานสันนั้นเกิดจากการเสียรูปที่ร่องสันมากกว่าพื้นที่ของสัน ร่องที่อยู่ตามแนวของสันจะเปลี่ยนแปลงมีลักษณะของร่องสันที่แคบลงในรูปแบบเป็นเชิงลบ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ ISRCT ลดลง 2.05 มิลลิเมตร ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 68.81 เปอร์เซ็นต์ ในการดึงขึ้นรูปผ่านตายไปในเที่ยวที่ 8 ปรากฏจุดเริ่มต้นของร่องที่กลางผิวด้านบนของยอดสันและรอยแยกที่ด้านข้างของแต่ละสัน ช่องว่างที่เกิดขึ้นนั้นจะบิดตัวพบบทในบริเวณขอบสันยกเว้นในช่วงกลางของช่องว่างระหว่างสัน ขนาดมิติเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ขอบสันด้วย ขนาดมิติจะเพิ่มขึ้นด้วยการดึงขึ้นรูปแบบที่ไม่มีความดันภายในที่ 0 bar) แต่เมื่อความดันเพิ่มขึ้นเป็น 1 bar, 2 bar และ 3 bar ตามลำดับ ช่องว่างฐานสันจะมีขนาดกว้างขึ้นได้อีกเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีความดันภายใน เนื่องจากความดันภายในของ ISRCT มีแรงกระทำที่ขอบของสันและบีบอัดให้แนวสันมีขนาดแคบลงเป็นผลให้ช่องว่างฐานสันเพิ่มขึ้น

12.1.6.1.7 ค่าช่องว่างยอดสันนั้นเกิดขึ้นจากความเครียดบนช่องว่างยอดสันและจะแผ่ขยายกลมกลืนเข้าด้วยกันตลอดทั่วทั้งขอบเขตระหว่างร่องสันและส่วนที่เป็นพื้นที่สันของ ISRCT ความเครียดเฉลี่ยและการเสียรูปในช่องว่างของสันนั้นจึงเข้มข้นมากขึ้นกว่าที่บริเวณส่วนที่เป็นพื้นที่ของสันในรูปแบบเป็นเชิงลบ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ ISRCT ลดลง 1.47 มิลลิเมตร ที่การลดพื้นที่หน้าตัดรวม 80.97 เปอร์เซ็นต์ ในการดึงขึ้นรูปผ่านตายไปในเที่ยวที่ 11 ช่องว่างยอดสันหายไปและไม่มีช่องว่างหลงเหลืออยู่อีกเลย แต่เมื่อความดันเพิ่มขึ้นเป็น 1 bar, 2 bar และ 3 bar ตามลำดับ ช่องว่างยอดสันจะมีขนาดกว้างขึ้นเพิ่มขึ้นได้อีกเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีความดันภายใน เนื่องจากความดันภายในของ ISRCT มีแรงกระทำที่ขอบของสันและบีบอัดให้แนวสันมีขนาดแคบลงเป็นผลให้ช่องว่างยอดสันเพิ่มขึ้น

12.1.6.1.8 ค่าความสูงของสันเกิดจากการเสียรูปในส่วนที่เป็นสัน เนื่องจากไม่มีความต้านทานจากแรงดันภายใน (0 bar) ช่วงที่มีการเสียรูปของ ISRCT ในช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติก (Elastic-plastic) ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดความหนาของผนังเพิ่มขึ้นและภายในที่ไม่มีแรงดันต้านการเสียรูปจึงทำให้ส่วนที่เป็นช่องว่างที่ฐานสันเสียรูปมากกว่าที่บริเวณฐานสัน ดังนั้นทิศทางในแนวเส้นรอบวงตลอดแนวความสูงของพื้นที่สันนั้นถูกบีบอัดความหนาที่ช่องว่างที่ฐานสันจะเพิ่มขึ้นมากกว่าส่วนที่เป็นสัน อย่างไรก็ตามความสูงของสันนั้นจะลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาเดียวกัน สำหรับในกรณีความดันภายใน ISRCT เพิ่มขึ้นเป็น 1 bar, 2 bar และ 3 bar ตามลำดับ ความสูงของสันมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากความดันส่วนใหญ่กระทำที่ขอบด้านข้างมากกว่าที่ยอดสันเป็นผลให้ความเค้นตามแนวแกนของสันเป็นความเค้นดึงที่สูงขึ้นมากกว่าที่ไม่มีแรงดัน

12.1.6.1.9 ค่าระยะพิชิตซ์สันนั้นลดลงอย่างต่อเนื่องโดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลงสอดคล้องกับการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม โดยความเค้นอัดในท่อตามแนวเส้นรอบวงของ

ISRCT นั้นเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับจำนวนของการดึงขึ้นรูปผ่านตายในแต่ละเที่ยวที่เพิ่มจำนวนครั้งขึ้น ในกรณีที่ไม่มีความดันภายในท่อ (0 bar) ระยะพิทช์ของสันจะลดลงมากกว่าในกรณีความดันภายใน ISRCT เพิ่มขึ้นเป็น 1 bar, 2 bar และ 3 bar ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อความดันภายในท่อเพิ่มสูงขึ้นจะมีความดันด้านที่ผิวสัมผัสภายในทำให้การเสียรูปบริเวณสันของ ISRCT เกิดขึ้นน้อยกว่าและเป็นผลให้ระยะพิทช์เปลี่ยนแปลงน้อยกว่าในกรณีที่ไม่มีความดันด้านอยู่ภายในด้วยเช่นกัน

12.1.6.1.10 ค่าระยะกระจัดที่เกิดจากการยืดตัวของ ISRCT ที่โหนดที่ระดับของ วัตดูอิสระ (Degree of freedom) โดยที่ระยะกระจัดจะเพิ่มขึ้นในแต่ละเที่ยวตามจำนวนครั้งที่ ISRCT ผ่านตายในการขึ้นรูป เนื่องจากความเค้นดึงตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงที่โหนดในลักษณะของระยะกระจัดนั้นจะมีค่าเท่ากับ 0.051197 มิลลิเมตร ในกรณีที่ไม่มีความดันภายในท่อ (0 bar) ในกรณีความดันภายใน ISRCT เพิ่มขึ้นเป็น 1 bar, 2 bar และ 3 bar ระยะกระจัดของโหนดจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.079801 มิลลิเมตร 0.07847 มิลลิเมตร และ 0.079783 มิลลิเมตร ตามลำดับ

12.1.6.1.11 ค่ามุมฮิลิกส์สันจะลดลงหลังจากการดึงขึ้นรูปผ่านตายทั้งสี่รอบ 12 เที่ยว ขนาดมุมฮิลิกส์สันที่ลดลงนั้นเป็นเพราะว่าระยะกระจัดตามแนวแกนมีทิศทางเดียวกันกับมุมฮิลิกส์ของสันเกลียวด้วย มุมฮิลิกส์ที่ฐานสันและที่ยอดสันทั้งคู่เปลี่ยนแปลงไปในเชิงลบ ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ ในกรณีที่ไม่มีความดันภายใน ISRCT (0 bar) และเพิ่มขึ้นเป็น 1 bar, 2 bar และ 3 bar นั้นมุมฮิลิกส์ของสันจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและจะถูกรู้เข้าจนมีค่าเป็นศูนย์ในเวลาดึงขึ้นรูปผ่านตายครบ 12 เที่ยวมีลักษณะใกล้เคียงกัน

12.1.6.1.12 การเปรียบเทียบกับวิธีการดึงขึ้นรูปโดยใช้แมนเดรลของไหล (Fluid mandrel) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของภาคตัดตามแนวขวางและตามแนวแกนของ ISRCT โดยผลจาก 3D FEM ระหว่างการดึงขึ้นรูปทั้ง 4 วิธีการนั้นมีความคล้ายคลึงกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของภาคตัดตามแนวขวางและตามแนวแกนของ ISRCT โดยการดึงขึ้นรูปด้วยแมนเดรลของไหล การวิเคราะห์ผลสรุปจากพารามิเตอร์ทั้ง 10 ค่า นั้นผลลัพธ์ที่ได้นั้นสามารถนำไปใช้ในการเทียบเคียงสำหรับการพยากรณ์เส้นผ่านศูนย์กลางของ ISRCT สุดท้ายที่แม่นยำสำหรับกระบวนการผลิตท่อทองแดงที่มีสันขดอยู่ภายในขนาดเล็กพิเศษด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบแมนเดรลของไหลได้

## 12.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการศึกษาวิธีการผลิตทองแดงที่มีสันขดเป็นเกลียวบนผิวภายใน (Inner spiral ribbed copper tube: ISRCT) ขนาดเล็กด้วยวิธีการดึงขึ้นรูป เป็นงานวิจัยที่ได้ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ อาทิเช่น ความเค้นในการดึงขึ้นรูป ความหนาของผนังท่อ ความกว้างฐานสันท่อ ความกว้างยอดสันท่อ ช่องว่างฐานสัน ช่องว่างยอดสัน ความสูงสันท่อ ระยะพิทช์ของสันท่อ ระยะกระจัดตามแนวแกนและมุมฮิลิกส์ของสันท่อ โดยการศึกษาและพัฒนาต่อไปควรศึกษาถึงตัวแปรอื่นๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการผลิต ISRCT ที่มีคุณภาพมากขึ้น เช่น

1. ศึกษาความล้า (Fatigue) ที่เกิดจากการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing)
2. ศึกษาความขรุขระของผิวภายใน ISRCT ในแต่ละมิติของผนังและแนวสัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ภายหลังจากการดึงขึ้นรูปลดขนาดผ่านตายหลายครั้ง (Multi-passes drawing)
4. ศึกษาการขึ้นรูป ISRCT ด้วยการผลิตแบบการดึงขึ้นรูปแบบไม่ใช้ตาย Dieless drawing process



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Tatsumi, A. 1983. "Machine for Forming Spiral Grooves in Metal Pipe Inner Surface" **United States Patent**. Patent Number: 4,373,366.
- [2] Keyes, M. and Fla, R. 1993. "Inner Ribbed Tube and Method" **United States Patent**. Patent Number: 5,184,674.
- [3] Rieger, K. and Island, S. 1997. "Inner Ribbed Tube of Hard Metal and Method" **United States Patent**. Patent Number: 5,690,167.
- [4] Saeki, C. 1998. "Inner Grooved Tube Forming Apparatus" **United States Patent**. Patent Number: 5,724,844.
- [5] Kalkenings, P. and Stinnertz, H. 2001. "Cold Pilger Rolling Tool for Producing Internally Ribbed Tubes" **United States Patent**. Patent Number: 6,205,833.
- [6] Hinago, N., Hatano, J.P., Saeki, C. and Ozeki, K. 2004. "Method for Producing Seamless Tube with Grooved Inner Surface" **United States Patent**. Patent Number: 6,834,523.
- [7] Zifferer, L. R. and Waco, T.X. 2005. "Apparatus and Method for Forming Internally and Externally Textured Tubing" **United States Patent**. Patent Number: 6,968,719.
- [8] Yamamoto, K., Sumitomo, T., Mori, Y. and Hashizume, T. 2005. "Method of Making an Internal Grooved Tube" **United States Patent**. Patent Number: 6,913,074.
- [9] Tang, Y., Chi, Y., Chen, J.C., Deng, X.X., Liu, L. and Wan, P. 2007. "Experimental Study of Oil-Filled High-Speed Spin Forming Micro-Groove Fin-Inside Tubes" **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. 47: 1059-1068.
- [10] Houfuku, M. 2007. "Development Trends in Inner-Grooved Tubes in Japan" **HITACHI CABLE REVIEW**. No: 26.
- [11] Yong, L., Hui, X., Bin, L., Yong, T. and Zhi-xin, Z. 2008. "Forming Method of Axial Micro Grooves Inside Copper Heat Pipe" **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**. 18: 1229-1233.
- [12] Tang, Y., Long-sheng, L., Yuan, D., Qing-hui, W. and Xiao-lin Z. 2009. "Experimental and FEM Study on Sinking of Miniature Inner Grooved Copper Tube" **Journal of Materials Processing Technology**. 209: 5333-5340.
- [13] Beppu, K. and Wakayama, S. 2010. "Production Method of Internally Ribbed Steel Tube and Drawing Plug for Use Therein" **United States Patent**. Patent Number: US 2010/0319425 A1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรรมใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Millet, F. and Foucher, P. 2010. "Mandrel for Introduction into a Fluid Circulation Duct, and Related Production Well" **United States Patent**. Patent Number: US 7,669,665 B2.
- [15] Shinohara, Y., Oizumi, K., Itoh, Y. and Hori, M. 1987. "Heat-Transfer Tubes with Grooved Inner Surface" **United States Patent**. Patent Number: 4,658,892.
- [16] Masukawa, S. and Sukumoda, S. 1993. "Heat Transfer Tubes and Method for Manufacturing" **United States Patent**. Patent Number: 5,259,448.
- [17] Kim, P.G. and Kwak, K.S. 2000. "Heat Transfer Tube with Cross-Grooved Inner Surface and Manufacturing Method Thereof" **United States Patent**. Patent Number: 6,026,892.
- [18] Furushima, T., Manabe, K. and Sakai, T. 2008. "Fabrication of Superplastic Microtubes Using Dieless Drawing Process" **Materials Transactions**. 49: 1365-1371.
- [19] Furushima, T. and Manabe, K. 2009. "Finite Element Simulation with Coupled Thermo-Mechanical Analysis of Superplastic Dieless Tube Drawing Considering Strain Rate Sensitivity" **Materials Transactions**. 50: 161-166.
- [20] Sadok, L., Kusiak, J. and Padko, M. 1996. "State of strain in the tube sinking process" **Journal of Materials Processing Technology**. 60: 161-166.
- [21] Khalaf, A. and Nwir, A. 1998. "Theoretical Analysis of Internal Pressure Supplied in Tube Sinking Process" **Researcher magazine**. Fourth Issue Fourth Year.
- [22] Swiatkowski, K. and Hatalak, R. 2006. "Application of Modified Tools in The Process of Thin Walled Tube Drawing" **Archives of Metallurgy and Materials**. 51: Issue 2.
- [23] Celentano, D.J., Rosales, D.A. and Peña, J.A. 2011. "Simulation and Experimental Validation of Tube Sinking Drawing Processes" **Materials and Manufacturing Processes**. 26: 770-780.
- [24] Fodase, G.M., Venkatesh, M.A. and YEOLA, R.C. 2014. "Analysis of Elastic Recovery in cold Drawing of Sectional Seamless Tubes" **International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)**. 3: Issue 3.
- [25] Nagarkar, M.P., Zaware, R.N. and Ghalme, S.G. 2012. "Finite Element Simulation of Sink Pass Round Tubes Using ANSYS" **BIBLID**. 43: 179-188.
- [26] Yoshida, K., Onitsuka, Y. and Yamashita, S. 2009. "Fabrication of High-Quality Fine Medical Tubes by Fluid Mandrel Drawing" **Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering**. 3: 1348-1355.
- [27] Palengat, M., Chagnon, G., Favier, D., Louche, H., Linardon, C. and C. Plaideau. 2013. "Cold drawing of 316L stainless steel thin-walled tubes: experiments and finite element analysis" **International Journal of Mechanical Sciences**. 70: 69-78.

- [28] Yamamoto, K., Nakamizo, K., Kameoka, H. and Namba, K. 2002. "High-Performance Micro Heat-Pipe" **Furukawa Review**. No. 22.
- [29] Morris, W.D. and Farhadi, K. 1996. "Convective Heat Transfer in Rotating Ribbed Tubes" **Inf. J. Hear Mass Transfer**. 39: 2253-2266.
- [30] Li, W. and Webb, R.L. 2002. "Fouling Characteristics of Internal Helical-Rib Roughness Tubes Using Low-Velocity Cooling Tower Water" **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 45: 1685-1691.
- [31] Lohász, M.M., Rambaud, P. and Benocci, C. 2001. "Flow Features in a Fully Developed Ribbed Duct Flow as a Resual of LES" **Fluid Mechanics, Budapest University of Technology and Economics**. Budapest, 1111, Hungary.
- [32] Liao, Q., Jen, T.C., Chen, Q., Li, L. and Cui, W. 2007. "Heat Transfer Performance in 3D Internally Finned Heat Pipe" **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 50: 1231-1237.
- [33] Li, W. 2007. "Modeling Liquid-Side Particulate Fouling in Internal Helical-Rib Tubes" **Chemical Engineering Science**. 62: 4204-4213.
- [34] Elnaggar, M.Z., Mohamed, H.A., Abdullah, M. and Mujeebu, A. 2011. "Experimental Analysis and FEM Simulation of Finned U-Shape Multi Heat Pipe for Desktop PC Cooling" **Energy Conversion and Management**. 52: 2937-2944.
- [35] Munoz, J. and Abanades, A. 2011. "A Technical Note on Application of Internally Finned Tubes in Solar Parabolic Trough Absorber Pipes" **Solar Energy**. 85: 609-612.
- [36] Selvaraj, P., Sarangan, J. and Suresh, S. 2011. "Experimental Investigation on Heat Transfer and Friction Factor Characteristics of a Water and Ethylene Glycol Mixture Flow of Internally Grooved Tubes" **International Journal of Chemical Research**. 3: 33-40.
- [37] Kattea, W.A. 2012. "An Experimental Study on the Effect of Shape and Location of Vortex Generators Ahead of a Heat Exchanger" **Al-Khwarizmi Engineering Journal**. 8: 12-29.
- [38] Kaji, R., Yoshioka, S. and Fujino, H. 2012. "The Effect of Inner Grooved Tubes on the Heat Transfer Performance of Air-Cooled Heat Exchangers of Co<sub>2</sub> Heat Pump System" **International Refrigeration and Air Conditioning Conference**. Paper 1268.
- [39] Sainath, K., Rath, Y.B. and Reddy, T.K.K. 2009. "Heat transfer and Thermal Stress Analysis in Internal Grooved tube in comparison with bare tube by Finite element method" **International Journal of Current Engineering and Technology**. E-ISSN 2277-4106, P-ISSN 2347-5161.

- [40] Dieter, G.E. 1988. **Mechanical metallurgy: SI metric edition**. McGraw-Hill, ISBN 0-07-100406-8.
- [41] McGannon, Harold. 1971. "Making, Shaping, and Treating of Steel" **Pennsylvania: United States Steel**. 905-907.
- [42] Raghavan, S. and Craig, H.S. 1985. "Computer Simulation of Residual Stresses in Extrusion" **Proceedings of the 13th NAMRC**. 159-163.
- [43] Donald, R.C. 1965. **Procedures of Experimental Stress Analysis**. Vol. 3, No.1.
- [44] Techang, W. and Craig, H.S. 1987. "Residual Stress Distribution in Cold Rolled Brass Sheets" **private communication**.
- [45] Avitzur, B. 1968. **Metal Forming: Process and Analysis**. New York: McGraw-Hill.
- [46] Hoffman and Sachs. **Op. cit.** 190-195.
- [47] Blazynski, T.Z., Smith, D.J. and Bramley, A.N. 1970. **Metall. Rev.**, no. 142. April, 1970; 13<sup>th</sup> Int. Machine Tool Design and Research Conf., Birmingham, England.
- [48] Suchs, G. and Baldwin, W.M. 1946. **Trans. ASME**. 68: 655-662.
- [49] Swift, H.W. 1949. **Philos. Mag.** 40: 883-902.
- [50] Siebel, E. and Weber, E. 1935. "Stresses and Metal Flow in Drawing Tubing" **Stahl and Eisen**, 55: 331-334.
- [51] Erich, G.T., Charles T.Y. and Shiro, K. 1965. **Plastic Deformation in Metal Processing**. New York: Macmillan.
- [52] Sachs, G., Lubahn, J.D. and Tracy, D.P. 1944. "Drawing of Thin-Walled Tubing With a Moving Mandrel through a Single Stationary Die" **Journal of Applied Mechanics**. 11: 199-210.
- [53] Collins, I.F. and Williams, B.K. 1985. "Slipline Fields for Axisymmetric Tube Drawing" **International Journal of Mechanical Sciences**. 27: 225-233.
- [54] Kiuchi, M. and Avitzur, B. 1980. "Limit Analysis of Flow Through Inclined Converging Planes" **Journal of Engineering for Industry**. 102: 109-117.
- [55] Durban, D. 1980. "Drawing of Tubes" **Journal of Applied Mechanics**. 47: 736-740.
- [56] Hartley, C.S. 1973. "Upper Bound Analysis of Extrusion of Axisymmetric, Piece wise Homogenous Tubes" **International Journal of Mechanical Science**. 15: 651-663.
- [57] Bramley, A.N. and Smith, D.J. 1976. "Tube Drawing with a Floating Plug" **Metal Technology**. 322-331.
- [58] Hartley, C.S. 1978. "Optimum Processing Parameters for Floating Plug tube Drawing" **Proceedings NAMRC VI, Society of Manufacturing Engineers**. 193-198.
- [59] Kurt, L. 1985. **Handbook of Metal Forming**. New York: McGraw-Hill.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [60] Blazynski, T.Z. 1979. "Geometry Factors and Inhomogenous of Flow in Rotary Piercing and Cold Drawing of Seamless Tubing" **International Journal of Mechanical Sciences**. 21: 527-536.
- [61] Noyan, I.C. and Cohen, J.B. 1982. "The Nature of Residual Stress and Its Measurements" **Proceedings of the 28th Sagamore Army Material Research Conference**. Lake Placid, New York, 1-16.
- [62] Messnager, M. 1919. "Methode de determination des tensions existent dans une cylinder circularie" **Compt. Rend.** 169: 1391-1393.
- [63] Sachs, G. 1929. "Der Nachweis Inner Spannungen in Stangen und Rohren" **Zeitschrift fur Metallkunde**. 19: 352-357.
- [64] Lambert, J .W. 1954. "A Method of Deriving Residual Stress Equations" **Experimental Stress Analysis**. 12: 91-96.
- [65] Donald C.R. 1965. **Procedures of Experimental Stress Analysis**. 3, No.1.
- [66] Raghavan, S., Craig S. and Bandy, R. 1982. "Residual Stress Determination in Incolhel-600 Tubes Using Electrochemical Machining" **Novel Techniques in Metal Deformation Testing, TMS-AIME**. 163-174.
- [67] Jahan, R and Hartley, C.S. 1986. "Experimental Measurements of Residual Stresses in Nuclear Fuel Cladding" **Proceedings of the Spring Conference of The Society of Experimental Mechanics**. New Orleans. LA. 247-254.
- [68] Jahan, R. 1987. "Experimental and Finite Element Study of Residual Stresses in Zircaloy-4(R) and OFHC Copper Tubes" **Mechanical Engineering Dissertation**. Louisiana State University.
- [69] Rasty, Jahan, R. 1989. "A Parametric Study of the Tube Drawing Process Utilizing the Finite Element Method" **Proceedings of the Pacific Conference on Manufacturing**. Australia. 121-134.
- [70] Midha, P.S. and Modlen, G.F. 1976. "Residual Stresses in Cold-Extruded Rods" **Metal Technology**, 202-207.
- [71] Samuel, W.K. and Raymond D.K. 1971. "Comparison of Finite-Element and Finite-Difference Methods" **Symposium, Numerical and Computer Methods m Structural Mechanics**. Urbana. 337-351.
- [72] Courant, R. 1943. "Variational Methods for the Solutions of Problems of Equilibrium and Vibrations" **American Math Society**. 49: 1-23.
- [73] Euler, L. 1744. **Methods Inveniendi Lineas Curvas Maximi Minimive Proprietate Gaudentes**. Bousquent, Lausanne, and Geneva.

- [74] Polya, G. 1952. "Summe Interpretation de la Methode des Differences Finies qui peut Fournir des Bornes Superieures ou Interieures" **Academy of Science, Paris**. 235: 995-997.
- [75] Polya, G. 1954. **Estimates for Eigenvalues**. New York: Academic Press, 200-207.
- [76] Hersh, J. 1955. "Equations Differentielles et Fonctions de Cellules" **Academy of Science**. 240: 1602-1604.
- [77] Wienberger, H.E. 1956. "Upper and Lower Bounds for Eigenvalues by Finite Difference Methods" **Pure and Applied Math**. 9: 613-623.
- [78] Weinberger, H.E. 1958. "Lower Bounds for Higher Eigenvalues by Finite Difference Methods" **Pacific Journal of Math**. 8: 339-363.
- [79] Collatz, I. 1938. "Konvergenz des Differenzverfahrens bei Eigenwertproblemen Partieller Differentialgleichungen" **Deutsche Math**. 3: 200-212.
- [80] Friedrichs, K.O. 1962. "A Finite Difference Scheme for the Neumann and Dirichlet Problem" **Courant Institute Mathematical Sciences**. New York University, New York.
- [81] White, G.N. 1962. "Difference Equations for Plane Thermal Elasticity" LAMS- 2745, **Los Alamos Science Laboratory**. Los Alamos, New Mexico.
- [82] Birkhoof, G., Schultz, M.H. and Varga, R.S. 1968. "Piecewise Hermite Interpolation in One and Two Variables to Partial Differential Equations" **Numerical Mathematics**. 11: 232-256.
- [83] Synge, J.L. 1952. "Triangulation in the Hypercircle Method for Plane Problems" **Proceedings of the Royal Irish Academy**. 55A9: 341-367.
- [84] McMahon, J. 1953. "Lower Bounds for the Electrostatic Capacity of a Cube" **Proceedings Royal Irish Academy**. 55A21: 133-167.
- [85] Richtmyer, R.D. and Morton, K.W. 1967. **Difference Methods for Initial Value Problems**. New York: John Wiley and Sons.
- [86] Greenstadt, J. 1959. "On the reduction of Continuous Problems to Discrete Form" **IBM Journal of Research and Development**. 3: 355-363.
- [87] Argyris, J.H. and Kelsey, S. 1955. "Energy Theorems and Structural Analysis" **Aircraft Engines**. Vol. 26-27, May.
- [88] Turner, M.J., Clough, R.W., Martin, H.C. and Topp, I.J. 1956. "Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures" **Journal of Aeronautical Sciences**. 23: 805-823.
- [89] Clough, R.W. 1960. "The Finite Element Method in Plane Stress Analysis" **Proceedings of the conference of Electronic Computation II**. Pittsburgh, Pennsylvania, September, 49-65.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [90] Melosh, R.J. 1963. "Basis for Derivation of Matrices for the Direct Stiffness Method" **Journal of American Institute of Aeronautics and Astronautics**. 1: 1631-1637.
- [91] Jones, R.E. 1964. "A Generalization of the Direct-Stiffness Method of Structural Analysis" **Journal of America Institute of Aeronautics and Astronautics**. 2: 821-816.
- [92] Yamada, Y., Yoshimura, N. and Sakurai, T. 1968. "Plastic Stress-strain Matrix and Its Application for the Solution of Elastic-plastic Problems by the Finite Element Method" **International Journal of Mechanical Sciences**. 10: 343-354.
- [93] Zienkiewicz, O.C. and Chung, Y.K. 1967. **The Finite Element Method**. New York: McGraw-Hill.
- [94] Marcal, P.V. 1971. "Finite-Element Analysis with Material Nonlinearities-Theory and Practice" **Recent Advances in Matrix Methods of Structural Analysis and Design**. University of Alabama Press, 257-282.
- [95] Lee, E.H., Mallett, R.L. and McMeeking, R.M. 1977(a). "Stress and Deformation Analysis of Metal Forming Processes" **Numeral Modeling of Manufacturing Process**. Symposium Volume, ASME Winter Annual Meeting in Atlanta Georgia, 19-33.
- [96] Lee, E. H. and Yang, W.H. 1977(b). "Stress and Deformation Analysis of the Metal Extrusion Process" **Computer Methods in Applied Mechanics**. 10: 339-353.
- [97] Lee, E.H. and Kobayashi, S. 1973. "New solutions to rigid-plastic deformation problems using a matrix method" **Journal of Engineering for Industry, Transactions of ASME**. 95: 865.
- [98] Shah, S.N. and Kobayashi, S. 1974. "Comparison of Tall Circular Solid Cylinders between Parallel Flat Dies" **Proceedings of the International Conference on Engineering**. Tokyo, 295.
- [99] Matsumoto, H., Oh, S.I. and Kobayashi, S. 1977. "A note on the matrix method for rigid-plastic analysis of ring compression" **Proceedings of the 18th MTDR Conference**. London, September, 3.
- [100] Chen, C.C. and Kobayashi, S. 1978. "Rigid-plastic finite-element analysis of ring compression" **Applications of the Numeral Method of Forming Processes, ASME, AMD**. 28: 163.
- [101] Chen, C.C. and Kobayashi, S. 1980. "Rigid-plastic finite-element analysis of plain strain closed die forging" **Process Modeling-Fundamentals and Applications to Metals, ASM**, 167.

- [102] Oh, S.I. and Kobayashi, S. 1980. "Finite Element Analysis of plane-strain closed die forging" *Journal of Engineering for Industry, Transaction of ASME*. 22: 538-545.
- [103] Hill, R. 1958. "A General Theory of Uniqueness and Stability in elastic-Plastic solids" *Journal of the Mechanics of Physical Solids*. 6: 236-249.
- [104] Hill, R. 1959. "Some Basic Principles in the Mechanics of Solids without a Natural Time" *Journal of the Mechanics of Physical Solids*. 7: 209-225.
- [105] Hill, R. 1967. "Eigenmodel Deformation in Elastic-Plastic Continuum" *Journal of the Mechanics of Physical Solids*. 15: 371-386.
- [106] Hibbit, H.D., Marcal, P.V. and Rice, J.R. 1970. "A Finite Formulation for Problems of Large Strain and Large Deformation" *International Journal of Solids and Structures*. 35: 1069-1086.
- [107] Lee, E.H. and Mallett, R.L. 1976. "Analysis of Elastic-Plastic Extrusion" *SUDAM Report NO.77-5*. Division of Applied Mechanics, Department of Mechanical Engineering, Stanford University.
- [108] Tekkaya, A.E. and Lange, K. 1984. "Determination of Residual Stresses in Industrial Extrusion" *Proceedings, NAMRC XII*. 103-110.
- [109] Tekkaya, A.E. and Gerhardt, J. 1985. "Residual Stresses in Cold-Formed Workpieces" *Annals of the CIRP*. 225-230.
- [110] Dehghani, M. 1987. "Simulation of Hydrostatic Co-extrusion of Bimetallic Composites" *Mechanical Engineering Dissertation*. Louisiana State university.
- [111] Gerhardt J. and Tekkaya, A.E. 1987. "Simulation of Drawing-Processes by the Finite Element Method" *Proceedings of the Second International Conference on Technology of Plasticity*. Stuttgart, Germany, 2: 841-848.
- [112] Jahan, R. 1987. "Experimental and Finite Element Study of Residual Stresses in Zircaloy-4(R) and OFHC Copper Tubes" *Mechanical Engineering Dissertation*. Louisiana State University.
- [113] Maciej, P. 1989. "Thermo-Mechanical Finite-Element Simulation of the Tube Sinking Process" *Steel Research*. 60: 459-463.
- [114] Sawamiphdi, K., Kropp, P.K. and Lahoti, G.D. 1990. "Investigation of Residual Stresses in Drawn Wire by the Finite Element Method" *Journal of Engineering Materials and Technology*. 112: 231-235.
- [115] Linicus, W. and Sachs, G. 1978. *Mitt. Dtsch. Materialprufungsanst.* 16: 38-67.
- [116] Crampton, D.K. 1930. *Trans. Metall. Soc. AIME*. 89: 233-255.
- [117] Misra, S.K. and Polakowski, N.H. 1969. *Trans. ASME, Ser. D: J. Basic Eng.* 91:810-815.
- [118] Meadows, B.J. and A. G. Lawrence, A.G. 1970. *J. Inst. Met.* 98: 102-105.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[119] ABAQUS user's manual: **ABAQUS Inc**, 2006.

[120] Lee, M. and Flom, D. G. 1989. "Lubrication Mechanisms in Tungsten and Molybdenum Wire Drawing. Part I. Simulated Drawing Experiments" **Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineering**. Volume 47, 2, 127-132.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ

1. Tangsri, T., Norasethasopon, S. and Yoshida, K. 2014. "Fabrication of small size inner spiral ribbed copper tube by fluid mandrel drawing" **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 70: 1923-1930.
2. Tangsri, T. and Norasethasopon, S. 2015. "Influences of total reduction of area on drawing stress and tube dimension in inner spiral ribbed copper tube sinking" **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 77: 2269-2276.
3. Tangsri, T. and Norasethasopon, S. 2015. "3D FEM validation of ultra-small inner spiral ribbed copper tube using the tube sinking method" **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. DOI 10.1007/s00170-015-7328-3

#### ผลงานวิจัยนำเสนอในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ

1. Tangsri, T. and Norasethasopon, S. 2013. "Fabrication of Small Size Inner Spiral Ribbed Copper Tube Using Tube Sinking Method" **Advanced Materials Research**. 802: 37-41.

#### ผลงานวิจัยนำเสนอในที่ประชุมวิชาการระดับชาติ

1. Tangsri, T. and Norasethasopon, S. 2013. "Effects of Rib Dimension Reduction and Orientation Change of Inner Spiral Ribbed Copper Tube Using Tube Sinking Method" **The 27<sup>th</sup> Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NET)**, 16-18 October 2013, Pattaya, Chonburi. (Best paper award)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*Fabrication of small size inner spiral ribbed copper tube by fluid mandrel drawing*

**Tanit Tangsri, Somchai Norasethasopon  
& Kazunari Yoshida**

The International Journal of  
Advanced Manufacturing Technology

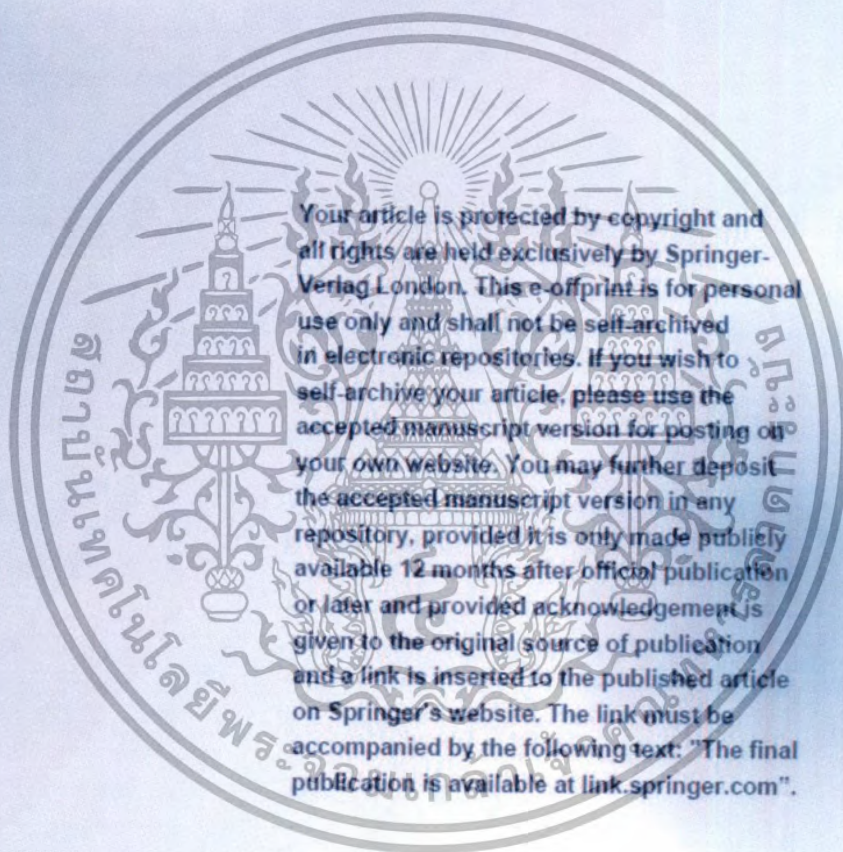
ISSN 0268-3768  
Volume 70  
Combined 9-12

Int J Adv Manuf Technol (2014)  
70:1923-1930  
DOI 10.1007/s00170-013-5328-8



 Springer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



 Springer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Fabrication of small size inner spiral ribbed copper tube by fluid mandrel drawing

Tanit Tangsri · Somchai Norasethasopon · Kazunari Yoshida

Received: 29 March 2012 / Accepted: 23 September 2013 / Published online: 5 November 2013  
 © Springer-Verlag London 2013

**Abstract** This paper is concerned with the development of ultra-small inner spiral ribbed copper tubes with high-quality heat transfer. Since the demand for the ultra-small tubes in electrical appliances is currently high and will be greater in the future, the technology employed must enable the production of inner spiral ribbed fine tubes with various features, such as small size, high quality, high functionality, and low processing cost so as to meet the increasing demand. The conventional production method is suitable for large tubes with high drawability but is unsuitable for fabrication of long ultra-small tubes because of the difficulty to manufacture both an ultra-small spiral ribbed mandrel and a floating plug. This research paper has proposed four drawing methods as follows: tube sinking, water, oil, and wax as mandrels and presented the comparison of seven parameters, i.e., drawing stress ratio, wall thickness ratio, ribbed base width ratio, ribbed lip width ratio, ribbed height ratio, ribbed pitch ratio, and ribbed spiral angle ratio. It was found that tube sinking was unfit for making the ultra-small inner spiral ribbed copper tubes due to the resulting high ratio of wall thickness. The results of all the parameters were similar in the cases of oil and wax. Despite less impressive outcomes, water was easily removed from the inner spiral ribbed copper tube compared to oil and wax. Thus, the tube drawing using water as mandrel

was most suitable for the production of the inner spiral ribbed copper tube.

**Key words** Inner spiral ribbed tube · Heat transfer tube · Ultra-small size · Fluid mandrel drawing

### 1 Introduction

The conventional manufacturing methods of tubes with inner spiral ribs have been in use since 1993. The tube wall is cylindrical, the tube internal structure surface is spiral ribbed, and the ribbed spiral angle at the central axis is greater than 35°. The roll forming process is conventionally used to produce the tube with inner spiral ribbed surface, whereby the flat metal sheet is rolled on from the upper side by a grooved roll with spiral grooved teeth and from underneath by another flat roll with smooth surface. The sheet is then rolled up along the length of the sheet metal, and both edges are welded lengthwise, resulting in a tube spirally ribbed on its inside surface along its length [1].

Since 2007, the manufacturing method of steel tubes with inner spiral ribbed surface has been perfected by which a ribbed mandrel and a floating plug are connected with a tie rod [1, 2]. In the drawing of the ribbed steel tube, the top surface of the spiral ribbed mandrel serving as the drawing plug is always in contact with the blank tube surface all the way from the initial stage of the contact to the final stage of rib formation, at which the blank tube is processed to product size. This production method makes long tube processing possible and has several benefits, such as forming capability and durability of the finished steel tube [3, 4].

T. Tangsri (✉) · S. Norasethasopon  
 Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of  
 Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand  
 e-mail: tangsritanit@yahoo.com

K. Yoshida  
 Department of precision Engineering, Tokai University,  
 Tokyo, Japan

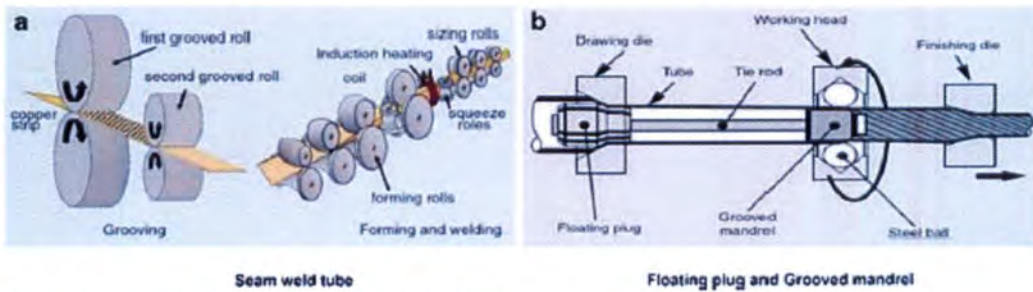


Fig. 1 The conventional method of inner spiral ribbed tube drawing [1]

The copper tube with inner spiral ribbed surface and seamless and smooth outer surface in the marketplace typically has the outside diameter of 5.00 to 15.00 mm. The tube with inner spiral ribbed surface allows more heat transfer [5, 6]. The inner spiral ribbed surface of the tube increases the efficiency of the heat exchanger of the condensation or vaporization of the refrigerant [7]. Examples of applications of the inner spiral ribbed copper tubes are found in the evaporators and condensers of air conditioning units, the copper tube freezers, and refrigerators [8, 9].

This research studied the behavior of various parameters of the inner spiral ribbed copper tube which was manufactured by the ultra-small tube drawing method. In this paper, the seamless 5.00 mm-diameter copper tube specimens were drawn using the four tube drawing methods to reduce the size of the copper tubes as follows: (1) tube drawing without a mandrel (tube sinking), (2) tube drawing with water mandrel (water), (3) tube drawing with oil-mandrel (oil) and (4) tube drawing with wax mandrel (wax). The results of this research can be applied to the production of ultra-small inner spiral ribbed copper tubes which are particularly useful for heat

transfer in heat exchanger equipment of electrical appliances with limited heat transfer area.

2 Conventional drawing and new drawing methods using wax and fluid for mandrel

There are two types of conventional drawing method which are still in use in the production process. The first type of the production method of inner spiral ribbed copper tube starts with the process of roll-forming of a flat metal sheet using the rolling mills on both sides of the surface. The metal sheet is then rolled into a tube until the two longitudinal edges of the metal sheet touched each other. The joint of the edges is welded along the length of the rolling plates to make a long inner spiral ribbed tube as shown in Fig. 1a.

The second method uses the mandrel with an outer spiral ribbed surface which is connected to the floating plug. The tube is then drawn through a die. The manufactured tube is further improved by applying pressure from steel sphere balls on the tube with an outer ribbed spiral surface mandrel inside.

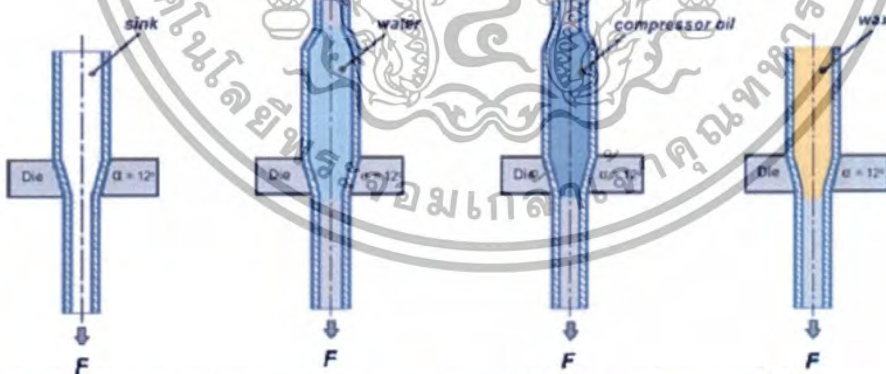
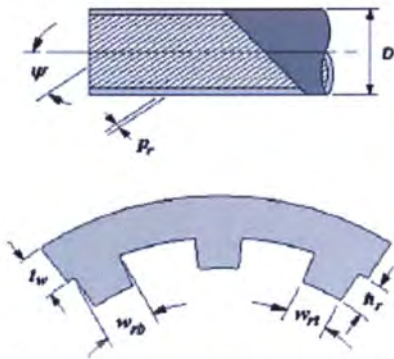


Fig. 2 The four drawing methods.  $F$  drawing force (N),  $\alpha$  approach semicone angle of die (die half-angle, in degrees) [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Fig. 3** The cross-sectional and longitudinal drawings of the inner spiral ribbed copper tube.  $D$  outside diameter,  $\psi$  ribbed spiral angle (de grees),  $P_r$  ribbed pitch (mm),  $t_w$  wall thickness (mm),  $h_r$  ribbed height (mm),  $w_{rb}$  ribbed base width (mm), and  $w_{rt}$  ribbed tip width (mm)

This development successfully helps accelerate the production speed as show in Fig. 1b.

The following four drawing methods: (1) tube drawing without a mandrel (tube sinking), (2) tube drawing with water mandrel (water density  $1,000 \text{ kg/m}^3$ ), (3) tube drawing with oil mandrel (compressor oil density  $879 \text{ kg/m}^3$ ), and (4) tube drawing with wax mandrel (wax density  $970 \text{ kg/m}^3$ ), are shown in Fig. 2.

The standard equation of reduction area [%] is as follows:  $R_d$ =reduction area (percent),  $A_0$ =initial area (square millimeter), and  $A_1$ =final area (square millimeter) [1]:

$$R_d = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100 \cdot [\%]$$

### 3 Specimens and experimental method

In this experiment, seamless inner spiral ribbed copper tubes were used as specimens (5.00 mm outside diameter, 3.71 mm

inside diameter, 0.364 mm wall thickness, 0.28 mm rib height, 0.33 mm rib base width, 0.175 mm rib tip width,  $38^\circ$  spiral angle, 0.393 mm rib pitch, and 45 ribs). A mother tube was prepared in the setup; its outside surface cleaned and coated with a Teflon resin lubricant, and then the tube drawn using a sodium stearate lubricant. The tungsten die which is widely used was employed in this experiment. The die half-angle was  $12^\circ$  ( $\alpha=12^\circ$ ) and the drawing speed remained stable at 150 mm/s. The cross-section area reduction per pass ( $Re/P$ ) stayed between 7 and 25 %. All parameters used in the experiment were set as show in Fig. 3.

Figure 4 shows the experimental model experimented with the four drawing methods. The die half-angle was  $12^\circ$  and the  $Re/P$  stayed between 7 and 25 %. The first tube was empty and the other three tubes were, respectively, filled with wax, water, and oil, and sealed both ends.

In this experiment, seamless inner spiral ribbed copper tubes as show in Fig. 5 were used as specimens (5.00 mm outside diameter, 3.71 mm inside diameter, 0.364 mm wall thickness, 0.28 mm rib height, 0.33 mm rib base width, 0.175 mm rib tip width, and 45 ribs). The seamless inner spiral ribbed copper tubes were cut longitudinally, and the cut tubes were found to have  $38^\circ$  spiral angle and 0.393-mm rib pitch as show in Fig. 6; and the parameters of the specimen geometry are listed in Table 1.

## 4 Results and discussion

### 4.1 Changes of the shape

After 12 passes of diameter reduction using half-angle  $12^\circ$  die ( $\alpha=12^\circ$ ) the deformation behavior and the inner spiral ribbed copper tubes (ISRCT) of the four methods are shown in Fig. 7. From the aforementioned figure, as the outer diameters were reduced, the inner spiral ribs and pitches contracted while the inner surface became uneven. The contraction rates were different for the four methods, resulting in unequal rates of increase of wall thickness. Contrary to the rise in wall



**Fig. 4** The experimental model



Fig. 5 Rib cross-section—mother tube

thickness, rib height, rib base width, rib tip width, rib pitch, and rib spiral angle decreased with each pass. Furthermore, the decreasing rates of the five parameters were different for the four methods depending upon whether a mandrel was used and the type of mandrel, i.e., water, oil, and wax. The strain distribution of the rib was not uniform from the rib base to the rib tip. The closer it was to the rib tip, the higher the rib strain, and the strain was greatest at the tip. The deformation at the rib base was more severe than at the rib tip, while the spiral rib angle decreased with each pass. The tube sinking method showed the greatest change in all of the aforementioned parameters, compared with the other tube drawing methods using fluids or wax as mandrel.

#### 4.2 Changes of the drawing stress ratio

The drawing stress ratio of each method is derived from axial stress, radial stress, and hoop stress. Axial stress is the tensile stress on the wall and the ribbed area of tube, radial stress is the compressive stress in the tube wall zone, and hoop stress is the stress caused by the pressure inside the compressive stress. The tube sinking yielded the lowest drawing stress ratio, the fluid mandrels (i.e., water and oil) produced the higher similar drawing stress ratios, and the wax mandrel



Fig. 6 Rib spiral angle—mother tube

Table 1 Material properties and drawing conditions used (mother tube)

Parameter	Copper
Young's modulus, $E$ (GPa)	110
Yield stress, $\sigma_y$ (MPa)	79
Ultimate stress, $\sigma_u$ (MPa)	180
Poisson's ratio, $\nu$	0.33
Die half-angle, $\alpha$ (degrees)	12
Coefficient of friction, $\mu$	0.02

gave the highest drawing stress ratio. The relation between the drawing stress ratio and percentage of total reduction area is shown in Fig. 8.

#### 4.3 Changes of variables involved in the four drawing methods

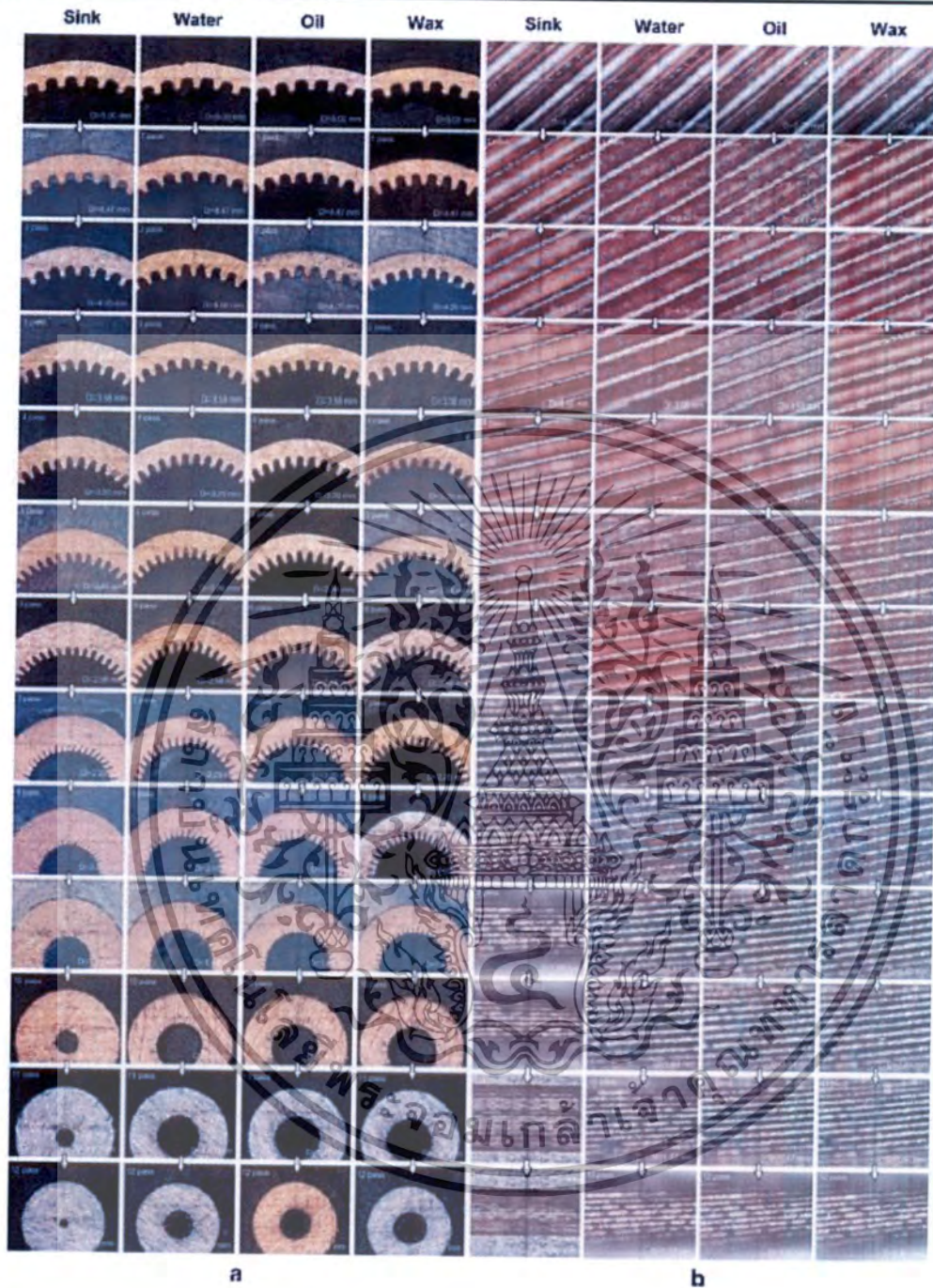
With tube sinking, the wall thickness ratio increased after each drawing. As the outside diameter decreased, the tube received compressive strain in the circumferential direction, leading to increase in the wall thickness. The tube sinking method is unsuitable for drawing the inner spiral ribbed copper tubes because the wall thickness ratio is large, obstructing the flow of fluid inside the tube as shown in Fig. 9.

In fluid mandrel (water, oil) drawing, a tube filled with oil or water with both ends closed was used. It was found that the wall thickness ratio of the tube slightly increased when compared to the thickness of the mother tube even after repeated drawings. It was important to remove the fluid from the tube by cutting both ends of the drawn tube.

In wax mandrel drawing, the wall thickness ratio of the tube was almost unchanged even after repeated drawings, thereby indicating a good result. In this method, however, it is time-consuming to remove the wax from the tube after drawing; hence, the manufacturing of long tubes is difficult.

The research results indicate that both fluid mandrel drawing methods, i.e., water and oil, are suited to drawing the inner spiral ribbed copper tubes with the wall thickness ratio insignificantly altered. Thus, it could be concluded that the aforementioned methods are suitable for the production of ultra-small inner spiral ribbed copper tubes with high heat-transfer efficiency.

The rib base width ratios tended to decrease in all drawing methods due to the compressive strain in the circumferential direction of the tubes. The compressive strain was highest in the tube sinking method because of the absence of resistance pressure force inside the tube. On the contrary, in cases of wax and fluid mandrels, the mandrels acted as the resistance pressure force inside the tubes, which was perpendicular to the inner surface of tube wall that was in contact with fluid and wax. Changes of rib base width ratio are shown in Fig. 10.



**Fig. 7** The cross sections,  $\times 5$  (a) and the spiral angles,  $\times 10$  (b) of ribs using the four drawing methods

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

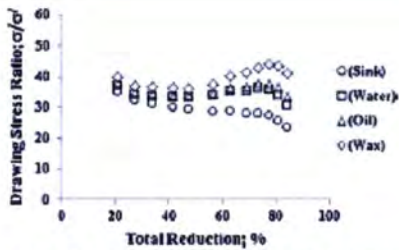


Fig. 8 The relation between the drawing stress ratio and percentage of total reduction area

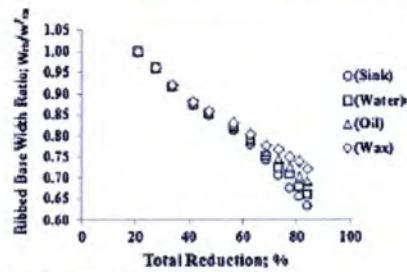


Fig. 10 Changes of rib base width ratio

The rib tip width ratio of tube sinking method was greater than those of wax and fluid mandrel methods because of the influence of the pressure inside the tubes over the deformation resistance of the tubes, i.e., the greater the inside pressure, the less the deformation. The changes were minimum in the drawing method using wax mandrel, followed by the drawing methods using fluid (water and oil) mandrels as shown in Fig. 11.

The effects of the inside pressure on rib height ratios were similar to those on the rib base width ratio and rib tip width ratio using fluid and wax mandrels, in which the pressure inside the tubes better resisted the deformation than the tube sinking method as shown in Fig. 12.

Changes of rib pitch ratio of the tube sinking method were greatest because of the increased wall thickness, whereas the rib pitch ratios for the methods with fluid and wax as mandrels decreased due to insignificant changes in wall thickness, which were caused by the resistance pressure inside the tube, which subsequently led to very small changes in the rib pitch after tube drawing as shown in Fig. 13.

The ribbed spiral angle inside the tube was altered after each drawing depending upon the percentage reduction of the cross-sectional area. The ribbed spiral angle of the mother tube was

38°, which decreased following each pass through the forming die. It was found that, when the percentage reductions in cross-sectional area of similar size were compared, decrease in the angle of the tube sinking method was larger than those of the fluid mandrel method and wax mandrel method. The inner spiral ribs using the tube sinking method freely deformed due to the absence of resistance pressure inside the tube. This is in contrast to the inner spiral ribs using the fluid mandrel and wax mandrel because of the fluid and wax contained inside the tubes. Both fluid and wax mandrel methods were closed systems in which the fluid and wax acted as the internal resistance pressure, thereby resulting in much smaller changes in the ribbed spiral angles compared to the tube sinking as shown in Fig. 14. The ribbed spiral angle of tube sinking was 0° on the 9th drawing, whereas those of the fluid mandrel and wax mandrel methods were 0° on the 12th pass.

5 Conclusions

This paper is concerned with the development of ultra-small ISRCT with high-quality heat transfer using tube sinking

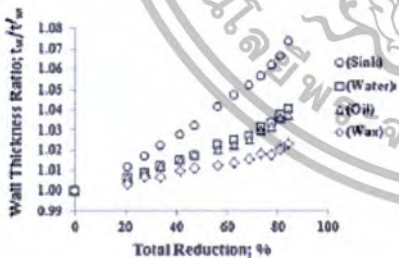


Fig. 9 Changes of wall thickness ratio

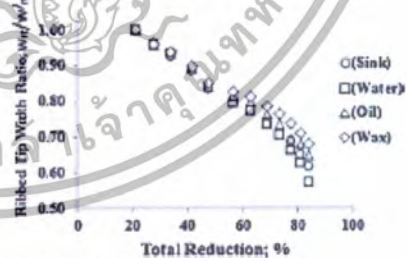


Fig. 11 Changes of rib tip width ratio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

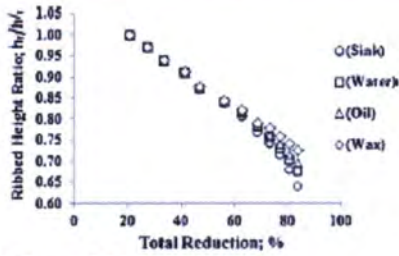


Fig. 12 Changes of rib height ratio

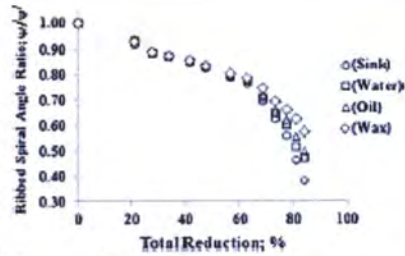


Fig. 14 Changes of rib spiral angle ratio

and water, oil, and wax as mandrels in drawing. It was found that:

1. The tube sinking is unsuitable for drawing the ultra-small inner spiral ribbed copper tubes because of large wall thickness ratio but very small ribbed spiral angle inside the tubes, thus making the production of the tubes with ribbed spiral angle inside impossible.
2. The wax mandrel drawing is the best of the four methods in the production of ultra-small inner spiral ribbed copper tubes with high-quality heat transfer; however, this method is unsuitable for fabrication of long ultra-small tubes because of the difficulty in removing the wax from the tubes after drawing.
3. The fluid mandrel drawing is more efficient for fabrication of long ultra-small inner spiral ribbed copper tubes with high-quality heat transfer because of the removal ease of the fluid from the tubes after drawing.
4. The wall thickness of the tubes after drawing using fluid mandrels, i.e., water and oil, is slightly different depending on of the type of fluid filled inside the tube. Nevertheless, the wall thickness of the tubes using either drawing method is almost identical to that of the mother tube. Besides, the cross-section of the copper tube in-

creases with each drawing but at a slower rate than the tube sinking method.

5. The fluid mandrel drawing using water is the most appropriate for fabrication of the tubes because of the greater removal ease of the water from inside of the tube than oil.

#### References

1. Mamoru, Houtoku., 2007, Development trends in inner-grooved tubes in Japan, Hitachi Cable Review No.26 (August 2007), pp. 1–3.
2. Yong LI, Hui XIAO, Bin LIAN, Yong TANG, Zhi-xin ZENG (2008) Forming method of axial micro grooves inside copper heat pipe, science press. Trans Nonferrous Met Soc China 18(2008): 1229–1233.
3. Yang Y, Chi Y, Chen JC, Dang XX, Liu L, Liu XK, Wan ZP (2006) Experimental study of oil-filled high-speed spin forming micro-groove fin-inside tubes. International Journal of Machine Tools & Manufacture 47(2007):1059–1068.
4. Tang Y, Longsheng L, Yuan D, Qing-hui Wang X-I Z (2009) Experimental and FEM study on sinking of miniature inner grooved copper tube. J Mater Process Technol 209(2009):5333–5340.
5. Chandra PR, Alexander CR, Han JC (2003) Heat transfer and friction behavior in rectangular channels with varying number of ribbed walls. International Journal of Heat and Mass Transfer 46(2003): 481–495.
6. Pedro G, Vicente AG, Viedma A (2002) Heat transfer and pressure drop for low Reynolds turbulent flow in helically dimpled tubes. International Journal of Heat and Mass Transfer 45(2002): 543–553.
7. Toshiyuki Hara, 2005, Developments and Future Trends in Copper Alloy Strip for Electronic Equipment and in Copper Tube for Air Conditioners, Kobelco Technology Review No. 26 Dec. 2005.
8. Arts T, Benocci C, Rambaud P (2007) Experimental and Numerical Investigation of Flow and Heat Transfer in a Ribbed Square Duct, 3rd International Symposium on Integrating CFD and Experiments in Aerodynamics, 20–21 June 2007. U.S. Air Force Academy, CO, USA, pp 1–19.

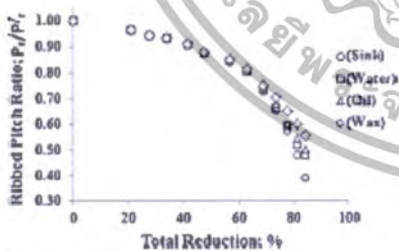


Fig. 13 Changes of rib pitch ratio

9. Renhu TANG, Fei YIN, Haijun WANG, Tingkuan CHEN (2007) An investigation into the heat transfer characteristics of spiral wall with internal rib in a supercritical sliding-pressure operation once-through boiler. *Front Energy Power Eng China* 2007: 300–304
10. Kazunari Y, Youichi O, Sadatomo Y (2009) Fabrication of high-quality fine medical tubes by fluid mandrel drawing. *J of Solid Mech and Mat Engin* 3((12):1348–1355
11. Dieter, G.E., *Mechanical metallurgy*, 1988, SI metric edition, McGraw-Hill, ISBN 0-07-100406-8.



*Influences of total reduction of area on drawing stress and tube dimension in inner spiral ribbed copper tube sinking*

**Tanit Tangsri & Somchai  
Norasethasopon**

The International Journal of  
Advanced Manufacturing Technology

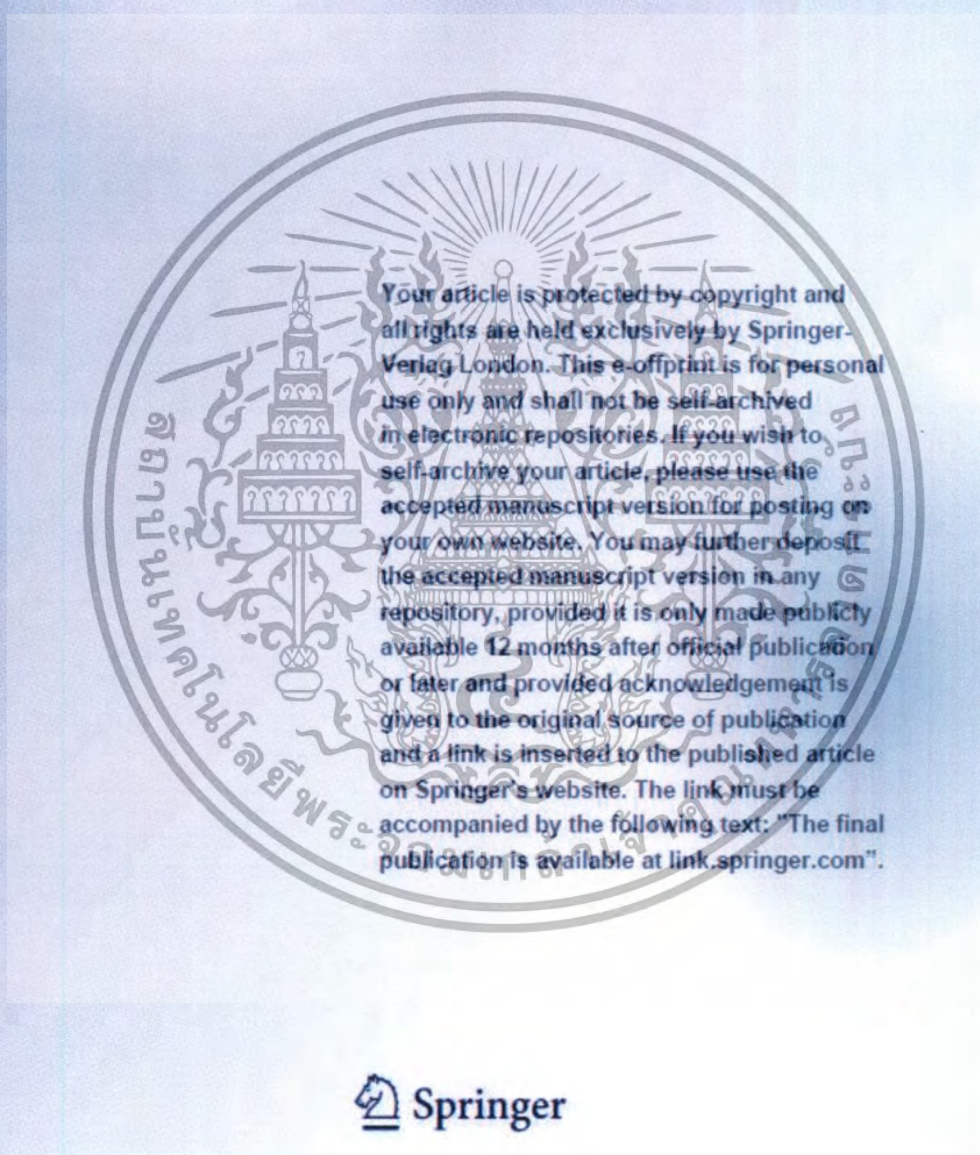
ISSN 0268-3768  
Volume 77  
Combined 9-12

Int J Adv Manuf Technol (2015)  
77:2269-2276  
DOI 10.1007/s00170-014-6624-7



 Springer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Influences of total reduction of area on drawing stress and tube dimension in inner spiral ribbed copper tube sinking

Tanit Tangsri · Somchai Norasethasopon

Received: 21 May 2014 / Accepted: 23 November 2014 / Published online: 3 December 2014  
 © Springer-Verlag London 2014

**Abstract** This research was about the development of ultra-small inner spiral ribbed copper tube (ISRCT) with high-quality heat transfer. The production of ISRCT involved various features, such as small size and high functionality which lowered manufacturing cost. Experimental results revealed the significant parameters and the cross-sectional profile of the ISRCT after tube sinking. These were used to indicate and predict the total reduction of area as a percentage (Rt%) and determine the success of the manufacturing process. This analysis determined the optimal process parameters for the ISRCT using the tube sinking method and the effects of the ribbed dimension to attain the maximum Rt% such as the ratio of drawing stress to yield stress ( $\sigma/\sigma_y$ ), the ratio of the wall thickness and the ribbed height to the diameter  $[(t_r+h_r)/D]$ , the ratio of the ribbed base width and the ratio of the ribbed base circumference to the total number of ribs inside the tube  $[w_r/(n\pi d_r/n)]$ , the ratio of the ribbed tip width and the ratio of ribbed tip circumference to the total number of tube ribs  $[w_t/(n\pi d_t/n)]$  and the ribbed spiral angle ( $\psi^\circ$ ). The optimal Rt% of these five parameters was compared. From the results, the optimum Rt% on the method of the tube sinking process with ISRCT must not exceed 57 %, and the size of the ISRCT has to be precise with a gap between the ribbed base and the ribbed tip; the angle of the ribbed spiral must not be zero. The conclusions are that the optimal Rt% used in the manufacture of ISRCT is suggested to be lower than 57 %.

**Keywords** Ultra-small inner spiral ribbed copper tube · Heat transfer tube · Small size tube · Tube sinking method

### 1 Introduction

The initial method of manufacturing inner spiral ribbed tubes was invented over two decades ago and adopted by industrialists. Nowadays, however, better manufacturing methods are followed, even though the original techniques are sometimes used in the production of large ribbed tubes. The wall of the tube produced by the original method was cylindrical and the internal surface was spirally ribbed at an angle to the central axis of at least 35°. The roll forming process in the conventional method to produce a tube with an inner spiral ribbed surface started by feeding a flat metal sheet into a series of calendering machines to press it. The upper roller of each pair of the calendering machine had spiral grooved teeth and the lower roller had a smooth surface. The 'calendered' metal sheet was then rolled up along its length and both edges were welded together. The conventional method of production of an inner spiral ribbed tube is shown in Fig. 1a.

Nowadays, more modern techniques are employed. A grooved mandrel, with one end of the tie rod fixed at the other end, is inserted into the tube, capable of freely rotating. The tube size is reduced by multiple rollers rotating in a cycle around the tube as it is being drawn in the axial direction. Using this process, many grooves can be formed on the inner surface of the tube as seen in Fig. 1b.

This improved production method overcame the restriction in processing length. The grooved mandrel and a floating plug were connected with the tie rod, and the floating plug was fixed by a drawing die. This method made long tube processing possible, as well as feeding by using level-wound coils. Production was further improved by replacing the process rollers with steel balls. This development achieved high-speed rotation due to the weight reduction of the working head, despite the added weight of the steel balls and also reduced the frictional force between the steel balls and the copper tube compared with the roll type method, as shown in

T. Tangsri (✉) · S. Norasethasopon  
 Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok,  
 Thailand  
 e-mail: tangsritanit@yahoo.com

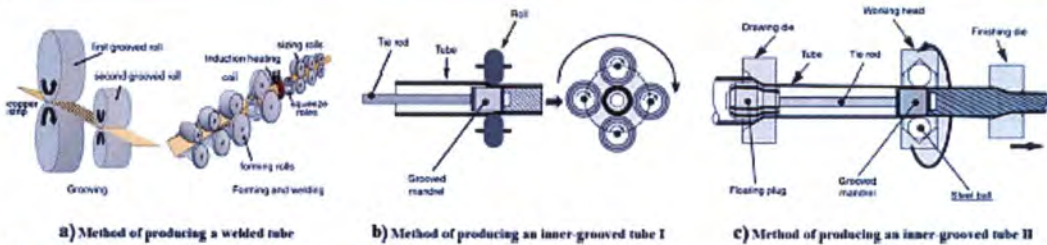


Fig. 1 The conventional method of inner spiral ribbed tube production [1]

Fig. 1c. A significant improvement in the manufacturing method of inner spiral ribbed tubes was made in 2007, with the introduction of groove shapes of inner grooved tubes using production methods with a grooved mandrel and a floating plug connected to a tie rod [1].

Several publications have addressed the state-of-the-art review of turbine blade cooling and the analysis of heat transfer and friction characteristics of the channel flow with two opposite ribbed walls. The effects of flow, Reynolds number and ribbed geometry (ribbed height, spacing, angle-of-attack and configuration) on heat transfer and pressure drop in the fully developed region of uniformly heated square channels has been investigated [2]. Further study of the combined effects of ribbed geometry and channel aspect ratio on the local values of heat transfer and pressure drop has also been reported [3].

Heat transfer and friction characteristics of a fully developed turbulent air flow in a square channel with transverse ribbing on one, two, three and four walls has been reported. The heat transfer coefficient and friction factor results were enhanced with the increase in the number of ribbed walls. This investigation could be used in various applications of turbulent internal channel flows involving different number of ribbed roughened walls [4].

Electronics equipment has become thinner and smaller with larger capacities and higher performance, copper alloys are now required to have higher strength, higher reliability (thermal resistance and stress-relaxation resistance) and better bending formability. This trend will continue more in the future [5].

The investigation of flow and heat transfer in a square section stationary duct equipped with high blockage ribbed on one face has been studied with a high-pressure turbine blade cooling channel. The behaviour of heat flow over a single-ribbed and a multi-ribbed domain showed the possible existence of flow structures longer than one ribbed-pitch length and suggested possible avenues of future experimental/numerical research to gain a full understanding of this class of flows. Validation using heat transfer measurements yielded good results on the ribbed surface, with larger variation on the surface of the ribbing itself [6].

Heat transfer to water was investigated for an upwardly inclined, internally ribbed tube with an angle of  $19.5^\circ$ . It was

found that heat transfer enhancement of the internally ribbed tube could postpone departure from nucleate boiling at the sub-critical pressure. However, the heat transfer enhancement decreased near the critical pressure. The rotational flow of the internal groove reduced the effect of natural convection and the internal wall temperature of the internally ribbed tube was uniformly distributed around the circumference. The effect of the acute variety of the fluid property on heat transfer and the correlation of the heat transfer coefficient on the top of the internally ribbed tube were calculated [7].

This research work examines the behaviour of various parameters of manufactured inner spiral ribbed copper tube (ISRCT). Seamless 5.00 mm outer diameter copper tube specimens were drawn using the tube sinking method. The experimental results can be applied to the manufacture of ultra-small ISRCT. The ultra-small tubes should be of great use for heat transfer in heat exchange components of electrical gadgets that have limited heat transfer area.

## 2 Theory

Tubes, particularly those with small diameters and requiring working on only their outer surfaces, were produced from cold-drawn coils by machines that straighten the stock and cut it to required lengths. Most of the tubes were produced from straight lengths rather than coiled stock. The surface finish of a tube blank can be improved and its wall thickness and/or diameter reduced by cold rolling on a plunger mill or, more frequently, by cold drawing. This is illustrated in Fig. 2.

Figure 2 illustrates the basic types of tube drawing. Sinking (Fig. 2a) was closest to wire drawing in that the tube was drawn through a die without a mandrel (or plug). In tube sinking, the tube was initially pointed to facilitate feeding through the die; it was then reduced in outside diameter while the wall thickness and the tube length were increased. The magnitude of wall thickness and tube elongation increase depended on the flow stress of the drawn part, die geometry and interface friction. The diameter was reduced while the wall slightly thickens and the inside surface roughens.

Of the five methods of tube drawing, it was found that the fixed cylindrical plug, fixed conical plug, floating plug and

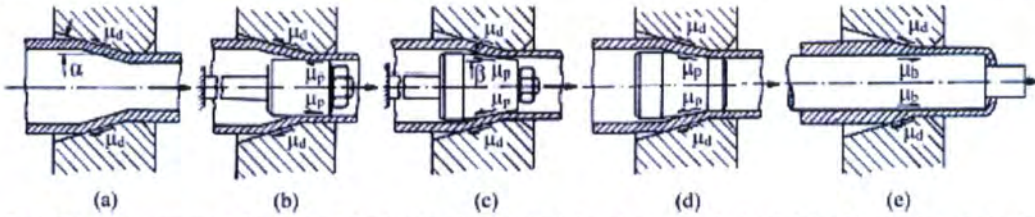


Fig. 2 Tube drawing processes. a Tube sinking, b drawing with a fixed cylindrical plug, c drawing with fixed conical plug, d floating plug and e drawing on a bar (or mandrel). [8]

moving mandrel methods were not appropriate for drawing the inner spiral ribbed copper tubes. The tube sinking method was found to be the most suitable for this task. However, the tube sinking method can cause tube deformation after drawing as the cross-sectional area and diameter of the tube will be reduced.

The standard equation of reduction of area (%) is as follows: where RA = reduction of area (%);  $A_b$  = initial area ( $\text{mm}^2$ );  $A_f$  = final area ( $\text{mm}^2$ ) [9].

$$RA = \frac{A_b - A_f}{A_b} \times 100(\%) \tag{1}$$

In this experiment, the cross-sectional reduction of area of the ISRCT is defined by:

$$A = A_w + A_r \tag{2}$$

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - d_w^2) + \left[ \left\{ \frac{1}{2} (w_{rb} + w_{rl}) h_r \right\} \times 45 \right] \tag{3}$$

Where  $A$  = cross-sectional area ( $\text{mm}^2$ ),  $A_w$  = cross-sectional area of the wall ( $\text{mm}^2$ ),  $A_r$  = cross-sectional area of the ribbing ( $\text{mm}^2$ ),  $D_o$  = outer diameter (mm),  $d_w = D_o - 2t_w$ , inner diameter (mm),  $w_{rb}$  = ribbed base width (mm),  $w_{rl}$  = ribbed lip width (mm),  $h_r$  = ribbed height (mm) and 45 is the number of ribs in the mother tube.

The total reduction of area (%) is as follows: where  $Rt$  the summation reduction of area (%)

$$Rt = \sum (RA_1 + RA_2 + RA_3 \dots \dots RA_{n_{total}}) (\%) \tag{4}$$

The stresses involved in tube sinking can be analysed by the method of Sachs and Baldwin [10] on the assumption that the wall thickness of tube remains constant. The equation of the drawing stress at the die exit was analogous to that describing the drawing stress in wire drawing. The cross-sectional area of the tube was related to the middle radius  $r$  and the wall thickness  $h$  by  $A \approx 2\pi rh$  [9].

$$\sigma_{sa} = \sigma_o \frac{1+B}{B} \left[ 1 - \left( \frac{A_f}{A_b} \right)^B \right] \tag{5}$$

Where  $B$  is given by:

$$B = \mu \cot \alpha \tag{6}$$

And

- $\mu$  Coefficient of friction between tube and die wall
- $\alpha$  Half-angle of die

The yield stress was taken equal to 1.1 for the complex stresses in tube sinking. A more complete analysis of tube sinking has been given by Swift [9].

The drawing stress is derived from axial stress, radial stress and hoop stress. The tube sinking yielded the lowest drawing stress used in the manufacture of inner spiral ribbed copper tube [11].

### 3 Specimens and experimental method

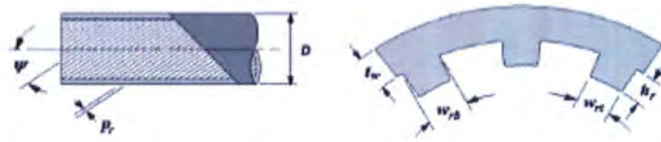
Twenty-three seamless ISRCTs were used as specimens. The specifications of the copper tubes were 5.00 mm outer diameter, 3.71 mm inner diameter, 0.364 mm wall thickness, 0.28 mm rib height, 0.33 mm rib base width, 0.175 mm rib lip width, 38° spiral angle, 0.393 mm rib pitch and 45 ribs (mother tube). The mother tube was prepared and its outer surface was cleaned and coated with a Teflon resin lubricant. The tube was dry drawn using a sodium stearate lubricant with a tungsten die. The half-angle of the die was 12° and the drawing speed was kept constant at 150 mm/s. The total reduction of area (Rt%) was increased for each successive

Table 1 Material properties and drawing conditions used (mother tube)

Parameter	Copper
Young's modulus, $E$ (GPa)	110
Yield stress, $\sigma_y$ (MPa)	79
Ultimate stress, $\sigma_u$ (MPa)	180
Poisson's ratio, $\nu$	0.33
Die half-angle, $\alpha$ (degrees)	12
Coefficient of friction, $\mu$	0.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Fig. 3** Illustrated cross-sectional and longitudinal axis of the inner spiral ribbed copper tube

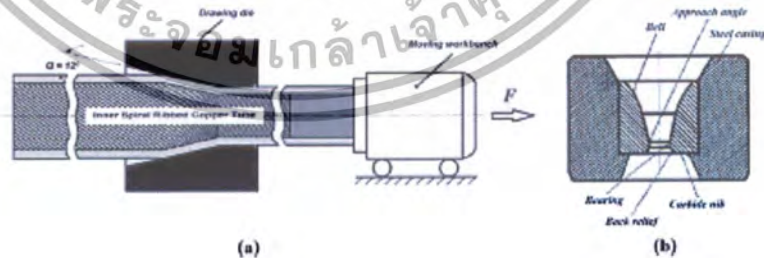


tube specimen; Rt was 2.52 % for the first tube specimen, 5.18 % for the second tube specimen and so on until Rt was 90.54 % for the 23rd tube. The sinking method was selected as the drawing method for the entire experiment, and the parameters of the specimens are listed in Table 1.

As heat exchangers, ISRCTs are manufactured for use in refrigerators, condensers and refrigerator evaporators. Manufacturing was done using a grooved mandrel and a floating plug connected with a tie rod. The floating plug was fixed by a drawing die (Fig. 1c). This method made long tube processing possible, as well as feeding using level-wound coil. The processing rate was further improved by replacing the process rollers with steel balls. This development achieved high-speed rotation with the weight reduction of the working head despite the added weight of the steel balls. It also reduced the frictional force between the steel balls and the copper tube as compared with the roller method. The tube had an annular wall with an inner surface. The inner surface was a profusion of inner ribbed spirals, each having a spiral angle. The cross-sectional and longitudinal axis of the ISRCT is shown in Fig. 3, where  $D$  = outside diameter (mm),  $\psi$  = ribbed spiral angle (degrees),  $P_r$  = ribbed pitch (mm),  $t_w$  = wall thickness (mm),  $h_r$  = ribbed height (mm),  $w_b$  = ribbed base width (mm) and  $w_t$  = ribbed tip width (mm).

Figure 4 shows the experimental model with tube sinking drawing methods. The drawing machine consists of a drawing die, a die holder and a moving workbench. The end of the tube was pointed with rotating dies that hammer (rotary swaging) the tube radially inwards to taper it, then the tube was fed into the dies and clamped to the jaws of the drawhead. The drawhead was moved by a hydraulic mechanism as shown in Fig. 4a. A sketch of the drawing dies is shown in Fig. 4b.

**Fig. 4** The experimental model



## 4 Results and discussion

After 23 passes of diameter reduction using a die half-angle of  $12^\circ$  ( $\alpha=12^\circ$ ), the behaviour of deformation in the ISRCT using the tube sinking method is shown in Fig. 5. As the outer diameter was reduced, the inner spiral ribbing and pitch contracted, while the inner surface became uneven. The contraction rates were different for increments of the Rt%, resulting in unequal rates in the increase of wall thickness. Other parameters, such as ribbed height ( $h_r$ ), ribbed base width ( $w_b$ ), ribbed tip width ( $w_t$ ) and ribbed spiral angle ( $\psi$ ), decreased with reduction area on each pass. There is a critical point when heat loss is maximised; further reduction in Rt after this will have a negative effect. The ribbed spiral angle was reduced after each drawing pass of the original tube.

### 4.1 Stress analysis

Tube sinking is a three-dimensional stress process which includes axial stress, radial stress and hoop stress. Axial stress is the tensile stress on the wall and ribbed area of the tube; this grows quickly in the ribbed region. Radial stress is the compressive stress in the tube wall zone; it might change to tensile stress in the ribbed area. Hoop stress is caused by the pressure inside the compressive stress. Its absolute value increases on the inside surfaces, but decreases rapidly from the ribbed base to the ribbed tip of the ISRCT. Thus, the effective stress is different between the tube wall and the ribbed region; it increases from the outer diameter to the inner surface of the tube wall and decreases from the ribbed base to the ribbed tip. The distribution of the effective strain is similar to the effective stress; the strain reaches its maximum value on the ribbed gap end and growth is distributed to the inside of the ribbed area in the ISRCT. The average strain in the ribbed gaps is higher than on the inside of the ribbed area. The deformations on the

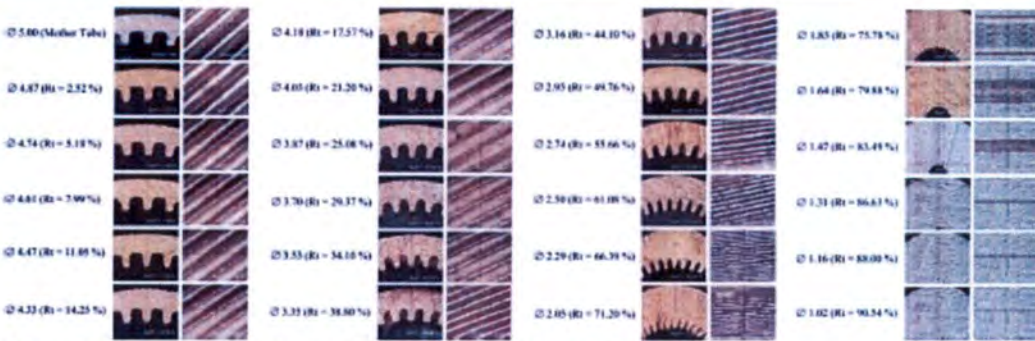


Fig. 5 The cross sections and the spiral angles  $\times 5$  of the ribbing using the tube sinking method

ribbed gap are therefore more intensive than those on the inside of the ribbed area.

Dimension changes of the ISRCT after drawing using the tube sinking method showed a deformation of the ribbed height, ribbed base width, ribbed tip width and ribbed spiral angle. The ribbed height and spiral angle were reduced after drawing; the width of the ribbed base reduced more than that the width of ribbed tip. The deformations in the ribbed gap region were more intensive than in the ribbed area. However, for a single rib, the strain distribution differed from the base of the rib to the tip of the rib. The strain in the ribbed base region was larger than that in the ribbed tip area. The deformation of the rib base was therefore more intensive than at the rib tip. The angle of the ribbed spiral changed in a negative way, until finally it was close to zero.

The Rt% increased as the reduction of the cross-sectional area decreased with every pass of the 23 test tube specimens through the die, as outside diameter and dimension size of the ribs decreased. The ratio of drawing stress to yield stress ( $\sigma/\sigma_y$ ) increased as the cross-sectional area decreased. The drawing stress increased together with the Rt% and the relationship between the proportions of the drawing stress to yield stress. The manufacture of ISRCT should be considered and compared with the value of  $\sigma/\sigma_y$ , which changes during the tube sinking process. The outside diameter of the tube was measured with accuracy as long as  $\sigma/\sigma_y$  was less than 1; the deformation of the tube after passing through the die was in the elastic range. The diameter of the tube was determined by

the size of the die and it was accurate after drawing. If  $\sigma/\sigma_y$  was greater than 1.00, then the deformation of the tube after passing through the die was in the plastic range. The outside diameter of the tube was not determined by the size of the die; it was deformed permanently. This deformation produced a lack of precision and therefore the method cannot be used in industrial ISRCT manufacture. In consequence, it was determined that the production of ISRCT using a tube sinking method should not be used to reduce the Rt% more than 57.7% (the cross-sectional profile can see in Fig. 6a). When  $\sigma/\sigma_y$  was 4.55, the Rt% was equal to 90.54, and the outside diameter was 1.02 mm.

When increasing the Rt%, an annealing process can relieve the residual stress in the tube after the cold working method. It was found that while the Rt% increased to 57.7%, the outer size diameter of the tube after drawing remained accurate and  $\psi^\circ$  decreased to 30°. Thus, the production of ultras-small ISRCT can be determined by the outside diameter and the  $\psi^\circ$  of the mother tube before drawing to predict the outcome of the ISRCT as required.

The relationship between drawing stress to yield stress and the percentage total reduction of area is depicted in Fig. 7.

#### 4.2 Changes in the shape

The copper tube had a spiral ribbing on the inside surface after drawing. The profile of the cross-sectional area of the spiral ribbing was changed after drawing; the deformation of the

Fig. 6 Photos showing the detail of three cross-sectional profiles after the tube sinking method  $\times 5$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

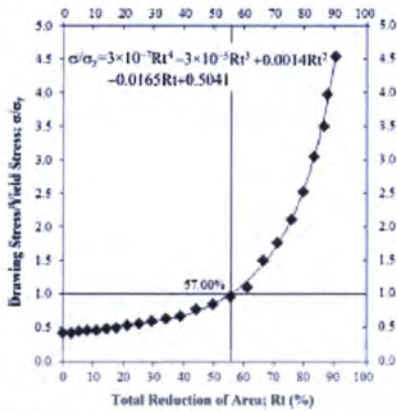


Fig. 7 The relationship between the ratio of drawing stress to yield stress  $\sigma_d/\sigma_y$  and total reduction of area; Rt%

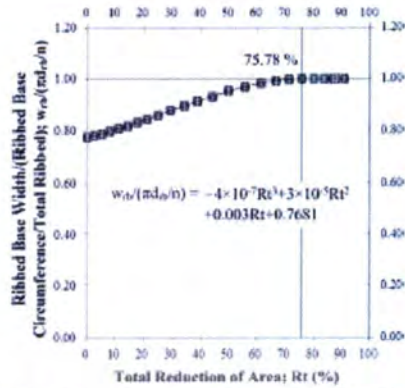


Fig. 9 The relationship between ribbed base width, ribbed base circumference and total ribbing;  $[w_b/(\pi d_b/n)]$  and total reduction of area; Rt (%)

tube was prolonged along the axial direction. The deformation in the radial direction of the ribbed region and the ribbed gap also changed, and the outside diameter of the tube reduced gradually, moving forward to the end of the reducing zone. As a result, the wall of the ISRCT was smoothly extruded and the outer diameter was reduced to the size of defining zone. As the tube was drawn, the outside diameter decreased and the wall thickness increased with each drawing pass. The tube received compressive strain in the circumferential direction, leading to the increase in the wall thickness as tube deformation could not withstand the pressure inside the tube. The height of the ribbing decreased with the compressive strain in the circumferential direction. The limit of ISRCT sinking drawn out through the die was reached when the wall thickness plus the ribbed height divided by the outside diameter  $[(t_w + h_r)/D]$  was then equal to 0.50  $[(t_w + h_r)/D = 0.50]$  and the Rt% was

then equal to 90.54 %. At this point, the hole inside the tube could not transmit the fluid anymore as the tube was closed at one end. When  $[(t_w + h_r)/D]$  became higher than 0.50  $[(t_w + h_r)/D > 0.50]$ , the tube was broken and fractured. The relationships between wall thickness, ribbed height, tube diameter and the percentage total reduction of area are shown in Fig. 8.

After tube sinking for the first time, the outside diameter and the reduction of area were both reduced and the ribbed gap width at the base changed more than the ribbed thickness. This meant that the dimension of the ribbed gap width at the base was reduced significantly. From the second drawing pass onwards, the outer diameter reduced, wall thickness increased and the initial arch effect on the side view of the ribbed gap width the base became more apparent. With more draw passes, the drawing force increased with the arch effect. The inside dimension of the ISRCT became uneven and the quality

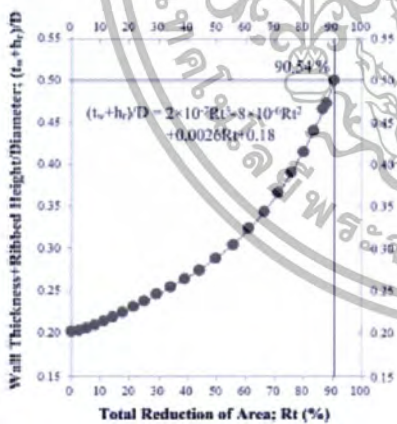


Fig. 8 The relationship between wall thickness + ribbed height / diameter;  $[(t_w + h_r)/D]$  and total reduction of area; Rt (%)

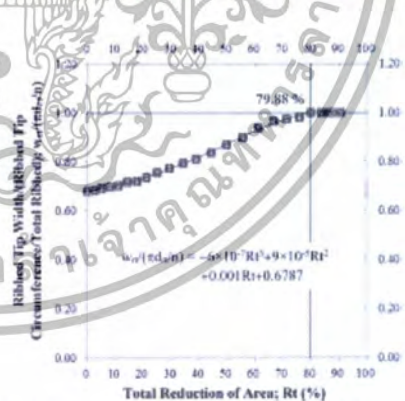


Fig. 10 The relationship between ribbed tip width, ribbed tip circumference and total ribbing;  $[w_t/(\pi d_t/n)]$  and total reduction of area; Rt (%)

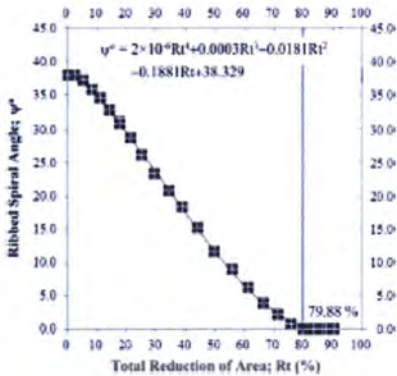


Fig. 11 The relationship between ribbed spiral angle;  $\psi^\circ$  and total reduction of area; Rt (%)

of the side view of the ribbed gap width at the base and the surface of the inner spiral were affected. Finally, the tube was damaged. When  $\varnothing=1.83$  mm, Rt=75.78 %, this cross-sectional profile is shown in Fig. 6b. The space between the ribbed gaps at the base was reduced to nothing, then the ribbed base width multiplied by the total ribbing inside the inner copper tube and then divided by the length of the ribbed base circumference of the ribbed base width of the ISRCT became equal to 1.00 [ $w_{rb}/(\pi d_{rb}/n)=1.00$ ]. The heat transfer from the ribbed gaps at the rib base became inefficient as the ISRCT now approached a conventional tube. The relationships between ribbed base width, ribbed base circumference, total ribbing and the percentage total reduction of area are shown in Fig. 9.

Similarly, the ribbed gap width of the ribbed tip changed more than the ribbed thickness. The dimensions of the inner ribbed gap width on the ribbed tip reduced significantly when  $\varnothing=1.64$  mm and Rt=79.88 %; the cross-sectional profile is shown in Fig. 6c. The space of the ribbed gap width on the

ribbed tip was reduced to nothing. Now, the ribbed tip width multiplied by the total ribbing inside the inner copper tube divided by the length of the ribbed tip became equal to 1.00 [ $w_{rt}/(\pi d_{rt}/n)=1.00$ ]. The gap between the ribbings had vanished and fluid could no longer flow through the ribbing. The ISRCT had now become a conventional tube. The relationship between ribbed tip width, ribbed tip circumference, total ribbing and the percentage total reduction of area are shown in Fig. 10.

The ribbed spiral angle inside ( $\psi^\circ$ ) the tube was altered after each drawing pass and depended upon the Rt% of the cross-sectional area. The  $\psi^\circ$  of the mother tube before the experiment was 38°, after the tube was drawn through the forming die,  $\psi^\circ$  decreased continuously with each pass. The ISRCT using the tube sinking method was freely deformed due to the absence of resistance pressure inside the tube. The deformation at the ribbed base was more than at the ribbed tip and  $\psi^\circ$  decreased at the same time. The reduction area per pass (RA/P) of 49.76 % for one pass of the tube sinking method was consistent with the second tube sinking drawing reduction in this experiment; Rt was 2.52 % for the first tube specimen, 5.18 % for the second tube specimen and so on. At an Rt% of 68.81 %, flute marks were found at the top of the ribbing, and lug marks formed on the back side of several ribs. When  $\varnothing=1.83$  mm (Rt=75.78 %),  $\psi^\circ$  was close to zero degrees, the strain had spread to the ribbed region,  $\psi^\circ$  had reduced continuously and was compressed and close together. This corresponded to calculation using the equation  $\psi = [(180 \times (\tan^{-1}(((v_{r0} - v_{r1})/2)/h_r)))/\pi] \times 2$ . On the mother tube  $\psi^\circ$  was 38°, fluid flow on the ribbed region surface was turbulent and heat transfer was efficient. With each drawing pass,  $\psi^\circ$  decreased continuously and therefore heat transfer efficiency also reduced. As  $\psi^\circ$  approached zero, fluid flow within the ribbed tube changed from turbulent to laminar, reducing the heat transfer efficiency. Thus, the efficiency of heat transfer was lower than with high  $\psi^\circ$ ; when  $\psi^\circ$  was close to zero, the heat transfer had the same effect as a straight ribbed tube. The relationship between ribbed spiral angle and the percentage total reduction of area is shown in Fig. 11. The comparisons of the five parameters used in the manufacture of inner spiral ribbed copper tube are shown in Fig. 12.

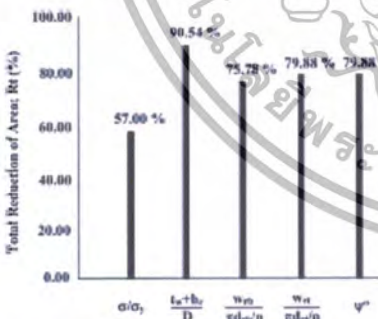


Fig. 12 Comparisons of the total reduction of area; Rt (%) and the five parameters to be used in the manufacturing of inner spiral ribbed copper tube (ISRCT)

5 Conclusions

This research was concerned with the influences of total reduction of area on drawing stress and tube dimension in inner spiral ribbed copper tube sinking. It was found that:

1. The drawing stress was derived from the axial stress, radial stress and hoop stress. In fabricating ISRCT, the

ratio of drawing stress to yield stress ( $\sigma/\sigma_y$ )=1.00 was determined by the outside diameter. This was accurate standard size or expected design and could be used in industrial manufacturing.

- The height of the ribbing was reduced with compressive strain in the circumferential direction, and there was no pressure inside the tube for the deformation resistance. If the wall thickness plus the rib height divided by the diameter was equal to 0.50  $[(t_w+h_r)/D=0.50]$ , then the tube was closed at the end and could not transmit any fluid.
- If the ribbed base width multiplied by the total ribbing inside the inner copper tube divided by the length of the ribbed base circumference of the ribbed base width of the ISRCT was equal to 1.00  $[w_{rl}/(\pi d_r/n)=1.00]$ , then the heat transfers at the ribbed gap on the ribbed base were inefficient and showed features similar to conventional tubing.
- If the ribbed tip width multiplied by the total ribbing inside the copper tube, divided by the length of the ribbed tip, was equal to 1.00  $[w_{rt}/(\pi d_r/n)=1.00]$ , then the gap between the ribs vanished and heat transfers were the same as conventional tube.
- The deformation of the ribbed base was more than at the ribbed tip;  $\psi^\circ$  reduced continuously and in a negative way. If  $\psi^\circ$  was close to zero, then the heat transfer would have the same effect as a straight ribbed tube.
- ISRCT after tube sinking had a precise size, a gap between the ribbed base and the ribbed tip and a spiral angle of the groove if the total reduction of area was lower than 37 %.

**Acknowledgments** The authors would like to express deep appreciation to Prof Dr. Kazunari Yoshida, Department of Precision Engineering, Tokai University, 1117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, Japan 259–1292, for valuable and useful advice and comments.

## References

- Mamoru H (2007) Development trends in inner-grooved tubes in Japan, Hitachi Cable Review No. 26, 1–3
- Han JC, Park JS, Lei CK (1985) Heat transfer enhancement in channels with turbulence promoters. *J Eng Gas Turbines Power* 107:629–635
- Han JC (1988) Heat transfer and friction characteristics in rectangular channels with rib turbulators. *J Heat Transf* 110:321–328
- Chandra PR, Alexander CR, Han JC (2003) Heat transfer and friction behaviors in rectangular channels with varying number of ribbed walls. *Int J Heat Mass Transf* 46:481–495
- Toshihisa H (2005) Developments and future trends in copper alloy strip for electronic equipment and in copper tube for air conditioners. *Kobelco Technol Rev.* (26)
- Arts T, Benocci C, Rambaud P (2007) Experimental and numerical investigation of flow and heat transfer in a ribbed square duct 3rd International Symposium on Integrating CFD and Experiments in Aerodynamics, 20–21 June 2007, U.S. Air Force Academy, CO, USA, 1–19
- Tang R, Yin F, Wang H, Chen T (2007) An investigation into the heat transfer characteristics of spiral wall with internal rib in a supercritical sliding-pressure operation once-through boiler, front. *Energy Power Eng. China* 300–304
- Dieter GE, Kuln HA, Semian SL (2003) Handbook of workability and process design. Copyright © 2003 by ASM International® All rights reserved. ISBN: 0-87170-778-0 SAN: 204-7586
- Dieter GE (1988) Mechanical metallurgy. SI metric edition, McGraw-Hill, ISBN 0-07 102405-8
- Sachs G, Baldwin WM (1946) *Trans Am Soc Mech Eng* 68:655–662
- Tangari T, Norasathasophon S, Kazunari Y (2014) Fabrication of small size inner spiral ribbed copper tube by fluid manifold drawing. *Int J Adv Manuf Technol* 70:1925–1930

# *3D FEM validation of ultra-small inner spiral ribbed copper tube using the tube sinking method*

**Tanit Tangsri & Somchai  
Norasethasopon**

The International Journal of  
Advanced Manufacturing Technology

ISSN 0268-3768

Int J Adv Manuf Technol  
DOI 10.1007/s00170-015-7328-3

ONLINE  
FIRST

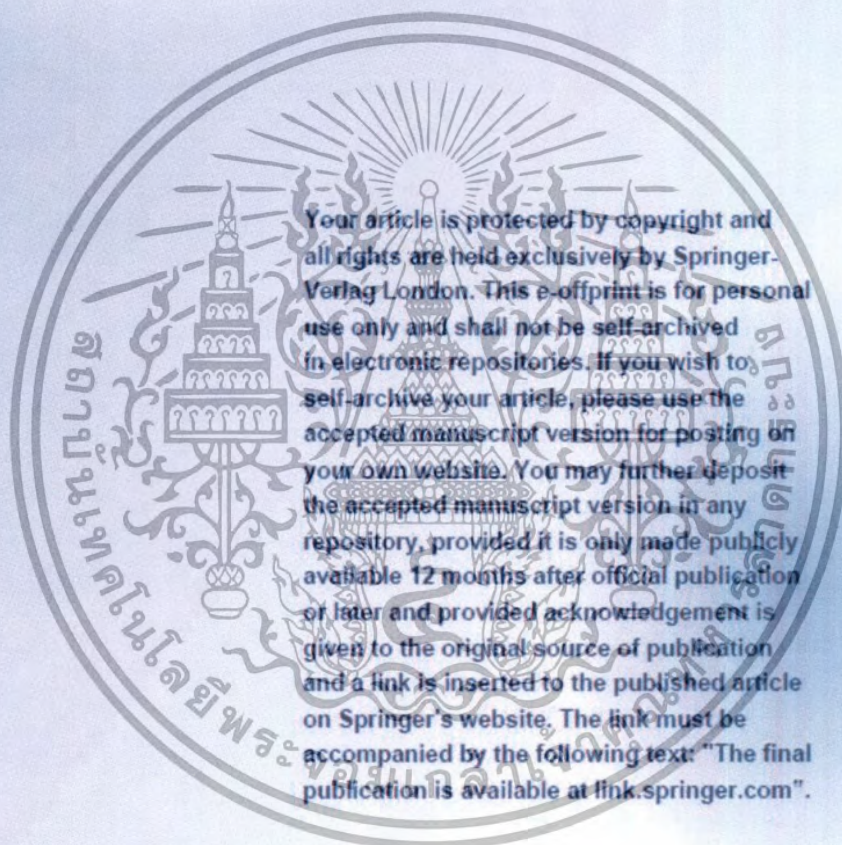
The International Journal of

Advanced  
Manufacturing  
Technology

Springer

Springer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



 Springer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3D FEM validation of ultra-small inner spiral ribbed copper tube using the tube sinking method

Tanit Tangsri<sup>1</sup> · Somchai Norasethasopon<sup>1</sup>

Received: 25 November 2014 / Accepted: 15 May 2015  
© Springer-Verlag London 2015

**Abstract** This research related to the development of ultra-small inner spiral ribbed copper tubes (ISRCTs) which have high quality and efficiency in transferring heat. The deformation behaviour of the ISRCT was studied. Three-dimensional finite element models were constructed for the various process parameters: the change of the cross-section profiles of the ribbed contours and the spiral angle of the ribbed area of the ISRCT, for twelve multi-pass drawings through the die using the tube sinking method. The effect of the ribbed spiral angle and the ribbed cross-sectional profile was also studied. Modelling and simulation techniques were performed using commercial Abaqus software to learn whether the surface profiles of the ISRCT increased or reduced with tube sinking using the finite element method (FEM). Results of the multi-pass drawing analysis were summarised and compared to the experimental findings. The FEM simulation approach was used to analyse the changes of ten parameters: von Mises stress, wall thickness, ribbed base width, ribbed tip width, ribbed base gap, ribbed tip gap, ribbed height, ribbed pitch, axial displacement and ribbed spiral angle. This procedure can be used to improve product quality and to study the effect of the various parameters. The results will be very valuable for researchers and well engineers for future design of ultra-small ISRCT to improve the quality and efficiency of heat transfer.

**Keywords** Ultra-small inner spiral rib copper tubes · Heat transfer tube · Finite element method · Tube sinking method

✉ Tanit Tangsri  
tangsritanit@yahoo.com

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

### 1 Introduction

Cold drawing is one of the most common processes of metal forming. This involves the change and/or reduction of the section of a bar or a tube by pulling it through a conical die [1]. Drawing can be used to reduce the diameter or wall thickness of seamless tubes and pipes, after initial tube formation by some other process such as extrusion. Tube drawing can be done with or without a mandrel, which is often used to prevent buckling or wrinkling of the workpiece. The simplest method uses no mandrel for diameter reduction. The term tube sinking is sometimes applied for this operation [2]. A variant of the wire drawing process is tube drawing. The thickness and/or diameter of the tube is reduced by pulling through a die. In this process, conventionally called sinking, the tube is drawn through the die without support for the inside surface of the tube. Since the inner surface of the tube is not supported, wall thickness and the internal surface may become uneven [3]. Micro-groove fin-inside tubes have excellent heat transfer enhancement and capillary geometry; they are used in micro-heat pipes and generally enhance natural convection by 20 % and overall heat transfer by 8 % [4]. An investigation into the characteristics of copper-finned micro-grooved surfaces for effective evaporation heat transfer with applications to the cooling of high flux electronics found that the micro-grooves increase the internal surface area of the tubes and this greatly improves the heat transfer capability compared to flat/smooth tubes. This could be applied to refrigeration, mechanical engineering and the micro-electron industry as an important heat transfer process [5]. The behaviour of various parameters of an inner spiral ribbed copper tube, manufactured by the ultra-small tube drawing method, was examined. Seamless 5.00-mm-diameter copper tube specimens were drawn using tube sinking to reduce the size of the copper tubes. This can be applied to the production of

Published online: 30 May 2015

 Springer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ultra-small inner spiral ribbed copper tubes which are particularly useful for heat transfer in the heat exchangers of electrical appliances [6]. The development of ultra-small inner spiral ribbed copper tubes can identify the optimal reduction area per pass using the tube sinking method and the effect of rib dimension reduction and orientation change of the inner spiral ribbed copper tube. Twenty-one seamless inner spiral ribbed copper tubes were used. Results indicated that the optimal reduction area per pass (Re/P) for each successive tube specimen was 2.52 % for the first, 5.18 % for the second and so on, until an Re/P of 86.63 % was reached for the final specimen [7]. There are two types of conventional drawing method in use today in the production process. The first type of production method of inner spiral ribbed copper tube begins with the process of roll forming of a flat metal sheet, using rolling balls on each side of the surface. The metal sheet is then rolled into a tube until the two longitudinal edges of the metal sheet touch each other. The joint of the edges is welded along the length of the rolling plate to make a long inner spiral ribbed tube. The second method uses a mandrel with an outer spiral ribbed surface; this is connected to a floating plug. The mandrel is held in place by the friction forces between the mandrel and the tube. The tube is then drawn through a die. The manufactured tube is further improved by applying pressure from steel sphere balls on the tube with an outer ribbed spiral surface mandrel inside. This development increases the production speed of the manufacturing process [8]. This research related to the development of ultra-small inner spiral ribbed copper tubes (ISRCTs) with high-quality heat transfer. This analysis determined the optimal process parameters for the ISRCT using the tube sinking method and the effects of the ribbed dimension to attain the maximum Rt% such as the ratio of drawing stress to yield stress ( $\sigma/\sigma_y$ ), the ratio of the wall thickness and the ribbed height to the diameter  $[(t_w+h_r)/D]$ , the ratio of the ribbed base width and the ratio of the ribbed base circumference to the total number of ribs inside the tube  $[w_{rb}/(\pi d_o/n)]$ , the ratio of the ribbed tip width and the ratio of the ribbed tip circumference to the total number of tube ribs  $[w_{rt}/(\pi d_o/n)]$  and the ribbed spiral angle ( $\psi^\circ$ ). The optimal Rt% of these five parameters was compared. From the results, the optimum Rt% on the method of the tube sinking process with ISRCT must not exceed 57 %, and the size of the ISRCT has to be precise with a gap between the ribbed base and the ribbed tip; the angle of the ribbed spiral must not be 0. The conclusions are that the optimal Rt% used in the manufacture of ISRCT is suggested to be lower than 57 % [9]. The Kobe Steel Group has the largest share of the Asian market for high-performance copper alloy strips for electronic equipment and for air conditioning copper tubes. The high-performance copper alloy strips and copper tubes meet the diverse needs of their customers [10]. Tubes with internal grooves are used in air conditioners to conserve energy. The demand for high-performance grooved tubes is increasing in response to the

recent Conservation of Energy Law regarding alternative refrigerants in Japan. This increasing development trend in inner-grooved tubes in Japan has resulted in changes in production methods and the shapes of the inner surface grooves in the tubes, used in fin-tube-type heat exchangers [11]. A high-speed oil-filled ball spinning and drawing process was developed to manufacture the axially grooved heat pipe with highly efficient heat transfer performance, and the forming mechanism of micro-grooves inside the pipe was investigated. The ball spinning process used a full oil-filling method to set up a steady dynamic oil-film. This reduces the drawing force and improves the surface quality of grooved copper tubes [12].

## 2 Principle of tube sinking

Tube sinking is an incremental metalworking process to size a tube by shrinking a large-diameter tube into a smaller one by drawing through a die; the tube is pointed at one end and pressed between two semi-circular jaws. Tube sinking is drawing without a mandrel; the tube is pulled through the drawing die hole with no support from inside. In this process, only the external diameter measurements are precise; the wall thickness and internal diameter can deviate more. Tube sinking is only applied to tubes with smaller internal diameters. The principle of tube sinking is shown in Fig. 1.

To calculate the principal strain and drawing force, the following parameters are used:

The tube sinking permissible deformation or  $\epsilon_{p, \max}$  is 20–50 % (from drawing force) of the principal strain  $\epsilon_p$ .

It is possible to write the following equation,

$$\epsilon_p = \ln \frac{d_o}{d_i} \quad (1)$$

where

$\epsilon_p$  is the principal strain

$d_o$  is the internal diameter before drawing (mm) and

$d_i$  is the internal diameter after drawing (mm).

The principal strain can be expressed as a percentage according to the equation



Fig. 1 The principle of tube drawing without a mandrel

$$\varphi_p \% = \varphi_p \cdot 100(\%) \quad (2)$$

The drawing force can be expressed by the following equation

$$F_{dr} = \frac{A_1 \cdot k_{strm} \cdot \varphi_p}{\eta_F} \quad (3)$$

where

$F_{dr}$  is the drawing force (N),  
 $A_1$  is the tube diameter after drawing ( $\text{mm}^2$ ),  
 $k_{strm}$  is the mean flow stress ( $\text{N/mm}^2$ ) and  
 $\eta_F$  is the deformation resistance where  $\eta_F = 0.4-0.6$  for  $\varphi_p = 15\%$  and  $\eta_F = 0.7-0.8$  for  $\varphi_p = 50\%$ .

The permissible drawing force is determined by

$$F_{perm} = A_1 \cdot R_m \quad (4)$$

where

$F_{perm}$  is the maximum force which can be carried into the tube cross-section (N) and  
 $R_m$  is the tensile strength of the tube material ( $\text{N/mm}^2$ ).

The limits for the permissible principal strain depend upon the required drawing force. The drawing force is applied to the tube cross-section after deformation, and it must always be lower than the tensile force [13].

The friction coefficient is dependent upon several parameters, of which the most important are material roughness, relative velocity, thickness of the oil film and normal pressure. The influence of these parameters on friction behaviour is not easily identifiable and measurable with specific tests [14].

In the finite element method (FEM), the contact was supposed to behave following a Coulomb friction law:

$$\tau = \mu p \quad (5)$$

where

$\tau$  is the frictional shear stress ( $\text{N/mm}^2$ ),  
 $\mu$  is the friction coefficient and  
 $p$  is the normal stress in the contact surface ( $\text{N/mm}^2$ ).

### 3 Experimental and FEM simulation methods

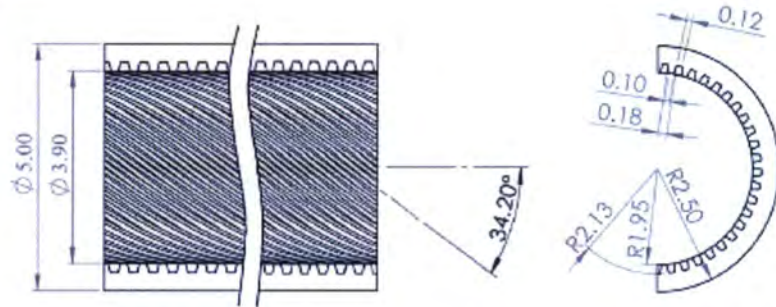
For this experiment and the FEM simulation model, seamless inner spiral ribbed copper tubes (ISRCTs) were used as specimens. A universal testing machine (UTM) was employed with Abaqus software three-dimensional (3D) finite element analysis for the simulation. The tube drawing process with ISRCT used specimens with dimensions of 5.00 mm outside diameter, 3.90 mm inside diameter, 0.370 mm wall thickness, 0.18 mm rib height, 0.18 mm rib base width, 0.10 mm rib tip

width, 34.20° rib spiral angle and 0.27 mm rib pitch for 45 ribs. A mother tube was prepared in the experimental setup with its outside surface cleaned and coated with a Teflon resin lubricant, and then the tube was drawn using sodium stearate lubricant ( $\mu = 0.02$ ). The tungsten die was modelled as a rigid body, the die half-angle was 12° ( $\alpha = 12^\circ$ ) and the drawing speed kept stable at 150 mm/s. The cross-section area of reduction per pass (Re/P) was kept between 7 and 25 %. A drawing of the cross-section of the ISRCT is shown in Fig. 2, and the parameters of the specimen mother tube are listed in Table 1.

A 3DFEM uses a numerical analysis technique for approximating solutions for a variety of engineering problems. FEM originated as a method of stress analysis, and the procedure produces many simultaneous algebraic equations which are generated and solved using computer techniques. It transforms a physical system with an infinite number of unknowns into a system with a finite number of variables. Abaqus software is used for solving FEM and partial differential equations. FEM modelling of ISRCT and the dies for the tube sinking method constructed the geometric model in Abaqus software. 3D models of ISRCT and dies were generated using key points, lines and areas. The cross-section was then revolved about the x-axis to obtain the quarter model. The cross- and longitudinal sections of the ISRCT experimental models used the axis of force in the tube sinking. 3D models of ISRCT and dies used for simulation are shown in Fig. 3.

Finite element analysis of tubular expansion was performed using Abaqus software. Mapped fields can only be used in models in which supported element types are used in the mesh. The most commonly used elements are supported, including shells. Supported element classes are according to the topology of the representative element type, shape, number of nodes and number of integration points. In this simulation, the total elements of ISRCT are well-adapted for 3D with 104,814 solid element contacts. There are two main components, C3D4 4-node linear tetrahedron with 84,074 solid element inertia loads on the ribbed region. For stress/displacement analyses, the first-order tetrahedral element C3D4 is a constant stress tetrahedron, which should be avoided as much as possible as the element exhibits slow convergence with mesh refinement. This element provides accurate results only in general cases with very fine meshing. Therefore, C3D4 is recommended only for filling in regions of low-stress gradient in meshes of elements. The wall of the tube has 20,740 solid elements of C3D8R 8-node linear brick and reduced integration with hourglass control. This is a well-adapted element for 3D contact and for forming simulations. Abaqus/Explicit offers two alternative kinematic formulations for the C3D8R solid element that can reduce the computational cost. The total elements of die are 1683 quadrilateral linear, R3D4 4-node 3D bilinear rigid quadrilateral. R3D4 elements can specify the thickness of the element if no thickness is

**Fig. 2** Cross-section of the ISRCT



given. The continuum, structural and rigid element types can be included and the respective node types generated in the rigid body. When connector elements are included in the rigid body, the type of generated nodes depends on whether the rotational degrees of freedom are active for their connection type. If connector elements that activate the material flow degree of freedom at nodes are included in the rigid body, the material and flow through the rigid body as that degree of freedom are constrained by the motion of the rigid body. The supported representative elements are shown in Fig. 4.

Meshing of the ISRCT and die for the tube sinking method was done by using a 3D node structural solid element. The material had nonlinear characteristics, shown in Fig. 5a. The analysis concerned the contacts taking place between the inner surface of the die and the outer surface of the ISRCT. A contact pair was generated using the contact wizard and a friction contact with coefficient of friction 0.02 was modelled. Various lubricants were also incorporated in the modelling by inputting values of the coefficient of friction. The contact pair between the ISRCT and die is shown in Fig. 5b. In the simulation, the die was fixed, and the tube moved past the die along the  $x$ -direction. Boundary conditions were applied on the nodes. The number of unknowns in the global force vector produced more global displacement vector matrices than equations. After applying boundary conditions, the number

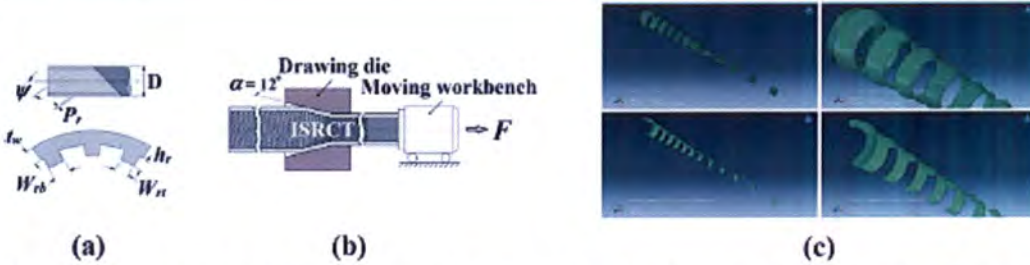
of unknowns reduced to equal to or less than the number of equations. The boundary conditions of the ISRCT and die are shown in Fig. 5c. The material used for the ISRCT in the tube sinking had a modulus of elasticity of  $110,000 \text{ N/mm}^2$  and Poisson's ratio 0.34. There was a nonlinear type of contact analysis between the die inner and the ISRCT outer surfaces. Thus, it became necessary to introduce the nonlinear nature of the material in the analysis. Figure 5d shows the nonlinear behaviour of the ISRCT material as a stress-strain diagram. In the analysis, the part under study is the ISRCT and not the die. The die material is assumed to have a very high value of the modulus of elasticity at  $2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$  and a Poisson's ratio of 0.3, thus the stress and FE simulation time plots only for the ISRCT.

#### 4 Results and discussion

The rib and gap deformation during tube sinking was analysed by both finite element simulation and experiment. The drawing stresses as von Mises distributions in the tube sinking process were calculated using commercial Abaqus software, based on the finite element method. The experimental tests as well as some other drawing variants, with different profile parameters, were evaluated numerically. The total reduction of area (Rt%) was increased for each successive tube specimen; Rt was 11.05% for the first tube specimen, 27.38% for the second and so on until Rt was 84.10% for the twelfth multi-pass drawing. The percentage of the total reduction of area was increased, and the concave profiles of the ISRCTs were taken into consideration. After 12 multi-passes of total reduction of the area using a half-angle  $12^\circ$  die ( $\alpha=12^\circ$ ), the deformation behaviour of the ISRCT with the tube sinking method is shown in Fig. 6. As the outer diameter reduced, the inner spiral ribs and pitches contracted while the inner surface became uneven. The increase in wall thickness and axial displacement, contrary to the ribbed base width, ribbed tip width, ribbed base gap, ribbed tip gap, ribbed height, ribbed pitch and ribbed spiral angle, was decreased with each pass. The strain distribution of the ribbed section was not

**Table 1** Material properties and drawing conditions used (mother tube)

Parameter	Copper
Young's modulus, $E$ (GPa)	110
Buck modulus, $k$ (GPa)	114.58
Shear modulus, $G$ (GPa)	41.015
Tangent modulus, $E_t$ (GPa)	1
Yield stress, $\sigma_y$ (MPa)	150
Ultimate stress, $\sigma_u$ (MPa)	250
Poisson's ratio, $\nu$	0.34
Die half angle, $\alpha$ (degrees)	12
Coefficient of friction, $\mu$	0.02
Density, $\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	8300

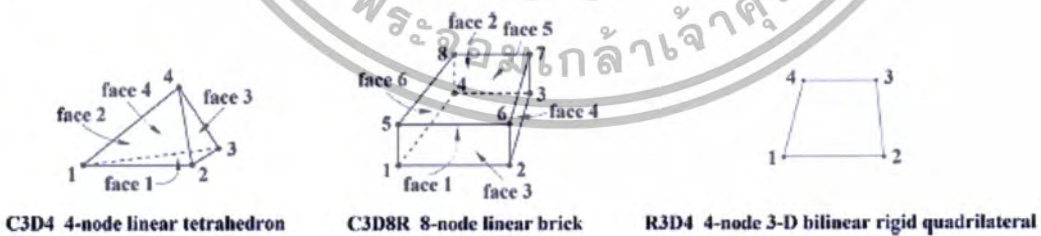


**Fig. 3** a The cross- and longitudinal sections of the inner spiral ribbed copper tube:  $D$  = outside diameter,  $\psi$  = ribbed spiral angle (degrees),  $P_r$  = ribbed pitch (mm),  $t_w$  = wall thickness (mm),  $h_r$  = ribbed height (mm),  $w_{rb}$  = ribbed base width (mm) and  $w_{rt}$  = ribbed tip width (mm). b Experimental model using the axis of force in drawing with a hollow tube. c 3D model of die and ISRCT used for simulation

uniform from the ribbed base to the ribbed tip. Closer to the ribbed tip, the strain was higher and it was greatest at the ribbed base. The deformation at the ribbed base was more severe than at the ribbed tip, while the spiral ribbed angle decreased with each pass. The tube sinking method showed the greatest change in all of the mentioned parameters. The profiles of the ISRCT from experimental results and FEM simulations are shown in Fig. 6.

In this case, the colour grey was selected for elements with no results. The die elements appear grey because the die is a rigid surface for which no stress results exist. The results of the ISRCT specimens are available in the output database file created by the 12 steps of multi-pass drawing by the optimisation process. Figure 8 shows a history output image and also the von Mises stress design response for each multi-pass drawing. There was minimum von Mises stress during the first step, although the resulting optimised shape allows the von Mises stress to increase slightly and continuously under the loading conditions with a maximum at the final step. The computer programme read all the von Mises stresses in the results file and obtained the maximum value. This value was then printed along with the element, section point and integration point numbers where it had occurred. The stresses at steps 1–12 are shown in Fig. 7. The results of FEM analysis of von Mises stress waves are shown as 12 multi-pass drawings in the case of the tube sinking process. The variation of equivalent stress for a point located at the cross-section profile of the ISRCT can be considered.

Figure 8a presents the drawing stress and number of multi-pass drawings. Figure 8b shows a cross-section profile contour of ISRCT to investigate von Mises stress simulations. This was carried out to identify the best performing configuration at any point, i.e., point 1 (node 512), point 2 (node 5973), point 3 (node 5974), point 4 (node 5975), point 5 (node 5976), point 6 (node 390), point 7 (node 33757), point 8 (node 33885), point 9 (node 33875), point 10 (node 33686), point 11 (node 33872) and point 12 (node 27043). The variations measured the existence of redundant von Mises stress, which occurred as a result of the multi-pass tube sinking. Von Mises stress increased for all nodes after multi-pass drawing across the die. In this simulation, von Mises stress was highest from point 8 (node 33885) at the base of the ribbed regions and intermediate at points 1 and 2 (nodes 512 and 5973) at the surface on the outer layer regions. The trend was lowest on point 4 (node 5975) at the middle of wall thickness and point 12 (node 27043) at the tip of the ribbed regions respectively. The highest stress occurred in the ribbed base width because three stresses (axial stress, radial stress and circumferential or hoop stress) combine at this point. Intermediate radial stress occurred at the outer surface of the ISRCT contact at the surface of the die and decreased to axial stress rapidly in the tube wall. The lowest stress occurred at the middle of wall thickness of the round tube and at the ribbed tip because there is no hoop stress in the inside of the ISRCT in the tube sinking method. Figure 8c presents the von Mises stress and the number of



**Fig. 4** 3D node structural solid element

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

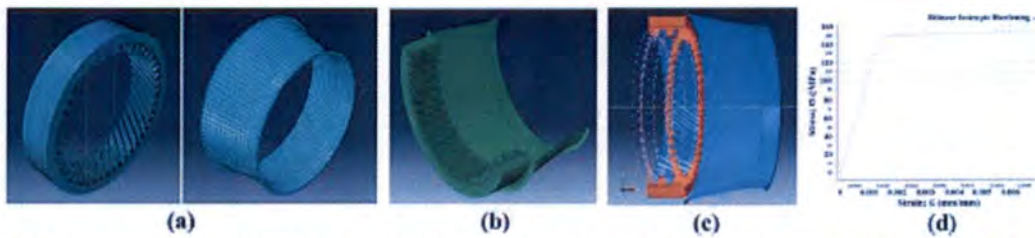


Fig. 5 Simulation model. a Meshed model ISRCT and die. b Contact pair between the ISRCT and die. c Boundary conditions for the ISRCT and die. d Stress-strain curve of the ISRCT

multi-pass drawings by simulation. There is a good agreement between experiment and simulation. Indeed, the numerical and experimental drawing stresses necessary to draw the tube through the die are quite similar for the steady state studied. An elastic-plastic material ISRCT was used in the FEM software with an isotropic hardening law. The von Mises criterion with radial return was used for the flow stress and the material was considered strain rate independent.

There are several existing friction models in finite element codes. The use of a constant friction coefficient was compared with a pressure-dependent one. The latter showed a better adequacy between experimental and numerical data. Four friction coefficients were calibrated independently: the friction coefficient between the die and the tube ( $\mu_{die/tube}$ ). The main principle of inverse analysis is to simulate a drawing test with a value of friction

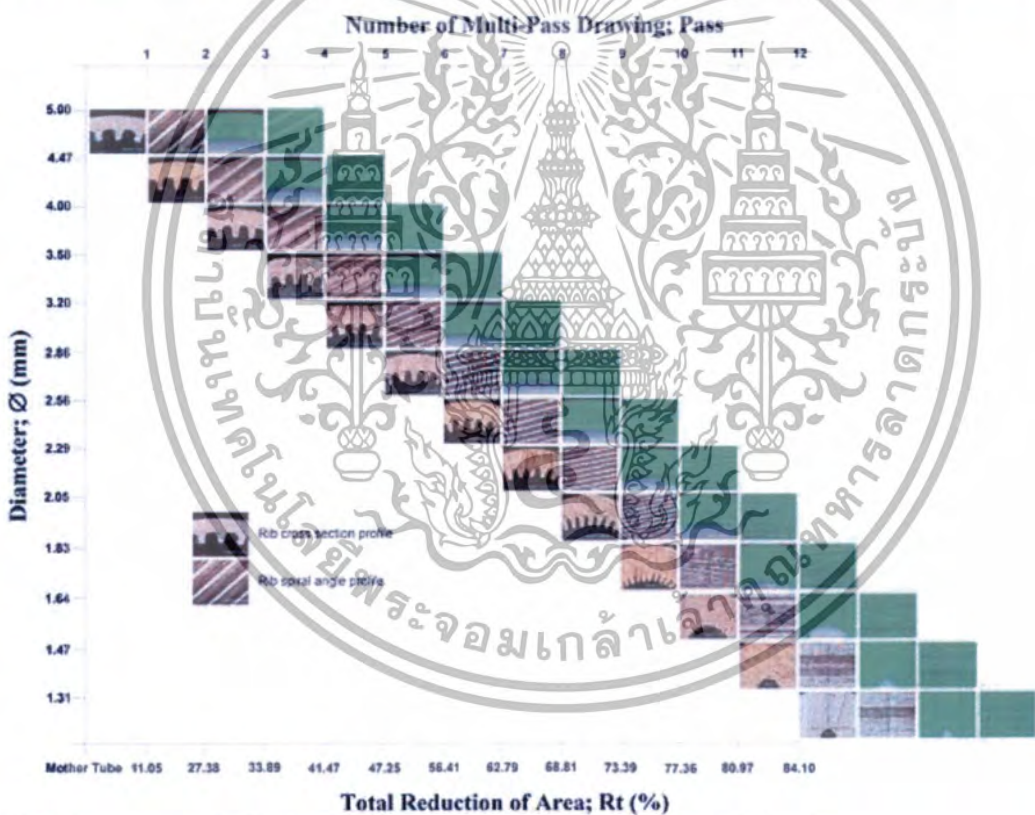


Fig. 6 The cross-sections and spiral angles of the ribs using the tube sinking methods by experimental and 3D FEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

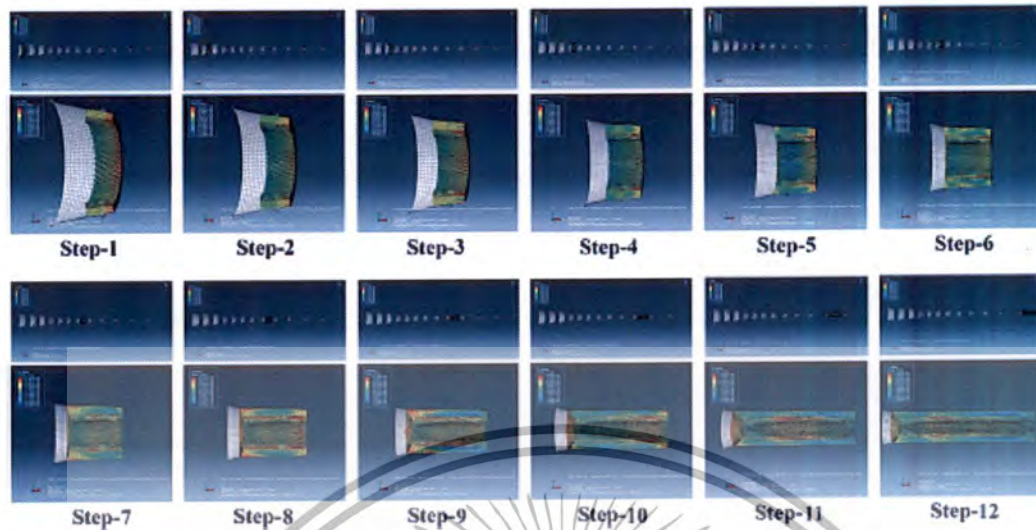


Fig. 7 Distribution contour plot of equivalent von Mises stress before and after on the 1–12-step multi-pass process

coefficient such as numerical drawing force equal to an experimental one. Figure 8d presents the comparative study which reveals that variation in the coefficient of friction significantly affects the value of the drawing force. Moreover, the drawing force distribution is more homogenised at higher values of the coefficient of friction. Comparing the contour diagrams, the maximum values tend to increase with the increase in the value of the coefficient of friction. However, it is evident that the coefficient of friction has very little effect on the drawing force. Therefore, as the friction increases, the material has to overcome higher forces, thereby leading to an increase in drawing force values. The best working range was found to be below 0.02 due to limitations with the lubricants available and tool material. This value currently hovers around 0.02.

In the sinking method, the behaviour of the copper tubes produced a spiral ribbed on the inside surface of the tube after drawing. The size of the cross-sectional area of the ribbed spiral on the surface inside the tube was changed after the deformation by drawing the hollow tube. Results showed that the cross-sectional area of the spiral ribbed on the inside surface of the tube changed with drawing from the lowest Rt at 11.05 % to the highest with the Rt at 84.10 %, using an experimental and simulation approach. The size of the cross-sectional dimension and the angle of the ribbed internal spiral changed after every multi-pass drawing and the thickness of the wall increased. This was because the outside diameter reduced while the tube itself took up the compressive stress in one direction along the circumference of the tube. Finally, in the tube sinking method, the wall thickness of the ISRCT increased with the number of multi-pass drawings and FE

simulation time. The relationship between wall thickness and FE simulation time is shown in Fig. 9a.

In the experimental and FEM simulation results, the ribbed base width and ribbed tip width were possibly reduced due to the compressive strain in the circumferential direction of the tube and the nonpressure inside the tube over the deformation resistance of the tube. The width of the ribbed base gradually reduced during the multi-stage tube sinking process. When  $D=1.64$  mm (Rt=77.36 %) at multi-pass drawing 10, the ribbed base widths contacted each other. The relationship between the ribbed base width and FE simulation time is shown in Fig. 9b.

When  $D=1.47$  mm (Rt=80.97 %) at multi-pass drawing 11, the ribbed tip widths contacted each other. The relationship between the ribbed tip width and FE simulation time is shown in Fig. 9c.

The experimental and FEM simulation results show uneven deformation in several layers of the ISRCT. It is difficult to observe and clarify the deformation behaviour of inner gaps and the ribbed area during the sinking process. In order to investigate the stress and strain, the effective strain distribution is similar to the effective stress. The strain reached maximum at the blending region between the gaps and the ribbed sections. The average strain in a gap region was larger than that in the ribbed areas. A gap deformation is therefore more intensive than that of a ribbed area. The gap of the ribbed area changed in a negative way. When  $D=2.05$  mm (Rt=68.81 %) at multi-pass drawing 8, the beginning of a flute mark was generated in the middle of the gap outside the ribbed section and a lug was generated on the back side of the flute mark. The folding gaps seldom generated at other places, except in the

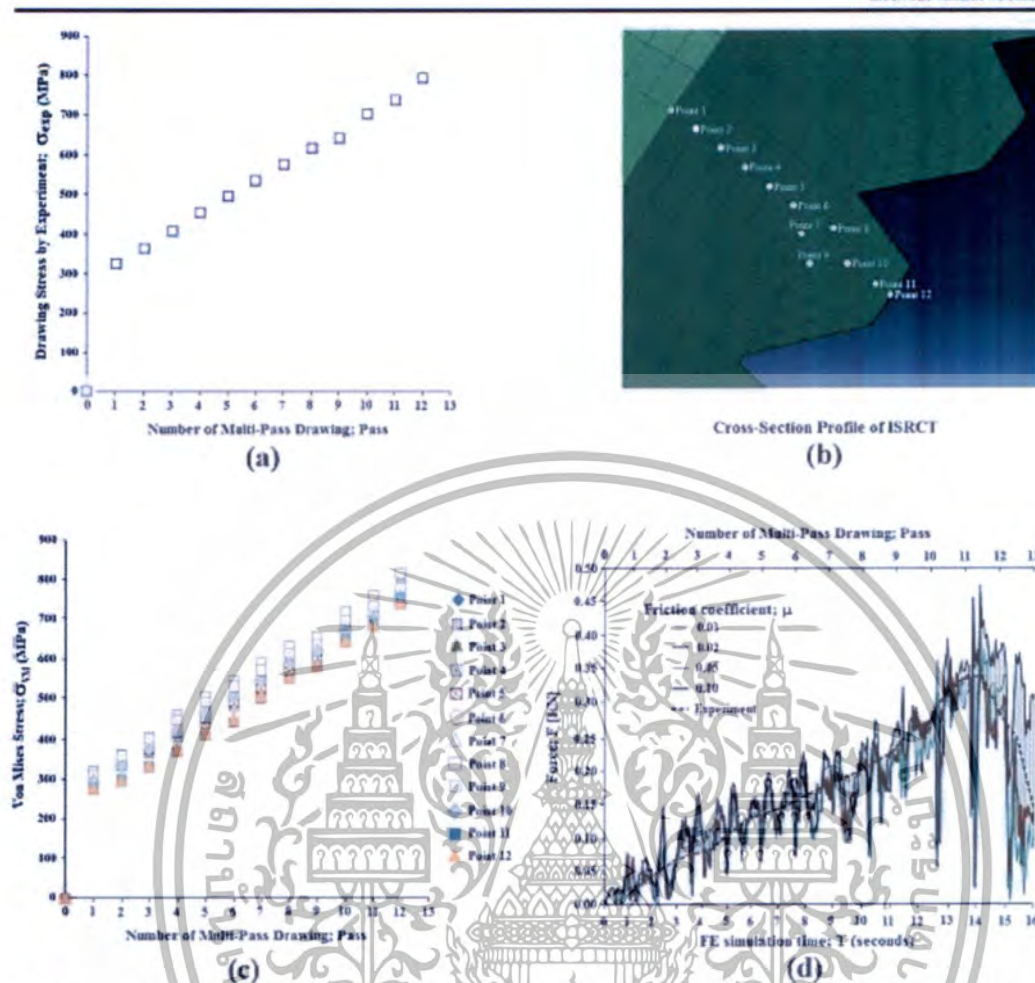


Fig. 8 Summary of the results at points 1–12. a Drawing stress by experiment. b Cross-section profile of the ISRCT. c Von Mises stress. d Comparison of the experimental and simulated drawing force for the conical die drawing with friction coefficient

middle of the gap; their dimensions increased with further tube sinking. Furthermore, several folding gaps appeared simultaneously around the circumference of the ribbed base line. Their dimensions were not all equal, and their distribution was not uniform over a circumference sector of the ribbed area. The relation between the ribbed base gap and FE simulation time is shown in Fig. 9d.

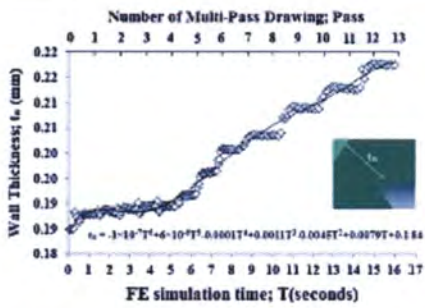
Similarly to the ribbed base gap, the strain on a ribbed tip gap reached maximum at the blending region between the gaps and ribbed areas. The average strain and gap deformation were more intensive than in a ribbed area. The gap of the ribbed section also changed in a negative way. When  $D=1.47$  mm ( $Rt=80.97\%$ ) at multi-pass drawing 11, the gap

vanished completely and no gaps were available except on the rough inner surface. Thus, values should be carefully designed in the multi-pass tube sinking process to manufacture ISRCT. The relationship between the ribbed tip gap and FE simulation time is shown in Fig. 9e.

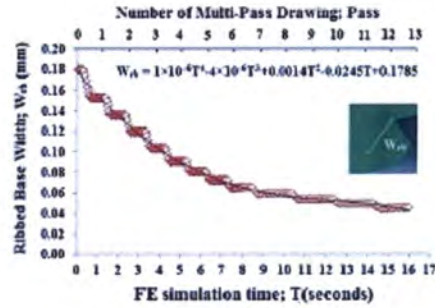
The simulation and experimental results for the total reduction area show a high deformation of the ribbed section. There was no pressure resistance of elastic–plastic deformation with

Fig. 9 Summary of the results of the multi-pass drawing. a Wall thickness. b Ribbed base width. c Ribbed tip width. d Ribbed base gap. e Ribbed tip gap. f Ribbed height. g Ribbed pitch. h Axial displacement and FE simulation time

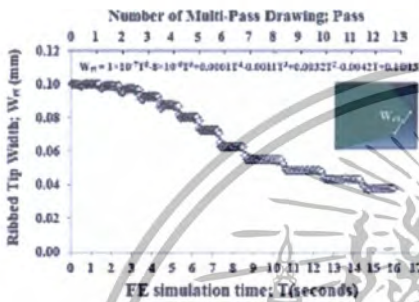
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



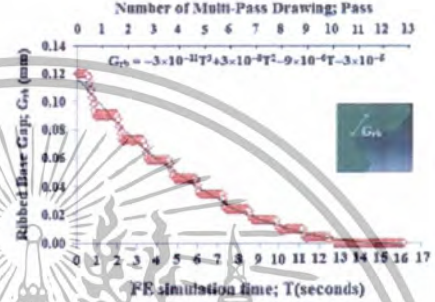
(a)



(b)



(c)



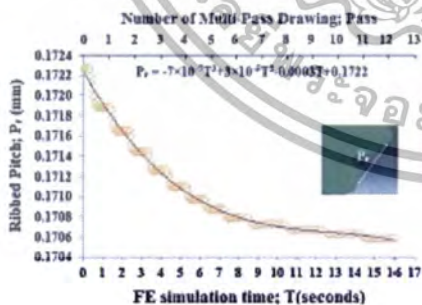
(d)



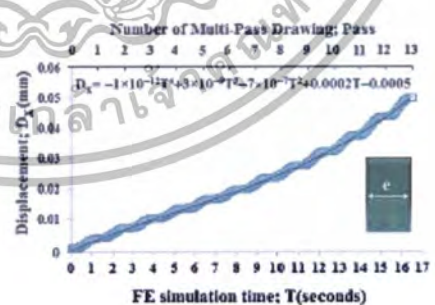
(e)



(f)



(g)



(h)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the multi-pass drawing of the ISRCT in the tube sinking method. As the outside diameters reduced, the compressive stress inside the ribbed region of the tube increased. Therefore, the direction along the circumference of the height of the ribbed area was compressed. However, the ribbed height decreased continuously over the same period. The relationship between the ribbed height and FE simulation time is shown in Fig. 9f.

The ribbed pitch reduced continuously as the outside diameter reduced to be consistent with the total reduction in size. The tube took up the compressive stress in the circumference of the ISRCT, which depended on the number of multi-pass drawings and the FE simulation time. The relationship between the ribbed pitch and FE simulation time is shown in Fig. 9g.

When adaptive meshing was performed, a material point coincident with a node at the beginning of the step did not remain coincident with that node throughout the step. Values of displacement and current coordinates represent the motion of the node, not necessarily the motion of the material. This output provided the magnitude of the maximum displacement and the node and degree of freedom where the maximum displacement increment occurred during each multi-pass. In addition, the nodes which experienced changes in geometric features were 0.05 mm in this case. The relationship between the axial displacement and FE simulation time is shown in Fig. 9h.

The ribbed spiral angle decreased after 12 multi-pass drawings and this increased the total reduction area of the ISRCT. The size reduced because the axial displacement in the axial direction trended from the ribbed spiral angle. However, for a single rib, the strain distribution differed from the ribbed base to the ribbed tip. The strain at the ribbed base region and deformation were larger than those at the ribbed tip. The angle of the ribbed base and the ribbed tip changed in a negative way. Similarly with experimental and simulation results, the

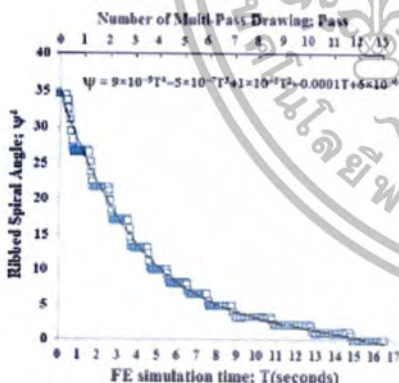
ribbed spiral angle decreased and the angle of the ribbing approached 0 with time. The relationship between the ribbed spiral angle and FE simulation time is shown in Fig. 10a.

Figure 10a shows the results of FEM analysis for 1–12 multi-pass drawings. Figure 10b in Table 2 summarises the results of comparing the characteristics and shows that the fabrication of ISRCT gives validated output at the 8th pass with a total reduction area of 68.81 %.

**5 Conclusions**

Both numerical and simulation models were produced and based on the validated model. This work has discussed the 3D FEM validation of ultra-small inner spiral ribbed copper tubes using the tube sinking method. Experimental data was collected to compare with the results obtained by simulation. It was found that

- [1] The drawing force increased as the coefficient of friction values increased. In this research, because of limitations of the lubricants available and tool material, this value currently hovers around 0.02.
- [2] The tube sinking method is a process which arises from stress, including axial stress, radial stress and hoop stress. The stress increases in the ribbed wall and rapidly expands into the ribbed area regions. The von Mises stress after 12 multi-pass drawings was different for each locality. The stress was greatest at the base of the ribbed regions, intermediate at the surface on the outer layer regions and minimum at the middle of the wall thickness and at the tip of the ribbed regions respectively.
- [3] The expansion of the effective strain occurred as growth assimilation within the limits of the ISRCT boundary. During the tube sinking, the ISRCT altered greatly and



(a)

Table 2 Summary of the results comparing the characteristics

	Number of Multi-Pass Drawings Pass											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Von Mises stress	O	O	O	O	O	O	O	O	Δ	Δ	Δ	Δ
Wall thickness	O	O	O	O	O	O	O	O	Δ	Δ	×	×
Ribbed base width	O	O	O	O	O	O	O	O	Δ	×	×	×
Ribbed tip width	O	O	O	O	O	O	O	O	Δ	×	×	×
Ribbed base gap	O	O	O	O	O	O	O	O	Δ	×	×	×
Ribbed tip gap	O	O	O	O	O	O	O	O	Δ	×	×	×
Ribbed height	O	O	O	O	O	O	O	O	Δ	×	×	×
Ribbed pitch	O	O	O	O	O	O	O	O	Δ	×	×	×
Ribbed spiral angle	O	O	O	O	O	O	O	O	Δ	×	×	×
Axial displacement	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O

(O Good, Δ Possible, × Impossible)

(b)

Fig. 10 Results of FEM analysis. a Ribbed spiral angle and FE simulation time. b Summary of the results comparing the characteristics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the von Mises stress, wall thickness and axial displacement increased repeatedly and continuously. The ribbed base width, ribbed tip width, ribbed base gap, ribbed tip gap, ribbed height, ribbed pitch and ribbed spiral angle however decreased after 12 multi-pass drawings of the ISRCT.

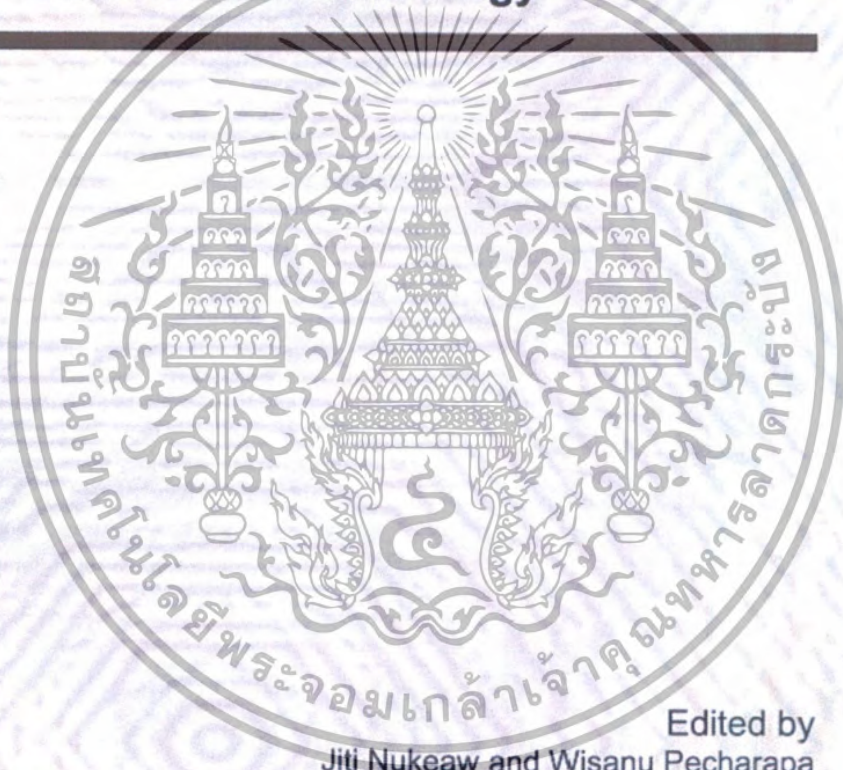
- [4] The results of the experimental and 3D FEM simulation were coincident with data from the tube sinking method. To summarise the analysis of the ten parameters varied in the ultra-small ISRCT, the most appropriate total reduction area must not exceed 68.81 % because then the gaps disappear and flute and lug marks appear on the side of the ribbed area. These results can be used to predict the final precision diameter of the ISRCT for manufacturing.

**Acknowledgments** The authors would like to express their deep appreciation to Prof. Dr. Kazunari Yoshida, Department of Precision Engineering, Tokai University, 1117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, Japan 259-1292, for valuable and useful advice and comments.

## References

- Avitzur B (1983) Handbook of metal forming processes. Wiley, New York
- Groover MP (1976) Fundamentals of modern manufacturing. Wiley, United States
- Dixit PM, Dixit US (2008) Modeling of metal forming and machining processes. Springer, London
- Wang T, Mislevy SP, Huang JCP (1994) Natural convection enhancement on micro-grooved surfaces. *J Enhanced Heat Trans* 1(3):245–254
- Al-Hajri E, Ouhdi M, Dessiatoun SV (2005) Thermal performance of micro-structured evaporation surfaces application to cooling of high flux microelectronics. *ASME Heat TransDiv Publ HTD* 376(1):799–805
- Tangri T, Norasethasopon S (2013) Fabrication of small size inner spiral ribbed copper tube using tube sinking method. *Adv Mater Res* 802:37–41
- Tangri T, Norasethasopon S (2013) Effects of rib dimension reduction and orientation change of inner spiral ribbed copper tube using tube sinking method. The 27th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand: Pattaya, Chonburi
- Tangri T, Norasethasopon S, Yoshida K (2014) Fabrication of small size inner spiral ribbed copper tube by fluid mandrel drawing. *Int J Adv Manuf Technol* 70:1923–1930
- Tangri T, Norasethasopon S (2015) Influences of total reduction of area on drawing stress and tube dimension in inner spiral ribbed copper tube sinking. *Int J Adv Manuf Technol* 77:2269–2276
- Toshihisa H (2005) Developments and future trends in copper alloy strip for electronic equipment and in copper tube for air conditioners. *Kobeco Technol Rev* (No. 26)
- Masunori H (2007) Development trends in inner-grooved tubes in Japan. *Hitachi Cable Rev* (No.26) 1–3
- Yong LI, Hua X, Bin L, Yong T, Zhi-xin Z (2008) Forming method of axial micro grooves inside copper heat pipe. *Trans Nonferrous Met Soc* 18:1229–1233, Science Press
- Tietzsch H (2006) Metal forming practise. Springer, Berlin
- Linderon C, Favier D, Chegnon G, Gruez B (2014) A conical mandrel tube drawing test designed to assess failure criteria. *J Mater Process Technol Elsevier* 347–357

**Advances in Material  
Science and Technology**



Edited by  
Jiti Nukeaw and Wisanu Pecharapa

**TTP** TRANS TECH PUBLICATIONS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Fabrication of Small Size Inner Spiral Ribbed Copper Tube Using Tube Sinking Method

Tanit Tangsri<sup>1, a</sup>, Somchai Norasethasopon<sup>1, b</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 Bangkok, Thailand

<sup>a</sup>tangsritanit@yahoo.com, <sup>b</sup>n-somchai@hotmail.com

**Keywords:** Inner Spiral Ribbed Tube, Heat Transfer Tube, Ultra-Small Size, Tube Sinking Drawing

**Abstract.** This research related to the development of ultra-small inner spiral ribbed copper tubes (ISRCT) which has the quality and the efficiency in transferring the high heat. So the demand of using ultra-small tubes in electrical appliances today is very high and will be greater in the future. The technology required must be the technology that can produce ultra-small ISRCT with various distinguishing features such as small size, high quality, high functionality and low cost of productions in order to fulfill the increasing demand. The conventional production method was suitable for large tubes which high draw ability, but unsuitable for the fabrication of long ultra-small tubes because it is difficult to manufacture the devices used as tools such as an ultra-small spiral ribbed mandrel and a floating plug. This research has proposed tube sinking drawing method and presented a comparison of seven parameters, including the drawing stress, wall thickness ratio, ribbed base width ratio, ribbed top width ratio, ribbed height ratio, ribbed pitch ratio, and ribbed spiral angle ratio. The experiment was found that the tube sinking was possible for making the ultra-small ISRCT. The results showed the sum of a reduction in the right size in the case of ultra-small ISRCT. The most appropriate must not exceed 68.81% and will be reduced after draw formed to the 8<sup>th</sup>.

### Introduction

The conventional manufacturing methods of tubes with inner spiral ribs have been using since 1993. The wall of the tubes is cylindrical, the structure of the surface inside the tube is spiral ribbed, and the ribbed spiral angle at the central axis is greater than 35 degrees. The roll forming process is conventionally used to produce the tube with inner spiral ribbed surface, whereby the flat metal sheet is rolled on from the upper side by a grooved roll with spiral-grooved teeth and from underneath by another flat roll with smooth surface. Then the sheet is rolled up along the length of the sheet metal and both edges are welded lengthwise, resulting in a tube spirally ribbed on its inside surface along its length [1].

Since 2007 the manufacturing method of steel tubes with inner spiral ribbed surface has more perfect, by using a ribbed mandrel and a floating plug been connected with a tie rod [2]. In the drawing of the ribbed steel tube, the top surface of the spiral ribbed mandrel serving as the drawing plug is always contact to the surface of the flat tubes all the time from the first stage to the final stage of rib formation, in which the size of the tubes were determined from the blank flat tube. This production method has the possibility to be used for the production of tube with length and several benefits, such as forming capability and durability of the finished steel tube [3, 4].

The copper tube with inner spiral ribbed surface, seamless and smooth outer surface in the marketplace typically has the outside diameter from 5.00 to 15.00 mm. The tube with inner spiral ribbed surface allows more heat transfer [5, 6]. The inner spiral ribbed surface of the tube increases the efficiency of the heat exchangers of the condensation or vaporization of the refrigerant [7]. For examples, the applications of the inner spiral ribbed copper tubes are found in the evaporators and condensers of air conditioning units, the copper tube freezers, and refrigerators [8, 9].

In these experimental investigations on friction factor, Nusselt number and thermal hydraulic performance of a tube equipped with the classic three modified internally grooved tubes. The working fluid is water and ethylene glycol mixture 90:10 (by weight). Local heat transfer by forced convection from plain and grooved tubes is investigated for Reynolds number ranges 4900 to 13300. The increase in forced convective heat transfer coefficient in water and ethylene glycol mixtures results in a heat exchanger under turbulent flow is also reported. Among the grooved tubes, heat transfer enhancement obtained for the flow of water and ethylene glycol mixture is up to 36% for circular grooved tube 55% for square grooved tube and 10% for trapezoidal grooved tube in comparison with the plain tube [10].

This research studied the behavior of various parameters of the inner spiral ribbed copper tube which was manufactured by the ultra-small tube drawing method. In this paper, the seamless 5.00 mm-diameter copper tube specimens were drawn using tube sinking to reduce the size of the copper tubes. The results of this research can be applied to the production of ultra-small inner spiral ribbed copper tubes which are particularly useful for the heat transfer in the heat exchanger of the electrical appliances in the limited heat transfer area.

### Theory

Tube drawing processes hollow cylinders, or tubes, which are made by hot forming processes such as extrusion or piercing and rolling, often are cold finished by drawing. Cold drawing is used to obtain closer dimensional tolerances, to produce better surface finishes, to increase the mechanical properties of the tube by strain hardening, to produce tubes with thinner walls or smaller diameters than can be obtained with hot forming methods, and to produce tubes of irregular shapes.

The standard equation of reduction area [%] is as follows:  $R_d =$  Reduction area (%);  $A_0 =$  Initial Area ( $\text{mm}^2$ );  $A_f =$  Final Area ( $\text{mm}^2$ ) [11].

$$R_d = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

The stresses involved in tube sinking can be analyzed by the method of Sachs and Baldwin [11] on the assumption that the wall thickness of tube remains constant. The equation of the drawing stress at the die exit is analogous with the equation describing the drawing stress in wire drawing. The cross-sectional area of the tube is related to the middle radius and the wall thickness by [11].

$$\sigma_w = \sigma_0^m \frac{1+B}{B} \left[ 1 - \left( \frac{A_f}{A_0} \right)^B \right] \quad (2)$$

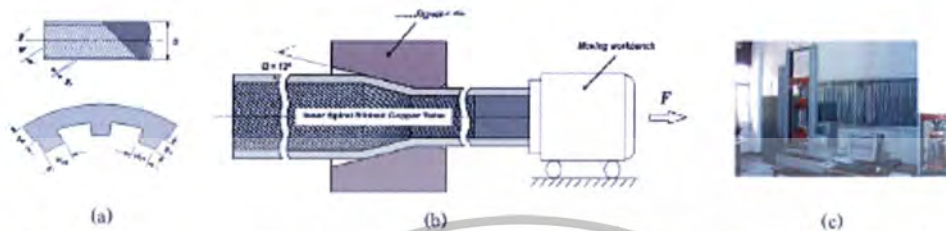
The yield stress  $\sigma_0^m$  is equal to  $1.1 \sigma_0$  for the complex stresses in tube sinking. A more complete analysis of tube sinking has been given by Swift [11].

### Specimens and Experimental Method

In this experiment, seamless inner spiral ribbed copper tubes were used as specimens. The specifications of the copper tubes are of 5.00 mm outer diameter, 3.71 mm inner diameter, 0.364 mm wall thickness, 0.28 mm rib height, 0.33 mm rib base width, 0.175 mm rib tip width,  $38^\circ$  spiral angle, 0.393 mm rib pitch, and 45 ribs (mother tube). A mother tube was prepared in the setup with its outside surface cleaned and coated with a Teflon resin lubricant, and then drawn the tube by using sodium stearate lubricant. The tungsten die was employed in this experiment. The die half-angle was 12 degrees ( $\alpha = 12^\circ$ ) and the drawing speed remained constant at 150 mm/s. The cross section area reduction per pass (Re/P) stayed between 7-25 %. All parameters used in the experiment were set as show in Fig. 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The material property and the conditions on drawing which is used in the experiment: Young's modulus,  $E = 110$  GPa; Yield stress,  $\sigma_y = 79$  MPa; Ultimate stress,  $\sigma_u = 180$  MPa; Poisson's ratio,  $\nu = 0.33$ ; Coefficient of friction,  $\mu = 0.02$ ; Die half-angle,  $\alpha = 12$  degree.



**Fig. 1.** (a) The cross-sectional and longitudinal drawings of the inner spiral ribbed copper tube:  $D =$  Outside diameter;  $\psi =$  Ribbed spiral angle (deg);  $P_r =$  Ribbed pitch (mm);  $t_w =$  Wall thickness (mm);  $h_r =$  Ribbed height (mm);  $w_{rb} =$  Ribbed base width (mm);  $w_{rt} =$  Ribbed tip width (mm). (b) Experimental models by using the axis force in drawing and use a method of a hollow tube. The die half-angle was 12 degrees and the reduction per pass (Re/P) stayed between 7-25 %. (c) Universal-Testing-Machine (UTM) for using to experiment.

## Results and Discussion



**Fig. 2.** Cross section after tube sinking drawing method

### A. Changes of the shape

The behavior of the copper tubes has a spiral rib on the surface inside the tube after drawing. The size of the cross-sectional area of a spiral rib on the surface inside the tube was changed after deforming. It showed that the drawing passes all twelve times of the experiments and each diameter were as follow 4.47mm, 4.00mm, 3.58mm, 3.20mm, 2.86mm, 2.56mm, 2.29mm, 2.05mm, 1.83mm, 1.64mm, 1.47mm and the last one was 1.6mm. The total of the reduction area was 73.39% after drawing formed 9 times, in the experiment from 1- 8, nothing happened and the total reduction area at the 8<sup>th</sup> of the experiment was 68.81% after drawing formed but the flute marks were found at the top of the rib and the lug marks were found on the back side of each rib happened at the 9 of the experiment. The flute marks and lug marks weren't such a problem which occurs but it was found that it had the grooves and the fissures around the boundary of each rib, too. They occurred at the same time and different dimension sizes. Their distribution might not be the same form all over the boundary and spread out all over the area. They would be compressed into the rib and able to change the shape of the rib that was shown in Fig. 2 above, It showed that the outer diameters were reduced and in the inner spiral ribs, the pitches decreased while the inner surface became roughness and uneven. As a result the wall thickness was increased, contrast to the ribbed height, ribbed base width, ribbed tip width, ribbed pitch and ribbed spiral angel which were decreased in each times. The strain distribution in the rib was not the same form of the rib base and the rib tip. The deformation at the rib base was more than at the rib tip while the spiral rib angle decreased in each times passing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### B. Comparison of seven parameters

The drawing stress ratio of tube sinking method caused from axial stress, radial stress, and hoop stress. Axial stress was the tensile stress on the wall and the rib area of tube, radial stress was the compressive stress that caused in the tube wall zone, and hoop stress was the stress caused by the pressure inside the compressive stress. The relation between the drawing stress ratio and the percentage of total reduction area was shown in Fig. 3(a) Tube sinking and the wall thickness ratio were increased after each drawing as the outside diameter was decreased, the tube received compressive strain in the circumferential direction lead to an increase in the wall thickness. The relation between of wall thickness ratio and the percentage of total reduction area was shown in Fig. 3(b) The ribbed base width ratio, ribbed tip width ratio, ribbed height ratio, ribbed pitch ratio, and ribbed spiral angle ratio were likely to be reduced due to the compressive strain in the circumferential direction of the tube and non-pressure inside the tube over the deformation resistance of the tube. The relation between ribbed base width ratio, ribbed tip width ratio, ribbed height ratio, ribbed pitch ratio, and ribbed spiral angle ratio and the percentage of total reduction area was shown in Fig. 3(c), 3(d), 3(e), 3(f), 3(g), respectively.



Fig. 3. Comparison of seven parameters and percentage of total reduction area

### Conclusions

This research related to the development of ultra-small inner spiral ribbed copper tubes (ISRCT) which has the quality and high efficiency of heat transfer. It was found that:

(1) The tube sinking is a process which caused high stress, consist of the axial stress, radial stress and hoop stress. The compressive stress will occur at the tube wall. But it may change to the tensile stress within the area of the rib. Compressive stress is the fact value that distributed within the range of the radius of the tube wall and diffused within the area of the rib inside the tube. It will have the same value of what occurs in the area of the wall and rapidly expanding in the area of the rib.

(2) About the expansion of the effectiveness strain that happened at that time will have the highest value assimilation within the boundary between the rib and the spiral angle of the rib, in the ribbed area will delicate and fragile easier than the surface of the tube wall.

(3) While using tube sinking drawing method, the inner spiral rib has changed a lot, consisted of the thickness of the tube wall, which increased repeatedly and continuously. But ribbed height (the height of the rib), ribbed base width (the width of the ribbed base), ribbed tip width (the width at the top of the rib), ribbed pitch (Pitch direction of the rib) and ribbed spiral angle are decreased a lot.

(4) The experiment was found that the tube sinking was possible for making the ultra-small ISRCT. These results showed the total reduction area of 73.39% after drawing formed at the 9<sup>th</sup> experiment which the flute marks were found at the top of the rib and lug marks on the back side of each rib. While the total reduction area on the 8<sup>th</sup> experiment was 68.81% after drawing formed and didn't appear the flute marks and lug marks. Summarize that, in case of ultra-small ISRCT, the most appropriate of the total reduction area must not exceed 68.81%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Acknowledgment

The authors would like to express deep appreciation to Prof. Dr. Kazunari Yoshida, Department of Precision Engineering, Tokai University, 1117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, Japan 259-1292, for valuable and useful advice and comments.

### References

- [1] Chikara Saeki., Inner Grooved Tube Forming Apparatus, United States Patent, Patent Number: 5,724,844, Mar. 10, 1998.
- [2] Mamoru, Houfuku., 2007, Development trends in inner-grooved tubes in Japan, Hitachi Cable Review No.26 (August 2007), pp. 1-3.
- [3] Y. Tang, Y. Chi, J.Ch. Chen, X.X. Deng, L. Liu, X.K. Liu, Zh.P. Wan., 2006, Experimental study of oil-filled high-speed spin forming micro-groove fin-inside tubes, International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007), pp. 1059-1068.
- [4] Yong Tang, Long-sheng Lu, Dong Yuan, Qing-hui Wang, Xiao-lin Zhao., 2009, Experimental and FEM study on sinking of miniature inner grooved copper tube, Journal of Materials Processing Technology 209 (2009), pp. 5333-5340.
- [5] P.R. Chandra, C.R. Alexander, J.C. Han., 2003, Heat transfer and friction behaviors in rectangular channels with varying number of ribbed walls, International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (2003), pp. 481-495.
- [6] Pedro G Vicente, Alberto Garcia, Antonio Viedma., 2002, Heat transfer and pressure drop for low Reynolds turbulent flow in helically dimpled tubes, International Journal of Heat and Mass Transfer 45 (2002), pp. 543-553.
- [7] Toshihisa, Hara., 2005, Developments and Future Trends in Copper Alloy Strip for Electronic Equipment and in Copper Tube for Air Conditioners, Kobelco Technology Review No. 26 Dec. 2005.
- [8] T. Arts, C. Benocci, P. Rambaud., 2007, Experimental and Numerical Investigation of Flow and Heat Transfer in a Ribbed Square Duct, 3rd International Symposium on Integrating CFD and Experiments in Aerodynamics, 20-21 June 2007, U.S. Air Force Academy, CO, USA, pp. 1-19.
- [9] TANG Renhu, YIN Fei, WANG Haijun, CHEN Tingkuan., 2007, An investigation into the heat Transfer characteristics of spiral wall with internal rib in a supercritical sliding-pressure operation once-through boiler, Front. Energy Power Eng. China 2007, pp. 300-304.
- [10] Selvaraj P, Sarangan J, Suresh S., 2011, Experimental Investigation on Heat Transfer and Friction Factor Characteristics of a Water and Ethylene Glycol Mixture Flow of Internally Grooved Tubes, International Journal of Chemical Research, Vol. 3, Issue 1, 2011, pp-33-40.
- [11] Dieter, G.E., Mechanical metallurgy, 1988, SI metric edition, McGraw-Hill, ISBN 0-07-100406-8.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



sea of innovation  
**ME-NETT**  
2013

# หนังสือรวมบทความคัดย่อ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27  
The 27<sup>th</sup> Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand  
16-18 ตุลาคม 2556 ณ โรงแรมดุสิตธานี พัทยา จังหวัดชลบุรี

โดย  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา  
ร่วมกับ  
สมาคมวิศวกรเครื่องกลไทย

ISBN 978-974-384-498-0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Effects of Rib Dimension Reduction and Orientation Change of Inner Spiral Ribbed Copper Tube Using Tube Sinking Method****Tanit Tangri<sup>1</sup> and Somchai Norasethasopon<sup>1,\*</sup>**<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, ThailandE-mail: [tangritanit@yahoo.com](mailto:tangritanit@yahoo.com)**Abstract**

This paper deals with the development of ultra-small inner spiral ribbed copper tubes with high quality heat transfer. Due to increased sophistication of modern electronic equipment and electrical appliances, the production technology of inner spiral ribbed fine tubes must allow for the manufacturing of the ultra-small tubes of small size, high quality, high-functionality, and at low processing cost. The conventional production method, however, is suitable for production of large tubes with high drawability but not suitable for long ultra-small tubes because with the conventional technology it is difficult to manufacture an ultra-small spiral ribbed mandrel and a floating plug. The aim of this research paper is to identify the optimal reduction area per pass using tube sinking method in light of the effects of rib dimension reduction and orientation change of the inner spiral ribbed copper tube. Twenty-one seamless inner spiral ribbed copper tubes are used as specimens. The specifications of the copper tubes are of 5.00 mm outer diameter, 3.71 mm inner diameter, 0.364 mm wall thickness, 0.28 mm rib height, 0.33 mm rib base width, 0.175 mm rib tip width, 38° spiral angle, 0.393 mm rib pitch, and 45 ribs. In the experiment, the reduction area per pass (Re/P) is increased for each successive tube specimen; that is, Re/P is 2.52% for the first tube specimen, 5.18% for the second tube specimen, and so on until Re/P is 86.63% for the twenty-first tube. Then, all twenty-one tubes are analyzed with respect to nine parameters: reduction per pass ratio, drawing force, drawing stress ratio, wall thickness ratio, rib height ratio, rib base width ratio, rib tip width ratio, rib pitch ratio, and rib spiral angle ratio. The results have indicated that the optimal reduction area per pass in the case of ultra-small inner spiral ribbed copper tubes is 49.76%.

**Keywords:** Inner Spiral Ribbed Tube, Heat Transfer Tube, Small Size Tube, Tube Sinking Method**1. Introduction**

The first method of manufacturing inner spiral ribbed tubes was invented over two decades ago and adopted by industrialists for the inner spiral ribbed tube manufacturing. The method has however lost its popularity following the advent of newer, better manufacturing methods, even though it is still sometimes found used in

production of large ribbed tubes. The wall of a tube produced with the original method was cylindrical and the internal surface was spirally ribbed with the angle at the central axis at least 35°. The roll forming process in the conventional method to produce a tube with inner spiral ribbed surface started with feeding a flat metal sheet into a series of calendaring machines to be pressed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The upper roller of each pair of the calendaring machine has spiral grooved teeth while the lower roller a smooth surface. The "calendered" metal sheet was then rolled up along its length and both edges were welded together lengthwise, the product of which was an inner spiral ribbed tube [1].

Significant improvement to the manufacturing method of inner spiral ribbed tubes was made in 2007 with the introduction of a ribbed mandrel and a floating plug connected to a tie rod [2, 3]. In drawing a steel ribbed tube, top surface of a spiral ribbed mandrel serving as the drawing plug always remains in contact with the surface of a blank tube from the initial contact to rib formation, by which the blank tube is processed to product size. This production method makes possible long tube processing and has several advantages, such as forming capability and durability of the finished steel tube [4, 5].

Presently, copper tubes with inner spiral ribbed surface and seamless, smooth outer surface available in the marketplace are of 5.00 to 15.00 mm in outer diameter. Unlike blank tubes, tubes with inner spiral ribbed surface allow more heat transfer [6, 7]. Besides, the inner spiral ribbed surface improves efficiency of the heat exchanger of condensation or vaporization of refrigerant [8]. Applications of the inner spiral ribbed copper tubes are found in evaporators and condensers of air conditioning units, copper tube freezers, and refrigerators [9, 10].

This research work examines the behavior of various parameters of the inner spiral ribbed copper tube (ISRCT), which was manufactured by the ultra-small tube drawing method. In this paper, seamless 5.00mm-diameter copper tube

specimens were drawn using the tube sinking method. The experiment results could be applied to the manufacturing of ultra-small inner spiral ribbed copper tubes. The ultra-small tubes would be of great use to heat transfer in heat exchanger components of electrical gadgets with limited heat transfer area.

## 2. Theory

Tube drawing operations involve tube extrusion (hot working process) and the tube is then drawn through a die (cold working process). Contact between the tube and the die results in plastic deformation, which causes compressive stress to occur, and the tube from the drawing operations is typically of circular shape even though other shapes are possible but infrequently produced. With each successive drawing, the tube diameter is reduced proportionately to a decrease in the cross-sectional area. As illustrated in Fig. 1, currently there exist four methods of tube drawing, i.e., sinking, fixed plug, floating plug, and moving mandrel [11].

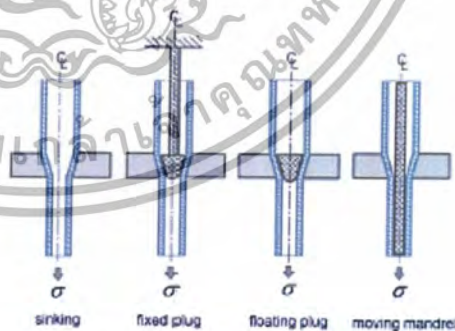


Fig. 1 The existing methods of tube drawing

Of the four methods of tube drawing, it has been found that the fixed plug, floating plug and moving mandrel methods are not appropriate to drawing the inner spiral ribbed copper tubes,

whereas the tube sinking method is most suitable for the task. However, the tube sinking method likely causes tube deformation after drawing, after that the effects occurred, the cross-sectional area of the tube will be reduced and the diameter of the tube can be reduced too.

The standard equation of reduction area [%] is as follows:  $R_A$  = Reduction area (%);  $A_0$  = Initial Area ( $\text{mm}^2$ );  $A_1$  = Final Area ( $\text{mm}^2$ ) [11].

$$R_A = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

The stresses involved in tube sinking can be analyzed by the method of Sachs and Baldwin on the assumption that the wall thickness of tube remains constant. The equation of the drawing stress at the die exit is analogous to that describing the drawing stress in wire drawing. The cross-sectional area of the tube is related to the middle radius  $r$  and the wall thickness  $h$  by  $A \approx 2\pi r h$  [11].

$$\sigma_{su} = \sigma_0 \frac{1+B}{B} \left[ 1 - \left( \frac{A_f}{A_0} \right)^B \right] \quad (2)$$

The yield stress  $\sigma_0$  is taken equal to  $1.1\sigma_y$  for the complex stresses in tube sinking. A more complete analysis of tube sinking has been given by Swift [11].

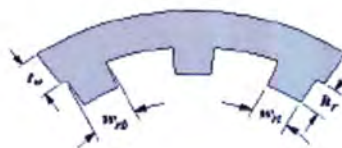
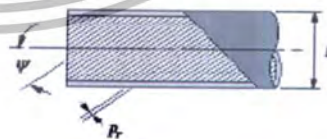
### 3. Specimen and Experimental Method

Twenty-one seamless inner spiral ribbed copper tubes were used as specimens. The specifications of the copper tubes are of 5.00 mm outer diameter, 3.71 mm inner diameter, 0.364 mm wall thickness, 0.28 mm rib height, 0.33 mm rib base width, 0.175 mm rib tip width,  $38^\circ$  spiral

angle, 0.393 mm rib pitch, and 45 ribs (mother tube). A mother tube was prepared in the setup with its outside surface cleaned and coated with a Teflon resin lubricant, and then drawn the tube by using sodium stearate lubricant. The tungsten die was employed in this experiment. The die half-angle was 12 degrees ( $\alpha = 12^\circ$ ) and the drawing speed remained constant at 150 mm/s. In the experiment, the reduction area per pass (Re/P) was increased for each successive tube specimen, that is, Re/P is 2.52% for the first tube specimen, 5.48% for the second tube specimen, and so on until Re/P is 35.63% for the twenty-first tube. The sinking method was selected as the drawing method for the entire experiment.

Table. 1 Material properties and the conditions on drawing which is used in the experiment

Parameters	Copper
Young's modulus, $E$ (GPa)	110
Yield stress, $\sigma_y$ (MPa)	79
Ultimate stress, $\sigma_u$ (MPa)	180
Poisson's ratio, $\nu$	0.33
Die half-angle, $\alpha$ (deg)	12
Coefficient of friction, $\mu$	0.02



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig. 2 The cross-sectional and longitudinal depictions of the inner spiral ribbed copper tube:  $D$  = Outside diameter;  $\psi$  = Ribbed spiral angle (deg);  $P_r$  = Ribbed pitch (mm);  $t_w$  = Wall thickness (mm);  $h_r$  = Ribbed height (mm);  $W_{rb}$  = Ribbed base width (mm);  $W_{rt}$  = Ribbed tip width (mm).

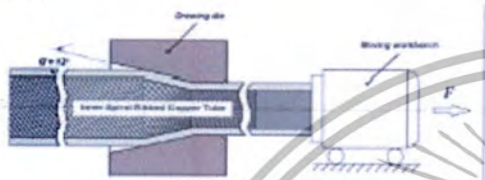


Fig. 3 Experimental model by using the axis force in drawing and use a method of a hollow tube. The die half-angle, the minimum Re/P of the first draw, and the maximum Re/P of the final draw (twenty-first) were 12 degrees, 2.52%, and 86.63%, respectively.



Fig. 4 The cross-section of the rib of mother tube



Fig. 5 Rib spiral angle - mother tube



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig. 6 The cross-sectional and longitudinal profile of the inner spiral ribbed copper tubes using the tube sinking method for the maximum total reduction of 86.63% and  $\alpha = 12^\circ$ .

#### 4. Results and Discussion

##### 4.1 Change of the shape

Behavior of copper tubes has a spiral ribbed on the surface inside the tube after drawing. The size of the cross-sectional area of a spiral ribbed on the surface inside the tube was changed after deformation the body by drawing into hollow tubes. The results showed the details of the cross-sectional area of a spiral ribbed on the surface inside the tube which drawing to change from the lowest  $Re / P = 2.52\%$  to the highest until the  $Re / P = 86.63\%$ , with an experimental approach. Beyond the reduction area per pass ( $Re/P$ ) of 49.76%, flute marks were found at the top of the ribbed and lug marks on the back side of the several ribbed. Moreover, it was found that it had the grooves and the fissures around the boundary of several ribbed which occurs at the same time different dimension sizes maybe not the same form their distribution may not be uniform the same form all over the boundary. It's spread out until the width expansion all over the area. They would be compressed into the ribbed and the shape of the ribbed becomes the shape that was deformed as shown in Fig. 6. The size of the cross-sectional dimension and the angle of internal spiral ribbed has changed after the drawing and the results have shown that the thickness of the wall is increased after the drawing but it is not always the same, the height of the ribbed (ribbed height), the width of the

base of the ribbed (ribbed base width), the width of the top of the ribbed (ribbed tip width), the distance between the ribbed (ribbed pitch), the angle of the ribbed (ribbed spiral angle) will decrease repeatedly and continuously after the reduction of the cross-sectional area every different time. However, for a single ribbed the expansion of the strain varies from the base of the ribbed to the top of the ribbed. Strain that occurs was in the main part of the ribbed more than the top. So changing the shape at the base of the ribbed more intense than at the top of the ribbed and the changing of the angle of spiral ribbed has changed in the negative way.

##### 4.2 Stress analysis

The tube sinking includes axial stress (tensile stress), radial stress (compressive stress) and hoop stress (circumferential stress in a cylindrical shaped part as a result of internal or external pressure). Axial stress is the tensile stress, which is almost the same as the value in the tube wall area, but grows quickly in the ribbed area. Radial stress is the compressive stress in tube wall zone, but it may change into tensile stress in the ribbed area. Hoop stress is the compressive stress; its absolute value grows in radial in the tube wall region, but reduces dramatically in the ribbed region. Effective strain reaches its maximum value on the blending region inside the spiral ribbed tubes. The relationship between reduction per pass ratio and total reduction is shown in Fig. 7. The reduction per pass ratio and total reduction increases repeatedly and continuously because of the reduction of the cross-sectional that decreased in the same direction after forming of 21 testing tubes (specimen). The outside diameter and the

dimension sizes of the ribbed decreased again and again. Similarly, the drawing force that used to form all 21 testing tubes and the sum of the size reduction will increase to over and over again and is going to continue because of the force in drawing was used in one direction along the axis will increase and a decrease in the cross-sectional area that was reduced relate to sum of the percent of size reduction (total reduction). The relationship between drawing force and total reduction is shown in Fig. 8. The drawing stress ratio and total reduction increase repeatedly and continuously because the cross-sectional area decreased. But the drawing force that was used to drawn up the percent increase together with the sum of the reduction, which tends to increase depending on the ratio of the stress in the drawing itself. The ratio of drawing stress (drawing stress ratio) is greater than 1 because it was more repeatedly and continuously throughout the 21 times. The relationship between drawing stress ratio and total reduction is depicted in Fig. 9.

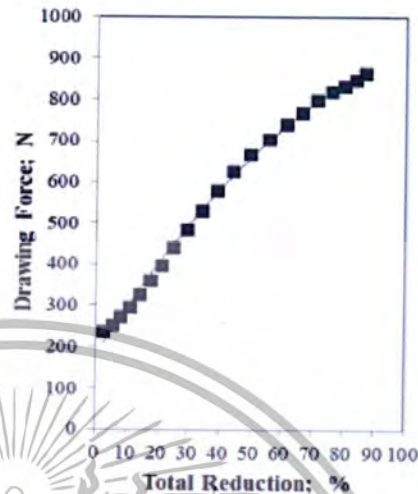


Fig. 8 Changes of drawing force



Fig. 9 Changes of drawing stress ratio

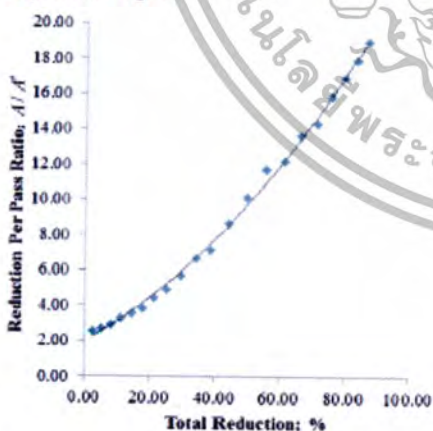


Fig. 7 Changes of reduction per pass ratio

#### 4.3 The analysis the reduction of the dimensions of the ribbed

The wall thickness ratio and total reduction are increased from Re/P of 2.52% for the first tube specimen, 5.18% for the second tube specimen, and so on until Re/P is 86.63% for the twenty-first or final tube. This is because, outside diameter was reduced while the tube itself was considered that the compressive stress in

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

one direction along the circumference of the tube. The relationships between wall thickness ratio and total reduction are shown in Fig. 10. The ribbed height ratio and the total reduction repeatedly and continuously in the same period. As the outside diameters are reduced, the compressive stress inside the tubes increases. Thereby, the directions along the circumference of the height of the ribbed were compressed. The relationships between rib height ratio and total reduction are depicted in Fig. 11. The ribbed base width ratio and ribbed tip width ratio were likely to be reduced due to the compressive strain in the circumferential direction of the tube and non-pressure inside the tube over the deformation resistance of the tube. The relation between ribbed base width ratio, ribbed tip width ratio and percentage of total reduction area is shown in Fig. 12, 13, respectively.

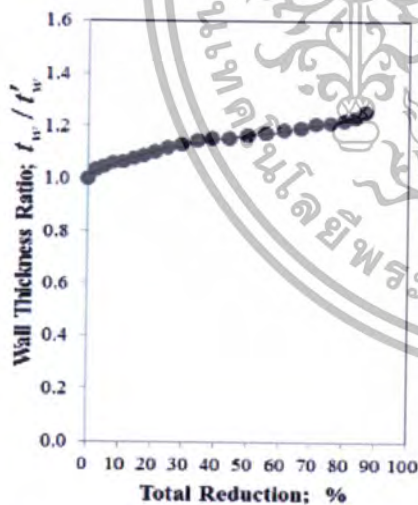


Fig. 10 Changes of wall thickness ratio

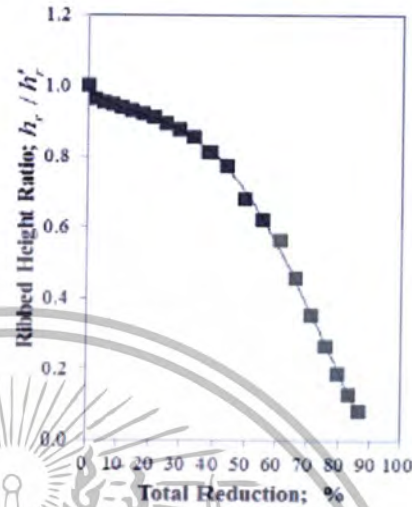


Fig. 11 Changes of rib height ratio



Fig. 12 Changes of rib base width ratio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

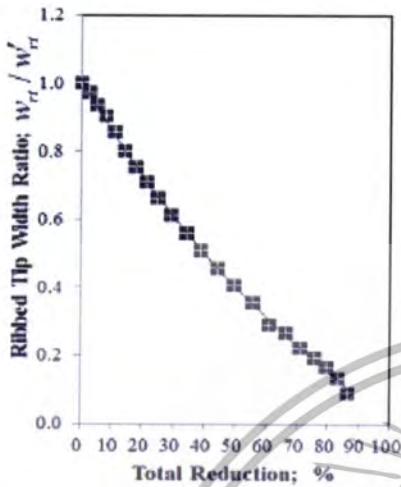


Fig. 13 Changes of rib tip width ratio

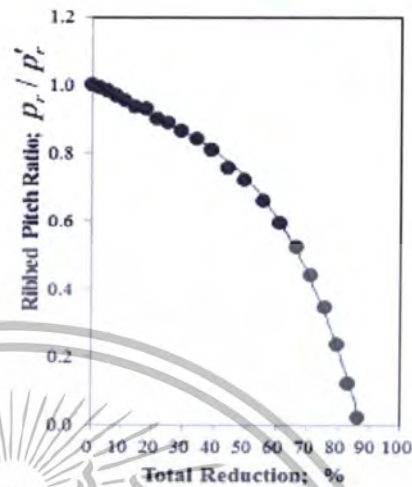


Fig. 14 Changes of rib pitch ratio

4.4 The analysis of the changes which occurred in tubes that was an inner spiral ribbed

The ribbed pitch ratio and the total reduction its size, down repeatedly and continuously because the outside diameter is reduced. While the tube was considered that it got the compressive stress in the circumference of the tube, which is likely to depend on the ribbed pitch ratio. The relationships between rib pitch ratio and total reduction are shown in Fig. 14. The ribbed spiral angle ratio and the total reduction its size down repeatedly and continuously because of a period of elongation in the axial direction, the trend was from the ribbed spiral angle ratio. It will decrease after the Re/P percent of increasing the amount continuously increasing throughout 21 times. The relationships between rib spiral angle ratio and total reduction are illustrated in Fig. 15.



Fig. 15 Changes of rib spiral angle ratio

#### 4. Conclusions

This work has discussed the effects of rib dimension reduction and orientation change of inner spiral ribbed copper tubes using the tube sinking method. The experimental outcomes are described below:

[1] The tube sinking is a process which arising from stress, including the axial stress,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

radial stress and hoop stress. The compressive stress will occur at the tube wall. But it may change to the tensile stress within the area of the rib. Compressive stress is the fact value that distributed within the range of the radius of the tube wall and unexpectedly reduced within the area of the rib. It will have the same value of what occurs in the area of the wall and rapidly expanding in the area of the rib.

[2] About the expansion of the effectiveness strain that happened at that time will have the highest value assimilation within the limits of the boundary between the rib and the spiral angle of the rib, in the rib area will delicate and fragile easier than the surface of the tube wall, while using tube sinking drawing method.

[3] During using tube sinking drawing, the inner spiral rib has changed a lot including the thickness of the tube wall, which increased repeatedly and continuously. But the ribbed height, ribbed base width, ribbed tip width, ribbed pitch, and ribbed spiral angle was decreased after that the spiral angle of the ribbed will change a lot.

[4] The tube sinking drawing in the case of a copper tube with a spiral rib inside; the total reduction that was the most appropriate must not exceed 49.76 percent because it will have the grooves and fissures at the side of the ribbed.

#### 5. Acknowledgements

The authors would like to express deep appreciation to Prof. Dr. Kazunari Yoshida, Department of Precision Engineering, Tokai University, 1117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, Japan 259-1292, for valuable and useful advice and comments.

#### 6. References

- [1] Chikara Saeki., Inner Grooved Tube Forming Apparatus, *United States Patent, Patent Number: 5,724,844*, Mar. 10, 1998.
- [2] Mamoru, Houfuku., 2007, Development trends in inner-grooved tubes in Japan, *Hitachi Cable Review No.26*, August 2007, pp. 1-3.
- [3] Li Yong, XIAO Hui, LIAN Bin, TANG Yong, ZENG Zhi-xin., 2008, Forming method of axial micro grooves inside copper heat pipe, *Science Press, Trans. Nonferrous Met. Soc.* 18(2008), pp. 1229-1233.
- [4] Y. Tang, Y. Chi, J.Ch. Chen, X.X. Deng, L. Liu, X.K. Liu, Zh.P. Wan., 2006, Experimental study of oil-filled high-speed spin forming micro-groove fin-inside tubes, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 (2007), November 2006, pp. 1059-1068.
- [5] Yong Tang, Long-sheng Lu, Dong Yuan, Qing-hui Wang, Xiao-lin Zhao., 2009, Experimental and FEM study on sinking of miniature inner grooved copper tube, *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009), pp. 5333-5340.
- [6] P.R. Chandra, C.R. Alexander, J.C. Han., 2003, Heat transfer and friction behaviors in rectangular channels with varying number of ribbed walls, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (2003), pp. 481-495.
- [7] Pedro G Vicente, Alberto Garcia, Antonio Viedma., 2002, Heat transfer and pressure drop for low Reynolds turbulent flow in helically dimpled tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45 (2002), pp. 543-553.
- [8] Toshihisa, Hara., 2005, Developments and Future Trends in Copper Alloy Strip for Electronic Equipment and in Copper Tube for Air

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Conditioners, *Kobelco Technology Review No. 26*  
Dec. 2005. pp. 70-76.

[9] T. Arts, C. Benocci, P. Rambaud., 2007, Experimental and Numerical Investigation of Flow and Heat Transfer in a Ribbed Square Duct, *3rd International Symposium on Integrating CFD and Experiments in Aerodynamics, 20-21 June 2007*, U.S. Air Force Academy, CO, USA, pp. 1-19.

[10] TANG Renhu, YIN Fei, WANG Haijun, CHEN Tingkuan., 2007, An investigation into the heat Transfer characteristics of spiral wall with internal rib in a supercritical sliding-pressure operation once-through boiler, *Front. Energy Power Eng. China* 2007, pp. 300-304.

[11] Dieter, G.E., *Mechanical metallurgy*, 1988, SI metric edition, McGraw-Hill, ISBN 0-07-100406-8.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายธนิต แต่งศรี  
 วัน เดือน ปีเกิด 20 ตุลาคม 2501  
 ที่อยู่ 55 ถนนร่มเกล้า แขวงแสนแสบ เขตมีนบุรี  
 กรุงเทพมหานคร 10510 โทรศัพท์ 02-9182031  
 ประวัติการศึกษา 2539 อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล  
 มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต  
 2545 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 2554 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล  
 มหาวิทยาลัยธนบุรี

ประสบการณ์วิจัย: Applied mechanics, Material and Manufacturing

หัวข้อวิทยานิพนธ์ (ป.ตรี)

ชื่อเรื่องไทย: การศึกษาและออกแบบเครื่องปอกกระเทียม

ชื่ออังกฤษ: The Study and Design of a Garlic Peeling Machine

อาจารย์ที่ปรึกษา: รศ.สุนันท์ ศรีนัยนิตย์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ (ป.โท)

ชื่อเรื่องไทย: การศึกษาผลกระทบของครึ่งมุมตาย, ความเร็วและความดันของสารหล่อ  
 ลื่นในการดึงลวดทองแดงโดยการทดสอบ

ชื่ออังกฤษ: AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF HALF DIE  
 ANGLE, SPEED AND LUBRICANT PRESSURE IN COPPER  
 WIRE DRAWING

อาจารย์ที่ปรึกษา: รศ.ดร.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ

1. การเผยแพร่ผลงานวิจัยระหว่างศึกษาปริญญาเอก

1.1 ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ

1. Tangsri, T., Norasethasopon, S. and Yoshida, K. 2014. "Fabrication of small size inner spiral ribbed copper tube by fluid mandrel drawing" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 70: 1923-1930.
2. Tangsri, T. and Norasethasopon, S. 2015. "Influences of total reduction of area on drawing stress and tube dimension in inner spiral ribbed copper tube sinking" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 77: 2269-2276.
3. Tangsri, T. and Norasethasopon, S. 2015. "3D FEM validation of ultra-small inner spiral ribbed copper tube using the tube sinking method" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. DOI 10.1007/s00170-015-7328-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 ผลงานวิจัยนำเสนอในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ

1. Tangsri, T. and Norasethasopon, S. 2013. “Fabrication of Small Size Inner Spiral Ribbed Copper Tube Using Tube Sinking Method” **Advanced Materials Research**. 802: 37-41.

## 1.3 ผลงานวิจัยนำเสนอในที่ประชุมวิชาการระดับชาติ

1. Tangsri, T. and Norasethasopon, S. 2013. “Effects of Rib Dimension Reduction and Orientation Change of Inner Spiral Ribbed Copper Tube Using Tube Sinking Method” **The 27<sup>th</sup> Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NET)**, 16-18 October 2013, Pattaya, Chonburi. (Best paper award)

## 2. การเผยแพร่ผลงานวิจัยระหว่างศึกษาปริญญาโท

### 2.1 การตีพิมพ์ผลงานวิจัย

1. Experimental Study of the Effect of a Half-Die Angle on Drawing Stress During Wire Drawing, *Ladkrabang Engineering Journal*, 2001
2. Effect of Half-Die Angle and Lubricant Pressure on Drawn Copper Wire Hardness by Experiment, *The 16th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand*, 17-19 October 2002



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้