

อิทธิพลของแมนเดรลเหลวต่อความหนาและคุณภาพผิว
ในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อทองแดง

INFLUENCE OF FLUID MANDREL ON THICKNESS AND SURFACE QUALITY
IN COPPER TUBE DRAWING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดำเนินการตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-030-183

อิทธิพลของแมนเดรลเหลวต่อความหนาและคุณภาพผิว
ในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อทองแดง

INFLUENCE OF FLUID MANDREL ON THICKNESS AND SURFACE QUALITY
IN COPPER TUBE DRAWING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-030-183

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INFLUENCE OF FLUID MANDREL ON THICKNESS AND SURFACE QUALITY
IN COPPER TUBE DRAWING



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015
KMITL-2015-EN-M-030-183

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

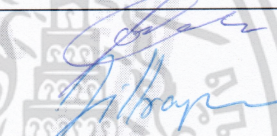
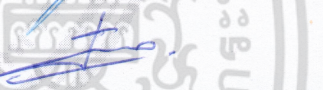

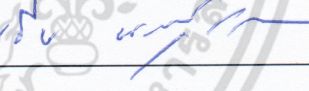
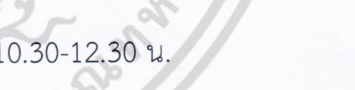
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

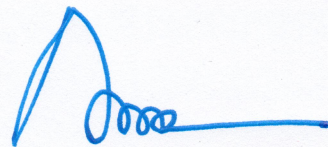
หัวข้อวิทยานิพนธ์ อิทธิพลของแมนเดรลต่อความหนาและคุณภาพผิวในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อทองแดง
Thesis Title Influence of Fluid Mandrel on Thickness and Surface Quality in Copper Tube Drawing
นักศึกษา นางสาวทัฬหะศมน ดุสิตโสภิตวงศ์
รหัสประจำตัว 54610856
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-030-183

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.เอกพจน์	ต้นตราภิวัดน์	
ดร.จิตราภรณ์	วงศางาม	
ผศ.ดร.ฐิตะพล	หุยะนันท์	
รศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	
รศ.ดร.สมชัย	นรเศรษฐ์โสภณ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 เวลา 10.30-12.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติใหม่ ห้อง HM-303

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. ศรัทธา มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของแมนเดรลเหลวต่อความหนาและคุณภาพผิวในกระบวนการดิ่งขึ้นรูปท่อทองแดง
นักศึกษา	นางสาวทัฬหะศมน ดุสิตโคภิตวงศ์
รหัสประจำตัว	54610856
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาลดลงของขนาดพื้นที่หน้าตัด ที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของท่อ ความเค้นดึงและค่าความขรุขระของผิวภายนอกท่อ ภายหลังจากกระบวนการดิ่งขึ้นรูปท่อทองแดงโดยใช้แมนเดรลเหลว ได้ทำการทดลองโดยใช้ท่อทองแดงตามมาตรฐาน JIS C12200 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาท่อเริ่มต้น 15.88 มิลลิเมตร และ 1.12 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยบรรจุของเหลวไว้ในท่อทองแดงเพื่อทำหน้าที่เป็นแมนเดรล คือ น้ำสะอาด น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 จนเต็ม และมีสารหล่อลื่น คือ น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40, โซเดียมสเตียเรท และ น้ำมันปาล์ม จากนั้นทำการดิ่งขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ที่มีขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์เท่ากับ 15 องศา เพื่อลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลงร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยศึกษาที่อัตราเร็วในการดิ่งขึ้นรูปเท่ากับ 30 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า อิทธิพลของแมนเดรลและสารหล่อลื่น รวมทั้งอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดนั้นส่งผลต่อความหนาของท่อ ความเค้นดึงขึ้นรูป และคุณภาพผิวภายนอกท่อ

Thesis	Influence of Fluid Mandrel on Thickness and Surface Quality in Copper Tube Drawing
Student	Ms.Tubsamon Dusitsopittawong
Student ID.	54610856
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Somchai Norasethasopon

ABSTRACT

The thesis is to study the effect of the reduction of area to thickness, drawing stress and surface roughness in tube drawing process with fluid mandrel. The standard copper tube JIS C12200 with 15.88 mm diameter and 1.12 mm wall thickness is chosen for this experimental investigation. Two types of fluid mandrel ; water and lubrication oil (SAE20W40) were contained in the copper tube with the outer surface were covered by lubrication oil (SAE20W40) , sodium stearate and palm oils. The copper tube is drawn through the die ($\alpha = 15^\circ$) by using the area reduction of 20, 35 and 50% with the drawing speed at 30 mm/min. The results shown the influence of the reduction of area on the tube thickness and the surface quality and also depend on the density of fluid, lubricant types and the drawing speed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งท่านได้ให้ข้อคิด คำแนะนำ รวมไปถึงแนวทางในการแก้ไขปัญหา ที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัย ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาเป็นอย่างยิ่งและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.พลชัย โชติปรายนกุล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้อนุเคราะห์ช่วยเหลือในเรื่องเครื่องวัดค่าความขรุขระผิว

ขอขอบพระคุณอาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่างๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือในทุกๆเรื่อง ทั้งกำลังใจ คำแนะนำเกี่ยวกับปัญหาต่างๆในการทำวิจัย

ขอขอบคุณน้องๆ ปริญญาตรีทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือ เป็นกำลังใจและรับฟังปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ความสำคัญกับการศึกษาของบุตรและให้การสนับสนุนเอาใจใส่ดูแลด้วยดีเสมอมา รวมทั้งกำลังใจจากน้องสาวคนสำคัญ ที่หาเปรียบมิได้

ทัฬหีสมน ดุสิตโคภิตวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	4
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
3.1 การขึ้นรูป.....	9
3.1.1 การขึ้นรูปทางกล.....	10
3.1.2 กลศาสตร์การขึ้นรูป.....	12
3.1.3 การวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะ.....	13
3.1.4 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป.....	13
2.2 คุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบการดึงและแผนภาพความเค้น - ความเครียด.....	16
3.2.1 การเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นและการเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก.....	16
3.2.2 ความเค้นวิศกรรม.....	17
3.2.3 ความเครียดวิศกรรม.....	19
3.2.4 มอดูลัสความยืดหยุ่น.....	20
3.2.5 ความเค้น ณ จุดคราก.....	22
3.2.6 ความต้านทานแรงดึงสูงสุด.....	24
3.2.7 ความเหนียว.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

3.3 ลักษณะผิว.....	25
3.3.1 ความผิดพลาดในการผลิต.....	26
3.3.2 ประเภทการวัดความหยาบผิว.....	28
บทที่ 4 การดัดขึ้นรูป.....	32
4.1 ทฤษฎีการดัดขึ้นรูป.....	32
4.1.1 ตัวแปรที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปท่อ.....	32
4.1.2 แรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปท่อ.....	35
4.1.3 ความเสียหาย.....	37
4.2 ชนิดของการดัดขึ้นรูป.....	39
4.2.1 การดัดขึ้นรูปแบบไม่มีแมนเดรลหรือซิ่งกิ้ง.....	40
4.2.2 การดัดขึ้นรูปแบบมีแมนเดรล.....	41
4.2.3 การดัดขึ้นรูปแบบมีแมนเดรลเหลว.....	42
บทที่ 5 ผลิตรัศมีหล่อลื่น.....	43
5.1 การหล่อลื่น.....	43
5.2 ลักษณะฟิล์มหล่อลื่น.....	45
5.2.1 ลักษณะฟิล์มแบบ Full Film.....	45
5.2.2 ลักษณะฟิล์มแบบ Elastohydrodynamic.....	46
5.2.3 ลักษณะฟิล์มแบบ Boundary Layer Film.....	46
5.3 การพัฒนากรรมวิธีของสารหล่อลื่น.....	47
5.4 ผลิตรัศมีสารหล่อลื่น.....	48
5.5 คุณสมบัติของผลิตรัศมีหล่อลื่นที่ใช้ในการขึ้นรูป.....	49
บทที่ 6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	50
6.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	50
6.1.1 เครื่องทดสอบแรงดึง.....	50
6.1.2 เครื่องวัดความขรุขระผิว.....	52
6.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	54
6.2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	54
6.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

6.3 วิธีการทดลอง.....	59
บทที่ 7 ผลการทดลอง.....	63
7.1 ผลการทดลอง.....	63
7.1.1 กราฟแรงดึงขึ้นงาน.....	63
7.1.2 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อการลดพื้นที่หน้าตัด.....	68
7.1.3 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อการลดพื้นที่หน้าตัด.....	71
7.1.4 ค่าความขรุขระผิวภายนอกท่อต่อการลดพื้นที่หน้าตัด.....	74
7.1.5 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อชนิดของแมนเดรลเหลว.....	77
7.1.6 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อชนิดของแมนเดรล.....	78
7.1.7 ค่าความขรุขระผิวภายนอกท่อต่อชนิดของแมนเดรลเหลว.....	79
7.1.8 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อชนิดของสารหล่อลื่น.....	80
7.1.9 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อชนิดของสารหล่อลื่น.....	81
6.1.10 ค่าความขรุขระผิวภายนอกท่อต่อชนิดของสารหล่อลื่น.....	82
7.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	83
บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	85
8.1 บทสรุป.....	85
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	85
เอกสารอ้างอิง.....	87
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก ข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง.....	92
ภาคผนวก ข ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	97
ประวัติผู้เขียน.....	115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การดึงท่อโดยใช้แมนเดรลเหลว.....	2
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงและอัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบต่างๆ.....	5
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงและครี้งมุมตาย ที่อัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20, 26.5 และ 34.4 เปอร์เซ็นต์.....	6
3.1 วิธีการขึ้นรูปแบบต่างๆ.....	10
3.2 แผนภาพการแตกแรงของแรงชนิดต่างๆ ขณะขึ้นรูปขึ้นงาน.....	14
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด.....	17
3.4 ทิศทางแรงกระทำกับชิ้นงานชนิด ก) แรงดึง ข) แรงกด.....	18
3.5 ทิศทางแรงกระทำกับชิ้นงานชนิด ก) แรงเฉือน ข) แรงบิด.....	18
3.6 การนิยามวิธีการหาโมดูลัสแบบต่างๆ จากกราฟของความเค้นและความเครียดแบบไม่เป็นเส้นตรง.....	21
3.7 กราฟแสดงค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด.....	22
3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด สำหรับเหล็กกล้าละมุน (Mild Steel) จุด Yu แสดงถึง Yield Strength point.....	23
3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แสดงการหาค่า 0.2% offset Yield Strength.....	23
3.10 ลักษณะความผิดพลาดในการผลิตพื้นผิว.....	26
3.11 ลักษณะความผิดพลาดของขนาดและรูปร่าง.....	27
3.12 ลักษณะความผิดพลาดแบบเป็นคลื่น.....	27
3.13 การวัดค่าความหยابผิวเฉลี่ยเลขคณิต.....	28
.....	29
3.14 การวัดค่าความหยابผิวเฉลี่ยกำลังสอง.....	29
3.15 การวัดค่าความหยابผิวเฉลี่ยปริมาตร.....	29
3.16 การวัดค่าความหยابผิวเฉลี่ยรูปร่าง.....	30
3.17 การวัดค่าความหยابผิวขนาดโดยรวม.....	30
3.18 การวัดค่าความหยابผิวขนาดหลุมลึกสุด.....	31
3.19 การวัดค่าความหยابผิวขนาดยอดสูงสุด.....	31
3.20 การวัดค่าความหยابผิวขนาดโดยเฉลี่ย.....	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 แผนภาพการดิ่งขึ้นรูปที่ภายในมีตัวปลັ๊ก.....	32
4.2 ตัวแปรที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูป.....	33
4.3 ความเค้นและแรงในการดิ่งขึ้นรูป.....	35
4.4 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดิ่งขึ้นรูป.....	39
4.5 การดิ่งขึ้นรูปแบบ ก) ไม่มีแมนเดรล ข) มีแมนเดรลแบบติดอยู่กับที่ ค) มีแมนเดรลแบบเคลื่อนที่ ง) มีแมนเดรลเหลว.....	39
4.6 การดิ่งขึ้นรูปแบบไม่มีแมนเดรล.....	40
4.7 มีแมนเดรลแข็งแบบติดอยู่กับผิวภายในชิ้นงาน.....	41
4.8 มีแมนเดรลแบบแข็งแบบเคลื่อนที่ภายในชิ้นงาน.....	42
4.9 การขึ้นรูปแบบมีแมนเดรลเหลว.....	42
5.1 ขอบเขตสภาวะไร้อากาศหล่อลื่น.....	43
5.2 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี.....	44
5.3 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์.....	44
5.4 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบสมบูรณ์.....	45
5.5 फिल्मหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก.....	45
5.6 फिल्मหล่อลื่นแบบไฮโดรสแตติก.....	46
5.7 ลักษณะฟิล์มหล่อลื่นแบบ Elastohydrodynamic.....	46
5.8 ลักษณะฟิล์มหล่อลื่นแบบ Boundary Layer Film.....	47
6.1 เครื่องทดสอบแรงดิ่ง.....	51
6.2 ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบแรงดิ่ง.....	52
6.3 ส่วนประกอบของเครื่องวัดความขรุขระผิว.....	54
6.4 ท่อทองแดงชนิด L ตามมาตรฐาน ASTM B88 5/8 นิ้ว.....	55
6.5 ชุดอุปกรณ์จับแม่พิมพ์.....	56
6.6 ชุดแม่พิมพ์ครึ่งมุมแม่พิมพ์ 15 องศา.....	57
6.7 ขนาดของแม่พิมพ์ตามมาตรฐานของบริษัทผู้ผลิต.....	58
6.8 แผนภาพท่อทองแดงและแกนเหล็ก.....	59
6.9 ขั้นตอนการเตรียมการทดลอง.....	60
6.10 ตัวอย่างสภาวะการทดลอง.....	61
6.11 แผนผังการดำเนินการทดลอง.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.1 ท่อทองแดงหลังดัดขึ้นรูป.....	63
7.2 กราฟระหว่างแรงดัดกับระยะยืด แสดงผลผ่านโปรแกรม Win Test.....	64
7.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและระยะยืดเทียบกับช่วงการดัดท่อทองแดงขณะทำการดัดขึ้นรูป.....	65
7.4 กราฟระหว่างแรงดัดกับระยะยืด ขณะทำการดัดขึ้นรูปท่อทองแดงที่การพื้นที่หน้าตัดต่างๆ.....	65
7.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดกับระยะยืด ขณะทำการดัดขึ้นรูปที่การดัดลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อภายในท่อทองแดงบรรจุแมนเดรลชนิดต่างๆ.....	66
7.6 กราฟระหว่างแรงดัดกับระยะยืด ขณะทำการดัดขึ้นรูปที่การดัดลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อภายนอกท่อทองแดงมีสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ.....	67
7.7 อัตราส่วนความหนาต่อการลดพื้นที่หน้าตัดเมื่อไม่มีสารหล่อลื่น.....	68
7.8 อัตราส่วนความหนาต่อการลดพื้นที่หน้าตัดเมื่อมีน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 เป็นสารหล่อลื่น.....	69
7.9 อัตราส่วนความหนาต่อการลดพื้นที่หน้าตัดเมื่อไม่มีแมนเดรลและมีแมนเดรล.....	70
7.10 อัตราส่วนความเค้นต่อการลดพื้นที่หน้าตัดเมื่อไม่มีสารหล่อลื่น.....	71
7.11 อัตราส่วนความเค้นต่อการลดพื้นที่หน้าตัดเมื่อมีน้ำมันเครื่องเกรด SAE20W40 เป็นสารหล่อลื่น.....	72
7.12 อัตราส่วนความเค้นต่อการลดพื้นที่หน้าตัดเมื่อไม่มีแมนเดรลและมีแมนเดรล.....	73
7.13 ค่าความขรุขระผิวภายนอกต่อการลดพื้นที่หน้าตัดเมื่อไม่มีสารหล่อลื่น.....	74
7.14 ค่าความขรุขระผิวภายนอกต่อการลดพื้นที่หน้าตัด เมื่อมีน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 เป็นสารหล่อลื่น.....	75
7.15 ค่าความขรุขระผิวภายนอกต่อการลดพื้นที่หน้าตัดไม่มีแมนเดรลและมีแมนเดรล.....	76
7.16 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อชนิดของแมนเดรล.....	77
7.17 อัตราส่วนความเค้นดัดต่อชนิดของแมนเดรล.....	78
7.18 ค่าความขรุขระผิวภายนอกต่อชนิดของแมนเดรลเหลว.....	79
7.19 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อชนิดของสารหล่อลื่น.....	80
7.20 อัตราส่วนความเค้นดัดต่อชนิดของสารหล่อลื่น.....	81
7.21 ค่าความขรุขระผิวภายนอกต่อชนิดของสารหล่อลื่น.....	82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 กระบวนการขึ้นรูปขนาดใหญ่.....	11
3.2 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น.....	12
4.1 ค่าแรงเสียดทานในการดึงขึ้นรูปและอัดขึ้นรูปขึ้นงาน.....	37
5.1 การดึงขึ้นรูปแบบแห้ง สำหรับสารหล่อลื่นชนิดทั่วไป.....	47
5.2 การดึงขึ้นรูปแบบเปียก สำหรับสารหล่อลื่นชนิดทั่วไป.....	48
6.1 องค์ประกอบทางเคมีของท่อทองแดง UNS No. C12200.....	55
6.2 คุณสมบัติเชิงกลของท่อทองแดงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปแบบมีแมนเหลว.....	55
6.3 ค่าความหนาแน่นของสารที่ใช้ในการทดลอง.....	55
6.4 ค่าความเหนียวของสารที่ใช้ในการทดลอง.....	56
6.5 ค่าคุณสมบัติของด้ายที่ใช้ในการทดลอง.....	57
6.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความเผื่อของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ยอมรับได้.....	57
6.7 รายละเอียดค่าตัวแปรที่เป็นมาตรฐานของผู้ผลิต.....	58
6.8 สภาวะการทดลอง.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

การดึงขึ้นรูปเป็นหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมที่เก่าแก่วิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมในงานอุตสาหกรรมการผลิตท่อในปัจจุบัน โดยนำท่อ ลวด หรือเหล็กท่อนกลม มาดึงลดขนาดทั้งด้านในและด้านนอก ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ขนาด และคุณสมบัติเชิงกลโดยดึงผ่านแม่พิมพ์เพื่อให้ได้ขนาดตามต้องการ โดยปกติแล้วการดึงขึ้นรูปนิยมทำที่อุณหภูมิห้องและทำการดึงซ้ำๆ ในบางกรณีได้มีการให้ความร้อนหรืออบอ่อนแก่ชิ้นงานที่ต้องดึงซ้ำเพื่อลดความเครียดแข็งที่เกิดขึ้นในชิ้นงานก่อนการดึงครั้งต่อไป [1, 2]

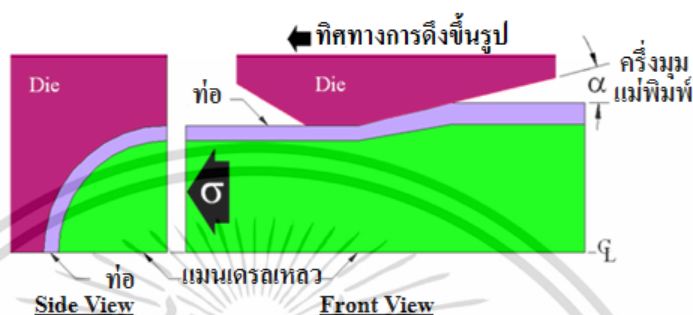
การดึงขึ้นรูปท่อแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดหลัก คือ 1. การดึงขึ้นรูปแบบไม่มีแกน หรือการดึงขึ้นรูปแบบซิงกิ้ง (Tube Sinking) โดยหลังจากดึงผ่านแม่พิมพ์จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลง ในขณะที่ความหนาและความยาวของท่อจะเพิ่มขึ้นโดยขนาดความหนาและความยาวของท่อที่เพิ่มขึ้นนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะของแม่พิมพ์ แรงเสียดทานระหว่างแม่พิมพ์กับชิ้นงาน และความเค้นดึงซึ่งความเค้นดึงที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวของท่อนั้น เกิดจากความดันของของเหลวที่อยู่ภายในท่อ [Yoshida] ซึ่งวิธีนี้จะทำให้ผิวภายในและภายนอกชิ้นงานมีความขรุขระ และ ลักษณะชิ้นงานที่ได้มีขนาดไม่คงที่ตลอดทั้งชิ้นงาน 2. การดึงขึ้นรูปแบบมีแกน (Plug Drawing or Mandrel Drawing) การดึงขึ้นรูปแบบนี้เป็นการดึงขึ้นรูปที่เป็นที่รู้จักและเหมาะสำหรับการดึงขึ้นรูปท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดกลางไปจนถึงขนาดใหญ่ ซึ่งแกนจะอยู่ภายในท่อและจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยอาศัยแรงเสียดทานไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางที่ใช้ดึง วิธีการนี้จะนิยมใช้ในการผลิตท่อผนังบาง โดยวิธีนี้ผิวชิ้นงานทั้งภายในและภายนอก จะมีความเรียบกว่าแบบซิงกิ้ง [3]

การพัฒนากระบวนการผลิตเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการผลิต ซึ่งการผลิตที่มีประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการขึ้นรูปคือ สามารถลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานได้ครั้งละมากๆ ขนาดที่ได้ตรงตามที่กำหนด แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปน้อย เกิดความเสียหายระหว่างการทำงานน้อยที่สุด ไม่ทำให้เกิดรอยขีดข่วนหรือขาดก่อนกระบวนการสิ้นสุด ลดต้นทุนให้มีราคาต่ำ และใช้เวลาในการผลิตน้อย รวมทั้งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพสูงขึ้น การปรับปรุงตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการผลิตเป็นอีกวิธีหนึ่งของการพัฒนากระบวนการผลิต การปรับปรุงตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการผลิตท่อที่สำคัญ เช่น ขนาดแม่พิมพ์ ชนิดของสารหล่อลื่น [30, 31] ชนิดของแมนเดรล [14, 17] ให้มีความเหมาะสมเพื่อให้ได้ชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตรงตามความต้องการในการใช้งาน

ในงานวิจัยได้เลือกใช้การดึงขึ้นรูปท่อแบบมีแกนเหลว (Fluid Mandrel) เป็นการดึงขึ้นรูปแบบเย็นอาศัยแรงในการดึงขึ้นรูปสูง และวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างแบบถาวร โดยทำการดึงวัสดุผ่านแม่พิมพ์โดยอาศัยแรงดึงในการดึงวัสดุที่บริเวณปลายของท่อที่สอดผ่านแม่พิมพ์ออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้ของเหลวเป็นแกนกลางในการดึงขึ้นรูป แม่พิมพ์จะทำหน้าที่ควบคุมขนาดและผิวภายนอกท่อ ส่วนขนาดและผิวภายในท่อจะถูกกำหนดด้วยแกนเหลว แสดงดังรูปที่ 1.1 โดยศึกษาถึงอิทธิพลของแมนเดรลเหลวและการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด ว่าส่งผลกระทบต่อความหนาของท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งภายในและภายนอก ความเค้นดึงที่เกิดขึ้นขณะทำการดึงขึ้นรูป รวมถึงคุณภาพผิวภายนอกของท่อหลังจากผ่านการดึงขึ้นรูป โดยศึกษาว่าตัวแปรเหล่านี้ จะส่งผลต่อวัสดุที่ใช้ทำท่ออย่างไรบ้าง



รูปที่ 1.1 การดึงท่อโดยใช้แมนเดรลเหลว

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1.2.1 ศึกษากระบวนการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยวิธีการดึงขึ้นรูป

1.2.2 ศึกษาพฤติกรรมการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อทองแดงว่าส่งผลอย่างไรต่ออัตราส่วนความหนา ความเค้นดึงและคุณภาพผิวภายนอกของท่อทองแดงหลังจากผ่านการดึงขึ้นรูป

1.2.3 ศึกษาอิทธิพลของแมนเดรลเหลวแต่ละชนิดว่าส่งผลอย่างไรต่ออัตราส่วนความหนา ความเค้นดึงและคุณภาพผิวภายนอกของท่อทองแดงหลังจากผ่านการดึงขึ้นรูป

1.2.4 ศึกษาอิทธิพลของสารหล่อลื่นแต่ละชนิดว่าส่งผลอย่างไรต่ออัตราส่วนความหนา ความเค้นดึงและคุณภาพผิวภายนอกของท่อทองแดงหลังจากผ่านการดึงขึ้นรูป

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีสมมติฐานในการศึกษาคือ

1.3.1 ชิ้นงานที่มีแมนเดรลเหลวจะส่งผลกระทบต่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างคงที่มากกว่าชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล

1.3.2 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้แมนเดรลเหลวจะส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนความหนา ความเค้นดึง และคุณภาพผิวภายนอกท่อทองแดงมากกว่าชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.3 ชิ้นงานที่บรรจุสารหล่อลื่นบริเวณผิวท่อทองแดงภายนอกกับแม่พิมพ์จะส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนความหนา ความเค้นดึง และคุณภาพผิวภายนอกท่อทองแดงมากกว่าชิ้นงานที่ไม่มีสารหล่อลื่น

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการออกแบบและสร้างชุดทดสอบในกระบวนการดึงขึ้นรูปของท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น 15.88 มิลลิเมตร ให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดลดลง 20 เปอร์เซ็นต์, 35 เปอร์เซ็นต์ และ 50 เปอร์เซ็นต์ ผ่านแม่พิมพ์ที่มีขนาดครึ่งมมแม่พิมพ์เท่ากับ 15 องศา ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงเหลือ 14.31 มิลลิเมตร, 12.80 มิลลิเมตร และ 10.24 มิลลิเมตรตามลำดับ ระหว่างที่ทำการดึงขึ้นรูป ภายในท่อทองแดงบรรจุน้ำสะอาด และน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 เพื่อใช้เป็นแมนเดรลเหลว และพื้นที่ระหว่างผิวท่อทองแดงภายนอกกับแม่พิมพ์บรรจุน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40, น้ำมันปาล์ม และโซเดียมสเตียเรทเพื่อใช้เป็นสารหล่อลื่น ทำการศึกษาที่อัตราเร็วในการดึงขึ้นรูปเท่ากับ 30 มิลลิเมตรต่อนาที แล้วบันทึกค่าแรงดึงโดยใช้หน่วยเป็นกิโลนิวตัน จากนั้นนำชิ้นทดลองที่ผ่านการดึงขึ้นรูปแล้ว ไปวัดค่าความขรุขระผิวภายนอกท่อทองแดง รวมทั้งศึกษาค่าคุณสมบัติทางกลของท่อทองแดงทั้งก่อนและหลังการขึ้นรูป ว่าอัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด ชนิดของแมนเดรลเหลว และชนิดของสารหล่อลื่น ส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนความหนาของท่อ ความเค้นดึงและคุณภาพผิวของท่อทองแดงอย่างไรบ้าง

1.5 ขั้นตอนของงานวิจัย

จากแนวคิดและหลักการที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น สามารถสรุปเป็นขั้นตอนการศึกษา ได้ดังนี้

- 1.5.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยโดยให้ครอบคลุมเนื้อหาทั้งหมด
- 1.5.2 ศึกษาบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.3 ปรับปรุงชุดทดสอบ ศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการวิจัย
- 1.5.4 ทำการทดลองที่ขนาดการลดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20, 35 และ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยดึงขึ้นรูปทดสอบที่อัตราเร็วเท่ากับ 30 มิลลิเมตรต่อนาที
 - 1.5.5 ทำการทดลองโดยเปลี่ยนแมนเดรลที่อยู่ภายในท่อทองแดง
 - 1.5.6 ทำการทดลองโดยเปลี่ยนสารหล่อลื่นที่อยู่ภายนอกท่อทองแดง
 - 1.5.7 ทำการสังเกตความหนา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ความเค้นดึงในขณะที่ทำการดึงขึ้นรูป รวมทั้งคุณภาพผิวภายนอกท่อหลังจากทำการดึงขึ้นรูป
- 1.5.8 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง
- 1.5.9 สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

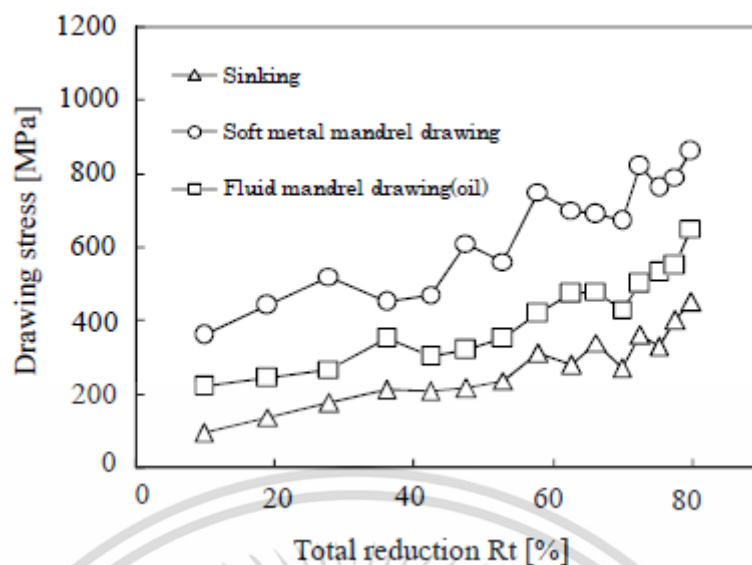
วรรณกรรมปริทัศน์

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการขึ้นรูปท่อทองแดงโดยใช้วิธีการขึ้นรูปแบบแกนเหลว (Fluid Mandrel) โดยการกำหนดขนาดการลดลงของพื้นที่หน้าตัดหลัง ชนิดของแมนเดรลเหลว รวมทั้งชนิดของสารหล่อลื่น ว่าตัวแปรเหล่านี้ส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนความหนาของท่อต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความเค้นดึงที่เกิดขึ้น และคุณภาพผิวภายนอกท่อทองแดง หลังจากที่ผ่านมาการดึงขึ้นรูปแล้ว จึงได้มีการศึกษาทฤษฎี แนวความคิด รวมถึงบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในทางตรงและทางอ้อม เพื่อนำมาประยุกต์ใช้และเปรียบเทียบกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยมีหนังสือและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 Fabrication of High Quality Fine Medical Tubes by Fluid Mandrel Drawing [14]

K. Yoshida, Y. Onitsuka และ S.Yamashita ได้ทำการศึกษาการขึ้นรูปแบบแกนเหลวในโครงสร้างของท่อเวชภัณฑ์แบบบาง ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบการขึ้นรูปของท่อสแตนเลส SUS 304 ที่ขนาดการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 34.4, 25.6 และ 20 เปอร์เซ็นต์จำนวน 5 แบบ คือ 1.วิธีซิงกิ้ง (Sinking Drawing) คือการขึ้นรูปแบบไม่มีแมนเดรลหรือแกน พบว่าหลังจากผ่านการดึงขึ้นรูปความหนาของผนังและความขรุขระของผิวท่อทั้งภายในและภายนอกจะเพิ่มขึ้น 2.วิธีการขึ้นรูปแบบปลั๊ก (Plug Drawing) คือมีแมนเดรลแข็งแบบติดอยู่กับผิวภายในชิ้นงาน ถูกนำมาใช้สำหรับชิ้นงานที่มีความสามารถในการทำงานต่ำ เพราะบ่อยครั้งจะเกิดการแตกหักหลังจากผ่านการดึงขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดสูง 3.วิธีการขึ้นรูปแบบโพลทึงปลั๊ก (Floating Plug Drawing) คือ การขึ้นรูปที่มีแมนเดรลแบบแข็งเคลื่อนที่ภายในชิ้นงาน ถือเป็นวิธีการขึ้นรูปท่อที่ดีที่สุดแต่ชิ้นงานมักจะแตกในขณะที่ทำการดึงสำหรับงานที่เป็นท่อแบบบาง 4. วิธีการขึ้นรูปแบบซอฟแมนเดรล (Soft Mandrel) คือมีแมนเดรลที่มีลักษณะเป็นผง โดยได้เลือกใช้โซเดียมสเตียเรทเป็นแกนกลางในการดึงขึ้นรูป หลังจากดึงขึ้นรูปพบว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลง และอัตราส่วนความหนาท่อหลังดึงขึ้นรูปต่อก่อนดึงขึ้นรูปแทบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในการดึงขึ้นรูปซ้ำ แต่ยากที่จะนำตัวแมนเดรลออกจากท่อ อีกทั้งชิ้นงานยังเกิดการเปลี่ยนรูปอยู่ (Deformation) และ 5. วิธีการขึ้นรูปแบบมีแกนเหลว (Fluid Mandrel Drawing) พบว่าเป็นการดึงขึ้นรูปท่อที่ดีที่สุดสำหรับท่อแบบบาง เพราะอัตราส่วนความหนาท่อหลังดึงขึ้นรูปต่อก่อนดึงขึ้นรูป และความขรุขระผิวที่เกิดขึ้น มีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานเริ่มต้น และน้ำยังเป็นแกนเหลวที่ใช้ดึงขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดเพราะสามารถนำออกจากท่อได้ง่ายกว่าของเหลวชนิดอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

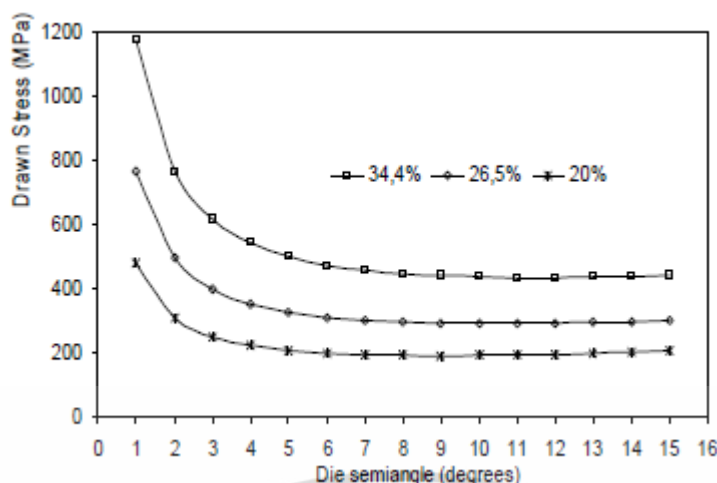


รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงและอัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปแบบต่างๆ

2.2 Numerical and Experimental Analysis of Tube Drawing with Fixed Plug [15]

F.O. Neves, S.T. Button, C. Caminaga และ F.C. Gentile ได้ทำการวิเคราะห์ผลของการดึงขึ้นรูปท่อโดยอาศัยการดึงขึ้นรูปแบบมีแมนเดรลแข็งแบบติดอยู่กับผิวภายในชิ้นงาน (Fixed Plug Drawing) ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองของท่อสแตนเลส SUS 304 โดยทำการดึงลดขนาดพื้นที่หน้าตัดจำนวน 2 ครั้งจนถึง 34.4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือขนาดการลดลงของครึ่งมุมแม่พิมพ์ (Die Semi Angle) และครึ่งมุมแมนเดรลแบบแข็ง (Plug Semi Angle) ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในท่อ แรงดึงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป และขนาดสุดท้ายของชิ้นงาน ได้นำการคำนวณโดยทฤษฎีขอบเขตบน (Upper Bound Theory) มาใช้ในการวิเคราะห์พบว่า ความเค้นที่เกิดขึ้นจะคงที่หลังจากผ่านการดึงขึ้นรูปไปแล้วที่ระยะทาง 10 มิลลิเมตร และที่ครึ่งมุมแม่พิมพ์ที่ได้ผลดีที่สุดอยู่ในช่วง 7 ถึง 10 องศา สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับการทดลองคือ มุมแม่พิมพ์ อัตราเร็วในการดึงขึ้นรูป สารหล่อลื่น และอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดในแต่ละครั้ง และการรักษาความดันภายใน (Pressurized) พบว่า ชิ้นงานที่ใช้สารหล่อลื่นแบบสังเคราะห์และแบบกึ่งสังเคราะห์ จะสามารถดึงลดขนาดพื้นที่หน้าตัดได้ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ แต่ชิ้นงานที่ใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น จะสามารถดึงลดขนาดได้ถึง 16 เปอร์เซ็นต์ โดยอัตราเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ดีที่สุดคือ 5 มิลลิเมตรต่ออนาที และถ้าทำการรักษาความดันภายในท่อจะทำให้แรงในการดึงขึ้นรูปลดลงซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนรูปของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงและครึ่งมุมตาย ที่อัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20, 26.5 และ 34.4 เปอร์เซ็นต์ [15]

2.3 Analysis of Drawing Process and Extrusion Process by Slip-Line Field Theory [27]

อำไพศักดิ์ ทิบุญมา, ศิริศักดิ์ หาญชูวงศ์ และชาญ ถนัดงาน ได้ทำการศึกษาดึงขึ้นรูปและการอัดรีดขึ้นรูปด้วยวิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยนำทฤษฎีสนามเส้นเลื่อนไหล (Slip-Line Field Theory) อีกทั้งได้ทำการเปรียบเทียบกับทฤษฎีขอบเขตบนและทฤษฎีสแลบ (Slab Analysis) ซึ่งในงานวิจัยได้ทำการกำหนดให้พลังงานภายนอกเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างขณะทำการขึ้นรูป ซึ่งทั้งการดึงขึ้นรูปและการอัดรีดขึ้นรูปนั้น ชิ้นงานจะมีความหนาลดลง แต่เมื่อมุมแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นชิ้นงานที่ผ่านการดึงจะมีค่าความดันแม่พิมพ์ลดลง ซึ่งตรงกันข้ามกับชิ้นงานที่ผ่านการอัดรีดขึ้นรูปคือค่าความดันแม่พิมพ์จะมีค่ามากขึ้น

2.4 Analysis of Tube Drawing Process using Floating Plug by FEM [28]

ณัฐนันท์ มูลสระคู่, พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์, วรุณี เปรมานนท์ และทวีชัย โสภณอุดมสิทธิ ได้ทำการศึกษาดึงท่อทองแดงด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบโพลทึงปลั๊กโดยใช้ FEM ในการวิเคราะห์ โดยต้องการดึงขึ้นรูปท่อทองแดงให้มีความยาวต่อเนื่องมากที่สุด สามารถลดขนาดพื้นที่หน้าตัดได้ครั้งละมากๆ แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปต่ำ และไม่เกิดรอยขีดข่วนหรือขาดในขณะทำการดึงขึ้นรูป ซึ่งวัสดุที่นำมาศึกษาเพื่อทำการเปรียบเทียบคือ เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และท่อทองแดง อีกทั้งศึกษาว่าครึ่งมุมปลั๊ก และครึ่งมุมแม่พิมพ์จะส่งผลกระทบต่ออย่างไรบ้างในขณะทำการดึงขึ้นรูปชิ้นงานพบว่าตัวปลั๊กจะเป็นตัวแปรที่ควบคุมขนาดและผิวภายในท่อ ในขณะที่ขนาดภายนอกท่อจะถูกรักษาด้วยแม่พิมพ์ ซึ่งค่าความต่างของมุมของตัวแปรทั้งสองนี้ส่งผลกระทบต่อ การขึ้นรูป คือที่มุมปลั๊กและมุมแม่พิมพ์ต่างกัน 2 องศา จะทำให้แรงในการดึงขึ้นรูปต่ำ (สามารถคำนวณทางทฤษฎีได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ของความเค้นในขณะทำการดึงขึ้นรูปต่อขนาดพื้นที่หน้าตัดหลังดึงขึ้นรูป) และเมื่อแรงดึงในการขึ้นรูปต่ำ จะสามารถทำให้ลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานได้มาก

2.5 การประยุกต์ใช้ FEM ในการวิเคราะห์และปรับปรุงปลี๊กในกระบวนการดึงท่อ [29]

คมกริช ละวรรณวงษ์ และ กุศล พร้อมมูล ได้ทำการวิเคราะห์และปรับปรุงมุมปลี๊กในกระบวนการดึงขึ้นรูปโดยใช้แบบจำลอง FEM ซึ่งได้ทำการปรับระยะเรียบตรงและรูปร่างของปลี๊กเพื่อทำให้แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลดลง ซึ่งแรงนี้จะขึ้นกับอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัด ความเสียดทานมุมแม่พิมพ์ และมุมปลี๊ก พบว่าแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลดลงเมื่อมุมปลี๊กมีค่าเพิ่มขึ้นเพราะมุมที่เพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างผนังท่อและผิวปลี๊กน้อย

2.6 อิทธิพลของแรงดันของเหลวที่มีต่อแรงลากขึ้นรูปในการลากขึ้นรูปปลี๊กเหล็กคาร์บอนรีดเย็น SPCC ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว [32]

ศิริชัย ต่อสกุล และ กฤษฎา บรรเทาพิช ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของแรงดันของเหลวในการขึ้นรูปปลี๊กด้วยการเคลื่อนที่ของเหลวชนิดน้ำมันไฮดรอลิกมาตรฐาน โดยกำหนดแรงดันอยู่ที่ 50 บาร์, 100 บาร์ และ 150 บาร์ เทียบกับการลากขึ้นรูปแบบปกติ พบว่าแรงดันของเหลวส่งผลต่อแรงกดพื้นที่โดยรวมเพิ่มสูงขึ้น แต่จะลดลงที่สภาวะแรงดันเท่ากับ 100 บาร์ เพราะไม่พบรอยฉีกขาดที่บริเวณผิวทดสอบ

2.7 การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของการใช้สารหล่อลื่นอุตสาหกรรมในงานดึงขึ้นรูปท่อทองแดง [33]

ณัฐนันท์ มูลสระคู, พงศ์พันธ์ แก้วตาพิทย์ และวารุณี เปรมานนท์ ได้ทำการศึกษาเชิงเปรียบเทียบของการใช้สารหล่อลื่นในการดึงขึ้นรูปท่อทองแดงโดยวิธีโฟลตดึงปลี๊ก ที่ร้อยละการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 38 โดยสารหล่อลื่นที่ใช้แบ่งออกเป็นกลุ่มสารหล่อลื่นที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมดึงท่อทั่วไป และกลุ่มสารหล่อลื่นพื้นฐานที่มีความหนืดต่างกันโดยพิจารณาแรงที่ใช้ในการดึงท่อและความเรียบผิวของท่อ พบว่าสารหล่อลื่นที่มีความหนืดน้อยจะทำให้ผิวท่อมีความเรียบมาก แต่ต้องไม่น้อยเกินไปเพราะจะทำให้ดึงขึ้นรูปไม่สำเร็จ และถ้าสารหล่อลื่นมีความหนืดมากหรือน้อยเกินไปจะทำให้แรงเสียดทานมากส่งผลให้แรงที่ใช้ในการดึงมากขึ้น

2.8 การศึกษาอิทธิพลของความหนืดและปริมาณคลอรีนในน้ำมันหล่อลื่นของกระบวนการดิ่งท่อทองแดง [34]

ณัฐนันท์ มูลสระคู, พงศ์พันธ์ แก้วดาทิพย์ และวารุณี เปรมานนท์ ได้ศึกษาอิทธิพลของความหนืดและปริมาณคลอรีนในน้ำมันหล่อลื่นของกระบวนการดิ่งท่อทองแดงแบบโพลดิ่งปลัก โดยศึกษาความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและปริมาณคลอรีนที่ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วงรับแรงกด พบว่าความเรียบของผิวท่อและแรงมีใช้ในการดิ่งขึ้นอยู่กับค่าความหนืดเป็นปัจจัยหลัก ส่วนปัจจัยรองคือสารรับแรงกด โดยน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดน้อยจะทำให้ผิวท่อมีความเรียบมาก เพราะมีแรงเสียดทานต่ำ และน้ำมันหล่อลื่นที่มีส่วนผสมของสารรับแรงกดคลอรีนจะช่วยลดแรงเสียดทานได้

2.9 การศึกษาการใช้ไขมันจากพืชเป็นสารหล่อลื่นในกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะ [35]

ศุภเอก ประมูลมาก และวิเชียร เกื้อนเครือวัลย์ ได้นำเอาไขมันจากพืชมาใช้เป็นสารหล่อลื่นในกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะเหล็ก SPEN แบบแผ่น โดยมีน้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันปาล์ม พบว่าน้ำมันทั้ง 3 ชนิดสามารถนำมาใช้ในการลากขึ้นรูปโลหะได้ แต่น้ำมันมะพร้าวจะให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิตและความหยาบผิวขนาดโดยรวมดีที่สุด

2.10 การศึกษาจุดบกพร่องที่มีผลต่อกระบวนการดิ่งลวดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ C5D2 [36]

อิทธิพล อินทร์ดีเสียบ และสมชัย นรเศรษฐ์โสภณ ได้ศึกษาจุดบกพร่องที่มีผลกระทบต่อกระบวนการดิ่งลวดเหล็กกล้าผสมคาร์บอนต่ำ C5D2 โดยศึกษาถึงผลกระทบของสารหล่อลื่นคือ โซเดียมสเตียเรทที่เป็นของแข็ง และน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่ร้อยละการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 8, 15 และ 24 พบว่าสารหล่อลื่นของแข็งทำให้แรงที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูปน้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เท่ากับ 2.2 เปอร์เซ็นต์แต่ความต้านทานแรงดิ่งของลวดหลังดิ่งจะน้อยกว่า 3.5 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การขึ้นรูป [1-8]

กระบวนการขึ้นรูปโลหะถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก ซึ่งในการขึ้นรูปโลหะนั้น มีความยากง่ายแตกต่างกันไป ซึ่งขึ้นอยู่กับขั้นตอนของกระบวนการขึ้นรูปชนิดนั้นๆ โดยกระบวนการที่นิยมนำมาใช้ขึ้นรูปโลหะนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นหลากหลายชนิด อาทิเช่น

- การขึ้นรูปโดยอาศัยอุณหภูมิ เช่น การขึ้นรูปเย็น การขึ้นรูปร้อน
- การขึ้นรูปแผ่นโลหะที่ไม่ต้องอาศัยขึ้นโลหะเป็นตัวเคลื่อนที่
- การขึ้นรูปโดยอาศัยสถานะความเค้นในชิ้นงาน
- การขึ้นรูปโดยอาศัยชนิดของความเค้น เช่น ความเค้นดึง ความเค้นอัด
- การขึ้นรูปโดยอาศัยขนาดของช่วงการเปลี่ยนรูปพลาสติก (Plastic Deformation Zone)

ซึ่งในงานด้านอุตสาหกรรมนั้น สามารถแบ่งกระบวนการขึ้นรูปออกได้เป็น 4 ชนิดหลัก คือ

1. กลุ่มการขึ้นรูปแบบบีบชิ้นงาน (Squeezing group) การขึ้นรูปในลักษณะให้แรงเค้นกดชิ้นงาน ซึ่งในกระบวนการนี้จะใช้กับชิ้นงานที่ต้องการพิจารณาการเปลี่ยนรูปร่าง ซึ่งจะประกอบด้วย การตีขึ้นรูป การอัดขึ้นรูป การรีด การหมุนขึ้นรูป การหมุนเฉือน เป็นต้น

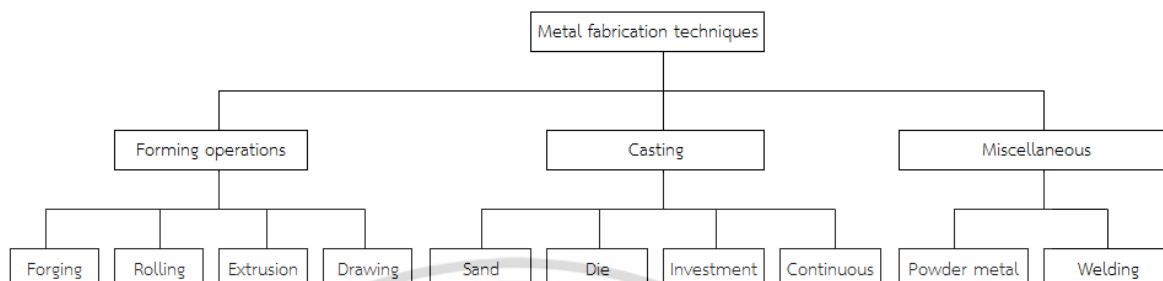
2. กลุ่มการขึ้นรูปแบบดึงชิ้นงาน (Drawing group) การขึ้นรูปโดยอาศัยความเค้นดึง เป็นกระบวนการที่จำกัดแค่นีในช่วงการเสียรูปพลาสติกซึ่งเป็นการขึ้นรูปเพียงครั้งเดียว ซึ่งจะพิจารณาในส่วนของ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากกว่าการเปลี่ยนแปลงความหนา โดยชิ้นงานที่ขึ้นรูปจะมีลักษณะเป็นแผ่น เป็นท่อผนังบาง ซึ่งจะประกอบด้วย การขึ้นรูปแผ่นโลหะ การขึ้นรูปหลอด การขึ้นรูปท่อ การขึ้นรูปถ้วยลึก เป็นต้น

3. กลุ่มการขึ้นรูปแบบดัดชิ้นงาน (Bending group) การขึ้นรูปชิ้นงานโดยให้ความเค้นแบบคู่กับชิ้นงาน โดยด้านหนึ่งให้ความเค้นดึง อีกด้านหนึ่งให้ความเค้นอัด โดยจะพิจารณาในส่วนของ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากกว่าการเปลี่ยนแปลงความหนา ซึ่งจะประกอบด้วย Straight Flanging, Stretch Flanging, Shrink Flanging เป็นต้น

4. กลุ่มการขึ้นรูปแบบตัด (Cutting group) เป็นการแยกส่วนของโลหะที่ไม่ใช้งานออกจากชิ้นงาน โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ Chipless Forming เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงเฉือน เช่น การครอบปิง (Cropping) การเจาะ การปี้ม และ Chip Forming เป็นกระบวนการที่อาศัยการขึ้นรูปด้วยเครื่องมือ เช่น การหมุน การเจาะ การบด การเลื่อย เป็นต้น

ในการขึ้นรูปโลหะนั้นจะทำหลังจากการทำให้โลหะบริสุทธิ์ การผสมธาตุในโลหะ และกรรมวิธีทางความร้อนต่างๆที่ทำให้โลหะมีคุณสมบัติตามต้องการ เทคนิควิธีการขึ้นรูปโลหะได้แก่ การขึ้นรูปโลหะทางกล การหล่อ การทำโลหะผง การเชื่อม และการกลึงไส ส่วนใหญ่มักใช้อย่างน้อย 2 วิธี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้โลหะเป็นรูปร่างชิ้นงานพร้อมใช้งาน โดยการเลือกวิธีนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ อาทิ เช่น คุณสมบัติของโลหะ ขนาด รูปร่างของชิ้นงาน รวมไปถึงราคา โดยในงานวิจัยจะให้ความสนใจ เฉพาะการขึ้นรูปทางกล



รูปที่ 3.1 วิธีการขึ้นรูปแบบต่างๆ [4]

3.1.1 การขึ้นรูปทางกล

กระบวนการขึ้นรูปทางกล คือ การทำให้วัสดุหรือโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างชนิดถาวร (Plastic Deformation) เมื่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่าการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) จะเรียกกระบวนการนั้นว่า การขึ้นรูปร้อน ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปร่างวัสดุได้มากโดยการกระทำซ้ำหลายครั้งเพราะว่าวัสดุไม่แข็งแรงและเหนียว จึงใช้พลังงานในการเปลี่ยนรูปร่างน้อย

ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ และไม่เกิดการตกผลึกใหม่ขึ้นนั้น คือ การขึ้นรูปเย็น ซึ่งทำให้ความแข็งแรงเพิ่มสูงมากเนื่องจากความเครียดแต่กลับทำให้ความเหนียวลดลง โดยสามารถแบ่งการขึ้นรูปออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ

1. กระบวนการขึ้นรูปขนาดใหญ่ (Massive Forming Processes)
2. กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet-metal Forming Processes)

ตารางที่ 3.1 กระบวนการขึ้นรูปขนาดใหญ่ (Massive Forming Processes) [1]

Forging	Rolling	Extrusion	Drawing
Closed-die forging with flash	Sheet rolling	Nonlubricated hot extrusion	Drawing
Closed die forging without flash	Shape rolling	Lubricated direct hot extrusion	Drawing with rolls
Coining	Tube rolling	Hydrostatic extrusion	Ironing
Electro-upsetting	Ring rolling		Tube sinking
Forward extrusion forging	Rotary tube piercing		
Backward extrusion forging	Gear rolling		
Hobbing	Roll forging		
Isothermal forging	Cross rolling		
Nosing	Surface rolling		
Open-die forging	Shear forming (flow turning)		
Orbital forging	Tube reducing		
Power metal forging			
Radical forging			
Upsetting			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet-Metal Forming Processes) [1]

Bending and straight flanging	Surface contouring of sheet	Linear contouring	Deep recessing and flanging	Shallow recessing
Brake bending	Contour stretch forming (Stretch forming)	Linear stretch forming (Stretch forming)	Spining (and roller flanging)	Dimpling
Roll bending	Androforming	Linear roll forming (Roll forming)	Deep drawing	Drop hammer forming
	Age forming		Rubber pad forming	Electromagnetic forming
	Creep forming		Marform process	Explosive forming
	Die-quench forming		Rubber diaphragm hydroforming	Jogging
	Bulging			
	Vacuum forming			

3.1.2 กลศาสตร์การขึ้นรูป (Mechanics of drawing) [2, 4]

การขึ้นรูปเป็นการดำเนินการลดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานแท่งหรือท่อให้ลดลง โดยการดึงผ่านดายที่กำหนด โดยตัวแปรที่เป็นปัจจัยหลักในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุ คือ การลดลงของพื้นที่หน้าตัด มุมตาย สารหล่อลื่น และความเร็วในการขึ้นรูป

ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญสำหรับการขึ้นรูปวัสดุ นั้น คือ การทำนายแรงกระทำจากภายนอกที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป ซึ่งเป็นตัวช่วยในการเคลื่อนที่ของโลหะเหลวและการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งตัวแปรที่เป็นส่วนประกอบของแรงภายนอกนั้น จะประกอบด้วย ผลกระทบจากแรงเสียดทาน การเปลี่ยนรูปร่างแบบ Non-Homogeneous (คือ การเปลี่ยนรูปชิ้นงานโดยคำนึงถึงผลกระทบจากแรงเสียดทาน) และความเค้นแข็ง (Strain Hardening) ในขณะที่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะ [1]

ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะนั้น จะประกอบด้วยตัวแปรหลักหลายตัวที่ใช้ในการวิเคราะห์การทำงานของกระบวนการขึ้นรูปหลายตัว ดังนี้

- เพื่อแสดงความสัมพันธ์คิเนเมติก (เช่น รูปร่าง ความเร็ว อัตราความเครียดและความเค้น) ระหว่างชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านกระบวนการ (บิลเล็ต ตัวป้อน) กับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้ว ซึ่งจะสามารถทำนายการไหลของโลหะขณะที่ทำการขึ้นรูปได้
 - เพื่อแสดงขีดจำกัดการขึ้นรูป เช่น การคำนวณหาความน่าจะเป็นในการขึ้นรูปโดยไม่คำนึงถึงการแตกบริเวณผิวภายในและภายนอกของชิ้นงานของวัสดุที่นำมาขึ้นรูป
 - การทำนายความเค้น แรง และพลังงานที่จำเป็นต่อการขึ้นรูป ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการออกแบบเครื่องมือและการเลือกใช้เครื่องมือให้เหมาะสมกับลักษณะงาน
- มีหลายวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาในการขึ้นรูปชิ้นงาน ทั้งการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่ในทุกวิธีการนั้น ตัวแปรที่จำเป็นสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ คือ

- คุณสมบัติของวัสดุภายใต้เงื่อนไขของกระบวนการ เช่น ข้อมูลความเค้นไหล
- ค่าคุณสมบัติความเสียดทาน เช่น ตัวประกอบความเสียดทาน (m) หรือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ)

ซึ่งทั้งสองตัวแปรนี้ สามารถหาได้จากการทดลองและเป็นค่าที่ไม่แน่นอน โดยต่างกันตามกระบวนการขึ้นรูป และคุณสมบัติวัสดุที่ใช้

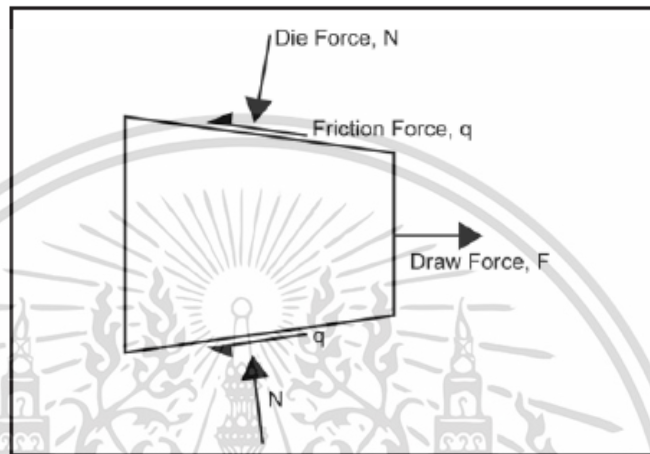
3.1.4 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป (Force in Drawing)

ในการสังเกตศึกษาขนาดแรงและกำลังที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการดึงขึ้นรูปโลหะนั้น สามารถวิเคราะห์หาได้โดยใช้การดึงในแนวแกนนอน เงื่อนไขในการทำให้เกิดการเปลี่ยนรูป หรือมากกว่านั้นสามารถหาได้จากแรงต้านที่เกิดกับผิวของด้าย

ในการขึ้นรูปวัสดุจะมีเกิดแรงที่มากกระทำกับชิ้นงานในทิศทางต่างๆ สามารถเขียนแผนภาพการแตกแรงได้ดังรูปที่ 3.2 ให้แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป (Draw Force) คือ F แสดงแรงที่เกิดขึ้นทั้งหมด คือ แรงขณะชิ้นงานผ่านด้าย แรงเสียดทานระหว่างด้าย (q) และชิ้นงาน (N) แต่เนื่องจากวัสดุบางชนิดแรงดึงขึ้นรูปนั้นมีขีดจำกัด จึงต้องอาศัยปัจจัยภายนอกด้ายในการนำมาประกอบการพิจารณาด้วย อีกตัวแปรที่สำคัญ คือ ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) จะเป็นตัวแปรที่กำหนดความเค้นขึ้นรูป (σ_d) ที่มีค่าสูงที่สุด ที่สามารถขึ้นรูปได้ โดยวัสดุส่วนใหญ่จำมีค่าความเค้นดึงจะมีค่าไม่เกิน 60 เปอร์เซ็นต์ของความเค้นจุดคราก และสามารถคำนวณพื้นฐานได้จากแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ผิวหน้าตัดของชิ้นงาน แสดงดังสมการที่ 3.1

$$\sigma_d = \frac{F_d}{A} \quad (3.1)$$

โดย σ_d คือ ความเค้นขึ้นรูป
 F_d คือ แรงดึงขึ้นรูป
 A คือ พื้นที่ผิวหน้าตัดของชิ้นงาน



รูปที่ 3.2 แผนภาพการแตกแรงของแรงชนิดต่างๆ ขณะขึ้นรูปชิ้นงาน

ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญสำหรับการขึ้นรูปวัสดุนั้น คือ การทำนายแรงกระทำจากภายนอกที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป ซึ่งเป็นตัวช่วยในการเคลื่อนที่ของโลหะเหลวและการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งตัวแปรที่เป็นส่วนประกอบของแรงภายนอกนั้น จะประกอบด้วย ผลกระทบจากแรงเสียดทาน การเปลี่ยนรูปร่างแบบ Non-homogeneous (คือ การเปลี่ยนรูปร่างงานโดยคำนึงถึงผลกระทบจากแรงเสียดทาน) และความเค้นแข็ง (Strain Hardening) ในขณะที่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร

3.1.4.1 การเปลี่ยนรูปในอุดมคติ (Ideal Deformation)

สำหรับชิ้นงานที่เป็นท่อหรือเส้น จะกำหนดความเค้นขึ้นรูป (σ_d) ให้เป็นแบบอุดมคติ คือ ไม่มีแรงเสียดทานมากกระทำหรือไม่เกิดงานซ้ำซ้อน (Redundant Work) จะกำหนดลักษณะเดียวกันนี้ในงานดึงขึ้นรูปเช่นเดียวกัน โดยความเค้นขึ้นรูปในอุดมคติสามารถหาได้จากสมการที่ 3.2

$$\sigma_d = Y \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) \quad (3.2)$$

โดย σ_d คือ ความเค้นขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Y	คือ	ความเค้นจุดคราก
A_0	คือ	พื้นที่หน้าตัดก่อนการทดลอง
A_f	คือ	พื้นที่หน้าตัดหลังการทดลอง

สำหรับวัสดุที่เป็น Strain-Hardening ค่า Y สามารถใช้เป็นค่าเฉลี่ยความเค้นไหล (Average Flow Stress), \bar{Y} ในช่วงการเปลี่ยนรูป (Deformation Zone) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.3

$$\bar{Y} = \frac{K \epsilon^n}{n+1} \quad (3.3)$$

โดย	\bar{Y}	คือ	ค่าเฉลี่ยความเค้นไหล
	K	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็ง (Strength Coefficient)
	ϵ	คือ	ความเครียด
	n	คือ	Strain Hardening Exponent

ซึ่งจากสมการที่ 3.2 และ 3.3 สามารถนำไปหาแรงในการดึงขึ้นรูปในอุดมคติ ได้จากสมการที่

3.4

$$F = \bar{Y} A_f \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) \quad (3.4)$$

โดย	F	คือ	แรงในการดึงขึ้นรูปอุดมคติ
	\bar{Y}	คือ	ค่าเฉลี่ยความเค้นไหล
	A_0	คือ	พื้นที่หน้าตัดก่อนการทดลอง
	A_f	คือ	พื้นที่หน้าตัดหลังการทดลอง

3.1.4.2 ชนิดของแรง (Types of Loads)

แรงที่กระทำต่อวัสดุหรือส่วนของโครงสร้างใดๆ ก็ตามสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

1. แรงที่อยู่นิ่ง (Static Load) เป็นแรงที่กระทำต่อชิ้นส่วนของโครงสร้างอย่างช้าๆ จนกระทั่งมีค่าถึงค่าหนึ่ง แล้วจะมีค่าคงที่อยู่ตลอดไปหรือเกือบเท่ากับค่านั้นตลอด เช่น แรงที่กระทำบนอาคารต่างๆ แรงเนื่องจากความดันภายในหม้อความดันที่กระทำต่อรอยเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แรงที่กระทำซ้ำๆ (Repeated Load) คือ แรงหรือน้ำหนักที่กระทำต่อโครงสร้างหรือวัสดุหลายๆครั้งซ้อนกัน และสลับกันไปมาในช่วงเวลาหนึ่ง เช่น แรงกระทำต่อข้อเหวี่ยงเครื่องยนต์ เพลารถไฟ ก้านสูบของเครื่องอัดอากาศ เป็นต้น

3. แรงกระแทก (Impact Load) เป็นแรงที่กระทำต่อชิ้นส่วนในระยะเวลายันสั้น โดยปกติแล้วไม่สามารถที่จะหาระยะเวลาที่แรงกระแทกนี้กระทำได้ล่วงหน้า เช่น การปล่อยน้ำหนักกระแทกบนส่วนโครงสร้าง แรงกระแทกที่เกิดจากรถยนต์วิ่งข้ามสะพาน เป็นต้น

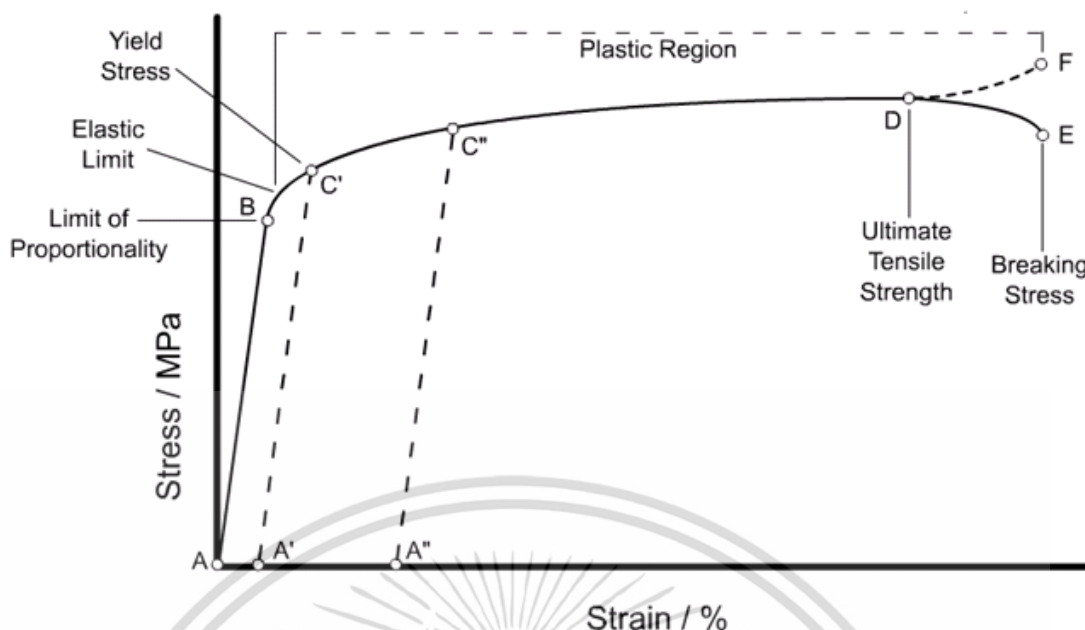
3.2 คุณสมบัติเชิงกลที่หาได้จากการทดสอบการดึงและแผนภาพความเค้น-ความเครียด [10, 22, 38]

การทดสอบแรงดึง เป็นการทดสอบพื้นฐานทางวิศวกรรมเพื่อศึกษาความแข็งแรงของวัสดุ เมื่อได้รับแรงดึงในทิศทางเดียว (Uniaxial tensile test) โดยในการทดสอบจะเป็นการใช้แรงดึงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ โดยจะดึงชิ้นงานให้ยืดออกและขาดในที่สุด โดยค่าสมบัติเชิงกลที่สนใจคือ ความแข็งแรงจุดคราก (Yield strength), ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength, UTS) และระยะยืด (Elongation Percentage) โดยส่วนใหญ่แล้ว จะทดสอบกับวัสดุเหนียวมากกว่าวัสดุเปราะ

3.2.1 การเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นและการเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก (Elastic and Plastic Deformation)

3.2.1.1 การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวยังคงกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ แสดงดังรูปที่ 3.3 ในช่วง B ถึง C'

3.2.1.2 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม ความสามารถของโลหะที่เกิดการผิดรูปในช่วงพลาสติกโดยไม่เกิดการแตกหักเป็นคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่มีประโยชน์ของโลหะ เช่น ความสามารถผิดรูปยืดหยุ่นได้ในขนาดที่มากของเหล็กกล้าทำให้สามารถอัดขึ้นรูปชิ้นส่วนต่างๆของรถยนต์ เช่น กันชน ฝากระโปรงและประตูโดยไม่เกิดการแตกหัก แสดงดังรูปที่ 3.3 ในช่วง B ถึง F



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

3.2.2 ความเค้นวิศวกรรม (Engineering Stress) [37, 38]

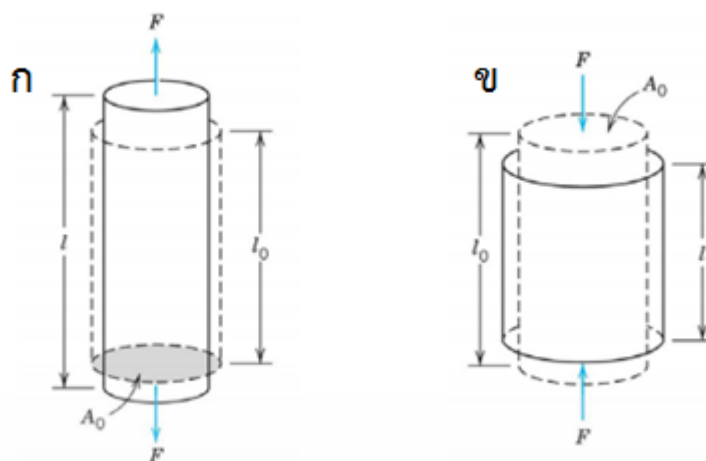
คือ ความเข้มของแรงภายในเทหะวัตถุหรือองค์ประกอบของแรงซึ่งกระทำต่อระนาบผ่านจุดใดจุดหนึ่ง ความเค้นสามารถนิยามได้ว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น

3.2.2.1 ความเค้นรวม (Nominal Stress) คือ ความเค้น ณ จุดที่คำนวณบนพื้นที่หน้าตัดรวมโดยทฤษฎีความยืดหยุ่น โดยไม่ได้คำนึงถึงผลของความเค้นที่เกิดจากความไม่ต่อเนื่องระหว่าง เนื้อสัมผัสภายในวัตถุนั้น ๆ เช่น รูหรือภายใน รอยบาก เป็นต้น

3.2.2.2 ความเค้นปกติ (Normal Stress) คือ องค์ประกอบความเค้นที่ตั้งฉากกับระนาบซึ่งแรงกระทำอยู่ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

3.2.2.2.1 ความเค้นดึง (Tensile Stress) เป็นความเค้นปกติเนื่องจากแรงกระทำในทิศทางที่พุ่งออกจากระนาบที่แรงกระทำอยู่ โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ความเค้นดึงจะให้เครื่องหมายแสดงเป็นบวก

3.2.2.2.2 ความเค้นกด (Compressive Stress) เป็นความเค้นปกติเนื่องจากแรงกระทำในทิศทางที่พุ่งเข้าหาระนาบที่แรงกระทำอยู่ เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ความเค้นอัดจะให้เครื่องหมายแสดงเป็นลบ



รูปที่ 3.4 ทิศทางแรงกระทำกับชิ้นงานชนิด ก) แรงดึง ข) แรงกด

3.2.2.2.3 ความเค้นเฉือน (Shear Stress) เป็นองค์ประกอบความเค้นในแนวสัมผัสกับระนาบซึ่งแรงนั้นกระทำอยู่ ซึ่งเป็นแรงภายนอกที่มากระทำต่อวัตถุนั้น โดยพยายามทำให้วัตถุเกิดการขาดจากกันตามแนวระนาบที่ขนานกับทิศทางของแรงนั้น

3.2.2.2.4 ความเค้นบิด (Torsion Stress) เป็นความเค้นเฉือนบนภาคตัดขวางซึ่งเป็นผลมาจากการบิด



รูปที่ 3.5 ทิศทางแรงกระทำกับชิ้นงานชนิด ก) แรงเฉือน ข) แรงบิด

3.2.2.2.5 ความเค้นจริง (True Stress) เป็นความเค้นในแนวแกน (ความเค้นดึงหรือความเค้นกด) ที่คำนวณโดยอาศัยพื้นที่หน้าตัด ณ เวลาปัจจุบันแทนที่จะคำนวณโดยใช้พื้นที่หน้าตัด ณ เวลาเริ่มต้น

3.2.2.2.6 ความเค้นแตกหัก (fracture Stress) เป็นความเค้นจริงบนพื้นที่หน้าตัดที่น้อยที่สุดที่วัตถุกำลังจะเริ่มแตกหัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณแรงเค้นจะขึ้นอยู่กับหน้าตัด (cross-section) เริ่มต้นของชิ้นทดสอบ ในการทดสอบแรงดึงและแรงอัด ชิ้นทดสอบจะรับแรงที่กระจายตัวในแบบเดียวกัน โดยแรงเค้นคำนวณได้จากน้ำหนักที่วัดได้หารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นน้อยสุด ดังสมการที่ 3.5

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3.5)$$

เมื่อ	σ	คือ	แรงเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นทดสอบ (lb/in.2 หรือ MPa)
	F	คือ	น้ำหนักหรือแรงที่ให้กับชิ้นทดสอบ (lb หรือ N)
	A_0	คือ	พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (in.2 หรือ mm ²)

3.2.3 ความเครียดวิศวกรรม (Engineering Strain) [37, 38]

คือ การเปลี่ยนแปลงต่อหน่วยในด้านของขนาดหรือรูปร่างของวัตถุอันเนื่องมาจากแรงเมื่อเทียบกับขนาดหรือรูปร่างดั้งเดิม ความเครียดเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย (Non - Dimensional Unit) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

3.2.3.1 ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) คือการเปลี่ยนแปลงต่อหน่วยความยาวอันเนื่องมาจากแรงในมิติเชิงเส้นเดียวกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น

3.2.3.1.1 ความเครียดดึง (Tensile Strain) คือ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อท่อนวัตถุถูกกระทำด้วยแรงดึงตามแนวแกน และเพิ่มแรงดึงขึ้นอย่างช้าๆ วัตถุจะเกิดการยืดออกทีละน้อยตามขนาดของแรงดึงที่เพิ่มขึ้น ทำให้ท่อนวัตถุยืดออก ในขณะที่ท่อนวัตถุยืดออกก็จะเกิดการหดตามแนวตั้งของท่อนวัตถุด้วย

3.2.3.1.2 ความเครียดกด (Compressive Strain) คือ การเปลี่ยนแปลงเมื่อท่อนวัตถุถูกกระทำด้วยแรงกดตามแนวแกน และเพิ่มแรงกดขึ้นอย่างช้าๆ จนทำให้ท่อนวัตถุหดตัวลง

3.2.3.2 ความเครียดแนวแกน (Axial Strain) เป็นความเครียดเชิงเส้นในระนาบซึ่งขนานกับแนวแกนยาวของชิ้นงานตัวอย่างนั้น

3.2.3.3 ความเครียดแนวขวาง (Transverse Strain) เป็นความเครียดเชิงเส้นในระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแกนยาวของชิ้นงานตัวอย่างนั้น

3.2.3.4 ความเครียดเฉือน หรือ ความเครียดเชิงมุม (Shear Strain หรือ Angular Strain, γ) คือการเปลี่ยนแปลงระหว่างเส้น 2 เส้นซึ่งตอนแรกตั้งฉากซึ่งกันและกัน เมื่อมีแรงเฉือนกระทำ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเกิดความเครียดขึ้นมา ความเครียดที่เกิดขึ้นเรียกว่า ความเครียดเฉือน

3.2.3.5 ความเครียดจริง (True Strain) เป็นอัตราส่วนของความยาว ณ ตำแหน่งที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใดๆ ในสเกลลอการิทึมธรรมชาติ (ln) ต่อความยาวเริ่มต้น

ความเครียดซึ่งเกิดจากการกระทำของแรงดึงในแนวแกนบนตัวอย่างโลหะ ซึ่งคำนวณได้โดยการวัดอัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเริ่มต้น ดังสมการที่ 3.6

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ	ϵ	คือ	ความเครียด
	Δl	คือ	ความยาวที่เปลี่ยนไป หรือ ระยะยืด
	l_0	คือ	ความยาวของระยะทดสอบ (gauge length) เริ่มต้น

3.2.4 โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

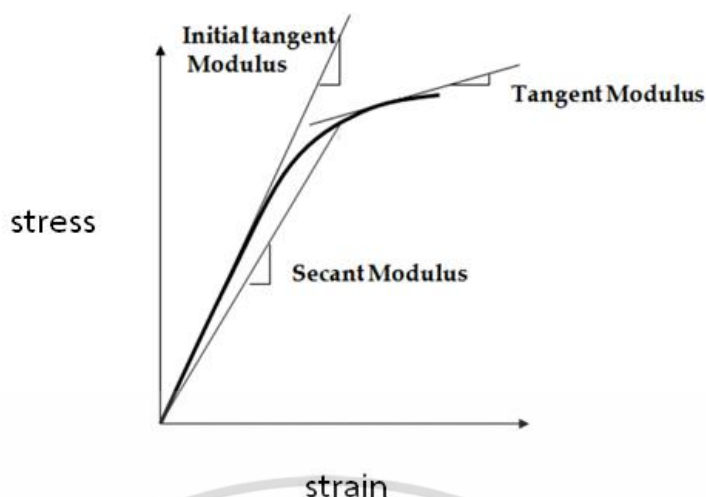
คือ อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดที่ ณ ตำแหน่งเดียวกันซึ่งต่ำกว่าขีดจำกัดเชิงอัตราส่วน (Proportional limit) สำหรับวัสดุบางชนิดที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นเส้นโค้งแทนที่จะเป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น

3.2.4.1 โมดูลัสสัมผัสเริ่มต้น (Initial Tangent Modulus) เป็นความชันสัมผัสของเส้นโค้งความเค้นและความเครียด ณ จุดเริ่มต้น

3.2.4.2 โมดูลัสสัมผัส (Tangent Modulus) เป็นความชันสัมผัสของเส้นโค้งความเค้นและความเครียด ณ ตำแหน่งใดๆ ที่ทำการศึกษาอยู่

3.2.4.3 โมดูลัสซีแคน (Secant Modulus) เป็นความชันของเส้นโค้งความเค้นและความเครียด คำนวณจากจุดเริ่มต้นถึงจุดใดๆ บนเส้นโค้งความเค้นและความเครียดนั้นๆ

3.2.4.4 โมดูลัสคอร์ด (Cord Modulus) เป็นความชันของเส้นโค้งความเค้นและความเครียด ซึ่งลากระหว่างจุดใดๆ สองจุด



รูปที่ 3.6 การนิยามวิธีการหาโมดูลัสแบบต่างๆ จากกราฟของความเค้นและความเครียดแบบไม่เป็นเส้นตรง

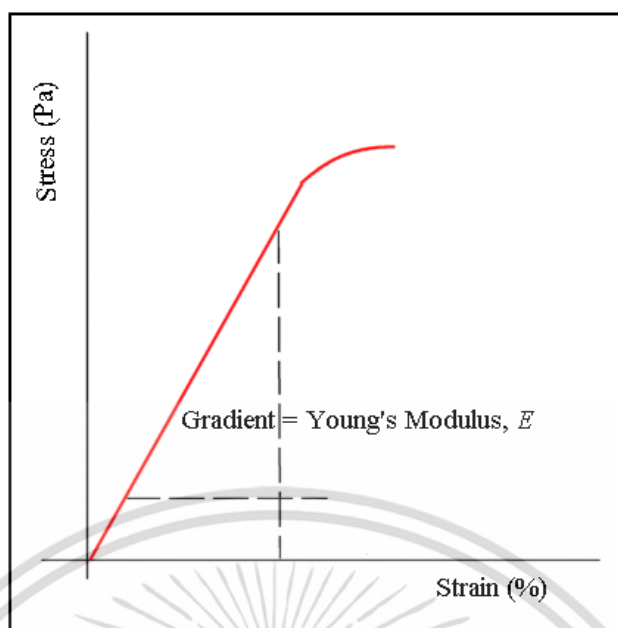
โดยระดับการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างหนึ่งนั้น จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของแรงกระทำที่กระทำต่อระบบ โดยความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงซึ่งกันและตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.7

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/A_0}{\Delta l/l_0} \quad (3.7)$$

เมื่อ	E	คือ	โมดูลัสความยืดหยุ่น
	σ	คือ	ความเค้น
	ϵ	คือ	ความเครียด
	F	คือ	น้ำหนักหรือแรงที่ให้กับชิ้นทดสอบ (lb หรือ N)
	A_0	คือ	พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (in.2 หรือ mm ²)
	Δl	คือ	ความยาวที่เปลี่ยนไป หรือ ระยะยืด
	l_0	คือ	ความยาวของระยะทดสอบ (gauge length) เริ่มต้น

หรือเรียกว่า กฎของฮุก (Hooke's Law) และค่าคงที่ของการแปรผัน E เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) หรือ โมดูลัสของยัง (Young's Modulus) ซึ่งสามารถหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการทดลองดังได้อีกด้วย แสดงดังรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

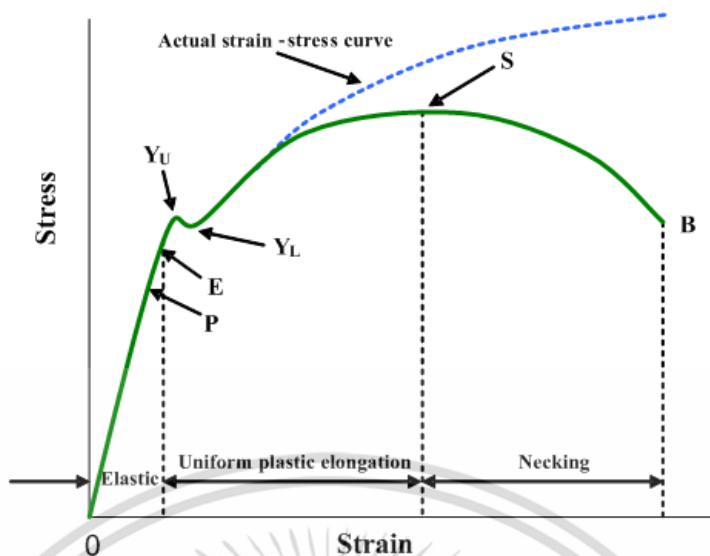


รูปที่ 3.7 กราฟแสดงค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด

โดยค่ามอดุลัสนี้อาจถูกพิจารณาว่าเป็นค่าที่บอกถึง ความแข็งตึง (Stiffness) ของวัสดุในการที่จะต้านทานต่อการผิดรูปแบบยืดหยุ่น คือ ยิ่งค่ามอดุลัสมากเท่าไร วัสดุก็มีการผิดรูปน้อยเท่านั้น

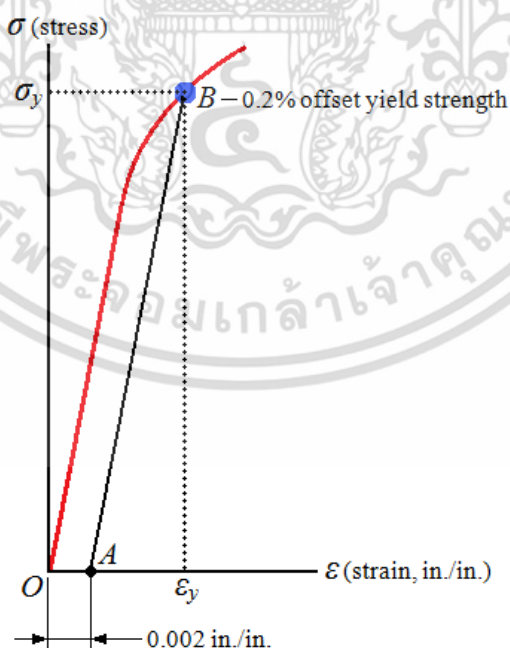
3.2.5 ความเค้น ณ จุดคราก (Yield Strength)

ความเค้น ณ จุดครากมีความสำคัญมากในการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรม เนื่องจากว่า เป็นค่าความแข็งแรงที่ซึ่งโลหะแสดงนัยสำคัญของการเสียรูปแบบคงรูป โดยค่าความเค้น ณ จุดคราก สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน บนแผนภาพความเค้น-ความเครียดของเหล็กกล้า ณ จุด Y_u แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด สำหรับเหล็กกล้าละมุน (Mild Steel)
จุด Y_u แสดงถึง Yield Strength point

โดยทั่วไปแล้ว จะกำหนดค่าความแข็งแรงจุดคราก (Yield Strength) ไว้ที่จุดตัดระหว่างเส้นที่ลากขนานกับส่วนที่เป็นเส้นของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด โดยเริ่มที่ 0.02% แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แสดงการหาค่า 0.2% offset Yield Strength

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า 0.2% Yield Strength อาจจะเรียกว่า 0.2% offset Yield Strength ซึ่งหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด โดยลากเส้นจากจุดที่มีความเครียด 0.002 in/in (m/m) ขนานไปกับส่วนที่แสดงการคืนรูป (ช่วงที่เป็นเส้นตรง) และตัดกับส่วนที่พ้นจากช่วงคืนรูปของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด หลังได้จุดตัดนี้ ลากเส้นในแนวระดับไปตัดในแนวแกนความเค้น

3.2.6 ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)

เป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดในเส้นโค้งของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แสดงดังรูปที่ 3.8 บนจุด S เมื่อเลยจุดนี้แล้ว ความเค้นจะมีค่าลดลง เนื่องจากในการคำนวณค่าความเค้นนั้นใช้พื้นที่หน้าตัดเดิมของชิ้นทดสอบ แต่ตามความเป็นจริงแล้ว เมื่อเลยจุดความเค้นสูงสุดในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ความเค้นจะยังคงเพิ่มขึ้น ถ้าคิดความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดจริงๆของชิ้นทดสอบ เนื่องจากช่วงนี้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบจะลดลง (Necking) จนกระทั่งขาด ดังนั้น ความเค้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนกระทั่งขาด โดยปกติแล้วค่านี้ไม่ค่อยใช้มากในงานออกแบบทางวิศวกรรมก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพวกโลหะอ่อน (ductile alloy) เนื่องจากมีการการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรขึ้น อย่างมากก่อนถึงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดนี้ ยังสามารถบ่งชี้ได้ว่าโลหะนั้นมีความสมบูรณ์หรือไม่ถ้าโลหะนั้นไม่สมบูรณ์ เช่น มีรูพรุน (Porosity) จะทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง

3.2.7 ความเหนียว (Ductility)

เป็นสมบัติเชิงกลอีกชนิดหนึ่ง ที่บ่งบอกถึงระดับปริมาณของการแปรรูปถาวรที่จะเกิดขึ้นได้ก่อนที่วัสดุนั้นจะแตกหัก โดยสมบัติด้านความเหนียวสามารถระบุเป็นปริมาณตัวเลขด้วยค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent Elongation) เมื่อชิ้นงานได้รับแรงดึงเป็นเหตุให้เกิดการยืดออกในทิศทางของแรงนั้น การเคลื่อนนี้เรียกว่าความเครียด (strain) โดยนิยามความเครียดเป็นการยืดอันเนื่องจากแรงดึงทางเดียวที่กระทำกับชิ้นงาน ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นงานในทิศทางของแรงนั้นเทียบกับความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน ดังนั้นก่อนทำการทดสอบต้องวัดพื้นที่หน้าตัดและระยะทดสอบเริ่มต้นของชิ้นงาน โดยระยะทดสอบเริ่มต้นจะทำการเป็นเครื่องหมายสองจุดบนชิ้นงาน อุปกรณ์วัดการยืดหรือความเครียดจะใช้ในการวัดระยะยืดของชิ้นงานในระหว่างการทดสอบ หรืออาจวัดจากผลต่างของระยะห่างของสองจุดข้างต้น ผลต่างระหว่างระยะทดสอบเริ่มต้นกับสุดท้ายเรียกว่าระยะยืด (elongation) และถ้านำค่าระยะยืดหารด้วยระยะทดสอบเริ่มต้นเรียกว่าความเครียด ดังนั้นความเครียดของชิ้นงาน แสดงดังสมการที่ 3.8

$$\% \text{ Elongation} = \frac{l_f - l_o}{l_o} \times 100 \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ l_0 คือ ความยาวเกจเริ่มต้น
 l_f คือ ความยาวเกจหลังขึ้นงานแตกหัก

จุดคอคอด (Necking) คือ local phenomena เมื่อทำการวัดค่าความแตกต่างของความยาวเกจที่กำหนดไว้ก่อนและหลังดึงขึ้นงาน พบว่า ความยาวเกจจะลดลง เมื่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มขึ้น เพราะเนื่องจาก ระยะเกจที่ทำการมาร์คไว้ใกล้กับบริเวณที่เกิดคอคอด แต่อย่างไรก็ตาม กราฟของเปอร์เซ็นต์การยืดตัวจะไม่เข้าใกล้ศูนย์ เพราะขึ้นงานได้เกิดการยืดตัวอย่างถาวรแล้วก่อนที่จะเกิดการแตกหัก

ในการวัดหาคุณสมบัติความเหนียวของขึ้นงานสามารถหาได้จากสมการร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (Percent reduction in area) ดังสมการที่ 3.9

$$\% \text{ Reduction Area} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \quad (3.9)$$

เมื่อ A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น
 A_f คือ พื้นที่หน้าตัดหลังขึ้นงานแตกหัก

โดยทั่วไปแล้ว ช่วงการยืดตัวของวัสดุจะอยู่ระหว่าง 10 เปอร์เซ็นต์ ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ โดยในวัสดุประเภทโลหะจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ส่วนวัสดุจำพวกพลาสติก จะมีค่าความเหนียวที่สูงมาก ในทางกลับกัน สำหรับวัสดุเปราะ จะมีค่าความเหนียวที่ต่ำมาก หรืออาจไม่สามารถหาค่าได้เลย

ในงานวิจัย ได้กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังดึงไว้แล้วตามขนาดของตาย โดยให้มีค่าร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20, 35 และ 50

3.3 ลักษณะผิว (Surface Texture) [40, 41]

ในการผลิตขึ้นงานในแต่ละขั้นนั้น ลักษณะคุณภาพผิวมีความสำคัญต่อการใช้งานมากขึ้นตามลำดับ โดยใช้เหตุผลของคุณภาพสูงสุดและความน่าเชื่อถือสูงสุดของผลิตภัณฑ์เมื่อนำไปใช้งาน และค่าพิคต์ความเผื่อ (Tolerances) ที่ถูกบังคับให้มีค่าน้อยลงเรื่อยๆ ผลของความเรียบของผิวงานสำเร็จเริ่มถูกคำนึงถึงว่ามีส่วนสำคัญเช่นกัน โดยค่าความเรียบผิว (Surface Roughness) จะมีผลหรือสามารถวิเคราะห์หาผลของกรรมวิธีการผลิตได้ เช่น การควบคุมสภาพแวดล้อม ผลของประสิทธิภาพการทำงาน ความเหมาะสมของขบวนการผลิตที่จะทำให้สภาพแวดล้อมการผลิตเหมาะสมต่องานขนาดจริงแท้จริงของขึ้นงาน หลังจากขึ้นงานผ่านการใช้งานไประยะเวลาหนึ่งค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเรียบผิวที่เหมาะสม ค่าคุณสมบัติของผิว (Surface Parameter) และวิธีการผลิตที่ถูกต้องจะทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงหรือไม่สูงเกินไป จากการออกแบบขั้นตอนการผลิตที่เหมาะสมถูกต้อง เนื่องจากการมีความเข้าใจอย่างถูกต้องต่อรูปทรงแบบต่างๆ ของคุณสมบัติของผิว วิธีการวัดและวิเคราะห์ผิวจะทำให้ผู้ออกแบบสามารถเลือกกำหนดค่าและวิธีการวัดความหยาบที่เหมาะสม ซึ่งไม่เพียงแต่จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพแต่จะทำให้เกิดขบวนการผลิตที่เหมาะสมและต้นทุนการผลิตที่ถูกต้อง

3.3.1 ความผิดพลาดในการผลิต

ในการผลิตเราสามารถจำแนกลักษณะความผิดพลาดในการผลิตพื้นผิวได้ 3 แบบคือ

- ความผิดพลาดด้านขนาด และรูปร่าง (Size and Form Error)
- ความเป็นคลื่น (Waviness)
- ความหยาบของพื้นผิว (Surface Roughness)

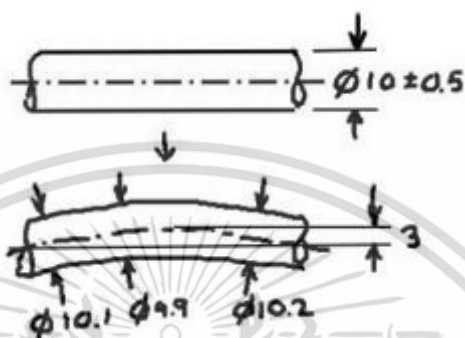


รูปที่ 3.10 ลักษณะความผิดพลาดในการผลิตพื้นผิว

3.3.1.1 ความผิดพลาดของขนาดและรูปร่าง (Size and Form Error) เป็นความผิดพลาดที่มีผลต่อการใช้งานโดยรวมของชิ้นงาน เช่น การสวมเพลลาเข้ากับตลับลูกปืน ถ้าต้องการให้ใส่ได้ง่ายก็ต้องกำหนดให้ขนาดของเพลลาเล็กกว่า แต่ถ้าต้องการลดการเสียดสีก็ต้องให้เพลลาใหญ่กว่า แหวนในของตลับลูกปืนเล็กน้อยแล้วใช้การสวมอัด การทำดังนี้จะทำให้เพลลาและแหวนในของตลับลูกปืนหมุนไปด้วยกันและไม่เกิดการเสียดสีความผิดพลาดแบบนี้สามารถวัดเพื่อการตรวจสอบได้ง่ายโดยใช้เครื่องมือพื้นฐาน เช่น เวอร์เนีย ในการกำหนดค่าความผิดพลาดของรูปร่างที่ยอมรับได้สำหรับชิ้นงานหลายๆชิ้นที่ต้องประกอบเข้าด้วยกัน จะสามารถทำได้โดยใช้มาตรฐานของ ISO ในเรื่องของความพอดีในการสวมใส่และพิถีพิถันของขนาด (Fits and Tolerance) และในเรื่องของพิถี

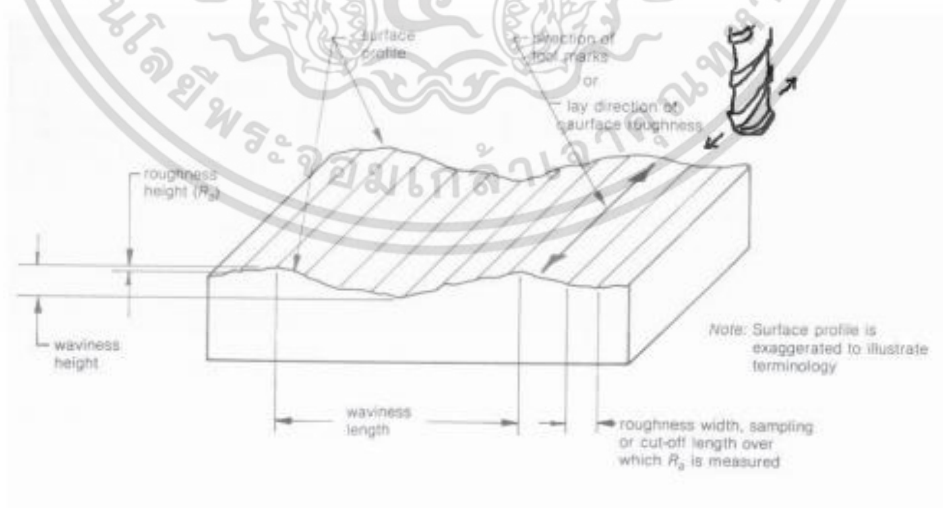
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเผื่อของรูปทรง (Geometric Tolerance) ในรูปที่ 3.11 จากในรูปจะเห็นว่าเราถ้าต้องการชิ้นงานทรงกระบอก แต่เมื่อผลิตชิ้นงานทรงกระบอกนั้นจะไม่สามารถทำให้เป็นทรงกระบอกได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์การผลิตจะต้องมีความผิดพลาดได้บ้าง ความผิดพลาดของรูปทรงที่ได้จริงที่แตกต่างไปจากรูปทรงกระบอกที่ต้องการนั้นเราเรียกว่า ความผิดพลาดของรูปร่าง ในกรณีทั่วไปเราจะกำหนดเฉพาะพิสัยของความเผื่อของขนาดเท่านั้น



รูปที่ 3.11 ลักษณะความผิดพลาดของขนาดและรูปร่าง

3.3.1.2 ความเป็นคลื่น (Waviness) เป็นความผิดพลาดที่ความยาวคลื่นมากบนพื้นผิวของชิ้นงาน ความเป็นคลื่นมักมีความสม่ำเสมอ อาจเกิดจากการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตซึ่งทำให้เกิดความสม่ำเสมอนี้ ซึ่งรูปที่ 3.11 เป็นรูปขยายของชิ้นงานในรูปที่ 3.12 ความเป็นคลื่นนั้นวัดได้ค่อนข้างยาก และจะแบ่งแยกออกจากความผิดพลาดด้านรูปร่างได้ยากด้วย



รูปที่ 3.12 ลักษณะความผิดพลาดแบบเป็นคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

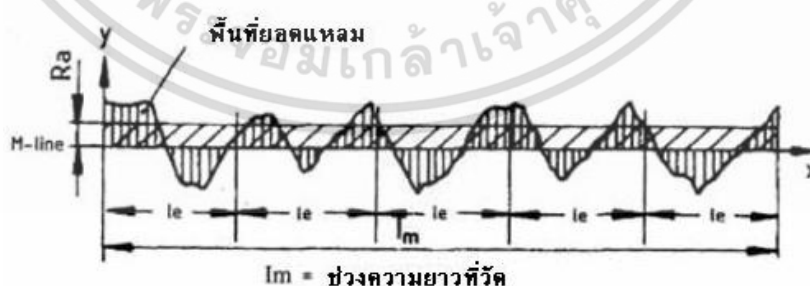
3.3.1.3 ความหยาบของผิว (Surface Roughness) เป็นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการผลิตแบบหนึ่ง ความหยาบเกิดขึ้นจากรูปร่างของวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานและกรรมวิธีการขึ้นรูป สำหรับการวัดความหยาบ เราจะวัดลักษณะที่เกิดจากความขรุขระของพื้นผิวที่ความยาวคลื่นน้อย ดังนั้นในการวัดเราจะต้องจำกัดระยะในการวัดให้ต่ำ ลักษณะความเป็นคลื่นระยะนี้เรียกว่า cut-off length ดังแสดงในรูปที่ 3.33 cut-off length มีค่ามาตรฐานที่ใช้กันมากคือ 0.25 มิลลิเมตร, 0.8 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร ความหยาบของพื้นผิวมีความสำคัญต่อการใช้งานหลายๆอย่าง เช่น แรงเสียดทานระหว่างพื้นผิว การสึกหรอจากการเสียดสี ความสวยงาม ความรู้สึกในการสัมผัส และความสามารถในการป้องกันการรั่วซึม เป็นต้น

3.3.2 ประเภทการวัดความหยาบผิว [41]

ในการวัดความหยาบผิวจะใช้เครื่องวัดความหยาบผิว ซึ่งปัจจุบันมีหลายแบบหลายยี่ห้อให้เลือก แต่ที่มีการวัดค่าความหยาบผิวนั้น แบ่งเป็น 2 กลุ่ม

3.3.2.1 การวัดความหยาบผิวโดยเฉลี่ย คือ อาศัยการวัดแล้วคำนวณค่าความหยาบผิวออกมาเป็นค่าความหยาบผิวเฉลี่ย ซึ่งจะทำให้เรารู้ระดับความหยาบโดยรวมแต่ไม่สามารถรู้ลักษณะความคลาด เคลื่อนสูงต่ำของความหยาบ วิธีการกลุ่มนี้ได้แก่ Ra Rku Rq และ Rsk

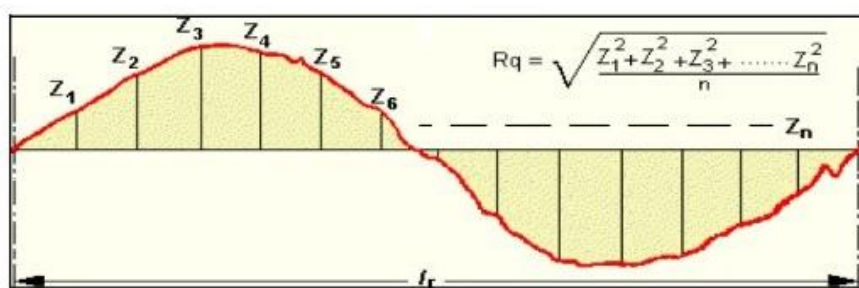
3.3.2.1.1 ความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness Average, Ra) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวด้วยค่าเฉลี่ยทางเลขคณิตของผิวที่วัด ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้กันมากที่สุด และหลายมาตรฐาน มักอ้างอิงค่านี้ในการกำหนดมาตรฐานความหยาบผิว การหาค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิตได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง (M-Line) กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลางหารด้วยความยาวเฉลี่ย (Lm) โดยที่ค่าของ Ra มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร (μm)



รูปที่ 3.13 การวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต

3.3.2.1.2 ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (Roughness Root Mean Square, Rq) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวด้วยรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของผิวที่วัด

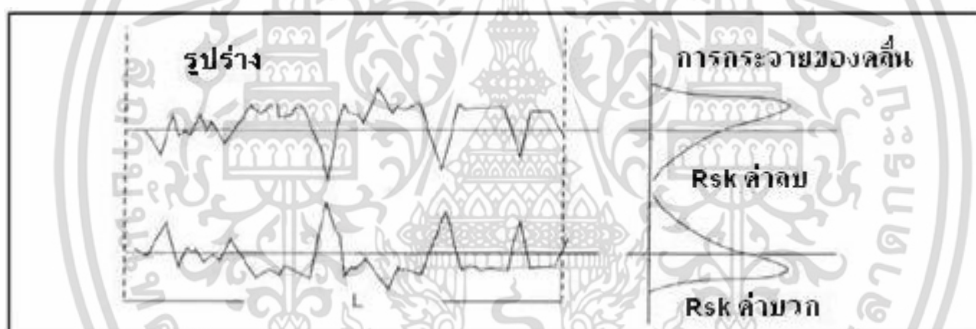
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 การวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง

3.3.2.1.3 ความหยาบผิวเฉลี่ยปริมาณ (Roughness Skewness, Rsk)

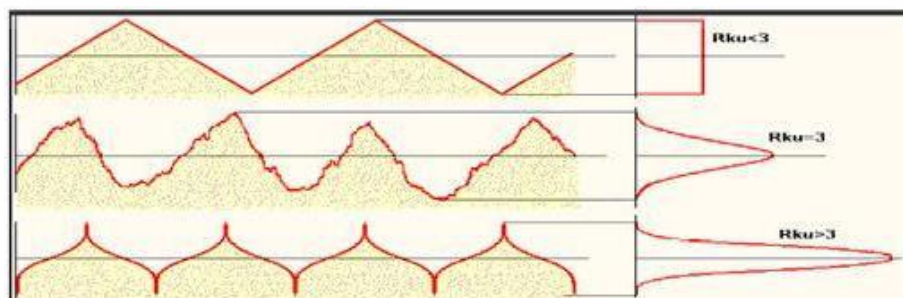
เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยการวัดปริมาณของยอดและหลุม โดยปริมาณของยอดให้เป็นค่าบวก ส่วนปริมาณของหลุมให้เป็นค่าลบ หากค่าใดมีมากก็แสดงให้เห็นถึงการมียอดหรือหลุมมากนั่นเอง



รูปที่ 3.15 การวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยปริมาณ

3.3.2.1.4 ความหยาบผิวเฉลี่ยรูปร่าง (Roughness Kurtosis, Rku)

เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยแสดงให้เห็นถึงลักษณะรูปร่างของยอดผิว ว่ามีลักษณะยอดโค้ง ยอดแหลม หรือยอดเรียบ

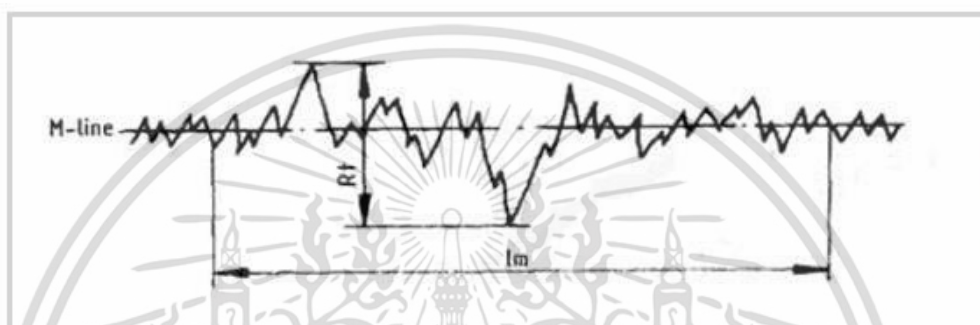


รูปที่ 3.16 การวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยรูปร่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

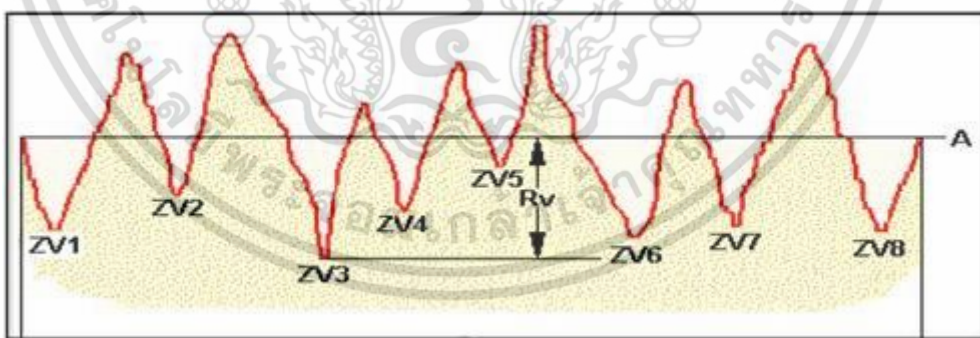
3.3.2.2 การวัดความหยาบผิวโดยขนาด (Amplitude Parameter) คือ อาศัยการวัดค่าสูงต่ำของขนาดความหยาบของพื้นผิว ซึ่งจะทำให้เรารู้รูปลักษณะของความหยาบได้ชัดเจนกว่าวิธีการกลุ่มนี้ได้แก่ R_p R_t R_v และ R_z

3.3.2.2.1 ความหยาบผิวขนาดโดยรวม (Roughness Total Height, R_t , R_y) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยวัดขนาดความห่างระหว่างยอดสูงสุดถึงหลุมลึกที่สุดของผิว ค่านี้มีประโยชน์มากตรงที่หากเราต้องการขัดผิวเพื่อขจัดความขรุขระออกให้หมด เราจะรู้ได้ว่าจะต้องขัดผิวลงไปลึกกี่ไมครอน



รูปที่ 3.17 การวัดค่าความหยาบผิวขนาดโดยรวม

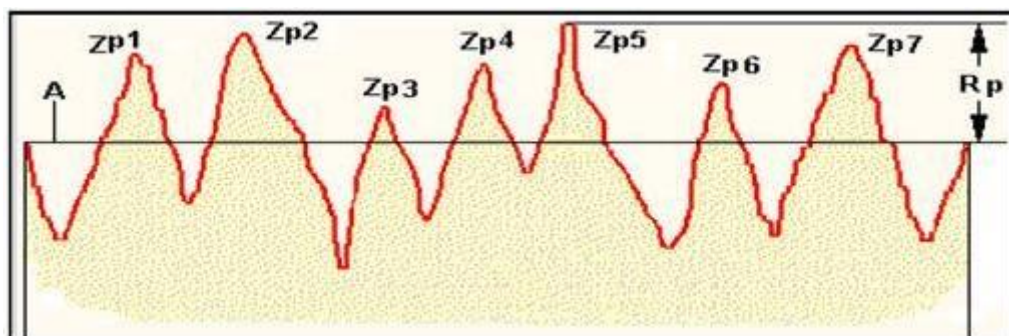
3.3.2.2.2 ความหยาบผิวขนาดหลุมลึกที่สุด (Roughness Valley, R_v) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยวัดขนาดความลึกของหลุม โดยแสดงความลึกหลุมที่มีขนาดลึกที่สุด



รูปที่ 3.18 การวัดค่าความหยาบผิวขนาดหลุมลึกที่สุด

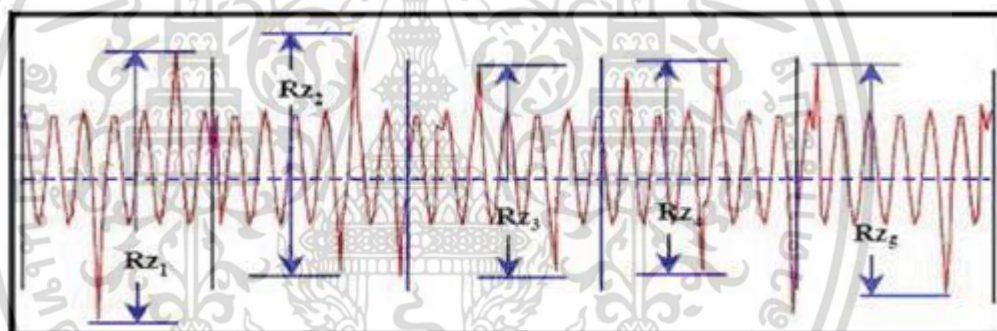
3.3.2.2.3 ความหยาบผิวขนาดยอดสูงสุด (Roughness Peak, R_p) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยวัดขนาดความสูงของยอด โดยแสดงความสูงของยอดที่มีขนาดสูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 การวัดค่าความหยาบผิวขนาดยอดสูงสุด

3.3.2.2.4 ความหยาบผิวขนาดโดยเฉลี่ย (Roughness Ten-point mean, Rz) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยวัดขนาดความสูงของยอดกับความลึกของหลุม โดยแสดงขนาดเฉลี่ยของระยะระหว่างความสูงของยอดกับความลึกของหลุม ทั้งหมด 5 ชุด การวัดทดสอบเป็นช่วงเท่าๆ กัน 5 ช่วง แล้วนำค่าที่ได้มารวมกันหารด้วย 5 โดยที่ค่าของ Rz มีหน่วยเป็นไมโครเมตร



รูปที่ 3.20 การวัดค่าความหยาบผิวขนาดโดยเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การดึงขึ้นรูปท่อ (Tube Drawing)

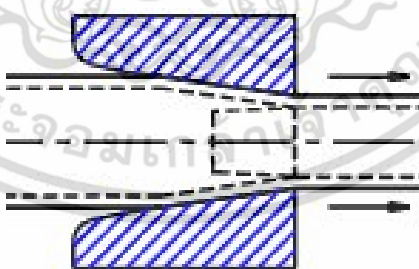
การดึงขึ้นรูปเป็นหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่เก่าแก่ที่สุด อีกทั้งยังเป็นการขึ้นรูปที่มีความสำคัญหลักกับงานอุตสาหกรรมอีกด้วย โดยกระบวนการดึงขึ้นรูปนี้จะให้ผิวสัมผัสที่ยืดหยุ่นหลังจากจบกระบวนการ อีกทั้งยังสามารถกำหนดขนาดของชิ้นงานให้คงที่ได้อีกด้วย

ในการดึงขึ้นรูปนั้น เริ่มแรกจะทำการม้วน การดัน หรือการนำวัสดุหลายๆชนิดมารวมกัน โดยให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเป็นแบบตัน หรือกลวง จากนั้นจะทำการดึงวัสดุเหล่านี้ ผ่านทางตายด้วยความเร็วสูง อาทิเช่น ในการดึงลวดเหล็กหรือลวดอลูมิเนียม จะมีความเร็วในการดึงสูงถึง 1000 ฟุตต่อนาที ซึ่งหลังจากที่ผ่านการดึงขึ้นรูปแล้ว ชิ้นงานจะมีพื้นที่หน้าตัดลดลง ขนาดเปลี่ยนแปลง ค่าความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้น โดยปกติแล้วในการดึงขึ้นรูปนั้น จะทำที่อุณหภูมิห้องโดยอาจมีการดึงซ้ำๆกันหลายครั้ง ในบางครั้งอาจมีการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานหลังจากดึงขึ้นรูปครั้งแรก จากนั้นนำไปดึงขึ้นรูปต่อไปซ้ำๆแบบนี้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงานที่ต้องการนำไปใช้

4.1 ทฤษฎีการดึงขึ้นรูปท่อ [4, 13, 15]

4.1.1 ตัวแปรที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปท่อ

ในการวิเคราะห์กระบวนการดึงขึ้นรูปท่อผนังบางขนาดเล็ก โดยผ่านแม่พิมพ์ที่มีขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ และขนาดครึ่งมุมปลั๊กที่แตกต่างกัน และภายในท่อชิ้นงานบรรจุของแข็ง หรือของเหลวเป็นตัวปลั๊กในการควบคุมขนาดภายใน โดยแสดงแผนภาพดึงรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภาพการดึงขึ้นรูปที่ภายในมีตัวปลั๊ก

มีตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป โดยแบ่งออกเป็นตัวแปรต้นและตัวแปรตาม คือ

1. ตัวแปรต้น เช่น
 - วัสดุตั้งต้น
 - รูปทรงของวัสดุ

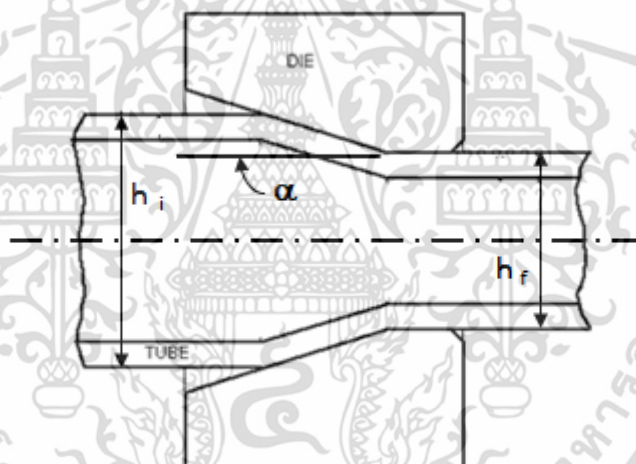
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องมือที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป
- อุณหภูมิตั้งต้น
- ความเร็วดึงขึ้นรูป

2. ตัวแปรตาม เช่น

- แรงและพลังงานที่ใช้
- สมบัติของชิ้นงานหลังดึงขึ้นรูป
- ความเรียบผิว
- อุณหภูมิสุดท้าย

โดยจะพิจารณาให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อก่อนดึงเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหลังดึง ($D_{i0}=D_{if}=D$) และกำหนดให้ความหนาของท่อก่อนดึง (h_i) และ ความหนาของท่อหลังดึง (h_f) เปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ตัวแปรที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป

โดยมีตัวแปรหลักที่เกี่ยวข้อง คือ ครึ่งมุมแม่พิมพ์ (α), ครึ่งมุมปลี๊ก (β) และขนาดการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (Re) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.1

$$Re = \frac{A_i - A_f}{A_i} \quad (4.1)$$

เมื่อ A_i คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดก่อนดึงขึ้นรูป และ A_f คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดหลังดึงขึ้นรูป ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 4.2 และ 4.3

$$A_i = \pi \left[\left(\frac{D_{oi}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{fi}}{2} \right)^2 \right] \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_f = \pi \left[\left(\frac{D_{Of}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{If}}{2} \right)^2 \right] \quad (4.3)$$

เมื่อ	D_{Oi}	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อก่อนดัดขึ้นรูป
	D_{Ii}	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อก่อนดัดขึ้นรูป
	D_{Of}	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อหลังดัดขึ้นรูป
	D_{If}	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อหลังดัดขึ้นรูป

ในขณะเดียวกันสามารถหาค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อก่อนดัดขึ้นรูป และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อหลังดัดขึ้นรูป ได้จากสมการ 4.4 และ 4.5 ได้อีกด้วย

$$D_{Oi} = D_{Ii} + 2h_i \quad (4.4)$$

$$D_{Of} = D_{If} + 2h_f \quad (4.5)$$

เมื่อ	h_i	คือ	ความหนาของแม่พิมพ์บริเวณทางเข้า
	h_f	คือ	ความหนาของแม่พิมพ์บริเวณทางออก

เมื่อนำสมการที่ 4.2-4.5 แทนเข้าไปในสมการที่ 4.1 จะสามารถเขียนได้เป็นสมการที่ 4.6

$$Re = \frac{D_{Ii}^2 \left[\left(\frac{h_i}{D_{Ii}} \right) + \left(\frac{h_i}{D_{Ii}} \right)^2 \right] - D_{If}^2 \left[\left(\frac{h_f}{D_{If}} \right) + \left(\frac{h_f}{D_{If}} \right)^2 \right]}{D_{Ii}^2 \left[\left(\frac{h_i}{D_{Ii}} \right) + \left(\frac{h_i}{D_{Ii}} \right)^2 \right]} \quad (4.6)$$

และกำหนดให้ $D_{Ii} \approx D_{If} \approx D$ จะสามารถเขียนสมการที่ 4.6 ได้เป็นสมการที่ 4.7

$$Re = \frac{\left[\left(\frac{h_i}{D} \right) + \left(\frac{h_i}{D} \right)^2 \right] - \left[\left(\frac{h_f}{D} \right) + \left(\frac{h_f}{D} \right)^2 \right]}{\left[\left(\frac{h_i}{D} \right) + \left(\frac{h_i}{D} \right)^2 \right]} = 1 - \frac{\left[\left(\frac{h_f}{D} \right) + \left(\frac{h_f}{D} \right)^2 \right]}{\left[\left(\frac{h_i}{D} \right) + \left(\frac{h_i}{D} \right)^2 \right]} \quad (4.7)$$

โดยที่ $h_i \ll D_{Ii} \approx D_{If} \approx D$ และ $h_f < h_i$ แล้ว จะได้ว่า $h_f \ll D_{Ii} \approx D_{If} \approx D$ ซึ่งจะทำให้สามารถเขียนสมการที่ 4.7 ได้เป็นสมการที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

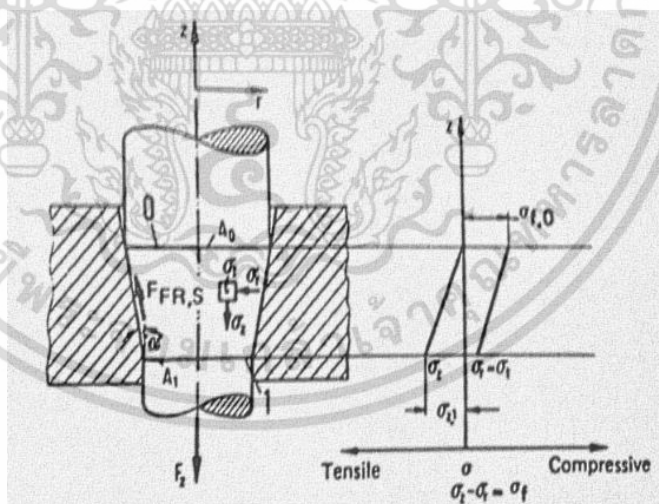
$$Re = 1 - \frac{h_f}{h_i} \quad (4.8)$$

ในกรณีที่ทำกรทดลองโดยใช้ท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อก่อนดิ่งขึ้นรูปมีค่ามากกว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อหลังดิ่งขึ้นรูป ($D_{fi} > D_{ff}$) สามารถเขียนสมการที่ 4.8 ได้เป็นสมการที่ 4.9 นั่นคือ อัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อนั้นเอง

$$Re = \frac{D_{ff}h_f}{D_{fi}h_i} \quad (4.9)$$

4.1.2 แรงที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูปท่อ

แรงที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูปท่อนั้น คือแรงที่เกิดจากการดิ่งที่ปลายท่อด้านหนึ่งผ่านแม่พิมพ์ และมีตัวปลี้อยู่ภายในท่อขึ้นงานเพื่อทำการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อ การวิเคราะห์แรงในการดิ่งขึ้นรูปจำเป็นต้องทราบพฤติกรรมต่างๆของเนื้อโลหะและองค์ประกอบอื่นๆ ในบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic deformation) ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง อาทิเช่น อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัด แรงที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูป ขนาดของครึ่งมุมแม่พิมพ์ ขนาดของครึ่งมุมปลีกลี ชนิดของตัวปลีกลี ความเสียหายที่เกิดขึ้นระหว่างดิ่ง หรือแม้กระทั่งชนิดของสารหล่อลื่น เป็นต้น



รูปที่ 4.3 ความเค้นและแรงในการดิ่งขึ้นรูป

งานและแรงที่ต้องการในกระบวนการดิ่งขึ้นรูปสามารถคำนวณได้ด้วย Siebel's Method โดยเทอมของงานและแรงจะพิจารณาจากผลรวมของแรงในสามส่วน ซึ่งประกอบด้วยแรงในการดิ่งขึ้นรูปที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Ideal deformation force) แรงเสียดทาน (Friction) แรงเฉือน (Shear) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

force) โดยสามารถคำนวณได้ด้วย Sibel's Method ดังสมการที่ 4.10 ซึ่งสอดคล้องกับการดึงขึ้นรูป ดังรูปที่ 4.3

$$F_{D,tot} = F_{id} + F_{FR,S} + F_{sh} \quad (4.10)$$

เมื่อ	$F_{D,tot}$	คือ	แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป
	F_{id}	คือ	แรงอุดมคติที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน
	$F_{FR,S}$	คือ	แรงเสียดทานบนช่วงมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์
	F_{sh}	คือ	แรงเฉือน

4.1.2.1 แรงอุดมคติที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน

$$F_{id} = A_i \sigma_{f,m} \varphi_{max} \quad (4.11)$$

เมื่อ $\sigma_{f,m}$ คือ ความเค้นขึ้นรูปเฉลี่ย (Flow stress) (N/mm^2)

φ_{max} คือ ความเครียด (True strain)

โดยที่
$$\sigma_{f,m} = \frac{\sigma_{m,n-1} + \sigma_{m,n}}{2}$$

เมื่อ $\sigma_{m,n}$ คือ ความแข็งแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานก่อนการดึงขึ้นรูป (นิเวศต่อตารางมิลลิเมตร)

$\sigma_{m,n-1}$ คือ ความแข็งแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานหลังการดึงขึ้นรูป (นิเวศต่อตารางมิลลิเมตร)

โดยที่
$$\varphi_{max} = \ln \frac{A_i}{A_f}$$

4.1.2.2 แรงเสียดทานบนช่วงมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์

$$F_{FR,S} = \frac{2\sigma_{f,m} \varphi_{max} \mu A_f}{\sin 2\alpha} \quad (4.12)$$

เมื่อ $F_{FR,S}$ คือ แรงเสียดทานบนช่วงมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- μ คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coulomb's coefficient of friction)
- α คือ ครึ่งมุมแม่พิมพ์

โดยที่มุม 2α เล็กๆนั้น ค่า $\sin 2\alpha \cong 2\alpha$ จะทำให้ได้สมการที่ 4.12 เป็นสมการแรงเสียดทานที่ 4.13

$$F_{FR,S} = \frac{\sigma_{f,m} \varphi_{max} \mu A f}{\alpha} \quad (4.13)$$

ซึ่งสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหาได้จากตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงเสียดทานในการดึงขึ้นรูปและอัดขึ้นรูปขึ้นงาน [13]

Process	Solid forward extrusion	Hollow forward extrusion	Drwing bar and tubes	Ironing	Drawing hollow bodies
Coefficient of friction, μ	0.04-0.08	0.10-0.125	0.02-0.05	0.02-0.07	0.08-0.02

4.1.3 ความเสียดทาน (Friction) [18]

ในกระบวนการขึ้นรูปนั้น ต้องใช้แรงในการดึงสูงในการที่จะทำให้ชิ้นงานตั้งต้นแปรรูปในหลายๆกระบวนการ อาจจะใช้พลังงานมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ที่เสียไปจากแรงเสียดทาน ในการนำพาสารหล่อลื่นมาใช้ สามารถทำให้การไหลของวัสดุของแข็งทำได้ดีขึ้น สามารถลดของเสียจากการดึงขึ้นรูป ปรับสภาพพื้นผิว ความเรียบหลังการดึงขึ้นรูป โดยแรงเสียดทานในการดึงขึ้นรูปนั้น ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

- ที่แรงดันต่ำ จะสามารถกำหนดได้ผลของแรงที่เกิดขึ้น จะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน ดังสมการที่ 3.14

$$F = \mu N \quad (4.14)$$

- เมื่อ F คือ แรงเสียดทาน (นิวตัน)
- μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน
- N คือ แรงปฏิกิริยาที่ตั้งฉากกับผิวสัมผัส (นิวตัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่แรงดันสูง แรงเสียดทานจะเกี่ยวเนื่องกับความแข็งแรงของชิ้นงานที่มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำกว่า ซึ่งคือชิ้นงานตั้งต้นที่ถูกนำมาขึ้นรูป

การหาค่าความเสียดทานโดยใช้สารหล่อลื่นชนิดต่างๆ ในกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะเป็นวิธีทั่วไปที่ใช้ในการวัดแรงหรือกำลังที่ต้องการเพื่อนำมาใช้ในกรรมวิธีการผลิต อย่างไรก็ตามการคำนวณสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากการวัดค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่ทำได้ยากมาก แบบจำลองทางทฤษฎีที่เที่ยงตรงมากสำหรับรูปแบบของความเค้นความเครียดซึ่งอธิบายถึงอิทธิพลของความเสียดทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างนั้นแตกต่างกัน ดังนั้นความเสียดทานที่ประมาณได้จะเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งอาจเป็นการอธิบายที่ไม่ดีนักของสภาวะความเสียดทานต่างๆ เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงมากในแต่ละบริเวณที่สัมผัสกันระหว่างผิวของแม่พิมพ์กับชิ้นงาน

นอกจากนี้การกระจายความเค้นจุดครากของชิ้นงานอาจมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยความเสียดทานจะเปลี่ยนแปลงโดยสารหล่อลื่นที่ต่างชนิดกัน

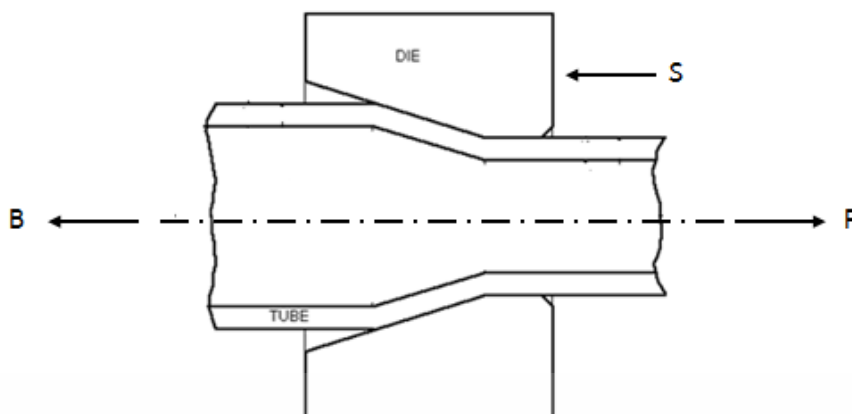
ในการวัดแรงเสียดทานโดยตรงในกรรมวิธีการดึงขึ้นรูปเป็นวิธีการที่ยาก การเปรียบเทียบสารหล่อลื่นต่างๆสามารถแสดงได้โดยการวัดแรงดึงขึ้นรูป ซึ่งทำการเปรียบเทียบแรงดึงกลับ (Back tension, B) การหาค่าโดยตรงของความเสียดทานสามารถหาค่าได้ถ้าแรงดึงขึ้นรูป แรงดึงกลับและแรงที่กระทำบนแท่นรองแม่พิมพ์ (S) หาค่าได้ แสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งแรงดึงกลับจะถูกวัดในตอนแรกโดยไม่มีแรงดึงกลับ คือ $F_0 = B_0$ และจากนั้นจะค่อยๆเพิ่มแรงดึงกลับ ตัวประกอบแรงดึงกลับ (Back pull factor, b) สามารถกำหนดค่าได้จากสมการที่ 4.15

$$b = \frac{F_0 - S}{B} \quad (4.15)$$

สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน คำนวณได้จากสมการที่ 4.16

$$\mu = \left[\frac{\ln(1-b)}{\ln(1-Re)} - 1 \right] \tan \alpha \quad (4.16)$$

เมื่อ α คือ ครึ่งมุมแม่พิมพ์
Re คือ อัตราการลดขนาด

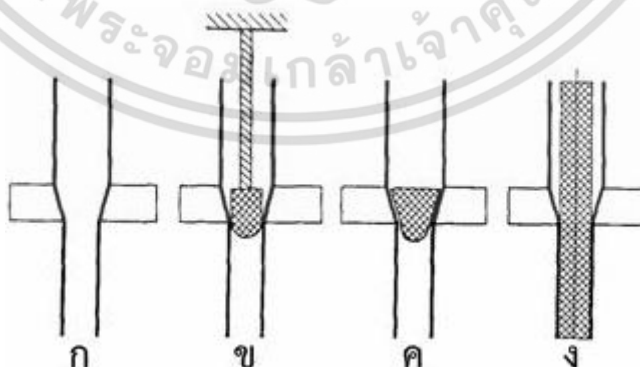


รูปที่ 4.4 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดึงขึ้นรูป

4.2 ชนิดของการดึงขึ้นรูป [5, 6]

การดึงขึ้นรูปท่อ ลวด และท่อนเหล็กนั้น โดยปกติแล้วจะเป็นการดึงขึ้นรูปเย็นเพื่อให้วัสดุหรือโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ทำให้เกิดผลึกใหม่ขึ้น อาศัยแรงในการดึงขึ้นรูปสูง แต่ชิ้นงานที่ได้จะมีความแข็งแรงสูง สามารถควบคุมขนาดสุดท้ายได้แน่นอน และผิวของวัสดุที่ได้มีความสวยงาม โดยนำชิ้นงานเข้าไปในแม่พิมพ์ซึ่งภายในชิ้นงานอาจจะมีปลั๊กหรือแมนเดรลเพื่อเป็นตัวควบคุมขนาดและคุณภาพผิวภายในท่อ โดยในการดึงขึ้นรูปนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดหลัก คือ

1. การดึงขึ้นรูปแบบไม่มีแมนเดรล แสดงดังรูปที่ 4.5 ก
2. การดึงขึ้นรูปแบบมีแมนเดรล แสดงดังรูปที่ 4.5 ข และ 4.5 ค
3. การดึงขึ้นรูปแบบมีแมนเดรลเหลว แสดงดังรูปที่ 4.5 ง

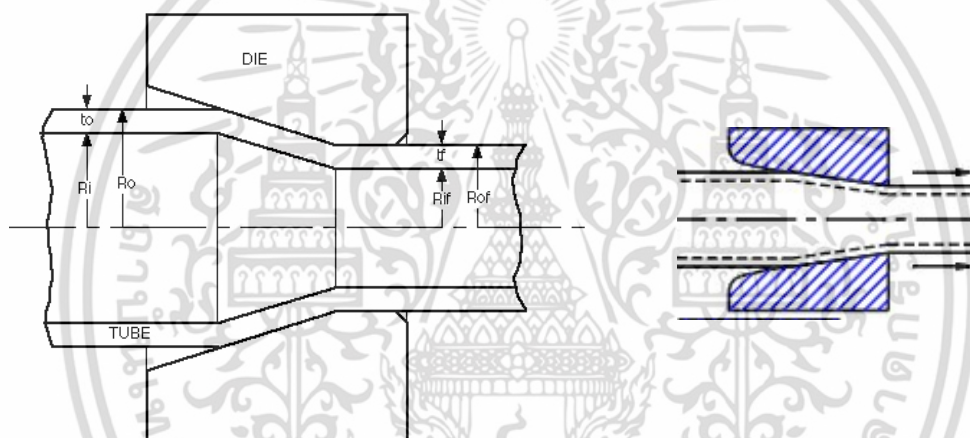


รูปที่ 4.5 การดึงขึ้นรูปแบบ ก) ไม่มีแมนเดรล ข) มีแมนเดรลแบบติดอยู่กับที่ ค) มีแมนเดรลแบบเคลื่อนที่ ง) มีแมนเดรลเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การดึงขึ้นรูปแบบไม่มีแมนเดรลหรือแบบซิ้งกิ้ง (Sinking drawing)

การดึงขึ้นรูปแบบไม่มีแมนเดรลเป็นกระบวนการขึ้นรูปอย่างง่าย เมื่อท่อผ่านดายจะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งภายในและภายนอกลดลงโดยไม่ต้องอาศัยตัวดันภายในท่อ ในทางทฤษฎีกล่าวว่า ความหนาของท่อจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ในความเป็นจริงนั้นอาจมีการลดลงหรือเพิ่มขึ้นโดยขึ้นกับมุมแม่พิมพ์และอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความหนาของท่อ ซึ่งในขณะที่ความหนาและความยาวของท่อจะเพิ่มขึ้นโดยขนาดความหนาและความยาวของท่อที่เพิ่มขึ้นนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะของแม่พิมพ์ แรงเสียดทานระหว่างแม่พิมพ์กับชิ้นงาน และความเค้นดึง ซึ่งความเค้นดึงที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวของท่อนั้นเกิดจากความดันของของเหลวที่อยู่ภายในท่อ [14] วิธีการขึ้นรูปแบบนี้จะทำให้ผิวภายในและภายนอกชิ้นงานมีความขรุขระ และลักษณะชิ้นงานที่ได้มีขนาดไม่คงที่ตลอดทั้งชิ้นงาน



รูปที่ 4.6 การดึงขึ้นรูปแบบไม่มีแมนเดรล

การขึ้นรูปวิธีนี้พบว่า ในขณะที่ท่อผ่านดายนั้นรัศมีของท่อทั้งภายในและภายนอกจะลดลง อีกทั้งผิวภายในท่อจะขรุขระ อีกทั้งความหนาสุดท้ายของท่อจะขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์และความเสียดทานระหว่างท่อกับดาย จากรูปที่

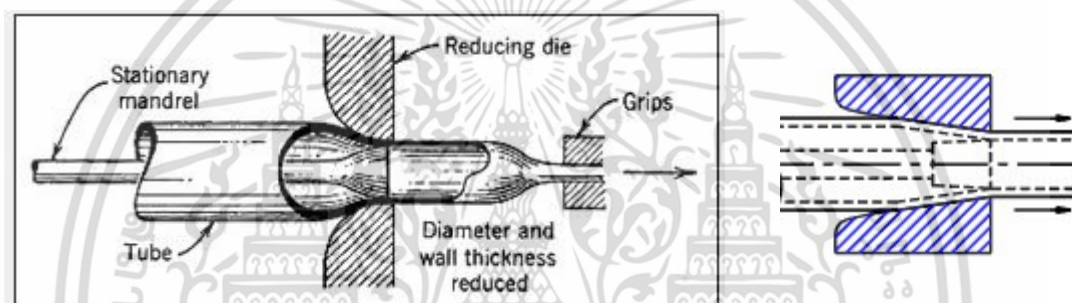
4.6	เมื่อ	t_0	คือ	ความหนาของท่อก่อนการขึ้นรูป
		R_i	คือ	รัศมีภายในของท่อก่อนการขึ้นรูป
		R_o	คือ	รัศมีภายนอกของท่อก่อนการขึ้นรูป
		t_f	คือ	ความหนาของท่อหลังการขึ้นรูป
		R_{if}	คือ	รัศมีภายในของท่อหลังการขึ้นรูป
		R_{of}	คือ	รัศมีภายนอกของท่อหลังการขึ้นรูป

4.2.2 การดึงขึ้นรูปแบบมีแมนเดรล (Plug Drawing)

การขึ้นรูปชนิดนี้เป็นการขึ้นรูปที่เป็นที่รู้จักและเหมาะสำหรับการขึ้นรูปท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดกลางไปจนถึงขนาดใหญ่ ซึ่งแกนจะอยู่ในท่อและจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยอาศัยแรงเสียดทานไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางที่ใช้ดึง วิธีการนี้จะนิยมใช้ในการผลิตท่อผนังบาง โดยวิธีนี้ผิวชิ้นงานทั้งภายในและภายนอก จะมีความเรียบกว่าแบบซึ่งกึ่ง

4.2.2.1 มีแมนเดรลแข็งแบบติดอยู่กับผิวภายในชิ้นงาน (Fixed Plug Drawing)

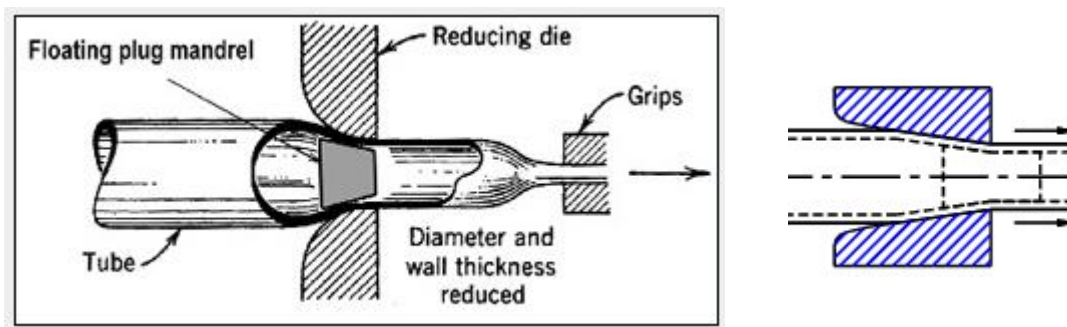
เป็นกระบวนการขึ้นรูปโดยอาศัยตัวแมนเดรลที่ติดอยู่กับที่ เป็นตัวควบคุมขนาดและรูปร่างของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน โดยจะใส่ตัวแมนเดรลเข้าไปภายในท่อ โดยแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป จะมีขนาดมากกว่าการขึ้นรูปแบบมีแมนเดรลแบบแข็งแบบเคลื่อนที่ภายในชิ้นงาน (Floating Plug Drawing) อีกทั้งให้ความแม่นยำมากกว่าการขึ้นรูปแบบไม่มีแมนเดรล



รูปที่ 4.7 มีแมนเดรลแข็งแบบติดอยู่กับผิวภายในชิ้นงาน

4.2.2.2 มีแมนเดรลแบบแข็งแบบเคลื่อนที่ภายในชิ้นงาน (Floating Plug Drawing)

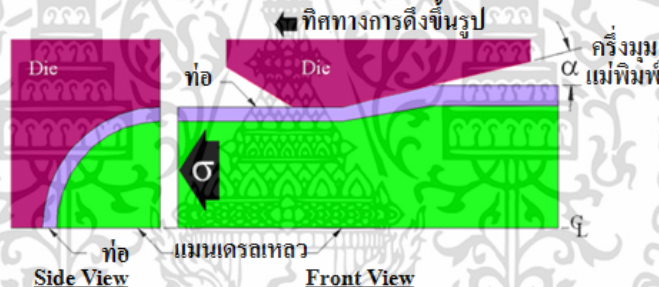
เป็นกระบวนการขึ้นรูปที่คล้ายกับการขึ้นรูปแบบมีแมนเดรลแข็งแบบติดอยู่กับผิวภายในชิ้นงาน แต่ตัวแมนเดรลจะสามารถเคลื่อนที่ได้ตลอดความยาวของท่อ โดยจะใส่ตัวแมนเดรลเคลื่อนที่เข้าไปภายในของท่อ โดยการกระบวนการขึ้นรูปชนิดนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงกับทั้งตัวท่อและตัวแมนเดรลเคลื่อนที่ โดยจะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งภายในและภายนอกของท่อลดลง วิธีนี้จะทำให้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อลดลงได้ถึงมากถึงร้อยละ 45 อีกทั้งแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปยังมีขนาดน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบมีแมนเดรลแข็งแบบติดอยู่กับผิวภายในชิ้นงานอีกด้วย



รูปที่ 4.8 มีแมนเดรลแบบแข็งแบบเคลื่อนที่ภายในชิ้นงาน

4.2.3 การดึงขึ้นรูปแบบมีแมนเดรลเหลว (Fluid Mandrel Drawing)

เป็นการดึงขึ้นรูปแบบมีแมนเดรลชนิดหนึ่ง แต่วัสดุที่ใช้เป็นแมนเดรลจะเป็นของเหลวซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ตลอดชิ้นงาน และสามารถเคลื่อนย้ายออกได้สะดวก ซึ่งตัวแมนเดรลเหลวจะเป็นตัวควบคุมขนาดและผิวภายนอกท่อ ส่วนภายนอกท่อจะถูกควบคุมด้วยขนาดของแม่พิมพ์



รูปที่ 4.9 การขึ้นรูปแบบมีแมนเดรลเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลิตภัณฑ์หล่อลื่น

ในการขึ้นรูปวัสดุ การไหลของโลหะเหลวเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความดันจากดาวย ไปสู่ชิ้นงานที่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ดังนั้นเงื่อนไขของความเสียดทานที่ชิ้นงานหรือดาวยจะส่งผล กระทบต่อการไหลของโลหะ การผิดรูปร่างของผิวชิ้นงาน ความเค้นที่กระทำกับดาวย รวมถึงพลังงาน และแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูป ซึ่งสามารถลดความเสียดทานที่เกิดขึ้นโดยอาศัยสารหล่อลื่น

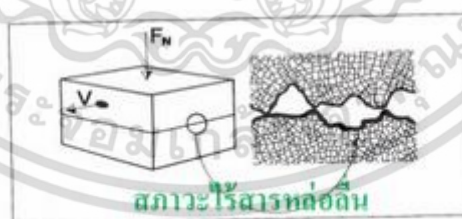
5.1 การหล่อลื่น (Lubrication) [9, 11]

คือ การลดแรงเสียดทานหรือลดความฝืดระหว่างผิวหน้าของวัตถุที่เคลื่อนที่เสียดสีหรือสัมผัส กัน โดยการใช้ฟิล์มน้ำมันเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างผิวหน้าของวัตถุทั้งสอง โดยปกติวัตถุใดๆ ก็ตามตั้งแต่ 2 ชิ้นขึ้นไป และมีการเคลื่อนที่เสียดสีกัน ไม่ว่าจะในรูปแบบเคลื่อนที่ไปกลับ เคลื่อนที่ในแนวตั้ง เคลื่อนที่เสียดสีกันแบบหมุนรอบตัวเอง หรือเคลื่อนที่กันแบบกระแทกกัน ซึ่งอาจก่อให้เกิดเสียงดัง ความร้อน การหลอมละลาย หรือการสึกหรอ เป็นต้น

พื้นฐานขอบเขตการหล่อลื่นแบ่งได้เป็น 4 ขอบเขตหลัก [1] คือ

1. สภาวะไร้สารหล่อลื่น (Solid Contact) คือ การขึ้นรูปที่ไม่ได้ใช้สารหล่อลื่น ซึ่งในกรณีนี้ จะทำให้เกิดแรงเสียดทานสูง โดยส่วนใหญ่แล้วการขึ้นรูปที่ไม่ได้ใช้สารหล่อลื่นนั้น จะเป็นการขึ้นรูปแค่ 2-3 ครั้ง เช่น พวงการรีดขึ้นรูปของแผ่นโลหะ การดันขึ้นรูปของอลูมิเนียมอัลลอยด์

ในสภาวะการหล่อลื่นแบบนี้ผิวสัมผัสของคู่วัสดุจะสัมผัสกันโดยตรงทำให้เกิดการเสียหายหรือ สึกหรออย่างรุนแรงบนผิวหน้าวัสดุ มีการสูญเสียวัสดุอยู่ในเกณฑ์สูงมาก



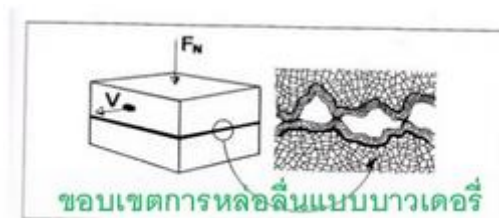
รูปที่ 5.1 ขอบเขตสภาวะไร้สารหล่อลื่น

2. ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวนด์ารี (Boundary Lubrication) เป็นแบบที่นิยมอย่าง กว้างขวางในการขึ้นรูป อย่างไรก็ตามการที่อุณหภูมิบริเวณผิวชิ้นงานเพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันในการ ขึ้นรูปสูงขึ้นด้วย

ในสภาวะแบบนี้ผิวหน้าคู่สัมผัสเกิดจากปฏิกิริยาเคมี การเสียดสีกันทำให้ผิวหน้าหลุดออกไป และเกิดผิวชั้นใหม่ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมี หรือการดูดกลืนอะตอมแทนผิวชั้นเดิม การได้สารหล่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลื่นที่มีคุณภาพที่มีความแข็งแรงของฟิล์มไม่เพียงแต่ทำให้เกิดชั้นผิวขึ้นมาใหม่ แต่ยังทำให้มีการปิดหรืออุดบริเวณที่เป็นร่องหลุมของผิวคู่สัมผัส ทำให้ผิวคู่สัมผัสเกิดความเรียบส่งผลให้สามารถรับภาระได้สูงยิ่งขึ้นจากพื้นที่รับภาระที่ถูกสร้างขึ้น



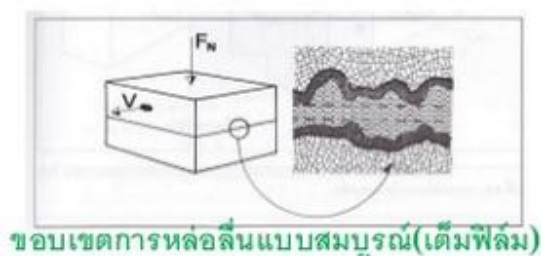
รูปที่ 5.2 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวเดอรี

3. ขอบเขตการหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์ (Mixed Lubrication) จะเกิดเมื่อสารหล่อลื่นมีช่วงเวลาที่เหมาะสมในการสร้างชั้นผิวที่มีความแข็งแรงต่อการเฉือนตัวต่ำมาก ซึ่งจะเป็นผลดีต่อค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานและการสึกหรอ การหล่อลื่นชนิดนี้บ่งบอกถึงรูปแบบผสมของการหล่อลื่นที่เกิดขึ้น ซึ่งจะมีอย่างน้อย 2 ลักษณะการสัมผัสกันของคู่วัสดุเกิดขึ้นพร้อมกัน เป็นลักษณะของสภาวะที่เกิดขึ้นในการสลับเปลี่ยนสถานะระหว่างสัมประสิทธิ์การเสียดทานของการเสียดสีของของแข็งคู่สัมผัสกับสัมประสิทธิ์การเสียดทานในชั้นของสารหล่อลื่น



รูปที่ 5.3 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์

4. ขอบเขตการหล่อลื่นแบบสมบูรณ์ (Hydrodynamic Lubrication) สภาวะการหล่อลื่นแบบนี้ฟิล์มในน้ำมันหล่อลื่นจะแยกผิววัสดุของคู่สัมผัสออกจากกันโดยสิ้นเชิง เป็นการหล่อลื่นแบบเต็มฟิล์ม หรือบางที่เรียกว่าการสึกหรอเป็นศูนย์ (Zero Wear) แรงกระทำในแนวตั้งถูกรองรับโดยสารหล่อลื่นโดยตรง



ขอบเขตการหล่อลื่นแบบสมบูรณ(เต็มฟิล์ม)

รูปที่ 5.4 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบสมบูรณ

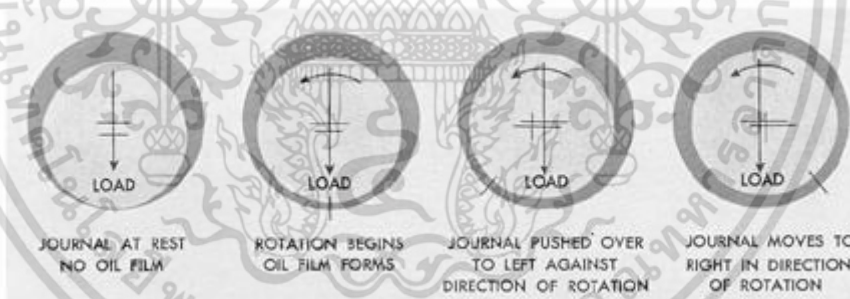
5.2 ลักษณะฟิล์มหล่อลื่น [43]

ฟิล์มหล่อลื่นแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ

5.2.1 ลักษณะฟิล์มแบบ Full Film

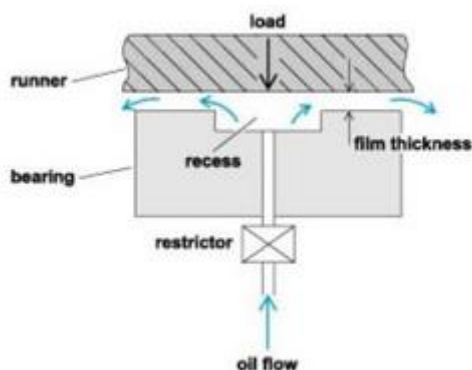
เป็นลักษณะของฟิล์มในอุดมคติของการหล่อลื่น โดยส่วนที่เคลื่อนที่จะไม่เกิดการสัมผัสกับส่วนที่อยู่กับที่เลยในทุกกรณีซึ่งแบ่งได้ 2 แบบ คือ

5.2.1.1 Hydrodynamic Full Film คือ ลักษณะดังรูปที่ 5.5 ฟิล์มที่มีแรงดันก่อตัวขึ้นจากการเคลื่อนตัวของส่วนเคลื่อนที่อัดสารหล่อลื่นผ่านเข้าไประหว่างส่วนเคลื่อนที่และส่วนอยู่กับที่ ยิ่งเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนตัวจะทำให้ผิวสัมผัสของส่วนเคลื่อนที่ถูกยกตัวแยกออกจากผิวของส่วนอยู่กับที่โดยฟิล์มของน้ำมัน



รูปที่ 5.5 ฟิล์มหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก

5.2.1.2 Hydrostatic Full Film คือ ลักษณะดังรูปที่ 5.6 โดยฟิล์มจะก่อตัวขึ้นจากแรงดันจากภายนอกมาดันให้สารหล่อลื่น ยกและรองรับน้ำหนักที่กดไว้ สารหล่อลื่นที่ถูกบีบด้วยแรงดันที่พอเหมาะจะแยกให้ผิวแบริงแยกกัน ในลักษณะฟิล์มทั้ง 2 แบบ ผิวสัมผัสที่เคลื่อนที่ จะถูกยกตัวและลอยอยู่ด้วยแรงดันของน้ำมัน แต่แบบ Hydrostatic แรงดันน้ำมันได้จากบีบภายนอกเท่านั้น



รูปที่ 5.6 พิล์มหล่อลื่นแบบไฮโดรสแตติก

5.2.2 ลักษณะฟิล์มแบบ Elastohydrodynamic

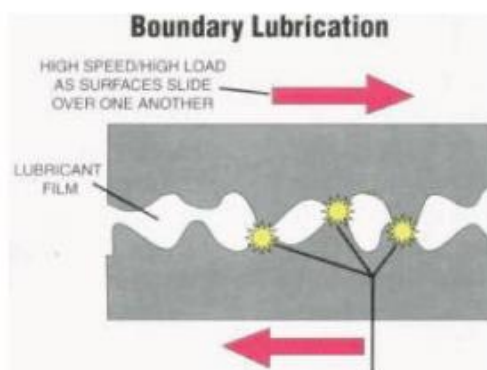
คือการก่อตัวของฟิล์มแบบ Hydrodynamic โดยได้รับความดันเกิดจากน้ำหนักที่กดลงบนส่วนที่เคลื่อนที่และหมุนตัวไปบนผิวที่อยู่กับที่ สารหล่อลื่นจะแทรกผ่านไประหว่างผิวหน้าทั้งสองซึ่งจะเพิ่มความดันให้กับผิวของสารหล่อลื่น สารหล่อลื่นจะถูกรีดตัวออกจากระหว่างผิวทั้งสองภายใต้ความดันสูง สารหล่อลื่นจะถูกรีดเป็นแผ่นบางๆ ถ้าน้ำหนักที่กดลงมายังคงเพิ่มไปตลอด จะทำให้สารหล่อลื่นถูกกดให้แยกออกจากผิวทั้งสองและจะทำให้ผิวทั้งสองสัมผัสกัน



รูปที่ 5.7 ลักษณะฟิล์มหล่อลื่นแบบ Elastohydrodynamic

5.2.3 ลักษณะฟิล์มแบบ Boundary Layer Film

ลักษณะฟิล์มแบบ Boundary Layer Film ลักษณะดังกล่าวฟิล์มจะเกิดขึ้นโดยส่งสารหล่อลื่นเข้าไปแทรกตัวระหว่างผิวทั้งสองในจำนวนที่พอเหมาะ ให้จุดสูงสุดของผิวสัมผัสเกิดแยกตัวเท่านั้น



รูปที่ 5.8 ลักษณะฟิล์มหล่อลื่นแบบ Boundary Layer Film

5.3 การพัฒนากรรมวิธีของสารหล่อลื่น [42]

การพัฒนาต่างๆ ได้ถูกคิดค้นขึ้นเป็นจำนวนมากในการหล่อของการขึ้นรูปโลหะ ซึ่งเกี่ยวกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เคมีและทางกลของสารหล่อลื่นในการขึ้นรูป

เมื่อความเค้นจุดครากของโลหะเพิ่มขึ้นแม้ว่าจะไม่พิจารณาที่จุดนั้น แต่ปฏิกิริยาของสารหล่อลื่นพบว่ายังคงอยู่ที่ความเค้นและอุณหภูมิสูง ซึ่งควรคำนึงถึงผิวที่เกิดกับเครื่องมือและชิ้นงานเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อป้องกันสภาวะต่างๆ ของความเค้น อุณหภูมิและปฏิกิริยาสูงสุดระหว่างเครื่องมือและชิ้นงาน สารหล่อลื่นควรจะมีหน้าที่ต่างๆ ที่กระทำซึ่งจะต้องลดความเสียหาย ซึ่งจะต้องไม่กัดกร่อนชิ้นงาน หรือชิ้นส่วนเครื่องจักร ล้างออกได้ง่ายและไม่เป็นอันตราย

ลักษณะของสารหล่อลื่นนั้น คือมีหน้าที่ลดแรงเสียดทาน สารหล่อลื่นต่างๆ สามารถเป็นของเหลวได้เช่นเดียวกับที่เป็นของแข็ง สำหรับในการดึงขึ้นรูปความต้องการสารหล่อลื่นมีมากกว่าในการรีดขึ้นรูป ซึ่งความยาวของการรีดมีค่าสูงกว่า มีการใช้โดยทั่วไปในการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกเนื่องจากความเร็วปกติมีค่ามากกว่าระหว่างชิ้นส่วนเครื่องมือและชิ้นงาน โดยมากสารหล่อลื่นต่างๆ สำหรับการดึงขึ้นรูปถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

- การดึงขึ้นรูปแบบแห้ง (Dry drawing)
- การดึงขึ้นรูปแบบเปียก (Wet drawing)

ตารางที่ 5.1 การดึงขึ้นรูปแบบแห้ง สำหรับสารหล่อลื่นชนิดทั่วไป

ชนิดของชิ้นงาน	สารหล่อลื่นแบบแห้ง
เหล็ก	<ul style="list-style-type: none"> • Coating of Ca-Na stearate on lime or borax • Soap phosphating
สแตนเลส	<ul style="list-style-type: none"> • Coating of Ca-Na stearate on lime, borax or oxalate • Metallic coating with emulsions or graphite • Chlorinated wax

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 การดัดขึ้นรูปแบบเปียก สำหรับสารหล่อลื่นชนิดทั่วไป

ชนิดของชิ้นงาน	สารหล่อลื่นแบบเปียก
เหล็ก	• Emulsions with soap, fatty oils, mineral oil and water
สแตนเลส	• Vegetable oils, fat, mineral oils with EP-additives
โลหะทองแดง	• Emulsions with soap, fatty acids, boundary lubricants and EP-additives
อลูมิเนียม	• Mineral oils with boundary lubricants and EP-additives

5.4 ผลิตภัณฑ์สารหล่อลื่น (Lubricants)

คือ สารหล่อลื่นที่เข้าไปแทรกเป็นฟิล์มหรือเยื่ออยู่ระหว่างผิวโลหะที่เสียดสีกันเพื่อลดความฝืดและลดการสึกหรอ ทำให้เครื่องมือ เครื่องจักรกลทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพช่วยระบายความร้อนและชะล้างสิ่งสกปรกออกจากบริเวณผิวสัมผัสที่ต้องการหล่อลื่น

สารหล่อลื่นที่วางตัวเป็นแผ่นฟิล์มระหว่างผิวสัมผัสจะทำให้เราสามารถเลื่อนผิวทั้ง 2 ไปมาได้โดยไม่แตะกัน ซึ่งเป็นจุดประสงค์สำคัญของการหล่อลื่น คือการแยกผิวหน้าที่สัมผัสกันทั้งสองให้เคลื่อนตัวไปมาได้ภายใต้แรงกดที่มีมากระทำ สารหล่อลื่นที่จะนำไปใช้ระหว่างผิวสัมผัสทั้ง 2 ต้องกระจายแยกออกตลอดพื้นผิวหน้าสัมผัสผิวหน้าที่เคลื่อนที่จะแยกออก และวิ่งอยู่บนสารหล่อลื่นได้ซึ่งจะไม่มีทางที่ผิวทั้งสองจะสัมผัสกัน [24] ซึ่งสามารถอยู่ได้ในสภาวะก๊าซ ของเหลว กิ่งของเหลว ของแข็ง ของแข็งที่บดเป็นผง

การหล่อลื่นด้วยก๊าซ เช่น การใช้อากาศเป็นสารหล่อลื่นในระบบที่มีความเร็วรอบสูงมากๆ ที่ภาระการใช้งานต่างๆ เช่น การเหวี่ยงด้วยความเร็วสูง บีมอัดอากาศในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ เซมิคอนดักเตอร์ เป็นต้น

สารหล่อลื่นแบบของเหลว หรือน้ำมันหล่อลื่น เป็นที่ครอบคลุมกว้างขวางมากตั้งแต่ก๊าซเหลว ไปจนถึงน้ำมันหล่อลื่น ที่มีความหนืดสูงมากๆ ปัจจุบันวัสดุที่ใช้เป็นพื้นฐานของกระบวนการผลิตสารหล่อลื่นของเหลวคือ น้ำมันหล่อลื่นที่กลั่นได้จากน้ำมันปิโตรเลียม นอกจากนั้น ก็ยังมีพวกไขสัตว์และน้ำมันพืช เป็นต้น

สารหล่อลื่นที่เป็นของแข็ง ซึ่งไม่มีสารนำพาไม่ว่าจะเป็นของเหลวหรือสภาวะกิ่งของเหลว มักถูกนำมาใช้งานในสภาวะที่ผิดปกติเท่านั้น สารหล่อลื่นของแข็งได้แก่ แกรไฟต์ , โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ ,PTFE (Polytetrafluoroethylene) และอื่นๆ เช่น เอสเบสตอส ถูกนำมาใช้เป็นเส้นใยเสริมในการหล่อลื่นของวัสดุประเภทคอมโพสิต เป็นต้น

การหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพเพื่อการประหยัดพลังงาน สามารถสรุปได้จากการใช้สารหล่อลื่นที่เหมาะสมตามระยะเวลาใช้งานของสารหล่อลื่นนั้นๆ ซึ่งสามารถช่วยลดการสูญเสียที่เกิดจากแรงเสียดทาน ลดการสึกหรอ และเพิ่มประสิทธิภาพการส่งถ่ายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโรงงานอุตสาหกรรมบางแห่ง การหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพสามารถช่วยลดการใช้พลังงานในเครื่องจักรได้สูงสุดถึง 20% อีกทั้งยังสามารถช่วยประหยัดเวลาในการดูแลรักษาเครื่องจักร ลดพื้นที่ในการใช้งานจากการสต็อกสารหล่อลื่นที่น้อยลง และยืดอายุเครื่องจักรให้ยาวนานขึ้น รวมทั้งยืดอายุของสารหล่อลื่นให้ยาวนานมากขึ้นอีกด้วย โดยในงานวิจัยสารหล่อลื่นที่เลือกมาใช้งานคือ น้ำมันเครื่อง น้ำมันปาล์ม และโซเดียมสเตียเรท

5.5 คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์หล่อลื่นที่ใช้ในการขึ้นรูป [1, 9]

ในการขึ้นรูปโลหะนั้น ความเหมาะสมของสารหล่อลื่นที่ใช้จะเป็นตัวกำหนดความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยสารหล่อลื่นนั้นต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปแบบต่างๆ โดยคุณสมบัติหลักที่สำคัญมีดังนี้ คือ

1. สามารถลดความเสียหาย สารหล่อลื่นจะลดความเสียหายโดยการแยกผิวที่เคลื่อนตัวออกจากกันภายใต้แรงกด ซึ่งมี 2 อย่างคือ

1. แรงเสียดทานจากการไถล (Sliding Friction) ระหว่างด้ายกับชิ้นงาน ซึ่งสามารถลดได้โดยใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหล่อลื่นสูง

2. แรงเสียดทานจากการหมุน (Rolling Friction) เป็นผลจากผิวสัมผัสที่เคลื่อนตัวผ่านกันในทิศทางตรงกันข้าม

2. มีหน้าที่ช่วยลดการสึกหรอ โดยการแยกผิวสัมผัสที่เคลื่อนที่ และอยู่หนึ่ง ให้แยกจากกันมากที่สุดเท่าที่จะทำได้

3. มีหน้าที่ลดหรือซึมซับแรงกระแทก โดยสารหล่อลื่นที่ติดค้างระหว่างจุดสัมผัสของฟันเฟืองทั้งสองที่ซึบกัน จะมีแรงดันต้านการเคลื่อนตัวเข้าหากันของฟันเฟือง การหล่อลื่นที่เหมาะสม จะป้องกันฟันเฟืองไม่ให้เกิดการกระแทกขณะเคลื่อนที่เข้าหากัน

4. มีหน้าที่เป็นผู้รับแรงกระทำหรือป้องกันการปริแตกของด้ายกับชิ้นงาน

5. มีคุณสมบัติของความเป็นฉนวน จะช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นโดยลดแรงเสียดทานและเก็บความร้อนถ่ายเทไปยังส่วนที่เย็นกว่าของเครื่องจักร หากควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นไม่ได้ จะทำให้ผิวสัมผัสของโลหะเกิดการขยายตัวและติดกันจะทำให้เกิดความเสียหาย หรือทำให้จุดดังกล่าวร้อนขึ้น เกิดการผุกร่อน และอ่อนตัวลงจะทำให้ชิ้นส่วนอื่นๆ สึกหรอเร็วจนต้องเปลี่ยนใหม่

6. มีความหนืดในระดับที่สามารถลดแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างด้ายกับชิ้นงาน ณ อุณหภูมิขึ้นรูป

7. มีคุณสมบัติที่ไม่กัดเซาะชิ้นงาน เพื่อลดการกัดกร่อนของผิวด้ายกับชุดด้าย

8. ต้องมีส่วนประกอบที่ไม่เป็นอันตรายต่อสภาวะแวดล้อม ไม่เป็นพิษ และต้องไม่ติดไฟง่าย

9. ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายออกจากด้าย หรือชิ้นงาน

10. มีราคาสมเหตุสมผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

วิธีการดำเนินการวิจัย

หนึ่งในการศึกษาด้านอุตสาหกรรมการขึ้นรูป คือการหาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างวัสดุ กับพฤติกรรมการตอบสนองของวัสดุนั้นต่อสภาวะแวดล้อมต่างๆ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณและตัวเลข ได้แก่ การเรียงตัว ชนิดของเฟส การกระจายตัว การศึกษาความแข็งแรง การวัดขนาดเกรน รวมถึงสัดส่วนโดยปริมาตรของเฟสต่างๆ ตามลำดับ

จากนิยามและทฤษฎีในบทที่ 2, 3 และ 4 ได้นำไปสู่การดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของแมนเดรลเหลวและการลดพื้นที่หน้าตัดต่อความหนา ความเค้นดึง และความขรุขระผิวในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อทองแดง

6.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

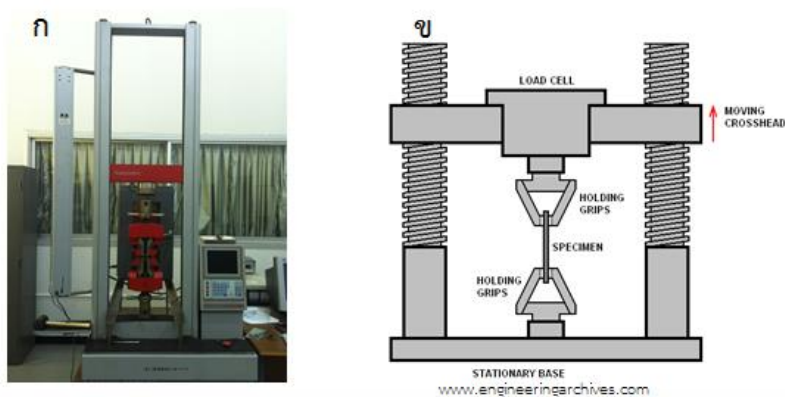
6.1.1 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบพื้นฐานที่สุดอย่างหนึ่งที่ใช้ทดสอบสมบัติของวัสดุต่างๆ ปกติการทดสอบแรงดึงจะใช้ขึ้นทดสอบตามแบบมาตรฐาน แต่ขณะเดียวกันก็สามารถใช้ขึ้นทดสอบแบบอื่นที่ทราบค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวเริ่มต้น โดยการทดสอบแรงดึงใช้ในการตรวจวัดพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุภายใต้แรงดึงหรือการยืดในแนวแกน

ข้อมูลและการคำนวณในการทดสอบแรงดึงโดยทั่วไปได้แก่ ขีดจำกัดการยืดหยุ่น, ร้อยละการยืด, โมดูลัสความยืดหยุ่น, ขีดจำกัดแบบสัดส่วน, ร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัด, ความแข็งแรงดึง, จุดคราก และความแข็งจุดคราก เป็นต้น

6.1.1.1 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine Testometric Model M500-100kN)

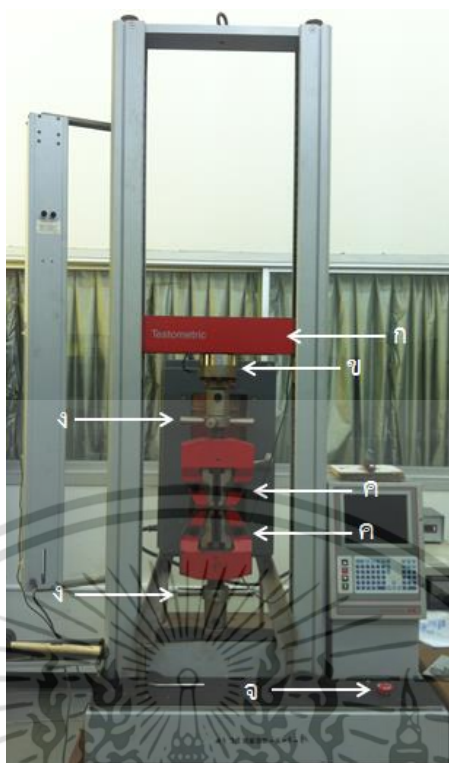
การทดสอบแรงดึงเพื่อหาค่าความแข็งแรงของโลหะและโลหะผสมจะใช้เครื่องทดสอบที่เรียกว่า เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal tester) ในงานวิจัยใช้เครื่องทดสอบรุ่น M500-100kN) ดังรูปที่ 6.1 โดยส่วนประกอบของเครื่องทดสอบแรงดึงแสดงดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.1 ก) เครื่องทดสอบแรงดึง ข) โครงร่างการทดสอบแรงดึงกับชิ้นทดสอบโลหะ

6.1.1.2 ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบแรงดึง

1. คอรัสเฮด (Crosshead) คือ ส่วนของโหนดที่จะเคลื่อนที่ลงเมื่อทำการกด (Compression test) และเคลื่อนที่ขึ้นเมื่อทำการดึง (Tensile test)
2. ตัวรับภาระแรง (Load Cell) คือ ตัวแปลงสัญญาณสำหรับภาระแรง (Load) สามารถรับภาระแรงได้สูงสุด 100 กิโลนิวตัน ขึ้นอยู่กับแต่ละวัสดุประสงค์ของการทดสอบ
3. ตัวยึดชิ้นงาน (Sample Grips) คือ ที่ยึดชิ้นงานระหว่างทำการทดสอบ สามารถเปลี่ยนได้ตามรูปร่างและขนาดของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ
4. สลักเลื่อน (Upper and Lower Crosshead Limits) คือ ตัวควบคุมคอรัสเฮดให้เคลื่อนที่ขึ้นหรือลงในขณะที่จัดวางชิ้นงานก่อนการทดสอบ สามารถควบคุมได้จากผู้ทดสอบหรือควบคุมโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก็ได้
5. ปุ่มหยุดฉุกเฉิน (Emergency stop) คือ ปุ่มที่ใช้เมื่อต้องการหยุดการทำงานของเครื่องทดสอบทันที



รูปที่ 6.2 ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบแรงดึง ก) คอร์สเฮด ข) ตัวรับภาระแรง ค) ด้ามจับชิ้นงาน ง) สลักเลื่อน จ) ปุ่มหยุดฉุกเฉิน

6.1.1.3 ขั้นตอนการทดสอบแรงดึง

1. กลึงชิ้นงานให้ได้ขนาดตามมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง
2. ทำความสะอาดชิ้นงาน เพื่อป้องกันการเลื่อนของชิ้นงานจากหัวจับขณะทำการดึง
3. ตรวจสอบความเรียบ ตรง ของชิ้นงาน โดยจะต้องไม่โก่งงอกก่อนนำเข้าสู่เครื่องทดสอบ
4. ทำการวัดและบันทึกค่าขนาดและมิติของชิ้นงาน
5. ทำการดึงชิ้นงาน ชิ้นงานขาดจากกันเป็นสองส่วน (ในงานวิจัยดึงโดยให้ส่วนที่ถูกดึงยาว 50 มิลลิเมตร)

ทดสอบ

6.1.2 เครื่องวัดความขรุขระผิว (Surface Roughness Tester)

เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความเรียบ ความขรุขระของพื้นผิว โดยจะวัดจากความเบี่ยงเบนของพื้นผิวจริงกับพื้นผิวในอุดมคติ ถ้าความเบี่ยงเบนมีค่ามากหมายถึงพื้นผิวนั้นขรุขระมากหรือผิวหยาบ ในขณะเดียวกันถ้าความเบี่ยงเบนมีค่าน้อยหมายถึงมีความขรุขระน้อยหรือพื้นผิวเรียบ โดยหน่วยวัดปกติที่นิยมใช้คือ ความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Ra) และความหยาบผิวขนาดโดยเฉลี่ย (Rz) เป็นตัวชี้วัดคุณลักษณะของพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดความขรุขระผิวมีบทบาทสำคัญในการกำหนดสภาวะวัดจริงที่จะสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อม โดยพื้นผิวขรุขระมักจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่าพื้นผิวเรียบ โดยความขรุขระจะเป็นปัจจัยบ่งชี้ที่ดีของประสิทธิภาพการทำงานของส่วนประกอบเครื่องจักรกล

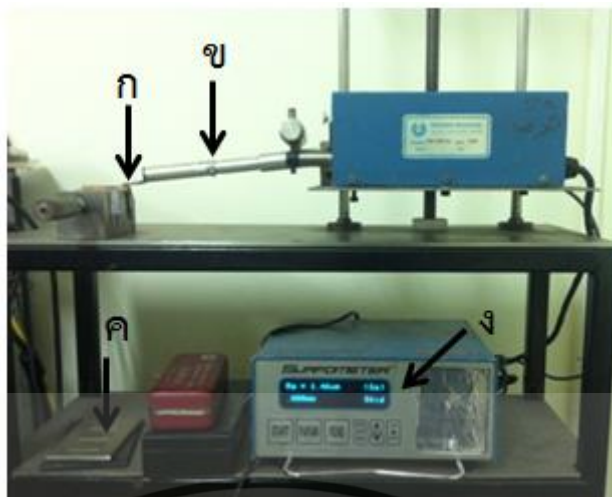
6.1.2.1 คุณลักษณะของเครื่องวัดความขรุขระผิว

1. ช่วงการวัด (Measuring Range) ควรจะสามารถวัดความหยาบผิวได้ต่ำสุดและสูงสุดเท่าไรและต้องอยู่ในช่วงที่ต้องการวัด
2. ความละเอียดของเครื่องมือ ต้องมีความละเอียดถึง 0.01 ไมโครเมตร
3. ความแม่นยำหรือความคลาดเคลื่อน ต้องไม่เกิน ± 10 เปอร์เซ็นต์
4. ขนาดจอแสดงผลต้องพอเหมาะ แสงต้องเพียงพอที่จะอ่านข้อมูลได้ง่าย
5. อุณหภูมิการใช้งาน เนื่องจากเครื่องนี้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงมีช่วงอุณหภูมิที่จะใช้งานได้เป็นอย่างดี ปกติเครื่องวัดจะใช้งานได้ที่อุณหภูมิ 10 – 45 องศาเซลเซียส
6. ขนาด น้ำหนัก รูปร่าง ต้องเหมาะสมกับขนาดของชิ้นงานที่ต้องการวัด

6.1.2.2 ส่วนประกอบของเครื่องวัดความขรุขระผิว

1. ตัวเครื่องวัดความขรุขระผิว
2. เข็มวัด จะติดตั้งตรงบริเวณแขนที่ต่อกับเครื่องอ่านค่า ซึ่งเป็นตัวที่จะสัมผัสกับชิ้นงาน
3. หน้าจอแสดงผล ค่าที่แสดงคือ ความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต, ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง, ความหยาบผิวขนาดโดยเฉลี่ย และความหยาบผิวเฉลี่ยสูงสุด (Rmax) โดยจะแสดงผลในหน่วยไมโครเมตร
4. แผ่นสอบเทียบ (Calibration Plate) ใช้ในการทดสอบค่าการอ่าน ว่าได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำจริง ก่อนทำการทดสอบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 ส่วนประกอบของเครื่องวัดความหนาขรุขระผิว ก) เข็มวัด ข) แขนไฮดรอลิกต่อกับเครื่องวัด
ค) แผ่นสอบเทียบ ง) หน้าจอแสดงผล

6.1.2.3 ขั้นตอนการทดสอบค่าความขรุขระผิว

1. นำเข็มวัดต่อเข้ากับตัวแขน
2. นำแผ่นสอบเทียบติดตั้งลงบนฐานจับชิ้นงาน
3. กดปุ่ม start และ enter พร้อมกัน จากนั้นกดปุ่ม start อีกครั้ง เพื่อเริ่มการคาร์ลิเบรต (Calibrate) ชิ้นงาน
4. หลังจากชิ้นงานได้ทำการคาร์ลิเบรตแล้ว ให้นำชิ้นงานจริงมาติดตั้งลงบนฐานจับได้เลย จากนั้นกด start เพื่อทำการวัดค่า
5. หน้าจอจะแสดงผลเป็นหน่วยไมโครเมตร

6.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

6.2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. ท่อทองแดงชนิด L ตามมาตรฐาน ASTM B88 [12] ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 15.875 มิลลิเมตร ความหนาท่อ 1.1176 มิลลิเมตร ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติเชิงกลดังตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 ท่อทองแดงชนิด L ตามมาตรฐาน ASTM B88 5/8 นิ้ว

ตารางที่ 6.1 องค์ประกอบทางเคมีของท่อทองแดง UNS No. C12200 [51]

C	Fe	Mn	Si	Cu	P	S
0.1567	98.7117	0.4349	0.3348	0.15769	≤ 0.0022	≤ 0.0058

ตารางที่ 6.2 คุณสมบัติเชิงกลของท่อทองแดงที่ใช้ในการตั้งขึ้นรูปแบบมีแมนเหลว

Young's Modulus, E (MPa)	117000
Yield Stress, σ_Y (MPa)	120
Poisson's Ratio, ν	0.31
Die Half-Angle, α (Degree)	15

2. แมนเดรลที่ใช้ในการทดลอง คือ น้ำสะอาด, น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40

3. สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง คือ น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40, น้ำมันปาล์ม และ

โซเดียมสเตียเรท

โดยแสดงค่าความหนาแน่นและความหนืด ดังตารางที่ 6.3 และตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.3 ค่าความหนาแน่นของสารที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสที่ใช้ในการทดลอง [49]

สารที่ใช้ในการทดลอง	ความหนาแน่น (kg/m^3)
น้ำสะอาด	998
น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40	880
โซเดียมสเตียเรท	941
น้ำมันปาล์ม	898

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.4 ค่าความหนืดของสารที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสที่ใช้ในการทดลอง [49]

สารที่ใช้ในการทดลอง	ความหนืด (N s/m ²)
น้ำสะอาด	0.000550
น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40	0.005700
โซเดียมสเตียเรท	0.001097
น้ำมันปาล์ม	0.026400

6.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดอุปกรณ์จับตาย ออกแบบชุดจับตายให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร โดยจะต้องประกอบด้วยชุดจับตายที่เหมาะสมและไม่ยุ่งยากซับซ้อนในการประกอบเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดึง UTM แสดงดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 ชุดอุปกรณ์จับแม่พิมพ์

2. ดาย สำหรับด้ายที่ใช้ในการทดลองทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งมีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 6.5 โดยจะต้องมีค่าความเผื่อที่ยอมรับได้และมีขนาดที่เป็นมาตรฐานของผู้ผลิตดังตารางที่ 6.6 และ 6.7 ตามลำดับ ซึ่งที่นำมาใช้ในการทดลอง คือ ชนิด W108 และ W109 ซึ่งทำให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดลดลงเป็น 20 เปอร์เซ็นต์, 35 เปอร์เซ็นต์ และ 50 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 ชุดแม่พิมพ์ครึ่งมูแม่พิมพ์ 15 องศา ที่ขนาดการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับร้อยละ ก) 20 ข) 35 และ ค) 50

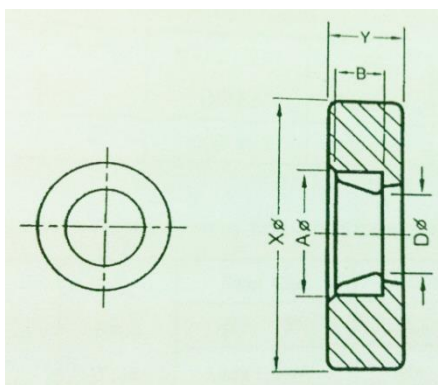
ตารางที่ 6.5 ค่าคุณสมบัติของดาบที่ใช้ในการทดลอง [18]

GRADE	WC (%)	CO (%)	HARDNESS (HRA)	TRS (kg/mm ²)	PARTICAL SIZE (μ m)
E10	94	6	89.63-90.7	260 over	3

ตารางที่ 6.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความเผื่อของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ยอมรับได้ [18]

Hole Diameter D, ϕ	Tolerance of D, ϕ
0.2-0.5	0-0.01
0.5-2.0	0-0.015
2.0-3.2	0-0.020
3.2-6.0	0-0.030
6.0-12.0	0-0.040
12.0-25.0	0-0.060
25.0-over	0-0.100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7 ขนาดของแม่พิมพ์ตามมาตรฐานของบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 6.7 รายละเอียดค่าตัวแปรที่เป็นมาตรฐานของผู้ผลิต [18]

TYPE	Range D mm	Steel case		Carbide Nib	
		X	Y	A	B
		mm	mm	mm	mm
W 102	0.7-1.5	24	12	9	6
W 103	1.5-2.5	30	15	12	8
W 104	2.5-4	42	20	15	10
W 105	4-6	55	24	20	14
W 106	6-8	60	28	25	18
W 107	8-10	70	35	30	22
W 108	10-13	85	40	35	25
W 109	11-16	100	45	40	27
W 110	16-20	125	50	50	30
W 111	20-26	145	60	60	35
W 112	26-32	175	70	70	40
W 113	32-36	195	80	80	45
W 114	38-46	215	96	90	50
W 115	46-54	230	90	100	50
W 116	54-64	240	90	110	50
W 117	64-74	260	100	120	50
W 118	74-87	280	100	130	50
W 119	84-94	300	100	140	50
W 120	94-104	300	100	150	50

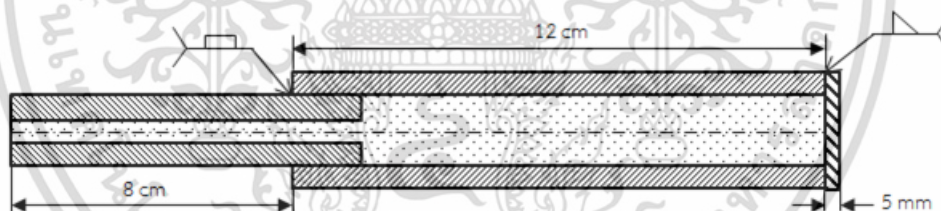
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 วิธีการทดลอง

ในการทดลองจะทำการดัดขนาดท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกก่อนดัดเท่ากับ 15.875 มิลลิเมตร และความหนาของท่อเท่ากับ 1.12 มิลลิเมตร ผ่านแม่พิมพ์ที่มีขนาดครึ่งมมแม่พิมพ์เท่ากับ 15 องศา ให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดลดลง 20, 35 และ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยมียาละเอียดขั้นตอนดังนี้

1. นำท่อทองแดงแบ่งตัดให้มีมีความยาวเท่ากับ 12 เซนติเมตร
2. นำเหล็กเพลตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 มิลลิเมตร ยาว 12 เซนติเมตร มากลึงให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 10.42 มิลลิเมตร, 11.78 มิลลิเมตร และ 13.29 มิลลิเมตร พร้อมทั้งเจาะรูภายในตลอดทั้งแท่งเหล็กมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร
3. นำท่อทองแดงในข้อที่ 1 มาเชื่อมติดกับแกนเหล็กหลงในข้อที่ 2 จากนั้นทำการเชื่อมปิดท้ายท่อทองแดงด้วยแผ่นเหล็กบาง ที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร
4. ภายในท่อทองแดงบรรจุน้ำสะอาด และน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 เพื่อใช้เป็นแมนเดรลเหลว พร้อมปิดปลายด้านแกนเหล็กด้วยอ็อกซี่ เพื่อกันไม่ให้อากาศเข้าไปภายในและพื้นที่ระหว่างผิวภายนอกท่อทองแดงกับแม่พิมพ์บรรจุน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40, น้ำมันปาล์ม และโซเดียมสเตียเรทเพื่อใช้เป็นสารหล่อลื่น

โดยแสดงแผนภาพท่อทองแดงและแกนเหล็กดังรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 แผนภาพท่อทองแดงและแกนเหล็ก

5. จากนั้นติดตั้งอุปกรณ์และชุดทดลองที่สร้างขึ้นลงบนเครื่อง Universal Testing Machine โดยใส่ท่อทองแดงเข้าไปในชุดอุปกรณ์จับตายและชุดหัวดัดท่อทองแดงที่ออกแบบมาเป็นพิเศษ โดยศึกษาที่อัตราเร็วในการดัดขึ้นรูป 30 มิลลิเมตรต่อนาที แล้วบันทึกค่าแรงดัดโดยใช้หน่วยเป็นกิโลนิวตัน จากนั้นนำชิ้นทดลองที่ผ่านการดัดขึ้นรูปแล้ว ไปหาค่าความขรุขระผิว โดยได้ทำการทดลองทั้งหมดจำนวน 24 ชิ้นงาน โดยทำซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 6.8

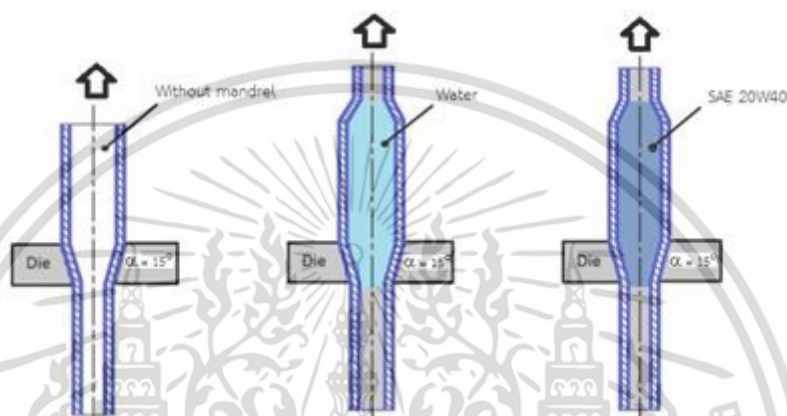


รูปที่ 6.9 ขั้นตอนการเตรียมการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการดำเนินการทดลองจะทำการตั้งค่าต่างๆในโปรแกรม Win Test ของเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ก่อนทำการทดลองดังนี้

1. อัตราเร็วในการดึง 30 มิลลิเมตรต่อนาที
2. แรงดึงสูงสุด 50 กิโลนิวตัน
3. ตั้งชนิดการทดสอบเป็นทดสอบการดึง (Tensile Test)
4. อุณหภูมิทดลอง คือ 25 องศาเซลเซียส



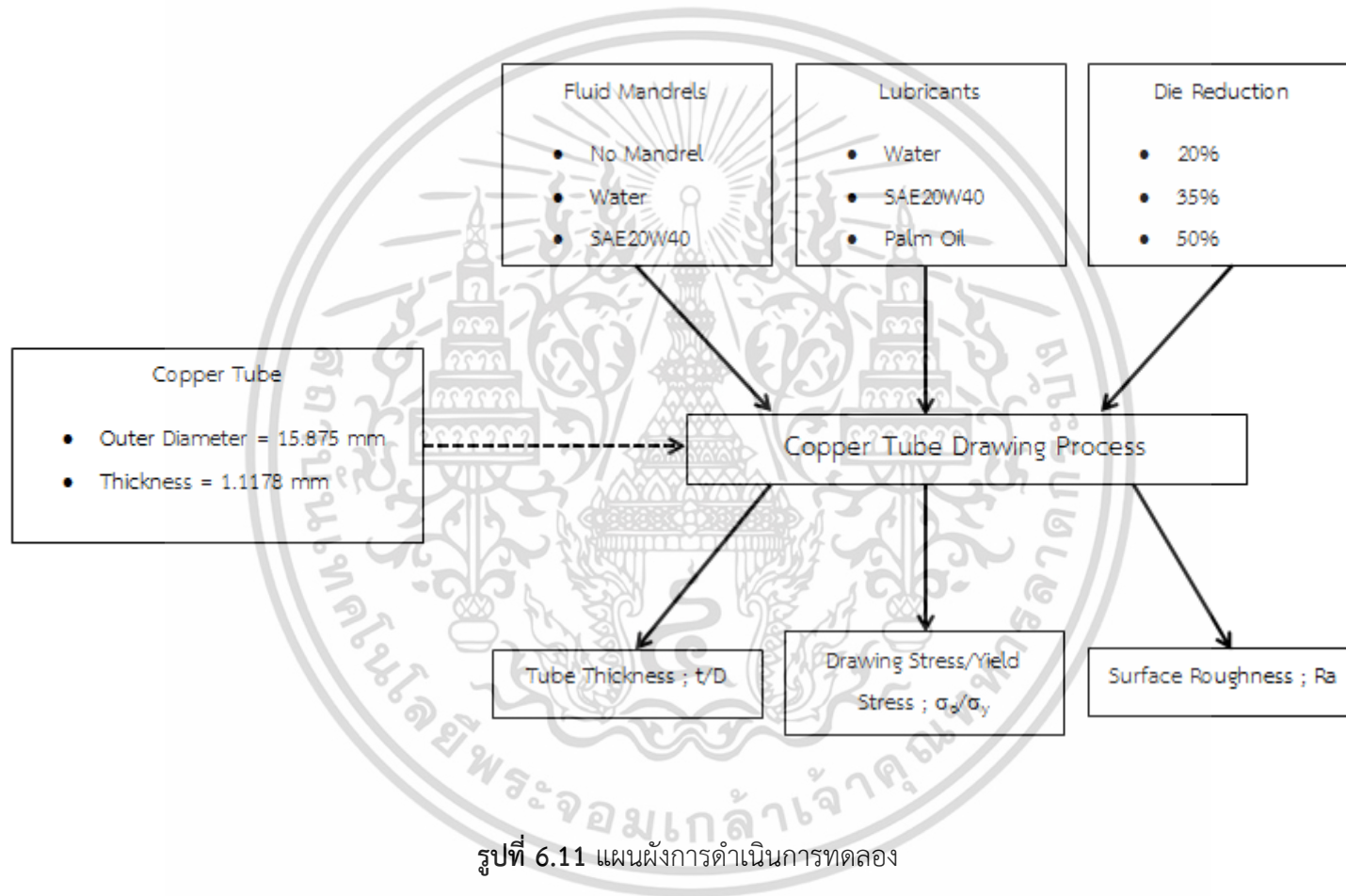
รูปที่ 6.10 ตัวอย่างสภาวะการทดลอง

ตารางที่ 6.8 สภาวะการทดลอง

สารหล่อลื่น	แมนเดรล	อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (%)		
		20	35	50
ไม่มี	ไม่มี	(1)	(4)	(7)
ไม่มี	น้ำสะอาด	(2)	(5)	(8)
ไม่มี	SAE 20W40	(3)	(6)	(9)
SAE 20W40	ไม่มี	(10)	(13)	(16)
SAE 20W40	น้ำสะอาด	(11)	(14)	(17)
SAE 20W40	SAE 20W40	(12)	(15)	(18)
โซเดียมสเตียเรท	ไม่มี	(19)	N/A	N/A
โซเดียมสเตียเรท	น้ำสะอาด	(20)	N/A	N/A
โซเดียมสเตียเรท	SAE 20W40	(21)	N/A	N/A
น้ำมันปาล์ม	ไม่มี	(22)	N/A	N/A
น้ำมันปาล์ม	น้ำสะอาด	(23)	N/A	N/A
น้ำมันปาล์ม	SAE 20W40	(24)	N/A	N/A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยวิธีการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



บทที่ 7

ผลการทดลอง

7.1 ผลการทดลอง

หลังจากได้ทำการดัดขึ้นรูปท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของผนังท่อ เริ่มต้นเท่ากับ 15.88 มิลลิเมตรและ 1.12 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยบรรจุของเหลวที่ทำหน้าหน้าที่เป็นแมนเดรลไว้ภายใน รวมทั้งผลิตภัณฑ์หล่อลื่นที่เคลือบอยู่บริเวณผิวด้านนอกของท่อ จากนั้นดัดผ่านแม่พิมพ์ที่มีครึ่งมุมแม่พิมพ์เท่ากับ 15 องศา เพื่อลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลงร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยมีอัตราเร็วในการดัดขึ้นรูปเท่ากับ 30 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าหลังจากทำการดัดขึ้นรูปท่อทองแดงรูปร่างของท่อทองแดงที่ได้หลังดัดมีขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานลดลงตามขนาดของแม่พิมพ์ที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 7.1

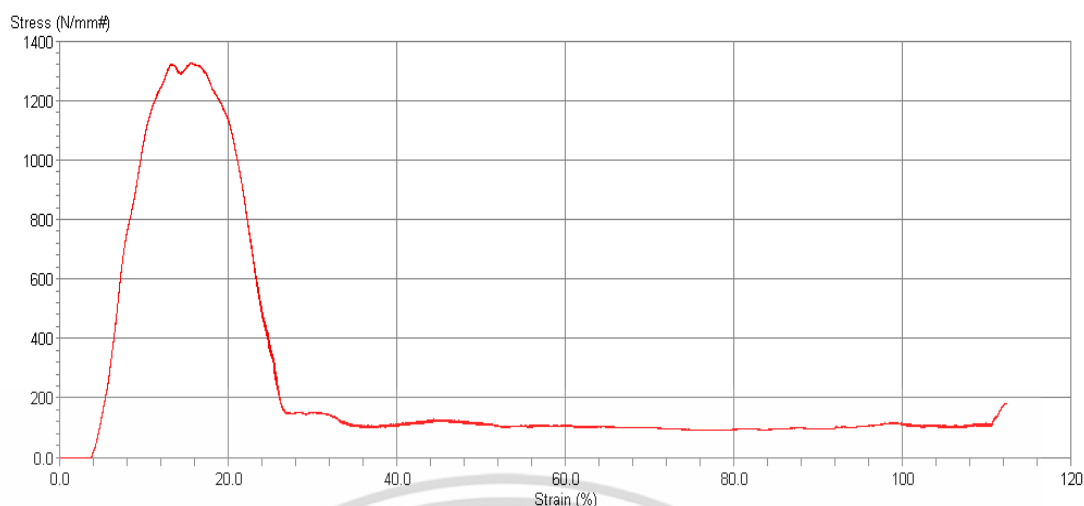


รูปที่ 7.1 ท่อทองแดงหลังดัดขึ้นรูปที่อัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ ก) 20% ข) 35% และ ค) 50%

7.1.1 กราฟแรงดัดขึ้นงาน

ในการดัดขึ้นรูปท่อทองแดงในแต่ละครั้ง เครื่องดัดขึ้นงานจะทำการประมวลผลออกมาในรูปของกราฟระหว่างแรงดัดกับระยะยืด ผ่านโปรแกรม Win Test ได้กราฟแสดงดังรูปที่ 7.2

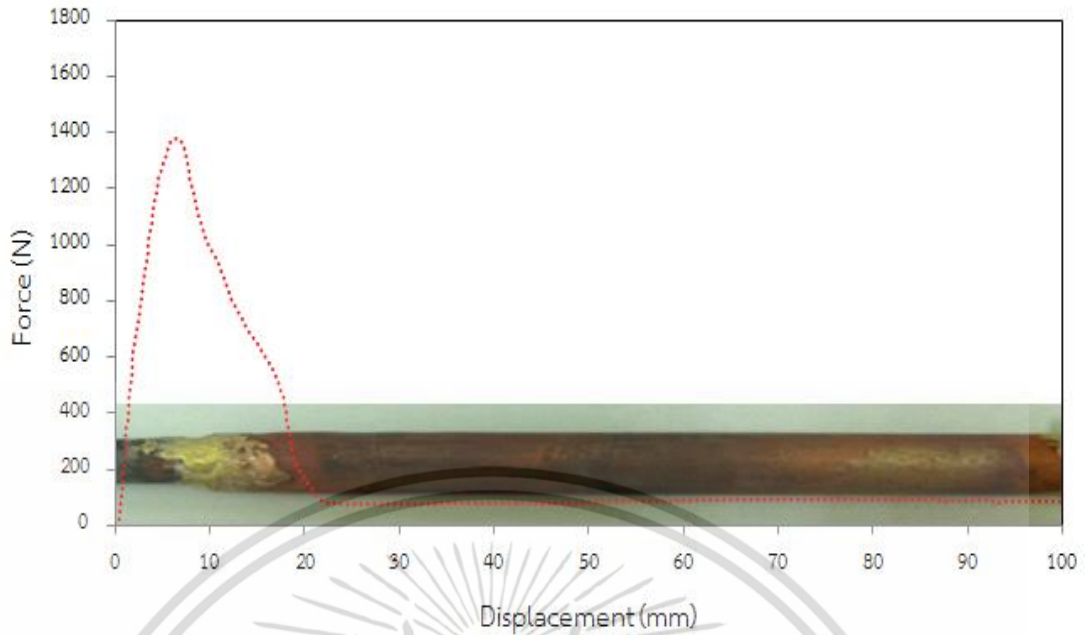
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.2 กราฟระหว่างแรงดึงกับระยะยืด แสดงผลผ่านโปรแกรม Win Test

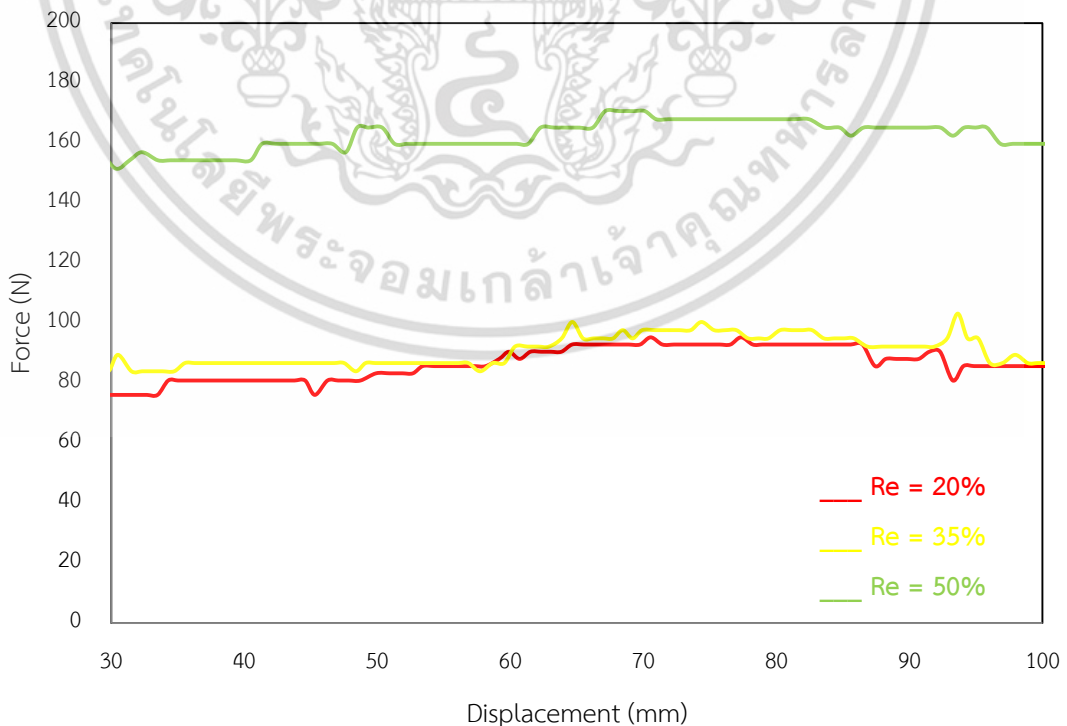
จากรูปที่ 7.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะยืดที่ได้จากโปรแกรม Win Test พบว่าจุดที่แรงดึงมีค่าสูงสุด คือส่วนที่ท่อทองแดงถูกเชื่อมติดกับแกนเหล็ก ซึ่งในงานวิจัย จะไม่นำช่วงนี้มาใช้ จากนั้นแรงดึงจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อท่อทองแดงถูกดึงผ่านแม่พิมพ์ และจะมีค่าแรงดึงคงที่ในช่วง 30 มิลลิเมตรเป็นต้นไป ซึ่งช่วงที่แรงอยู่ในสภาวะคงที่นี้ เนื่องจากท่อทองแดงได้ถูกดึงพันแม่พิมพ์มาแล้ว ซึ่งจะเป็นช่วงที่นำมาวิเคราะห์ผลของแรงว่าส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์หลังผ่านการดึงขึ้นรูปอย่างไรบ้าง

โดยในรูปที่ 7.3 ได้แสดงถึงตำแหน่งของกราฟที่ได้จากเครื่องดึงขึ้นงานเทียบกับชิ้นงานจริง โดยพบว่า ในช่วงที่กราฟเริ่มคงที่คือช่วงที่ชิ้นงานผ่านการดึงขึ้นรูปแล้ว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาที่ใกล้เคียงกับขนาดของแม่พิมพ์ที่กำหนด



รูปที่ 7.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและระยะยืดเทียบกับช่วงการดึงท่อทองแดงขณะทำการดึงขึ้นรูป

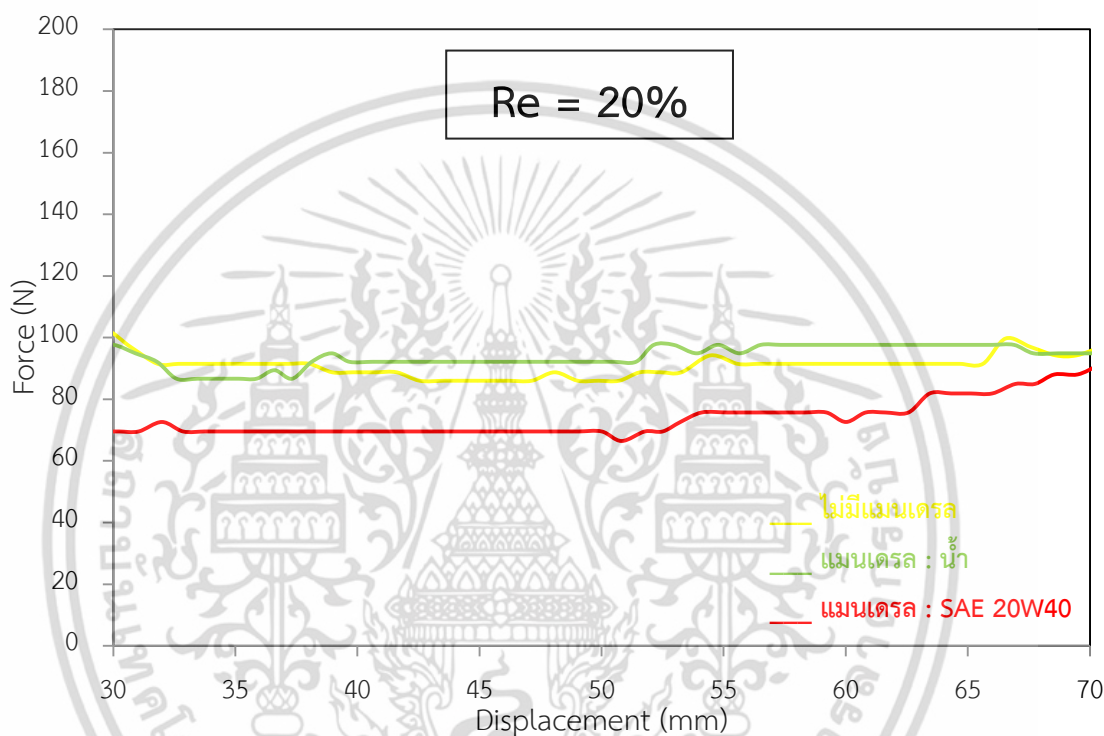
เมื่อได้กราฟระหว่างแรงดึงกับระยะยืดของชิ้นงานที่มีสภาวะการทดลองแตกต่างกันแล้ว ได้ผลของแรงดึงดังรูปที่ 7.4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของแรงดึงที่การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20, 35 และ 50 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 7.4 กราฟระหว่างแรงดึงกับระยะยืด ขณะทำการดึงขึ้นรูปท่อทองแดงที่การพื้นที่หน้าตัดต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 7.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดิ่งกับระยะยืด ขณะทำการดิ่งขึ้นรูปท่อทองแดง ที่การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่างๆ พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการดิ่งลดขนาดพื้นที่หน้าตัดน้อย แรงที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูปหลังผ่านแม่พิมพ์แล้วจะมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ผ่านการดิ่งลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมาก

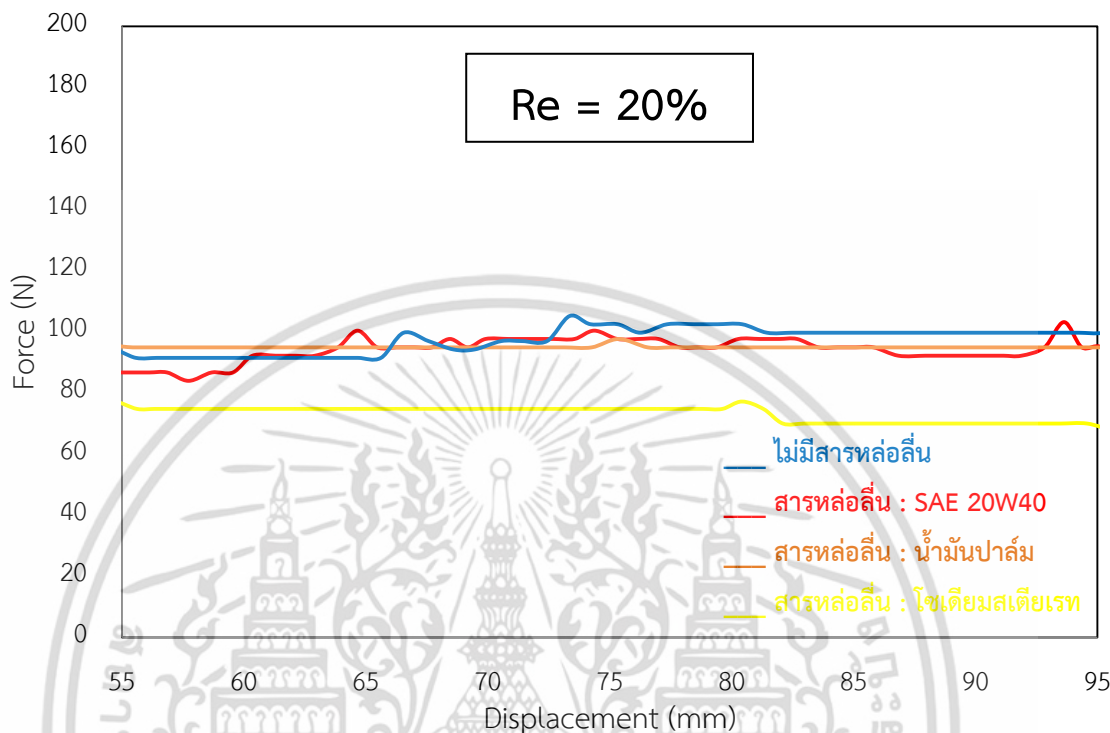
นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาแรงที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูป เมื่อทำการดิ่งขึ้นรูปแบบไม่มีแมนเดรล และดิ่งขึ้นรูปแบบมีแมนเดรลเหลวชนิดต่างๆคือ น้ำสะอาด และน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 7.5



รูปที่ 7.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดิ่งกับระยะยืด ขณะทำการดิ่งขึ้นรูปที่การดิ่งลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อภายในท่อทองแดงบรรจุแมนเดรลชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 7.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดิ่งกับระยะยืดขณะทำการดิ่งขึ้นรูปที่การดิ่งลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อภายในท่อทองแดงบรรจุแมนเดรลชนิดต่างๆ พบว่าเมื่อทำการดิ่งขึ้นรูปท่อทองแดงที่การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์นั้น ชิ้นงานที่ภายในบรรจุ น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 จะใช้แรงในการดิ่งขึ้นรูปต่ำสุด รองลงมาคือน้ำสะอาด ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของของเหลว คือของเหลวที่มีความหนาแน่นต่ำจะส่งผลให้แรงที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูปต่ำ ในขณะที่ของเหลวที่มีความหนาแน่นสูงจะส่งผลให้แรงที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูปสูง

รวมทั้งได้ทำการดิ่งขึ้นงานโดยให้ภายนอกท่อทองแดงมีสารหล่อลื่น คือ น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40, โซเดียมสเตียเรท และ น้ำมันปาล์ม ได้ผลการทดลองของแรงที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูปดังรูปที่ 7.6

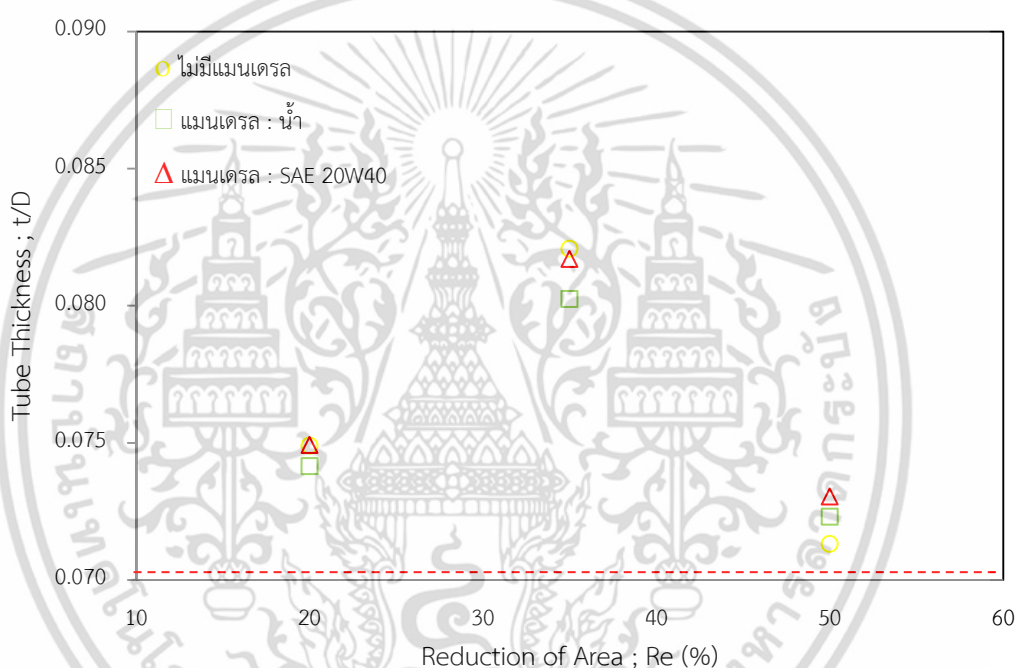


รูปที่ 7.6 กราฟระหว่างแรงดิ่งกับระยะยืด ขณะทำการดิ่งขึ้นรูปที่การดิ่งลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อภายนอกท่อทองแดงมีสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 7.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดิ่งกับระยะยืด ขณะทำการดิ่งขึ้นรูปที่การดิ่งลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อภายนอกท่อทองแดงมีสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ พบว่าเมื่อทำการดิ่งขึ้นรูปท่อทองแดงที่การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ ชิ้นงานที่ภายนอกมีโซเดียมสเตียเรทเป็นสารหล่อลื่นจะให้ค่าแรงดิ่งต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของอิทธิพลและสมชัย [36] คือ สารหล่อลื่นที่มีความหนืดต่ำ หรือสารหล่อลื่นที่เป็นของแข็ง จะทำให้แรงที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูปต่ำ และชิ้นงานที่มีน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40, น้ำมันปาล์ม และไม่มีแมนเดรล จะให้ค่าแรงดิ่งขึ้นรูปที่สูงขึ้นตามลำดับ

7.1.2 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อการลดพื้นที่หน้าตัด (Tube Thickness vs Reduction of Area)

ในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อนั้น ถ้าอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (Tube Thickness; t/D) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ท่อที่ผ่านการดึงขึ้นรูปลดพื้นที่หน้าตัดลงหลายครั้งนั้น มีโอกาสตีตันได้ [17] ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้งค่าอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเริ่มต้นหรือท่อที่ใช้เป็นชิ้นทดสอบนั้น มีค่าเท่ากับ 0.0704 จากการศึกษาโดยการทดลอง พบว่าอัตราส่วนความหนาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหลังดึงขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ที่มีครึ่งมุมแม่พิมพ์เท่ากับ 15 องศา ที่อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20, 35 และ 50% ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 7.7 สำหรับชิ้นงานที่ขณะดึงขึ้นรูปไม่มีสารหล่อลื่น



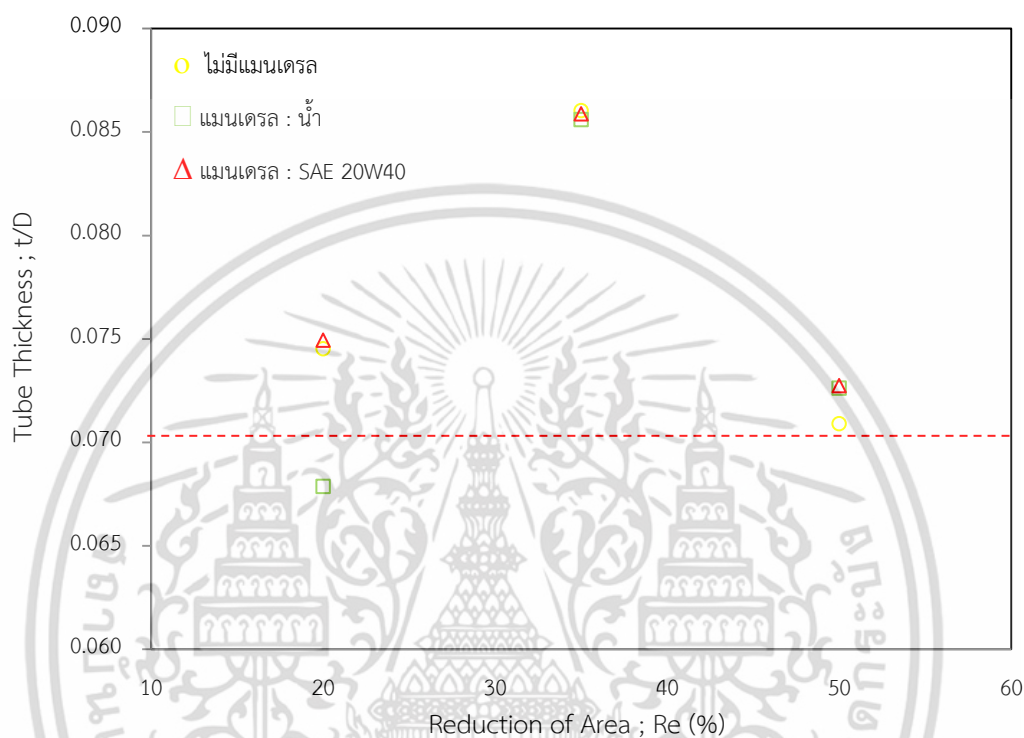
รูปที่ 7.7 อัตราส่วนความหนาท่อต่อการลดพื้นที่หน้าตัดเมื่อไม่มีสารหล่อลื่น

จากรูปที่ 7.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาท่อต่อการลดพื้นที่หน้าตัดเมื่อไม่มีสารหล่อลื่น โดยเส้นประสีแดงแสดงถึงจุดอ้างอิง (คือ จุดที่อัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 0.0704) จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อของชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรลและมีแมนเดรลเหลวจะมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ร้อยละ 20 และอัตราส่วนนี้จะเพิ่มสูงขึ้นที่การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ร้อยละ 35 และยังพบว่าเมื่อทำการดึงลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มมากขึ้น คือที่ร้อยละ 50 ค่าอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อของทั้งชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรลและมีแมนเดรลเหลว จะมีค่าใกล้เคียงกับจุดอ้างอิงมากที่สุด และพบว่าชิ้นงานที่มีน้ำเป็นแมนเดรลเหลวจะให้ค่าอัตราส่วนความหนาต่อค่าชิ้นงานที่มีน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 เป็นแมนเดรลเหลวอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นพบว่า ช่วงขนาดการลดพื้นที่หน้าตัดที่ร้อยละ 50 ที่ในขณะดึงขึ้นรูปไม่มีสารหล่อลื่น ให้ค่าอัตราส่วนความหนาของท่อได้ใกล้เคียงกับจุดอ้างอิงมากที่สุด ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการพิจารณากำหนดค่าการดึงลดพื้นที่หน้าตัดเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป

ในขณะเดียวกันได้ทำการทดลองดึงขึ้นรูปโดยมีสารหล่อลื่นคือ น้ำมันเครื่องเกรด SAE20W40 ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 7.8

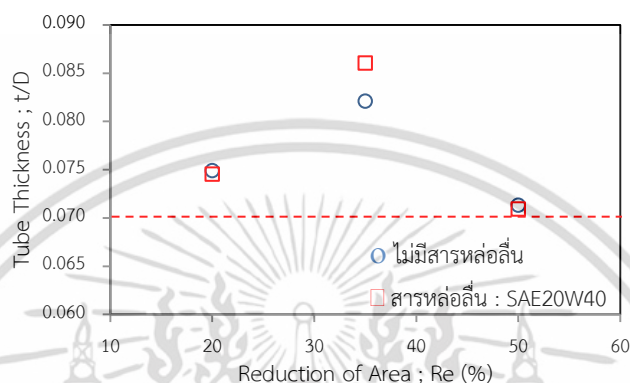


รูปที่ 7.8 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อการลดพื้นที่หน้าตัด เมื่อมีน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 เป็นสารหล่อลื่น

จากรูปที่ 7.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาของท่อต่อการลดพื้นที่หน้าตัด เมื่อมีน้ำมันเครื่องเกรด SAE20W40 เป็นสารหล่อลื่น โดยเส้นประสีแดงแสดงถึงจุดอ้างอิง (คือ จุดที่อัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 0.0704) ที่อัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ร้อยละ 20 ของชิ้นงานที่ภายในมีน้ำเป็นแมนเดรลเหลว ให้ค่าอัตราส่วนความหนาของท่อต่ำกว่าจุดอ้างอิง ที่ค่าเท่ากับ 0.06788 และค่าอัตราส่วนความหนานี้จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการดึงขึ้นรูปที่การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ร้อยละ 35 อีกทั้งยังพบว่า เมื่อทำการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมากขึ้นคือที่ร้อยละ 50 ค่าอัตราส่วนความหนาของท่อจะมีค่าใกล้เคียงกับจุดอ้างอิงมากที่สุด

ดังนั้นพบว่า ช่วงขนาดการลดพื้นที่หน้าตัดที่ร้อยละ 50 ที่ในขณะดึงขึ้นรูปที่มีสารหล่อลื่น ให้ค่าอัตราส่วนความหนาของท่อได้ใกล้เคียงกับจุดอ้างอิงมากที่สุด ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการพิจารณากำหนดค่าการดึงลดพื้นที่หน้าตัดเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป

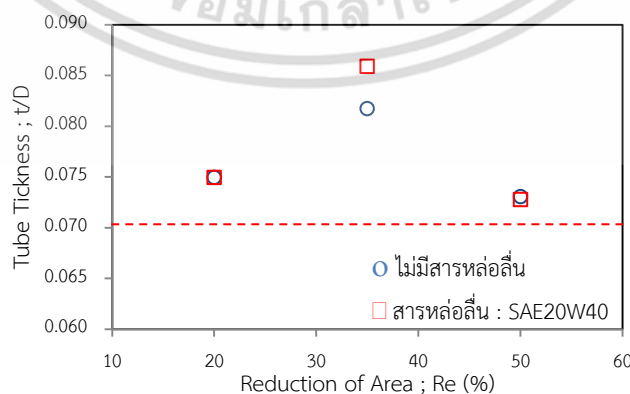
อีกทั้งได้ทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อระหว่างชิ้นงานที่ไม่มีสารหล่อลื่นและไม่มีสารหล่อลื่น แสดงดังรูปที่ 7.9 พบว่าทั้งชิ้นงานที่ไม่มีสารหล่อลื่นและมีสารหล่อลื่นจะให้ค่าอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อใกล้เคียงกันมาก แต่ที่สังเกตได้คือ ค่าอัตราส่วนนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับจุดอ้างอิงในช่วงที่ทำการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดร้อยละ 50 อีกทั้งผลการทดลองที่การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ร้อยละ 35 นั้น สารหล่อลื่นไม่ส่งผลต่อชิ้นงานทุกประเภท



ก) ไม่มีแมนเดรล



ข) มีน้ำเป็นแมนเดรลเหลว



ค) มีน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 เป็นแมนเดรลเหลว

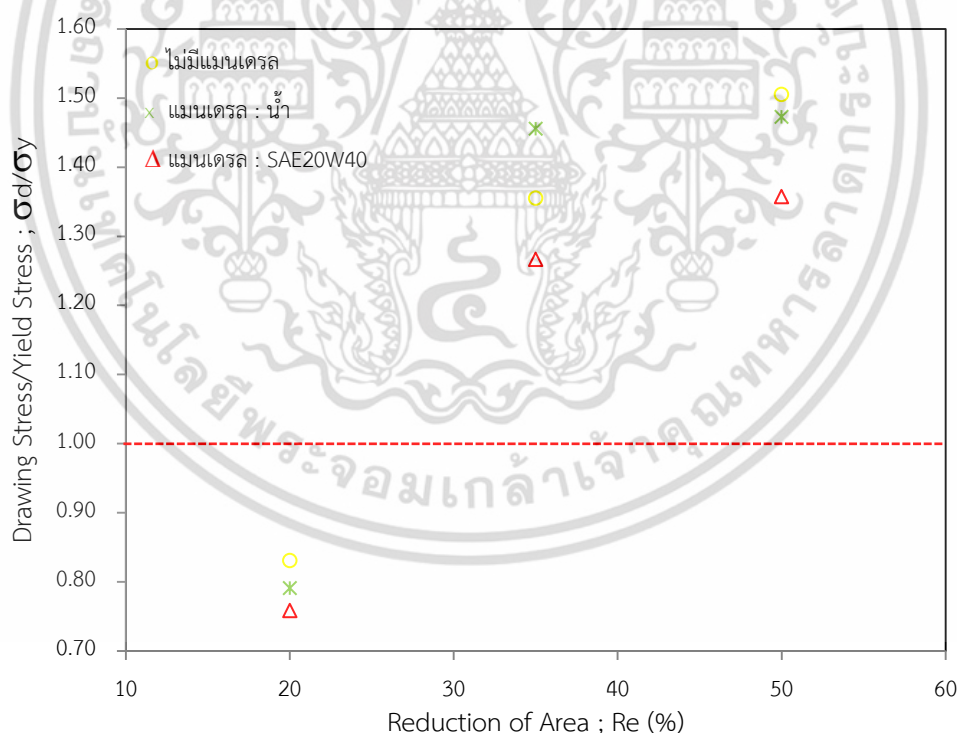
รูปที่ 7.9 อัตราส่วนความหนาต่อต่อการลดพื้นที่หน้าตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นช่วงการลดพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสม ที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออย่างชัดเจนที่สุดคือที่ 50% ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการพิจารณาเพื่อกำหนดค่าการดึงลดพื้นที่หน้าตัดใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป

7.1.3 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อการลดพื้นที่หน้าตัด (Drawing Stress vs Reduction of Area)

ในขณะที่ทำการดึงขึ้นรูปท่อโดยอาศัยแรงกระทำจากภายนอกกระทำกับชิ้นงาน จะทำให้ชิ้นงานที่ดึงพื้นแม่พิมพ์ออกมาแล้ว เกิดความเค้นภายในที่เรียกว่า ความเค้นดึง ซึ่งแรงนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปทางโครงสร้างของชิ้นงาน จึงได้ทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างความเค้นดึงและความเค้นจุดคราก (Yield Stress) ซึ่งค่าอัตราส่วนนี้จะต้องมีค่าไม่เกิน 1.0 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่ทำให้เมื่อขึ้นรูปแล้ว ได้ขนาดท่อที่แม่นยำตรงตามขนาดแม่พิมพ์ที่ใช้และท่อจะไม่เกิดรอยแตกหรือขาดก่อนสิ้นสุดกระบวนการ โดยได้ศึกษาอัตราส่วนความเค้นที่เป็นผลมาจากการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20, 35 และ 50% ได้ผลการทดลองดังกราฟในรูปที่ 7.10 เมื่อไม่มีสารหล่อลื่น



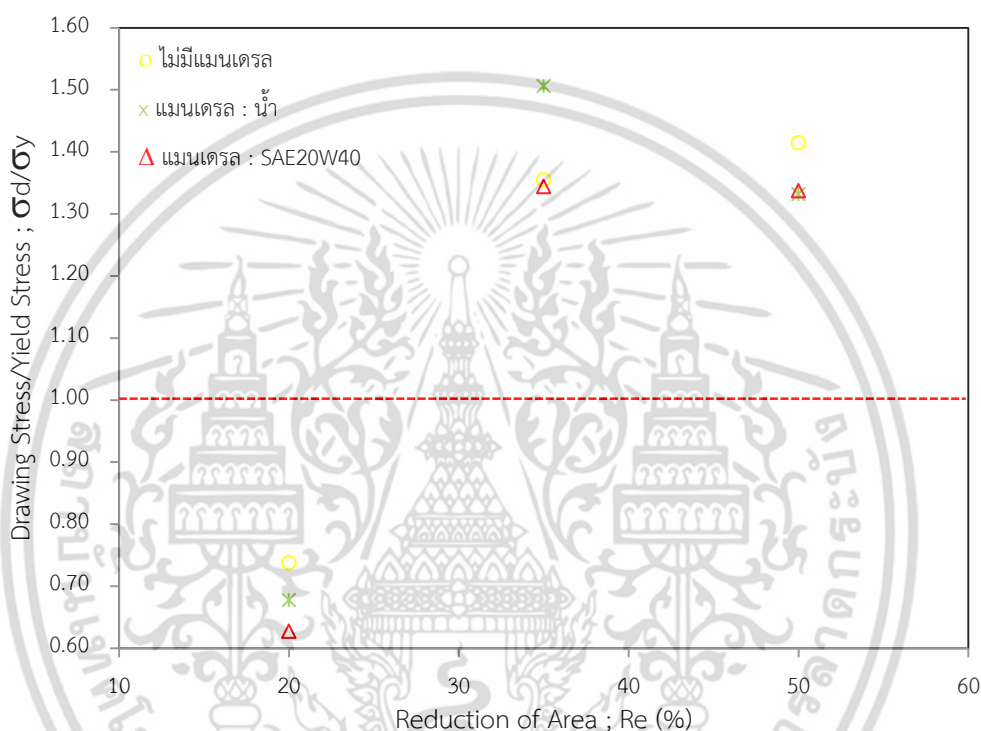
รูปที่ 7.10 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อการลดพื้นที่หน้าตัดเมื่อไม่มีสารหล่อลื่น

จากรูปที่ 7.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นดึงต่อการลดพื้นที่หน้าตัดเมื่อไม่มีสารหล่อลื่น สังเกตตามแนวเส้นประสีแดง (คือจุดอ้างอิง ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนความเค้นดึงต่อความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เค้นจุดคราก ที่สามารถยอมรับได้ มีค่าเท่ากับ 1) พบว่าชิ้นงานที่การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดร้อยละ 20 ที่ภายในไม่มีแมนเดรลเหลวและมีแมนเดรลเหลวนั้น ให้ค่าอัตราส่วนต่ำกว่าจุดอ้างอิง แต่สำหรับชิ้นงานที่ดึงลดขนาดที่ร้อยละ 35 และ 50 นั้น ค่าอัตราส่วนความเค้นที่ได้มีค่าสูงกว่าจุดอ้างอิง ซึ่งถ้านำชิ้นงานที่ผ่านการดึงที่ร้อยละเหล่านี้ไปใช้งาน จะส่งผลต่อความแข็งแรงของวัสดุที่นำไปใช้งานนั้นลดลงได้

ในขณะที่เดียวกันได้ทำการดึงขึ้นรูปโดยมีน้ำมันเครื่องเกรด SAE20W40 เป็นสารหล่อลื่น ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 7.11



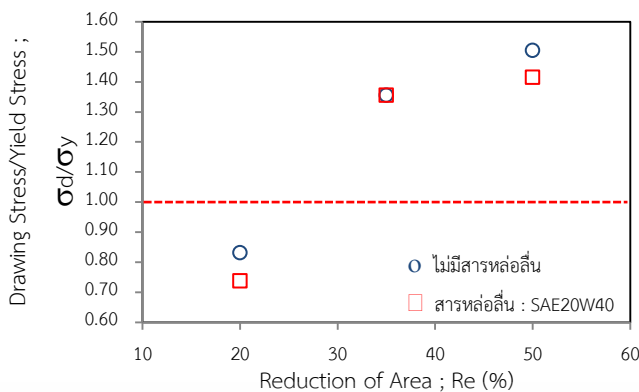
รูปที่ 7.11 อัตราส่วนความเค้นต่อการลดพื้นที่หน้าตัด เมื่อมีน้ำมันเครื่องเกรด SAE20W40 เป็นสารหล่อลื่น

จากรูปที่ 7.11 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นต่อการลดพื้นที่หน้าตัด เมื่อมีน้ำมันเครื่องเกรด SAE20W40 เป็นสารหล่อลื่น ให้ข้อมูลเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ไม่มีสารหล่อลื่น คือ เมื่อสังเกตตามแนวเส้นประสีแดง พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ร้อยละ 20 จะให้ค่าอัตราส่วนความเค้นต่ำกว่าจุดอ้างอิง และชิ้นงานที่ผ่านการลดขนาดที่ร้อยละ 35 และ 50 จะให้ค่าอัตราส่วนความเค้นที่สูงกว่าจุดอ้างอิง

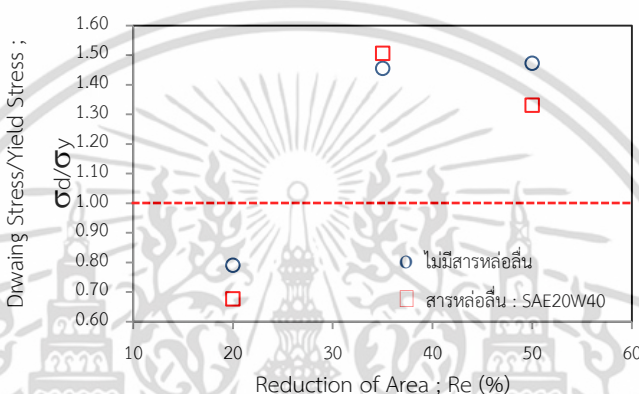
และพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการดึงขึ้นรูปที่ผ่านการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ร้อยละ 20 ที่ภายในมีน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 เป็นแมนเดรลเหลวจะให้ค่าความเค้นดึงต่ำสุด

รวมถึงได้ทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนความเค้นดึงของแมนเดรลชนิดต่างๆ เมื่อขึ้นงานผ่านการดึงขึ้นรูปแบบไม่มีสารหล่อลื่นและมีสารหล่อลื่น ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 7.12

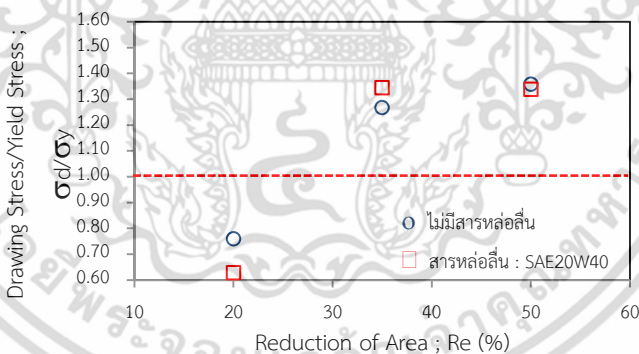
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ไม่มีแมนเดรล



ข) มีน้ำเป็นแมนเดรลเหลว



ค) มีน้ำมันเครื่องเกรด SAE20W40 เป็นแมนเดรลเหลว

รูปที่ 7.12 อัตราส่วนความเค้นต่อการลดพื้นที่หน้าตัด

จากรูปที่ 7.12 พบว่าช่วงการลดพื้นที่หน้าตัดของทั้งชิ้นงานที่มีสารหล่อลื่นและไม่มีสารหล่อลื่นนั้น จะให้ค่าอัตราส่วนความเค้นเพิ่มขึ้นตามขนาดการดึงลดพื้นที่หน้าตัด แต่ช่วงที่ยอมรับได้คือ มีค่าอัตราส่วนความเค้นเท่ากับ 1.0

และพบว่าชิ้นงานที่ดึงลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ร้อยละ 20 จะให้ค่าอัตราส่วนความเค้นต่ำกว่าจุดอ้างอิง อีกทั้งพบว่าชิ้นงานที่ภายนอกมีสารหล่อลื่น คือน้ำมันเครื่องเกรด SAE10W40 ซึ่งมี

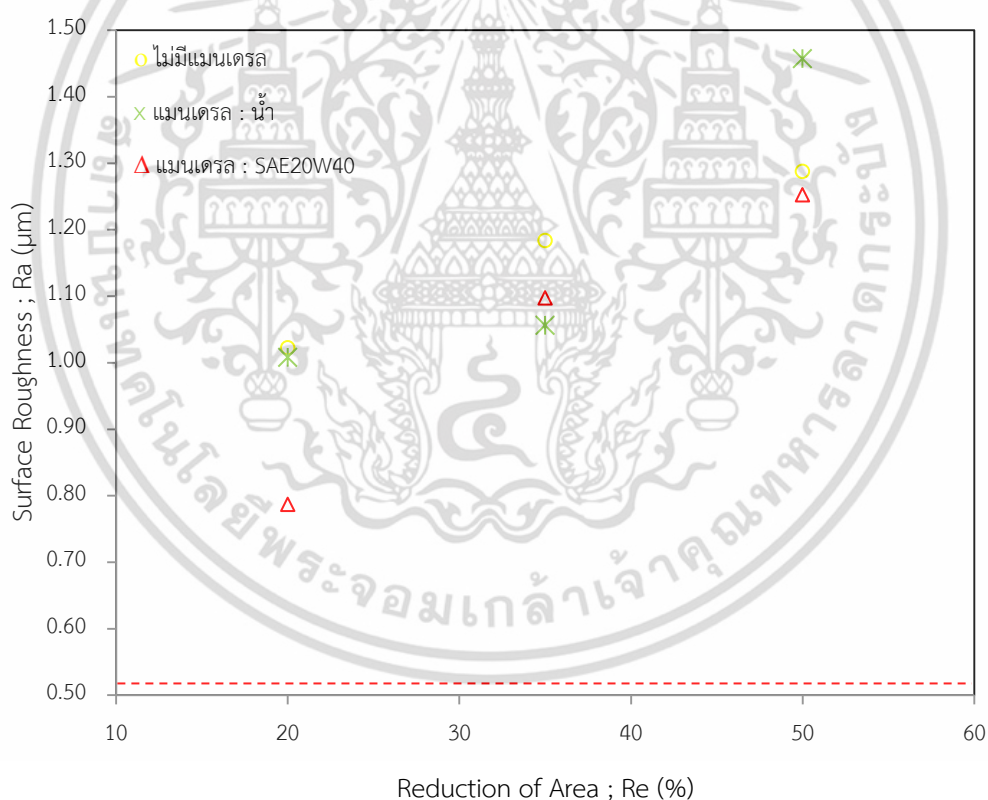
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติเป็นตัวช่วยลดแรงเสียดทานในการดึงขึ้นรูป จะให้ค่าอัตราส่วนความเค้นต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีสารหล่อลื่น

ดังนั้นช่วงการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ทำให้ได้อัตราส่วนความเค้นดีที่สุด คือ 20% โดยที่ชิ้นงานมีแมนเดรลเหลวและสารหล่อลื่นเป็นน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 ด้วย

7.1.4 ค่าความขรุขระผิวภายนอกต่อการลดพื้นที่หน้าตัด (Surface Roughness vs Reduction of Area)

ในการดึงขึ้นรูปชิ้นงานผ่านแม่พิมพ์เพื่อให้ได้ขนาดตามที่กำหนดนั้น ส่งผลให้ผิวด้านนอกของท่อเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพขึ้น ซึ่งสามารถวัดได้จากค่าความขรุขระผิวที่เกิดขึ้น โดยค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานก่อนทำการดึงขึ้นรูปจากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.521 ไมโครเมตร พบว่าค่าความขรุขระของผิวต่อการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดหลังดึงขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ที่มีครีมน้ำมันแม่พิมพ์เท่ากับ 15 องศา ที่อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20, 35 และ 50% เป็นดังแสดงในรูปที่ 7.13



รูปที่ 7.13 ค่าความขรุขระผิวภายนอกต่อการลดพื้นที่หน้าตัดเมื่อไม่มีสารหล่อลื่น

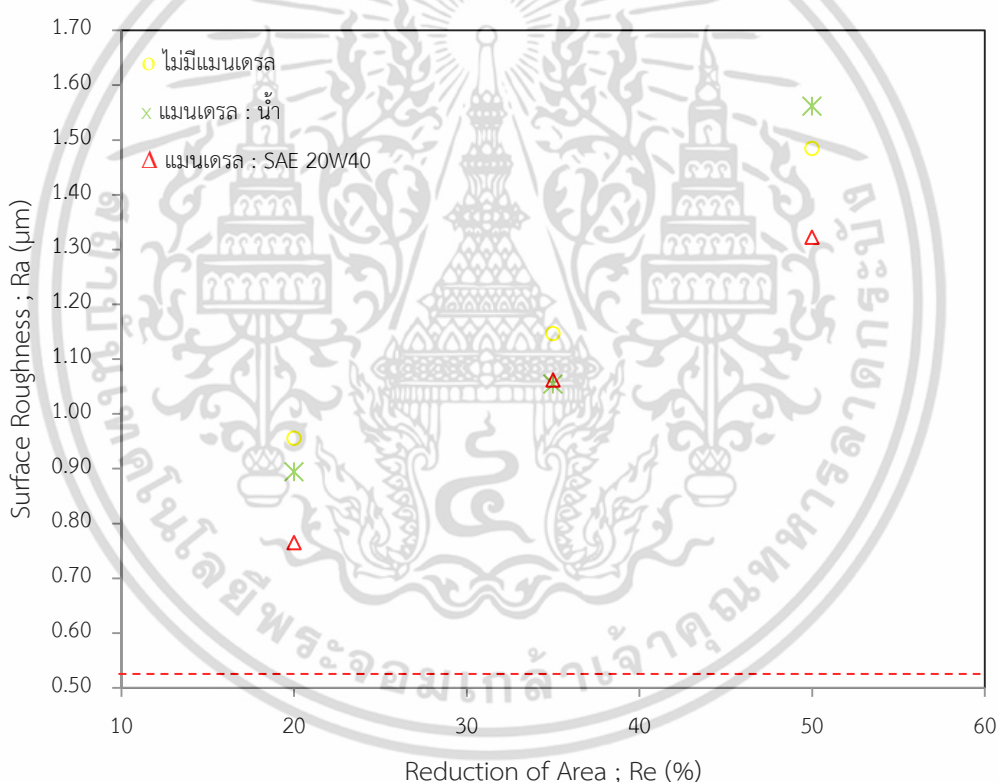
รูปที่ 7.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระผิวภายนอกต่อการลดพื้นที่หน้าตัดเมื่อไม่มีสารหล่อลื่น พบว่าชิ้นงานทุกชิ้นที่ผ่านการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดจะให้ค่าสูงกว่าจุดอ้างอิง (คือค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานภายนอกก่อนทำการดึงขึ้นรูปจากการทดลอง มีค่าเท่ากับ 0.521 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครเมตร) เนื่องจากในขณะทำการดึงขึ้นรูปเพื่อทำให้ขนาดพื้นที่หน้าตัดลดลง เกิดการเสียดสีกันระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ ทำให้กลไกการถ่ายผิวเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว อีกทั้งในการทดลองทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราเร็วเท่ากัน ทำให้ชิ้นงานที่ต้องลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมากๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงเร็วกว่าในเวลาจำกัด ส่งผลให้เกิดความขรุขระของผิวภายนอกมากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการดึงลดขนาดพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่า

พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดร้อยละ 20 ให้ค่าความขรุขระผิวต่ำที่สุด และเพิ่มขึ้นเมื่อทำการดึงขึ้นรูปที่การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมากๆ

ดังนั้นอัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวที่ดีที่สุดคือ 20%

อีกทั้งได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระผิวภายนอกต่อการลดพื้นที่หน้าตัด เมื่อมีน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 แสดงดังรูปที่ 7.14



รูปที่ 7.14 ค่าความขรุขระผิวภายนอกต่อการลดพื้นที่หน้าตัด เมื่อมีน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 เป็นสารหล่อลื่น

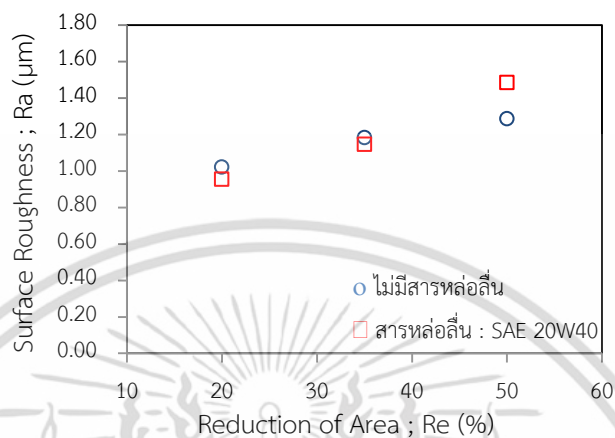
พบว่าที่การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ร้อยละ 20 จะให้ค่าความขรุขระผิวต่ำที่สุด และเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ร้อยละมากขึ้น

ดังนั้นช่วงการลดพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสม ที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ผ่าน

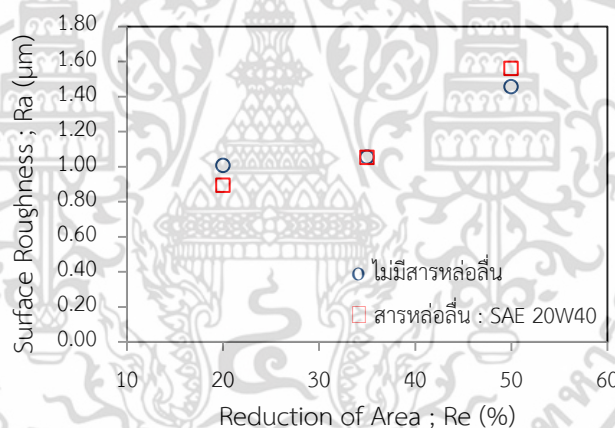
การดึงขึ้นรูปตามขนาดที่กำหนดและผิวของชิ้นงานยังคงความเรียบเนียน คือ ที่การลดขนาด เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20% ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการพิจารณากำหนดค่าการดึงลดพื้นที่หน้าตัดเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป

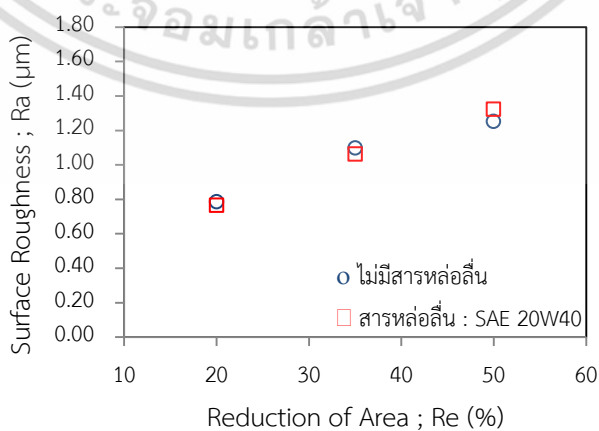
อีกทั้งได้ทำการเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวของแมนเดรลชนิดต่างๆ เมื่อขึ้นงานผ่านการดึงขึ้นรูปแบบไม่มีสารหล่อลื่นและมีสารหล่อลื่น ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 7.15



ก) ไม่มีแมนเดรล



ข) มีน้ำเป็นแมนเดรลเหลว



ค) มีน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 เป็นแมนเดรลเหลว

รูปที่ 7.15 ค่าความขรุขระผิวภายนอกต่อการลดพื้นที่หน้าตัด

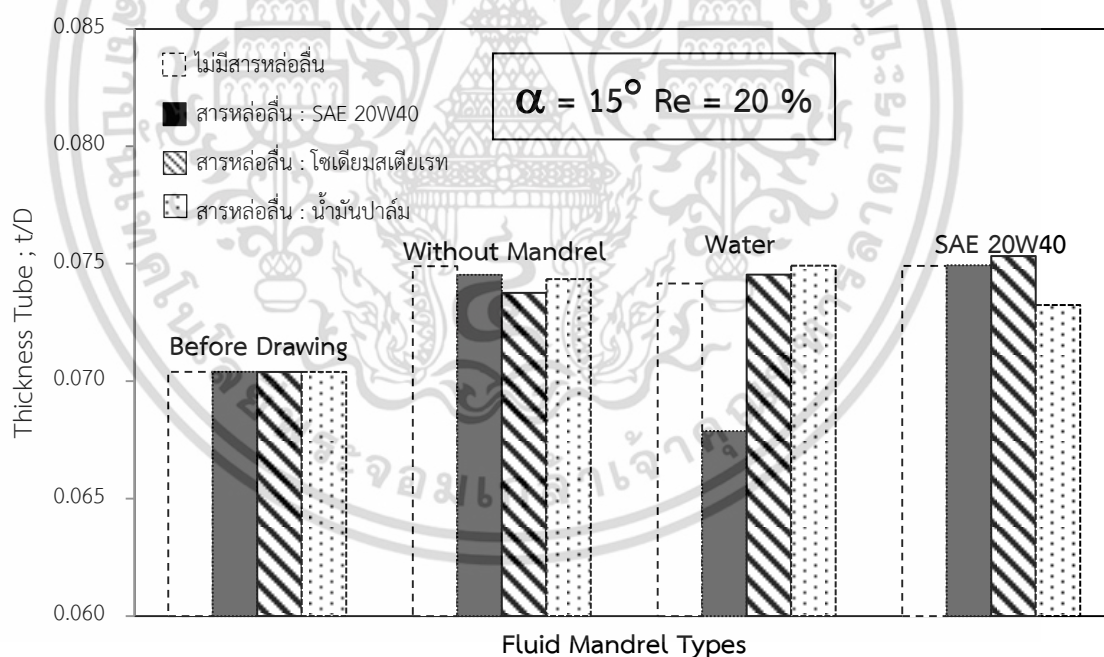
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 7.15 พบว่าค่าความขรุขระผิวจะสูงขึ้นตามอัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด โดยที่ช่วงการลดพื้นที่หน้าตัดที่ร้อยละ 20 ของทั้งชิ้นงานที่มีสารหล่อลื่นและไม่มีสารหล่อลื่น จะให้ค่าความขรุขระผิวต่ำที่สุด และยังพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการดึงขึ้นรูปโดยมีสารหล่อลื่น คือน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 นั้น จะให้ค่าความขรุขระผิวต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีสารหล่อลื่นอีกด้วย

ดังนั้นช่วงการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ทำให้ค่าความขรุขระผิวต่ำที่สุด คือ 20% โดยที่ชิ้นงานมีแมนเดรลเหลวและสารหล่อลื่นเป็นน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 ด้วย

7.1.5 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อชนิดของแมนเดรลเหลว (Tube Thickness vs Fluid Mandrel Types)

หลังจากทำการดึงขึ้นรูปท่อ โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหลังการดึงขึ้นรูปที่เป็นผลมาจากชนิดของแมนเดรลเหลว ได้ผลการทดลองดังกราฟในรูปที่ 7.16



รูปที่ 7.16 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อชนิดของแมนเดรล

จากรูปที่ 7.16 พบว่าอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อของชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรลจะให้ค่าสูงกว่าชิ้นงานที่มีแมนเดรล

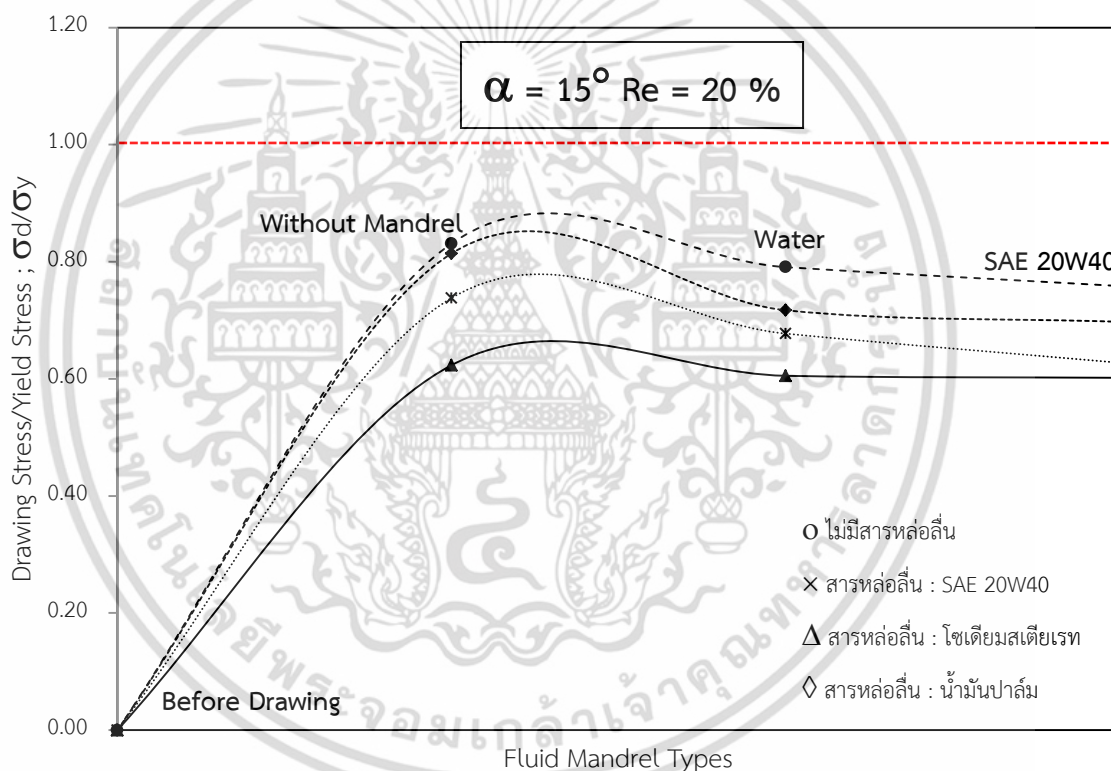
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของชิ้นงานที่มีแมนเดรลเหลวคือ น้ำซึ่งมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าแมนเดรลชนิดอื่น มีแนวโน้มช่วยลดอัตราส่วนความหนาของท่อได้ดีกว่าแมนเดรลชนิดอื่น

ดังนั้นแมนเดรลเหลวที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความหนาของท่อที่ดีที่สุด คือ น้ำ

7.1.6 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อชนิดของแมนเดรล (Drawing Stress vs Fluid Mandrel Types)

ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนความเค้นซึ่งเป็นผลมาจากชนิดของแมนเดรลเหลวในงานวิจัยครั้งนี้ ด้วย และได้ผลการทดลองดังกราฟในรูปที่ 7.17 เมื่อทำการดึงขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ที่มีครึ่งมุมแม่พิมพ์เท่ากับ 15 องศา ที่อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20% พบว่าชิ้นงานทุกชิ้นในงานทดลองสามารถนำไปใช้งานได้จริง เพราะอัตราส่วนความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่า 1.0



รูปที่ 7.17 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อชนิดของแมนเดรล

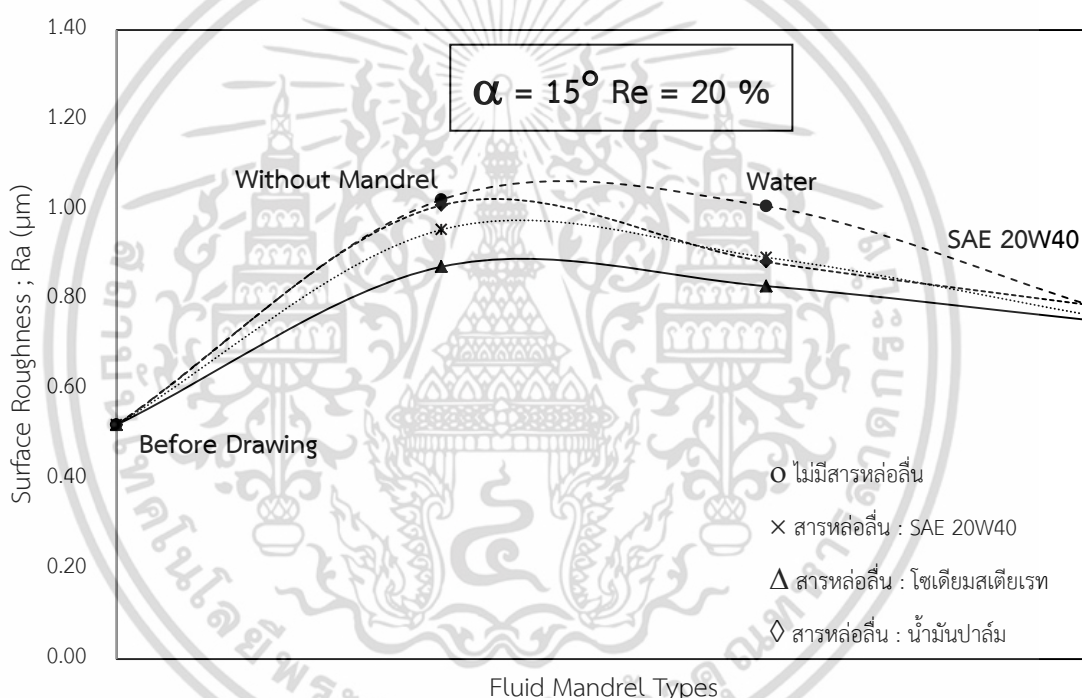
จากรูปที่ 7.17 พบว่าชิ้นงานของทุกสภาวะการทดลองสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตขั้นต่อไปได้ เพราะอัตราส่วนความเค้นดึงที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่า 1.0 สังเกตได้จากค่าความเค้นดึงที่เกิดขึ้นต่ำกว่าเส้นประสีแดง และพบว่าชิ้นงานที่ดึงขึ้นรูปโดยมีแมนเดรลเหลวจะให้ค่าอัตราส่วนความเค้นดึงต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล

พบว่าแมนเดรลเหลวที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความเค้นที่ดีที่สุดคือ น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 แต่จากการทดลองยังไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าเป็นเพราะเหตุใด ที่ทำให้ความเค้นของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นงานที่มีน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 เป็นแมนเดรลเหลวถึงมีค่าความเค้นต่ำกว่าชิ้นงานที่มีน้ำ เป็นแมนเดรลเหลว ซึ่งแมนเดรลเหลวทั้งสองชนิดนี้เป็นของเหลวที่อัดตัวได้เช่นเดียวกัน และเนื่องด้วย ความเร็วในการดึงขึ้นรูปเพียง 30 มิลลิเมตรต่อนาที จึงไม่น่าส่งผลให้ความเค้นดึงที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน อย่างเห็นได้ชัดเจנדังแสดงในรูปที่ 7.17

7.1.7 ค่าความขรุขระผิวภายนอกต่อชนิดของแมนเดรลเหลว (Surface Roughness vs Fluid Mandrels Types)

ในการทำการดึงขึ้นรูปเพื่อลดขนาดพื้นที่หน้าตัดนั้น ส่งผลให้คุณสมบัติของผิวภายนอกมีการ เปลี่ยนแปลงขึ้น โดยในหัวข้อนี้ได้นำเอาแมนเดรลเหลวมาเป็นตัวแปรในการสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่ เกิดขึ้นของผิวภายนอกหลังจากผ่านการดึงขึ้นรูปแล้ว แสดงดังรูปที่ 7.18



รูปที่ 7.18 ค่าความขรุขระผิวภายนอกต่อชนิดของแมนเดรลเหลว

จากรูปที่ 7.18 พบว่าค่าความขรุขระผิวภายนอกของชิ้นงานที่ผ่านการดึงขึ้นรูป จะให้ค่า ความขรุขระผิวที่สูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการดึงขึ้นรูป ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น อย่างรวดเร็วบริเวณผิวภายนอกของท่อในขณะที่ทำการดึงขึ้นรูป และพบว่าชิ้นงานที่ภายในมีแมน เดรลเหลวจะให้ค่าความขรุขระผิวต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล

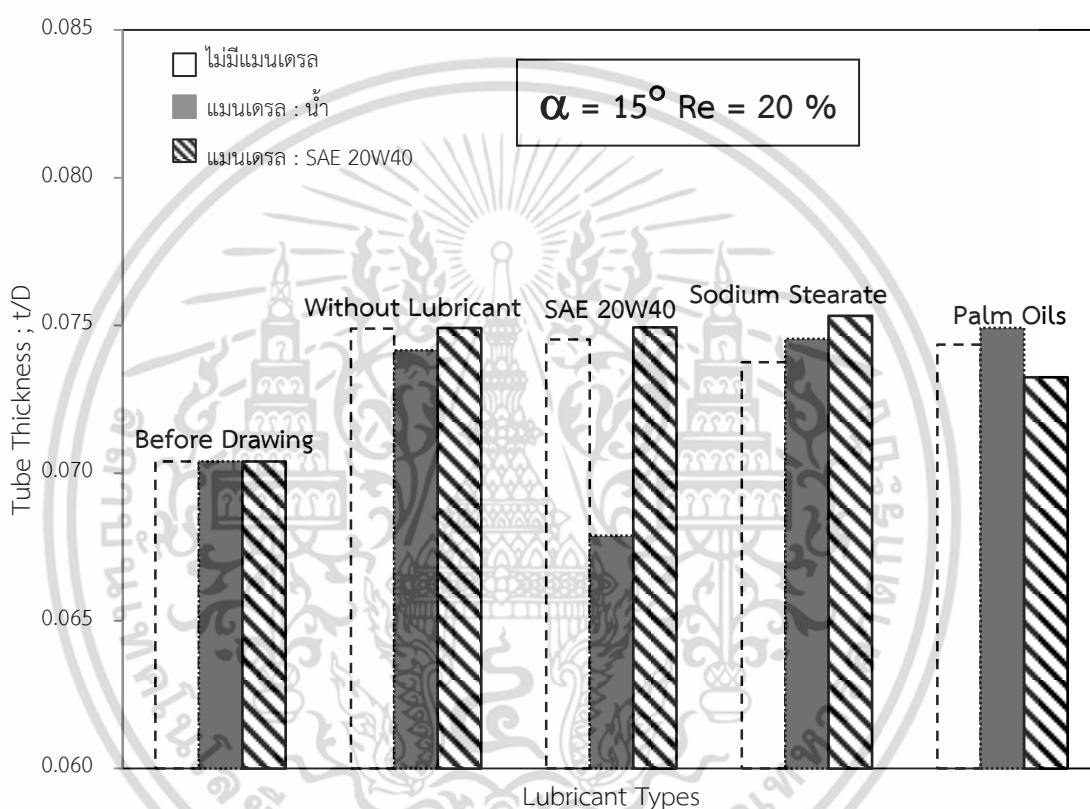
อีกทั้งชิ้นงานที่มีน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 จะให้ค่าความขรุขระผิวต่ำกว่าชิ้นงานที่มีน้ำ เป็นแมนเดรลเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นแมนเดรลเหลวที่ส่งผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวที่ดีที่สุด คือ น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40

7.1.8 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อชนิดของสารหล่อลื่น (Tube Thickness vs Lubricant Types)

สารหล่อลื่นที่ใส่เข้าไปบริเวณผิวภายนอกท่อทองแดงขณะทำการดึงขึ้นรูป ได้ถูกนำมาศึกษา ด้วย ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 7.19



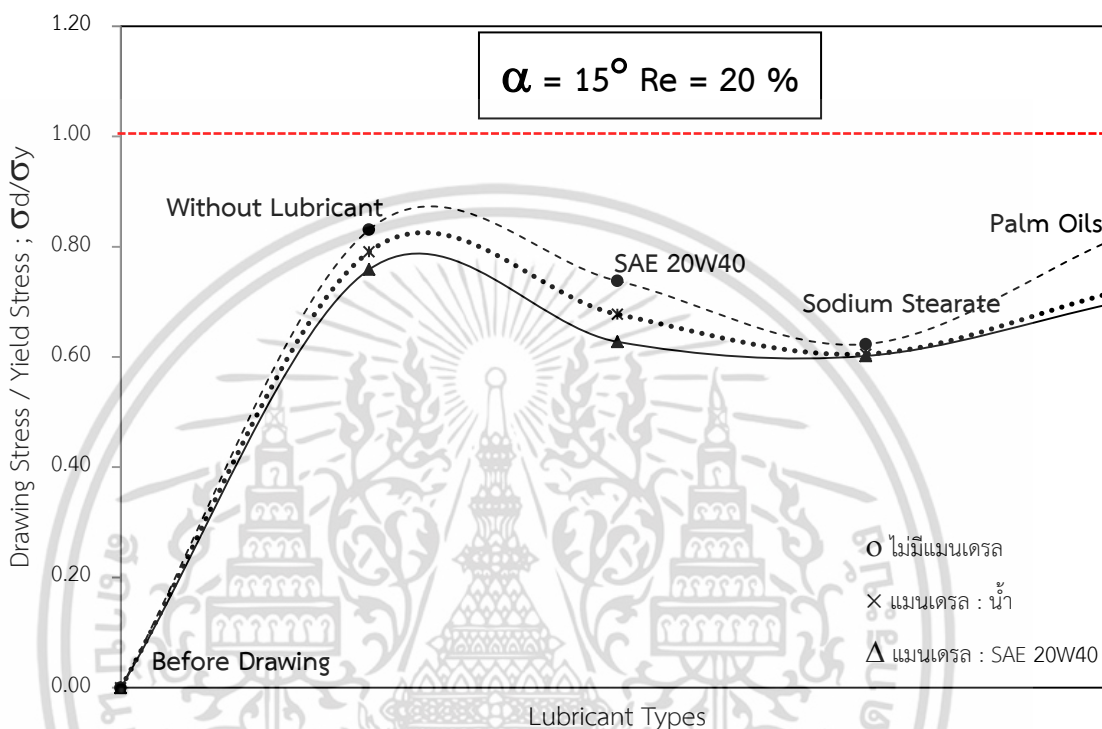
รูปที่ 7.19 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อชนิดของสารหล่อลื่น

จากรูปที่ 7.19 พบว่าค่าอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อสำหรับชิ้นงานที่มีและไม่มีสารหล่อลื่นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก

แต่ที่สังเกตเห็นได้ชัดเจน คือ ชิ้นงานที่มีสารหล่อลื่นน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 และภายในมีน้ำเป็นแมนเดรลเหลวให้ค่าอัตราส่วนความหนาของท่อต่ำที่สุด

7.1.9 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อชนิดของสารหล่อลื่น (Drawing Stress vs Lubricant Types)

ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาอัตราส่วนความเค้นที่เป็นผลมาจากชนิดของสารหล่อลื่นด้วย เมื่อทำการดึงขึ้นรูปท่อทองแดงผ่านแม่พิมพ์ที่มีมุมแม่พิมพ์เท่ากับ 15 องศา ให้มีอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20% ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 7.20



รูปที่ 7.20 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อชนิดของสารหล่อลื่น

จากรูปที่ 7.20 พบว่าชิ้นงานที่มีสารหล่อลื่นเป็นตัวช่วยในการดึงขึ้นรูป จะให้ค่าอัตราส่วนความเค้นต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีสารหล่อลื่น เนื่องจากสารหล่อลื่นเป็นตัวช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างท่อทองแดงกับตาย ทำให้แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีสารหล่อลื่น

ชิ้นงานที่มีแนวโน้มของค่าความเค้นต่ำที่สุดคือชิ้นงานที่มีโซเดียมสเตียเรทเป็นแมนเดรล ซึ่งเป็นไปตามการทดลองของอิทธิพลและสมชัย [36] คือ สารหล่อลื่นของแข็งทำให้แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปน้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่น และความเค้นแรงดึงที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวท่อนั้นเกิดจากของเหลวที่อยู่ภายใน [15] โดยมีแรงเนื่องจากของเหลวมากระทำกับผิวท่อนในทิศทางตั้งฉากกับผนังของเหลวสัมผัส จึงเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานที่มีโซเดียมสเตียเรทเป็นแมนเดรลให้ค่าความเค้นดึงต่ำที่สุด

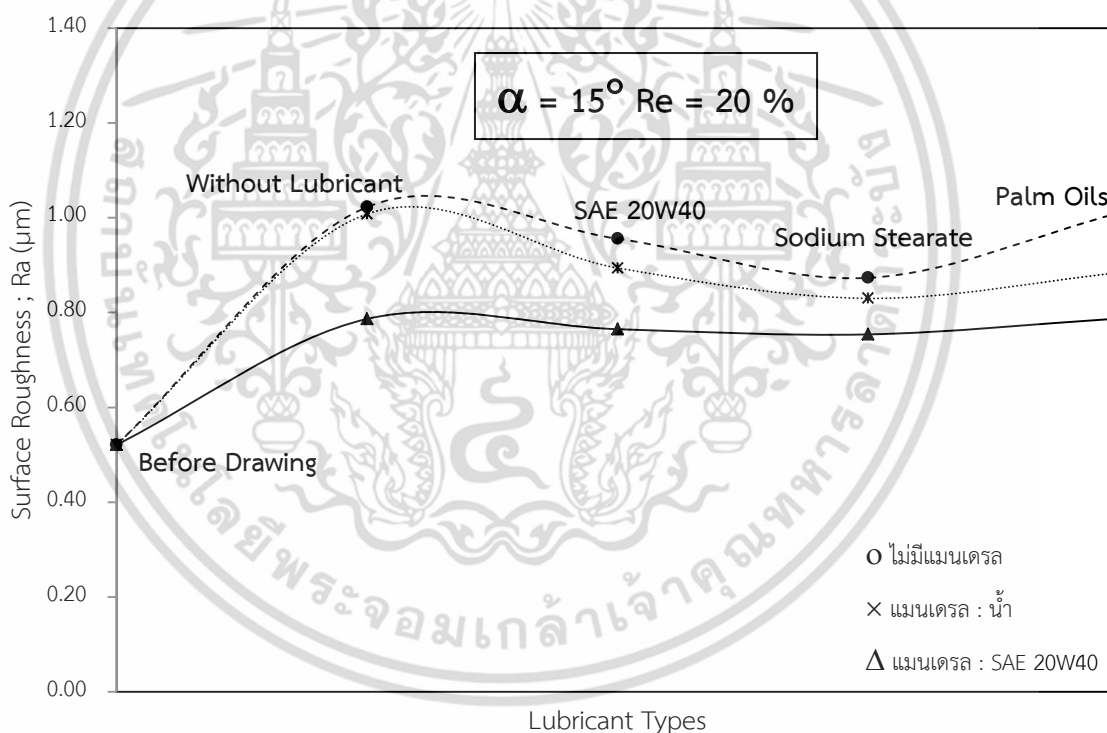
แต่ถ้าสังเกตในบางกรณีที่สารหล่อลื่นอาจจะทำให้แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล ดังกราฟในรูปที่ 7.20 สำหรับชิ้นงานที่มีน้ำมันปาล์มเป็นสารหล่อลื่น นั้นเป็นเพราะความหนืดของของเหลวที่มีมากเกินไป ทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุในของไหลมาก จึงทำให้เกิดแรงเสียดทานมากเป็นผลให้แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของณัฏฐนันท์และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะ [33] ที่ได้ทำการได้ทำการศึกษาเชิงเปรียบเทียบของการใช้สารหล่อลื่นในการดึงขึ้นรูปท่อทองแดงโดยวิธีโพลตึงปลั๊กอีกด้วย

ดังนั้นสารหล่อลื่นที่ส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนความเค้นที่ดีที่สุด คือ โซเดียมสเตียเรท

7.1.10 ค่าความขรุขระผิวภายนอกต่อชนิดของสารหล่อลื่น (Surface Roughness vs Lubricant Types)

ได้ทำการศึกษาการสังเกตค่าความขรุขระผิวภายนอกที่เกิดขึ้นหลังจากทำการดึงขึ้นรูปโดยมีตัวแปรเป็นสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ ซึ่งส่งผลให้ผิวด้านนอกของท่อเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพขึ้น ซึ่งสามารถวัดได้จากค่าความขรุขระผิวที่เกิดขึ้น โดยค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานก่อนทำการดึงขึ้นรูปจากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.521 ไมโครเมตร พบว่าค่าความขรุขระของผิวต่อการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดหลังดึงขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ที่มีครึ่งมุมแม่พิมพ์เท่ากับ 15 องศา ที่อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20, 35 และ 50% เป็นดังแสดงในรูปที่ 7.21



รูปที่ 7.21 ค่าความขรุขระผิวภายนอกต่อชนิดของสารหล่อลื่น

จากรูปที่ 7.21 สามารถสังเกตได้ว่าชิ้นงานที่มีสารหล่อลื่นเป็นโซเดียมสเตียเรทจะมีค่าความขรุขระผิวภายนอกต่ำที่สุด เมื่อใช้แรงในการดึงขึ้นรูปต่ำ (อัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดน้อย) ค่าความขรุขระผิวภายนอกที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อย เนื่องจากเมื่อใช้แรงในการดึงขึ้นรูปต่ำ ทำให้ท่อทองแดงเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างช้าๆ ทำให้ผิวด้านนอกของท่อทองแดงไม่ขรุขระมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกทั้งถ้าสังเกตค่าความขรุขระของผิวภายนอกท่อระหว่างน้ำมันปาล์มและน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 พบว่าน้ำมันปาล์มให้ค่าความขรุขระผิวภายนอกสูงกว่าน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 เนื่องจากชิ้นงานที่มีค่าความหนืดมากกว่าจะส่งผลต่อแรงในการดึงขึ้นรูป ทำให้ใช้แรงในการดึงขึ้นรูปมากกว่า ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวสูงกว่า (ในที่นี่น้ำมันปาล์มและน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 มีความหนืดเท่ากับ 26.4 และ 5.7 เมกะปาสคาลที่ 20 องศาเซลเซียสตามลำดับ) ซึ่งผลการทดลองที่ได้ นั้นตรงกับงานวิจัยของณัฐนันท์ และคณะ [33] ที่ได้ทำการศึกษาเชิงเปรียบเทียบของการใช้สารหล่อลื่นอุตสาหกรรมในงานดึงขึ้นรูปท่อทองแดง พบว่าน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดน้อยจะทำให้ผิวท่อมีความเรียบมาก

ดังนั้นสารหล่อลื่นที่ส่งผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวของชิ้นงาน คือ โซเดียมสเตียเรท

7.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการดึงขึ้นรูปท่อแบบไม่ใช้แมนเดรลกับแบบใช้แมนเดรลเหลว จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การดึงขึ้นรูปท่อโดยใช้แมนเดรลเหลวนั้น ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญให้สามารถเพิ่มค่าการดึงลดพื้นที่หน้าตัด ลดความเค้นแรงดึงในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อ ซึ่งจะส่งผลผลิตเพิ่มสูงขึ้น และลดระยะเวลาในการดึงขึ้นรูปลง ซึ่งพบว่า

7.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาต่อการลดพื้นที่หน้าตัดนั้น ชิ้นงานเริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับ 0.0704 ซึ่งหลังจากผ่านกระบวนการดึงขึ้นรูปแล้ว ชิ้นงานควรมีค่าอัตราส่วนความหนาต่อการลดพื้นที่หน้าตัดลดลงต่ำกว่าค่านี้ ซึ่งช่วงการลดพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมที่ส่งผลชัดเจนที่สุดสำหรับชิ้นงานที่ไม่มีสารหล่อลื่นและมีสารหล่อลื่น คือ ที่อัตราการลดขนาดที่ร้อยละ 20

7.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นดึงต่อการลดพื้นที่หน้าตัด ทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างความเค้นดึงและความเค้นจุดคราก ค่าอัตราส่วนนี้จะต้องมีค่าไม่เกิน 1.0 ซึ่งช่วงการลดพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความเค้นชัดเจนที่สุดสำหรับชิ้นงานที่ไม่มีสารหล่อลื่นและมีสารหล่อลื่น คือ ที่อัตราการลดขนาดที่ร้อยละ 20

7.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระผิวภายนอกต่อการลดพื้นที่หน้าตัด มีค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานก่อนทำการดึงขึ้นรูปจากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.521 ไมโครเมตร หลังการดึงขึ้นรูป พบว่าช่วงการลดพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมที่ส่งผลชัดเจนที่สุดต่อค่าความขรุขระผิวภายนอกสำหรับชิ้นงานที่ไม่มีสารหล่อลื่นและมีสารหล่อลื่น คือ ที่อัตราการลดขนาดที่ร้อยละ 20

7.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาต่อชนิดของแมนเดรล ในชิ้นงานที่มีแมนเดรลเหลวมีแนวโน้มช่วยลดอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อได้ดีกว่าชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล และชิ้นงานที่มีแมนเดรลเหลวมีความหนาแน่นสูงกว่าจะสามารถลดขนาดความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อได้ดีกว่าชิ้นงานที่มีแมนเดรลเหลวมีความหนาแน่นต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นดึงต่อชนิดของแมนเดรล ในชิ้นงานที่มีแมนเดรลเหลวจะให้ค่าอัตราส่วนความเค้นดึงต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล

7.2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระผิวภายนอกต่อชนิดของแมนเดรลเหลว ในชิ้นงานที่มีแมนเดรลเหลวจะมีค่าความขรุขระผิวภายนอกต่อต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล และชิ้นงานที่มีน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 จะให้ค่าความขรุขระผิวภายนอกต่อต่ำกว่าแมนเดรลชนิดอื่น

7.2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาของท่อต่อชนิดของสารหล่อลื่น ทั้งในชิ้นงานที่ไม่มีและมีสารหล่อลื่นจะให้ค่าอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อใกล้เคียงกัน

7.2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นดึงต่อชนิดของสารหล่อลื่น พบว่าชิ้นงานที่มีสารหล่อลื่นเป็นตัวช่วยในการดึงขึ้นรูป จะให้ค่าอัตราส่วนความเค้นต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีสารหล่อลื่น และชิ้นงานที่มีแนวโน้มของค่าความเค้นต่ำที่สุดคือชิ้นงานที่มีโซเดียมสเตียเรทเป็นสารหล่อลื่น และน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 และน้ำมันปาล์ม ให้ค่าความเค้นที่สูงขึ้นตามลำดับ เป็นผลมาจากความหนืดของชนิดของสารหล่อลื่น คือ สารหล่อลื่นที่มีความหนืดน้อย จะทำให้แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปต่ำ ซึ่งแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปนี้จะส่งผลในทิศทางเดียวกันกับอัตราส่วนความเค้น

7.2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระผิวภายนอกต่อชนิดของสารหล่อลื่น พบว่าชิ้นงานที่มีสารหล่อลื่นเป็นตัวช่วยในการดึงขึ้นรูป จะให้ค่าความขรุขระผิวต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีสารหล่อลื่นและชิ้นงานที่มีแนวโน้มค่าความขรุขระผิวต่ำที่สุดคือชิ้นงานที่มีโซเดียมสเตียเรทเป็นสารหล่อลื่น เป็นผลมาจากความหนืดของชนิดของสารหล่อลื่นที่ช่วยลดผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ ทำให้ไม่เกิดการเสียดสีกันเกิดขึ้น ชิ้นงานที่ได้จึงมีความเรียบเนียนกว่า

บทที่ 8

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการศึกษาอิทธิพลของแมนเดรลเหลวและสารหล่อลื่นต่ออัตราส่วนความหนาของท่อ อัตราส่วนความเค้นดึง และค่าความขรุขระผิวของท่อทองแดงหลังจากผ่านกระบวนการดัดขึ้นรูปที่มีการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20, 35 และ 50% พบว่า

8.1.1 เมื่อทำการดัดขึ้นรูปท่อทองแดงโดยทำการเปรียบเทียบอัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดร้อยละ 20, 35 และ 50 พบว่าที่การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดร้อยละ 20 เป็นช่วงการลดขนาดพื้นที่ที่ดีที่สุด เนื่องจากส่งผลให้อัตราส่วนความหนาของท่อลดลงต่ำกว่าชิ้นงานที่ยังไม่ทำการดัดขึ้นรูป

8.1.2 เมื่อทำการดัดขึ้นรูปท่อทองแดงโดยทำการเปรียบเทียบชนิดของแมนเดรลเหลวระหว่างน้ำและน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 พบว่าน้ำเป็นแมนเดรลเหลวที่ดีที่สุด เนื่องจากส่งผลให้อัตราส่วนความหนาของท่อเท่ากับ 0.06788 ซึ่งลดลงต่ำกว่าชิ้นงานอ้างอิงที่ยังไม่ทำการดัดขึ้นรูป

8.1.3 เมื่อทำการดัดขึ้นรูปท่อทองแดงโดยทำการเปรียบเทียบชนิดของแมนเดรลเหลวระหว่างน้ำและน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 พบว่าน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 เป็นแมนเดรลเหลวที่ดีที่สุด เนื่องจากส่งผลให้ความเค้นแรงดึงลดลงในขณะที่ทำการดัดขึ้นรูปและให้ค่าความขรุขระผิวดต่ำกว่าแมนเดรลชนิดอื่นด้วย

8.1.4 เมื่อทำการดัดขึ้นรูปท่อทองแดงโดยทำการเปรียบเทียบชนิดของสารหล่อลื่น โดยเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40, โซเดียมสเตียเรท และน้ำมันปาล์ม พบว่าโซเดียมสเตียเรทเป็นสารหล่อลื่นที่ดีที่สุด เพราะเกิดความเค้นแรงดึงต่ำที่สุดในขณะที่ทำการดัดขึ้นรูปและให้ค่าความขรุขระผิวดต่ำกว่าสารหล่อลื่นชนิดอื่นด้วย

แต่ท้ายที่สุดแล้ว ตัวแปรทุกตัวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของท่อทองแดง แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งานในขั้นตอนต่อไป

8.2 ข้อเสนอแนะ

8.2.1 ในงานวิจัยได้ทำการทดลองที่การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเพียง 3 ค่า เพื่อให้ผลทดลองเป็นแนวทางที่จะทำการทดสอบต่อไป ถ้าได้มีการเพิ่มค่าของอัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดขึ้น จะทำให้ได้ค่าต่างๆออกมาถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

8.2.2 จากผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นดึงต่อชนิดของแมนเดรล แต่จากการทดลองยังไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าเป็นเพราะเหตุใด ที่ทำให้ความเค้นของชิ้นงานที่มีน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 เป็นแมนเดรลเหลวถึงมีค่าความเค้นต่ำกว่าชิ้นงานที่มีน้ำเป็นแมนเดรลเหลว ซึ่งแมนเดรลเหลวทั้งสองชนิดนี้เป็นของเหลวที่อัดตัวได้เช่นเดียวกัน จึงไม่น่าส่งผลให้ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เค้นดึงที่เกิดขึ้นแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน อาจทำการทดลองเพื่อหาความเชื่อมโยงระหว่างความหนาแน่นของของไหลที่อัดตัวได้กับความเค้นแรงดึงโดยการวัดความดันของเหลวที่เกิดขึ้นหรือคำนวณโดยวิธี FEM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Altan, S. OH, H. Gegel. **Metal Forming Fundamentals and Applications.** American Society for Metals, Metal Park, OH 44073. 1983.
- [2] William F. Hosford, Robert M. Caddell. **Metal Forming Mechanics and Metallurgy.** PTR Prentice-Hall Inc., London. 1993.
- [3] R.H. Wagoner, J.-L. Chenot. **Metal Forming Analysis.** Cambridge, United Kingdom. 2001.
- [4] S. Kalpakjian and R.Schmid. **Manufacturing Processes for Engineering Materials.** Pearson. 2003.
- [5] R.A.W. Slater **Engineering and Plasticity : Theory and Application to Metal Forming Processes.** Macmillan. 1977.
- [6] Raymond A. Higgins. **Engineering metallurgy. PART 1.** English Universities P. 1968
- [7] Prakash M. Dixit and Uday S. Dixit. **Modeling of Metal Forming and Machining Processes.** Springer. 2008.
- [8] J. Lin, D. Balint and M. Pietrzyk. **Microstructure Evolution in Metal Forming Processes, 1st Edition.** Woodhead. 2012.
- [9] Theo Mang, Wilfried Dresel. **Lubricants and Lubrication.** John Wiley & Sons. 2007.
- [10] William F. Smith. **Principle of Material Science and Engineering, 3rd.ed.** NewYork, McGraw-Hill. 1996.
- [11] Bielely, C.A. and Anrovs. **The Lubrication Engineering Manual 1th ed.** USA. United States Steel. 1971.
- [12] **ASTM B88. Standard Specification for Seamless Copper WATER Tube [Metric].** pp.102-107.
- [13] E.M. Rubio. **Analytical Methods Application to the Study of Tube Drawing Processes with Fixed Conical Inner Plug : Slab and Upper Bound Methods.** Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 14, 119-130. 2006.
- [14] K. Yoshida, Y. Onitsuka and S.Yamashita. **Fabrication of High Quality Fine Medical Tubes by Fluid Mandrel Drawing.** Journal of Solid Mechanicals and Materials Engineering, Vol.3, 1348-1355. 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] F.O. Neves, S.T. Button, C. Caminaga, F.C. Gentile. **Numerical and Experimental Analysis of Tube Drawing with Fixed Plug.** Journal of the Braz. Soc. of Mech. Sci & Eng. 17 No.4, 426-431. 2005.
- [16] T. Tangsri and S. Norasethasopon. **Influences of total reduction area on drawing stress and tube dimension in inner spiral ribbed copper tube sinking.** Int J Adv Manuf Technol. Vol. 77, 2269-2276. 2015.
- [17] T. Tangsri and S. Norasethasopon. **Fabrication of small size inner spiral ribbed copper tube by fluid mandrel drawing.** Int J Adv Manuf Technol. Vol. 70, Issue 9-12, pp 1923-1930. 2014.
- [18] T. Tangsri and S. Norasethasopon. **Experimental study of the effect of a half die angle on drawing stress during wire drawing.** Ladkrabang Engineering Journal. pp 134-139. 2001.
- [19] ทวี เทศเจริญ. **กรรมวิธีการผลิต.** ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [20] สาคร คันธโชติ. **กรรมวิธีการผลิต Production Methods.** กรุงเทพฯ. โอ.เอส. พรีนติ้ง เฮ้าส์. 2541.
- [21] ดำรง ไชยธีรานุวัฒน์ศิริ. **การขึ้นรูปโลหะ.** กรุงเทพฯ. ซีเอ็ดดูเคชั่น. 2537.
- [22] แม้น อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา. แปล. **วัสดุวิศวกรรม.** กรุงเทพมหานคร. McGraw-Hill. 1997.
- [23] อนุรักษ์ รักอ่อน. **เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น.** พัฒนาวิชาการ (2535). กรุงเทพฯ. 2552.
- [24] วีระศักดิ์ มะโนน้อม. **เชื้อเพลิงและวัสดุหล่อลื่น.** กรุงเทพฯ. เอ็มพันธ์. 2547.
- [25] ชำรง โชตะมังสะ และคณะ. **เชื้อเพลิงและวัสดุหล่อลื่น.** กรุงเทพฯ. มณีรัตน์การพิมพ์. 2536.
- [26] อ่ำพล ชื่อตรง และคณะ. **เชื้อเพลิงและวัสดุหล่อลื่น.** กรุงเทพฯ. ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ. 2545.
- [27] อ่ำไพศักดิ์ ทีบุญมา, ศิริศักดิ์ หาญชูวงศ์ และชาญ ถนัดงาน. **Analysis of Drawing Process and Extrusion Process by Slip-Line Field Theory.** The Journal of KMITNB, Vol.11, No.4, 33-39. 2001.
- [28] ณีภูธรนันท์ มูลสระคู่, พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์, วารุณี เปรมานนท์ และทวีชัย โสภณอุดมสิทธิ์. **Analysis of Tube Drawing Process using Floating Plug by FEM.** การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20. 2549.
- [29] คมกริช ละวรรณวงษ์ และ กุศล พรหมมูล. **การประยุกต์ใช้ FEM ในการวิเคราะห์และปรับปรุงปลั๊กในกระบวนการดึงท่อ.** การประชุมวิชาการเครือข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม. 2550.
- ณีภูธรนันท์ มูลสระคู่, พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์ และ วารุณี เปรมานนท์. **การศึกษาอิทธิพลของ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [30] ความหนืดและปริมาณคลอรีนในน้ำมันหล่อลื่นของกระบวนการดิ่งท่อทองแดง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20. 2549.
- [31] ญัฐนันท์ มูลสระคู, พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์ และ วารุณี เปรมานนท์. การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของการใช้สารหล่อลื่นอุตสาหกรรมในงานดิ่งขึ้นรูปท่อทองแดง. วารสารและพัฒนา มจร., ฉบับที่ 2. 2550.
- [32] ศิริชัย ต่อสกุล และ กฤษฎา บรรเทาพิช. อิทธิพลของแรงดันของเหลวที่มีต่อแรงลากขึ้นรูปในการลากขึ้นรูปเหล็กคาร์บอนรีดเย็น SPCC ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ปีที่ 23. ฉบับที่ 3. 2556.
- [33] ญัฐนันท์ มูลสระคู, พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์ และวารุณี เปรมานนท์. การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของการใช้สารหล่อลื่นอุตสาหกรรมในงานดิ่งขึ้นรูปท่อทองแดง. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 30. ฉบับที่ 2. 2550.
- [34] ญัฐนันท์ มูลสระคู, พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์ และวารุณี เปรมานนท์. การศึกษาอิทธิพลของความหนืดและปริมาณคลอรีนในน้ำมันหล่อลื่นของกระบวนการดิ่งท่อทองแดง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย. ครั้งที่ 20. 2549.
- [35] ศุภเอก ประมูลมาก และวิเชียร เลื่อนเครือวัลย์. การศึกษาการใช้น้ำมันจากพืชเป็นสารหล่อลื่นในกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะ. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ครั้งที่ 8. 2553.
- [36] อิทธิพล อินทร์ดีเสียบ และสมชัย นรเศรษฐ์โสภณ. การศึกษาจุดบกพร่องที่มีผลต่อกระบวนการดิ่งลดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ C5D2. วิศวกรรมลาดกระบัง. ปีที่ 28. ฉบับที่ 3. 2544.
- [37] คุณสมบัติทางกลของวัสดุ (Mechanical Properties) [Online]
Available : <http://www.mutphysics.com>. 2543.
- [38] วิชาวิศวกรรมวัสดุ : ความเค้นและความเครียด [Online]
Available : http://www.stc.ac.th/stc/data/data_aum-n/1_02.pdf. 2555.
- [39] มาตรฐานคำนิยามของ ASTM ที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางเชิงกล [Online]
Available : <http://coursewares.mju.ac.th>. 2554.
- [40] ลักษณะของพื้นผิว surface texture [Online]
Available : <http://pioneer.netsev.chula.ac.th>. 2551.
- [41] สยามสแตนเลส : ความหยาบผิวของสแตนเลสแผ่น [Online]
Available : <http://www.siamstainless.com/?p=1110>. 2553.
- [42] วัสดุหล่อลื่น [Online]
Available : <http://www.krtc.ac.th>. 2556.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [43] พื้นฐานการหล่อลื่น [Online]
Available : <http://www.centrollube.co.th>. 2551.
- [44] ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร [Online]
Available : <http://www.foodnetworksolution.com>. 2553.
- [45] สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) [Online]
Available : <http://www.arda.or.th>. 2555.
- [46] ซีพีไอ อะโกรเทค [Online]
Available : <http://www.cpiagrotech.com>. 2558.
- [47] กรมวิชาการเกษตร [Online]
Available : <http://www.doa.go.th>. 2553.
- [48] กองควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์ [Online]
Available : <http://www.pcd.go.th>. 2553.
- [49] ความหนาแน่นของวัสดุ [Online]
Available : www.simetric.co.uk. 2541.
- [50] บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)
- [51] บริษัท นครหลวง อินเตอร์เทค จำกัด
- [52] ทักษิณ ดุสิตโศภิตวงศ์ และสมชัย นรเศรษฐ์โสภณ. อิทธิพลของแมนเดรลเหลวต่อการลดพื้นที่หน้าตัด ความเค้นดึงและความหนาในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อทองแดง. วิศวกรรมลาดกระบัง. ฉบับที่ 3. ปีที่ 32. 2558.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองของท่อทองแดงก่อนการดึงขึ้นรูป

ความหนาท่อก่อนดึง (mm)	1.176
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อก่อนดึง (mm)	15.874
อัตราส่วนความหนาท่อ	0.0704
อัตราส่วนความเค้นดึง	1
ค่าความขรุขระผิวภายนอกท่อ (μm)	0.52125

ค่าอัตราส่วนความหนาของท่อเมื่อไม่มีสารหล่อลื่น

ร้อยละการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด (เปอร์เซ็นต์)	ก่อนดึง ขึ้นรูป	20	35	50
ชนิดของแมนเดรล	อัตราส่วนความหนาของท่อ (t/D)			
ไม่มี	0.07040	0.07490	0.08207	0.07132
น้ำสะอาด	0.07040	0.07415	0.08024	0.07230
น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40	0.07040	0.07491	0.06099	0.07304
โซเดียมสเตียเรท	0.07040	0.07468	0.08497	0.07412

ค่าอัตราส่วนความหนาของท่อเมื่อน้ำมันเครื่องเกรด SAE20W40 เป็นสารหล่อลื่น

ร้อยละการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด (เปอร์เซ็นต์)	ก่อนดึง ขึ้นรูป	20	35	50
ชนิดแมนเดรล	อัตราส่วนความหนาของท่อ (t/D)			
ไม่มี	0.07040	0.07453	0.08604	0.07090
น้ำสะอาด	0.07040	0.06788	0.08561	0.07262
น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40	0.07040	0.07494	0.08588	0.07275
โซเดียมสเตียเรท	0.07040	0.07461	0.08401	0.07183

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเค้นดึงเมื่อไม่มีสารหล่อลื่น

ร้อยละการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด (เปอร์เซ็นต์)	ก่อนดึง ขึ้นรูป	20	35	50
ชนิดแมนเดรล	ค่าความเค้นดึง (σ_d/σ_y)			
ไม่มี	0.00000	0.83100	1.35500	1.50500
น้ำสะอาด	0.00000	0.79083	1.45583	1.35750
น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40	0.00000	0.75858	1.66680	1.35750
โซเดียมสเตียเรท	0.00000	0.77425	1.26333	1.41500

ค่าความเค้นดึงเมื่อมีน้ำมันเครื่องเกรด SAE20W40 เป็นสารหล่อลื่น

ร้อยละการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด (เปอร์เซ็นต์)	ก่อนดึง ขึ้นรูป	20	35	50
ชนิดแมนเดรล	ค่าความเค้นดึง (σ_d/σ_y)			
ไม่มี	0.00000	0.73791	1.35500	1.41500
น้ำสะอาด	0.00000	0.67733	1.50619	1.33167
น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40	0.00000	0.53820	1.34424	1.33750
โซเดียมสเตียเรท	0.00000	0.67408	1.37667	1.55083

ค่าความขรุขระผิวภายนอกท่อเมื่อไม่มีสารหล่อลื่น

ร้อยละการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด (เปอร์เซ็นต์)	ก่อนดึงขึ้น รูป	20	35	50
ชนิดแมนเดรล	ค่าความขรุขระผิว (μm)			
ไม่มี	0.52125	1.02250	1.28750	1.18333
น้ำสะอาด	0.52125	1.00800	1.45714	1.05600
น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40	0.52125	0.78667	1.25250	1.09750
โซเดียมสเตียเรท	0.52125	0.98500	1.28333	1.15500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความขรุขระผิวภายนอกท่อมีน้ำมันเครื่องเกรด SAE20W40 เป็นสารหล่อลื่น

ร้อยละการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด (เปอร์เซ็นต์)	ก่อนตั้ง ขึ้นรูป	20	35	50
ชนิดแมนเดรล	ค่าความขรุขระผิว (μm)			
ไม่มี	0.52125	0.95571	1.48444	1.14667
น้ำสะอาด	0.52125	0.89400	1.56125	1.05400
น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40	0.52125	0.76500	1.32250	1.06200
โซเดียมสเตียเรท	0.52125	0.94000	1.35000	1.25000

ค่าอัตราส่วนความหนาของท่อเมื่อภายในท่อบรรจุแมนเดรลชนิดต่างๆ

ชนิดแมนเดรล	อัตราส่วนความหนาของท่อ (t/D)			
ไม่มี	0.52125 ¹	0.95571 ²	1.48444 ³	1.14667 ⁴
น้ำสะอาด	0.52125 ¹	0.89400 ²	1.56125 ³	1.05400 ⁴
น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40	0.52125 ¹	0.76500 ²	1.32250 ³	1.06200 ⁴
โซเดียมสเตียเรท	0.52125 ¹	0.94000 ²	1.35000 ³	1.25000 ⁴

เมื่อ ¹ ไม่มีสารหล่อลื่น, ² SAE 20W40 เป็นสารหล่อลื่น, ³ โซเดียมสเตียเรทเป็นสารหล่อลื่น และ ⁴ น้ำมันปาล์มเป็นสารหล่อลื่น

ค่าความเค้นดึงเมื่อภายในท่อบรรจุแมนเดรลชนิดต่างๆ

ชนิดแมนเดรล	ค่าความเค้นดึง (σ_d/σ_y)			
ไม่มี	0.83100 ¹	0.73791 ²	0.62325 ³	0.81392 ⁴
น้ำสะอาด	0.79083 ¹	0.67733 ²	0.57958 ³	0.71725 ⁴
น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40	0.75858 ¹	0.53820 ²	0.60183 ³	0.69742 ⁴
โซเดียมสเตียเรท	0.77425 ¹	0.67408 ²	0.60014 ³	0.69000 ⁴

เมื่อ ¹ ไม่มีสารหล่อลื่น, ² SAE 20W40 เป็นสารหล่อลื่น, ³ โซเดียมสเตียเรทเป็นสารหล่อลื่น และ ⁴ น้ำมันปาล์มเป็นสารหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความขรุขระผิวภายนอกเมื่อภายในท่อบรรจุแมนเดรลชนิดต่างๆ

ชนิดแมนเดรล	ค่าความขรุขระผิว (μm)			
	ไม่มี	SAE 20W40	โซเดียมสเตียเรท	น้ำมันปาล์ม
ไม่มี	1.02250 ¹	0.95571 ²	0.87333 ³	1.01000 ⁴
น้ำสะอาด	1.00800 ¹	0.89400 ²	0.73875 ³	0.88400 ⁴
น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40	0.78667 ¹	0.76500 ²	0.83000 ³	0.87500 ⁴
โซเดียมสเตียเรท	0.98500 ¹	0.94000 ²	0.85500 ³	0.88000 ⁴

เมื่อ ¹ ไม่มีสารหล่อลื่น, ² SAE 20W40 เป็นสารหล่อลื่น, ³ โซเดียมสเตียเรทเป็นสารหล่อลื่น

และ ⁴ น้ำมันปาล์มเป็นสารหล่อลื่น

ค่าอัตราส่วนความหนาของท่อเมื่อมีสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ

	ชนิดสารหล่อลื่น			
	ไม่มีสารหล่อลื่น	SAE 20W40	โซเดียมสเตียเรท	น้ำมันปาล์ม
อัตราส่วน ความหนาของท่อ (t/D)	0.07490 ¹	0.07453 ¹	0.07376 ¹	0.07435 ¹
	0.07415 ²	0.06788 ²	0.07454 ²	0.07492 ²
	0.07491 ³	0.07494 ³	0.07533 ³	0.07325 ³
	0.07468 ⁴	0.07461 ⁴	0.07479 ⁴	0.07492 ⁴

เมื่อ ¹ ไม่มีแมนเดรล, ² น้ำสะอาดเป็นแมนเดรล, ³ โซเดียมสเตียเรทเป็นแมนเดรล

และ ⁴ โซเดียมสเตียเรทเป็นแมนเดรล

ค่าความเค้นดึงเมื่อมีสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ

	ชนิดสารหล่อลื่น			
	ไม่มีสารหล่อลื่น	SAE 20W40	โซเดียมสเตียเรท	น้ำมันปาล์ม
ค่าความเค้นดึง (σ_d/σ_y)	0.83100 ¹	0.73791 ¹	0.62325 ¹	0.81392 ¹
	0.79083 ²	0.67733 ²	0.57958 ²	0.71725 ²
	0.75858 ³	0.53820 ³	0.60183 ³	0.69742 ³
	0.77425 ⁴	0.67408 ⁴	0.60014 ⁴	0.69000 ⁴

เมื่อ ¹ ไม่มีแมนเดรล, ² น้ำสะอาดเป็นแมนเดรล, ³ โซเดียมสเตียเรทเป็นแมนเดรล

และ ⁴ โซเดียมสเตียเรทเป็นแมนเดรล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความขรุขระผิวภายนอกเมื่อมีสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ

	ชนิดสารหล่อลื่น			
	ไม่มีสารหล่อลื่น	SAE 20W40	โซเดียมสเตียเรท	น้ำมันปาล์ม
ค่าความขรุขระผิว (μm)	1.02250 ¹	0.95571 ¹	0.87333 ¹	1.01000 ¹
	1.00800 ²	0.89400 ²	0.73875 ²	0.88400 ²
	0.78667 ³	0.76500 ³	0.83000 ³	0.87500 ³
	0.98500 ⁴	0.94000 ⁴	0.85500 ⁴	0.88000 ⁴

เมื่อ ¹ ไม่มีแมนเดรล, ² น้ำสะอาดเป็นแมนเดรล, ³ โซเดียมสเตียเรทเป็นแมนเดรล

และ ⁴ โซเดียมสเตียเรทเป็นแมนเดรล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลข้อมูลความหนา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ค่าอัตราส่วนความเค้นดึง และความขรุขระผิวภายนอกท่อทองแดงหลังผ่านการดึงขึ้นรูปที่ $Re = 20\%$

สารหล่อลื่น	แมนเดรล	% Re = 20						
		ความหนาท่อ หลังดึง (mm)	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางหลังดึง (mm)	t/D	พื้นที่หน้าตัด หลังดึง (mm ²)	แรงดึงขึ้นรูป (kN)	อัตราส่วนความเค้นดึง (σ_d/σ_y)	ความขรุขระผิวภายนอก (μm)
ไม่มี	ไม่มี	1.0453	13.9569	0.0749	22.0586	2.1997	0.8310	1.0225
ไม่มี	น้ำสะอาด	1.0347	13.9531	0.0742	21.8370	2.0723	0.7908	1.0080
ไม่มี	SAE 20W40	1.0469	13.9744	0.0749	22.1191	2.0135	0.7586	0.7867
ไม่มี	โซเดียมสเตียเรท	1.0492	14.0491	0.0747	22.2887	2.0708	0.7743	0.9850
SAE 20W40	ไม่มี	1.0450	14.0216	0.0745	22.1585	1.9621	0.7379	0.9557
SAE 20W40	น้ำสะอาด	0.9500	13.9959	0.0679	20.1767	1.6400	0.6773	0.8940
SAE 20W40	SAE 20W40	1.0479	13.9831	0.0749	22.1546	1.4308	0.5382	0.7650
SAE 20W40	โซเดียมสเตียเรท	1.0361	13.8877	0.0746	21.7591	1.7601	0.6741	0.9400

(ต่อ) ผลข้อมูลความหนา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ค่าอัตราส่วนความเค้นดึง และความขรุขระผิวภายนอกท่อทองแดงหลังผ่านการดึงขึ้นรูปที่ $Re = 20\%$

สารหล่อลื่น	แมนเดรล	% Re = 20						
		ความหนาท่อ หลังดึง (mm)	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางหลังดึง (mm)	t/D	พื้นที่หน้าตัด หลังดึง (mm ²)	แรงดึงขึ้นรูป (kN)	อัตราส่วนความเค้นดึง (σ_d/σ_y)	ความขรุขระผิวภายนอก (μm)
โซเดียมสเตียเรท	ไม่มี	1.0304	13.9700	0.0738	21.7776	1.6287	0.6233	0.8733
โซเดียมสเตียเรท	น้ำสะอาด	1.0458	14.0297	0.0745	22.1888	1.5432	0.5796	0.7388
โซเดียมสเตียเรท	SAE 20W40	1.0490	13.9256	0.0753	22.0819	1.5948	0.6018	0.8300
โซเดียมสเตียเรท	โซเดียมสเตียเรท	1.0467	13.9947	0.0748	22.1483	1.5950	0.6001	0.8550
น้ำมันปาล์ม	ไม่มี	1.0367	13.9430	0.0744	21.8607	2.1351	0.8139	1.0100
น้ำมันปาล์ม	น้ำสะอาด	1.0479	13.9875	0.0749	22.1618	1.9075	0.7173	0.8840
น้ำมันปาล์ม	SAE 20W40	1.0220	13.9522	0.0733	21.5779	1.8059	0.6974	0.8750
น้ำมันปาล์ม	โซเดียมสเตียเรท	1.0500	14.0144	0.0749	22.2485	1.8422	0.6900	0.8800

ผลข้อมูลความหนา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ค่าอัตราส่วนความเค้นดึง และความขรุขระผิวภายนอกท่อทองแดงหลังผ่านการดึงขึ้นรูปที่ $Re = 35\%$

สารหล่อลื่น	แมนเดรล	% Re = 35						
		ความหนาท่อ หลังดึง (mm)	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางหลังดึง (mm)	t/D	พื้นที่หน้าตัด หลังดึง (mm ²)	แรงดึงขึ้นรูป (kN)	อัตราส่วนความเค้นดึง (σ_d/σ_y)	ความขรุขระผิวภายนอก (μm)
ไม่มี	ไม่มี	1.0166	12.3863	0.0821	18.9669	3.0840	1.3550	1.2875
ไม่มี	น้ำสะอาด	0.9996	12.4572	0.0802	18.7748	3.2800	1.4558	1.4571
ไม่มี	SAE 20W40	0.7575	12.4197	0.0610	14.3272	2.8657	1.6668	1.2525
ไม่มี	โซเดียมสเตียเรท	1.0563	12.4309	0.0850	19.7486	2.9939	1.2633	1.2833
SAE 20W40	ไม่มี	1.0678	12.4100	0.0860	19.9188	3.2388	1.3550	1.4844
SAE 20W40	น้ำสะอาด	1.0654	12.4456	0.0856	19.9369	3.6034	1.5062	1.5613
SAE 20W40	SAE 20W40	1.0622	12.3684	0.0859	19.7504	3.1859	1.3442	1.3225
SAE 20W40	โซเดียมสเตียเรท	1.0410	12.3910	0.0840	19.4106	3.2066	1.3767	1.3500

ผลข้อมูลความหนา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ค่าอัตราส่วนความเค้นดึง และความขรุขระผิวภายนอกท่อทองแดงหลังผ่านการดึงขึ้นรูปที่ $Re = 50\%$

สารหล่อลื่น	แมนเดรล	% Re = 50						
		ความหนาท่อ หลังดึง (mm)	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางหลังดึง (mm)	t/D	พื้นที่หน้าตัด หลังดึง (mm ²)	แรงดึงขึ้นรูป (kN)	อัตราส่วนความเค้นดึง (σ_d/σ_y)	ความขรุขระผิวภายนอก (μm)
ไม่มี	ไม่มี	0.8013	11.2350	0.0713	13.6362	2.4627	1.5050	1.1833
ไม่มี	น้ำสะอาด	0.8129	11.2430	0.0723	13.8372	2.2541	1.3575	1.0560
ไม่มี	SAE 20W40	0.8209	11.2400	0.0730	13.9650	2.2749	1.3575	1.0975
ไม่มี	โซเดียมสเตียเรท	0.8334	11.2441	0.0741	14.1742	2.4068	1.4150	1.1550
SAE 20W40	ไม่มี	0.8020	11.3110	0.0709	13.7442	2.3338	1.4150	1.1467
SAE 20W40	น้ำสะอาด	0.8223	11.3240	0.0726	14.0958	2.2525	1.3317	1.0540
SAE 20W40	SAE 20W40	0.8244	11.3314	0.0728	14.1400	2.2695	1.3375	1.0620
SAE 20W40	โซเดียมสเตียเรท	0.8132	11.3216	0.0718	13.9425	2.5947	1.5508	1.2500

ผลข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง พื้นที่หน้าตัดภายในและภายนอก และอัตราการลดขนาดจริงของท่อทองแดงหลังผ่านกระบวนการดิ่งขึ้นรูปที่ $Re = 20$ %

สารหล่อลื่น	แมนเดรล	% Re = 20					อัตราการลดจริง (%)
		เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอกหลังดิ่ง (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในหลังดิ่ง (mm)	พื้นที่หน้าตัด ภายนอกหลังดิ่ง (mm ²)	พื้นที่หน้าตัด ภายในหลังดิ่ง (mm ²)	พื้นที่หน้าตัด หลังดิ่ง (mm ²)	
ไม่มี	ไม่มี	13.9569	12.9116	152.9911	130.9325	22.0586	17.9609
ไม่มี	น้ำสะอาด	13.9531	12.9184	152.9089	131.0720	21.8370	18.7853
ไม่มี	SAE 20W40	13.9744	12.9275	153.3750	131.2559	22.1191	17.7360
ไม่มี	โซเดียมสเตียเรท	14.0491	12.9999	155.0189	132.7302	22.2887	17.1051
SAE 20W40	ไม่มี	14.0216	12.9766	154.4126	132.2541	22.1585	17.5895
SAE 20W40	น้ำสะอาด	13.9959	13.0459	153.8487	133.6720	20.1767	24.9600

(ต่อ) ผลข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง พื้นที่หน้าตัดภายในและภายนอก และอัตราการลดขนาดจริงของท่อทองแดงหลังผ่านกระบวนการดัดขึ้นรูปที่ $Re = 20\%$

สารหล่อลื่น	แมนเดรล	% Re = 20					อัตราการลดจริง (%)
		เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอกหลังดัด (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในหลังดัด (mm)	พื้นที่หน้าตัด ภายนอกหลังดัด (mm ²)	พื้นที่หน้าตัด ภายในหลังดัด (mm ²)	พื้นที่หน้าตัด หลังดัด (mm ²)	
SAE 20W40	SAE 20W40	13.9831	12.9352	153.5672	131.4125	22.1546	17.6037
SAE 20W40	โซเดียมสเตียเรท	13.8877	12.8516	151.4783	129.7192	21.7591	19.0747
โซเดียมสเตียเรท	ไม่มี	13.9700	12.9396	153.2790	131.5014	21.7776	19.0061
โซเดียมสเตียเรท	น้ำสะอาด	14.0297	12.9839	154.5916	132.4028	22.1888	17.4767
โซเดียมสเตียเรท	SAE 20W40	13.9256	12.8766	152.3062	130.2244	22.0819	17.8744
โซเดียมสเตียเรท	โซเดียมสเตียเรท	13.9947	12.9480	153.8212	131.6730	22.1483	17.6275
น้ำมันปาล์ม	ไม่มี	13.9430	12.9064	152.6878	130.8271	21.8607	18.6971

(ต่อ) ผลข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง พื้นที่หน้าตัดภายในและภายนอก และอัตราการลดขนาดจริงของท่อทองแดงหลังผ่านกระบวนการดัดขึ้นรูปที่ $Re = 20\%$

สารหล่อลื่น	แมนเดรล	% Re = 20					อัตราการลดลงจริง (%)
		เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอกหลังดัด (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในหลังดัด (mm)	พื้นที่หน้าตัด ภายนอกหลังดัด (mm ²)	พื้นที่หน้าตัด ภายในหลังดัด (mm ²)	พื้นที่หน้าตัด หลังดัด (mm ²)	
น้ำมันปาล์ม	น้ำสะอาด	13.9875	12.9396	153.6633	131.5014	22.1618	17.5770
น้ำมันปาล์ม	SAE 20W40	13.9522	12.9302	152.8884	131.3105	21.5779	19.7489
น้ำมันปาล์ม	โซเดียมสเตียเรท	14.0144	12.9644	154.2543	132.0058	22.2485	17.2546

ผลข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง พื้นที่หน้าตัดภายในและภายนอก และอัตราการลดขนาดจริงของท่อทองแดงหลังผ่านกระบวนการดึงขึ้นรูปที่ $Re = 35\%$

สารหล่อลื่น	แมนเดรล	% Re = 35				พื้นที่หน้าตัด หลังดึง (mm ²)	อัตราการลดลงจริง (%)
		เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอกหลังดึง (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในหลังดึง (mm)	พื้นที่หน้าตัด ภายนอกหลังดึง (mm ²)	พื้นที่หน้าตัด ภายในหลังดึง (mm ²)		
ไม่มี	ไม่มี	12.3863	11.3697	120.4951	101.5283	18.9669	29.4595
ไม่มี	น้ำสะอาด	12.4572	11.4576	121.8793	103.1045	18.7748	30.1738
ไม่มี	SAE 20W40	12.4197	11.6622	121.1466	106.8193	14.3272	46.7149
ไม่มี	โซเดียมสเตียเรท	12.4309	11.3747	121.3662	101.6176	19.7486	26.5522

(ต่อ) ผลข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง พื้นที่หน้าตัดภายในและภายนอก และอัตราการลดขนาดจริงของท่อทองแดงหลังผ่านกระบวนการดัดขึ้นรูปที่ $Re = 35\%$

สารหล่อลื่น	แมนเดรล	% Re = 35				พื้นที่หน้าตัด หลังดัด (mm ²)	อัตราการลดลงจริง (%)
		เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอกหลังดัด (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในหลังดัด (mm)	พื้นที่หน้าตัด ภายนอกหลังดัด (mm ²)	พื้นที่หน้าตัด ภายในหลังดัด (mm ²)		
SAE 20W40	ไม่มี	12.4100	11.3423	120.9577	101.0388	19.9188	25.9190
SAE 20W40	น้ำสะอาด	12.4456	11.3802	121.6531	101.7162	19.9369	25.8519
SAE 20W40	SAE 20W40	12.3684	11.3063	120.1488	100.3985	19.7504	26.5456
SAE 20W40	โซเดียมสเตียเรท	12.3910	11.3500	120.5876	101.1770	19.4106	27.8091

ผลข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง พื้นที่หน้าตัดภายในและภายนอก และอัตราการลดขนาดจริงของท่อทองแดงหลังผ่านกระบวนการดิ่งขึ้นรูปที่ $Re = 50\%$

สารหล่อลื่น	แมนเดรล	% Re = 50				พื้นที่หน้าตัด หลังดิ่ง (mm ²)	อัตราการลดลงจริง (%)
		เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอกหลังดิ่ง (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในหลังดิ่ง (mm)	พื้นที่หน้าตัด ภายนอกหลังดิ่ง (mm ²)	พื้นที่หน้าตัด ภายในหลังดิ่ง (mm ²)		
ไม่มี	ไม่มี	11.2350	10.4338	99.1371	85.5009	13.6362	49.2852
ไม่มี	น้ำสะอาด	11.2430	10.4301	99.2783	85.4411	13.8372	48.5375
ไม่มี	SAE 20W40	11.2400	10.4191	99.2253	85.2604	13.9650	48.0623
ไม่มี	โซเดียมสเตียเรท	11.2441	10.4107	99.2977	85.1236	14.1742	47.2843

(ต่อ) ผลข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง พื้นที่หน้าตัดภายในและภายนอก และอัตราการลดขนาดจริงของท่อทองแดงหลังผ่านกระบวนการดัดขึ้นรูปที่ $Re = 50\%$

สารหล่อลื่น	แมนเดรล	% Re = 50				พื้นที่หน้าตัด หลังดัด (mm ²)	อัตราการลดลงจริง (%)
		เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอกหลังดัด (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในหลังดัด (mm)	พื้นที่หน้าตัด ภายนอกหลังดัด (mm ²)	พื้นที่หน้าตัด ภายในหลังดัด (mm ²)		
SAE 20W40	ไม่มี	11.3110	10.5090	100.4828	86.7387	13.7442	48.8834
SAE 20W40	น้ำสะอาด	11.3240	10.5017	100.7139	86.6182	14.0958	47.5759
SAE 20W40	SAE 20W40	11.3314	10.5070	100.8456	86.7056	14.1400	47.4114
SAE 20W40	โซเดียมสเตียเรท	11.3216	10.5084	100.6707	86.7283	13.9425	48.1460

ข้อมูลความขรุขระผิวภายนอกท่อทองแดงหลังผ่านกระบวนการดัดขึ้นรูปที่ $Re = 20\%$

สารหล่อลื่น	แมนเดรล	ค่าความขรุขระผิวภายนอกท่อ (μm)						ค่าเฉลี่ย
		ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			
ไม่มี	ไม่มี	0.93	0.98	1.10	0.95	1.00	1.18	1.02250
ไม่มี	น้ำสะอาด	1.01	0.93	1.01	1.01	1.08	1.01	1.00800
ไม่มี	SAE 20W40	0.84	0.75	0.77	0.79	0.77	0.80	0.78673
ไม่มี	โซเดียมสเตียเรท	0.98	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.98500
SAE 20W40	ไม่มี	0.95	0.80	0.95	1.09	0.97	0.97	0.95567
SAE 20W40	น้ำสะอาด	0.88	0.86	0.81	0.96	0.96	0.89	0.89400
SAE 20W40	SAE 20W40	0.67	0.69	0.93	0.67	0.95	0.68	0.76500

(ต่อ) ข้อมูลความขรุขระผิวภายนอกท่อทองแดงหลังผ่านกระบวนการดัดขึ้นรูปที่ $Re = 20\%$

สารหล่อลื่น	แมนเดรล	ค่าความขรุขระผิวภายนอกท่อ (μm)						ค่าเฉลี่ย
		ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			
SAE 20W40	โซเดียมสเตียเรท	0.92	0.93	0.89	1.06	0.91	0.93	0.9400
โซเดียมสเตียเรท	ไม่มี	0.85	0.86	0.91	0.89	0.83	0.90	0.8733
โซเดียมสเตียเรท	น้ำสะอาด	0.75	0.72	0.71	0.75	0.73	0.77	0.7384
โซเดียมสเตียเรท	SAE 20W40	0.79	0.81	0.76	0.89	0.79	0.94	0.8300
โซเดียมสเตียเรท	โซเดียมสเตียเรท	0.85	0.86	0.92	0.85	0.83	0.82	0.8550
น้ำมันปาล์ม	ไม่มี	1.25	1.00	0.92	0.92	0.98	0.99	1.0100
น้ำมันปาล์ม	น้ำสะอาด	0.84	0.89	0.95	0.93	0.81	0.88	0.8840
น้ำมันปาล์ม	SAE 20W40	0.92	0.87	0.84	0.87	0.88	0.88	0.8750
น้ำมันปาล์ม	โซเดียมสเตียเรท	0.88	0.81	0.89	0.94	0.88	0.88	0.8800

ข้อมูลความขรุขระผิวภายนอกท่อทองแดงหลังผ่านกระบวนการดัดขึ้นรูปที่ $Re = 35\%$

สารหล่อลื่น	แมนเดรล	Ra						ค่าเฉลี่ย
		ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			
ไม่มี	ไม่มี	1.27	1.28	1.29	1.31	1.29	1.29	1.2875
ไม่มี	น้ำสะอาด	1.43	1.45	1.50	1.46	1.44	1.46	1.4571
ไม่มี	SAE 20W40	1.16	1.37	1.22	1.26	1.25	1.25	1.2525
ไม่มี	โซเดียมสเตียเรท	1.37	1.22	1.26	1.28	1.28	1.29	1.2833
SAE 20W40	ไม่มี	1.25	1.38	1.64	1.64	1.38	1.62	1.4844
SAE 20W40	น้ำสะอาด	1.20	1.47	1.43	2.28	1.47	1.52	1.5612
SAE 20W40	SAE 20W40	1.25	1.44	1.12	1.48	1.42	1.22	1.3225
SAE 20W40	โซเดียมสเตียเรท	1.23	1.27	1.67	1.34	1.24	1.35	1.3500

ข้อมูลความขรุขระผิวภายนอกท่อทองแดงหลังผ่านกระบวนการดัดขึ้นรูปที่ $Re = 50\%$

สารหล่อลื่น	แมนเดรล	Ra						ค่าเฉลี่ย
		ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			
ไม่มี	ไม่มี	1.16	1.17	1.25	1.03	1.25	1.24	1.1833
ไม่มี	น้ำสะอาด	1.01	1.05	1.07	1.01	1.09	1.11	1.0560
ไม่มี	SAE 20W40	1.17	0.98	0.98	1.00	1.23	1.23	1.0975
ไม่มี	โซเดียมสเตียเรท	1.10	1.03	1.28	1.21	1.16	1.15	1.1550
SAE 20W40	ไม่มี	1.12	1.17	1.15	1.14	1.15	1.15	1.1467
SAE 20W40	น้ำสะอาด	1.17	0.96	1.22	0.98	0.94	1.05	1.0540
SAE 20W40	SAE 20W40	1.03	1.02	1.18	1.01	1.07	1.06	1.0620
SAE 20W40	โซเดียมสเตียเรท	1.25	1.23	1.27	1.24	1.24	1.27	1.2500

ข้อมูลความความหนาของท่อทองแดงหลังผ่านกระบวนการดิ่งขึ้นรูปที่ $Re = 20\%$

สารหล่อลื่น	แมนเดรล	ความหนาของท่อหลังดิ่งขึ้นรูป (ม.ม.)				ค่าเฉลี่ยรวม
		ค่าเฉลี่ย				
ไม่มี	ไม่มี	1.063	1.043	1.034	1.043	1.0453
ไม่มี	น้ำสะอาด	1.033	1.041	1.041	1.024	1.0347
ไม่มี	SAE 20W40	1.041	1.040	1.055	1.051	1.0469
ไม่มี	โซเดียมสเตียเรท	1.039	1.055	1.054	1.048	1.0492
SAE 20W40	ไม่มี	1.040	1.038	1.045	1.053	1.0450
SAE 20W40	น้ำสะอาด	0.953	0.948	0.953	0.950	0.9500
SAE 20W40	SAE 20W40	1.048	1.049	1.051	1.044	1.0479

(ต่อ) ข้อมูลความความหนาของท่อทองแดงหลังผ่านกระบวนการดัดขึ้นรูปที่ $Re = 20\%$

สารหล่อลื่น	แมนเดรล	ความหนาของท่อหลังดัดขึ้นรูป (ม.ม.)				ค่าเฉลี่ยรวม
		ค่าเฉลี่ย				
SAE 20W40	โซเดียมสเตียเรท	1.033	1.036	1.041	1.030	1.0361
โซเดียมสเตียเรท	ไม่มี	1.033	1.035	1.041	1.015	1.0304
โซเดียมสเตียเรท	น้ำสะอาด	1.048	1.043	1.049	1.046	1.0458
โซเดียมสเตียเรท	SAE 20W40	1.050	1.045	1.050	1.048	1.0490
โซเดียมสเตียเรท	โซเดียมสเตียเรท	1.043	1.045	1.050	1.045	1.0467
น้ำมันปาล์ม	ไม่มี	1.048	1.016	1.055	1.039	1.0367
น้ำมันปาล์ม	น้ำสะอาด	1.045	1.051	1.043	1.050	1.0479
น้ำมันปาล์ม	SAE 20W40	0.953	0.951	0.949	0.950	0.9500
น้ำมันปาล์ม	โซเดียมสเตียเรท	1.050	1.053	1.050	1.048	1.0500

ข้อมูลความความหนาของท่อทองแดงหลังผ่านกระบวนการดิ่งขึ้นรูปที่ $Re = 35\%$

สารหล่อลื่น	แมนเดรล	ความหนาของท่อหลังดิ่งขึ้นรูป (ม.ม.)				ค่าเฉลี่ยรวม
		ค่าเฉลี่ย				
ไม่มี	ไม่มี	1.019	1.038	1.019	0.991	1.0166
ไม่มี	น้ำสะอาด	0.988	1.000	1.003	0.996	0.9996
ไม่มี	SAE 20W40	0.776	0.761	0.744	0.749	0.7575
ไม่มี	โซเดียมสเตียเรท	1.055	1.051	1.059	1.059	1.0563
SAE 20W40	ไม่มี	1.063	1.065	1.068	1.078	1.0678
SAE 20W40	น้ำสะอาด	1.063	1.064	1.056	1.076	1.0654
SAE 20W40	SAE 20W40	1.050	1.056	1.068	1.075	1.0622
SAE 20W40	โซเดียมสเตียเรท	1.043	1.040	1.036	1.038	1.0410

ข้อมูลความความหนาของท่อทองแดงหลังผ่านกระบวนการดิ่งขึ้นรูปที่ $Re = 50\%$

สารหล่อลื่น	แมนเดรล	ความหนาของท่อหลังดิ่งขึ้นรูป (ม.ม.)				ค่าเฉลี่ยรวม
		ค่าเฉลี่ย				
ไม่มี	ไม่มี	0.796	0.786	0.813	0.811	0.8013
ไม่มี	น้ำสะอาด	0.818	0.813	0.810	0.811	0.8129
ไม่มี	SAE 20W40	0.825	0.825	0.813	0.821	0.8209
ไม่มี	โซเดียมสเตียเรท	0.829	0.831	0.833	0.840	0.8334
SAE 20W40	ไม่มี	0.790	0.812	0.776	0.830	0.8020
SAE 20W40	น้ำสะอาด	0.826	0.823	0.824	0.817	0.8223
SAE 20W40	SAE 20W40	0.831	0.825	0.815	0.826	0.8244
SAE 20W40	โซเดียมสเตียเรท	0.810	0.810	0.815	0.818	0.8132

Certificate of Attendance

International Conference on Mechanical, Civil and Material Engineering
July 11-13, 2014, Phuket, Thailand

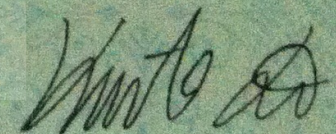
Tubsamon Dusitsopittawong

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

has attended the conference and presented a paper entitled

"The Study of Grain Boundary Plane Rotation for FCC Bi-Crystal
Structure by the Molecular Dynamics Simulation"

Chief Executive Committee



The study of grain boundary plane rotation for FCC bi-crystal structure by the molecular dynamics simulation

Tubsamon Dusitsopittawong^a, Onuma Santawitee^b and Panya Kansuwan^{a*}

^aDepartment of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520

^bNational Metal and Materials Technology Center, Pathumthani, Thailand 12120

*Corresponding Author: kkpanya@kmitl.ac.th

Abstract

The kinetics of grain boundary plane rotation caused by atomic rearrangement around the grain boundary region was investigated by molecular dynamics simulation using Lennard-Jones-type interatomic potential. Simulation systems were constructed by posing atoms on FCC lattice points of joint upper and lower grains. By orienting both or either grain about [001], created respectively were symmetrical and asymmetrical grain boundaries (GBs) systems of which atomic configuration was first identified after energy minimization; thus, providing reference structures. To study the GB plane rotation, only special GBs called $\Sigma 5$ (310) were selected. Initially, GB plane's normal vectors were faced up in [010] but by rotating the planes about [001] at the center of simulation cell, zigzag like GBs were consequently established with perfectly x-periodic boundary condition. During simulated annealing, GB planes rotated by atomic readjustment causing curved boundary composing of various structures of symmetrical, asymmetrical, and amorphous structures in each segment along the GBs. Some correlations between bi-crystal structure and the disturbed one could be existed and interpreted from their local atomic structure.

Keyword: Grain boundary plane rotation, Molecular dynamics, Coincidence site lattice (CSL)

1. Introduction

Engineering materials in industrial applications are mostly polycrystalline of various oriented joint crystals or grains separated by two dimensional regions of approximately 0.5-1.0 nm thick called grain boundaries (GBs). Understanding the material behaviors involves fundamental knowledge of the influence of individual contribution to controlled mechanism of interested phenomenon. Single grain or crystal properties are anisotropic in nature. When randomly oriented grains aggregate in enough numbers the embedded anisotropy are screened out and thus isotropic bulk property of materials. On the contrary, when crystals arrange in a prefer direction the crystalline anisotropy stands out as identified by texture analysis which finds most usefulness in sheet metal forming processes. GBs, coexisted planar defects to polycrystalline, are the second most essential part playing their role to the bulk property, especially mechanical properties. Even though GBs occupy only small amount fraction comparing to the bulk volume, some phenomena such as coble creep, intergranular corrosion, and strain hardening required GBs as controlled paths to take place via relevant mechanism. Attempts were conducted to model the structure at the interfacing grains from the vary early model of amorphous glue boundaries for high angle grain boundaries (HAGBs) to more sophisticate model based on dislocation for low angle grain boundaries (LAGBs) and atomic periodicity for Coincident Site Lattice Boundaries (CSLBs) (Randle, 1993; 2001; 1996). The latter achieved great explanation to physical observation that some GBs possessed prominent properties over average GBs. In order to exploit the superior characteristics, selective enhancement processes of the special boundaries, typically low- Σ CSLBs, into materials are engineered and coined as Grain Boundary Engineering (GBE). The successful thermomechanical processes include 1) Single-step strain annealing 2) Single-step recrystallization 3) Multi-step strain annealing and 4) Multi-step recrystallization. Each of them is suited for low stacking fault energy FCC materials and the optimal procedure for different metals need some trail experiments (Engelberg, Newman, & Marrow, 2008; Lee & Richards, 2005; Li, Cahoon, & Richards, 2005; Thomson & Randle, 1996; Schwartz & King, 1998). Nevertheless, common mechanism exists through the necessary of stored elastic strain energy in the materials through plastic deformation followed by thermal activating atomic rearrangement to get rid of higher energy GBs through annealing process. GB motion and reaction between GBs at triple junction are responsible for such the transformation which finally created new low energy GBs (annealed twin boundaries). On the other hand, GB plane rotation and Grain rotation are the other mechanisms but less important to FCC materials since 1) annealing twin is more active and 2) inside grains are 3D constraint. However, surface grains are less restrictive that allows GB plane rotation and Grain rotation more agile. In fact, it was found that they were the only two processes to engineer GBs in BCC materials when annealing twins is prohibited.

Recently, our research group has played more attention toward GBE of BCC crystal structure materials using fine tuning process by annealing small strained specimen at some temperature for certain period of time which allows either GB plane rotation or Grain rotation to occur but a fundamental question remained (Thomson & Randle, 1997). Whether the mechanisms are energetically and kinetically feasible? To partly answer the question, we resort to MD simulation of Lennard-Jones potential type, the simplest model but not trivial for much knowledge could be deduced prior to constructing more precise model of BCC ferrite or conducting experiments on real materials. However, former MD simulation demonstrated that both GB Plane rotation and Grain rotation cooperated during annealing to a certain extent (Uehara et al., 2008). Decomposing them is one of the challenges and zigzag-like GBs are established for the purpose.

2. Methodology

2.1 Simulaiton Model

A series of GB simulation cells is created by posing atoms on two FCC crystal structure with different misorientation angle yielding x-z GB plane at $y = 0$ on the given referent coordinate system. Three types of GBs with y- and z-periodic boundary condition (BC) are constructed, namely, Symmetric (SYM), Asymmmetric (ASYM) and Zigzag (Fig.1a, 1b, 2a). A symmetrical GB is first obtained by symmetrically misorienting the upper grain ($y > 0$) by $\theta/2$ and the lower grain ($y < 0$) by $-\theta/2$ about z-direction (Fig.1a). The increment interval of the angle θ is every about 2° using Eq. (1) to specify the dimension of the simulation box in x-direction which ensured x-periodic BC.

$$\Sigma = m^2 + n^2 \rightarrow \theta = 2 \arctan\left(\frac{n}{m}\right) \quad (1)$$

where m and n are integer ≥ 0 . The Σ -value defines reciprocal density of the number of Coincident Site Lattice to that of perfect lattice on GB and we usually use the number to classify type of CSLBs (Randle,1993; Davies & Randle, 2001; Brandon, 1996). For an ASYM GB, only upper grain is rotated by θ (Fig.1b) but in this case it is impossible to applied x-periodic BC for most of the θ -value. To diminish the boundary effect to the value of GB energy, GB region are laterally sandwiched by constant width layers with fixed atomic position and variable width buffer layers (Fig.1c). Subsequently, we have to increase the buffer width until the asymptotic GB energy satisfactory. Since the rotation may bring some pairs of atoms too close which raise the unrealistic infinite potential energy one of atoms within a threshold range will be randomly eliminated. For zigzag boundary, boundary of type $\Sigma 5$ is chosen and partitioned laterally into 4 parts, each of length 5 in lattice unit, to facilitate x-periodic boundary condition when rotating the twin boundary plane (310) about [001] at the center of the box (Fig.2). Rotation increment is of every 5° from $\alpha = 0^\circ$ to 45° (Fig.2b).

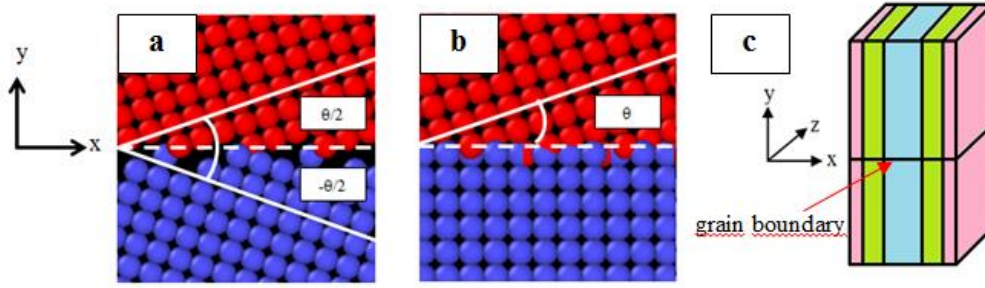


Fig.1: Illustration of a) the SYM GB b) the ASYM GB and c) asymmetrical buffer set up

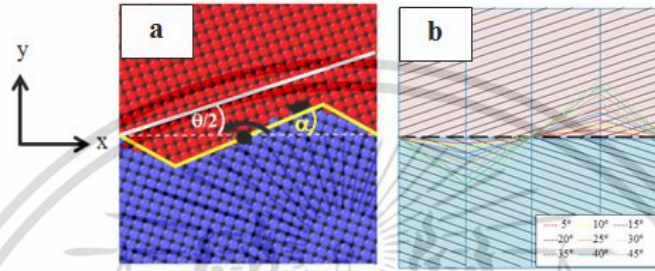


Fig.2: Illustrations of rotation angle α and misorientation angle θ of the zigzag boundary system by a) atomic model b) schematic planes model

2.2 Definition of GB energy (Uehara et al., 2008)

The large-scale atomic/molecular massively parallel simulation (LAMMPS) code (Plimpton, 1995; LAMMPS project, 2013) is employed to perform our MD simulation following the Lennard-Jones potential:

$$\phi_i = 4\epsilon \sum_{i \neq j} \left[\left(\frac{\sigma}{r_{ij}} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r_{ij}} \right)^6 \right] \quad (2)$$

in which ϕ_i is the potential energy of the i^{th} atom and r_{ij} is the distance between i^{th} and j^{th} atoms. Further modification is the shifted option at cut-off radius equal to 3 to conserve system energy during the simulation leading to the equilibrium FCC lattice parameter value of 1.54638 at zero temperature. Energy and distance dimensions in Eq.(2) become unitless by taking 4ϵ and σ as the energy and length references, respectively, while advisable form of the GB energy is in Eq.(3):

$$\phi_{gb} = \sum_{i \in V} (\phi_i - \phi_o) / S_{gb} \quad (3)$$

in which ϕ_o is the bulk atomic energy and S_{gb} is the GB area. Only atoms influenced by GB regions give the non-zero term of $\phi_i - \phi_o$ and its summation over the dedicated domain V will be the appropriate indicator of the stability of GB after GB area division.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Result and Discussion

3.1 GB energy after conjugate gradient relaxation

Actually, GB structure and energy are completely described by 8 Degrees of freedom, 5 macroscopic and 3 microscopic. One macroscopic DOF i.e. θ was controlled here while the other 4 macroscopic parameters were predetermined by the axis rotation about [001] and the definition of SYM GBs and ASYM GBs. However, in searching for minimum GB energy, we must take the microscopic DOFs and the number of GB atoms into account. Translating the upper grain parallel to x- and y-direction to adjust GB free volume and varying threshold distance to eliminate too close particles were applied before energy minimizing the system energy by conjugate gradient algorithm at constant volume.

The SYM and ASYM GB energy of the relaxed samples were plotted as a function of θ in Fig.3 exhibiting cusp-shape minimum for several special boundaries for $\Sigma 5$ (310) and $\Sigma 5$ (210) of SYM GBs and 18.43° , 26.57° , 33.69° , and 36.87° of ASYM GBs.

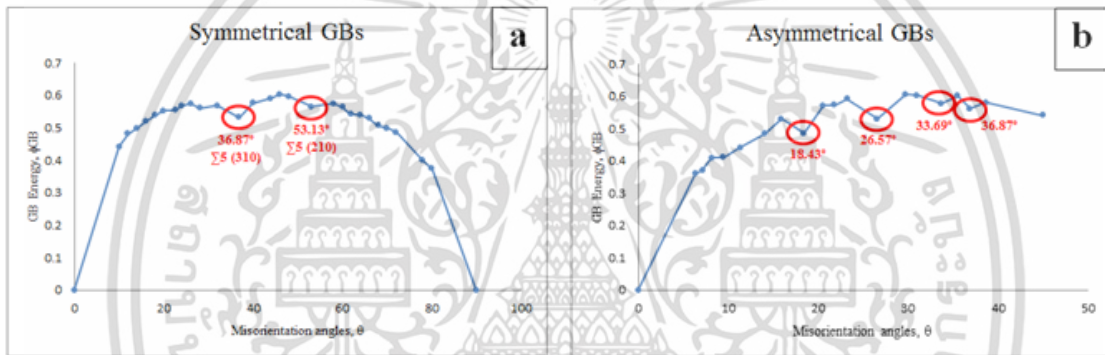


Fig 3. The GB energy as a function of misorientation angles for a) SYM GBs b) ASYM GBs

The atomic configurations of selected systems relaxed to the minimum GB energy were shown in Fig.4 in which the atoms were colored according to their potential energy. We noticed the periodic structures of alternating defect free region and order defect region at low misorientation angle in agreement with the structure of the dislocation based model of the low angle GBs. When the misorientation angle increased the order defects became more connected and more two dimensional aspect. Obviously, simple but not trivial, these structures express the fundamental properties of GB energy i.e. GB movement, GB diffusion. Of particular interest, the distribution of atomic potential energy for relaxed SYM and ASYM GBs at misorientation angle of 36.87° were figured out in Fig.5 as the finger print of the structure to identify the structure in more complicated cases.

3.2 Dynamic behavior of GB plane rotation

The previous arrangement of $\Sigma 5$ (310) was chosen as an initial state with application of plane rotation angle, α (Fig.2). By suitable value of threshold distance, we can construct the zigzag model with exactly number of particles as in the initial state i.e. $\Sigma 5$ (310) system. GB

plane rotation was performed every 5° increment before simulated annealing the system at temperature = 1.0 and gradually cooling the system down to zero temperature where the final configuration and atomic potential energy were recorded. Note that due to z-periodic BC, the length of GB on x-y plane is equivalent to the area of GB on x-z plane.

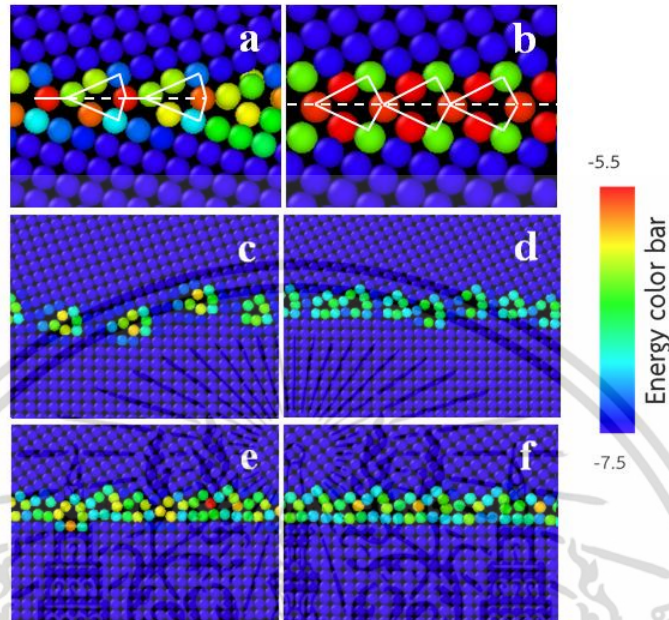


Fig 4. Atomic configuration of SYM GBs a) $\Sigma 5$ (310) 36.87° b) $\Sigma 5$ (210) 53.13° and ASYM GBs c) 18.43° d) 26.57° e) 33.69° and f) 36.87°

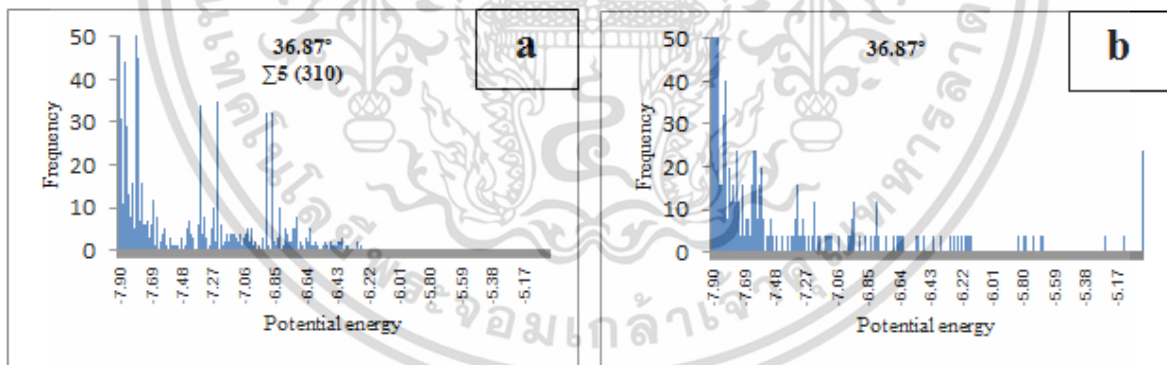


Fig.5: Atomistic potential energy distribution for relaxed a) SYM $\Sigma 5$ (310) b) ASYM GBs 36.87°

The average atomic potentials of two different total time steps of 1000 and 6000 were shown in Fig. 6 as the function of α . After annealing the system with small rotation angle of 5°, GB plane rotated back to 0° angle with almost the same system energy while $\alpha \geq 10^\circ$, the system evolved similarly to diminish system energy as described. After conjugate gradient minimizing the initial zigzag configuration at zero temperature, the system allowed short range atomic displacement which reduced only local energy resulting in segments of SYM and ASYM structure (Fig. 7a1,7b1,7c1). However, the system still possessed longer GB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 6
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

length with plenty of local energy to release and drive the GB structure readjustment for the lower energy state of the system. As indicated in Fig.7b2,7c2, enough atomic mobility caused the adjustment. Depending on α -value, sine-like curve boundary occurred with more relaxed structure of both structural and non-structural segments. This suggested that the later structure took place when energy dissipation of shorter GB systems surmounted that of tilted order boundary with the longer GB systems.

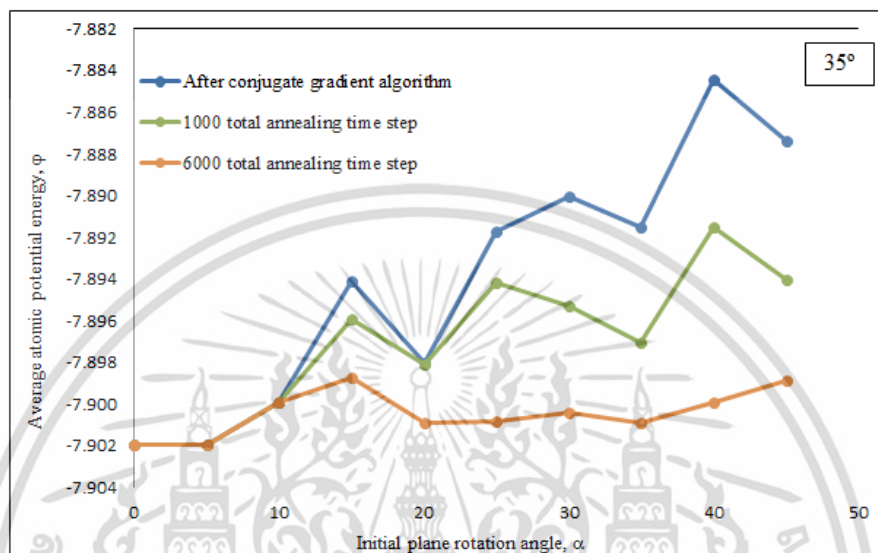


Fig.6: Average atomic potential energy at different annealing time step with initial plane rotation angles

Plane rotation continued to the angle of 18-20° but with slower rate. During this angular range, we observed the structure of asymmetrical boundary at 36° stagnant. Both atomic configuration and atomic potential energy distribution substantiated this point by comparing Fig.4f with 7b2,7c2 and Fig.5b with 8b, respectively. With enough supplied heat, the system further lowered its total energy by reducing GB length and the shortest GB length of SYM configuration certainly fulfilled the total minimum energy. Nevertheless, such the lowest state was unattainable because of the immobility of redundant atoms or vacancies along the GB by local energy traps which caused other high energy symmetrical boundary other than $\Sigma 5$ (310) or partly amorphous section. In retrospect, island model of GB in which with both amorphous regions and crystal regions were scattered may suitably explain our result at both 1000 and 6000 total time steps. In our simulation, the atomic elimination and addition are limited but in real system those atoms may diffuse in and out more easily as a result of high GB diffusivity and, therefore, ubiquitous observation of twin boundaries. In other words, high diffusivity at GBs shortens the state existence. This may be the reason why the island model could not observe in real system and thus became obsolete. However, Fig. 7a3, 7b3, 7c3 strongly indicate the trace of the amorphous segment along with $\Sigma 5$ (310) type as comparing the energy distribution of Fig.5a and Fig.8c.

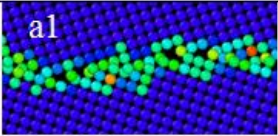
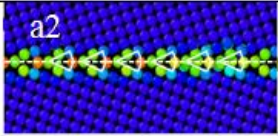
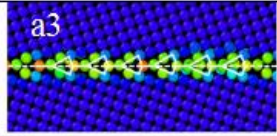
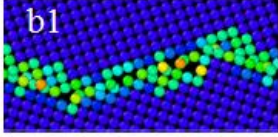
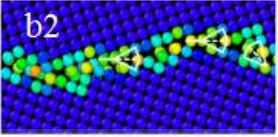
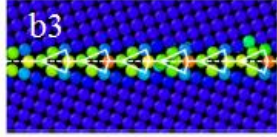
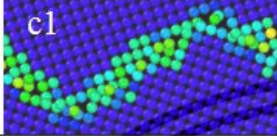
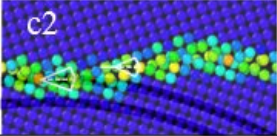
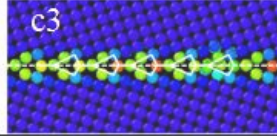
Initial plane rotation angle, α	Total annealing time step		
	After conjugate gradient algorithm	1000	6000
10°			
20°			
35°			

Fig.7: Atomic configuration for zigzag type during energy minimization at initial plane rotation of a) 10° b) 20° and c) 35° at different MD time steps

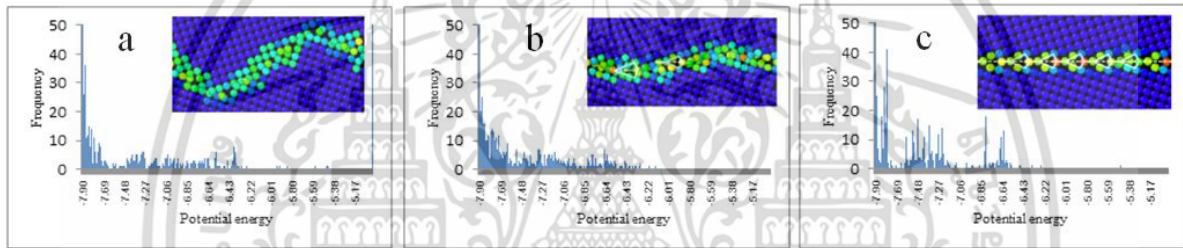


Fig.8: Atomistic potential energy distribution for zigzag boundaries of SYM $\Sigma 5$ (310) type after a) Conjugate gradient minimization algorithm b) MD 1000 total time steps c) MD 6000 total time steps

4. Conclusion

We have studied the dynamic behaviors of GB plane rotation using MD atomistic simulation. The following characteristics are observed

- 1) Plane rotation mechanism is possible to lower total system energy resulting to shorter length GB when thermally activated energy is high enough.
- 2) Curve GB may compose of order defect segments, amorphous, and defect free region
- 3) The minimum energy will attained for long period of time by rotation indicating the possibility of twin boundary formation by rotating the plane to lowest possible energy configuration expressing the possibility of fine tuning for other crystal structure like BCC through the mechanism

5. Acknowledgement

The authors would like to thank Assoc. Prof. T. Uehara, Ph.D. from Dept. Mechanical Systems Eng., Yamagata University, Japan for helpful discussion and devices for GB energy and Mark Tschopp for LAMMPS.

6. References

- V. Randle (1993). The measurement of Grain Boundary Geometry. *Institute of Physics, London.*
- Valerie Randle (2001). The coincidence site lattice and the sigma enigma. *Materials Characterization* . 47, 411-416.
- V. Randle (1996). The role of the coincidence site lattice in grain boundary engineering. *Institute of Materials, London.*
- D.L. Engelberg, R.C. Newman, T.J. Marrow (2008). Effect of the thermomechanical process history on grain boundary control in an austenitic stainless steel. *Scripta Materialia*. 59, 554-557.
- S.L. Lee, N.L. Richards (2005). The effect of single-step low strain and annealing of nickel on grain boundary character. *Materials Science and Engineering A*. 390, 81-87.
- Quiangyong Li, J.R. Cahoon, N.L. Richards (2009). Effect of thermo-mechanical processing parameters on the special boundary configurations of commercially pure nickel. *Materials Science and Engineering A*. 527, 263-271.
- C.B. Thomson, V. Randle (1996). A study of twinning in nickel. *Scripta Materialia*. 35, 385-390.
- Adam J. Schwartz, Wayne E. King (1998). The potential engineering of grain boundaries through the thermomechanical processing. *JOM*, 50-55.
- C.B. Thomson, V. Randle (1997). Fine tuning at $\Sigma 3^n$ boundaries in nickel. *Acta Mater*. 45, 4909-4916.
- Takuya Uehara, Naoki wakabayashi, Yoshitaka Hirabayashi, Nobutada Ohno (2008). An atomistic study of grain boundary stability and crystal rearrangement using molecular dynamics techniques. *Internation Journal of Mechanical Sciences*. 50,956-965.
- P.Davies, V. Randle (2001). Grain boundary engineering and the role of the interface plane. *Materials Science and Technology*. 17, 615.
- D.G. Brandon (1966) The structure of high-angle grain boundaries. *Acta Matall*. 14, 1479.
- S. J. Plimpton (1995). Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics. *J Comp Phys*. 117,1-19.
- Lammps project (<http://lammps.sandia.gov>)

Conference Program



JULY
2014
PHUKET

IBSSS

The Global Symposium on Social Sciences

ISSTEP

International Symposium on Society, Technology, Tourism, Education and Politics

IRCITCS

International Research Conference on Information Technology and Computer Sciences

CMCME

International Conference on Mechanical, Civil and Material Engineering

อิทธิพลของแมนเดรลเหลวต่อการลดพื้นที่หน้าตัด ความเค้นดึง และความหนาในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อทองแดง

Influence of Fluid Mandrel on Area Reduction, Drawing Stresses and Thickness in Copper Tube Drawing

ทัฬหะศมน ดุสิตโสภิตวงศ์ สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาอิทธิพลของแมนเดรลเหลวที่ส่งผลกระทบต่อ การลดของพื้นที่หน้าตัด ความหนา และความเค้นดึงของท่อในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อทองแดง ได้ทำการทดลองโดยใช้ท่อทองแดงตามมาตรฐาน JIS C12200 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของท่อ 15.88 มิลลิเมตร และ 1.12 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยของเหลวที่บรรจุไว้ภายในท่อทองแดงเพื่อทำหน้าที่เป็นแมนเดรล คือ น้ำสะอาด และ น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 จนเต็ม จากนั้นทำการดึงขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ที่มีขนาดครึ่งมมแม่พิมพ์เท่ากับ 15 องศา เพื่อลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลงร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยศึกษาที่อัตราเร็วในการดึงขึ้นรูปเท่ากับ 5 และ 30 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าชนิดของแมนเดรลเหลวส่งผลกระทบต่อขนาดของพื้นที่หน้าตัด ความหนาของท่อและความเค้นดึง และยังขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของแมนเดรลเหลวและอัตราเร็วที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปด้วย

คำสำคัญ : การดึงขึ้นรูปท่อ, ท่อทองแดง, แมนเดรลเหลว, การลดพื้นที่หน้าตัด, ความเค้นดึง

Abstract

The objective of this research is to study the effect of the fluid mandrel on the reduction of area, drawing stress and thickness in copper tube drawing process. The standard copper tube JIS C12200 with 15.88 mm diameter and 1.12 mm wall thickness is chosen for this experimental investigation. Two types of fluid mandrel, water and lubrication oil (SAE20W40) were contained in the copper tube. The copper tube is drawn through the die ($\alpha = 15^\circ$) by using the area reduction of 20, 35 and 50% with the drawing speeds at 5 and 30 mm/min. The results shown the influence of the fluid mandrel on the reduction of area, the tube thickness and the drawing stress and also depend on the density of fluid and the drawing speed.

Keywords : Tube drawing, Copper tube, Fluid mandrel, Reduction of area, Drawing stress

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ [1,2,4]

การดึงขึ้นรูป เป็นกระบวนการขึ้นรูปที่นิยมในงานอุตสาหกรรมการผลิตท่อในปัจจุบัน โดยการนำท่อมาดึงลดขนาดทั้งด้านในและด้านนอก โดยดึงผ่านแม่พิมพ์ เพื่อให้ได้ขนาดตามต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้ เป็นการดึงขึ้นรูปแบบเย็นที่อาศัยแรงในการดึงขึ้นรูปสูง และวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด รูปร่างแบบถาวรที่อุณหภูมิห้อง แต่ชิ้นงานที่ได้จะมีความแข็งแรงสูง สามารถควบคุมขนาดสุดท้ายได้แน่นอน และผิวของวัสดุที่ได้มีความสวยงาม

การพัฒนากระบวนการผลิตเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการผลิต ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนในการดำเนินงานลดต่ำลง ใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานน้อยลง ให้ผลผลิตสูงขึ้น ผลผลิตที่มีคุณภาพสูงขึ้น การปรับปรุงตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการผลิตเป็นอีกวิธีหนึ่งของการพัฒนากระบวนการผลิต การปรับปรุงตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการผลิตที่สำคัญ เช่น ขนาดแม่พิมพ์ ชนิดของสารหล่อลื่น ชนิดของแมนเดรล ให้มีความเหมาะสม เพื่อให้ได้ชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตรงตามความต้องการในการใช้งาน

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด ว่าส่งผลกระทบต่อความหนาของท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งภายในและภายนอก รวมไปถึงความเค้นดึงที่เกิดขึ้นขณะทำการดึงขึ้นรูป อีกทั้งยังมีของเหลวที่ใช้เป็นแมนเดรลมาพิจารณาด้วย โดยศึกษาว่าตัวแปรเหล่านี้ จะส่งผลกระทบต่อวัสดุที่ใช้ทำท่ออย่างไรบ้าง

2. การดึงขึ้นรูป (Tube Drawing Process) [2,3]

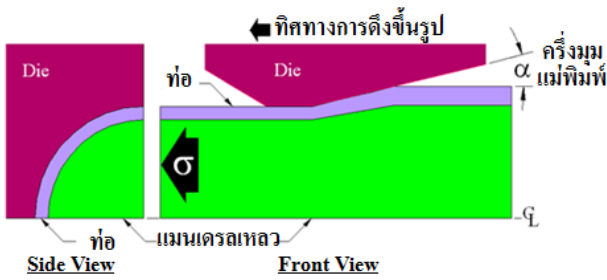
การดึงขึ้นรูป เป็นหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมที่เก่าแก่วิธีหนึ่ง โดยเป็นการทำให้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อ ลวด หรือเหล็กท่อนกลม ลดขนาดลงตามที่ต้องการ ซึ่งตัวกำหนดขนาดของวัสดุในขณะที่ดึงขึ้น

รูป คือ แม่พิมพ์ (Die) ที่ทำจากซีเมนต์คาร์ไบด์หรือเพชรอุตสาหกรรม เพราะจะทำให้แม่พิมพ์มีอายุการใช้งานที่นาน และทนต่อการสึกหรอสูง โดยปกติแล้วการดึงขึ้นรูปนิยมทำที่อุณหภูมิห้องและทำการดึงซ้ำๆ ในบางกรณีได้มีการให้ความร้อนหรืออบอ่อนแก่ชิ้นงานที่ต้องดึงซ้ำ เพื่อลดความเครียดแข็งที่เกิดขึ้นในชิ้นงานก่อนการดึงครั้งต่อไป

การดึงขึ้นรูปแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดหลัก คือ 1. การดึงขึ้นรูปแบบไม่มีแมนเดรลหรือแกน เรียกว่า การขึ้นรูปแบบซิงกิ้ง (Tube Sinking) โดยหลังจากดึงผ่านแม่พิมพ์จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลง ในขณะที่ความหนาและความยาวของท่อจะเพิ่มขึ้น จะขึ้นอยู่กับความเค้นดึง ลักษณะของแม่พิมพ์ และแรงเสียดทานระหว่างแม่พิมพ์กับชิ้นงาน วิธีนี้จะทำให้ผิวภายในและภายนอกชิ้นงานมีความขรุขระ ลักษณะชิ้นงานที่ได้มีขนาดไม่คงที่ตลอดทั้งชิ้นงาน 2. การดึงขึ้นรูปแบบมีแกน (Plug Drawing or Mandrel Drawing) การขึ้นรูปแบบนี้เป็นการขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดกลาง ไปจนถึงขนาดใหญ่ นิยมใช้ในการผลิตท่อผนังบาง ซึ่งแกนจะอยู่ภายในท่อและจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยอาศัยแรงเสียดทานไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางที่ใช้ดึง โดยวิธีนี้ ผิวชิ้นงานทั้งภายในและภายนอกมีความเรียบกว่าแบบซิงกิ้ง

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การขึ้นรูปท่อแบบมีแกนเหลว (Fluid Mandrel) คือ การดึงวัสดุผ่านแม่พิมพ์โดยอาศัยแรงดึงในการดึงวัสดุที่บริเวณปลายของท่อที่สอดผ่านแม่พิมพ์ออกมา โดยใช้ของเหลวเป็นแกนกลางในการดึงขึ้นรูป แม่พิมพ์จะทำหน้าที่ควบคุมขนาดและผิวภายนอกท่อ ส่วนขนาดและผิวภายในท่อจะถูกกำหนดด้วยแกนเหลว แสดงดังรูปที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 การดึงขึ้นรูปท้อโดยใช้แมนเดรลเหลว

3. วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ชิ้นทดสอบที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของ การลดลงของพื้นที่หน้าตัด ต่อความหนาของท้อ และความเค้นดึง ในกระบวนการดึงขึ้นรูปท้อโดยใช้แมนเดรลเหลวในงานวิจัยนี้ คือ ท้อทองแดงขนาด 15.88 มม. หนา 1.12 มม. โดยดึงผ่านแม่พิมพ์ 3 ขนาด ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงดังต่อไปนี้

3.1 ท้อทองแดง ตามมาตรฐาน JIS C12200 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 15.88 มม. ความหนา 1.12 มม. ความยาวท้อก่อนดึง 10 ซม. ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลดังตารางที่ 1 ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชิงกลของท้อทองแดงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป

Young's modulus, E (MPa)	117,000
Yield stress, σ_y (MPa)	120
Poisson's ratio, ν	0.31
Die half-angle, α (Degree)	15

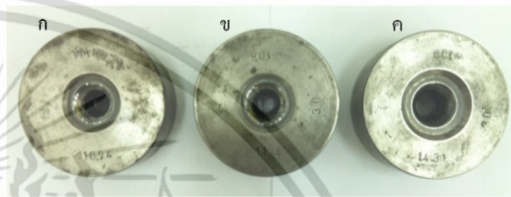
3.2 เครื่องทดสอบแรงดึง Universal Testing Machine

Testometric Model รุ่น M500-100 kN (UTM) ขนาดแรง 100 กิโลนิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 2

3.3 แม่พิมพ์ (Die) ในการทดลอง เลือกใช้แม่พิมพ์ที่มีขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ (α) เท่ากับ 15 องศา โดยมีอัตรา การลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20, 35 และ 50% ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 เครื่องทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3 ชุดแม่พิมพ์ขนาดครึ่งมุม 15 องศา ที่ขนาดการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ ก) 20% ข) 35% ค) 50%

3.4 แมนเดรลเหลว แมนเดรลที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป โดยค่าความหนาแน่นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังตารางที่ 2 ในปริมาณการใช้ 18 มิลลิลิตร ต่อการทดลองในแต่ละครั้ง

ตารางที่ 2 ค่าความหนาแน่นของแมนเดรลเหลวที่อุณหภูมิห้องที่ใช้ในการทดลอง

แมนเดรลเหลว	ความหนาแน่น (kg/m ³)
น้ำสะอาด	1000*
น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40	896*

*www.engineeringtoolbox.com

4. ขั้นตอนการทดลอง

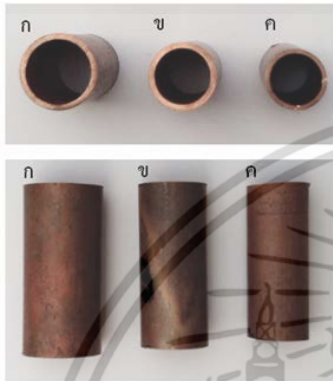
ในการทดลองจะทำการดึงลดขนาดท้อทองแดงผ่านแม่พิมพ์ที่มีขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ 15 องศาให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดลดลง 20, 35 และ 50% ภายในท้อบรรจุ น้ำสะอาดและน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 เพื่อใช้เป็นแมนเดรลเหลว โดยศึกษาที่อัตราเร็วในการดึงขึ้นรูป 5 และ 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ม.ม./นาที แล้วบันทึกค่าแรงดึงโดยใช้หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

5. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

หลังจากทำการดึงขึ้นรูปท่อทองแดง รูปร่างของท่อทองแดงที่ได้หลังดึง พบว่า ขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานลดลงตามขนาดของแม่พิมพ์ที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ท่อทองแดงหลังดึงที่อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัด ก) 20% ข) 35% และ ค) 50%

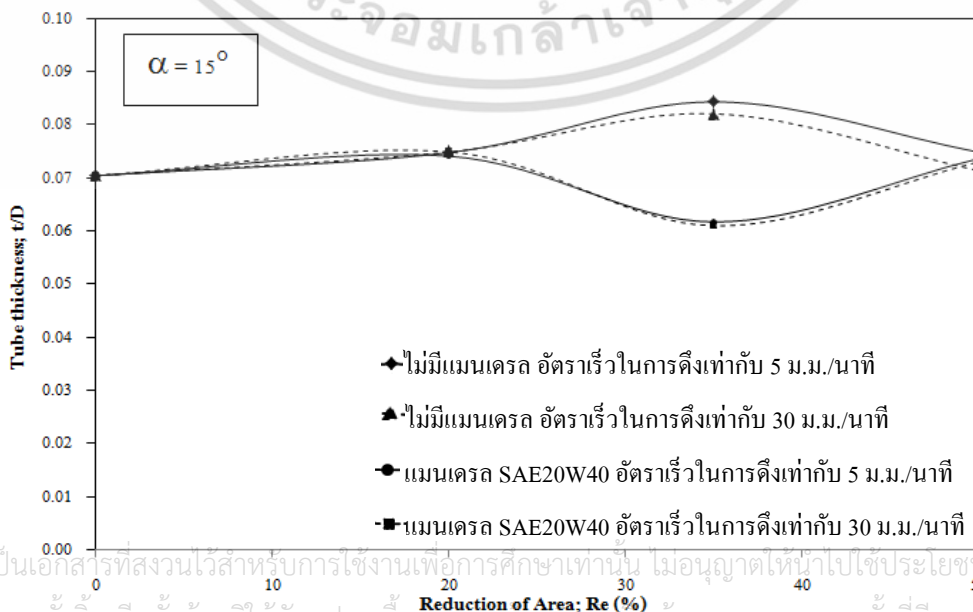
5.1 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อการลดพื้นที่หน้าตัด (Tube thickness vs Reduction of area)

ในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อนั้น ถ้าอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (Tube thickness; t/D) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ท่อที่ผ่านการดึงขึ้นรูปลดพื้นที่หน้าตัดลงหลายๆครั้ง มีโอกาสตีบตันได้ [5] ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้งค่าอัตราส่วนความหนาต่อ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเริ่มต้นหรือท่อที่ใช้เป็นชิ้นทดสอบนั้น มีค่าเท่ากับ 0.07 จากการศึกษาดังกล่าวพบว่าการทดลองพบว่าอัตราส่วนความหนาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหลังดึงขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ที่มีครึ่งมุมแม่พิมพ์เท่ากับ 15 องศา ที่อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20, 35 และ 50 % เป็นดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อของชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล จะมีค่าสูงขึ้นในช่วงการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดระหว่าง 20% - 35% และมีแนวโน้มที่จะลดลงหลังจากช่วง 35% เป็นต้นไป

ในทางตรงกันข้าม ชิ้นงานที่ภายในมีแมนเดรล เหลว คือ น้ำมันเครื่องเกรด SAE20W40 พบว่าอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยในช่วงการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดระหว่าง 0%-20% หลังจากนั้นจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนในช่วงการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดระหว่าง 20%-35% และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหลังจากช่วง 35% เป็นต้นไป

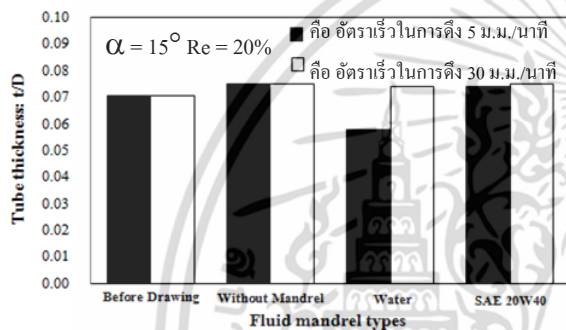
ดังนั้น ช่วงการลดพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสม ที่ส่งผลต่อความหนาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออย่างชัดเจนที่สุด คือ ที่ 20-35% ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการพิจารณากำหนดค่าการดึงลดพื้นที่หน้าตัดเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป



รูปที่ 5 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อการลดพื้นที่หน้าตัด

5.2 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อชนิดของแมนเดรลเหลว (Tube thickness vs Fluid mandrel types)

หลังจากทำการดึงขึ้นรูปท่อ โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหลังผ่านการดึงขึ้นรูปที่เป็นผลมาจากชนิดของแมนเดรลเหลว ได้ผลการทดลองดังกราฟในรูปที่ 6 พบว่าอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อของชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล จะให้ค่าที่สูงกว่าชิ้นงานที่มีแมนเดรลเหลว สำหรับอัตราเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ 5 ม.ม./นาที่



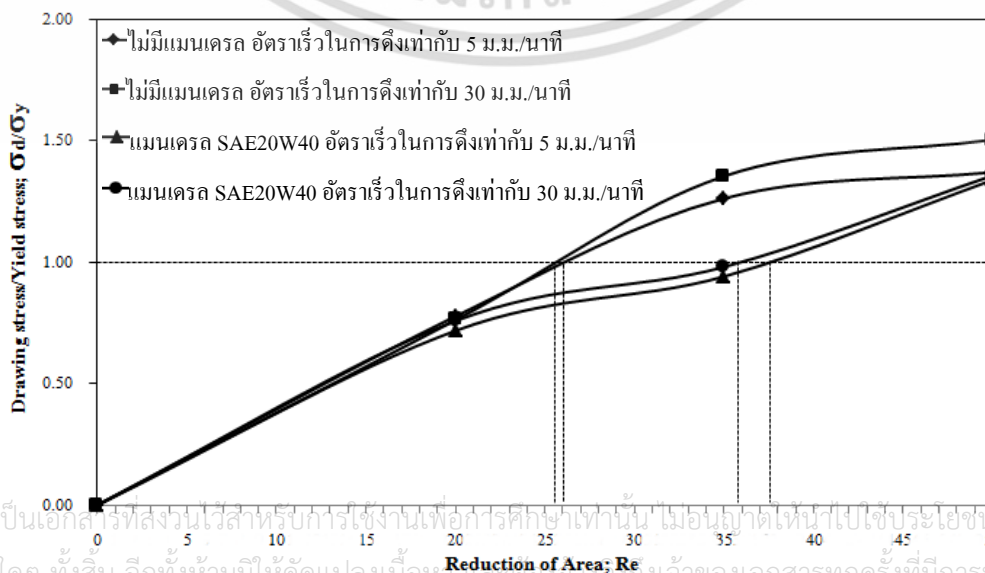
รูปที่ 6 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อชนิดของแมนเดรล

ในส่วนของชิ้นงานที่มีแมนเดรลเหลว คือ น้ำสะอาดซึ่งมีค่าความหนาแน่นสูงกว่า มีแนวโน้มช่วยลดอัตราส่วนความหนาของท่อได้ดีกว่าชิ้นงานที่มีน้ำมันเครื่องเกรด SAE20W40 เป็นแมนเดรลเหลว

5.3 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อการลดพื้นที่หน้าตัด (Drawing stress vs Reduction of area)

ในขณะที่ทำการดึงขึ้นรูปท่อ โดยอาศัยแรงกระทำจากภายนอกกระทำกับชิ้นงาน จะทำให้ชิ้นงานที่ดึงพื้นแม่พิมพ์ออกมาแล้ว เกิดความเค้นภายในที่เรียกว่า ความเค้นดึง ซึ่งแรงนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปทางโครงสร้างของชิ้นงาน จึงได้ทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างความเค้นดึงและความเค้นจุดคราก (Yield Stress) ซึ่งค่าอัตราส่วนนี้ต้องมีค่าไม่เกิน 1.0 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่ทำให้เมื่อขึ้นรูปแล้ว ได้ขนาดท่อที่แม่นยำตรงตามขนาดแม่พิมพ์ที่ใช้ และท่อจะไม่เกิดรอยแตกหรือขาดก่อนสิ้นสุดกระบวนการ โดยได้ศึกษาอัตราส่วนความเค้นที่เป็นผลมาจากการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20, 35 และ 50% ได้ผลการทดลองดังกราฟในรูปที่ 7 สังเกตตามแนวเส้นประ พบว่าอัตราส่วนความเค้นดึงของชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล ในการดึงขึ้นรูปที่อัตราเร็วทั้ง 5 และ 30 ม.ม./นาที่ จะมีค่าเท่ากับ 1.0 ที่ค่าการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 25.75% และ 26.25% ตามลำดับ

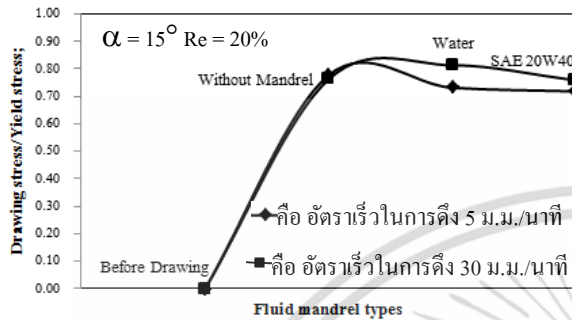
ในทางเดียวกัน สำหรับอัตราส่วนความเค้นของชิ้นงานที่มีแมนเดรลเหลว คือ SAE20W40 ในการดึงขึ้นรูปที่อัตราเร็ว 5 และ 30 ม.ม./นาที่ จะมีค่าเข้าใกล้ 1.0 ที่ค่าการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 36.5% และ 37.8% ตามลำดับ



รูปที่ 7 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อการลดพื้นที่หน้าตัด

5.4 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อชนิดของแมนเดรลเหลว (Drawing stress vs Fluid mandrel types)

ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนความเค้นที่เป็นผลมาจากชนิดของแมนเดรลเหลวในงานวิจัยครั้งนี้ด้วย และได้ผลการทดลองดังกราฟในรูปที่ 8



รูปที่ 8 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อชนิดของแมนเดรลเหลว

เมื่อทำการดึงขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ที่มีครึ่งมุมแม่พิมพ์เท่ากับ 15 องศา ที่อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20% พบว่า อัตราส่วนความเค้นดึงของชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล จะให้ค่าที่สูงกว่าชิ้นงานที่ภายในมีแมนเดรลเหลว และสำหรับชิ้นงานที่มีแมนเดรลเหลว คือ น้ำสะอาด จะให้ค่าอัตราส่วนความเค้นดึงของชิ้นงานสูงกว่าชิ้นงานที่มีน้ำมันเครื่องเกรด SAE20W40 เป็นแมนเดรลเหลว และยังพบว่าอัตราเร็วในการดึงขึ้นรูปท่อ ส่งผลต่ออัตราส่วนความเค้นดึงด้วย นั่นคือ ยิ่งอัตราเร็วในการดึงขึ้นรูปสูง แรงกระทำระหว่างภายในและภายนอกจะมีค่ามาก วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปเร็วขึ้น ส่งผลให้ความเค้นดึงสูงขึ้น ซึ่งส่งผลในทิศทางตรงกันข้ามกับชิ้นงานที่มีอัตราเร็วในการดึงขึ้นรูปต่ำ

6. สรุปผลการทดลอง

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการดึงขึ้นรูปท่อแบบไม่ใช้แมนเดรลกับแบบใช้แมนเดรลเหลว จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การดึงขึ้นรูปท่อโดยใช้แมนเดรลเหลวนั้น ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญให้สามารถเพิ่มค่าการลดลงพื้นที่หน้าตัดในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อให้สูงขึ้นได้พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แมนเดรลเหลวส่งผลต่ออัตราส่วนความความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อได้ดีกว่าชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล ทั้งในการดึงขึ้นรูปที่ 5 และ 30 ม.ม./นาที

2. ช่วงการลดพื้นที่หน้าตัดที่ 20-50% เป็นช่วงที่แมนเดรลเหลวส่งผลต่ออัตราความเค้นดึงอย่างชัดเจน ได้ขนาดท่อที่แม่นยำตรงตามขนาดแม่พิมพ์ที่ใช้ สำหรับกรณีไม่มีแมนเดรล การดึงขึ้นรูปที่อัตราเร็วทั้ง 5 และ 30 ม.ม./นาที การลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ไม่ควรเกิน 25.75% และ 26.25% ตามลำดับ และสำหรับกรณีที่ใช้แมนเดรลเหลวเป็น SAE20W40 ดึงขึ้นรูปที่อัตราเร็ว 5 และ 30 ม.ม./นาที ค่าการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในกระบวนการผลิตไม่ควรเกิน 36.5% และ 37.8% ตามลำดับ

3. ความหนาแน่นของแมนเดรลเหลว ส่งผลต่อความเค้นดึง ยิ่งค่าความหนาแน่นมาก อัตราส่วนความเค้นดึงที่เกิดขึ้นจะมีค่ามาก

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] William F.Hosford and Robert M. Caddell, "Metal Forming Mechanics and Metallurgy," PTR Inc, 1993.
- [2] S.Kalpakjian and R.Schmid, "Manufacturing Process for Engineering Materials," Pearson Inc, 2003.
- [3] T.Altan, S.OH and H.Gegel, "Metal Forming Fundamentals and Applications," American Society for Metals, Metal Park, OH 44073, 1983.
- [4] K.Yoshida, Y.Onitsuka and S.Yamashita, "Fabrication of High Quality Fine Medical Tubes by Fluid Mandrel Drawing," Journal of Solid Mechanicals and Materials Engineering, Vol.3, pp.1348-1355, 2009.
- [5] T.Tangsri, S.Norasethasopon and K.Yoshida, "Fabrication of small size inner spiral ribbed copper tube by fluid mandrel drawing," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.70, pp 1923-1930, 2014.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นางสาวทัฬหีศมน ดุสิตโคภิตวงศ์
วัน เดือน ปี เกิด	22 พฤษภาคม 2532
ประวัติการศึกษา	
2547	โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) 2
2550	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประวัติการทำงาน	
2558	บริษัท เอสโซ่ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
2554 - 2556	บริษัท นิสสัน มอเตอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
ผลงานที่เคยได้รับการตีพิมพ์	
2557	“The study of grain boundary plane rotation for FCC bi-crystal structure by the molecular dynamics simulation”
2558	International Conference on Mechanical, Civil and Material Engineering ICMCME, Phuket, Thailand, 11-13 July 2015. “อิทธิพลของแมนเดรลเหลวต่อการลดพื้นที่หน้าตัด ความเค้นดึง และความหนาในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อทองแดง” วิศวกรรมลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้