

การวิเคราะห์การดึงลวดวัตถุประกอบโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

ANALYSIS OF DRAWING OF COMPOSITE WIRES BY FINITE ELEMENT METHOD



รพ.  
ก 251 ก  
2547

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 51088  
วัน,เดือน,ปี ๒ พ.ศ. 2547

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ ISBN 974-324-997-4 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
b1138161๓

ANALYSIS OF DRAWING OF COMPOSITE WIRES BY FINITE  
ELEMENT METHOD



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ ISBN 974-324-997-4 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์การดึงลวดวัตถุประกอบโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
นักศึกษา	นาย กรีทาพล สุลีลายุทธพล
รหัสประจำตัว	42062024
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุม	รศ.สมชัย นรเศรษฐ์โคกาน

### บทคัดย่อ

การค้นคว้านี้ทำขึ้นเพื่อ เป็นแนวทางในการดึงลวดขนาดหน้าตัดลวดวัตถุประกอบ 2 ชนิด เพื่อให้ได้การผลิตที่มีประสิทธิภาพ และ ช่วยลดต้นทุนการผลิต ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เทียบกับการทดลองกับชิ้นงานตัวอย่าง โดยได้ทำการทดลองและนำเสนอผลกระทบของมุมตาย และอัตราส่วนการลดขนาด ที่ส่งผลต่อค่าความเครียด เพื่อให้ได้รูปทรงหน้าตัดลวดและผิวลวดที่สมบูรณ์ในขั้นตอนการดึงลวดขนาด 1 ครั้ง จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้ทราบค่ามุมครึ่งตายและอัตราส่วนการลดขนาดที่เหมาะสมสำหรับการดึงขึ้นรูปลวดวัตถุประกอบ ซึ่งจากการทดลองจริงก็ให้ผลในทางเดียวกัน โดยได้กล่าวถึงการผิดเพี้ยนของลวดวัตถุลอกไว้ด้วย และได้นำเสนอวิธีการดึงขึ้นรูปที่เหมาะสมเพื่อที่จะสามารถลดข้อบกพร่องในการดึงขึ้นรูปลวดหกเหลี่ยมไว้ด้วยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Analysis of Drawing of Composite Wires by Finite Element Method
Student	Mr.Greetapol Sulilayuttapol
Student ID.	42062024
Degree	Master of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2004
Thesis Adviser	Assoc.Prof. Somchai Norasethasopon

## ABSTRACT

The objective of this research is to establish sound guideline for the design of the Bi-Metal composite wire pass-reduction practice that will lead to the fabrication of high quality defect-free and cost effective. The Bi-Metal single filament wire has been simulates by finite-element method (FEM). The effect of half-die-angle, reduction of area by 1 pass reduction during the drawing has been investigated. Deformations of element, cross-section shape of drawn wire, equivalent strain under drawing conditions have been calculated by FEM. The experimental result was satisfactory agreement. The filament defect also discussed. Suitable drawing have been proposed to obtain flawlessly drawn hexagonal wires.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือและสนับสนุนเป็นอย่างดีจากบุคคลที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

รศ. สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้คำแนะนำและให้ข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องาน และการแก้ปัญหาต่างๆที่พบในระหว่างการทำงานวิจัย

Professor. Kazunari Yoshida พร้อมคณะจาก Tokai University Japan ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในส่วนของการให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ตลอดจนคำชี้แนะอื่นๆ

ผศ. มิ่ง โลกกิจแสงทอง และ ผศ. จำลอง ปราบแก้ว กรุณาที่ให้ความช่วยเหลือในส่วนของเครื่องมือทดสอบ และช่วยแก้ปัญหาในด้านเทคนิค และ ดร. มนต์ศักดิ์ ทิมสาร ช่วยให้คำปรึกษาด้านทฤษฎี

ข้าพเจ้าขอขอบคุณบุคคลต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น รวมทั้งเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจให้งานนี้สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา และมารดาเป็นอย่างสูงที่ได้สนับสนุนและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมาจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

กริธาพล สุลีลายุทธพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VII
สารบัญรูป .....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์ .....	X
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.2 บทความวิจัยที่ผ่านมา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัย .....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
บทที่ 2 การดัดขึ้นรูป.....	5
2.1 การดัดขึ้นรูป.....	5
2.1.1 คำจำกัดความ .....	5
2.1.2 ดาย.....	5
2.1.3 วัสดุที่ใช้ทำดาย.....	6
2.2 วิธีการขึ้นรูปลวด.....	7
2.2.1 การดัด และการอัดขึ้นรูปลวด .....	8
2.2.2 สภาพความสมดุลของการดัดขึ้นรูป .....	11
2.2.3 ตัวแปรบ่งชี้ช่วงการเปลี่ยนรูป .....	14
2.2.4 การเกิดการแยกตัวในแกนลวดจากการดัดลดขนาดลวด .....	15
2.2.5 เหตุการณ์เกิดการแยกตัวของเนื้อลวด .....	18
2.3 การนำไปใช้และประโยชน์.....	21

เอกสาร **บทที่ 3** วิธีการจำลองการวิเคราะห์ห้ขบวนการขึ้นรูปโลหะเบื้องต้น 23  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1 วิธีการไฟไนท์เอลิเมนต์สำหรับขบวนการขึ้นรูป .....	23
3.1.1 บทนำ.....	23
3.1.2 ภาพรวมของวิธีการไฟไนท์เอลิเมนต์.....	24
3.2 การนำไฟไนท์เอลิเมนต์ไปใช้ใน Plasticity .....	25
3.3 โครงสร้างของไฟไนท์เอลิเมนต์โปรแกรมสำหรับใช้กับคอมพิวเตอร์.....	29
บทที่ 4 วิธีการทดลองและการจำลองในการวิเคราะห์ .....	31
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง .....	31
4.1.1 เครื่อง UTM .....	31
4.1.2 ชุดตาย หัวจับขึ้นทดสอบ .....	31
4.2 วิธีการทดลอง .....	33
4.3 การจำลองในการวิเคราะห์ .....	34
บทที่ 5 ผลการทดลอง .....	36
5.1 ผลจากการทดลอง .....	36
5.1.1 ผลการทดลองในเบื้องต้น .....	36
5.1.2 ค่าความเค้นเฉลี่ยโดยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ .....	38
5.1.3 หน้าตัดลวดหลังการดึงขึ้นรูปจริงเทียบกับผลไฟไนท์เอลิเมนต์ .....	45
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	56
6.1 บทสรุป.....	56
6.2 ข้อเสนอแนะ .....	57
เอกสารอ้างอิง .....	58
ภาคผนวก .....	59
ภาคผนวก ก. แบบลวดที่ใช้ในการทดลอง .....	59
ภาคผนวก ข. แบบตายที่ใช้ในการทดลอง.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่ผลิตขึ้นทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ ไม่อนุญาตให้แก้ไขโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตารางแสดงการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานชิ้นรูปเย้น .....	25
4.1 แสดงสัดส่วนขนาดและอัตราการผลิตขนาดของลวดทดสอบ .....	32
4.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำลวดทดสอบและค่าที่ใช้ในโปรแกรมคำนวณ .....	34



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงสาเหตุการขาดของลวดระหว่างกระบวนการดึง.....	2
1.2 ความเสียหายของลวดวัตถุประกอบเนื่องจากความเค้นดึงระหว่างการดึงลดขนาด.....	2
2.1 ภาพการดึงลวดหน้าตัดกลมฝายตาย.....	5
2.2 แสดงสัดส่วนของตาย.....	6
2.3 ภาพส่วนประกอบของตาย.....	6
2.4 แสดงทิศทางความเค้นที่เกิดขึ้นในการดึงลวด.....	7
2.5 แสดงความสัมพันธ์ที่เกิดจากเส้นโค้งของครึ่งมุมตายระหว่างการดึง.....	10
2.6 แสดงการดึงลวดผ่านตาย และ free body equilibrium ของเอลิเมนต์ในส่วนที่ผ่าน.....	11
2.7 ภาพแสดงการเกิดรอยแยกในแนวแกนกลางสำหรับการดึงขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง.....	15
2.8 แผนภาพแสดงเกณฑ์การเกิดรอยแยกแนวแกนกลางลวดจากการดึงหรืออัดขึ้นรูป.....	17
2.9 แผนภาพแสดงผลกระทบของมุมตายกับความเค้นดึง.....	17
2.10 แผนภาพแสดงสนามความเร็วของลวดขณะทำการขึ้นรูปผ่านตาย.....	19
2.11 ภาพแสดงการบิดเบี้ยวของสนามความเร็ว.....	20
2.12 ภาพลำดับสนามความเร็วแนวอนที่ต่อเนื่องกันเป็นผลให้เกิดการขาดแกนกลางลวด...21	
2.13 แสดงการนำลวดที่ได้จากการดึงไปใช้ประกอบรวมกันสำหรับการทำลวดตัวนำยิ่งยวด.....	21
2.14 แสดงการนำลวดที่ได้จากการดึงไปใช้ในเครื่องเสกสามมิติ.....	22
2.15 การนำลวดวัตถุประกอบไปใช้ในกับรถไฟความเร็วสูง.....	22
3.1 แสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณของกระบวนการขึ้นรูปโลหะ.....	23
3.2 แสดงภาพลำดับขั้นตอนวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูป.....	24
3.3 แสดงแผนภาพเส้นโค้งสำหรับวัสดุทางอุดมคติ.....	26
3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ stress-strain.....	27
3.5 โครงสร้าง และระเบียบวิธีการทำของการวิเคราะห์ช่วงการเปลี่ยนแปลง large plastic.....	30
3.6 ระเบียบวิธีการคำนวณผลลัพธ์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	30
4.1 แสดงไดอะแกรมของเครื่องทดลอง.....	31
4.2 อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเป็นพิเศษสำหรับการทดสอบการดึงลวดผ่านตาย.....	31
4.3 แบบจำลองชิ้นงานการดึงลวดหน้าตัดกลมเป็นหกเหลี่ยม.....	32
4.4 ตายที่ใช้ในการทดสอบขนาดครึ่งมุม 6, 8, 10 และ 13 องศา ตามลำดับจากขวา.....	33

เอกสาร 4.5 ภาพขณะทดลองการดึงขึ้นรูปงานแบบที่เอกรสสีของแท่งนี้. ไปอนุญาติให้มันไปใช้ประโยชน์ด้วยน.33

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ลวดวัตถุประกอบ.....	35
4.7 ชิ้นงานลวดวัตถุประกอบที่ใช้ในการทดลอง.....	35
5.1 ค่าความสัมพันธ์ของค่าครี้งมุดตายกับค่าความเค้นดึงลวด Cu/BCuP5.....	36
5.2 ค่าความสัมพันธ์ของค่าครี้งมุดตายกับค่าความเค้นดึงลวด SS304/BCuP5.....	37
5.3 Hydrostatic Pressure (MPa) ที่เกิดขณะดึงลวดผ่านตายมีมุมเข้าขนาด 12 องศา.....	38
5.4 Hydrostatic Pressure (MPa) ที่เกิดขณะดึงลวดผ่านตายมีมุมเข้าขนาด 16 องศา.....	39
5.5 Hydrostatic Pressure (MPa) ที่เกิดขณะดึงลวดผ่านตายมีมุมเข้าขนาด 20 องศา.....	40
5.6 Hydrostatic Pressure (MPa) ที่เกิดขณะดึงลวดผ่านตายมีมุมเข้าขนาด 26 องศา.....	42
5.7 ค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรในช่วงการผ่านตายกับค่าครี้งมุดตาย ค่าอัตราการลด.....	43
ขนาดหน้าตัดลวด	
5.8 ค่าความสัมพันธ์ Hydrostatic pressure ที่ตำแหน่งกลางแกนลวดกับค่าครี้งมุด.....	44
และค่าอัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด 10%, 15% และ 20%	
5.9 ภาพหน้าตัดแสดงการกระจาย Strain ในลวดวัตถุประกอบ Cu/BCuP5 และลวด.....	45
SS304/BCuP5 การดึงลวดผ่านตายมีมุมเข้าขนาด 12 องศา	
5.10 ภาพหน้าตัดแสดงการกระจาย Strain ในลวดวัตถุประกอบ Cu/BCuP5 และลวด.....	47
SS304/BCuP5 การดึงลวดผ่านตายมีมุมเข้าขนาด 16 องศา	
5.11 ภาพหน้าตัดแสดงการกระจาย Strain ในลวดวัตถุประกอบ Cu/BCuP5 และลวด.....	49
SS304/BCuP5 การดึงลวดผ่านตายมีมุมเข้าขนาด 20 องศา	
5.12 ภาพหน้าตัดแสดงการกระจาย Strain ในลวดวัตถุประกอบ Cu/BCuP5 และลวด.....	51
SS304/BCuP5 การดึงลวดผ่านตายมีมุมเข้าขนาด 23 องศา	
5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวมุมโค้งกับอัตราการลดขนาดหน้าตัดลวดและค่าครี้ง.....	53
มุดตายของลวดวัตถุประกอบประกอบ Cu/BCuP5	
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวมุมโค้งกับอัตราการลดขนาดหน้าตัดลวดและค่าครี้ง.....	54
มุดตายของลวดวัตถุประกอบประกอบ SS304/BCuP5	
5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสูงสุดที่เกิดในเส้นลวดกับอัตราการลดขนาดหน้า.....	55
ตัดลวดและค่าครี้งมุดตาย	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$\alpha$	ครึ่งมุมตาย (องศา)
$\mu$	แรงเสียดทาน
$\nu$	Poisson's ratio
$\sigma$	ความเค้น (stress)
$\epsilon$	ความเครียด (strain)
$A_0$	ขนาดพื้นที่หน้าตัดก่อนดึงผ่านตาย ( $\text{mm}^2$ )
$A_1$	ขนาดพื้นที่หน้าตัดหลังดึงผ่านตาย ( $\text{mm}^2$ )
$D$	Elasticity matrix
$D_{e,p}^*$	Elastic-Plastic matrix
$D_0$	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางก่อนดึงผ่านตาย (mm)
$D_1$	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหลังดึงผ่านตาย (mm)
$E$	Yong's modulus
$F$	แรง(kgf)
$g$	ความตึงจำเพาะ
$L_0$	ขนาดความยาวก่อนดึงผ่านตาย (mm)
$L_1$	ขนาดความยาวหลังดึงผ่านตาย (mm)
$T$	แรงดึง (N)
$v$	ความเร็ว
Cu	ทองแดง
SS304	สแตนเลสมาตรฐาน JIS-SUS304
$\eta$	ประสิทธิภาพ
Re	สัดส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดของลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

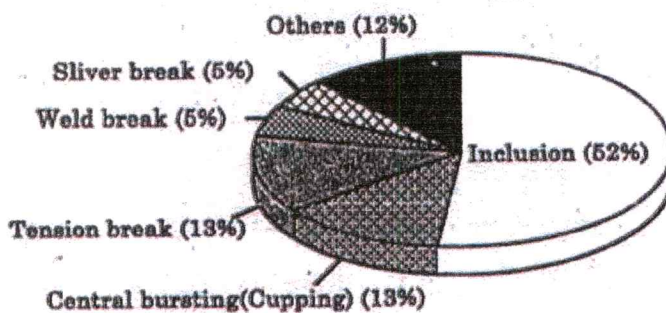
# บทที่ 1

## บทนำ

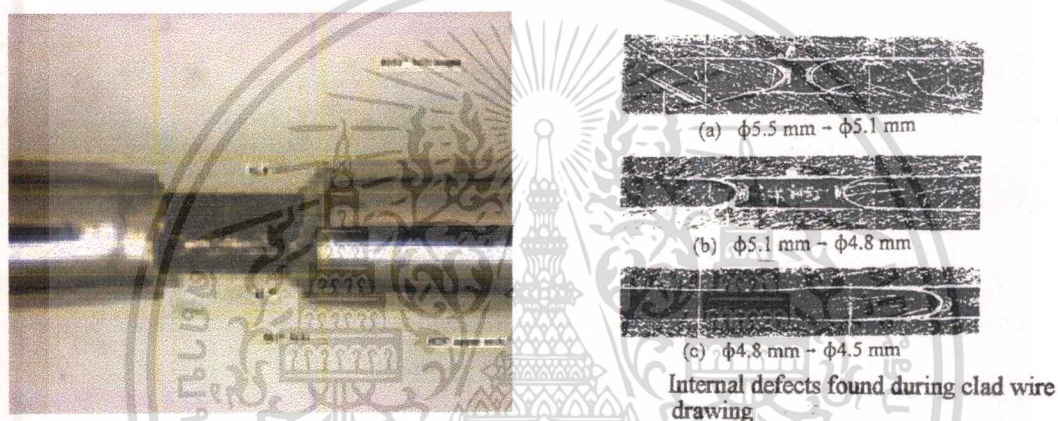
### 1.1 ความสำคัญและที่มา

ปัจจุบันลวดวัตถุประกอบถูกนำมาใช้งานมากขึ้น เนื่องจากการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีวัตถุมีความก้าวหน้าขึ้น ที่เห็นชัดคือ ลวดตัวนำยิ่งยวด[11] และลวดสัญญาณอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ใช้ในร่างกาย[12] ล้วนเป็นผลจากวิเคราะห้การผลิตลวดวัตถุประกอบซึ่งปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตของกระบวนการดึงขึ้นรูปโลหะมีความก้าวหน้าไปอย่างมากหากแต่ว่าก็ยังคงต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตกันต่อไปอย่างต่อเนื่อง การพัฒนาการผลิตดังกล่าวทำกันอยู่ในหลายรูปแบบ และหลากหลายวิธี วิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการพัฒนากระบวนการผลิตการดึงขึ้นรูปโลหะก็ คือ ใช้วิธีสร้างรูปแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Math Model) ขึ้นมาศึกษาแก้ปัญหา และลดเวลานอกจากนั้นแล้วการพัฒนางานวิจัยทางด้านการดึงขึ้นรูปโลหะที่จำเป็นที่จะต้องทำอีกวิธีหนึ่งซึ่งในปัจจุบันมีนักวิจัยหลายท่านและจากองค์กรต่างได้ให้ความสนใจเช่นการศึกษาอิทธิพลและตัวแปรที่มีผลเสียหายการดึงลวดตัวนำยิ่งยวดของ นักวิจัยหลายท่าน เช่น Yoshida K. และ คณะ [6-10] โดยวัดจากคลื่นเสียงระหว่างการดึงควบคู่กันไปด้วย เพื่อจะได้เปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณ กับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองว่าถูกต้องหรือเป็นไปได้ในทิศทางเดียวกันหรือไม่ รวมทั้งผลการศึกษาของ Malberg M. และ คณะ [6] การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆต่อความเค้นและพฤติกรรมของลวดและตาย (Die) ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในทางอุตสาหกรรมการผลิต เพราะหากกำหนดวิธีการผลิตที่ถูกต้องแล้วจะทำให้สามารถประหยัดเวลาและต้นทุนการผลิต

งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการและผลการศึกษาผลค่าความเครียดของลวดวัตถุประกอบขณะดึงขึ้นรูปด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อจะได้เป็นแนวทางในการศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์อื่นๆที่สำคัญ รวมทั้งพฤติกรรมของลวดและตายที่เกิดจากการดึงขึ้นรูปวัตถุประกอบต่อไป ซึ่งจะเป็นแบบอย่างที่ดีในการพัฒนาที่ถูกต้องและรวดเร็ว ในรูปที่ 1.1 แสดงความน่าจะเป็นของการเสียหายในขณะดึงลวดอันเกิดจากความเค้นดึง และการขาดในแนวแกนรวมกันมีค่าถึง 26% เมื่อเทียบกับการขาดจากสาเหตุอื่น [7] ซึ่งเมื่อเทียบกับสาเหตุอื่นที่พบ เห็นว่ารองจากการมีสิ่งเจือปนในวัตถุลวดแล้ว ผลเสียหายในลวดจากเหตุทั้งสองข้างต้นนั้น มีความน่าจะเป็นที่พบเป็นอันดับสอง ในรูปที่ 1.2 ภาพความเสียหายของลวดในขณะดึงอันเกิดจากความเค้นดึงและการขาดในแนวแกนของวัตถุปลอกในรูปซ้าย และการขาดของวัตถุแกนในรูปขวา



รูปที่ 1.1 แสดงสาเหตุการขาดของลวดระหว่างกระบวนการดึง



รูปที่ 1.2 ความเสียหายของลวดวัตถุประกอบเนื่องจากความเค้นดึงระหว่างการดึงลดขนาด

## 1.2 บทความวิจัยที่ผ่านมา

1. Acoustic Emission detection of Internal Fracture during Wire Drawing of Composite Wires เป็นงานวิจัยที่ศึกษาหาตัวแปรการความเสียหายภายในเส้นลวดในระหว่างการดึงขึ้นรูปโดยการฟังคลื่นเสียง วิจัยโดย Kazunari Yashida Tokyo University Japan
2. General Characteristics of DFT Composite Wire เป็นบทความกล่าวถึงการเลือกวัสดุลวด พิจารณาการกัดร่อน ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางกล ไฟฟ้า และการรับภาระการดัดงอของลวดวัตถุประกอบที่ใช้งานในงานเฉพาะด้าน แต่งโดย Jeremy E. Shaffer Fort Wayne Metals Research Products Cooperation
3. Influence of Process Parameters in Drawing of Superconducting Wire เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการอิทธิพลของค่าเครื่องมุดายกับความเค้นดึงและความหนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แน่นของวัสดุแกน วิจัยโดย M. Malbeg, J. Bech, N.Bay Technical University of Denmark, P. Skov-Hanssen Nordic Superconductor Technologies

4. Niobium-Titanium superconducting Wires : Nanostructures by Extrusion Wire Drawing เป็นบทความที่กล่าวถึงขั้นตอนการผลิตลวดวัสดุประกอบให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด แต่งโดย Peter J. Lee, David C. Iarbaletier The University of Wisconsin-Madison
5. Criteria for the Prevention of Filament and Wire Breaking During the Fabrication of Multifilamentary Composite Superconducting Wire เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับมาตรการที่ป้องกันการขาดของลวดวัสดุประกอบในระหว่างการดึง วิจัยโดย Betzalel Avitzur

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. เพื่อศึกษาขบวนการขึ้นรูปโลหะโดยวิธีการดึงที่สัมพันธ์กันระหว่างลวด และคาย ที่ใช้ในแนวทางสำหรับการดึงขึ้นรูปลวดวัสดุประกอบ จากน้ำหนักมเป็นหน้าตัดหกเหลี่ยม
2. เพื่อสร้างและออกแบบชุดทดลองในการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของลวดวัสดุประกอบในระหว่างการดึง
3. เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของมุมคายกับความเค้นเฉื่อยของลวดในระหว่างการดึงลวด
4. เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลที่มีผลกับความเครียดเนื้อวัสดุปลอกและวัสดุแกนของลวดวัสดุประกอบเพื่อให้ได้ตามการออกแบบ
5. เพื่อจำลองการดึงลวดวัสดุประกอบผ่านคายลดขนาด โดยจำลองให้วัสดุปลอกและวัสดุแกนมีคุณสมบัติทางกลที่ต่างกัน
6. เพื่อวิเคราะห์และทำนายแนวโน้มปัญหาที่จะเกิดขึ้นจากการเลือกอัตราการลดขนาด ความแตกต่างของคุณสมบัติทางกลของวัสดุปลอกและแกน ความสมบูรณ์ของรูปทรงหน้าตัดของลวดหลังการดึง

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้มีขอบเขตของการวิจัย ดังนี้

1. ทำการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของเส้นลวดวัสดุประกอบในระหว่างการดึงลวดวัสดุประกอบ ที่เกิดจากสัดส่วนการลดขนาดของลวด และมุมคาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.1 ความเค้นเฉลี่ย Mean normal stress ของลวดวัตถุประกอบก่อนและหลังการดึงขึ้นรูป
  - 1.2 ความเครียดของวัตถุปลอกและวัตถุแกนหลังจากการดึงขึ้นรูป
  - 1.3 ลักษณะทางกายภาพของลวดวัตถุประกอบหลังจากการดึง เช่น ผิวของลวด หน้าที่ดของลวด
  2. ทำการจำลองลวดวัตถุประกอบ 2 ชนิด โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ กำหนดคุณสมบัติทางกลของวัตถุประกอบ 2 ตัวอย่างคือ
    - 2.1 ให้วัตถุที่เป็นปลอกมีค่าความเค้นครากน้อยกว่าวัตถุแกน
    - 2.2 ให้วัตถุที่เป็นปลอกมีค่าความเค้นครากมากกว่าวัตถุแกน
  3. ออกแบบอุปกรณ์ทดสอบและขึ้นงานทดสอบสำหรับศึกษาพฤติกรรมของลวดวัตถุประกอบในระหว่างการดึง โดยสร้างชิ้นทดสอบที่สามารถเลือกเปลี่ยนวัตถุแกนได้ (แกนกลางของลวด)
  4. วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลจากการใช้โปรแกรม และผลจากการทดลอง เพื่อเป็นข้อเสนอแนะ และการแก้ปัญหาต่อไป
- 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
- ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาถึงพฤติกรรมการขาดของลวดวัตถุประกอบที่มีความแตกต่างของคุณสมบัติทางกลของวัตถุแกนและปลอก โดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งคาดว่าจะมีประโยชน์ดังนี้
1. ในด้านการศึกษาจะเป็นแนวทางที่ดีสำหรับการวิเคราะห์และคาดการณ์การขึ้นรูปลวดวัตถุประกอบคู่กับการพัฒนาใช้ในปัจจุบันและในอนาคตที่มีแนวโน้มการพัฒนาลวดวัตถุประกอบสำหรับงานเฉพาะด้านมากขึ้น ซึ่งมีการเลือกใช้วัตถุและวัตถุแกนที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการพัฒนาวิจัยวัตถุนิดใหม่ขึ้นมาเพื่อสนองความต้องการของเทคโนโลยีใหม่ๆ
  2. ในด้านเศรษฐศาสตร์เป็นการลดต้นทุนและเวลาในการออกแบบที่จะต้องสร้างชุดอุปกรณ์ทดสอบจริงขึ้นมาเป็นจำนวนมาก ๆ
  3. จะทำให้เกิดความต่อเนื่องในกระบวนการผลิตหากมีการกำหนดกรรมวิธีการผลิตอย่างถูกต้อง

## บทที่ 2 การดึงขึ้นรูป

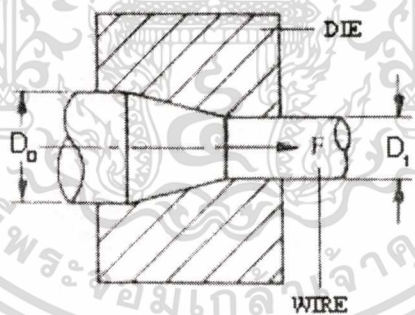
### 2.1 การดึงขึ้นรูปลวด

#### 2.1.1 คำจำกัดความ

การดึงลวด เป็นกระบวนการดึงเส้นโกลโดยลวดเส้นใหญ่จะถูกดึงผ่านดายรีดที่ขนาดรูเล็กกว่าหน้าตัดลวด เพื่อให้ลวดที่ได้มีรูปร่างและขนาดหน้าตัดตามดาย เป็นกระบวนการขึ้นรูปที่อยู่ในประเภทใช้แรงดึงและกด ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะประกอบไปด้วยความเค้นแรงดึง และความเค้นแรงกด

ในการดึงลวดจะแบ่งแยกประเภทตามขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางลวดที่ดึงดังนี้

การดึงหยาบ	$D_o = 16$ ถึง $3.2$
การดึงปานกลาง	$D_o = 3.2$ ถึง $1.6$
การดึงละเอียด	$D_o = 1.6$ ถึง $0.7$
การดึงสายลวด	$D_o < 0.7$



รูปที่ 2.1 ภาพการดึงลวดหน้าตัดกลมผ่ายดาย

เครื่องดึงลวดที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น เครื่องสำหรับการดึงขึ้นเดียว และเครื่องสำหรับการดึงหลายชั้น

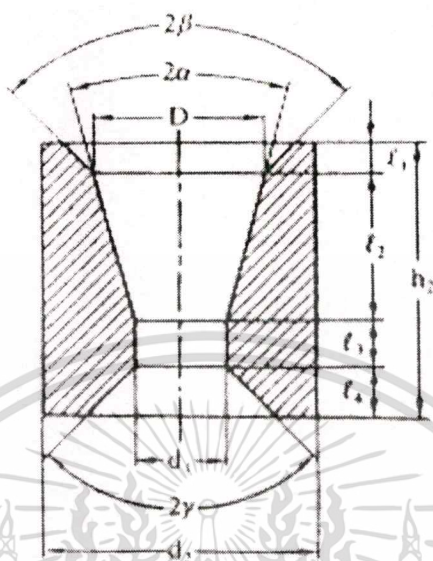
วัสดุดิบสำหรับนำมาดึงเป็นลวด ได้แก่ เส้นลวดรีดร้อน สำหรับการดึงให้ได้ผลผลิตที่เป็นเส้นตรงวัตถุดิบส่วนใหญ่จะผ่านมาจากกรรีดร้อน หรือจากการอัดเส้นร้อน

#### 2.1.2 ดาย

ดายจะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเรียวบริเวณขาเข้า  $2\beta$  ส่วนที่เป็นเรียวที่ติดตั้ง  $2\alpha$  ส่วนที่ใช้ลดขนาดลวด  $l_3$  และเรียวขาออก  $l_4$  โดยที่ความยาวของ  $l_3$  จะมีค่าไม่ต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของ  $l_4$  อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$l_3 = 0.15d_1 \quad (2.1)$$

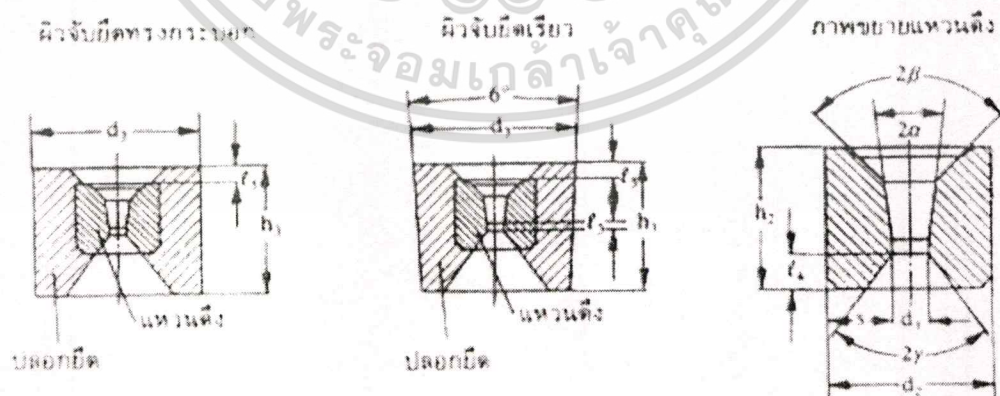
มุมเรียวของดาบ  $2\alpha$  จะมีผลต่อแรงและความเรียบของผิวลวดที่ดึง



รูปที่ 2.2 แสดงสัดส่วนของดาบ

### 2.1.3 วัสดุใช้ทำดาบ

เหล็กกล้าที่ใช้ทำดาบเพื่อใช้ดึงลวดอ้างอิงมาตรฐาน AISI 2203, 2453, 2080, 2436 ซึ่งดาบจะมีความแข็งระหว่าง 63-67 HRC สำหรับเส้นลวดที่มีขนาดเล็กดาบส่วนใหญ่จะทำจากโลหะแข็ง (Hard Metal) เกรด G10-G60



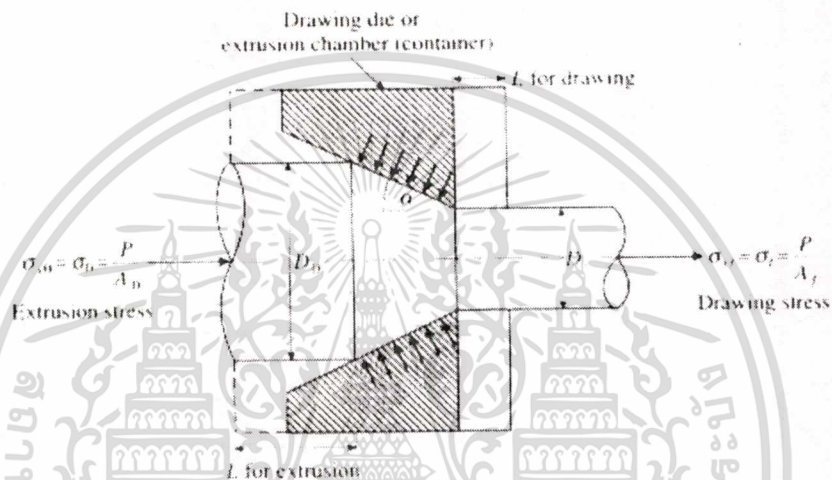
รูปที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบของดาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 วิธีการขึ้นรูปหลอด

วิธีการหาคำตอบสำหรับการคำนวณความเค้นดึงขึ้นรูป หรือความเค้นอัดขึ้นรูปสามารถหาได้จาก 4 วิธี ดังนี้

- 1) Analytical
- 2) Numerical
- 3) Semiempirical
- 4) Empirical



รูปที่ 2.4 ทิศทางความเค้นที่เกิดขึ้นในการดึงหลอด

การหาผลลัพธ์โดยการวิเคราะห์โดยตรง สำหรับปัญหาการขึ้นรูปโลหะ เช่น การดึงขึ้นรูป ทำได้ยากมาก เพราะว่าเป็นปัญหาที่ซับซ้อน ดังนั้น จำนวนข้อสมมุติต่างๆ จึงถูกนำมาใช้เพื่อให้ง่ายแก่การวิเคราะห์ จากที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นผลที่แม่นยำ (Exact solutions) จะมีความพอเพียงกับความถูกต้อง ก็ต่อเมื่อมีข้อกำหนด เหล่านี้

1. เงื่อนไขการสมดุล คือ ต้องมีสมการสมดุล 3 สมการ
2. ความต่อเนื่องของการไหล ในที่นี้คือ วัสดุที่อัดตัวไม่ได้ และไม่มีที่ว่างเปล่า สำหรับการก่อรูปโลหะ เช่นต้องการสมการ Compatibility
3. ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain และจุด Yield
4. เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) รวมทั้งผลกระทบจากความเสียดทาน

สำหรับการวิเคราะห์แบบวิธี Upper-and Lower-bound ตัวอย่างเช่น บางสภาพถูก Relaxed สำหรับกระบวนการในการพิจารณา สำหรับบางตัวอย่างค่า Von Mises อาจจะถูกใช้ในการประมาณได้เป็นอย่างดี ซึ่งวัสดุที่เป็น Rigid (non elastic), Homogeneous, Isotropic, Nonstrain-hardening continuum นั้นเชื่อว่า สามารถพิจารณา ได้ที่จุด Von Mises Yield

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งหนึ่งที่คาดว่าจะผสมกลมกลืน ทางด้านทฤษฎีและผลลัพธ์คำตอบทางด้านการทดลอง คือ Semiempirical solutions ในเชิงปฏิบัติจะต้องพยายามนำผลลัพธ์ที่ได้จากทางทฤษฎีให้สอดคล้องกับผลการทดลองในทางปฏิบัติ

การวิเคราะห์คำตอบทางคณิตศาสตร์ถูกหาโดยวิธีหนึ่งวิธีใด ตามการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. Drawing of extrusion without friction or redundancy losses.
2. Free body equilibrium or slab technique.
3. Upper — bound solution
4. Slip — line field analysis , which is limited to plane strain conditions

ผลลัพธ์ที่ได้จากการสมมูลจาก Free body ถูกสมมุติว่า เป็น Homogeneous การเสียรูป โดยตลอดช่วงการเสียรูป ประกอบด้วย ผลกระทบจาก External friction แต่ไม่รวมไปถึง Internal shear losses หรือ Redundant work, ซึ่งตัวแปรที่สำคัญคือ มุมตายที่มีค่าเหมาะสม เพราะฉะนั้นผลลัพธ์จากการคาดการณ์ ความเค้นดึงขึ้นรูป หรือ ความเค้นดันขึ้นรูป มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง ดังนั้นอาจหาค่าผลลัพธ์คำตอบโดยวิธี Lower-bound ทุกๆค่าตัวแปรที่สำคัญถูกพิจารณา จากการออกแบบ Flat — face ของตายสำหรับการดันขึ้นรูปในคอมพิวเตอรซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป สำหรับคำตอบของวิธี Upper-bound ถูกสมมุติจากพลังงานจลย์ของสนามความเร็วที่ยอมรับได้

### 2.2.1 การดึง และการอัดขึ้นรูปลวด

จากหลักการที่ว่าความเค้นเป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง Bar drawing และ Forward extrusion กับ ดายรูปทรงกรวย มีความคล้ายคลึงกันมาก ดังจะอธิบายต่อไป

ถ้าไม่คำนึงถึง External friction และ Internal shearing losses ค่าความเค้นดึงหรืออัดขึ้นรูปที่เกิดจาก Drawing หรือ Extrusion จะสามารถคิดอย่างง่ายๆ เมื่อให้วัตถุเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบ homogeneous ได้เป็น

$$\sigma = \bar{\sigma} \ln \frac{A_o}{A_f} = \bar{\sigma} \ln \left( \frac{1}{1-r} \right) \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\sigma$  = Drawing and Extrusion stress or pressure

$A_o$  = Entry or initial area

$A_f$  = Exit or final area

$r$  = Fractional reduction in area  $(A_o - A_f) / A_o$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\bar{\sigma}$  = Flow stress for a non strain hardening material or the mean true flow stress  
 $\sigma_{fm}$  for a strain hardening

หากพิจารณางานที่เสียไปจากแรงความเสียดทานของผิวลวดที่สัมผัสกับด้าย (External friction) และ ผลจากแรงเฉือนในเนื้อวัสดุลวด (Internal shearing redundancy) เพื่อให้ได้สมการความเค้นดึงที่ถูก ควรนำสมการ (2.2) ทหารด้วยค่าประสิทธิภาพ  $\eta = w_h / w$ , หรือ คูณด้วยตัวแปรหลัก 2 ตัว ค่าตัวแปรแรกคือ ตัวทดแทนสำหรับการสูญเสียจากความเสียดทานของผิวลวดที่สัมผัสกับด้าย  $C_f(\alpha)$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมครึ่งของด้าย ( $\alpha$ ) ค่าตัวแปรที่สองคือ ตัวทดแทนสำหรับค่าสูญเสียจากแรงเฉือนในเนื้อวัสดุลวด  $C_i(\alpha, r)$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมครึ่งของด้าย ( $\alpha$ ) และยังเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัด  $r$  ค่าตัวแปรที่ถูกต้องนี้ยังขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต เช่น การดึงหรือดันขึ้นรูป ค่าครึ่งมุมของด้าย ( $\alpha$ ) เป็นมุมที่ผิวของด้ายกระทำกับแกนหลักในทิศการดึงหรือดันขึ้นรูปลวด ดังนั้นสมการด้านบนอาจจะเขียนได้ดังนี้

$$\sigma = C_f(\alpha) C_i(\alpha, r) \bar{\sigma} \ln \frac{A_o}{A_f} \quad (2.3)$$

และ 
$$\sigma = C_f(\alpha) C_i(\alpha, r) \bar{\sigma} \ln \left( \frac{1}{1-r} \right) \quad (2.4)$$

ถ้าอัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัด ( $r$ ) ที่กำหนดค่าล่อลื่นให้คง จะได้กราฟที่แสดงค่าครึ่งมุมด้าย  $\alpha$  ซึ่งแปรผันสัมพันธ์กับความเค้นดึง และงาน ดังแสดงในรูป 2.5 ซึ่งสถานะก่อนหน้าี่งานทั้งหมดต่อหน่วยปริมาตร คือ

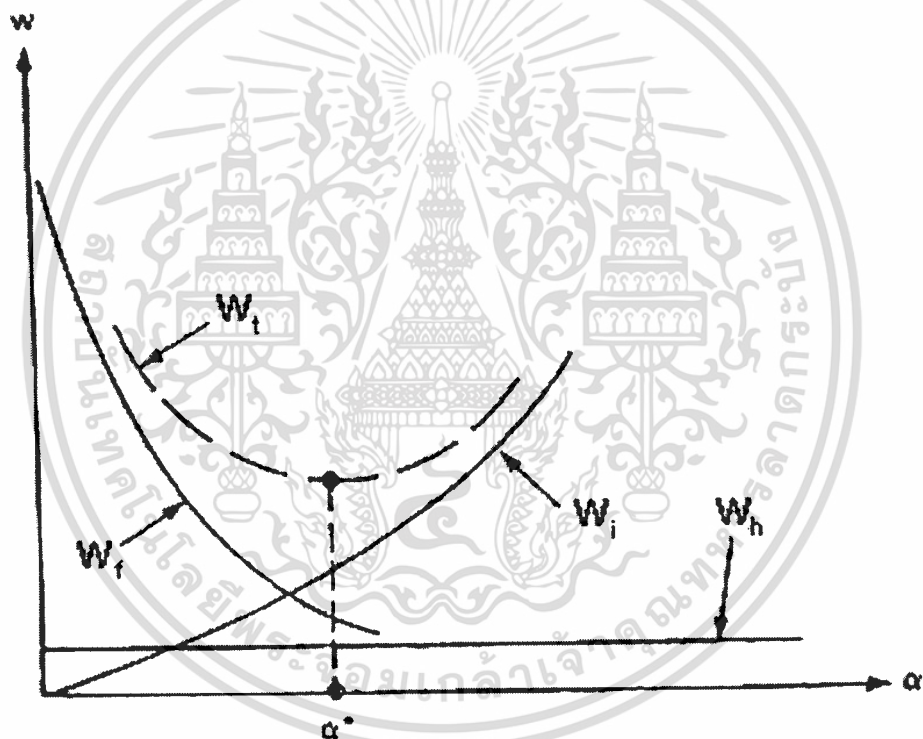
$$W_t = W_h + W_f + W_i \quad (2.5)$$

การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Homogeneous)  $W_h$  จะไม่เป็นฟังก์ชันกับ  $\alpha$  ดังนั้นจึงเป็นค่าคงที่ ค่าครึ่งมุมของด้ายที่เหมาะสมกำหนดเป็น  $\alpha^*$  จากรูป 2.5 ด้านซ้ายของจุดต่ำสุดของค่า  $W_t$  เป็นบริเวณที่มีอิทธิพลจากความเสียดทานของผิวลวดกับด้าย ดังนั้นต้องใช้ความเค้นดึงหรือดันที่มากเพื่อที่จะสามารถทำการขึ้นรูปได้ ดังทฤษฎีชิ้นงานชิ้นหนึ่งผ่านด้ายที่ยาวมาก เนื่องจากมีค่า  $\alpha$  ที่เล็กมาก แต่เมื่อค่า  $\alpha$  เพิ่มขึ้น  $W_f$  ลดลงแต่  $W_i$  ค่อยเพิ่มจนกระทั่งเข้าสู่ช่วงที่มันมีอิทธิพลกับการขึ้นรูปเต็มที่ เมื่อค่าครึ่งมุมด้ายเพิ่มจะเกิดจุดตายของเนื้อวัสดุบริเวณที่ลวดสัมผัสกับด้ายด้านเข้าที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่า Dead Zone ซึ่งเป็นค่าจำกัดขนาดครึ่งมุมตาย คือด้านขวาจากจุดต่ำสุดของ  $W_i$  เช่น มุมครึ่งของ ดาย ที่ถูกเพิ่มอาจจะถึงช่วง Dead zone ซึ่งความจำเป็นของค่าลิมิต ( $\alpha$ ) จะถูกอธิบาย ในภายหลังและแรงเสียดทาน ภายนอกที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดปลายสุด,  $\alpha^*$  มุมครึ่งของ ดาย ที่เหมาะสมสำหรับแรงเสียดทานที่สูงใน Hot-working และ  $\alpha$  ที่ทำจะมีค่ามากกว่า ค่าที่เหมาะสมจะทำให้ ผิวของชิ้นงานมีคุณภาพที่ดีกว่าและ Safe tool loading ค่ามุมครึ่งของ ดาย ที่เหมาะสม  $\alpha^*$  เพิ่มขึ้นกับ ปริมาณการลดจาก  $3 \frac{1}{2}''$  คือ 10% และ  $8 \frac{1}{2}''$  สำหรับ 45%

สมการสำหรับการดึงหรือดันขึ้นรูปหรือ Total work เขียนในเทอมของครึ่งมุมตาย ( $\alpha$ ) เพื่อให้ได้ค่ามุมที่เหมาะสมอาจจะพบโดยสมการเชิงอนุพันธ์โดยหาค่าจุดต่ำที่สุด ให้สมการเท่ากับ ศูนย์



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ที่เกิดจากเส้นโค้งของครึ่งมุมตายระหว่างการดึง

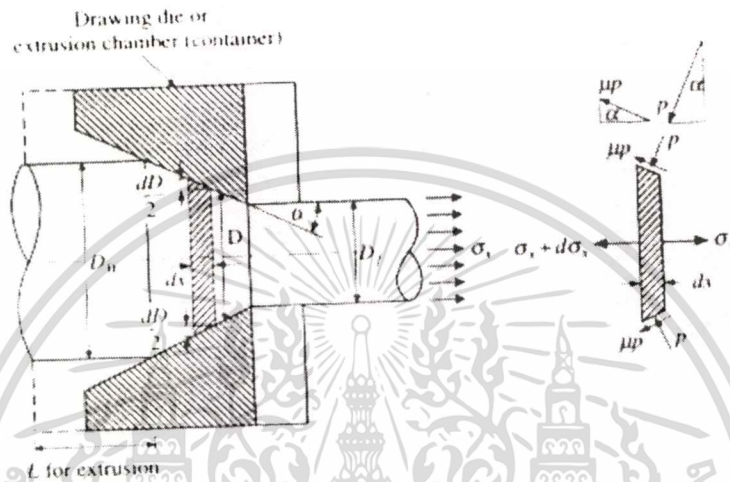
จากรูปที่ 2.5 ถ้าคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นของการดึงหรือดันขึ้นรูปเทียบกับงาน สำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง  $W_h$  โดยไม่คิดแรงเสียดทานจากภายนอก และ Redundancy losses ค่าที่ได้จะมีความผิดพลาด การหาสมการของความเค้นดึงหรืออัดขึ้นรูปโดยพิจารณาผล จากแรงเสียดทานภายนอกแต่ไม่สนใจผลจาก redundancy โดยกำหนดให้  $W$ , เท่ากับศูนย์ ซึ่งเป็น วิธีที่เก่าแก่ที่สุด สำหรับการดึงหรืออัดขึ้นรูป เป็นวิธีที่ใช้หลักสมการการสมดุลแรง หรือเรียกว่า Slab method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะใช้การสมมูล หรือวิธี Slab สำหรับการดึงขึ้นรูปหลอดทรงกระบอกกับด้ายทรงกรวย ในที่นี้จะสมมุติให้  $\alpha, \mu, \sigma$  มีค่าคงที่

## 2.2.2 สภาพความสมมูลของการดึงขึ้นรูป

รูป 2.6 แสดงโลหะทรงกระบอกถูกดึงผ่านด้ายทรงกรวย และสมมูล Freebody diagram บน เอลิเมนต์ของหลอดโลหะ ในกระบวนการระหว่างการดึงลดขนาด



รูปที่ 2.6 แสดงการดึงหลอดผ่านด้าย และ free body equilibrium ของเอลิเมนต์ในส่วนที่ผ่านการลดขนาด

สมมูลแรงในแนวแกนและในแนวรัศมี และให้เท่ากับศูนย์ ถ้าให้องค์ประกอบของแรงตามแนวแกน X ประกอบด้วย

1. Longitudinal stress,  $\sigma_x$
2. ด้าย pressure ,  $P$ , แรงดันตั้งฉากที่ผิวของ ด้าย
3. Frictional drag ,  $\mu p$  , on the extrusion chamber, ด้าย surface, and/or ด้าย land  $L$  , แสดงดังรูป 2.4 เมื่อ  $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

สมมูลแรงในแนวแกน x

$$\sum F = (\sigma_x + d\sigma_x) \frac{\pi}{4} (D + dD)^2 - \sigma_x \frac{\pi}{4} D^2 + p \left( \pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha + \mu p \left( \pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha = 0 \quad (2.6)$$

เมื่อ  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง Cone และ  $(\alpha)$  คือมุมครึ่งของด้ายแสดงดังรูป 2.6 ถ้าตัดเทอมที่มีค่าน้อยมากๆ ทิ้ง

$$2rdr\sigma_x + r^2 d\sigma_x + 2prdr + \frac{2rdr\tau}{\tan\alpha} = 0 \quad (2.7a)$$

$$Dd\sigma_x + 2[\sigma_x + p(1 + \mu \cot\alpha)dD] = 0 \quad (2.7b)$$

เมื่อ  $\tau = \text{the friction shear stress} = m \bar{\sigma} / \sqrt{3}$

สมดุลแรงในแนวรัศมี โดย  $\sigma_r$  คิดค่าความเค้นที่ทำให้ด้ายแตกหัก

$$\sum F_r = \sigma_r (\pi D dx) + \left( \pi D \frac{dx}{\cos\alpha} \right) \cos\alpha - \mu p \left( \pi D \frac{dx}{\cos\alpha} \right) \sin\alpha = 0 \quad (2.8)$$

และ

$$\sigma_r = -p(1 - \mu \tan\alpha) \quad (2.9)$$

สำหรับมุมที่เล็กๆ ค่า  $\mu \tan\alpha$  อาจจะตัดทิ้งได้ และ  $\sigma_r = -p$

โดยรวมค่า yield กับสมการ (2.7) สำหรับแรงในแนวแกน และให้  $B = \mu \cot\alpha$ , ทำการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ แล้วจัดรูปใหม่ให้สมการ เป็นค่าเฉลี่ยของ Drawing stress

$$\frac{\sigma_x}{\bar{\sigma}} = \frac{1+B}{B} \left[ 1 - \left( \frac{D_f}{D_0} \right)^{2B} \right] \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\bar{\sigma}$  คือ mean flow stress

$B$  คือ  $\mu \cot\alpha$

$D_0$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางก่อนดึงผ่านด้าย

$D_f$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางหลังดึงผ่านด้าย

สำหรับการดึงหรืออัดขึ้นรูปที่ผ่านด้ายรูปกลม โดยลวดจะมีหรือไม่มีจุดค้ำยันก็สามารถใช้ขั้นตอนข้างต้นในการสมการสำหรับเป็นค่าพื้นฐานการออกแบบได้เช่นกัน

หากค่าแรงเสียดทาน  $\mu$  และ redundancy เท่ากับศูนย์ต้องใช้สมการที่เป็นผลจากเปลี่ยนแปลงรูปร่าง คือสมการที่ 2.2

สมการต่อไปนี้เป็นสมการจากวิธี Slab หรือ สมการสมดุลสำหรับการดึงหรืออัดขึ้นรูปเพื่อป้องกันผลกระทบจากแรงเสียดทาน และ redundancy

#### 1. การดึงผ่าน ด้าย รูปกลมใน Plane strain [ 8 ]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\sigma_x}{S} = \frac{1+B}{B} \left[ 1 - \left( \frac{h_f}{h_0} \right)^B \right] \quad (2.11)$$

เมื่อ  $S = 2/\sqrt{3}\sigma_0$  หรือ  $1.15\sigma_0$  ในที่นี้คือ Yield (flow) stress ใน Plane strain ตามการทดสอบการอัด จนถึง Von Mises criterion และ  $\sigma_0$  คือ Yield stress ใน Uniaxial tension และ  $h_0, h_f$  คือ ความหนาหน้าก่อนดึงผ่านตายและหลังดึงผ่านตาย ตามลำดับ

### 2. Close — pass plug and straight mandrel drawing กับตายทรงกรวย

$$\frac{\sigma_x}{S} = \frac{1+B^*}{B^*} \left[ 1 - \left( \frac{h_f}{h_0} \right)^{B^*} \right] \quad (2.12)$$

เมื่อ  $B^* = \frac{\mu_1 \pm \mu_2}{\tan \alpha - \tan \beta}$  และ  $S = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_0$

$\mu_1$  คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ผิวตายกับลวด

$\mu_2$  คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ผิวลวดกับแกนค้ำยัน

$h_0$  คือ ความหนาหน้าก่อนการดึงขึ้นรูป

$h_f$  คือ ความหนาหน้าหลังการดึงขึ้นรูป

(ใช้เครื่องหมายบวกเมื่อเป็นการดึงขึ้นรูปท่อที่มีแท่งค้ำยันแกนท่อแบบ Plug และเครื่องหมายลบเมื่อเป็นการดึงขึ้นรูปท่อที่มีแท่งค้ำยันแกนท่อแบบ mandrel)

ในการดึงขึ้นรูปท่อที่มีแท่งค้ำยันแกนแบบ mandrel หากค่า  $\mu_1 = \mu_2$  ใช้สมการ (2.2) สำหรับการประยุกต์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นเนื้อเดียวกัน และถ้า  $\mu_2 > \mu_1$  ความเค้นดึงขึ้นรูปท่อที่ใช้แท่งค้ำยันแบบ mandrel จะเกิดขึ้นน้อยกว่าสำหรับการลดพื้นที่หน้าตัดที่ค่าเดียวกัน

### 3. Tube sinking (tube drawing with no internal support)

$$\frac{\sigma_x}{1.1\sigma_0} = \frac{1+B}{B} \left[ 1 - \left( \frac{D_f}{D_0} \right)^B \right] \quad (2.13)$$

### 4. Round — bar extrusion ผ่านตายทรงกรวย

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_0} = \frac{1+B}{B} \left[ 1 - \left( \frac{D_f}{D_0} \right)^{2B} \right] \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\sigma_{xx}$  = Extrusion pressure บนปลายสุดของ billet

$$B = \mu \cot \alpha$$

หมายเหตุ สภาพทางเข้าและทางออก สำหรับการดันขึ้นรูปแปรผกผันกับอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง

5. Extrusion of flat strip ผ่านมุมของตายที่คงที่

$$\frac{\sigma_x}{S} = \frac{1+B}{B} \left[ 1 - \left( \frac{h_s}{h_f} \right)^B \right] \quad (2.15)$$

สมการข้างบนนี้ เป็นคำตอบพื้นฐาน โดยแทนคำตอบของ Lower-bound โดยในสภาวะต่อไป เป็นการพิจารณาคำตอบแบบ Upper-bound

ประยุกต์งานการดันขึ้นรูปลดที่ความร้อนสูงผ่านตายทรงกรวย โดยการแปลงสมการ (2.6) และจัดรูปใหม่ได้

$$-\sigma_{x0} = \bar{\sigma} \ln \left( \frac{A_0}{A_1} \right) + \frac{\tau \ln(A_0/A_1)}{\sin \alpha \cos \alpha} \quad (2.16)$$

โดยเทอมแรกของสมการ (2.15) แทนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบเป็นเนื้อเดียว หรืองานน้อยมาก และเทอมที่สอง คือ External friction loss [5.3]

### 2.2.3 ตัวแปรช่วงการเปลี่ยนรูป

จากความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.5 อิทธิพลจาก Redundant work  $W_r$ , Friction work  $W_f$  และแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปในช่วงการเปลี่ยนรูปมีผลถึงคุณสมบัติและโครงสร้างของชิ้นงาน หลังการดึงเช่น โพรงหรือการเกิดรอยแยกในแกนกลาง โดยกำหนดค่าตัวแปรเดียวสำหรับในขั้นตอนการผลิตคือ  $\Delta$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง ค่าความหนาเฉลี่ย  $h = (h_1+h_2) / 2$  กับค่าความยาวช่วงลดและตาย  $L = (h_2-h_1) / (2\sin \alpha)$  ค่า  $h_2$  และ  $h_1$  คือความหนาของแผ่นวัตถุก่อนและหลังเข้าตาย

$$\Delta = \frac{h}{L} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการดึงลวดหน้ากลมค่า  $h$  เป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลวดตั้งนั้นจะได้ค่า  $\Delta$  สำหรับการดึงลวด ควรออกแบบการดึงขึ้นรูปที่  $\Delta$  น้อยกว่า 2

$$\Delta = \frac{\sin \alpha}{r} (1 + \sqrt{1-r})^2 \quad (2.18)$$

จากสมการ 2.5 ค่าอัตราส่วน  $W_f / W_f$  เพิ่มขึ้นเมื่อลดค่า  $\Delta$  เพราะค่าพื้นที่สัมผัสของลวดและตายจะเพิ่มขึ้นทำให้มีค่าแรงเสียดทานเพิ่มขึ้น

สำหรับการวิเคราะห์การดึงแบบ Plane-strain และแบบสมมาตรรอบแกน Axisymmetric ค่าอัตราส่วนของตายและชิ้นงาน ค่าพื้นที่สัมผัสต่อค่าพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย

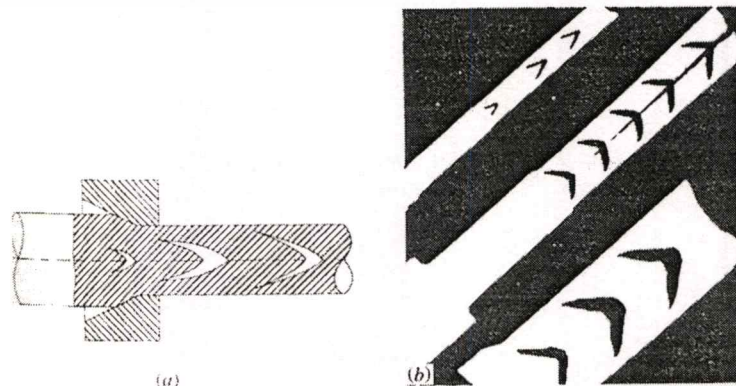
$$\text{Area ratio} = \frac{2r}{(2-r)\sin \alpha} \quad (2.19)$$

สำหรับ Plane-strain เท่ากับ  $2 / \Delta$  และสำหรับ Axisymmetric เท่ากับ  $4 / \Delta$  ในการคิดโดยวิธี Upper-bound slab [5] สำหรับค่าความเค้นเฉือนคงที่จะสามารถทำนายการกระจายค่าเสียดทานต่อค่า drawing load ได้ดังนี้

$$\frac{W_f}{W_h} = \frac{m}{\sin 2\alpha} \quad (2.20)$$

#### 2.2.4 การเกิดการแยกตัวในแกนลวดจากการดึงลดขนาดลวด

ในขั้นตอนการขึ้นรูปลวดโดยการอัดแบบ Forward extrusion อาจมีจุดเสียเกิดขึ้นได้คือ Center-burst หรือการเกิดเนื้อวัสดุแยกเป็นรูปลูกศร Chevron ที่เรียกว่า Cupping แม้ว่าจะไม่เกิดขึ้นบ่อยเนื่องด้วยไม่สามารถสังเกตเห็นจากภายนอกได้ แต่เป็นเรื่องที่สำคัญมากต้องทำการตรวจสอบโดยรังสี X-Ray หรือคลื่นเสียง Ultrasonic จึงจะพบข้อบกพร่องนี้ได้



เอกสาร **รูปที่ 2.7** ภาพแสดงการเกิดรอยแยกในแนวแกนกลางสำหรับการดึงขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

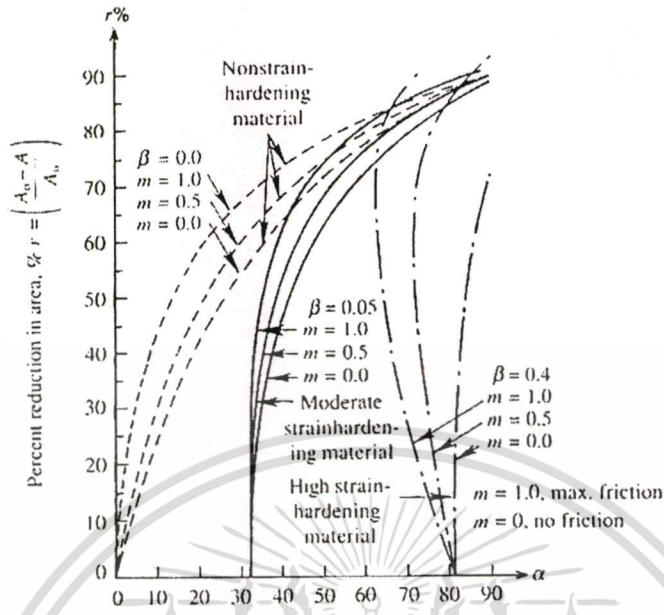
Center-burst เป็นการผิดปกติภายในที่เกิดตามแนวขวางของหน้าตัดลวด เกิดเป็นรูปหัว ลูกศรชี้ไปในทิศการเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 2.7 โดยปกติผลลัพท์หากออกแบบด้ายให้มีค่าการลดขนาดไม่มากซึ่งใช้สำหรับโลหะกลุ่ม Nonstrainhardening ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold work) ซึ่งเป็นการลดค่าของตัวบ่งชี้ของ Strain hardening ในการทำการลดขนาดลวดหลายขั้นตอนพบว่า Chevron จะเกิดขึ้นเมื่อนำลวดมาดึงหรือดัดขึ้นรูปผ่านด้ายเพื่อลดขนาดหน้าตัดเล็กน้อยแล้วนำมาดึงผ่านด้ายใหม่เพื่อลดขนาดหน้าตัดลวดในอัตราลดขนาดที่มาก ทำให้มีการเกิดแรงดึงเป็นช่วงๆผลทำให้เนื้อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงไม่สม่ำเสมอ โดยกระบวนการต้องการความเร่งแบบทันทีสำหรับการอัดลดขนาดลวด ทั้งพบว่าจะเกิดเมื่อมีการลดขนาดที่ไม่มาก การใช้ด้ายที่มีมุมมาก ทั้งค่าความเสียหายผิวด้ายที่มาก และการทำงานที่อุณหภูมิห้อง โดยสรุปสามารถป้องกันข้อบกพร่องนี้โดย (1) เพิ่มค่าการลดขนาดหน้าตัด (2) ลดค่ามุมด้าย (3) ลดแรงเสียหาย (4) เพิ่มค่า Strain hardening ของลวดโดยทำการอบความร้อนหลังการดึง ซึ่งทั้งหมดได้สรุปออกมาเป็นแผนภาพแสดงในรูปที่ 2.8 เมื่อ  $\beta$  คือ อัตราส่วนความชันของ True stress-True strain เป็นแนวโค้งของโลหะแข็งกลุ่มที่มีค่า Strain hardening เชิงเส้นตรงในช่วงของพลาสติกเทียบกับกราฟความเค้นกับความเครียดของโลหะกลุ่ม nonlinearly strainhardening ซึ่งเส้นโค้งของ True stress-True strain ในช่วงพลาสติกอาจจะนิยาม โดยความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_n (1 - \beta \varepsilon_n) \quad (2.21)$$

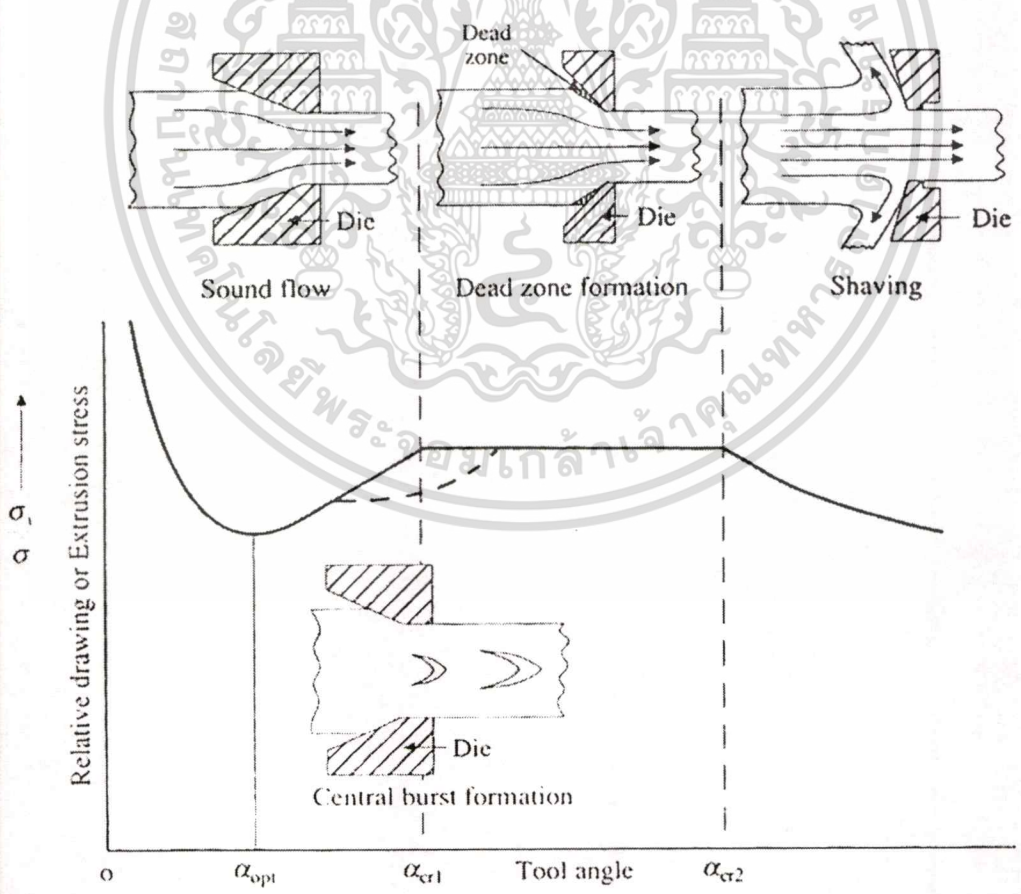
ถ้า stress ที่  $\varepsilon_1$  และ  $\varepsilon_2$  คือ  $\sigma_1$  และ  $\sigma_2$  ตามลำดับคำตอบของสมการข้างบนก่อนหน้านี้นี้จึงเขียนได้เป็น

$$\beta = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_1 (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} \quad (2.22)$$

ในรูปที่ 2.8,  $m$  คือ Friction shear factor ทางด้านซ้ายมือของเส้นโค้งเป็นบริเวณที่ไม่เกิด Central bursting สำหรับเงื่อนไขเฉพาะเส้นโค้งนั้นๆ จากรูปลูกศรชี้ในส่วนนั้นอาจจะป้องกันโดยลดมุมครึ่งของด้ายหรือเพิ่มอัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัด Sound metal flow อาจจะไม่ปรากฏสำหรับทุกๆ มุมของด้าย, เพอร์เซ็นต์การลดพื้นที่, และความเสียหาย



รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงเกณฑ์การเกิดรอยแยกแนวแกนกลางลวดจากการดึงหรืออัดขึ้นรูป



รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงผลกระทบของมุมตายกับความเค้นดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการแยกของแกนกลางนั้นต้องนำข้อจำกัดต่างๆมาประกอบการพิจารณาด้วย เช่น มุมตายเท่าไรจึงจะพอ เลือกใช้การดึงหรืออัดขึ้นรูป เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ ต้องพิจารณาข้อจำกัดอื่นด้วย (1) การเปลี่ยนรูปในพื้นที่ตาย (2) แรงเฉือน (3) การขาดของลวด หลังการดึง จากรูป 2.5 เมื่อค่าครึ่งมุมตายเพิ่มขึ้นจาก  $0^\circ$  จนถึงค่าที่เหมาะสม  $\alpha^*$  External friction losses จะลดลงอย่างมาก และพลังงานของการความเค้นดึงหรืออัดขึ้นรูปลดลง จนต่ำสุดที่ sound flow ของโลหะ ถัดจากจุดนี้ เมื่อมุมครึ่งของตายเพิ่มขึ้นความเค้นที่เกิดจากการดึงหรืออัดขึ้นรูปจะเพิ่มขึ้น เพราะว่า เกิด internal shear losses หรือ redundancy เพิ่มขึ้น อย่างรวดเร็ว

ในการดึงหรืออัดขึ้นรูป ค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อมุมตายเพิ่มขึ้นจะมีความไม่แน่นอนแต่จะมีมุมครึ่งของตายอยู่จุดหนึ่งเรียกว่า จุดวิกฤติแรก First critical angle ( $\alpha_{cr1}$ ) Dead-zone formation เริ่มเกิดขึ้นแสดงดังรูป 2.9 ที่จุดนี้ internal shearing ของโลหะถัดจากผิวของตายปรากฏรูปร่างการก่อตัวเป็น dead-metal zone เกิดตลอดแนวความยาวผิวลวดส่วนที่สัมผัสกับตายซึ่งเป็นข้อจำกัดมุมครึ่งของตาย จุดวิกฤติแรกของมุมครึ่งของตายนั้นเป็นฟังก์ชันของเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัด และ shear factor ค่า stress จากการดึงหรืออัดขึ้นรูป ดังแสดงในรูป 2.9 ในช่วงแถบ dead-zone formation

ที่มุมครึ่งของตายเพิ่มขึ้นต่อไป จุดวิกฤติที่สอง ( $\alpha_{cr2}$ ) จะมาถึงช่วง Dead-zone metal ซึ่งไม่มีการเกาะติดตายของเนื้อโลหะ และเริ่มมีเศษโลหะเคลื่อนที่ย้อนกลับไปด้านหลังซึ่งคล้ายกับการหลุดออกของเศษไม้เมื่อทำการไสด้วยมีด ซึ่งผิวด้านนอกของลวดโลหะที่ดึงผ่านตายจะหลุดออก ส่วนด้านในจะเคลื่อนที่ผ่านตายโดยปราศจากการเปลี่ยนรูปร่างแบบพลาสติก และความเร็วที่ทางเข้าและทางออกมีค่าเท่ากัน ค่าความเค้นจากการดึงหรืออัดขึ้นรูป ถูกพบว่าลดลงเมื่อค่า  $\alpha$  เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 2.9 ในช่วง shaving จุดวิกฤติสำหรับมุมครึ่งของตายช่วง Shaving, ( $\alpha_{cr2}$ ) จะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัด, ความคมของอุปกรณ์ และไม่ปรากฏ Built-up edge และชนิดของกระบวนการดึงหรืออัดขึ้นรูป

หากสภาพที่อำนวยความสะดวกการเกิด Center-burst formation ดังแสดงในรูป 2.9 สำหรับค่า  $\alpha_{cr1}$  สามารถหาได้โดยเกณฑ์ Central-burst formation และจะเกิดการเสียหายของลวดได้หากมีองค์ประกอบที่อำนวยความสะดวก

### 2.2.5 เหตุการณ์เกิดการแยกตัวของเนื้อลวด

จากคำอธิบายของ Avitzer โดยการใช้วิธีขอบเขตบนและขอบเขต รวมทั้งความเร็วสัมผัสที่ผิววัตถุโดยทำการแบ่งลวดในบริเวณทางเข้าและออกตายเป็นสามส่วน ดังแสดงในรูป 2.10

-โซน 1 คือ บริเวณทางเข้าตายความเร็วเนื้อวัตถุลวดขนานกับแนวยาวของลวดและตาย

-โซน 2 คือ บริเวณในตายความเร็วของวัตถุลวดจะเคลื่อนในทิศเข้าหาจุดยอดของมุมตาย

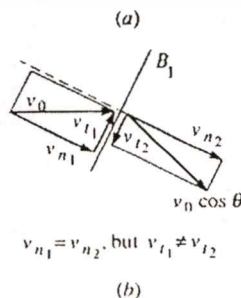
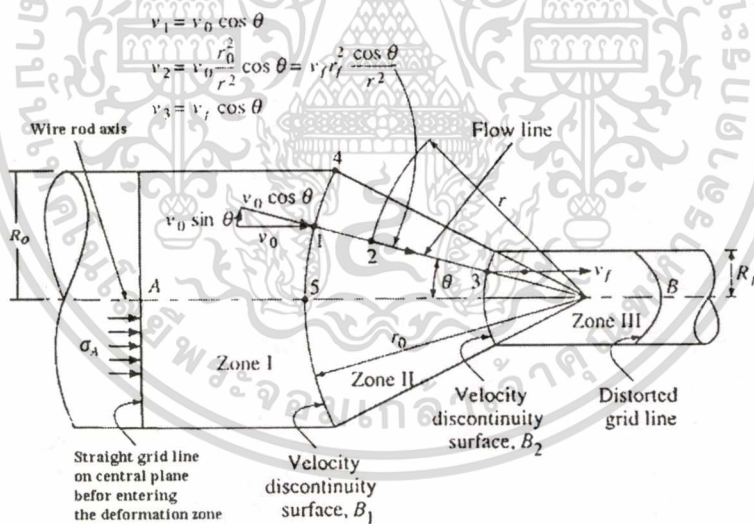
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-โซน 3 คือ บริเวณทางออกตาย ความเร็ววัตถุลดมีทิศกลับมามาขนานกับแกนตามยาวของ ลวดและตาย

ขอบเขตการเปลี่ยนแปลงของโซน 1 ต่อ โซน 2 และ โซน 2 ต่อ โซน 3 มีการเปลี่ยนการไหลที่ละน้อย แะเปลี่ยนอย่างสมบูรณ์ที่ขอบเขตแนวโค้ง B1 และ B2 ดังแสดงในรูป 2.10 โดยทั้งสองจุดมีรัศมี  $r_0$  และ  $r$  มีจุดศูนย์กลางที่จุดยอดของมุมตาย ทันทีที่วัตถุเคลื่อนที่ผ่านเข้าขอบเขตการเปลี่ยนทิศการไหลเข้าหาจุดยอดของตายและความเร็วจะเพิ่ม เมื่อผ่านเข้าจุดที่ 2 (B2) ทิศการไหลจะกลับมามาขนานกับแกนตามยาวของลวดและตาย ความเร็วแนวสัมผัสที่ผิวโค้ง B1 และ B2 มีขนาด  $V_0 \sin \theta$  และ  $V_f \sin \theta$  ตามลำดับ

ในโซน 2 ไกล่ศูนย์กลางลวดพบว่าวัตถุเคลื่อนที่เร็วขึ้นเนื่องจากต้องการสมดุลของปริมาตร ความเร็วของวัตถุเมื่อเคลื่อนที่เข้าโซน 2 ที่จุด B1 มีขนาด  $V_0 \sin \theta$  โดย  $V_0$  เป็นค่าความเร็วเริ่มต้น  $\theta$  เป็นค่ามุมจากแกนตามยาวของลวดถึงจุดอ้างอิง B1 โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนค่ามุม แต่ค่ารัศมี  $r$  ลดลง ดังนั้น  $V$  จะเพิ่มตามสมการ 3.18

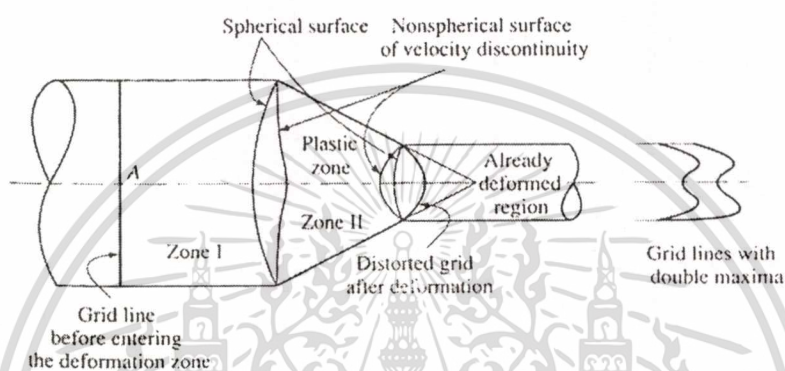
$$V_2 = V_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \cos \theta = V_f \left( \frac{r_f}{r} \right) \cos \theta \tag{2.23}$$



รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดงสนามความเร็วของลวดขณะทำการขึ้นรูปผ่านตาย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

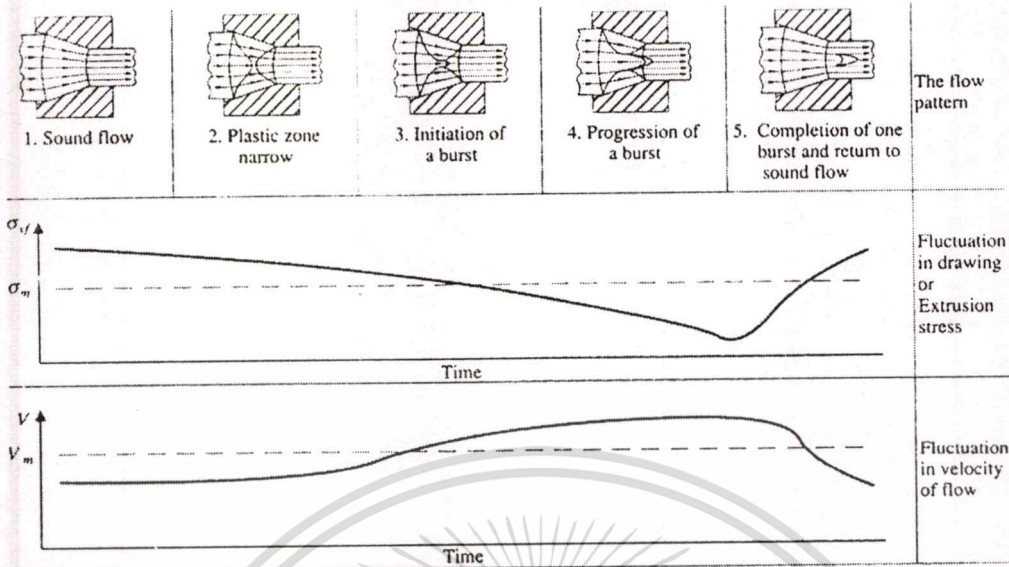
จากรูป 2.10 (a) เส้นแวงในภาคตัดลวดบิดเบี้ยวขณะไหลจากจุด A ไปจุด B การบิดเบี้ยวเพิ่มเมื่อมุม  $\theta$  เพิ่ม ( $\theta > 30^\circ$ ) โดยบิดย้อนกลับไปด้านเข้าตาย แสดงว่าค่า Internal shear หรือ Redundancy แปรผันตาม  $\theta$

การแยกของเนื้อวัสดุลวดที่แกนกลางสามารถอธิบายจากค่าเฉลี่ยของการบิดเบี้ยวของสนามความเร็วที่แนวโค้งแสดงดังรูป 2.11 (a) และ (b) ขอบเขตการบิดเบี้ยวจะสอดคล้องกับการเกิดการแยกข้อดังกล่าวแสดงในรูป 2.11



รูปที่ 2.11 ภาพแสดงการบิดเบี้ยวของสนามความเร็ว

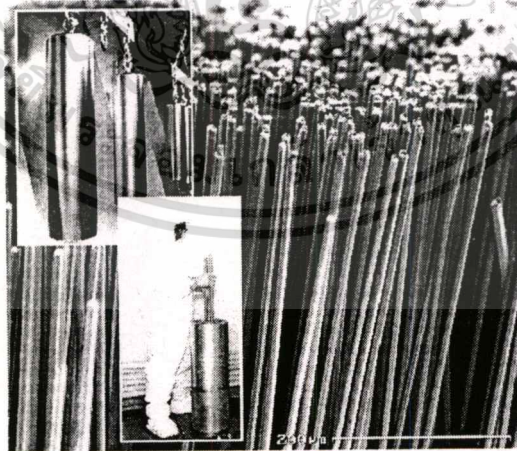
ขอบเขตความเร็วไม่ต่อเนื่องจาก B1 และ B2 จากค่าแนวโค้งที่เหมาะสมโดยเลือกมุมตายที่เหมาะสมที่สุด มีแนวโน้มการบิดเบี้ยวเพิ่ม เงื่อนไขการดึงลดขนาดผ่านตาย วัสดุจะสัมผัสซึ่งกันและกัน พื้นที่สัมผัสเพิ่มขึ้น ความเร็วด้านออกตาย  $V_1$  มีค่ามากกว่าความเร็วด้านเข้าตาย  $V_0$  ความเร็วไม่ต่อเนื่องในระนาบเกิดขึ้น ทำให้เกิดการแยกเนื้อวัสดุขึ้นจากแกนกลางลวด โดยจะเกิดการไหลผ่านตายจะเป็นการไหลแบบ Nonsteady State จากนั้นเริ่มมีรอยแตก แล้วขยายแนวแตกออกไปซึ่งทำให้เกิดรอยแยกที่แกนกลางลวดดังรูป 2.12



รูปที่ 2.12 ภาพลำดับสนามความเร็วแน่นอนที่ไม่ต่อเนื่องกันเป็นผลให้เกิดการขาดแกนกลางลวด

### 2.3 การนำไปใช้และประโยชน์

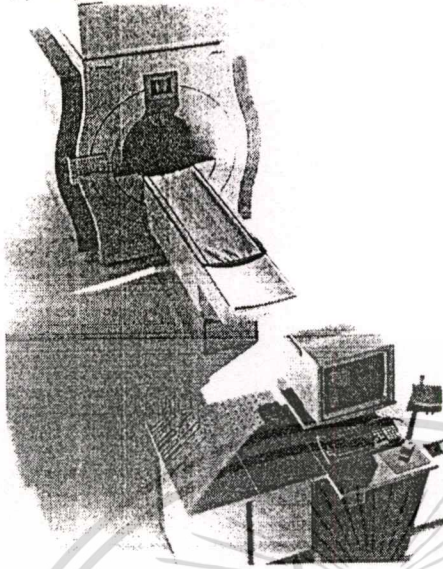
1. เป็นวิธีการหนึ่งในการลดขนาดชิ้นวัตถุขนาดเล็ก ที่ไม่ซับซ้อน
2. ใช้ในการออกแบบ และผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กในการผลิตเครื่องมือแพทย์
3. ใช้ในการออกแบบ และผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ทางด้านไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์



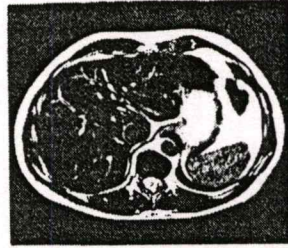
รูปที่ 2.13 แสดงการนำลวดที่ได้จากการดึงไปใช้ประกอบรวมกันสำหรับการทำลวดตัวนำยิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

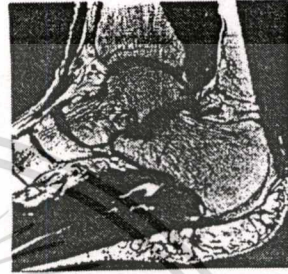
(a) magnetic resonance imaging(MRI)



(b) portrait of the abdominal region

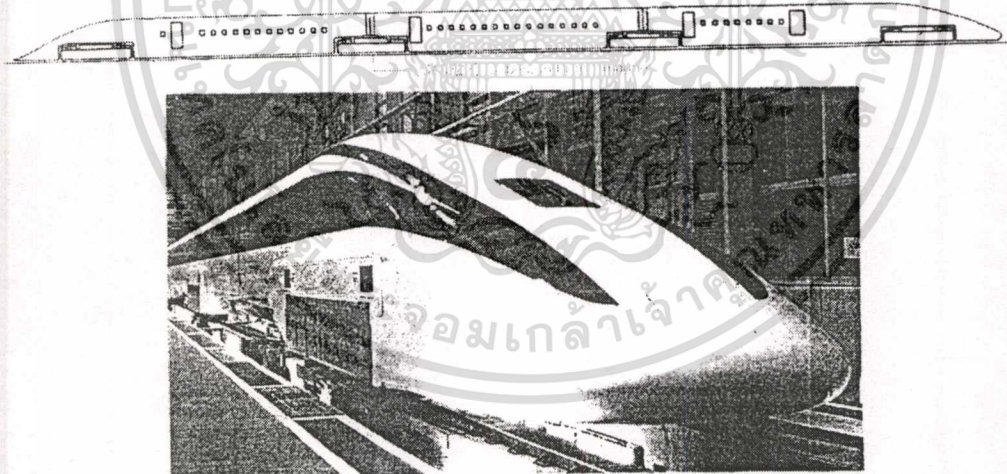


(c) portrait of the foot



Use of the superconducting wire.

รูปที่ 2.14 แสดงการนำลวดที่ได้จากการดึงไปใช้ในเครื่องสแกนสามมิติ (ลวดตัวนำยิ่งยวด ชนิดอุณหภูมิต่ำ)



Test super-express vehicle(500km/h over) at Japan railway technical research institute.

รูปที่ 2.15 การนำลวดวัตถุประกอบไปใช้ในรถไฟความเร็วสูง (ลวดตัวนำยิ่งยวด ชนิดอุณหภูมิ ต่ำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

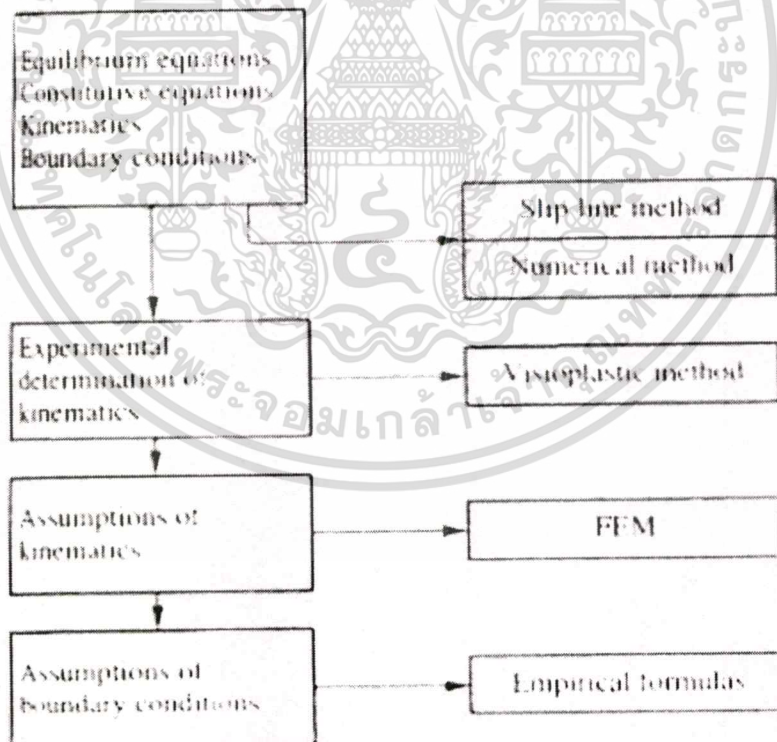
## วิธีการจำลองการวิเคราะห์ขบวนการขึ้นรูปโลหะเบื้องต้น

### 3.1 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับขบวนการขึ้นรูป

#### 3.1.1 บทนำ

การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้หลายวิธีตามรูป 3.1 สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ขบวนการขึ้นรูปโลหะที่นำไปสู่การทำนายสนามของความเค้น ความเครียด และการเคลื่อนตัวของวัตถุ เป็นวิธีการประมาณค่าโดยอาศัยผลที่เกิดจากส่วนย่อยที่เป็น

- 1) วิธีการ Slip-line สำหรับปัญหาความเค้นหลัก
- 2) ทฤษฎีเบื้องต้นซึ่งลดขนาดจากปัญหาสามมิติไปสู่ปัญหาหนึ่งมิติโดยอาศัยขีดจำกัดพลังงานจลย์ต่ำสุด
- 3) ทฤษฎีขอบเขตจำกัดล่าง และบน (Lower and Upper bound)



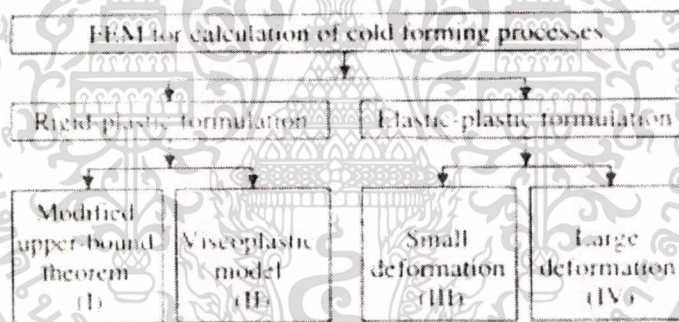
รูปที่ 3.1 แสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณของกระบวนการขึ้นรูปโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากรูปทรงของส่วนที่เปลี่ยนรูปทรงอยู่ในบริเวณมีการไหลมีความซับซ้อน วิธีที่เหมาะสมคือการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเช่น ไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เป็นวิธีที่ใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางสำหรับวิเคราะห์ความเค้นระนาบพื้นฐานจนถึงขั้นสามมิติที่ซับซ้อน เช่น ขบวนการขึ้นรูป

### 3.1.2 ภาพรวมของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

ปัจจุบันวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกพัฒนาไปใช้งานหลายด้านแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้และรูปทรง กล่าวคือ Elastic-plastic และ Rigid-plastic ที่แสดงในรูป 3.2 และด้วยการใช้ทฤษฎี Plasticity เช่น Flow Theory หรือ Deform Theory (ไม่ได้แสดงในรูป) สำหรับทฤษฎีที่นิยมอ้างอิงสำหรับไฟไนต์เอลิเมนต์เช่น  $J_2$  Deformation Theory ใช้ในกรณีวัสดุชนิด isotropic และ วัสดุที่ไม่สามารถอัดตัว จะไม่นำค่าความเค้นวิกฤติและอนุพันธ์อันดับสามมาพิจารณา แสดงเป็นสมการของ  $f(J_2) = 0$  โดยที่  $J_2 = -(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)$  ดังนั้นสมมติให้แบ่งแรงออกเป็นส่วนๆตามทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ทฤษฎีการไหลจะมีความแม่นยำมากสำหรับกรณี Large plastic strain



รูปที่ 3.2 แสดงภาพลำดับขั้นตอนวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์ขบวนการขึ้นรูป

สมการของ Rigid-plastic เป็นการเริ่มต้นสำหรับการพัฒนาของ FEM ไปสู่การคำนวณการขึ้นรูปวัตถุ โดยเฉพาะกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแบบพลาสติกขนาดใหญ่ แต่ก็ยังมีปัญหา เช่น การขึ้นรูปโลหะแผ่นซึ่งยังคงมีผลของ elastic มาเกี่ยวข้องในการเปลี่ยนรูปร่าง เพื่อให้สามารถจำลองการเปลี่ยนรูปร่างได้ดีกว่าจึงมีการใช้ขั้นตอน Elastic-plastic ที่แสดงในตาราง 3.1 ที่ได้กล่าวมาแล้ว ความแตกต่างของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์พูดได้ว่าเป็น การใช้สมการ

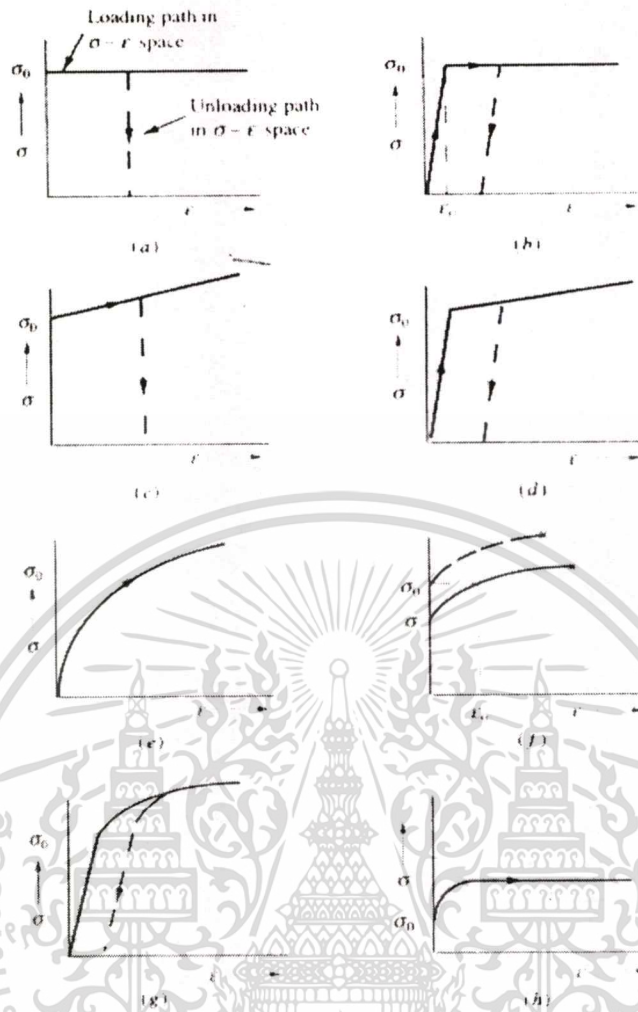
1. Elastic-Plastic (E-P)FEM
2. Rigid-Plastic (R-P)FEM
3. Rigid-Viscoplastic (R-V)FEM

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานขึ้นรูปเย็น

Processes	Rigid plastic formulation		Elastic-plastic formulation	
	(I)	(II)	(III)	(IV)
Indentation	x	x	x	x
Forging	x	x	x	x
Extrusion	x	x	x	x
Drawing	x			x
Rolling	x	x		x
Stretching		x		x
Deep drawing		x		x
Radial drawing	x		x	x
Hydraulic bulging			x	x
3D forming	x	x		x

### 3.2 การนำไฟไนต์เอลิเมนต์ไปใช้ใน Plasticity

พฤติกรรมของ Elastoplastic ในหนึ่งมิติเป็นคุณลักษณะภายในของวัสดุ elastic ซึ่งจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงในแบบ plastic ที่เป็นเชิงเส้น ภายหลังจากการเพิ่มขึ้นของระดับความเค้นที่แสดงในรูป 3.3 (g)



รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพเส้นโค้งสำหรับวัสดุทางอุดมคติ a) rigid-perfectly plastic; b) elastic-perfectly plastic; c) rigid-linearly strainhardening plastic; d) linearly elastic-linearly strainhardening plastic; e) nonlinear strainhardening plastic; f) rigid nonlinear strainhardening plastic; g) linearly elastic-nonlinear strainhardening; h) elastic-steady state plastic

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างในช่วง plasticity ไม่สามารถย้อนกลับได้เมื่อไม่มีภาระกระทำ การเริ่มการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบ plastic จะเป็นไปตามกฎของ yield

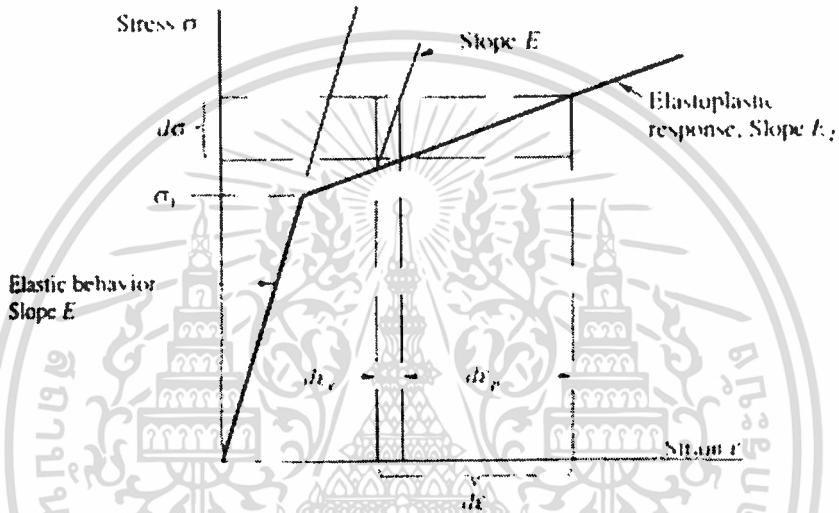
นอกจากนั้นการเปลี่ยนรูปหรือการเกิด plastic จะปรากฏขึ้นเมื่อระบบของความเค้นเป็นไปตามกฎรูปแบบการเปลี่ยนแปลงพื้นฐาน ดังเช่น

$$F'(\sigma, H) = 0 \quad (3.1)$$

เอกสารเมื่อ  $H$  เป็นตัวแปร strainhardening (or softening) สำหรับ  $\sigma$  เป็นเมตริกซ์ของความเค้น ด้านการคำนวณว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} \tag{3.2}$$

การกำหนดเงื่อนไขค่าความเค้นวิกฤติสามารถแสดงโดยสมการ 3.1 แสดงให้เห็นที่พื้นผิวที่มีช่วงความเค้นกระจายอยู่ โดยมีตำแหน่งของความเค้นบนผิวขึ้นกับตัวแปร  $H$   
 อ้างถึงรูป 3.4 ตัวแปร  $H$  ในสมการ 3.1สามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ Stress - Strain

$$H' = \frac{d\sigma}{d\varepsilon_p} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon - d\varepsilon_e} = \frac{E_T}{1 - E_T/E} \tag{3.3}$$

เมื่อ  $E_T$  เป็นความชันของส่วนที่เป็น Plasticity ของเส้นโค้ง Stress - Strain ซึ่งอาจเรียกได้ว่า Tangential modulus

การแบ่งส่วนของ Plastic strain  $d\varepsilon_p$  เป็นไปตามความสัมพันธ์ Yield surface โดย

$$d\varepsilon = \lambda \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \tag{3.4}$$

เมื่อ  $\lambda$  เป็น Proportionality constant

การเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นของความเครียดนั้นประกอบด้วยส่วนของ Elastic และ Plastic strain ซึ่งเป็นไปตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d\varepsilon = d\varepsilon_e + d\varepsilon_p \quad (3.5)$$

สมการที่ 3.5 อาจเขียนให้อยู่ในรูป

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (3.6)$$

และ

$$d\{\varepsilon\} = d\{\varepsilon\}^e + d\{\varepsilon\}^p \quad (3.7)$$

เมื่อ e และ p เป็น elastic และ plastic strain

ดังนั้น Elastic strain ที่เพิ่มขึ้นเป็นอัตราส่วนกับ Elastic stress ที่เพิ่มขึ้นโดย สัดส่วน matrix D strain ที่เพิ่มขึ้นทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังนี้

$$d\varepsilon = D^{-1}d\sigma + \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \lambda \quad (3.8)$$

เมื่อเกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวร สถานะของความเค้นบน Yield surface ในสมการที่ 3.1 ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นอิสระกับ H

Differentiating สมการที่ 3.1 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$dF' = \frac{\partial F'}{\partial \sigma_1} d\sigma_1 + \frac{\partial F'}{\partial \sigma_2} d\sigma_2 + \dots + \frac{\partial F'}{\partial H} dH = 0 \quad (3.9)$$

หรือ

$$\left\{ \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \right\}^T d\sigma - A\lambda = 0 \quad (3.10)$$

ซึ่งทำการแบ่งเป็นช่วงย่อย

$$A = -\frac{\partial F'}{\partial H} dH \frac{1}{\lambda} \quad (3.11)$$

เมื่อใช้สมการ Levy-Mises สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ  $\frac{\partial F'}{\partial \sigma} = \frac{3}{2\sigma} \{\sigma\}^T$  ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (3.12) ใดๆ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $A = n$  ความชันของเส้นโค้ง  $\bar{\sigma} - \bar{\epsilon}$  สมการที่ 3.8 และ 3.10 สามารถเขียนให้อยู่ในรูป single symmetric matrix ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} d\epsilon \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D^{-1} & \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \\ \left(\frac{\partial F'}{\partial \sigma}\right) & -A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\sigma \\ \lambda \end{Bmatrix} \quad (3.13)$$

ค่าคงที่  $\lambda$  สามารถตัดทิ้งได้ ซึ่งแสดงผลลัพธ์ที่แน่นอน ในการหาค่าการเปลี่ยนแปลงของความเค้นในการใช้ matrix ดังนี้

$$d\sigma = D_{e,p}^* d\epsilon \quad (3.14)$$

เมื่อ

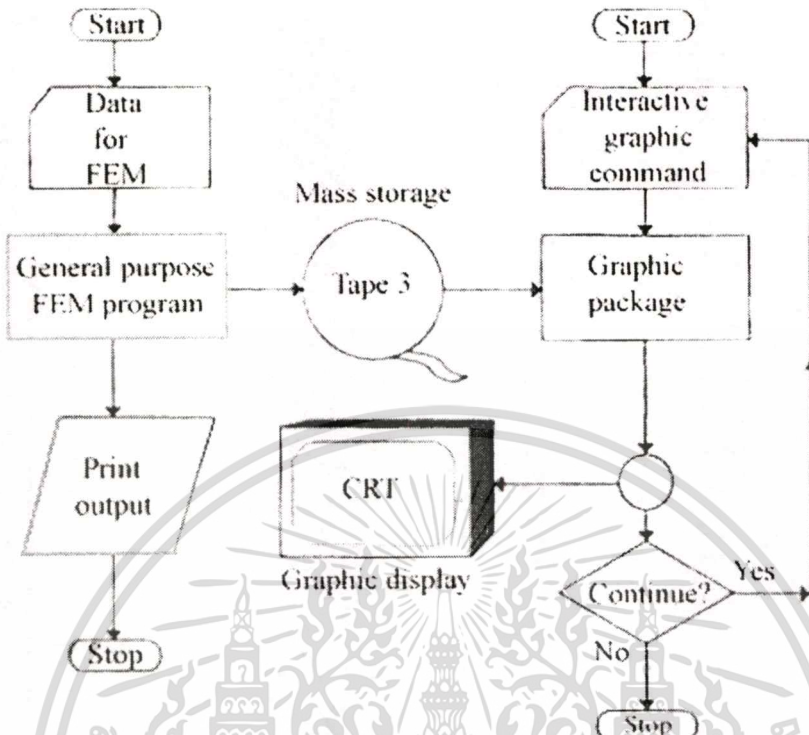
$$D_{e,p}^* = D - D \left\{ \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \right\}^T \cdot D \cdot \left[ A + \left\{ \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \right\}^T D \left\{ \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \right\} \right]^{-1} \quad (3.15)$$

รวม matrix elasticity-plasticity  $D_{e,p}^*$  เป็นเสมือน elasticity matrix  $D$  ในการวิเคราะห์ elastic ในสมการ

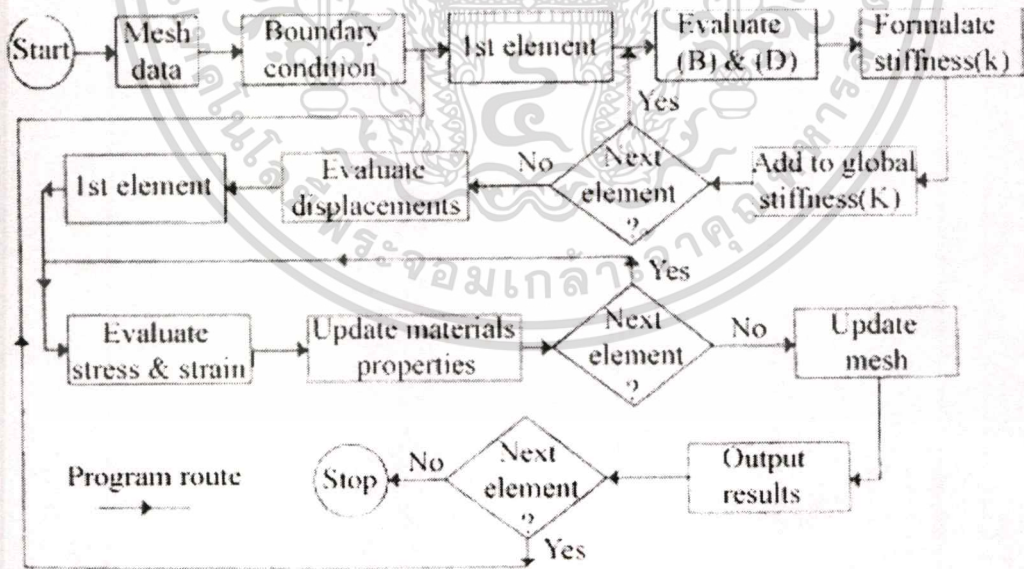
$$D = [D] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix}$$

### 3.3 โครงสร้างของไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมสำหรับใช้กับคอมพิวเตอร์

ในทางคณิตศาสตร์การแบ่งย่อยและการกระจายตัวของคุณสมบัติของวัสดุเป็นช่วงการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น ตลอดจนกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นอาจจะใช้เทคนิค Elastic-Plastic ไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่แสดงในรูป 3.5 และ 3.6 อธิบายถึงขั้นตอนไปสู่ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหา Plasticity ได้



รูปที่ 3.5 โครงสร้างและวิธีการทำซ้ำของการวิเคราะห์ช่วงการเปลี่ยนแปลง large plastic



รูปที่ 3.6 ระเบียบวิธีการคำนวณผลลัพธ์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

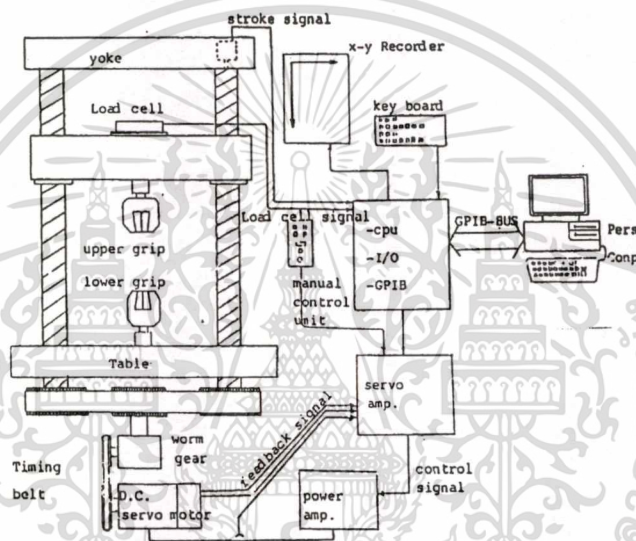
## บทที่ 4

# วิธีการทดลองและการจำลองในการวิเคราะห์

### 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

#### 4.1.1 เครื่อง UTM

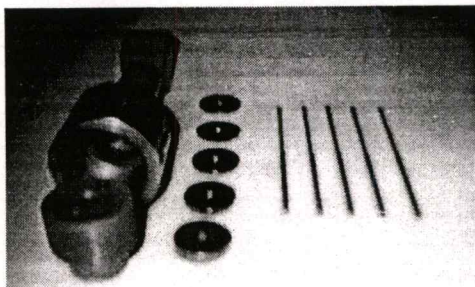
เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ระบบขับเคลื่อน วัตถุประสงค์ และบันทึกผลควบคุม ด้วยคอมพิวเตอร์ แรงดึงสูงสุด 10 ตัน มีไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงไดอะแกรมของเครื่องทดลอง

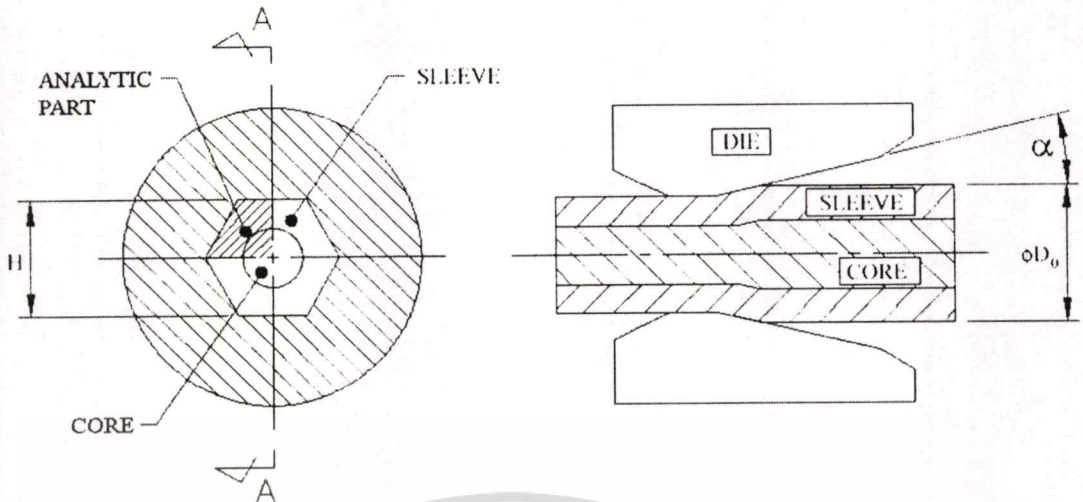
#### 4.1.2 ชุดตาย หัวจับขึ้นทดสอบ

- ชุดหัวจับตายซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อให้จับยึดตายขณะทำการทดลอง มีลักษณะดังแสดงในรูป 4.2



รูปที่ 4.2 อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเป็นพิเศษสำหรับการทดสอบการดึงลวดผ่านตาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แบบจำลองชิ้นงานการดึงลวดหน้าตัดกลมเป็นทรงแหลี่ยม

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบจะคิดค่าการลดลงของขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวด ดังนี้

$$Re = \frac{A_0 - A_f}{A_f} \times 100 \quad (4.1)$$

เมื่อ

Re = สัดส่วนการลดลงของพื้นที่หน้าตัดของลวด (%)

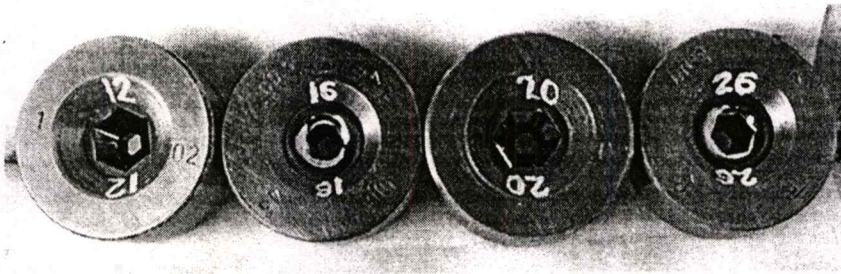
$A_f$  = ขนาดพื้นที่หน้าตัดหลังการดึงผ่านดาย ( $\text{mm}^2$ )

$A_0$  = ขนาดพื้นที่หน้าตัดก่อนการดึงผ่านดาย ( $\text{mm}^2$ )

ตารางที่ 4.1 แสดงสัดส่วนขนาดและอัตราการผลิตขนาดของลวดทดสอบ

Experiment type	$H_1$	$A_f$ ( $\text{mm}^2$ )	$D_0$ (mm)	$A_0$ ( $\text{mm}^2$ )	Re (%)
1	5	21.67	5.54	24.08	10
2	5	21.67	5.70	25.50	15
3	5	21.67	5.87	27.09	20

การจำลองวัตถุประกอบของลวดทำโดยเลือกใช้วัตถุปลูกเป็นเหล็กไร้สนิม หรือทองแดงปลอดออกซิเจนสำหรับวัตถุแกนใช้วัตถุชนิดเดียวกันคือลวดเชื่อมผสมเงิน 15 % ดายที่ใช้ในการทดสอบทำมาจากโลหะแข็งทั้งสแตนมีค่าครีงมุมดายเท่ากับ 6, 8, 10 และ 13 องศา

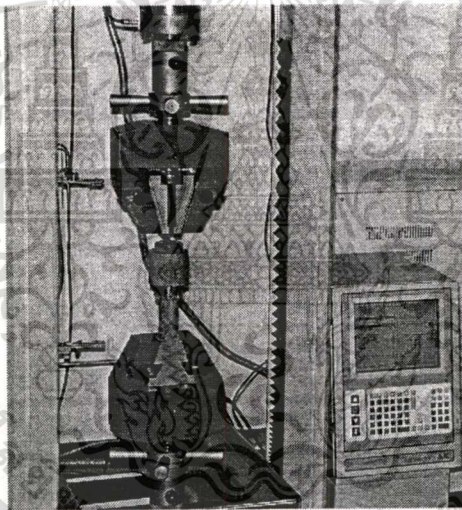


รูปที่ 4.4 ดายที่ใช้ในการทดสอบขนาดครึ่งมุม 6, 8, 10 และ 13 องศา ตามลำดับจากขวา

## 4.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองนี้ทำการทดลองในห้องทดสอบแรงดึง ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และมีลำดับขั้นตอนการทดสอบ ดังนี้

1. ติดตั้งอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นทั้งหมดบนเครื่อง UTM



รูปที่ 4.5 ภาพขณะทดลองการดึงชิ้นงาน

2. หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกันบนเครื่อง UTM แล้ว นำลวดหรือชิ้นงานที่จะทดลองใส่ในเครื่องมือดังกล่าวแล้วทำการตั้งค่าต่างๆในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก่อนที่จะทำการทดสอบ โดยตั้งค่าต่างๆที่สำคัญดังต่อไปนี้

- ค่าความเร็วในการทดลอง = 4 mm/min
- Return Position = 200 mm
- กำหนดสเกลวัดแรงดึงสูงสุดไว้ = 1000 N
- Chart Ratio = 10

- ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (27 °C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จากนั้นทำการดึงจนสิ้นสุดความยาว เมื่อสิ้นสุดความยาวเครื่องคอมพิวเตอร์จะทำการพล็อตกราฟผลของการทดลองลงในกระดาษเก็บข้อมูล

4. นำ Specimen ที่ผ่านการดึง ผลการทดลอง และกราฟที่ได้หลังจากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ การทดลองและเก็บข้อมูลจะทำซ้ำๆ หลายๆ ครั้งสำหรับแต่ละตัวอย่างจนแน่ใจว่าผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

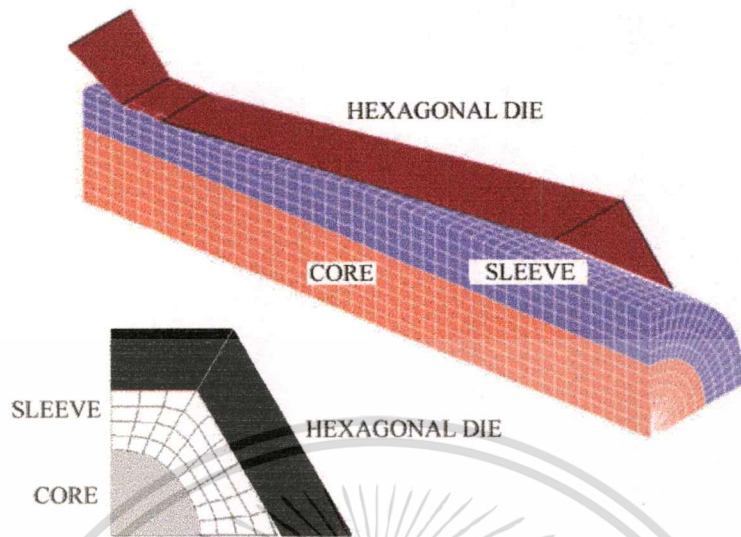
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำลวดทดสอบและค่าที่ใช้ในโปรแกรมคำนวณ

Physical Properties	Sleeve		Core
Material Specification / Grade	JIS-G4318 / SUS304	ASTM / B68M-99	AWS / A5.8-BCuP5
Young's modulus E (MPa)	196000	117000	120000
Yield stress $\sigma_y$ (MPa)	240	120	230
Poisson's ratio $\nu$	0.3	0.34	0.32
Die half angle $\alpha$ (deg)	6, 8, 10, 13		
Single reduction Re (%)	10, 15, 20		
Coefficient of friction $\mu$	0.02		

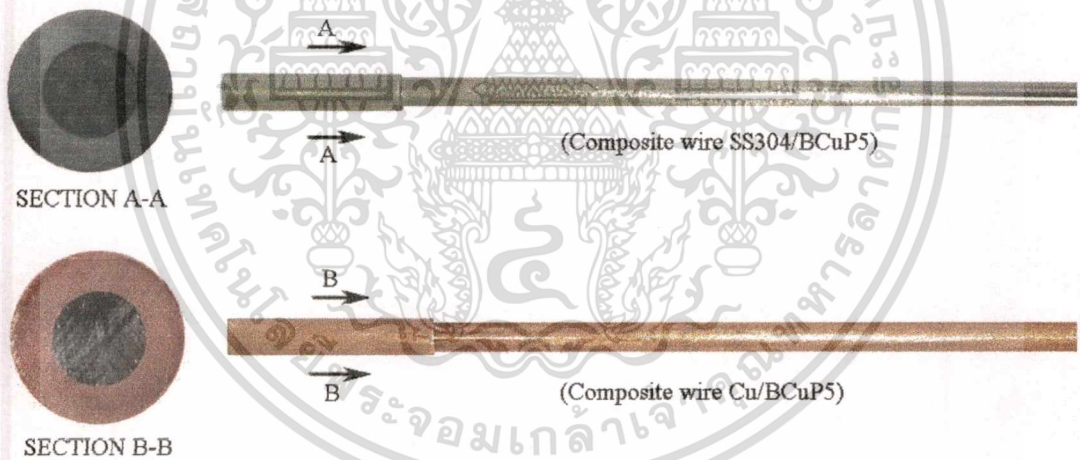
#### 4.3 การจำลองในการวิเคราะห์

1. ทำการจำลองขนาดของลวด (ตามภาคผนวก ข.) โดยใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์คิดเป็นชิ้นงานทดสอบ
2. จำลองวัสดุปลอกและแกนเพื่อทำเป็นลวดวัตถุประกอบ โดยใช้วัตถุดิบตามตารางที่ 4.2 สร้างลวดขึ้นมา 2 ชนิด โดยการเปลี่ยนวัสดุปลอกลวด

ในขั้นตอนถัดไปเป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงในรูปที่ 4.6 โดยกำหนดให้ลวดมีสมบัติเป็น Elastic-Plastic ประกอบด้วย 2,800 เอลิเมนต์ เอลิเมนต์ทรงลูกบาศก์หกเหลี่ยม 8 โหนด โดยเป็นค่าที่ให้ผลลัพธ์ที่มีใกล้เคียงกันกับการแบ่ง 5,200 และ 12,000 เอลิเมนต์ ซึ่งใช้หน่วยความจำและเวลาการคำนวณที่เหมาะสมกับคอมพิวเตอร์ชนิดตั้งโต๊ะ เนื่องจากเป็นค่าพื้นฐานในการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติที่ใช้เวลาคำนวณน้อยและให้ผลที่ใกล้เคียงการทดลองจริง กำหนดให้ผิวสัมผัสระหว่างวัตถุทั้งสองติดกันแบบสมบูรณ์ ทำการคำนวณจากภาคตัด 1 ใน 4 ส่วนของหน้าตัด 6 เหลี่ยม เพื่อลดเวลาและขนาดของข้อมูลวิเคราะห์ ตารางที่ 4.2 เป็นข้อมูลสำหรับและเงื่อนไขในการทดลองในที่ใช้ในการวิเคราะห์กับไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่ากำหนดสำหรับลวดตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้ลวดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.54, 5.70, และ 5.87 ม.ม ทำการลดขนาดเป็นหน้าตัดหกเหลี่ยม ขนาด 5 ม.ม สำหรับทำการลดขนาด 10 %, 15 % และ 20 %



รูปที่ 4.6 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ลวดวัตถุประกอบ



รูปที่ 4.7 ชิ้นงานลวดวัตถุประกอบที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

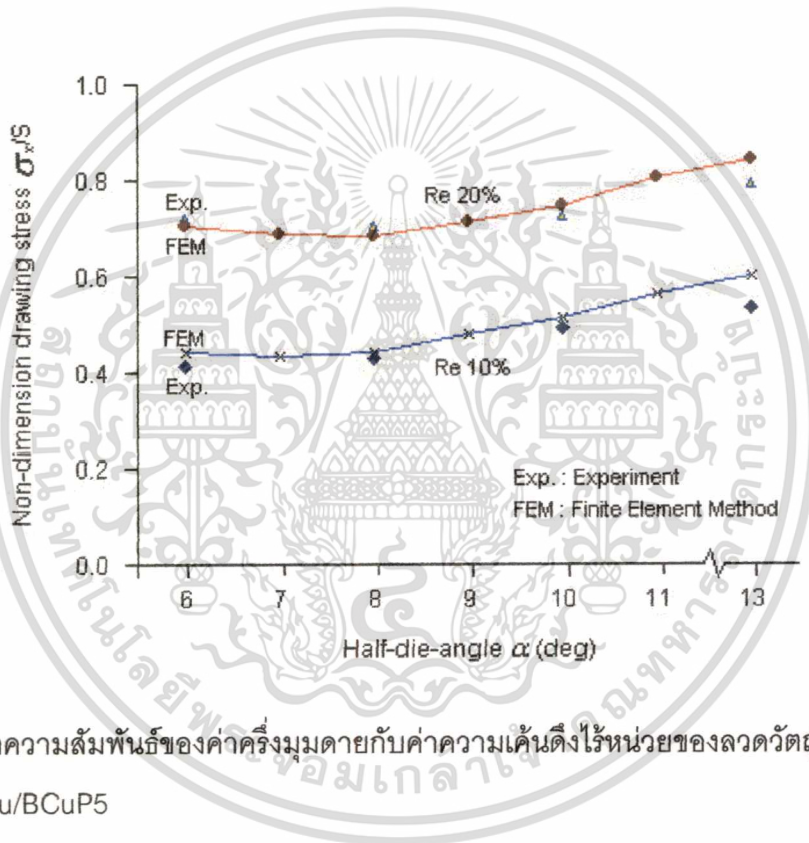
## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

#### 5.1 ผลที่ได้จากการทดลอง

##### 5.1.1 ผลการทดลองในเบื้องต้น

เพื่อเป็นการหาความน่าเชื่อถือในการศึกษา จึงได้ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์บางส่วนจากการทดลองจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 10% และ 20%



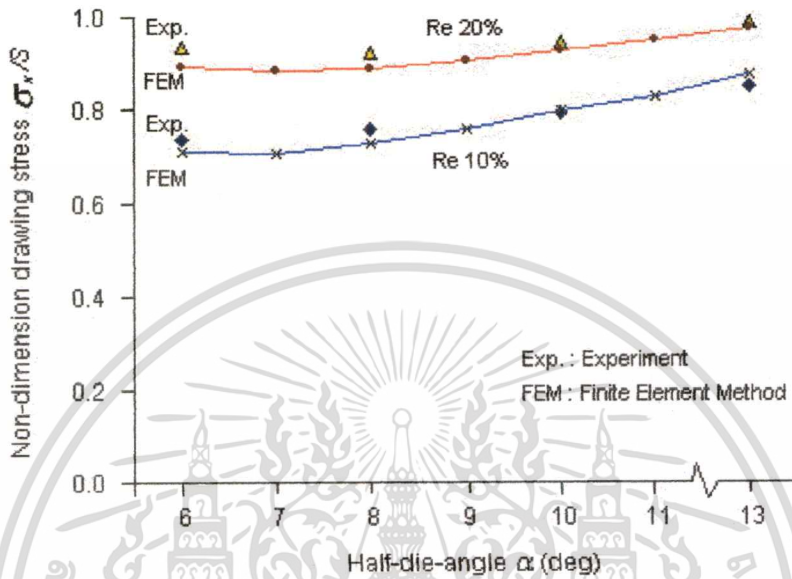
รูปที่ 5.1 ค่าความล้มพันซ์ของค่าครึ่งมุมด้ายกับค่าความเค้นดึงไร้หน่วยของลวดวัตถุประกอบ Cu/BCuP5

จากรูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าครึ่งมุมกับค่าความเค้นดึงไร้หน่วย เปรียบเทียบกันระหว่างการวิเคราะห์จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองจริง สำหรับความเค้นดึงไร้หน่วย ( $\sigma_x/S$ ) ได้จากค่า Drawing stress  $\sigma_x$  หารด้วยค่าเฉลี่ยของ Deformation resistance (S) [7] ซึ่งในที่นี้ S คำนวณจากกฎของวัตถุประกอบดังสมการที่ 5.1

$$S = \frac{SsAs + ScAc}{As + Ac} \quad (5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ss คือค่า Yield stress ของวัสดุปลูก As คือค่าพื้นที่หน้าตัดของวัสดุปลูก ส่วน Sc และ Ac คือค่า Yield stress และพื้นที่หน้าตัดของวัสดุแกน ซึ่งผลที่ได้เห็นว่าผลจากไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองได้ที่ค่าครีงมุดายในช่วง 8 องศา จะได้ค่าความเค้นดึงน้อยที่สุด

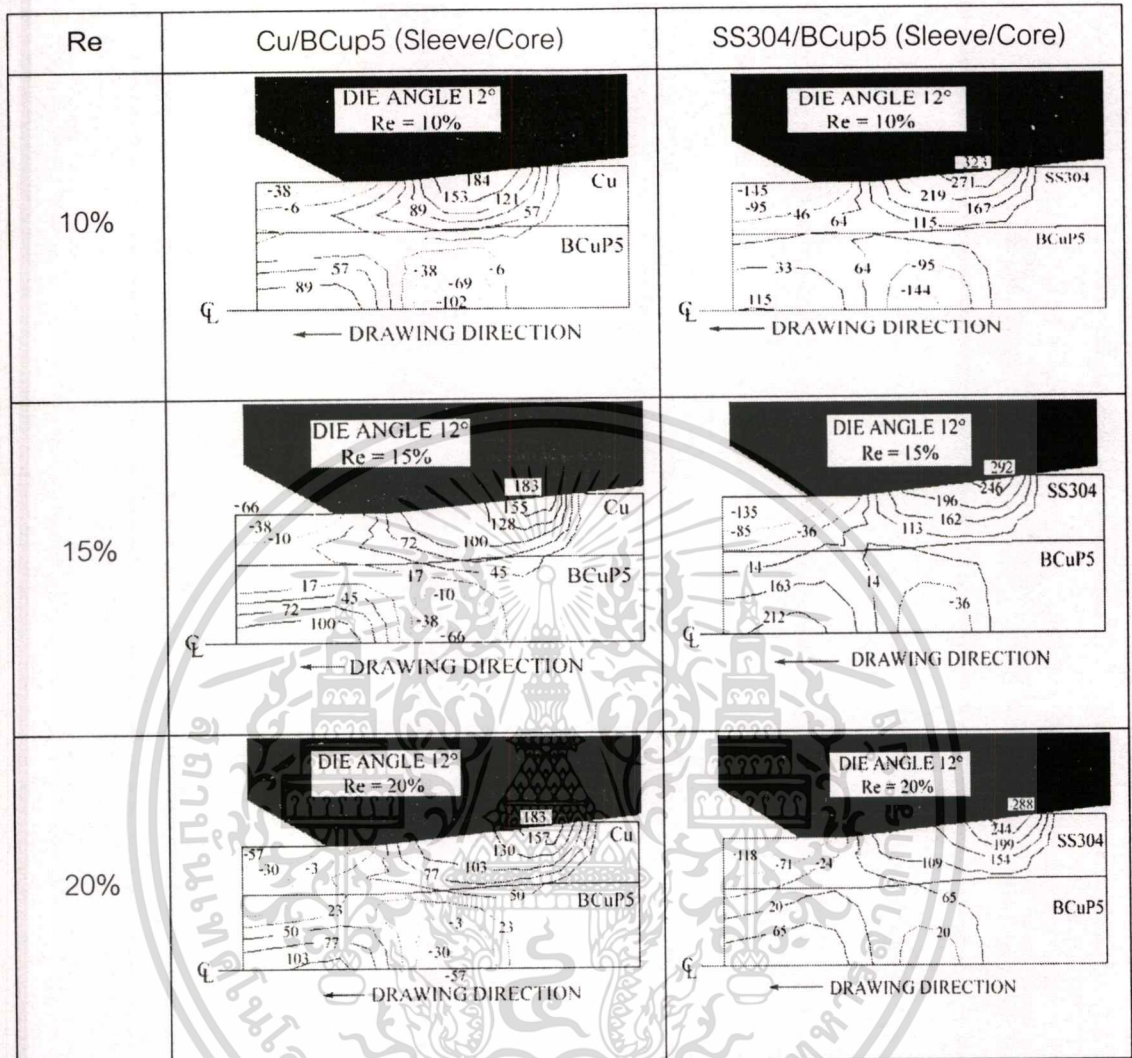


รูปที่ 5.2 ค่าความสัมพันธ์ของค่าครีงมุดายกับค่าความเค้นดึงไร้หน่วยของลวดวัสดุประกอบ SS304/BCuP5

รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าครีงมุดายกับค่าความเค้นดึงไร้หน่วย เปรียบเทียบกันระหว่างการวิเคราะห์จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองจริง พบว่าที่ค่าครีงมุดายช่วง 6, 8 และ 10 องศาจะได้ความเค้นดึงน้อยซึ่งผลจาก FEM และจากการทดลองจริงให้ผลไปในทางเดียวกัน

เป็นการยากในการหาค่าความเค้นในเนื้อวัสดุขณะทำการดึง การขาดของแกนหรือปลอกลวดมีผลกระทบต่อการผลิตมาก ดังนั้นในงานด้าน Plasticity ค่า hydrostatic pressure จะถูกนำมาใช้บ่อยสำหรับการทำนายการแยกหรือแตกของลวดขณะทำการดึง

5.1.2 ค่าความเค้นเฉลี่ย (Hydrostatic Pressure) โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์



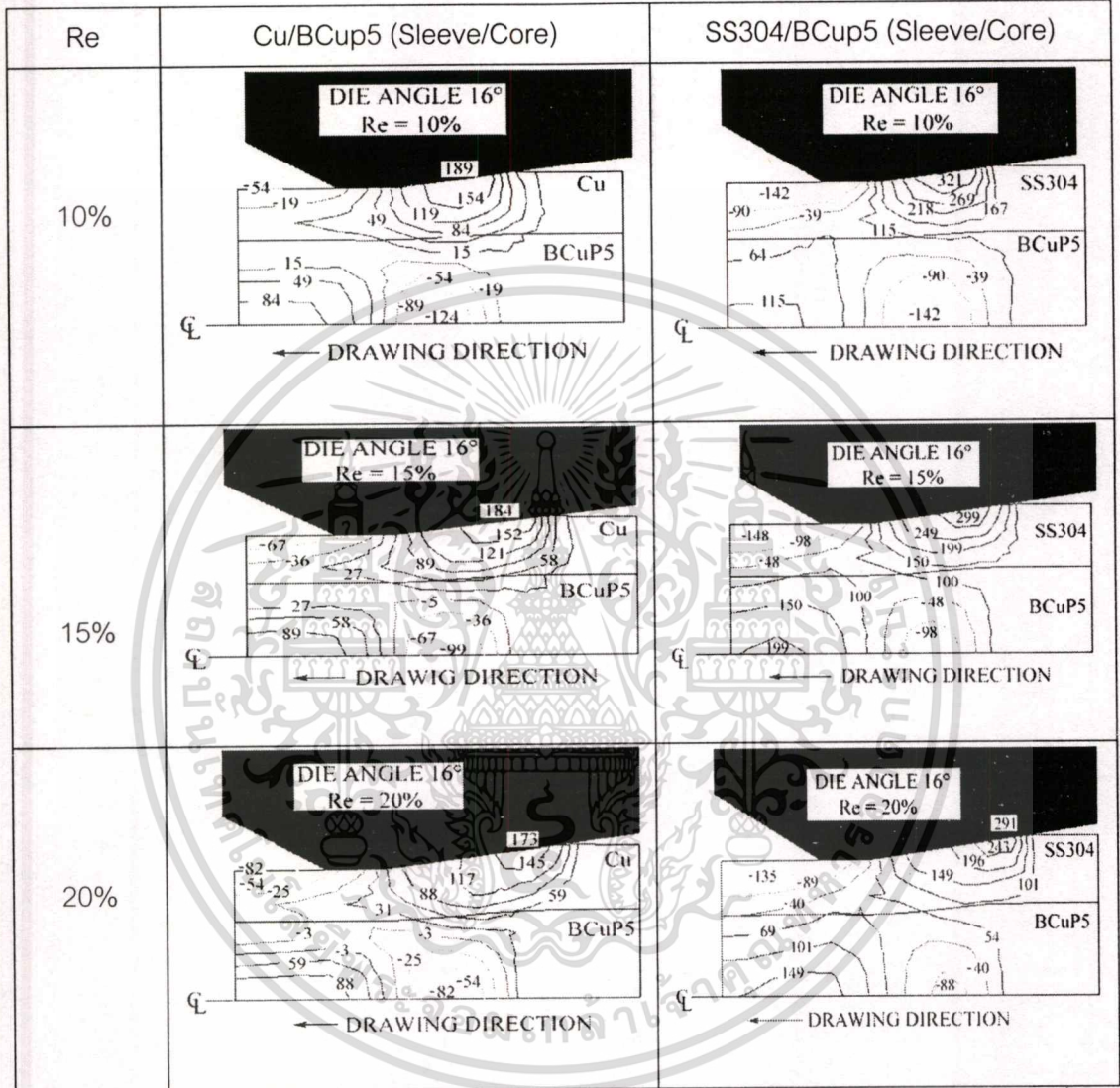
รูปที่ 5.3 Hydrostatic Pressure (MPa) ที่เกิดขณะดึงลวดผ่านดายมีมุมเข้าขนาด 12 องศา ที่อัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด 10%, 15% และ 20%

จากรูปที่ 5.3 แสดงค่า hydrostatic pressure จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าจะกระจายไปทั่วบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปทรง ภาพตัดแสดงจากแบบจำลองรูปที่ 4.6 สำหรับลวดวัตถุประกอบชนิด Cu/BCuP5 ค่า hydrostatic pressure บริเวณแกนลวดมีค่าเป็นความเค้นดึง(ค่า เป็นลบ) ซึ่งมีค่ามากที่สุด 102 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% และลดลงน้อยที่สุด 57 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20% ในบริเวณผิวนอกของวัตถุลวดค่า hydrostatic pressure เป็นความเค้นกด (มีค่าบวก) ซึ่งที่ค่าอัตราการลดขนาดหน้าตัดลวดทั้งสามค่าให้ผลที่แตกต่างกันเล็กน้อย

ในส่วนลวดวัตถุประกอบชนิด SS304/BCuP5 ค่า hydrostatic pressure บริเวณแกนลวดเป็นความเค้นดึงพบเฉพาะที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% และ 15% แต่ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20% พบว่าเป็นความเค้นกด สำหรับค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% พบว่ามีความเค้นดึงสูงสุดเท่า

เอกสารนี้เป็นของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 02-214-9434 หรือ อีเมล: info@kmutt.ac.th

กับ 144 MPa ในส่วนของวัตถุปลอกลวดบริเวณผิวนอกค่า hydrostatic pressure เป็นความเค้นกดมากที่สุด 323 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% เช่นกัน โดยค่าลดลงเมื่อเพิ่มค่าการลดขนาดหน้าตัดเพิ่มขึ้นและให้ค่าความเค้นกดน้อยที่สุด 288 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20%

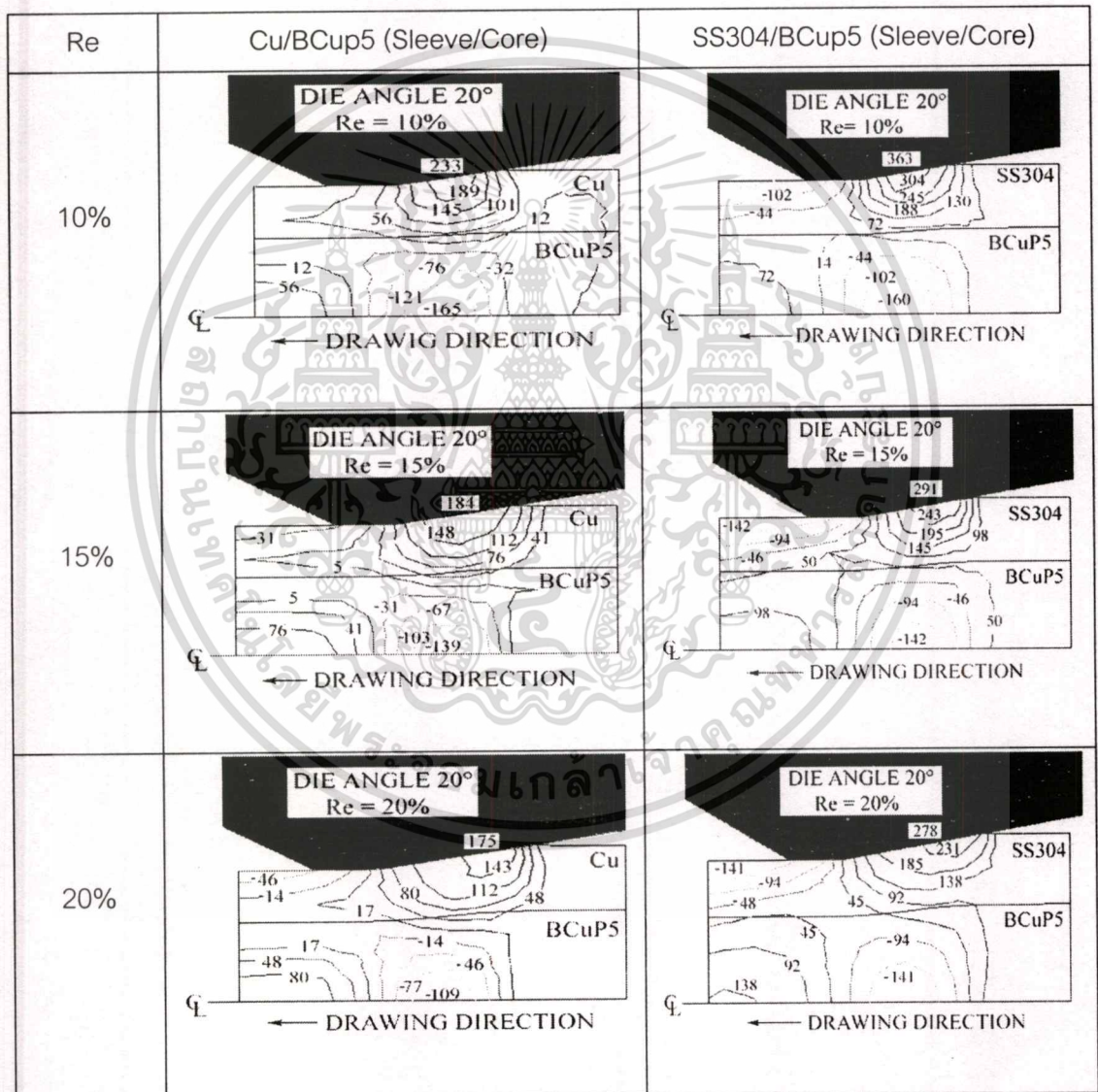


รูปที่ 5.4 Hydrostatic Pressure (MPa) ที่เกิดขณะดึงลวดผ่านดายมีมุมเข้าขนาด 16 องศา ที่อัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด 10%, 15% และ 20%

จากรูปที่ 5.4 สำหรับลวดวัตถุประกอบชนิด Cu/BCuP5 พบว่าค่า hydrostatic pressure บริเวณแกนลวดเป็นความเค้นดึง มีค่ามากที่สุด 124 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% และลดลงเมื่อเพิ่มการลดขนาดหน้าตัดลวด มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 82 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20% สำหรับค่า hydrostatic pressure ของวัตถุปลอกบริเวณผิวนอกของลวดค่าเป็นความเค้นกด พบว่าที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% และ 15% ให้ผลที่แตกต่างกันเล็กน้อย แต่ที่ค่าการลดขนาดหน้า

เอกสารตัด 20% สารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับลวดวัตถุประกอบชนิด SS304/BCuP5 ค่า hydrostatic pressure บริเวณแกนลวดมีค่าเป็นความเค้นดึงทุกค่าการลดขนาดหน้าตัด โดยมีค่าความเค้นดึงมากที่สุด 142 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% และลดลงเมื่อเพิ่มการลดขนาดหน้าตัดและพบว่ามีค่าความเค้นดึงน้อยที่สุดเท่ากับ 88 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20% ในส่วนวัตถุปลอกลวดค่า hydrostatic pressure เป็นความเค้นกด มีค่ามากที่สุด 321 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% และลดลงเมื่อค่าการลดขนาดหน้าตัดเพิ่มขึ้นและให้ค่าความเค้นกดน้อยที่สุด 291 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20%

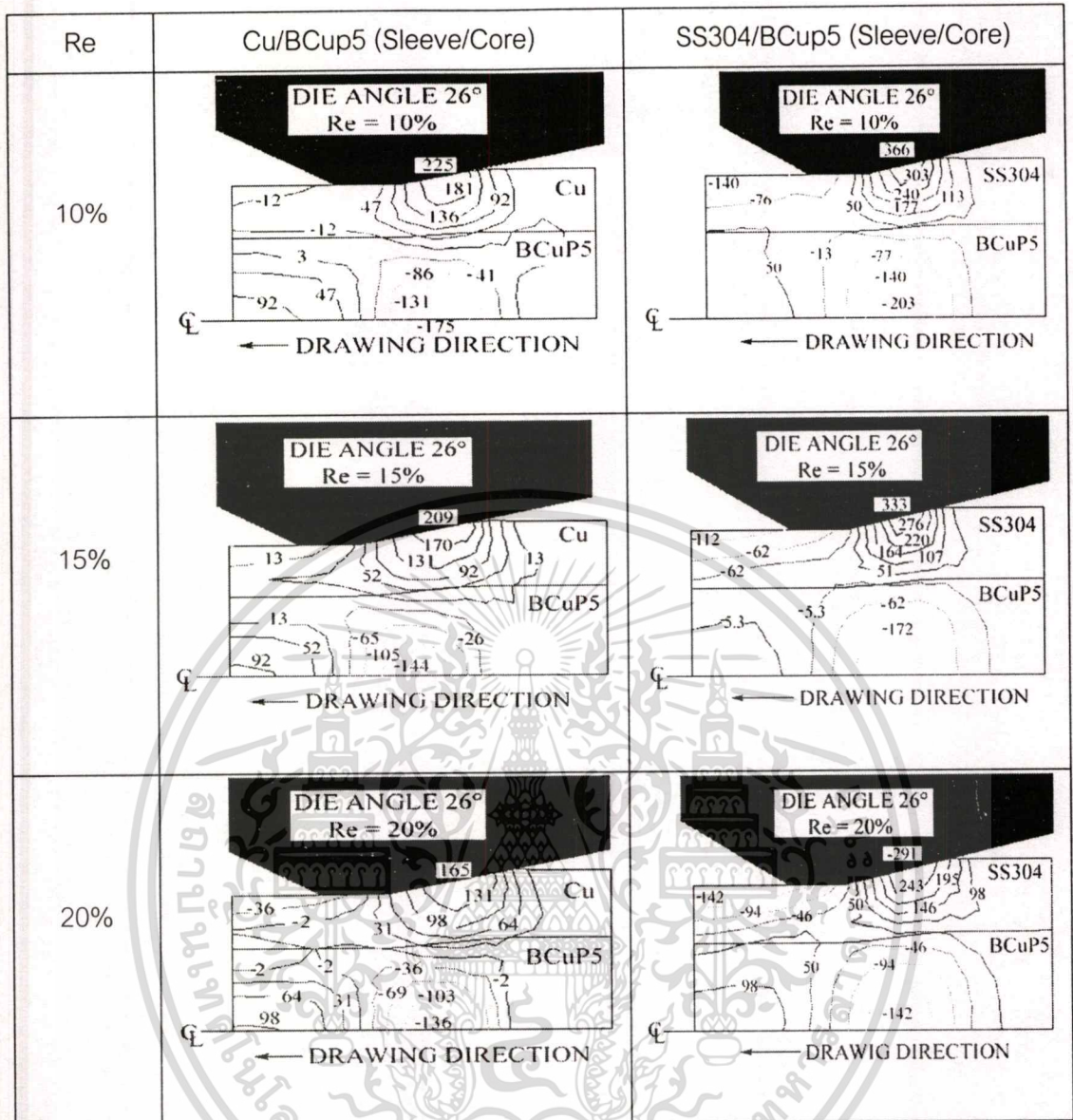


รูปที่ 5.5 Hydrostatic Pressure (MPa) ที่เกิดขณะดึงลวดผ่านดายมีมุมเข้าขนาด 20 องศา ที่อัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด 10%, 15% และ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.5 สำหรับลวดวัตถุประกอบชนิด Cu/BCuP5 พบว่าค่า hydrostatic pressure บริเวณแกนลวดมีค่าเป็นความเค้นดึง มีค่ามากที่สุด 165 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% และลดลงเมื่อเพิ่มการลดขนาดหน้าตัดลวด มีค่าน้อยที่สุด 109 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20% ในส่วนวัตถุปลอกบริเวณผิวนอกของลวดค่า hydrostatic pressure เป็นความเค้นกด ซึ่งที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% ได้ค่าความเค้นกดมากที่สุดเท่ากับ 233 MPa แล้วลดลงเมื่อเพิ่มการลดขนาดหน้าตัดลวด ซึ่งได้ค่าความเค้นกดที่ผิวของวัตถุปลอกน้อยที่สุด 175 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20% ส่วนลวดวัตถุประกอบชนิด SS304/BCuP5 ค่า hydrostatic pressure บริเวณแกนลวดมีค่าเป็นความเค้นดึงทุกค่าการลดขนาดหน้าตัดโดยมีค่าความเค้นดึงมากที่สุด 160 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% และลดลงเมื่อเพิ่มการลดขนาดหน้าตัดและพบว่ามีค่าน้อยที่สุด 141 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20% ในส่วนวัตถุปลอกลวดค่า hydrostatic pressure เป็นความเค้นกด มีค่ามากที่สุด 363 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% และลดลงเมื่อค่าการลดขนาดหน้าตัดเพิ่มขึ้นและให้ค่าความเค้นกดน้อยที่สุด 278 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20%

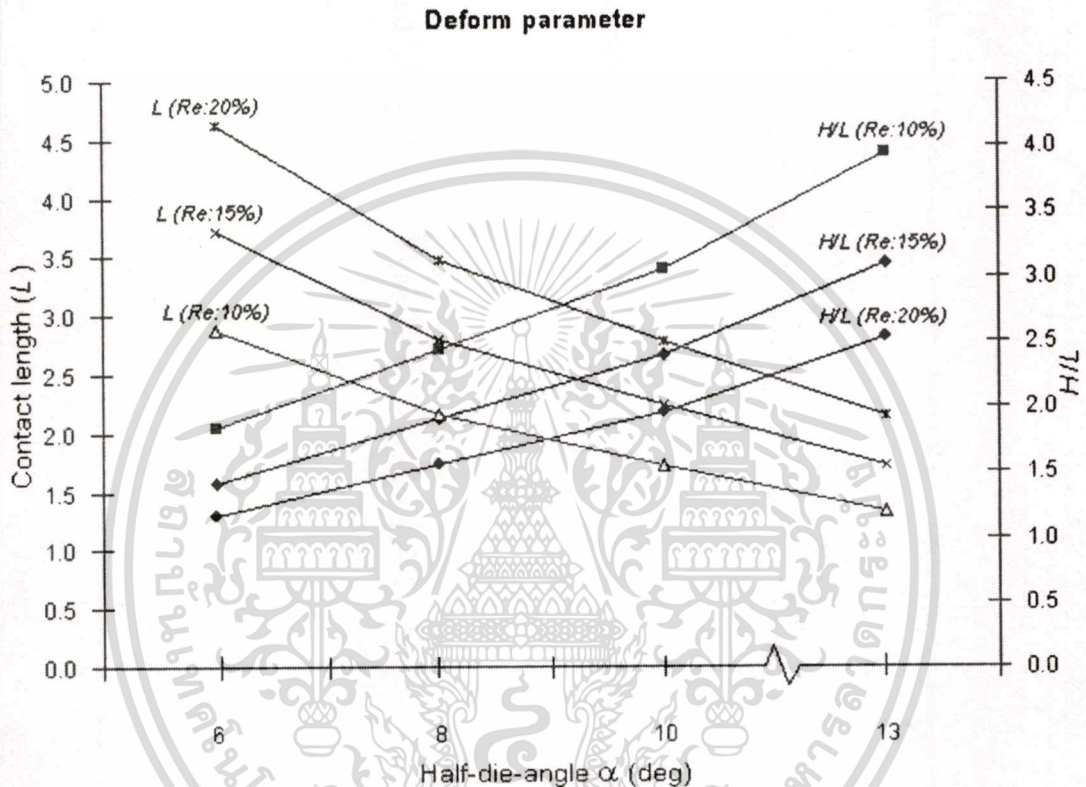




รูปที่ 5.6 Hydrostatic Pressure (MPa) ที่เกิดขึ้นขณะดึงลวดผ่านดายมีมุมเข้าขนาด 26 องศา ที่อัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด 10%, 15% และ 20%

จากรูปที่ 5.6 สำหรับลวดวัตถุประกอบชนิด Cu/BCuP5 พบว่าค่า hydrostatic pressure บริเวณแกนลวดมีค่าเป็นความเค้นดึง ซึ่งมีค่ามากที่สุด 175 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% และลดลงเมื่อเพิ่มการลดขนาดหน้าตัดลวด มีค่าน้อยที่สุด 136 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20% ในส่วนวัตถุปลอกบริเวณผิวของลวดค่า hydrostatic pressure เป็นความเค้นกด ซึ่งที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% ได้ค่าความเค้นกดมากที่สุดเท่ากับ 225 MPa แล้วลดลงเมื่อเพิ่มการลดขนาดหน้าตัดลวด ซึ่งได้ค่าความเค้นกดที่ผิวของวัตถุปลอกน้อยที่สุด 165 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20% ส่วนลวดวัตถุประกอบชนิด SS304/BCuP5 ค่า hydrostatic pressure บริเวณแกนลวดมีค่าเป็นความเค้นดึงทุกค่าการลดขนาดหน้าตัดโดยมีค่าความเค้นดึงมากที่สุด 203 MPa เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วารณี่ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

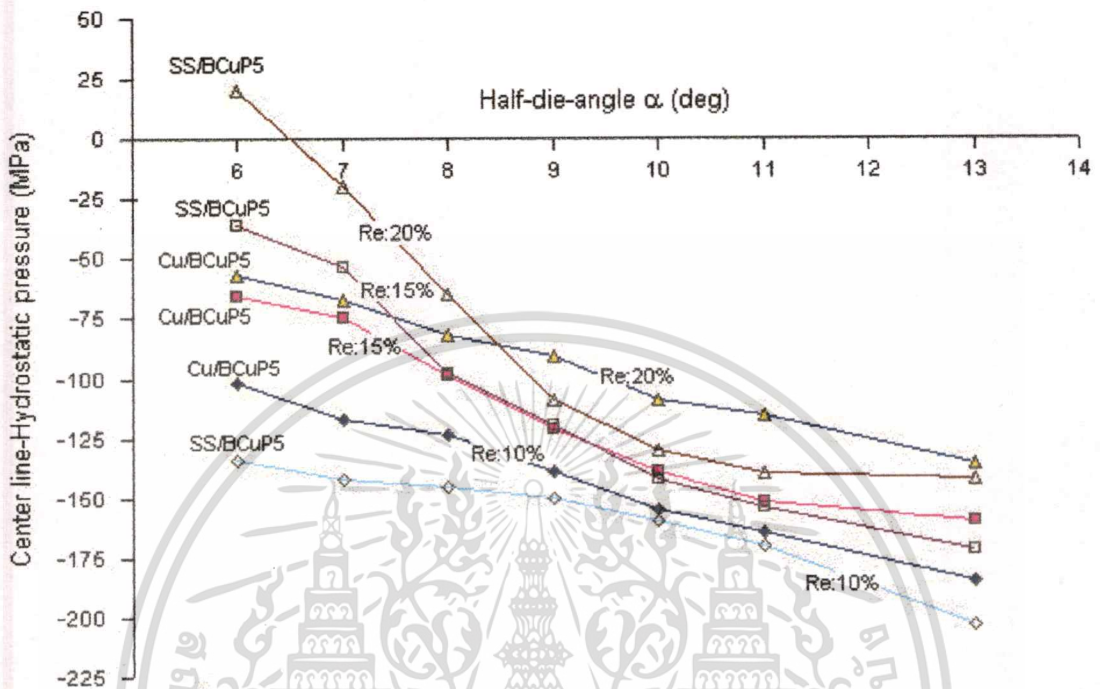
ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% และลดลงเมื่อเพิ่มการลดขนาดหน้าตัดและพบว่ามีค่าน้อยที่สุด 142 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20% ในส่วนวัสดุปลอกลดค่า hydrostatic pressure เป็นความเค้นกด มีค่ามากที่สุด 366 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% และลดลงเมื่อค่าการลดขนาดหน้าตัดเพิ่มขึ้นและให้ค่าความเค้นกดยีน้อยที่สุด 291 MPa ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20%



รูปที่ 5.7 ค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรในช่วงการผ่านตายกับค่าครึ่งมุมตาย ค่าอัตราการลดขนาดหน้าตัดลด

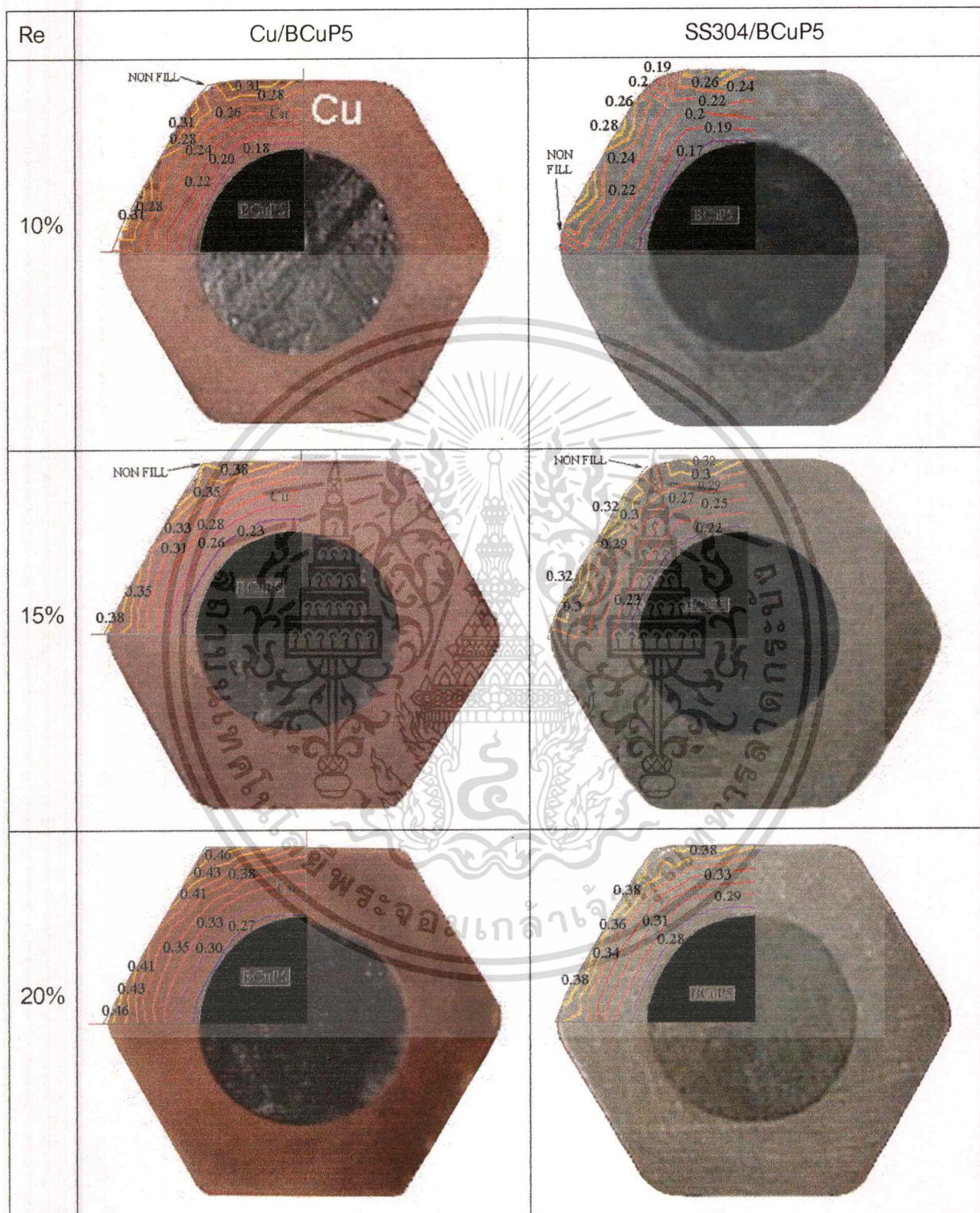
จากรูปที่ 5.7 แสดงค่าตัวแปร  $H/L$  จากสมการที่ 2.17 มีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าครึ่งมุมตาย และลดค่าอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลด ซึ่งเมื่อหาความสัมพันธ์ของกับค่า Hydrostatic pressure ที่แกนกลางลดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับค่าครึ่งมุมตายตามรูปที่ 5.8 พบว่าที่ค่าครึ่งมุมตาย 13 องศา และอัตราการลดขนาดหน้าตัด 10% จะเกิดค่าความเค้นดิ่งมาก (Hydrostatic pressure ติดลบ) ซึ่งมีผลเช่นกันกับลดตัวอย่างทั้งสองชนิด และจะลดลงเมื่อลดค่าครึ่งมุมและลดอัตราการลดขนาดหน้าตัดลด ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าเมื่อเพิ่มค่าดัชนี  $\Delta$  จากสมการ 2.17 พบว่าค่าความเค้นดิ่งมีค่าสูงที่แกนกลางลดซึ่งจะมีผลทำให้ความหนาแน่นของวัสดุแกนลด

ลดลงซึ่งง่ายที่จะนำไปสู่การเกิดโพรงหรือขาดของลวดเมื่อนำไปทำการดึงเพื่อให้ได้ขนาดตามต้องการแต่ละกระบวนการนั้นๆ



รูปที่ 5.8 ค่าความสัมพันธ์ Hydrostatic pressure ที่ตำแหน่งกลางแกนลวดกับค่าครึ่งมุมและค่าอัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด 10%, 15% และ 20%

### 5.1.3 หน้าตัดลวดหลังการดึงขึ้นรูปจริงเทียบกับผล โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์



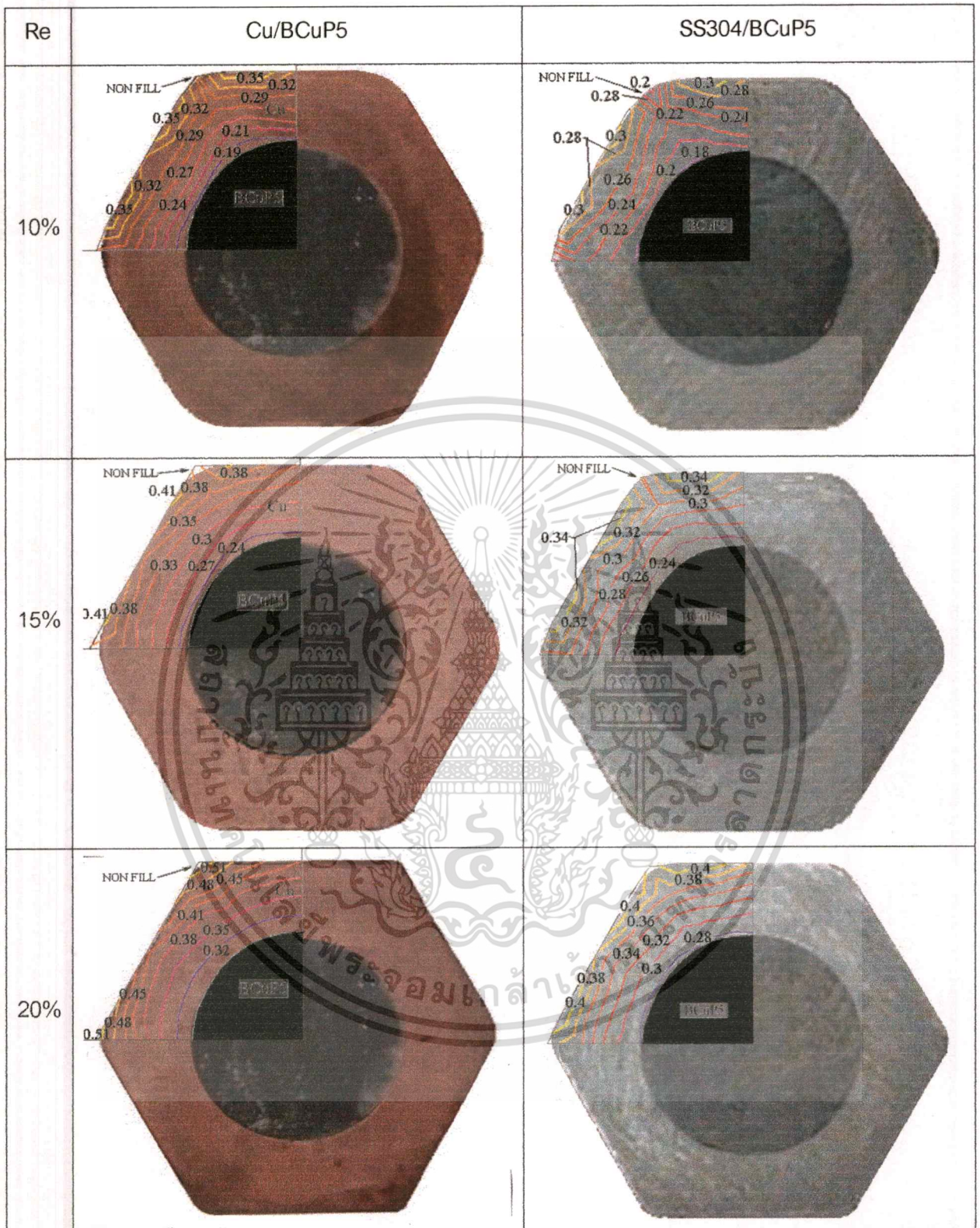
รูปที่ 5.9 ภาพหน้าตัดแสดงการกระจาย Strain ในลวดวัตถุประกอบ Cu/BCuP5 และลวด

SS304/BCuP5 การดึงลวดผ่านดายมีมุมเข้าขนาด 12 องศา ที่อัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด 10%, 15% และ 20% เทียบรูปทรงกับชิ้นงานจริงจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 5.9 รูปซ้ายมือเป็นผลการเปรียบเทียบหน้าตัดลวดวัตถุประกอบ Cu/BCuP5 โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และจากจากทดสอบ โดยดูค่า Strain และความสมบูรณ์ของขอบมุมลวดทกเหลี่ยม เพื่ออธิบายการกระจายของเนื้อวัตถุปลูกพบว่าที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% มีค่า Strain น้อยที่สุด 0.31 และเห็นว่ากรการกระจายของวัตถุปลูกบริเวณมุมนอกหน้าตัดยังไม่เต็มเต็ม โดยเป็นทั้งที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% และ 15% แต่ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20% มีค่า Strain ที่ผิวนอกมากที่สุด 0.46 และสามารถกระจายเนื้อวัตถุได้เต็มหน้าตัด เมื่อเทียบกับชิ้นงานทดลองจริงก็ให้ผลลัพธ์ในทางเดียวกัน ทั้งพบว่าผลต่างของ Strain ที่บริเวณผิวนอกของลวดกับบริเวณแนวต่อของวัตถุแกนกับวัตถุปลูกเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าการลดขนาดหน้าตัด 0.13, 0.15 และ 0.19 ตามลำดับ

จากรูปขวามือผลการเปรียบเทียบหน้าตัดลวดวัตถุประกอบ SS304/BCuP5 พบว่าค่า Strain บริเวณวัตถุปลูกที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% มีค่า Strain น้อยที่สุด 0.28 และเห็นว่ากรการกระจายของวัตถุปลูกบริเวณมุมนอกหน้าตัดยังไม่เต็มเต็มทุกค่าการลดขนาดหน้าตัด ค่า Strain มีค่าเพิ่มขึ้นขึ้นตามอัตราการลดขนาดหน้าตัดและมากที่สุดที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20% เท่ากับ 0.38 โดยสามารถกระจายเนื้อวัตถุได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% และ 15% เมื่อเทียบกับชิ้นงานทดลองจริงก็ให้ผลลัพธ์ในทางเดียวกัน เมื่อดูว่าผลต่างของ Strain ที่บริเวณผิวนอกของลวดกับบริเวณแนวต่อของวัตถุแกนกับวัตถุปลูกมีค่าใกล้เคียงกันทุกเพิ่มค่าการลดขนาดหน้าตัด 0.09, 0.1 และ 0.1 ตามลำดับ

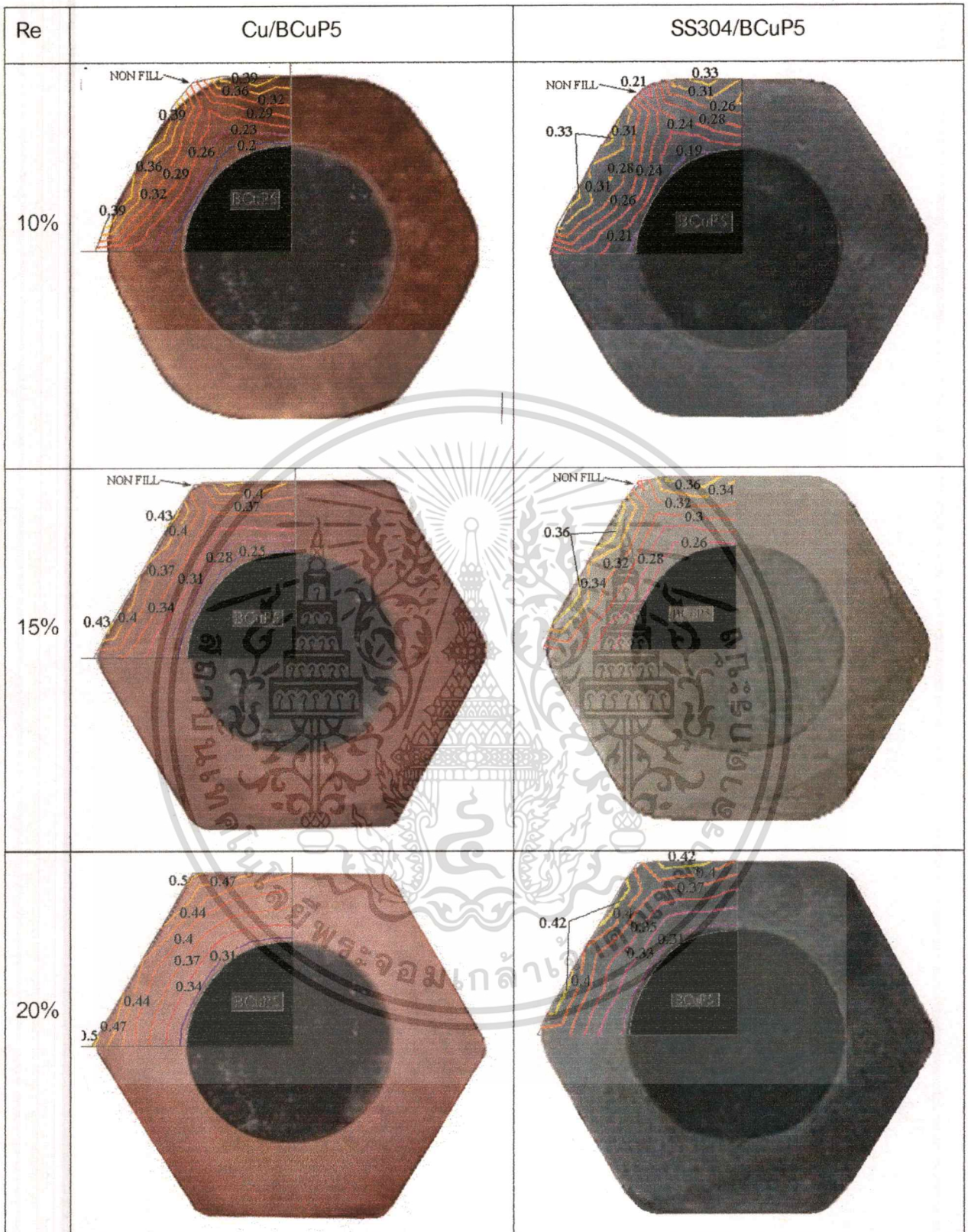


รูปที่ 5.10 ภาพหน้าตัดแสดงการกระจาย Strain ในลวดวัตถุประกอบ Cu/BCuP5 และลวด SS304/BCuP5 การดึงลวดผ่านตายมีมุมเข้าขนาด 16 องศา ที่อัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด 10%, 15% และ 20% เทียบรูปทรงกับชิ้นงานจริงจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 5.10 รูปซ้ายมือเป็นผลการเปรียบเทียบหน้าตัดลวดวัตถุประกอบ Cu/BCuP5 โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และจากจากทดสอบ โดยดูค่า Strain และความสมบูรณ์ของขอบมุมลวดเหล็กเหลี่ยม พบว่าค่า Strain บริเวณวัตถุปลูกที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% มีค่า Strain น้อยที่สุด 0.35 และเห็นว่าการกระจายของวัตถุปลูกบริเวณมุมนอกหน้าตัดยังไม่เต็มเต็ม แต่ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 15% และ 20% มีค่า Strain มีค่าเพิ่มขึ้นและมากที่สุดที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20% เท่ากับ 0.51 โดยสามารถกระจายเนื้อวัตถุได้เต็มหน้าตัด เมื่อเทียบกับชิ้นงานทดลองจริงก็ให้ผลลัพธ์ในทางเดียวกัน ทั้งพบว่าผลต่างของ Strain ที่บริเวณผิวนอกของลวดกับบริเวณแนวต่อของวัตถุแกนกับวัตถุปลูกเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าการลดขนาดหน้าตัด 0.16, 0.17 และ 0.19 ตามลำดับ

จากรูปขวามือผลการเปรียบเทียบหน้าตัดลวดวัตถุประกอบ SS304/BCuP5 พบว่าค่า Strain บริเวณวัตถุปลูกที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% มีค่า Strain น้อยที่สุด 0.3 และเห็นว่าการกระจายของวัตถุปลูกบริเวณมุมนอกหน้าตัดยังไม่เต็มเต็มทุกค่าการลดขนาดหน้าตัด ค่า Strain มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการลดขนาดหน้าตัดและมากที่สุดที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20% เท่ากับ 0.4 โดยสามารถกระจายเนื้อวัตถุได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% และ 15% เมื่อเทียบกับชิ้นงานทดลองจริงก็ให้ผลลัพธ์ในทางเดียวกัน เมื่อดูว่าผลต่างของ Strain ที่บริเวณผิวนอกของลวดกับบริเวณแนวต่อของวัตถุแกนกับวัตถุปลูกมีค่าใกล้เคียงกันทุกที่เพิ่มค่าการลดขนาดหน้าตัด 0.12, 0.1 และ 0.12 ตามลำดับ

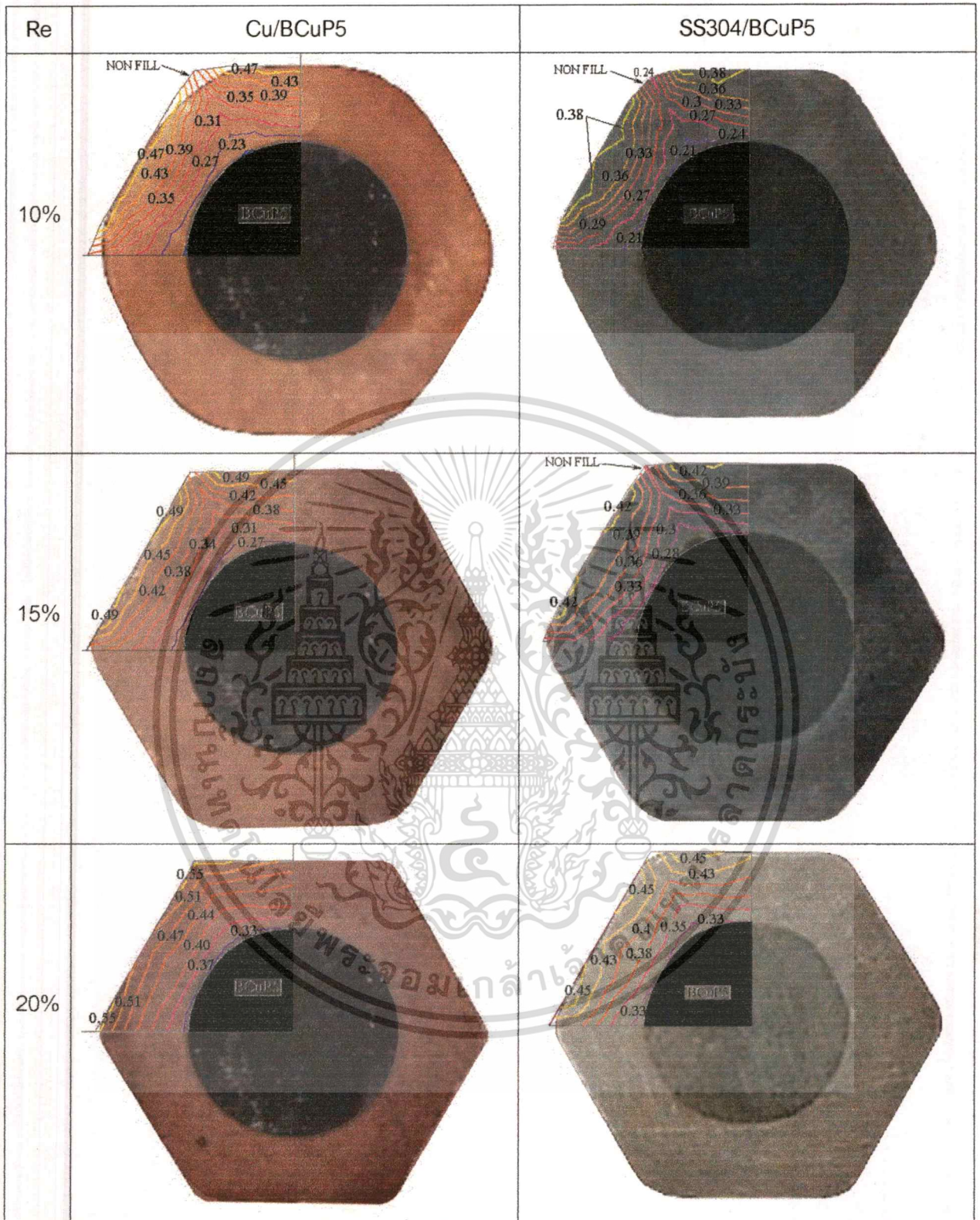


รูปที่ 5.11 ภาพหน้าตัดแสดงการกระจาย Strain ในลวดวัตถุประกอบ Cu/BCuP5 และลวด SS304/BCuP5 การดึงลวดผ่านตายมีมุมเข้าขนาด 20 องศา ที่อัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด 10%, 15% และ 20% เทียบรูปทรงกับชิ้นงานจริงจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 5.11 รูปซ้ายมือเป็นผลการเปรียบเทียบหน้าตัดลวดวัตถุประกอบ Cu/BCuP5 โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และจากจากทดสอบ โดยดูค่า Strain และความสมบูรณ์ของขอบมุมลวดทกเหลี่ยม พบว่าค่า Strain บริเวณวัตถุปลอกที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% มีค่า Strain น้อยที่สุด 0.39 และเห็นว่าการกระจายของวัตถุปลอกบริเวณมุมนอกหน้าตัดยังไม่เต็มเต็ม แต่ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 15% และ 20% มีค่า Strain มีค่าเพิ่มขึ้นและมากที่สุดที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20% เท่ากับ 0.5 โดยสามารถกระจายเนื้อวัตถุได้เต็มหน้าตัด เมื่อเทียบกับชิ้นงานทดลองจริงก็ให้ผลลัพธ์ในทางเดียวกัน เมื่อดูว่าผลต่างของ Strain ที่บริเวณผิวนอกของลวดกับบริเวณแนวต่อของวัตถุแกนกับวัตถุปลอกมีค่าใกล้เคียงกันทุกพิมค่าการลดขนาดหน้าตัด 0.19, 0.18 และ 0.19 ตามลำดับ

จากรูปขวามือผลการเปรียบเทียบหน้าตัดลวดวัตถุประกอบ SS304/BCuP5 พบว่าค่า Strain บริเวณวัตถุปลอกที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% มีค่า Strain น้อยที่สุด 0.33 และเห็นว่าการกระจายของวัตถุปลอกบริเวณมุมนอกหน้าตัดยังไม่เต็มเต็มทุกค่าการลดขนาดหน้าตัด ค่า Strain มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการลดขนาดหน้าตัดและมากที่สุดที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20% เท่ากับ 0.42 โดยสามารถกระจายเนื้อวัตถุได้มากที่สุดเกือบเต็มเต็มในส่วนมุมของหน้าตัดเมื่อเทียบกับค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% และ 15% เมื่อเทียบกับชิ้นงานทดลองจริงก็ให้ผลลัพธ์ในทางเดียวกัน เมื่อดูว่าผลต่างของ Strain ที่บริเวณผิวนอกของลวดกับบริเวณแนวต่อของวัตถุแกนกับวัตถุปลอกมีค่าใกล้เคียงกันทุกพิมค่าการลดขนาดหน้าตัด 0.12, 0.1 และ 0.11 ตามลำดับ



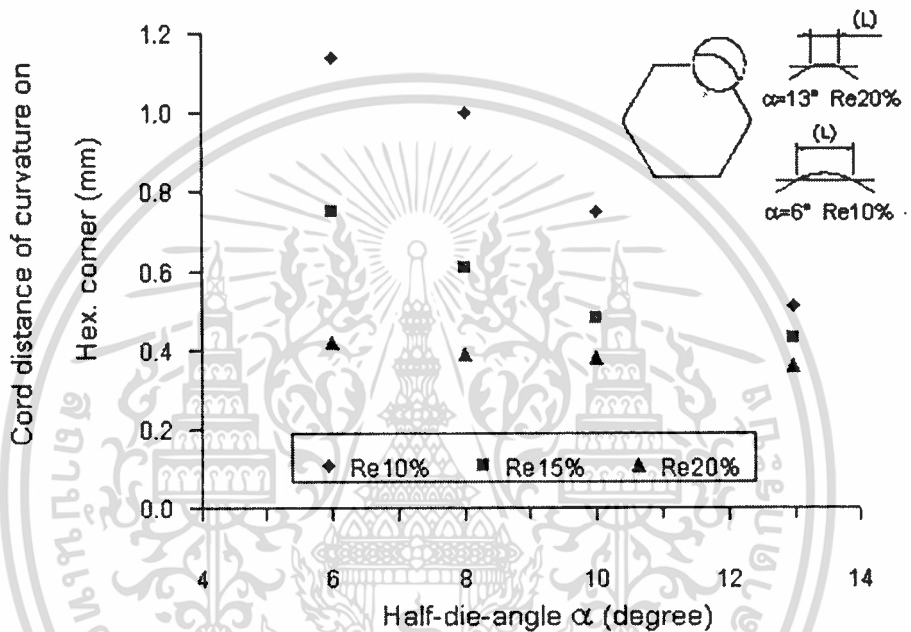
รูปที่ 5.12 ภาพหน้าตัดแสดงการกระจาย Strain ในลวดวัตถุประกอบ Cu/BCuP5 และลวด SS304/BCuP5 การดึงลวดผ่านด้ายมีมุมเข้าขนาด 26 องศา ที่อัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด 10%, 15% และ 20% เทียบรูปทรงกับชิ้นงานจริงจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 5.12 รูปซ้ายมือเป็นผลการเปรียบเทียบหน้าตัดลวดวัตถุประกอบ Cu/BCuP5 โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และจากจากทดสอบ โดยดูค่า Strain และความสมบูรณ์ของขอบมุมลวดทกเหลี่ยม พบว่าค่า Strain บริเวณวัตถุปลอกที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% มีค่า Strain น้อยที่สุด 0.47 และเห็นว่าการกระจายของวัตถุปลอกบริเวณมุมนอกหน้าตัดได้เกือบเต็มเต็ม แต่ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 15% และ 20% มีค่า Strain มีค่าเพิ่มขึ้นและมากที่สุดที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20% เท่ากับ 0.55 โดยสามารถกระจายเนื้อวัตถุได้เต็มหน้าตัด เมื่อเทียบกับชิ้นงานทดลองจริงก็ให้ผลลัพธ์ในทางเดียวกัน เมื่อดูว่าผลต่างของ Strain ที่บริเวณผิวนอกของลวดกับบริเวณแนวต่อของวัตถุแกนกับวัตถุปลอกที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.14 ในส่วนที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 15% และ 20% มีค่าเท่ากันคือ 0.22

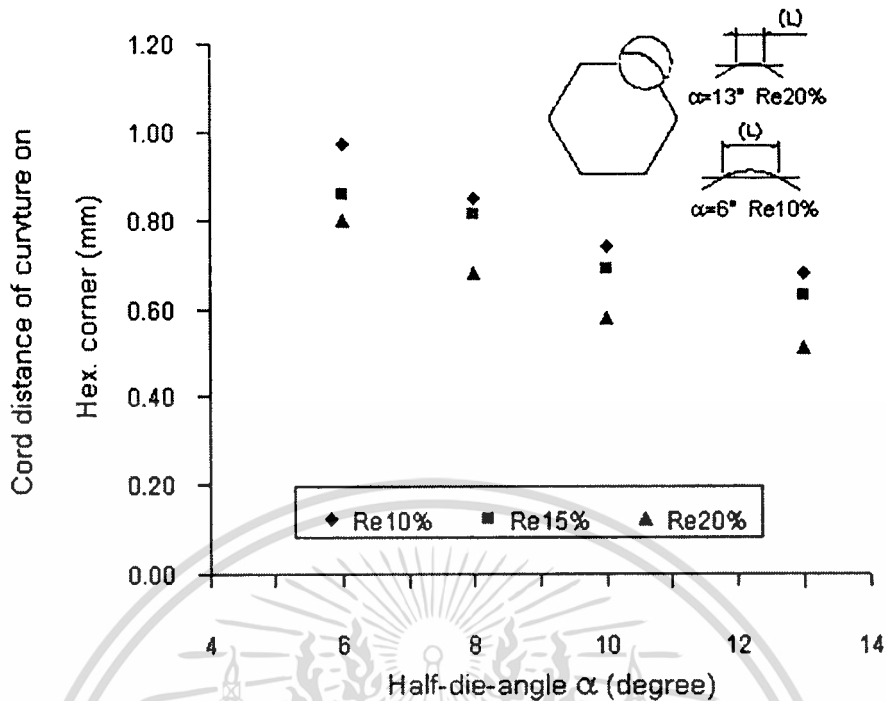
จากรูปขวามือผลการเปรียบเทียบหน้าตัดลวดวัตถุประกอบ SS304/BCuP5 พบว่าค่า Strain บริเวณวัตถุปลอกที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% มีค่า Strain น้อยที่สุด 0.38 และเห็นว่าการกระจายของวัตถุปลอกบริเวณมุมนอกหน้าตัดยังไม่เต็มเต็มทุกค่าการลดขนาดหน้าตัด ค่า Strain มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราลดขนาดหน้าตัดและมากที่สุดที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20% เท่ากับ 0.45 โดยสามารถกระจายเนื้อวัตถุได้มากที่สุดเกือบเต็มเต็มในส่วนมุมของหน้าตัดเมื่อเทียบกับค่าการลดขนาดหน้าตัด 10% และ 15% เมื่อเทียบกับชิ้นงานทดลองจริงก็ให้ผลลัพธ์ในทางเดียวกัน เมื่อดูว่าผลต่างของ Strain ที่บริเวณผิวนอกของลวดกับบริเวณแนวต่อของวัตถุแกนกับวัตถุปลอกมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มค่าการลดขนาดหน้าตัด 0.17, 0.14 และ 0.12 ตามลำดับ

เมื่อนำลวดวัตถุประกอบชนิด Cu/BCuP5 ที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาวัดขนาดความยาวส่วนโค้งบริเวณขอบมุมหน้าตัดหกเหลี่ยมเพื่อเปรียบเทียบและหาค่าความยาวที่น้อยที่สุดเพื่อให้ได้หน้าตัดหกเหลี่ยมความสมบูรณ์ เมื่อนำค่าความยาวที่ได้มาแสดงความสัมพันธ์กับอัตราการลดขนาดหน้าตัดลวดและค่าครึ่งมุมตาย แสดงดังรูปที่ 5.13 เป็นในส่วนของลวดชนิด Cu/BCuP5 เห็นว่าที่อัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด 20% และค่าครึ่งมุม 13 องศา จะได้ค่าความยาวเส้นโค้งน้อยที่สุด ส่วนที่อัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด 10% และค่าครึ่งมุม 6 องศา จะได้ค่าความยาวเส้นโค้งมากที่สุด



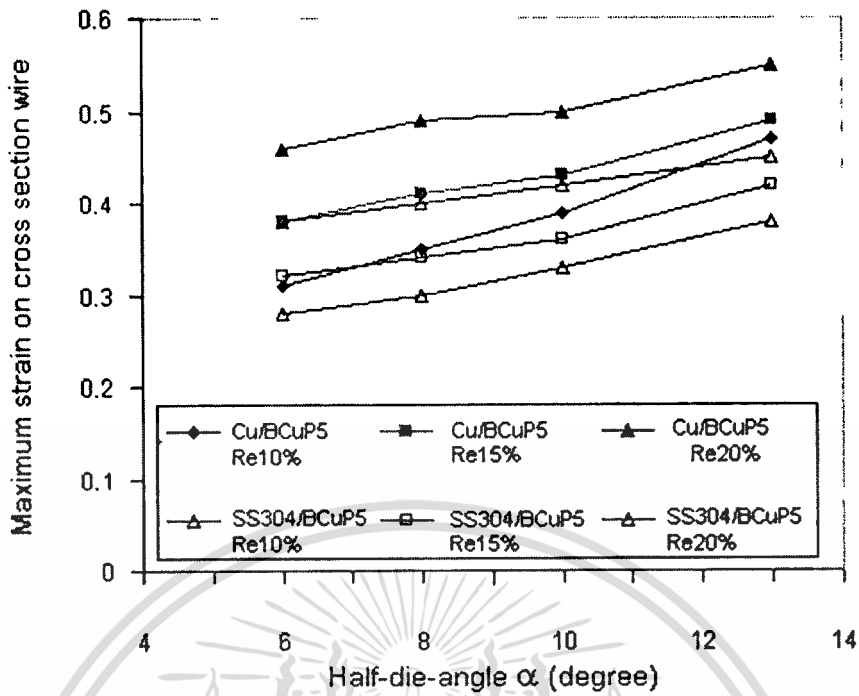
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวมุมโค้งกับอัตราการลดขนาดหน้าตัดลวดและค่าครึ่งมุมตายของลวดวัตถุประกอบประกอบ Cu/BCuP5

เมื่อนำลวดวัตถุประกอบชนิด SS304/BCuP5 ที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาวัดขนาดความยาวส่วนโค้งบริเวณขอบมุมหน้าตัดหกเหลี่ยมเพื่อเปรียบเทียบและหาค่าความยาวที่น้อยที่สุดเพื่อให้ได้หน้าตัดหกเหลี่ยมความสมบูรณ์ เมื่อนำค่าความยาวที่ได้มาแสดงความสัมพันธ์กับอัตราการลดขนาดหน้าตัดลวดและค่าครึ่งมุมตาย แสดงดังรูปที่ 5.14 เป็นในส่วนของลวดชนิด SS304/BCuP5 เห็นว่าที่อัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด 20% และค่าครึ่งมุม 13 องศา จะได้ค่าความยาวเส้นโค้งน้อยที่สุด ส่วนที่อัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด 10% และค่าครึ่งมุม 6 องศา จะได้ค่าความยาวเส้นโค้งมากที่สุด



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวมุมโค้งกับอัตราการลดขนาดหน้าตัดและค่าครึ่งมุมตายของลวดวัตถุประกอบประกอบ SS304/BCuP5

จากผลการหาค่าความเครียดโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นในเส้นลวดกับอัตราการลดขนาดหน้าตัดและค่าครึ่งมุมตายแสดงดังรูปที่ 5.15 แสดงให้เห็นว่าที่มุมตายสูงสุดคือ 13 องศา และ อัตราการลดขนาดหน้าตัดสูงสุดที่ 20% ความเครียดที่บริเวณใกล้ผิวนอกที่สัมผัสกับตายของลวดทั้งสองชนิดมีค่ามากกว่าความเครียดของลวดที่ผ่านการดึงขึ้นรูปผ่านที่มุมตาย 6, 8 และ 10 และที่อัตราการลดขนาดหน้าตัดที่ 10% และ 15% โดยค่าความเครียดสูงสุดเกิดกับลวดวัตถุประกอบชนิด Cu/BCuP5 เห็นว่าที่อัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด 15% และ 20% ความเครียดในวัตถุประกอบของลวด Cu/BCuP5 จะมากกว่าความเครียดลวดวัตถุประกอบชนิด SS304/BCuP5 ที่อัตราการลดขนาดเดียวกัน จึงทำให้สามารถได้น้ำตัดหกเหลี่ยมที่สมบูรณ์กว่า ดังรูปที่ 5.13 และ 5.14



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสูงสุดที่เกิดในเส้นลวดกับอัตราการลดขนาดหน้าตัดลวดและค่าครึ่งมุมตายของลวดวัตถุประกอบประกอบ Cu/BCuP5 และ SS304/BCuP5

## บทที่ 6

# บทสรุปและข้อเสนอแนะ

### 6.1 บทสรุป

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาการดึงลวดวัตถุประกอบเพื่อลดขนาดหน้าตัดและเปลี่ยนหน้าตัดจากกลมเป็นหกเหลี่ยม โดยเป็นการศึกษาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และจากการทดลอง แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉลี่ย Hydrostatic pressure หรือ Mean normal stress ที่เกิดขึ้นในเส้นลวดขณะดึงขึ้นรูปผ่านตาย กับอัตราการลดขนาดหน้าตัดลวดและค่าครีชมุมตาย เพื่อให้ได้ค่าครีชมุมตายและอัตราการลดขนาดที่ดีที่สุด เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายโดยรวมของชิ้นงาน ดังนั้นเพื่อให้ได้ลวดวัตถุประกอบผ่านการดึงขึ้นรูปจากหน้าตัดกลมเป็นหน้าตัดหกเหลี่ยมโดยลดความเสี่ยงการขาดของวัตถุปลูกหรือวัตถุแกนและมีหน้าตัดที่สมบูรณ์ควรใช้ค่าครีชมุมตายที่เหมาะสมสำหรับลวดวัตถุประกอบอยู่ที่ 6-8 องศา ที่อัตราการลดขนาดหน้าตัด 20% แต่ต้องคำนึงถึงความต้องการของผลผลิตด้วยดังนี้

1. สำหรับลวดวัตถุประกอบชิ้นเดียว จากรูปที่ 5.3, 5.4, 5.5 และ 5.6 เมื่อเพิ่มค่าครีชมุมตาย และ ค่าอัตราการลดขนาดหน้าตัด ทำให้เกิดความเค้นดึง[9]ที่แกนของลวดทำให้เกิดค่าความหนาแน่นของวัตถุแกนลดลง[5] ซึ่งง่ายต่อการขาดโดยเฉพาะลวดที่วัตถุแกนเป็นกลุ่มวัตถุที่เปราะ
2. การใช้ค่าครีชมุมที่มากและอัตราการลดขนาดที่น้อย พบว่าจะเกิดความเค้นดึงสูงสุดที่แกนลวด ดังรูปที่ 5.6 และทำให้ค่าดัชนีการลดขนาด  $\Delta$  เพิ่มขึ้น และสอดคล้องตามรูปที่ 5.15 ซึ่งเป็นการบ่งชี้ว่าความหนาแน่นของลวดบริเวณแกนจะลดลง[5] ซึ่งเสี่ยงกับการขาดหากนำลวดไปดึงในขั้นตอนต่อไปจนได้ขนาดตามต้องการ
3. ที่ค่าการลดขนาดหน้าตัด 20% และค่าครีชมุมตาย 13 องศา จะให้ลวดที่มีหน้าตัดหกเหลี่ยมที่สมบูรณ์ที่สุด ดังรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 และ 5.14 เป็นผลสรุปจากโปรแกรมวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และจากการทดลองจะได้ค่าการกระจาย strain ในพื้นที่บริเวณขอบปลูกลวดมากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองจริง
4. การใช้ค่าครีชมุมน้อยและค่าอัตราการลดขนาดที่มากดังรูปที่ 5.3 พบว่าบริเวณแกนลวดค่า hydrostatic pressure มีค่าเป็นความเค้นดึงน้อยที่สุดสำหรับลวดชนิด Cu/BCuP5 และมีค่าเป็นความเค้นกดสำหรับลวด SS304/BCuP5 ซึ่งเป็นการดึงที่สามารถหลีกเลี่ยงการขาดของวัตถุแกนลวดได้

5. ที่ค่าครึ่งมุดตาย 6 องศา สำหรับการดึงลวดวัตถุประกอบ SS304/BCuP5 ที่เลือกใช้ วัตถุปลอกมีค่า Yield stress สูงกว่าวัตถุแกน จะสามารถป้องกันการขาดของแกนได้ดีกว่าลวด Cu/BCuP5 ดังรูปที่ 5.3
6. ผลการทดลองและโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์เห็นว่าค่า Strain ที่กระจายในลวดวัตถุประกอบ Cu/BCuP5 จะมีค่ามากกว่าลวด SS304/BCuP5 แสดงดังรูปที่ 5.13 และ 5.14 ที่การดึงขึ้นรูปผ่านตายที่มีค่าครึ่งและอัตราการลดขนาดที่เท่ากัน เนื่องจากคุณสมบัติของทองแดงที่ความเค้นครากที่น้อยกว่าสแตนเลส จึงให้ได้หน้าตัดที่สมบูรณ์กว่า

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

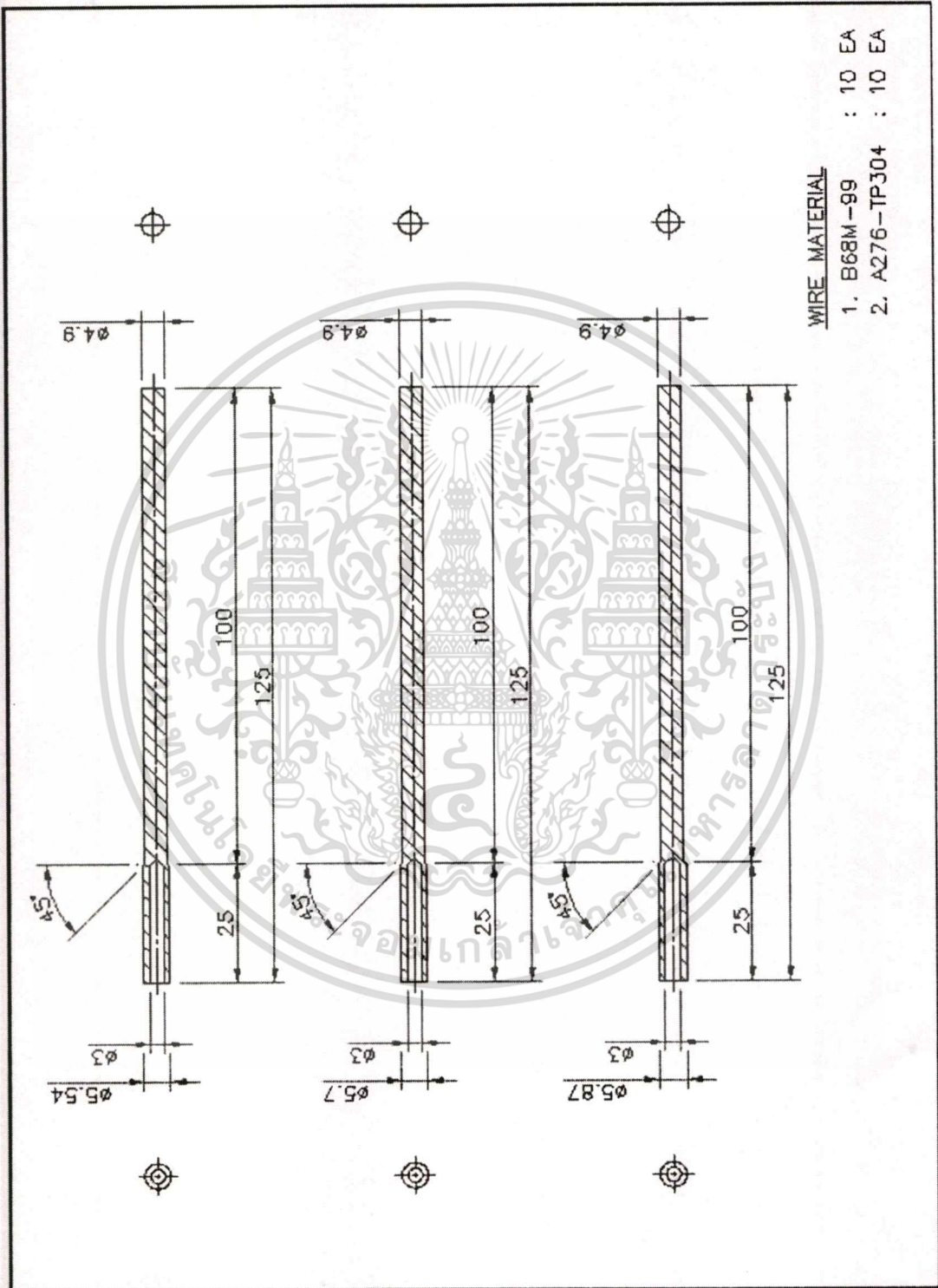
จากผลการทดลองส่วนใหญ่ที่ได้เห็นมีความสอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์โดยไฟไนต์อิลิเมนต์ ซึ่งสามารถทำนายผลที่จะเกิดขึ้นได้ โดยไม่จำเป็นต้องทำการทดลองจริง โดยผลการเบี่ยงเบนของการทดลองจริงอาจเนื่องมาจากสาเหตุดังนี้

1. การดึงขึ้นรูปลวดวัตถุประกอบ ในขั้นตอนการหลอมวัตถุแกนไม่สามารถทำให้ผิวของวัตถุแกนและวัตถุปลอกยึดกันได้ดีตลอด เมื่อนำไปทำการดึงจึงทำให้ค่าผลลัพธ์บางช่วง รวมทั้งผลงานที่ได้ไม่สมบูรณ์เช่นในโปรแกรม
2. ในขั้นตอนการทำวัตถุประกอบไม่ได้คำนึงถึงผลตัวแปรจากความร้อน ซึ่งทำให้คุณสมบัติของวัตถุเบี่ยงเบนไป
3. ความเที่ยงตรงของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งหากขาดการซ่อมบำรุงที่เหมาะสมผลที่อาจเบี่ยงเบนจากค่าจริง
4. ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายในการดึงที่ใช้ในการวิเคราะห์เลือกใช้จากค่าจากงานวิจัยในลักษณะเดียวกัน ซึ่งอาจคลาดเคลื่อนกับค่าที่เกิดขึ้นจริง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Charkrabarty, J. Theory of Plasticity. International ed. : McGraw-Hill Inc. 1987
- [2] Edward M, Mielnik. Metalworking Science and Engineering : McGraw-Hill Inc. 1991
- [3] William F, Hosford and Robert M, Caddell. Metal forming: mechanic and metallurgy. 2<sup>nd</sup> ed : PTR Prentice-Hall Inc. 1993
- [4] ดำรง ไชยธีรานุกัฒศิริ. การขึ้นรูปโลหะ : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน). 2521
- [5] Malberg, M. J.Bech, N.Bay, P.Skov-Hansen, Giuseppe Cualbu. 1998. Influence of process parameters in drawing of superconducting wire. [Online]. Applied Superconductivity Conference. California USA.  
Available : <http://www.sensor.northgrum.com/es/stc/asc/pdf/mtb02.pdf>
- [6] Honma, T. 1983. "Shape memory alloys and their application." J.JSME. , 1983. pp.87-786
- [7] Kazunari Yashida, Hiroshi Tanaka."The drawability of Ni-Ti shape-memory alloy wires." Wire and bar.,no.2 , 1995. pp.89-93.
- [8] Kazunari Yashida."FEM analysis of wire breaks in drawing of superfine wire with an inclusion." Wire Journal International. , March 2000. pp.102-107.
- [9] Kazunari Yashida, "3-Dimension finite element analysis of drawing of superconducting wire" Advance in Materials and Processing Technology II , 1998. pp.934-941.
- [10] Kazunari Yashida, "Acoustic Emission Detection of Internal Fracture during Wire Drawing of Composite Wires" Advance in Materials and Processing Technology , 1999. pp.27-34.
- [11] Peter J. Lee, David C. Larbalestier. "Niobium-Titanium superconducting Wires: Nanostructures by Extrusion and Wire Drawing" Wire Journal International, vol.36, No. 2, 2003. pp. 61-66
- [12] Jeramy E Schaffer. 2002. General characteristics of DFT composite wire. [Online]. Available : [www.fwmetals.com/res\\_mats/DFT.pdf](http://www.fwmetals.com/res_mats/DFT.pdf)

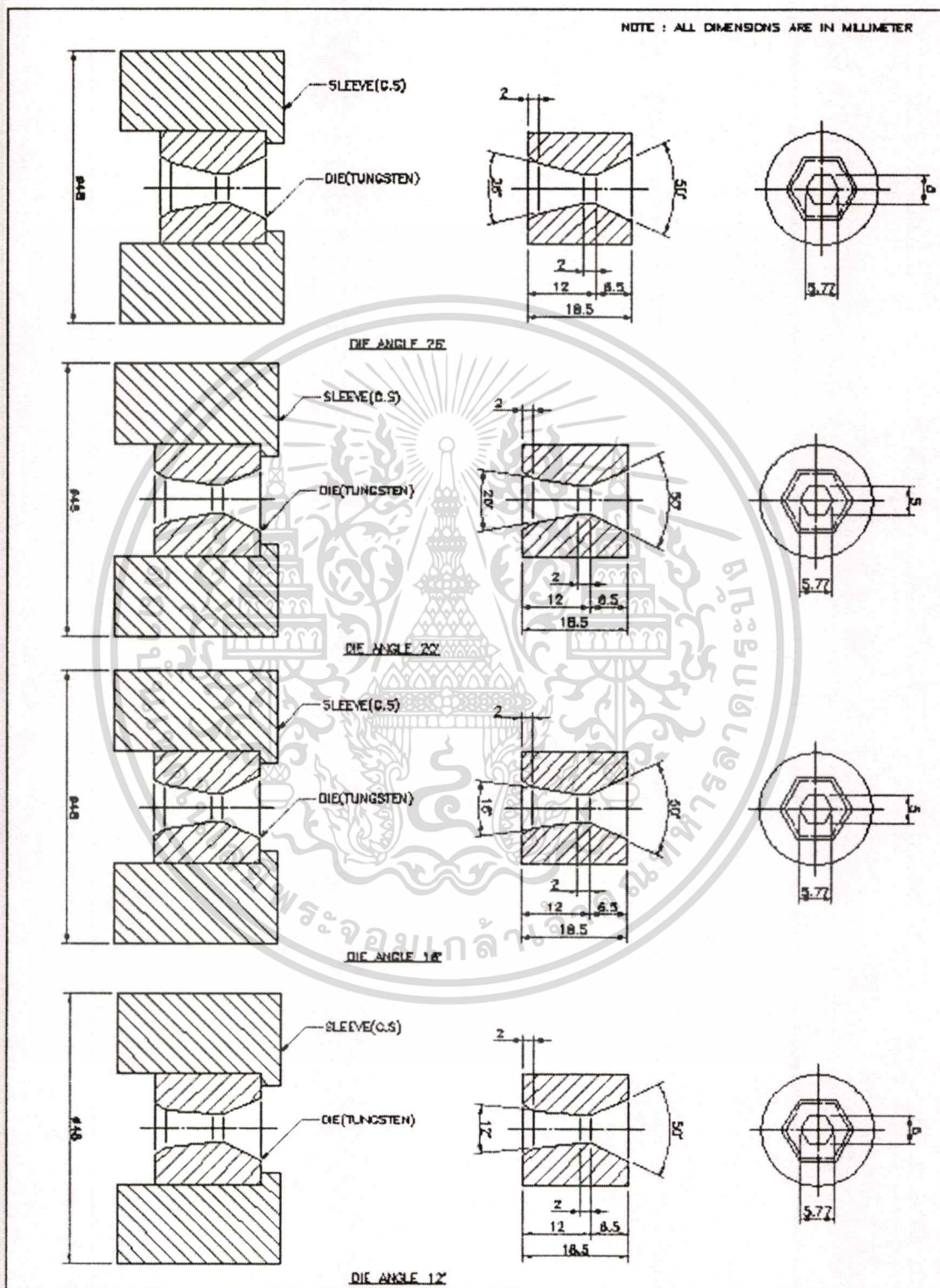
ภาคผนวก ก.  
แบบลวดที่ใช้ในการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ข.

## แบบด้ายที่ใช้ในการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.  
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### บทความวิจัย

การพัฒนาไบโอดีเซลจากไขมันปาล์มบริสุทธิ์สำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด.....	1
<i>กนกอร รจนากิจ จินดา เจริญพรพรณิษฐ์</i>	
การวิเคราะห์ความเครียดในการดึงเส้นลวดวัสดุประกอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	7
<i>กรिताพล สุทธิลาภุทธพล สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ</i>	
2D FEA of Inclusion Length Effects on Copper Shaped-Wire Drawing.....	12
<i>Somchai Norasethasopon</i>	
ประสิทธิภาพการผลิตบัณฑิตระดับปริญญาเอกของประเทศไทย.....	17
<i>อุมาพร จันทิศ</i>	
ผลของชีวสังเคราะห์แอมโทไซยานินต่อการควบคุมสีในพืช.....	23
<i>กนกพร สมพรไถลिन</i>	
การคัดเลือกแบคทีเรียที่มีความสามารถย่อยสลาย Polyhydroxybutyrate(PHB).....	28
<i>กุลวดี ทองภูเบศร์ คันธง วงศ์วัฒนา เศชา ศิลป์ศรี</i>	
สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกรดซิตริกจากน้ำตาลสกัดเชื้อหุ้มเมล็ดโกโก้ โดยเชื้อ <i>Aspergillus niger</i> TISTR 3089.....	33
<i>ดวงใจ โอชัยกุล กุลวดี ทองภูเบศร์ ปริมประภา คณารักษ์ สุปรีชา ฉัตรทอง</i>	
การพัฒนาสูตรและกระบวนการผลิตไอ้กข้าวกล้องกึ่งสำเร็จรูป.....	38
<i>รชมพูนุท สีห์โสภณ</i>	

# การวิเคราะห์ความเครียดในการดึงลวดวัตถุประกอบ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

## Strain Analysis of Composite Wire Drawing by Finite Element Method

กริธาพล สุกิลายุทธพล  
นักศึกษาระดับปริญญาโท

สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ  
อาจารย์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

การค้นคว้านี้ทำขึ้นเพื่อ เป็นแนวทางในการลดขนาดหน้าตัดลวดวัตถุประกอบ 2 ชนิด เพื่อให้ได้การผลิตที่มีประสิทธิภาพ และ ช่วยลดต้นทุนการผลิต ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เทียบกับการทดลองกับชิ้นงานตัวอย่าง โดยได้ทำการทดลองและนำเสนอผลกระทบของมุมคาย และอัตราส่วนการลดขนาด ที่ส่งผลต่อค่าความเครียด เพื่อให้ได้และรูปร่างหน้าตัดลวดและผิวลวดที่สมบูรณ์ในขั้นตอนการดึงลดขนาด 1 ครั้ง จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้ทราบค่ามุมครึ่งคายและอัตราส่วนการลดขนาดที่เหมาะสมสำหรับการดึงขึ้นรูปลวดวัตถุประกอบ ซึ่งจากการทดลองตัวจริงก็ให้ผลในทางเดียวกัน โดยกล่าวถึงการผิดเพี้ยนลวดวัตถุประกอบ เพื่อที่จะสามารถลดข้อบกพร่องในการดึงลวดหกเหลี่ยม

### Abstract

The objective of this research is to establish sound guideline for the design of the Bi-Metal composite wire pass-reduction practice that will lead to the fabrication of high quality defect-free and cost effective. The Bi-Metal single filament wire has been simulated by finite-element method (FEM). The effect of half-die-angle, reduction of area by 1 pass reduction during the drawing has been investigated. Deformations of element, cross-section shape of drawn wire, equivalent strain under drawing conditions have been calculated by FEM. The experimental result was satisfactory agreement. The filament defect also discussed. Suitable drawing have been proposed to obtain flawlessly drawn hexagonal wires.

คำสำคัญ : ลวดวัตถุประกอบ, วิเคราะห์ความเค้น, ไฟไนต์เอลิเมนต์

Keyword: Composite wire, Strain analysis, Finite Element

### 1. บทนำ

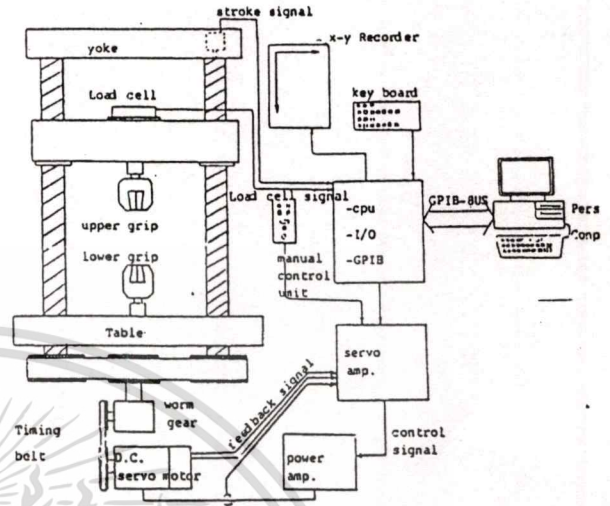
ปัจจุบันลวดวัตถุประกอบถูกนำมาใช้งานมากขึ้น เนื่องจากการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีวัสดุที่มีความก้าวหน้าขึ้น ที่เห็นชัดคือ ลวดตัวนำยิ่งยวดแสดงในรูปที่ 1 และ ลวดสายสัญญาณ อุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ใช้ในร่างกาย วิเคราะห์การผลิตลวดวัตถุประกอบ 2 วัตถุ ซึ่งปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตของกระบวนการดึงขึ้นรูปโลหะมีความก้าวหน้าไปอย่างมากหากแต่เราก็ยังคงต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตกันต่อไปอย่าง

ต่อเนื่อง การพัฒนาการผลิตดังกล่าวทำกันอยู่ในหลายรูปแบบ และหลากหลายวิธี วิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการพัฒนากระบวนการผลิตการดึงขึ้นรูปโลหะ ก็คือ ใช้วิธีสร้างรูปแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Math Model) ขึ้นมาศึกษาแก้ปัญหา และลดเวลานอกจากนั้นแล้วการพัฒนางานวิจัยทางด้าน การดึงขึ้นรูปโลหะ ที่จำเป็นที่จะต้องทำอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งในปัจจุบันมีนักวิจัยหลายท่านและจากองค์กรต่าง ได้ให้ความสนใจเช่น การศึกษาการดึงลวดตัวนำยิ่งยวดของ นักวิจัยหลายท่าน เช่น Yoshida K. และคณะ [3] การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆต่อความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เค้นและพฤติกรรมของลวดและคาย (Die) โดยวัดจากคลื่นเสียงระหว่างการดึงควบคู่กันไปด้วย เพื่อจะได้เปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณ กับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองว่าถูกต้องหรือเป็นไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในทางอุตสาหกรรมการผลิต เพราะหากกำหนดวิธีการผลิตที่ถูกต้องแล้วจะทำให้สามารถประหยัดเวลา ต้นทุนการผลิตลด งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการและผลการศึกษาผลค่าความเครียดของลวดวัตถุประกอบขณะดึงขึ้นรูปด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อจะได้เป็นแนวทางในการศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์อื่นๆที่สำคัญ รวมทั้งพฤติกรรมของลวดและคายที่เกิดจากการดึงขึ้นรูปวัตถุประกอบต่อไป ซึ่งจะเป็นแบบอย่างที่ดีในการพัฒนาที่ถูกต้อง และรวดเร็ว

ประกอบด้วย



รูปที่ 2 แสดงโคะแกรมของเครื่องทดลอง



รูปที่ 1 ขั้นตอนการประกอบลวดวัตถุประกอบ สำหรับนำไปใช้เป็นลวดตัวนำยิ่งยวด

1. เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ระบบขับเคลื่อน วัตถุประสงค์ และบันทึกผลควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์แรงดึงสูงสุด 10 ตัน มีโคะแกรมดังแสดงในรูปที่ 2
2. ชุดหัวจับคายซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อใช้จับยึดคายขณะทำการทดลอง
3. ชุดของตัวคายที่มีขนาดของมุมเอียงต่างกันได้แก่ขนาดครึ่งมุม 6°, 8°, 10°, และ 13°
4. ลวดวัตถุประกอบใช้ทดสอบใช้กับมุมครึ่งคายขนาดต่างกันได้ โดยใช้วัตถุทองแดงเป็นปลอก โดยมีวัตถุทองแดงผสมเงิน 5 % เป็นแกนกลาง ลดขนาดคิดเป็นการลดขนาด 10 % และ 20 % ของขนาดหน้าตัดเดิม

2. การทดลอง

ทำการสร้างชิ้นงานลวดวัตถุประกอบโดยใช้ลวดทองแดงบริสุทธิ์เป็นวัตถุปลอก ใช้ลวดเงินเป็นวัตถุแกน โดยเลือกอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด (Matrix Ratio) เท่ากับ 3 คือค่าอัตราส่วน พื้นที่หน้าตัดปลอกต่อพื้นที่หน้าตัดแกน ให้ความร้อนวัตถุแกนหลอมจับกับปลอก นำไปทำการดึงลดขนาดโดยมีสารช่วยหล่อลื่นระหว่างการดึง ผลการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และค่าความเค้นดึงที่แปรตามค่ามุมคาย และอัตราการลดขนาด

- เครื่องมือ และอุปกรณ์ทดลอง

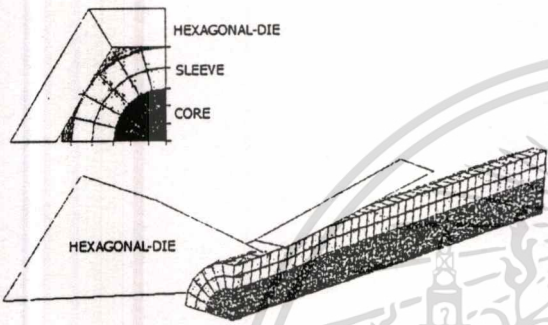
เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ประกอบการทดลอง

3. วิธีการวิเคราะห์ และประเมินผลโดยการใช้ Math Model

ในขั้นตอนถัดไปเป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงในรูปที่ 3 โดยกำหนดให้ลวดมีสมบัติเป็น Elasto-Plastic ประกอบด้วย 1,200 อิลิเมนต์ เลือกใช้อิลิเมนต์ทรงหกเหลี่ยม 8 โหนด เนื่องจากเป็นค่าพื้นฐานในการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติที่ใช้เวลาคำนวณน้อยและให้ผลที่ใกล้เคียงการทดลองจริง กำหนดให้ผิวสัมผัสระหว่างวัตถุทั้งสองติดกันแบบ

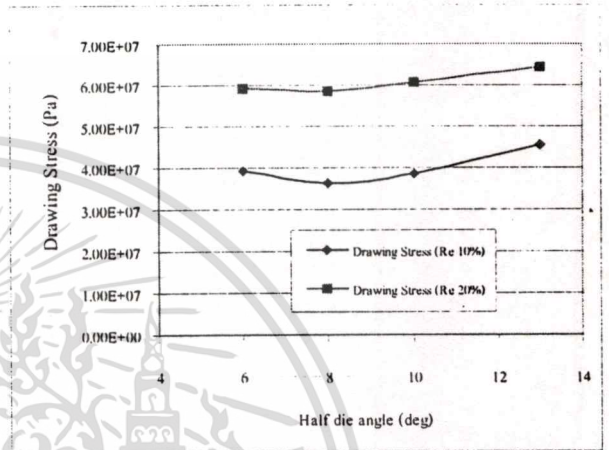
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบูรณ ทำการคำนวณจากภาคตัด 1 ใน 4 ส่วนของหน้าตัด 6 เหลี่ยม เพื่อลดเวลาและขนาดของข้อมูล โดย ตารางที่ 1 เป็นข้อมูลสำหรับและเงื่อนไขในการทดลองในที่ใ้ใช้ในการวิเคราะห์กับไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่ากำหนดสำหรับลวดตัวอย่างที่ใ้ใช้ในการทดลอง โดยใ้ ลวดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.5 มม และ 5.8 มม ทำการลดขนาดเป็นหน้าตัดหกเหลี่ยม ขนาด 5 มม สำหรับทำการลดขนาด 10 % และ 20 %



รูปที่ 3 แสดงรูปแบบจำลองการดึงลวดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ของคบายในการดึงที่น้อยและเหมาะกับการลดขนาดลวดหน้าตัดหกเหลี่ยม คืออยู่ในช่วง 8-13 องศา ซึ่งต่างกับการลดขนาดลวดหน้าตัดกลมที่ค่ามุมจะอยู่ในช่วง 4-8 องศา [2] ซึ่งเป็นค่าจากการทดลองจริงจะใ้ความเค้นดึงน้อยที่สุดที่ การลดขนาดหน้าตัด 10 % โดยใ้ครี้งมุดาย 6 องศา



รูปที่ 4 ค่า Drawing Stress แปรผันกับค่าครี้งมุดาย ที่เกิดขึ้นในลวดระหว่างการจำลองการดึงลดขนาดลวดหน้าตัดหกเหลี่ยม

ตารางที่ 1 สมบัติของวัสดุ และเงื่อนไขที่ใ้ใช้ในการดึงลวดด้วย

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

	กรณีที่ 1 Cu (ปลอก)	กรณีที่ 2 SS304 (ปลอก)	Cu(95%)- Ag(5%) (แกน)
Young's modulus E(MPa)	100000	193000	120000
Yield stress $\sigma_y$ (MPa)	100	205	120
Poisson's ratio (V)	0.3	0.3	0.32
Die half angle $\alpha$ (Deg)	6, 8, 10, 13		
Reduction Re (%)	10, 20		
Coefficient of friction $\mu$	0.05		

ในหัวข้อนี้ใ้แสดงใ้เห็นถึงแบบจำลองอย่างง่ายที่ใ้ใช้เป็นแบบอย่างพื้นฐานในการวิเคราะห์

4. ผลประเมินโดยการใช้ Math Model

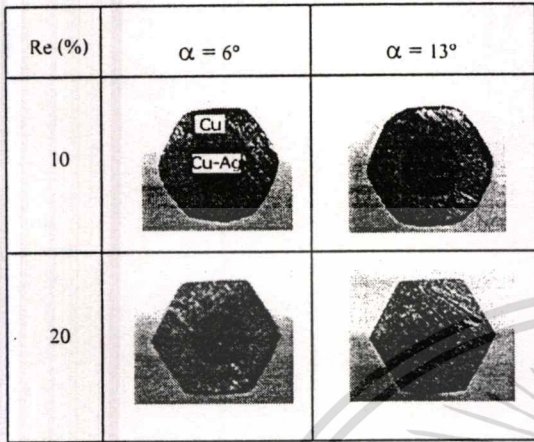
รูปที่ 4 แสดงค่ามุมที่ใ้ความเค้นดึงแปรผันกับค่าครี้งมุด

4.1 ขนาดมุมของลวดหน้าตัดหกเหลี่ยม

รูปที่ 5 แสดงภาพหน้าตัดของลวดหกเหลี่ยมวัสดุประกอบ Cu/Ag ที่ผ่านการดึงลดขนาดจากหน้าตัดกลมสัมพันธ์กับการลดขนาดที่ 10 % และ 20 % กับค่าครี้งมุดายพบว่าที่ค่าการลดขนาด 20 % มุม 13 องศา จะใ้ลวดหน้าตัดหกเหลี่ยมที่สมบูรณ คือ มีเนื้อวัสดุปลอกเต็มในทุกมุมเหลี่ยมทั้งหก รูปที่ 6 แสดงค่า Equivalent Strain จากการคำนวณ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คำนเินตามเงื่อนไขตามตารางที่ 1 ในส่วนสี่คือวัสดุแกน (Cu-Ag) วัสดุปลอกคือทองแดง ได้ผลในทางเดียวกับการทดลองจริง คือเมื่อค่าการลดขนาด 20% และครี้งมุดายที่ 13 องศา ค่าของ Strain ที่มุมทั้งหกของลวดจะมีค่ามากกว่าการลดขนาดที่ 10 % และ ใ้ครี้งมุดายที่น้อยกว่า แต่พบว่าเมื่อใ้ครี้งมุดายที่สูงจะเกิดค่าความแตกต่างอย่างมากของ Strain ของวัสดุปลอกมีค่ามาก ซึ่งจะทำให้เกิดการไม่สม่ำเสมอสำหรับการกระจายตัวของเนื้อวัสดุปลอกในระหว่างการดึงเนื่องจากค่าแรงเฉือน และ

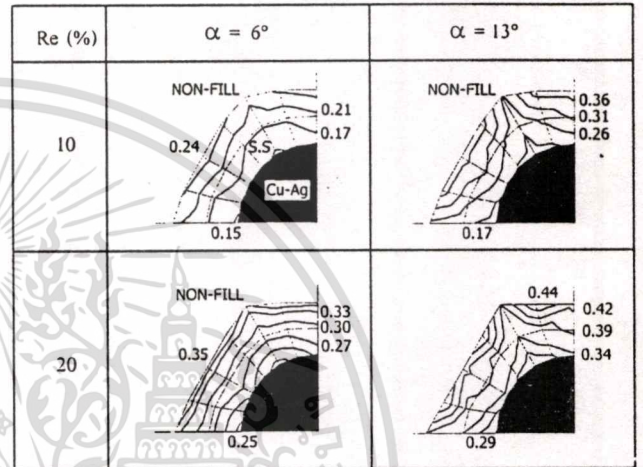
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนใ้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตใ้ให้นำไปใ้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิใ้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใ้

อัตราการผลิตขนาดที่ต่ำจะมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดการไม่สม่ำเสมอสำหรับการกระจายตัวของวัสดุในระหว่างการดึงได้

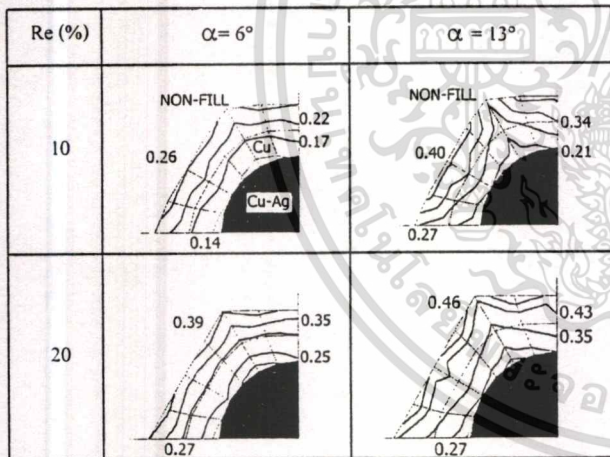


รูปที่ 5 แสดงหน้าตัดลวดวัสดุประกอบ (Cu/Cu-Ag) หลังการดึงจากหน้าตัดกลมเป็นหกเหลี่ยม

ขนาดที่ 10 % และ ใช้เครื่องมือคายนที่น้อยกว่า แต่พบว่าเมื่อใช้ค่าเครื่องมือที่สูงจะเกิดค่าความแตกต่างอย่างมากของ Strain ที่ขอบนอกวัสดุปลอกมีค่ามาก ซึ่งจะทำให้เกิดการไม่สม่ำเสมอระหว่างเนื้อวัสดุในระหว่างการดึง และอัตราการผลิตขนาดที่ต่ำจะมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดการไม่สม่ำเสมอสำหรับการกระจายตัวของวัสดุในระหว่างการดึงได้



รูปที่ 7 รูปทรงหน้าตัดหกเหลี่ยม และ ค่า Equivalent Strain ของลวดวัสดุประกอบ SS304/Cu-Ag



รูปที่ 6 รูปทรงหน้าตัดหกเหลี่ยม และ ค่า Equivalent Strain ของลวดวัสดุประกอบ Cu/Cu-Ag

รูปที่ 7 แสดงค่า Equivalent Strain จากการคำนวณ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณตามเงื่อนไขตามตารางที่ 1 แต่เปลี่ยนวัสดุปลอกเป็นเหล็กไร้สนิม ASTM-TYP304 วิเคราะห์โดยไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อค่าการผลิตขนาด 20% และเครื่องมือคายนที่ 13 องศา ค่าของ Strain ที่มุมทั้งหกของลวดจะมีค่ามากกว่าการผลิต

### 5. สรุป และคำแนะนำ

การดึงลวดวัสดุประกอบสองชนิดเส้นเดี่ยว (Bi-metal Single Filament) ถูกตรวจสอบด้วยการทดลองจริงและไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. อัตราการผลิตขนาดและค่าเครื่องมือคายนที่ควรใช้ค่าที่มากเพื่อให้ได้รูปทรงหกเหลี่ยมที่สมบูรณ์ สำหรับลวดวัสดุปลอกเป็นทองแดงที่มีความแข็งน้อยกว่าวัสดุแกนให้ใช้ค่าเครื่องมือคายนที่ 6 องศา อัตราการผลิตขนาดหน้าตัด 20 % สอดคล้องกับรูปที่ 6 สำหรับลวดที่มีวัสดุปลอกเป็นเหล็กไร้สนิมซึ่งมีค่าความแข็งมากกว่าวัสดุแกน คายนที่ค่าเครื่องมือคายน 13 องศา อัตราการผลิตขนาดหน้าตัด 20 % ได้หน้าตัดหกเหลี่ยมที่สมบูรณ์
2. จากผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 6 และ 7 ที่ค่าเครื่องมือคายน 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอัตราการลดขนาดที่ 20% ได้ค่า equivalent strain ที่ผิวหน้าของวัสดุปลูกมีค่ามากที่สุด ซึ่งจะเป็ผลให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของเนื้อวัสดุซึ่งมีแนวโน้มจะทำให้ผิวหน้าเสียรูปจากผลต่างของแรงเฉือน

3. ผู้ที่สนใจสามารถทำการศึกษา ทำวิจัย และพัฒนาต่อไปได้ ในผลกระทบจากความเร็วในการดึง การลดค่าแรงเฉือน หรือ ค่าความเสียหายของคาน และอื่นๆ ครั้งนี้เป็นเพียงผลการวิจัยในบางส่วนของกระบวนการดึงลวดที่ต้องอาศัยการจำลองการทดลองที่สอดคล้องกับความจริงที่จะทำได้

การวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลสอดคล้องกับการทดลองจริงซึ่งสามารถสรุปว่าสำหรับการดึงลวดหน้ากลมเป็นเหลี่ยมควรเลือกใช้ครั้งมุมคาน 8 องศา และอัตราการลดขนาด 20 % ซึ่งสำหรับในส่วนของการผลิตลวดประกอบรวมแกนควรเลือกใช้วัสดุแกนที่สามารถทนแรงดึงได้มากกว่าวัสดุปลูกเพื่อเป็นแนวทางป้องกันการขาดในแกนลวด

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Edward M. Mielenik. **Metalworking Science and Engineering** : McGraw-Hill, Inc. 1991.
- [2] Avitzler B. "Limit Analysis of Flow Through Conical covering Dies." Proceedings of the JSTP International seminar on Precision Forging (update '97). Osaka, Japan March 31-april 1. pp. 41-49.
- [3] Yoshida, K. et al. "Drawing analysis of Cu/Nb-Ti superconducting shape wire." Proceeding of 47<sup>th</sup> Joint Conference of Plasticity(Kanazawa Japan),1996. Pp.263-264



กริชาพล สุทธิลาอุทพล จบปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปี 2540 ปัจจุบันทำงานตำแหน่ง วิศวกรบริษัท ที ไอ จี เทรคคิง และกำลังศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ งานวิจัยที่ศึกษาการดึงขึ้นรูปลวดวัสดุประกอบ



สมชัย นรเศรษฐ์ โสภณ อาจารย์ประจำภาควิชาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีผลงานการวิจัยการขึ้นรูปวัสดุและวัสดุประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายกรีฑาพล สุลีลายุทธพล
วัน เดือน ปีเกิด	26 พฤศจิกายน 2516
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 2539
ประสบการณ์การทำงาน	
2539 - 2543 :	MES MITR PROJECT SERVICES CO.,LTD. ตำแหน่งวิศวกรเครื่องกล
2544 (ถึงปัจจุบัน)	THAI INDUSTRIAL GASES (PUBLIC) CO.,LTD. ตำแหน่งวิศวกรเครื่องกล หน่วยงาน ISP-CE
ผลงานที่เคยได้รับการตีพิมพ์	
2545 :	"การวิเคราะห์ความเครียดในการดึงเส้นลวดวัตถุประกอบด้วยวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์",วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง ปีที่ 10 ฉบับที่ 1 เมษายน 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้