

การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ของการขาดในการดึงลวดที่มีสิ่งเจือปน

FE ANALYSIS OF BREAKS IN INCLUSION WIRE DRAWING

พงษ์ศักดิ์ นิสapakul

PONGSAK NISSAPAKUL

วิทยานิพนธ์ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. ๒๕๔๖

ISBN 974-648-632-9

การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ของการขาดในการดึงลวดที่มีสิ่งเจือปน

FE ANALYSIS OF BREAKS IN INCLUSION WIRE DRAWING

พงษ์ศักดิ์ นิสภกุล

PONGSAK NISSAPAKUL

เลขที่.....
เลขทะเบียน 43305
วัน, เดือน, ปี 26 ส.ค. 2545

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-682-9

FE ANALYSIS OF BREAKS IN INCLUSION WIRE DRAWING

PONGSAK NISSAPAKUL

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

2002

ISBN 974-648-682-9

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของการขาดในการดึงลวดที่มีสิ่งเจือปน
นักศึกษา	นายพงศักดิ์ นิสภกุล
รหัสประจำตัว	43062031
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงการขาดในระหว่างการรีดดึงลวดผ่านตายที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่ามุมได้ พร้อมทั้งออกแบบการทดลองชิ้นงานจริงเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่เกิดขึ้น กับการจำลองทางไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อศึกษาถึงความถูกต้องเพื่อใช้เป็นแนวทางการจำลองสภาวะ ขอบเขตเงื่อนไขโดยให้เกิดสิ่งเจือปนขึ้นณ.บริเวณหรือตำแหน่งต่างๆ ของลวด โดยวิธีการทางไฟไนต์อีลิเมนต์ ในกรรมวิธีการผลิตจริง ไม่สามารถรู้ได้ว่าจะเกิดสิ่งเจือปนบริเวณใดๆ การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์จะให้เห็นถึงลักษณะ พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของการเกิดสิ่งเจือปนในบริเวณต่างๆ เพื่อทำนายถึงสาเหตุที่เกิดการขาด และสามารถใช้กำหนดกรรมวิธีการผลิตที่สอดคล้อง และเหมาะสมต่อไป

Thesis Title	FE Analysis of Breaks In Inclusion Wire Drawing
Student	Mr.Pongsak Nissapakul
Student ID.	43062031
Degree	Master of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Somchai Norasethasopon

ABSTRACT

This thesis presents an analysis of wire breaks during wire drawing through die which can vary angle and design the experimental to compare with the simulated results from the finite element method. To confirm the accuracy of the computational results for using as a guideline of applying the inclusion boundary conditions to any position of wire. The finite element model generated to demonstrate the characteristic of wire to predict the cause of wire breaking and define the corresponding and appropriate manufacturing process further.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือและสนับสนุนเป็นอย่างดีจากบุคคลที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

รศ.ดร. สมชัย นรเศรษฐโสภณ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้คำแนะนำและให้ข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องาน และการแก้ปัญหาต่างๆที่พบในระหว่างการทำงานวิจัย

Professor. Kazunari Yoshida Yoshida พร้อมคณะจาก Tokai University Japan ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในส่วนของกรให้คำแนะนำในการใช้ซอฟต์แวร์ในการช่วยการวิเคราะห์ปัญหา ตลอดจนคำชี้แนะอื่นๆ

คุณมณฑา เทียมเมือง เจ้าหน้าที่ช่างเทคนิคที่ให้ความช่วยเหลือในส่วนของเครื่องมือ และช่วยแก้ปัญหาในด้านเทคนิค

ข้าพเจ้าขอขอบคุณบุคคลต่างๆดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น รวมทั้งเพื่อนๆ เป็นอย่างยิ่ง และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำ วิทยานิพนธ์ครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา และมารดาเป็นอย่างยิ่งที่ได้สนับสนุนและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมาจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

พงษ์ศักดิ์ นิสภกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.5 สมมุติฐานจากการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 กรรมวิธีการผลิตเบื้องต้น.....	5
2.1 พื้นฐานกรรมวิธีการผลิต.....	5
2.2 ความหมายของการผลิต.....	5
2.3 ความหมายของอุตสาหกรรม.....	6
2.4 หลักการทั่วไปของอุตสาหกรรมการผลิต.....	7
2.5 ปัจจัยด้านการผลิต.....	8
บทที่ 3 พฤติกรรม และคุณสมบัติของวัสดุ.....	10
3.1 การจำแนกวัสดุ.....	10
3.2 คุณสมบัติของวัสดุ.....	12
3.2.1 คุณสมบัติของวัสดุที่สำคัญ.....	12
3.2.2 ความเครียด (Strain).....	12
3.2.3 พฤติกรรมค้ำรูปและคงรูป (Elastic and Plastic Behavior).....	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.4 ความเค้น (Stress).....	14
3.2.5 ความแข็ง (Hardness).....	15
3.3 ลักษณะที่สำคัญ ๆ ของวัสดุ.....	16
บทที่ 4 การขึ้นรูปโลหะ	19
4.1 การขึ้นรูปโลหะร้อน.....	19
4.1.1 การรีดขึ้นรูป (Rolling).....	19
4.1.2 การตีขึ้นรูป (Forging)	20
4.1.3 การอัด.....	21
4.1.4 ท่อและกรรมวิธีการผลิตท่อ (Pipe and Tube manufacture).....	22
4.1.5 การดึงขึ้นรูป (Drawing).....	23
4.1.6 การหมุนขึ้นรูปร้อน (Hot spinning).....	23
4.2 การขึ้นรูปโลหะเย็น.....	23
4.2.1 การผลิตท่อ (Tube finishing).....	24
4.2.2 การดึงลวด (Wire drawing).....	25
4.2.3 การหมุนขึ้นรูป.....	26
4.2.4 การดันขึ้นรูป (Stretch forming).....	26
4.2.5 การอัดหรือการตีขึ้นรูป (Swaging or Cold forging).....	26
4.2.6 การอัดแบบหล่อ (Hobbing).....	27
4.2.7 การทำเหรียญตราและการอัดนูน (Coining and Embossing).....	27
4.2.8 การย้ำหัวและการย้ำมุม (Riveting and Staking).....	28
4.2.9 การรีดขึ้นรูป (Roll forming).....	28
4.2.10 การดัดเหล็กแผ่น (Plate bending).....	29
4.2.11 การเข้าตะเข็บ (Seaming).....	29
4.2.12 การพ่นเม็ดโลหะ (Shot speening).....	29
บทที่ 5 การดึงขึ้นรูป.....	31
5.1 การดึงขึ้นรูป.....	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.1 คำจำกัดความ.....	31
5.1.2 ดาย.....	32
5.1.3 วัสดุใช้ทำตาย.....	32
5.2 วิธีการ Method Forming.....	33
5.2.1 การดิ่ง และการอัดแท่งลวด.....	34
5.2.2 สภาพความสมดุลของการดิ่งขึ้นรูป.....	36
5.3 การนำไปใช้และประโยชน์.....	40
บทที่ 6 วิธีการจำลองการวิเคราะห์ขบวนการขึ้นรูปโลหะเบื้องต้น.....	42
6.1 วิธีการไฟไนท์อิลิเมนต์สำหรับขบวนการขึ้นรูป.....	42
6.1.1 พื้นฐาน(Introduction).....	42
6.1.2 ภาพรวมของวิธีการไฟไนท์อิลิเมนต์.....	43
6.2 การนำ FE ไปใช้ใน Plasticity.....	44
6.3 โครงสร้างของไฟไนท์อิลิเมนต์โปรแกรมสำหรับใช้กับคอมพิวเตอร์.....	48
บทที่ 7 วิธีการทดลองและการจำลองในการวิเคราะห์.....	50
7.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง.....	50
7.1.1 เครื่อง UTM.....	50
7.1.2 ชุดตาย หัวจับขึ้นทดสอบ.....	51
7.2 วิธีการทดลอง.....	52
7.3 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทดสอบ และจำลองในโปรแกรม.....	53
7.4 การจำลองในการวิเคราะห์.....	54
บทที่ 8 ผลการทดลอง.....	55
8.1 ผลจากการทดลอง.....	55
8.1.1 ผลการทดลองในเบื้องต้น.....	55
8.1.2 ผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการดิ่ง.....	56
8.1.3 แสดงผลการทดสอบในการจำลองสิ่งเจือปนลงในลวด.....	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
8.2 ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง.....	64
8.2.1 วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ.....	65
8.2.2 วิเคราะห์เชิงกล.....	68
8.3 สรุปผลการทดลอง.....	82
บทที่ 9 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	83
9.1 บทสรุป.....	83
9.2 ข้อเสนอแนะ.....	84
เอกสารอ้างอิง	85
ภาคผนวก	86
ภาคผนวก ก. แบบของอุปกรณ์พิเศษที่นำมาประกอบการทดสอบ.....	86
ภาคผนวก ข. แบบลวดที่ใช้ในการทดสอบ.....	87
ภาคผนวก ค. องค์ประกอบของด้ายที่ใช้ในปัจจุบัน.....	88
ภาคผนวก ง. ด้ายที่ใช้ในปัจจุบัน.....	89
ภาคผนวก จ. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	90
ประวัติผู้เขียน	99

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ประเภทของการแปรขึ้นรูปในสภาพเย็น.....	24
6.1 ตารางแสดงการใช้ไฟในทีอิลิเมนต์ในงานขึ้นรูปเย็น.....	44
7.1 แสดงสัดส่วนการลดขนาดของลวดที่ทดสอบ.....	52

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
3.1 การจำแนกวัสดุ.....	10
3.2 ภาพแสดงโครงสร้างการเรียงตัวของอะตอมวัสดุโลหะ.....	11
3.3 ภาพแสดงการทดสอบแรงดึง.....	13
3.4 ภาพแสดงการตัดเฉือน.....	14
3.5 ภาพแสดงการอัดวัสดุขึ้นงาน.....	14
3.6 ภาพแสดงความเค้นและความเครียดของวัสดุ.....	15
3.7 ภาพแสดงการทดสอบความแข็ง.....	16
3.8 ภาพแสดงการทดลองกับความแข็งแรงของวัสดุ.....	17
4.1 แสดงการรีดขึ้นรูปด้วยลูกกลิ้ง.....	19
4.2 แสดงขั้นตอนการตีอัดขึ้นรูป.....	20
4.3 แสดงหลักการของการตีหมุนขึ้นรูปด้วยลูกกลิ้ง.....	21
4.4 แสดงการตีหมุนขึ้นรูปโดยลูกกลิ้ง.....	21
4.5 แสดงภาพหน้าตัดให้เห็นลักษณะการอัดรีดแบบ direct และ indirect.....	22
4.6 แสดงภาพหน้าตัดของแบบพิมพ์ที่ใช้ดิ่งลวด.....	25
4.7 แสดงการดิ่งลวดแบบต่อเนื่อง.....	25
4.8 การอัดและดิ่งขึ้นรูป.....	26
4.9 แบบพิมพ์ที่ใช้ในการอัด.....	27
4.10 แสดงความแตกต่างในการทำเหรียญตราและทำให้เป็นตัวนูน.....	28
4.11 ชิ้นส่วนที่ผลิตจากกรรมวิธีการรีดเย็น.....	28
5.1 แสดงการดิ่งลวด.....	31
5.2 แสดงสัดส่วนของตาย.....	32
5.3 แสดงส่วนประกอบของตาย.....	32
5.4 แสดงองค์ประกอบทิศทางการเค้นที่เกิดขึ้นในการดิ่ง.....	33
5.5 แสดงความสัมพันธ์ที่เกิดจากเส้นโค้งของครึ่งมุมตายระหว่างการดิ่ง.....	36
5.6 แสดงถึงส่วนของลวดที่สัมผัสกับตาย.....	37
5.7 แสดงการนำลวดที่ได้จากการดิ่งไปใช้.....	40
5.8 แสดงการนำลวดที่ได้จากการดิ่งไปใช้ในการแพทย์.....	40
5.9 แสดงการนำลวดที่ได้จากการดิ่งไปใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	41

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.1 แสดง flowchart วิธีการสำหรับการคำนวณของกระบวนการขึ้นรูปโลหะ.....	42
6.2 แสดงภาพFlowchart วิธีการไฟไนท์อิลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์ขบวนการขึ้นรูป.....	43
6.3 แสดงแผนภาพเส้นโค้งสำหรับวัสดุทางอุดมคติ.....	45
6.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ stress-strain.....	46
6.5 โครงสร้าง และวิธีการทำซ้ำของการวิเคราะห์ช่วงการเปลี่ยนแปลง large plastic.....	49
6.6 Flowchart สำหรับวิธีการไฟไนท์อิลิเมนต์.....	49
7.1 แสดงไดอะแกรมของเครื่องทดสอบ.....	50
7.2 แสดงการทำงานของเครื่องทดสอบเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์.....	50
7.3 อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเป็นพิเศษสำหรับการทดสอบการดึงลวดผ่านตาย.....	51
7.4 แสดงตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ.....	51
7.5 แสดงรูปตายที่ใช้ในการทดสอบ.....	52
7.6 แสดงการทดลองการดึงชิ้นงาน.....	53
7.7 แบบจำลองการดึงลวดที่มีสิ่งเจือปนอยู่ใน.....	54
7.8 แสดงแบบจำลองการดึงลวดที่มีสิ่งเจือปนเกิดขึ้น ณ ตำแหน่ง.....	54
8.1 อธิบายถึงผลจากการทดลองเกี่ยวกับแรงที่ใช้กับระยะยืดที่เหมาะสม.....	55
8.2 แสดงชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบ.....	55
8.3 แสดงกราฟที่ได้จากการแทนค่าลงในสมการ 5.10.....	56
8.4 ความสัมพันธ์ความเค้น กับความเครียดที่ $Re = 8.2\%$ (5.2mm).....	57
8.5 ความสัมพันธ์ความเค้น กับความเครียดที่ $Re = 25.4\%$ (5.6mm).....	58
8.6 ความสัมพันธ์ความเค้น กับความเครียดที่ $Re = 44\%$ (6.0mm).....	59
8.7 อธิบายถึงการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายที่สัดส่วนการลดขนาด 8.2 %.....	60
8.8 อธิบายถึงการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายที่สัดส่วนการลดขนาด 25.4 %.....	60
8.9 อธิบายถึงการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายที่สัดส่วนการลดขนาด 44 %.....	61
8.10 กราฟแสดงผลการทดลองโดยการจำลองสิ่งเจือปนลงในลวด $Re 8.2\%$	62
8.11 กราฟแสดงผลการทดลองโดยการจำลองสิ่งเจือปนลงในลวด $Re 16.6\%$	62
8.12 กราฟแสดงผลการทดลองโดยการจำลองสิ่งเจือปนลงในลวด $Re 25.4\%$	63
8.13 กราฟแสดงผลการทดลองโดยการจำลองสิ่งเจือปนลงในลวด $Re 34.6\%$	63
8.14 กราฟแสดงผลการทดลองโดยการจำลองสิ่งเจือปนลงในลวด $Re 44\%$	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
8.15 แสดงรูปแบบจำลองการดึงลวดโดยการสร้างแบบจำลอง.....	64
8.16 แสดงลักษณะผิวแบบจำลองที่ถูกดึงผ่านตาย โดยมุมครึ่งตาย 6 องศา.....	65
8.17 แสดงลักษณะผิวแบบจำลองที่ถูกดึงผ่านตาย โดยมุมครึ่งตาย 8 องศา.....	66
8.18 แสดงลักษณะผิวแบบจำลองที่ถูกดึงผ่านตาย โดยมุมครึ่งตาย 10 องศา.....	67
8.19 แสดงถึง Mean Normal Stress ที่เกิดขึ้นในลวดระหว่างการจำลองการดึงลวด.....	68
8.20 อธิบายถึงความเค้นกับความเครียด $Re = 8.2\%$ จำลอง Inclusion ผิวบน.....	69
8.21 อธิบายถึงความเค้นกับความเครียด $Re = 16.6\%$ จำลอง Inclusion ผิวบน.....	69
8.22 อธิบายถึงความเค้นกับความเครียด $Re = 25.4\%$ จำลอง Inclusion ผิวบน.....	70
8.23 อธิบายถึงความเค้นกับความเครียด $Re = 34.6\%$ จำลอง Inclusion ผิวบน.....	70
8.24 อธิบายถึงความเค้นกับความเครียด $Re = 44\%$ จำลอง Inclusion ผิวบน.....	71
8.25 แสดงค่า Mean Normal Stress ที่เกิดขึ้นในบริเวณใดๆ มุมครึ่งตาย 6 องศา $Re = 44\%$..	71
8.26 แสดงค่า Mean Normal Stress ที่เกิดขึ้นในบริเวณใดๆ มุมครึ่งตาย 8 องศา $Re = 44\%$..	72
8.27 แสดงค่า Mean Normal Stress ที่เกิดขึ้นในบริเวณใดๆ มุมครึ่งตาย 10 องศา $Re = 44\%$..	73
8.28 แสดงกราฟ Mean Normal Stress ณ.บริเวณที่มี Inclusion $Re = 8.2\%$	75
8.29 แสดงกราฟ Mean Normal Stress ณ.บริเวณที่มี Inclusion $Re = 16.6\%$	76
8.30 แสดงกราฟ Mean Normal Stress ณ.บริเวณที่มี Inclusion $Re = 25.4\%$	77
8.31 แสดงกราฟ Mean Normal Stress ณ.บริเวณที่มี Inclusion $Re = 34.6\%$	79
8.32 แสดงกราฟ Mean Normal Stress ณ.บริเวณที่มี Inclusion $Re = 44\%$	80

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

α	มุมครึ่งด้าย (องศา)
μ	แรงเสียดทาน
V	ความเร็ว (m/sec)
T	แรงตึง (N)
σ	ความเค้น (N/mm ²)
E	Yong's modulus
ϵ	ความเครียด
g	ความถ่วงจำเพาะ
F	แรง(Kgf)
D_0	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้น (mm.)
D_1	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่เปลี่ยนไป (mm.)
A_0	ขนาดพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น (mm ²)
A_1	ขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนไป (mm ²)
L_0	ขนาดความยาวเริ่มต้น (mm.)
L_1	ขนาดความยาวที่เปลี่ยนไป (mm.)
Cu	ทองแดง
Al	อะลูมิเนียม
η	ประสิทธิภาพ
Re	สัดส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดของลวด

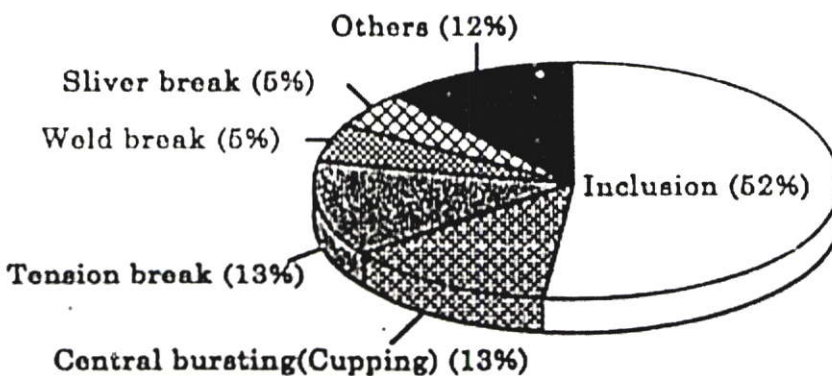
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตของกระบวนการดึงขึ้นรูปโลหะมีความก้าวหน้าไปอย่างมากหากแต่เราก็ยังคงต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตกันต่อไปอย่างต่อเนื่อง การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตดังกล่าวทำกันอยู่ในหลายรูปแบบ และหลากหลายวิธี วิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการพัฒนากระบวนการผลิตการดึงขึ้นรูปโลหะก็คือ ใช้วิธีสร้างรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Math Model) ขึ้นมาศึกษาแก้ปัญหา นอกจากนั้นแล้วการพัฒนางานวิจัยทางด้านการดึงขึ้นรูปโลหะที่จำเป็นที่จะต้องทำอีกวิธีหนึ่ง คือ การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆต่อความเค้นและพฤติกรรมของลวดและตาย (Die) จากการทดลอง (Experiment) ควบคู่กันไปด้วย เพื่อจะได้เปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณ กับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองว่าถูกต้องหรือเป็นไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในทางอุตสาหกรรมการผลิต เพราะหากกำหนดวิธีการผลิตที่ถูกต้องแล้วจะทำให้สามารถประหยัดเวลา ต้นทุนการผลิตลดลง และยังได้งานเพิ่มขึ้นอีกด้วย

งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการและผลการศึกษาผลกระทบของการเกิดสิ่งเจือปนขึ้นในเส้นลวดขณะดึงขึ้นรูปด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์ เพื่อจะได้เป็นแนวทางในการศึกษาถึงผลกระทบของตัวพารามิเตอร์อื่นๆที่สำคัญ รวมทั้งพฤติกรรมของลวดและตายที่เกิดจากการดึงขึ้นรูปโลหะต่อไป ซึ่งจะเป็นแบบอย่างที่ดีในการพัฒนา ออกแบบ หรือคำนวณที่ถูกต้อง และเหมาะสมต่อไป ในภาพที่ 1.1 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของสิ่งเจือปนที่มีผลกระทบต่อการขาดของลวดระหว่างการดึงลวดมากถึง 52% เมื่อเทียบกับการขาดจากสาเหตุอื่น [7]



ภาพที่ 1.1 แสดงสาเหตุการขาดของลวดระหว่างการดึง

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

1. The draw ability of Ni-Ti shape-memory alloy wires เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนรูปร่างจากการดึงลวด วิจัยโดย Kazunari Yashida Tokyo University Japan
2. FEM analysis of wire breaks in drawing of superfine wire with an Inclusion เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการขาดของลวดที่มีสิ่งเจือปนในเส้นลวด โดยจำลองให้สิ่งเจือปนอยู่กับที่คืออยู่ในบริเวณแกนกลางของลวด แต่ให้ขนาดของสิ่งเจือปนเปลี่ยนไป วิจัยโดย Kazunari Yashida Tokyo University Japan
3. Limit Analysis of Flow Through Conical Converging Dies เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับข้อจำกัดของการเปลี่ยนแปลงเส้นการเลื่อนไหลที่บริเวณสัมผัสระหว่างลวด และตาย วิจัยโดย Betzalel Avitzur

1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. เพื่อศึกษาขอบเขตการขึ้นรูปโลหะโดยวิธีการดึงที่สัมพันธ์กันระหว่างลวด และตาย ที่ใช้ในการดึง
2. เพื่อสร้าง และออกแบบชุดทดลองในการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของลวดทองแดงในระหว่างการดึง
3. เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการขาดของลวดในระหว่างการดึงลวด ที่ขาดโดยมีสิ่งเจือปนอยู่ในเส้นลวดทองแดง
4. เพื่อจำลองการขาดของลวดทองแดง โดยจำลองให้มีสิ่งเจือปนเกิดขึ้นในเส้นลวดโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนท์อีลิเมนต์
5. เพื่อวิเคราะห์ และแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากสิ่งเจือปนในลวด โดยสัดส่วนการลดขนาด (Reduction) และมุมตาย(Die Angle)

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้มีขอบเขตของการวิจัย ดังนี้

1. ทำการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของเส้นลวด ในระหว่างการดึงลวดทองแดง ที่เกิดจากสัดส่วนการลดขนาดของลวด และมุมตาย
 - 1.1 ความเค้นของลวดทองแดงหลังจากการดึง
 - 1.2 ระยะเวลาของลวดทองแดงหลังจากการดึง

- 1.3 ลักษณะทางกายภาพของลวดทองแดงหลังจากการดึง เช่น ผิวของลวด การแตกหัก
2. ทำการจำลองให้มีสิ่งเจือปนเกิดขึ้นในเส้นลวดโดยอาศัยโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์อีลิเมนต์ สิ่งเจือปนจะมีตำแหน่งต่างๆกัน ใน 3 ตำแหน่งคือ
 - 2.1 ให้มีสิ่งเจือปนบริเวณตำแหน่งแกนกลางของลวด
 - 2.2 ให้มีสิ่งเจือปนบริเวณตำแหน่งด้านในของลวด
 - 2.3 ให้มีสิ่งเจือปนบริเวณตำแหน่งด้านนอกของลวด(บริเวณผิวด้านนอก)
3. ทำการออกแบบเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของลวดทองแดงในระหว่างการดึง โดยสร้างชิ้นทดสอบที่สามารถจำลองสิ่งเจือปนในลวดได้(บริเวณผิวด้านนอก)
4. วิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลจากการใช้โปรแกรม และผลจากการทดลอง เพื่อเป็นข้อเสนอแนะ และการแก้ปัญหาต่อไป

1.5 สมมุติฐานจากการศึกษา

1. คาดว่าความเสียหายที่เกิดขึ้น จากการมีสิ่งเจือปนในเส้นลวด ณ.บริเวณ หรือตำแหน่งที่ต่างกันจะให้ผลกระทบต่อความเสียหายที่มีต่อเส้นลวดแตกต่างกันด้วย
2. ในการใช้อัตราส่วนการลดขนาดของลวด และมุมของด้ายที่เหมาะสมจะก่อให้เกิดความเสียหายที่น้อยลง
3. การเปรียบเทียบผลจากการทดลอง กับผลจากการใช้โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์จะให้ค่าที่แตกต่างกันไม่มากนัก
4. การใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์อีลิเมนต์จะช่วยให้สามารถทำนายความเสียหายที่จะเกิดขึ้นได้

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาถึงพฤติกรรมการขาดของลวดที่เกิดจากสิ่งเจือปนในลวดโดยวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์ ซึ่งคาดว่าจะมีประโยชน์ดังนี้

1. ในด้านการศึกษา จะเป็นแนวทางที่ดีสำหรับการวิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะที่มีการคงรูปอย่างถาวร(Plasticity) ที่ไม่สามารถทำชิ้นทดสอบขึ้นมาได้ อย่างในกรณีที่มีสิ่งเจือปนอยู่ด้านใน และที่แกนกลางของลวดเป็นต้น
2. ในด้านเศรษฐกิจ จะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย และเวลาที่จะต้องสร้างชุดอุปกรณ์ทดสอบ -

สอบขึ้นมาเป็นจำนวนมาก ๆ

3. จะทำให้เกิดความต่อเนื่องในกระบวนการผลิตหากมีการกำหนดกรรมวิธีการผลิตอย่างถูกต้อง

บทที่ 2

กรรมวิธีการผลิตเบื้องต้น

2.1 พื้นฐานกรรมวิธีการผลิต

การเริ่มต้นกรรมวิธีการผสมสมัยใหม่เกิดขึ้นเมื่อ นาย Eli Whitney ได้ใช้เครื่องปั่นฝ้ายแปรรูปเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ก่อน ค.ศ. 1800 ขณะเดียวกันก็ได้มีการพัฒนาทางด้านนี้เกิดขึ้นทั่วโลก สมัยสงครามกลางเมือง ความรุนแรงทำให้เกิดกำลังกระตุ้นในกรรมวิธีการผลิตของสหรัฐอเมริกา จุดเริ่มต้นของการทดลองและวิเคราะห์ในกรรมวิธีการผลิตได้เกิดขึ้นใหญ่ เมื่อนาย Fred W. Taylor พิมพ์รายงานของเขาเกี่ยวกับศิลปะการตัดโลหะ ซึ่งให้พื้นฐานทางด้านวิทยาศาสตร์หลังจากสมัยของนาย Eli Whitney ต่อมานาย Myron L. Begeman ซึ่งเป็นนักสังเกตและวิจัยได้รายงานการพัฒนาใหม่ ๆ ในกรรมวิธีการผลิตเกี่ยวกับวัสดุในอุตสาหกรรม แต่ก็ยังไม่แพร่หลายในสมัยนั้น

การผลิตเครื่องจักรที่ใช้ในการแปรรูปพลังงาน เช่น กังหันน้ำ เครื่องจักรไอน้ำ มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น ได้แพร่หลายมาใช้แทนการใช้กำลังคน การพัฒนาวัสดุพวกโลหะและอโลหะ ได้นำมาใช้ผลิตชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์โดยเทคโนโลยีที่ยุ่ยากซับซ้อน ในที่สุดได้มีการพัฒนาใช้เครื่องมือที่สามารถควบคุมการทำงานของเครื่องจักรโดยใช้เครื่องมือทางอิเล็กทรอนิกส์และระบบคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในปัจจุบันนี้

2.2 ความหมายของการผลิต

Production หมายถึง กิจกรรมต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่ม ทั้งในรูปของสินค้าเพื่อการอุปโภคบริโภค สินค้ากึ่งสำเร็จรูปหรือในด้านบริการต่าง ๆ ด้วย เช่น การผลิตยารักษาโรค การผลิตอาหารกระป๋อง การฟอกหนัง บริการที่ได้รับจากโรงพยาบาล บริษัทประกันภัย มหาวิทยาลัย และบริษัทเดินรถประจำทาง เป็นต้น

Manufacturing หมายถึง การผลิตสินค้าที่สามารถจับต้องได้ เช่น รถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า อาหารกระป๋อง และอื่น ๆ ผลผลิตที่ได้แบ่งออกเป็น

1. สินค้าเพื่อการอุปโภคบริโภค (Consumer goods) เช่น วิทยุ ทีวี เครื่องเรือน ยารักษาโรคและอื่น ๆ
2. สินค้ากึ่งสำเร็จรูป (Producer goods) คือ สินค้าที่จะต้องนำไปผลิตต่อ เช่น เหล็กแผ่น เหล็กเส้น ยางแผ่น หนังสือตัวที่ฟอกแล้ว และอื่น ๆ

ฉะนั้นในการศึกษาวิชานี้จะใช้คำว่า Production เป็นหลัก เพราะมีความหมายกว้างกว่า ซึ่งรวมถึงการผลิตสินค้าและบริการด้วย

2.3 ความหมายของอุตสาหกรรม

คำว่า อุตสาหกรรม หมายถึง การทำสิ่งของเพื่อให้เป็นสินค้าหรือทำอะไรก็ตาม อันทำให้ผลที่ออกมามีมูลค่าเพิ่มในทางด้านเศรษฐกิจ

อุตสาหกรรมในโลกอาจจำแนกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1. อุตสาหกรรมที่นำหรือสกัดทรัพยากรธรรมชาติมาใช้ เช่น การเพาะปลูก การป่าไม้ การเลี้ยงสัตว์ การประมง การทำเหมืองแร่ เป็นต้น

2. อุตสาหกรรมการผลิต เป็นการนำเอาวัตถุดิบมาปรุงแต่ง ดัดแปลง แปรสภาพด้วยแรงมนุษย์หรือเครื่องจักร ก็ตาม เพื่อเปลี่ยนสภาพมาเป็นเครื่องอุปโภคบริโภค เช่น การผลิตอาหาร การผลิตรองเท้า การผลิตรถยนต์ การผลิตยา เป็นต้น

3. อุตสาหกรรมบริการ เป็นการดำเนินการในลักษณะการให้บริการ เช่น การค้าขาย การขนส่ง การท่องเที่ยว การธนาคารและโรงแรม เป็นต้น

ประเภทของอุตสาหกรรม แบ่งตามขนาดออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. อุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ได้แก่ อุตสาหกรรมถลุงเหล็ก อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ อุตสาหกรรมผลิตเครื่องมือเครื่องจักร และอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล เป็นต้น

2. อุตสาหกรรมขนาดกลาง ได้แก่ อุตสาหกรรมประกอบรถยนต์ อุตสาหกรรมประกอบหรือผลิตเครื่องรับวิทยุโทรทัศน์ อุตสาหกรรมผลิตหรือประกอบเครื่องปรับอากาศ ตู้เย็น เครื่องไฟฟ้า เป็นต้น

3. อุตสาหกรรมขนาดย่อม เป็นอุตสาหกรรมในครอบครัวหรืออุตสาหกรรมหัตถกรรม ได้แก่ อุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา อุตสาหกรรมเครื่องจักรสาน การประดิษฐ์ของชำร่วย การประดิษฐ์ผลิตภัณฑ์เครื่องหนัง เป็นต้น

นอกจากนี้แล้ว อุตสาหกรรมการผลิตยังจำแนกตามจำนวนการผลิตได้ดังนี้คือ

1. การผลิตจำนวนมาก (Mass production) อาจพูดได้ว่าเป็นการผลิตอย่างต่อเนื่องเป็นจำนวนมากในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งผลผลิตเกินกว่า 100,000 ชิ้นต่อปี โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมีคุณภาพ ในกรณีนี้การผลิตจะขึ้นกับการสั่งซื้อโดยเฉพาะ จะต้องมีการเลือกใช้เครื่องจักรที่เหมาะสมกับการผลิตชิ้นงาน ปกติแล้วเครื่องจักรนี้ต้องมีความสามารถทำงานอื่นได้ด้วย ทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำสุด ตัวอย่างง่าย ๆ ของการผลิตแบบนี้ ได้แก่ การผลิตไม้ขีด ขวด หมวก ดินสอ รถยนต์ นอต สลัก แหวนสปริง สายไฟ และลวด เป็นต้น

2. Moderate production เป็นการผลิตปริมาณมาก และบางครั้งก็อาจผลิตอย่างต่อเนื่อง แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความผันแปรมากกว่าการผลิตแบบ Mass production และบ่อยครั้งผลผลิตขึ้นอยู่กับคำสั่งซื้อ เครื่องจักรที่ใช้เป็นแบบอเนกประสงค์ แม้ว่าในโรงงานผลิตจริง ๆ แล้วอาจจะใช้แบบเฉพาะอย่าง ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ผลิต ผลผลิตที่ได้จะน้อยกว่าการผลิตแบบ Mass production จำนวนผลิตจะอยู่ระหว่าง 2,500 ชิ้น ถึง 100,000 ชิ้นต่อปี ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แบบนี้ได้แก่ การพิมพ์หนังสือ เครื่องส่งวิทยุ เข็มทิศเครื่องบิน เป็นต้น

3. Job lot production เป็นการผลิตที่มีความผันแปรมากและจำนวนการผลิตจะถูกจำกัดด้วยจำนวนขายมาก เครื่องจักรที่ผลิตเป็นแบบอเนกประสงค์ สามารถทำได้หลายอย่าง โดยที่ผู้ใช้เครื่องจักรจะต้องมีความชำนาญสูง การผลิตจะขึ้นกับชิ้นส่วนที่มาประกอบ การผลิตแต่ละครั้งอยู่ระหว่าง 10 ถึง 500 ชิ้นต่อรุ่น ปกติแต่ละบริษัทจะผลิตผลิตภัณฑ์สามชนิดหรือมากกว่านี้ ส่วนปริมาณการผลิตขึ้นอยู่กับความต้องการ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แบบนี้ได้แก่ เครื่องบิน ชิ้นส่วนรถยนต์ ลิ้นเปิดปิดน้ำมัน เครื่องวัดไฟฟ้า มือเทียม เป็นต้น

2.4 หลักการทั่วไปของอุตสาหกรรมการผลิต

ทรัพยากรที่จำเป็น 3 ประการ ในอุตสาหกรรมทุกประเภท

- 1) ทรัพยากรธรรมชาติ (Natural Resources) ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรม
- 2) ทรัพยากรมนุษย์ (Human Resources) ซึ่งหมายถึงทั้งความคิดและกำลังกายในการผลิตสิ่งต่าง ๆ
- 3) ทรัพยากรทุน (Capital Resources) ซึ่งหมายถึง เงิน โรงงาน เครื่องจักร กำลังงาน และสิ่งอำนวยความสะดวก และติดต่อต่าง ๆ ที่ใช้ในการแปรรูปทรัพยากรธรรมชาติ

องค์ประกอบของอุตสาหกรรม เรียงลำดับตั้งแต่ต้นมีดังนี้

- 1) การวิจัยและพัฒนา (Research and development) เป็นการวางแผนและออกแบบผลิตภัณฑ์ที่จะทำออกมา รวมทั้งการวิจัยตลาดของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ทดลองทำต้นแบบแล้วทดสอบจนเป็นที่พอใจ จึงจะทำรายละเอียดในการผลิตจริง ๆ ต่อไป
- 2) เครื่องมือในการผลิต (Production tooling) เป็นการวางแผนเครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ที่จำเป็นจะต้องใช้ในการผลิต
- 3) การควบคุมการผลิต (Production control) เป็นการจัดขั้นตอนการผลิต การเคลื่อนที่ของวัตถุ และจุดที่คนและเครื่องจักรจะต้องทำงานในการผลิต
- 4) การควบคุมคุณภาพ (Quality control) เพื่อที่จะรักษามาตรฐานของวัตถุดิบ วัตถุที่อยู่ระหว่างการผลิต และผลิตภัณฑ์สำเร็จแล้ว

5) การจัดการงานบุคคล (Personal management) อุตสาหกรรมจำเป็นต้องมี คนงานที่มีความชำนาญงานในการใช้และควบคุมเครื่องจักร การจัดการงานบุคคลเป็นการจ้าง ฝึกอบรม และตรวจการทำงานของคนงานเหล่านี้

6) การผลิต (Manufacturing) หลังจากการออกแบบ วางแผน และจัดเครื่องมือแล้ว ก็เป็นการผลิต ซึ่งเป็นการแปรรูปวัตถุดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จ

7) การตลาด (Marketing) เป็นการส่งและจำหน่ายผลิตภัณฑ์ ซึ่งรวมทั้งการโฆษณา และการบริการด้วย

2.5 ปัจจัยด้านการผลิต

ปัจจัยด้านการผลิตเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาด้วยในการออกแบบผลิตภัณฑ์ การออกแบบผลิตภัณฑ์อย่างสมบูรณ์ ต้องทำให้สามารถผลิตสิ่งนั้นได้ด้วย ปัญหาด้านการผลิตที่สำคัญมีหลายประการดังนี้

1. การเลือกกระบวนการผลิตที่เหมาะสม ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณการผลิตเครื่องจักร อุปกรณ์และเครื่องมือที่มีอยู่หรือสามารถหาเพิ่มได้ ลำดับการผลิตและการประกอบชิ้นส่วน ความรู้ ความสามารถของพนักงาน ตลอดจนเทคโนโลยี และกรรมวิธีผลิตใหม่ ๆ ตัวอย่างเช่น กรรมวิธี สร้างชิ้นส่วนขึ้นมากอาจจะใช้การหล่อด้วยน้ำทราย การอัดเข้าแบบ การตีเข้าแบบ การปั๊ม หรือการ หล่อด้วยผงโลหะ ในการตัดโลหะอาจจะใช้เครื่องกลึง เครื่องกัด เครื่องไส เครื่องเจาะ เครื่องขัด หรือเครื่องตัด การติดชิ้นส่วนอาจจะใช้ตะปูเกลียว นอต หรือการเชื่อม นอกจากนี้ความก้าวหน้า ทางวิทยาการได้ทำให้เกิดสารเคมีที่ใช้ในการติดต่อชิ้นส่วนต่าง ๆ ได้อย่างแข็งแรง ในด้านบริการก็ เช่นเดียวกัน เราจำเป็นต้องเลือกวิธีบริการลูกค้าที่เหมาะสม เช่น ใช้การขายสินค้าตามบ้านโดย พนักงาน หรือส่งขายตามร้านค้าปลีกและห้างสรรพสินค้า เป็นต้น

2. การใช้วัสดุหรือส่วนประกอบที่ซื้อจากแหล่งอื่น จำเป็นจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติ และคุณภาพที่ต้องการ เช่น เลือกใช้พลาสติกแทนโลหะและจะมีน้ำหนักเบา ไม่ผูกเรือนง่าย และ ราคาถูกกว่า แต่จะไม่แข็งแรงเท่าโลหะ การออกแบบควรจะให้สามารถผลิตโดยสิ้นเปลืองวัสดุน้อย ที่สุด

3. การระบุพิภักต์ความเผื่อ คือ ช่วงที่ยอมให้ขนาดหรือปริมาณมีค่ามากหรือน้อยกว่า มาตรฐานได้ เช่น การให้เส้นผ่าศูนย์กลางของลูกสูบมีขนาด 100 ± 0.1 มม. หมายความว่า ถ้า ลูกสูบมีขนาดระหว่าง 99.9 มม. ถึง 100.1 มม. ก็นับว่าใช้ได้ เพราะสามารถนำไปประกอบใน ผลิตภัณฑ์ได้ การระบุพิภักต์ความเผื่อมีความจำเป็นมาก เพราะความปกติการผลิตของให้ได้ขนาด หรือปริมาณเท่ากันทุกครั้งย่อมเป็นไปไม่ได้ ฉะนั้นจึงควรที่จะยอมให้มีขนาดหรือปริมาณหรือน้อย กว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ได้บ้าง ถ้าเข้มงวดมากในการระบุช่วงขาดเกินก็จะทำให้การผลิตต้อง

พิถีพิถันเป็นพิเศษ และจะมีของเสียมาก แต่ถ้าระบุช่วงขนาดเกินกว้างเกินไปก็จะทำให้ของที่ผลิตมีขนาดแตกต่างกันมากจนนำไปประกอบในผลิตภัณฑ์ไม่ได้ หรือทำให้คุณภาพด้อยลงไป

4. การออกแบบให้ง่ายขึ้น หมายถึง การทำให้รวดเร็วยิ่งขึ้น โดยลดเวลาการใช้เครื่องจักรและแรงงาน การประหยัดเวลา ย่อมทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง และสามารถใช้อุปกรณ์และแรงงานอย่างมีประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้การออกแบบให้ง่ายยังช่วยในด้านการฝึกพนักงานด้วย เพราะงานที่ทำง่ายย่อมฝึกพนักงานให้ทำได้ง่ายและเร็วกว่า

5. การออกแบบโดยให้มีชิ้นส่วนประกอบขนาดมาตรฐาน เป็นนโยบายที่มีความสำคัญมาก เพราะจะช่วยลดชนิดและขนาดของส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ที่จะต้องผลิตเป็นจำนวนมาก ผลดีของการออกแบบตามมาตรฐานได้แก่

5.1 สามารถเปลี่ยนชิ้นส่วนประกอบได้ง่าย และช่วยลดงานในการแยกเก็บชิ้นส่วนต่าง ๆ ตลอดจนบริการลูกค้าได้รวดเร็ว เช่น ยางล้อรถขนาดมาตรฐาน ซึ่งสามารถใช้กับรถหลายยี่ห้อ บางครั้งการสั่งของเพียงแต่บอกขนาด โดยไม่ต้องเห็นของก็เลือกได้ถูก

5.2 ผลิตได้ครั้งละมาก ๆ เพราะต้องการจำนวนมาก ฉะนั้น จึงใช้เครื่องจักรและแรงงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่ต้องหยุดหรือเปลี่ยนงานบ่อย ๆ ถ้าชิ้นส่วนบางชิ้นไม่มากพอที่จะคุ้มกับการผลิตเองก็อาจจะซื้อจากแหล่งอื่น ซึ่งมีขนาดมาตรฐานอยู่แล้วมาใช้ได้ทันที

5.3 สะดวกในการวางแผนและควบคุมงานผลิต เพราะการผลิตของจำนวนมากแต่ไม่มากนัก การควบคุมคุณภาพและปริมาณของเสียจะสามารถทำได้อย่างเต็มที่

5.4 ช่วยในด้านฝึกพนักงาน เพราะไม่เปลี่ยนงานบ่อย ๆ พนักงานสามารถเพิ่มความชำนาญและช่วยให้ผลิตได้เร็วขึ้น

5.5 ช่วยลดงานธุรการเกี่ยวกับทำบัญชีพัสดุ การบันทึก และเอกสารต่าง ๆ เกี่ยวกับผลิตภัณฑ์

5.6 ช่วยในการรักษาระดับคุณภาพตามมาตรฐานสากล ซึ่งช่วยเพิ่มการส่งสินค้า เนื่องจากมีการมีมาตรฐานผลิตภัณฑ์จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิตและควบคุมคุณภาพตลอดจนความปลอดภัยในการใช้ผลิตภัณฑ์ หลายประเทศจึงได้กำหนดมาตรฐานขึ้นมา

บทที่ 3

พฤติกรรม และคุณสมบัติของวัสดุ

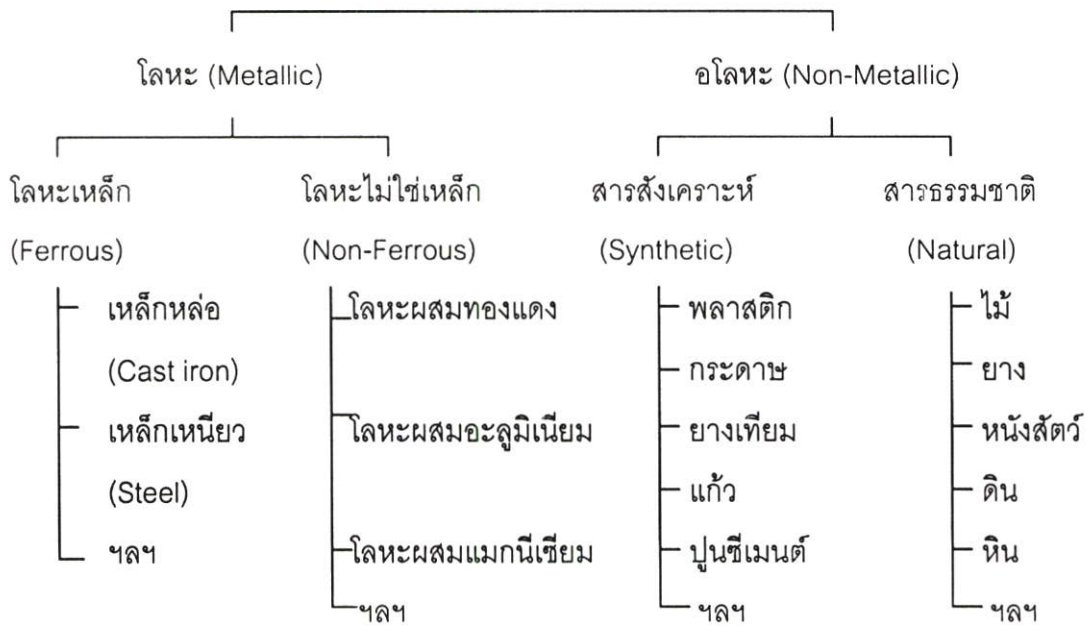
การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุหรือมาตรฐานของวัสดุนี้ มีวัตถุประสงค์ต้องการทำให้เป็นมาตรฐาน ซึ่งจะช่วยลดราคาต้นทุนการผลิต การปรับเปลี่ยนชิ้นส่วนก็ทำได้ง่ายและสะดวก ตลอดจนการเก็บวัสดุหรือชิ้นส่วน ทำได้สะดวกมีระเบียบเรียบร้อย

3.1 การจำแนกวัสดุ

โดยทั่วไปสามารถจำแนกวัสดุออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ

1. โลหะ (Metallic)
2. อโลหะ (Non-Metallic)

วัสดุ (Materials)



ภาพที่ 3.1 แสดงการจำแนกวัสดุ

โลหะ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ พวกโลหะเหล็ก (Ferrous Metal) และพวกโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Non Ferrous Metal)

โลหะเหล็ก มีหลายชนิด ตามปกติจะหล่อเป็นแท่ง (Ingot) หรือรูปร่างอื่น ๆ ตามความต้องการคุณสมบัติของโลหะเหล็กแต่ละชนิด จะมีคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน เนื่องจาก

ปริมาณส่วนผสมของคาร์บอนที่มีอยู่ในเนื้อโลหะมากน้อยต่างกัน ได้แก่ เหล็กอ่อน เหล็กกล้า เหล็กหล่อ เป็นต้น

สำหรับเหล็กหล่อยังแยกประเภทออกได้อีก เช่น เหล็กหล่อสีเทา เหล็กหล่อสีขาว และเหล็กหล่อเหนียว นอกจากนี้ยังมีพวกเหล็กหล่อผสมที่ใช้กันอย่างกว้างขวางกว่าเหล็กหล่อ คือ เหล็กกล้าหรือเหล็กเหนียว เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าผสม และเหล็กไร้สนิม เป็นต้น สามารถผลิตออกมาเป็นรูปร่าง และขนาดต่าง ๆ ได้โดยการหล่อรีดหรือตีขึ้นรูปได้

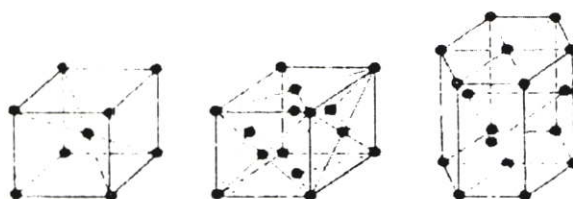
โลหะไม่ใช่เหล็ก ได้แก่ โลหะหรือโลหะผสมที่ไม่ใช่เหล็กเกี่ยวข้องกับอยู่ด้วย เช่น โลหะผสมทองแดง ได้แก่ ทองเหลือง และบรอนซ์ นอกจากนี้ก็ยังมีอีกมากมายหลายชนิด เช่น โลหะผสมอะลูมิเนียม และโลหะผสมแมกนีเซียม เป็นต้น

อโลหะ จำแนกออกได้ 2 พวกใหญ่ ๆ คือ สารสังเคราะห์ และสารธรรมชาติ ซึ่งมีอยู่มากมายในวงการอุตสาหกรรมทั่ว ๆ ไป สารสังเคราะห์ที่เราใช้อยู่ในชีวิตประจำวันที่ได้ชัดและเป็นที่รู้จัก เช่น พลาสติก ไบเทียม ยางเทียม และซีเมนต์ เป็นต้น ส่วนสารธรรมชาติ เช่น ไม้ ยางธรรมชาติ หนังสัตว์ หิน และดิน เป็นต้น

ข้อแตกต่างประการหนึ่งของโลหะกับอโลหะ คือ โลหะทุกชนิดจะมีการเรียงตัวของอะตอมเป็นไปอย่างมีระเบียบและเชื่อมโยงต่อเนื่องกันไป โลหะทุกอย่างไม่ว่าจะเป็นโลหะบริสุทธิ์หรือโลหะผสมจะมีโครงสร้างภายในเป็นผลึก (Crystal) ซึ่งเรามักจะเรียกว่า Crystal structure ที่เราพบมากที่สุดภายในโลหะมี 3 ประเภท คือ ตามภาพที่ 3.2 ประกอบ

1. Body Centered Cubic (B C C) ได้แก่ เหล็กโครเมียม โมลิบดีนัม วาเนเดียม และทังสเตน เป็นต้น
2. Face Centered Cubic (F C C) ได้แก่ ทองแดง อะลูมิเนียม นิกเกิล ตะกั่ว เงิน ทอง และทองคำขาว เป็นต้น
3. Hexagonal Close Packed (H C P) ได้แก่ เบอริลเลียม แคดเมียม โคบอลต์ ไทเทเนียม สังกะสี และแมงกานีส เป็นต้น

สำหรับอโลหะ การเรียงตัวของอะตอมจะขาดความเป็นระเบียบ ถึงแม้จะมีความเป็นระเบียบอยู่บ้างก็เป็นเฉพาะช่วงสั้น ๆ ซึ่งเราเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า Amorphous Structures เช่น แก้ว ยางบางชนิด และพลาสติก เป็นต้น



ภาพที่ 3.2 ภาพแสดงโครงสร้างการเรียงตัวของอะตอมวัสดุโลหะ

3.2 คุณสมบัติของวัสดุ

การศึกษาเรื่องนี้มีความจำเป็นที่จะต้องรู้และเข้าใจถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ ความรู้ที่จะกล่าวถึงนี้ สามารถนำไปพิจารณาเกี่ยวกับการเลือกใช้ชนิดและขนาดของวัสดุได้ถูกต้องเหมาะสม นอกจากนี้ยังทำให้เกิดความเชื่อมั่นว่า วัสดุที่เราเลือกใช้นั้นสามารถรับแรงภายนอกที่มากระทำในขณะที่ใช้งานได้อย่างปลอดภัย ไม่เกิดการชำรุดเสียหาย และยังสามารถนำวัสดุไปใช้อย่างประหยัดอีกด้วย

3.2.1 คุณสมบัติของวัสดุที่สำคัญ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

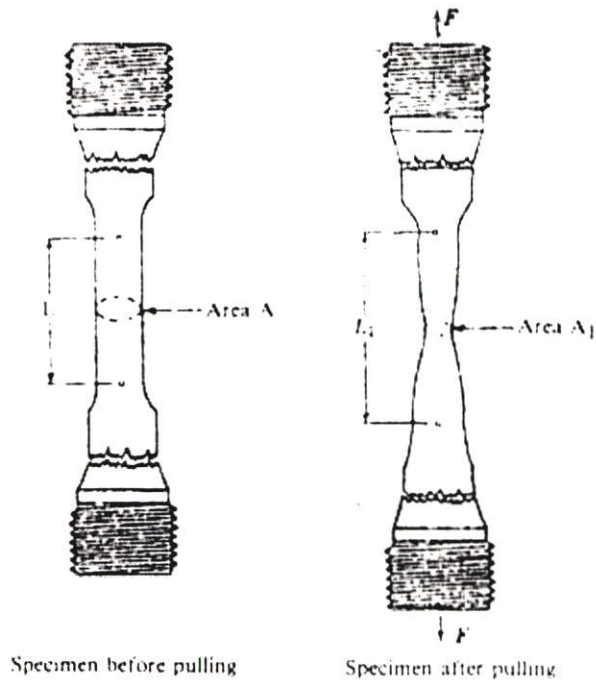
1. คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ซึ่งบ่งบอกถึงชนิด ขนาดของวัสดุ เช่น สี ความหนาแน่น ความตึงจำเพาะ สัมประสิทธิ์การขยายตัว การนำความร้อน สื่อไฟฟ้า และความแข็งแรง เป็นต้น
2. คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties) เป็นคุณสมบัติที่ทำให้ปฏิกิริยาเคมีของวัสดุแต่ละชนิด เช่น ลักษณะการเกิดสนิม การสึกกร่อน การชุบและการเคลือบผิวโลหะ เป็นต้น
3. คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) เป็นคุณสมบัติของวัสดุเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ ข้อมูลที่บ่งถึงคุณสมบัติเหล่านี้จะได้มาจากการทดสอบด้วยวิธีการต่าง ๆ ภายใต้การควบคุมสภาพแวดล้อม คุณสมบัติของวัสดุที่จะกล่าวถึงในที่นี้ ได้แก่ ความเค้นแรงดึง ความเค้นแรงอัด ความเค้นแรงเฉือน ความแข็ง ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด เป็นต้น

ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องจักร โครงสร้างและผลิตภัณฑ์ทำด้วยวัสดุหลายชนิด และมีขนาดต่าง ๆ กัน อันนี้ขึ้นอยู่กับงานที่นำไปใช้ ส่วนประกอบต่าง ๆ เหล่านี้ โดยทั่วไปมักจะต้องรับแรงภายนอกมากระทำ ทำให้เกิดแรงต้านทานภายใน (Internal forces) และการเปลี่ยนรูป (Deformation) ขึ้น ในเนื้อวัสดุ-แรงต้านภายในที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ความเค้น (Stress) คุณสมบัติภายนอกวัสดุเมื่ออยู่ใต้ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) เรียกว่า คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ของวัสดุนั้น

3.2.2 ความเครียด (Strain)

เป็นตัวบ่งถึงลักษณะและปริมาณการเปลี่ยนรูป (Deformation) ของวัสดุไปจากเดิม เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ มีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภท คือ

1. Linear strain เป็นสัดส่วนของความยาวของวัสดุที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม ความยาวต่อไปนี้ อาจยืดออกหรือหดลงขึ้นอยู่กับแรงภายนอกที่มากระทำว่าเป็นแรงดึงหรือแรงอัด
- ดูภาพที่ 3.3 ประกอบ



ภาพที่ 3.3 ภาพแสดงการทดสอบแรงดึง

2. Shear Strain การที่แรงภายนอกมากจะทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปไปนั้นไม่เพียงแต่ทำให้ความยาวเชิงเส้นเปลี่ยนไปเท่านั้น แต่มันอาจทำให้มุมระหว่างด้าน ซึ่งเป็นเส้นตรง 2 ด้านใด ๆ ของแท่งวัสดุเปลี่ยนไปได้อีกด้วย กรณีเช่นนี้เกิดจากแรงภายนอกเป็นแรงเฉือนมุมระหว่างด้าน 2 ด้านของวัตถุที่เปลี่ยนไปจากมุมฉากนี้ เราเรียกว่า Shear strain ดูภาพที่ 3.4 ประกอบ

3.2.3 พฤติกรรมคืนรูปและคงรูป (Elastic and Plastic Behavior) ของวัสดุ

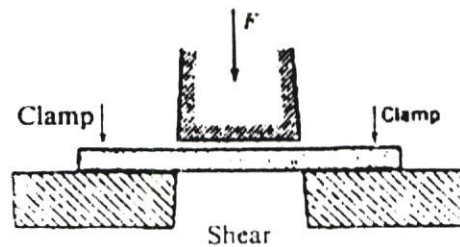
เมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำวัสดุของแข็งทุกชนิดแล้ว ทำให้วัสดุนั้นเปลี่ยนรูปไปจากเดิม จากการทดลองพบว่า เมื่อแรงภายนอกมากกระทำมีค่าอยู่ในช่วงจำกัดที่แน่นอนช่วงหนึ่ง วัสดุนั้นจะสามารถกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิมก่อนเปลี่ยนรูป เมื่อปล่อยแรงที่มากระทำออกเสีย ปรากฏการณ์ที่วัสดุซึ่งเปลี่ยนรูปไป สามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมและขนาดเดิม เมื่อปล่อยแรงที่มากระทำออกนี้เรียกว่า พฤติกรรมการคืนรูป (Elastic behavior) ของวัสดุ พิกัดสูงสุดของแรงซึ่งวัสดุยังคงแสดงสมบัติการคืนรูปอยู่นี้เรียกว่า พิกัดการคืนรูป (Plastic limit) ถ้าแรงภายนอกที่มากระทำมีค่าเกินพิกัดการคืนรูป วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (permanent set of deformation) ขึ้น เมื่อปล่อยแรงวัตถุซึ่งถูกเปลี่ยนรูปถาวรนั้นกล่าวได้ว่า อยู่ภายใต้การเปลี่ยนรูปแบบคงรูป (plastic deformation)

3.2.4 ความเค้น (Stress)

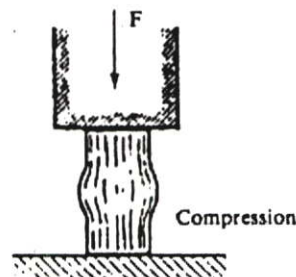
เมื่อวัตถุถูกแรงภายนอกกระทำ จะเกิดแรงต้านทานขึ้นภายในเนื้อวัตถุในปริมาณที่เท่ากับแรงภายนอกที่กระทำเพื่อให้สมดุลกัน แรงต้านทานภายในเนื้อวัตถุที่มีต่อแรงภายนอกที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่นี้เรียกว่า ความเค้น

โดยทั่วไป ความเค้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่กระทำ คือ

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile stress) คือ ความเค้นที่กระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางในทิศทางที่พยายามดึงให้เนื้อวัสดุแยกขาดจากกัน
2. ความเค้นแรงอัด (Compressive stress) คือ ความเค้นที่กระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางในทิศทางที่พยายามบีบอัดให้วัสดุมีขนาดเล็กลง ดูภาพที่ 3.5 ประกอบ



ภาพที่ 3.4 ภาพแสดงการตัดเฉือน

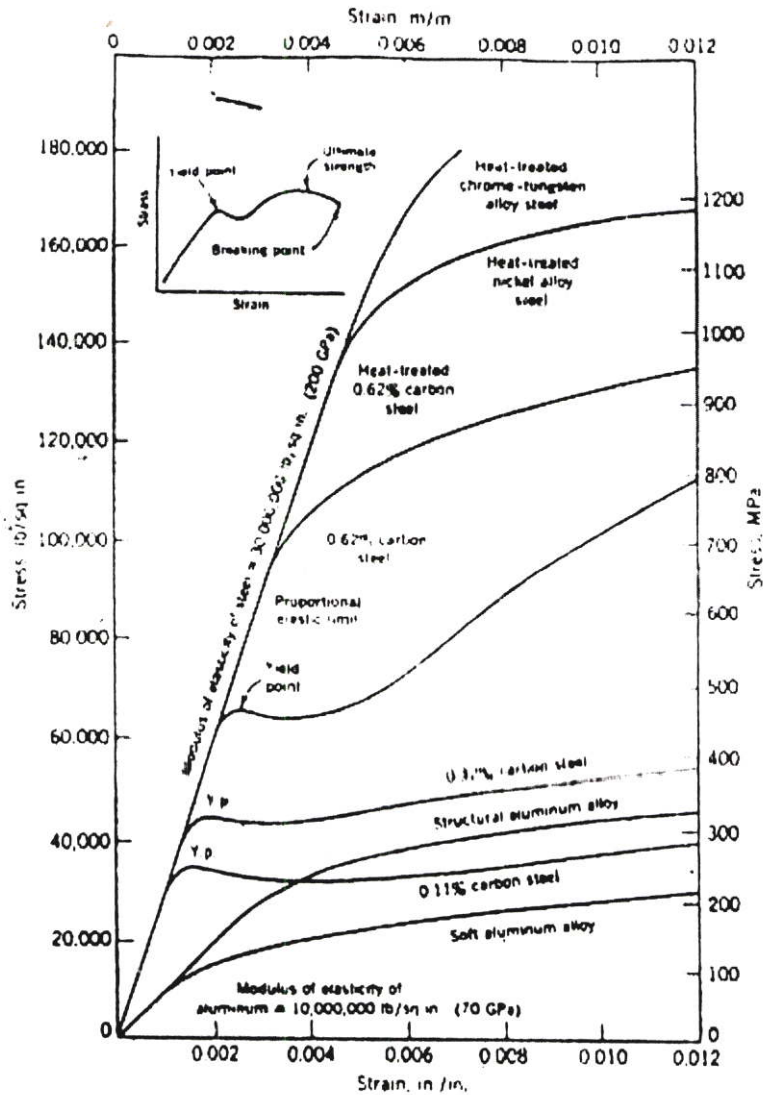


ภาพที่ 3.5 ภาพแสดงการอัดวัสดุขึ้นงาน

3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear stress) คือ ความเค้นที่กระทำในทิศทางที่ขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวางเพื่อให้เนื้อวัสดุเคลื่อนผ่าน

ถึงแม้ว่าโลหะส่วนมาก เมื่อถูกแรงกระทำในช่วงพิกัดการคืนรูปแล้ว จะทำให้ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดเป็นเชิงเส้นตรง แต่อย่างไรก็ตาม ไม่จำเป็นที่วัสดุทุก

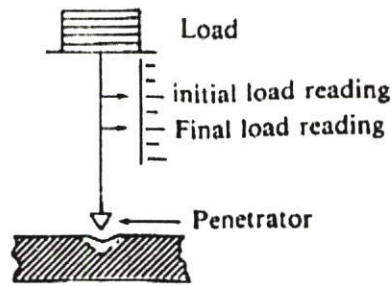
ชนิด ซึ่งแสดงสมบัติการคืบรูปจะมีความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดเป็นเชิงเส้นตรง เช่น ยางซึ่งมีความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดไม่เป็นเส้นตรง แต่ก็ยังจัดเป็นวัสดุประเภทคืบรูปประเภทหนึ่ง ดูภาพที่ 3.6 ประกอบ



ภาพที่ 3.6 ภาพแสดงความเค้นและความเครียดของวัสดุ

3.2.5 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งเป็นความต้านทานต่อการเจาะทะลุ (Penetration) หรือการเสียดสี หากเราเข้าใจจะช่วยให้ได้ทราบความแข็งแรงของผิวโลหะหรือวัสดุที่จะนำไปใช้งานได้อย่างแม่นยำ ถูกต้อง และรวดเร็ว ดูภาพที่ 3.7 ประกอบ



ภาพที่ 3.7 ภาพแสดงการทดสอบความแข็ง

3.3 ลักษณะที่สำคัญ ๆ ของวัสดุ

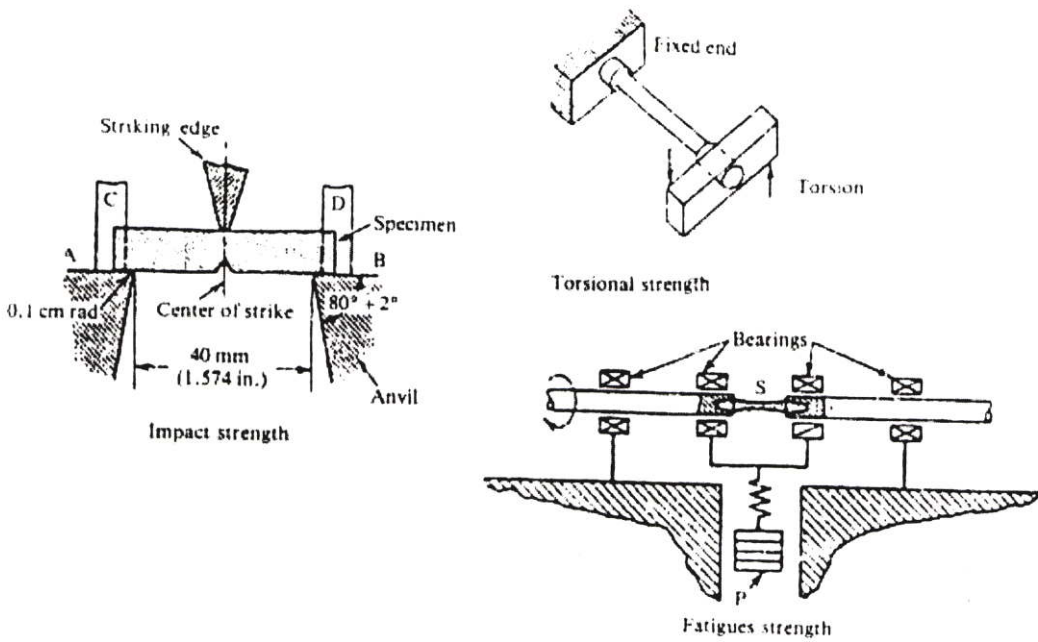
ลักษณะที่สำคัญ ๆ ของวัสดุมีอยู่หลายประเด็น กล่าวคือ

1. ผิว ผิวของวัสดุต่างชนิดกันไม่เหมือนกัน เช่น เหล็กกล้ามีผิวเรียบสีเทากระเดียดไปทางน้ำเงิน เมื่อเคาะดูมีเสียงแหลมกังวาน เมื่อทดลองหักดูแล้วจะเห็นเม็ดเกรนละเอียดอยู่แน่น สีเทาขาวทึบ ๆ สำหรับเหล็กหล่อผิวจะหยาบ ขรุขระ สีเทาหรือเทาดำ เมื่อเคาะดูเสียงดังแป๊ก ๆ เมื่อทดลองหักดูจะเห็นเม็ดเกรนโตสีเทา

2. ลักษณะใช้งาน ชิ้นงานทุกชิ้นสร้างจากวัสดุในลักษณะต่าง ๆ กัน โดยอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุนั้น ๆ เป็นเกณฑ์กล่าวคือ

2.1 ความหนาแน่น คิดจากน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัสดุ วัสดุต่างชนิดกันจะไม่มี ความหนาแน่นเท่ากัน เช่น อะลูมิเนียมหนักเบา ความหนาแน่นเท่ากับ 2.7 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แต่ของตะกั่ว 11.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งหนักกว่าอะลูมิเนียมประมาณ 4 เท่า

2.2 ความแข็งแรง วัสดุต่าง ๆ ขณะใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานจะต้องได้รับความเค้นในลักษณะต่าง ๆ กัน สลักเกลียวและนอตเมื่อขันแน่น จะปรากฏว่ามีความเค้นดึงอยู่ในลำตัว ฆ้อนเมื่อตีลงบนผิวงานในเนื้อฆ้อนจะปรากฏเป็นความเค้นแรงอัด หมุดย้ำที่ย้ำแผ่นโลหะอยู่จะต้องได้รับความเค้นแรงเฉือน วัสดุของสลักเกลียวก็ดี ของหัวฆ้อนหรือของหมุดย้ำก็ดี จะสามารถทนรับความเค้นต่าง ๆ ได้ ค่าสูงสุดเพียงค่าหนึ่งเท่านั้น เมื่อเลยค่าสูงสุดนั้นไป วัสดุจะชำรุด หัก หรือขาด ไม่สามารถใช้งานต่อไปได้ วัสดุต่าง ๆ กันก็จะรับค่าความเค้นต่าง ๆ เหล่านี้ไม่เท่ากัน ฉะนั้นจะต้องรู้จักเลือกใช้วัสดุและขนาดของวัสดุนั้น ๆ ให้ถูกต้อง ดูภาพที่ 3.8 ประกอบ



ภาพที่ 3.8 ภาพแสดงการทดลองกับความแข็งแรงของวัสดุ

2.3 ความแข็งของผิว คุณสมบัติที่สำคัญอีกอันหนึ่งของผิววัสดุคือ ความแข็ง ผิวที่แข็งมากจะสึกหรอยาก ความแข็งกล่าวได้ว่าเป็นความสามารถในการต้านทานการถูกแทงทะลุ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลมีมากมายหลายชิ้น ที่จะต้องทำให้ผิวแข็ง เช่น ผิวของเพลาช้อเหวี่ยงในเครื่องยนต์ เป็นต้น ความแข็งของผิววัสดุรู้ได้ด้วยเครื่องมือวัด ซึ่งมีอยู่ 3 ระบบด้วยกัน คือ วิธีบรินเนล (Brinell hardness) วิธีร็อคเวล (Rockwell hardness) และวิธีวิกเกอร์ (Vicker hardness)

2.4 ความเปราะ ความเปราะเป็นคุณสมบัติที่ไม่พึงประสงค์ในการนำวัสดุไปใช้งานเพราะทันทีที่มีแรงทุบหรือกระแทกแรง ๆ วัสดุที่เปราะจะแตกออกเป็นเสี่ยง ๆ ทันที วัสดุที่มีแต่ความเปราะอย่างเดียวเราไม่ใช้ เว้นแต่วัสดุนั้นจะมีคุณสมบัติเด่นพิเศษในทางอื่น เช่น เหล็กหล่อเปราะแต่ที่เรายังนิยมใช้เพราะหลอมหล่อเทแบบขึ้นรูปได้ง่าย

2.5 ความสามารถในการอัดขึ้นรูป คุณสมบัติข้อนี้เป็นลักษณะพิเศษของวัสดุ ซึ่งเป็นลักษณะที่ดี และสะดวกต่อการทำงาน เราสามารถดัดรีดหรือโค้งขึ้นรูปได้โดยวัสดุนั้นไม่หัก เช่น ทองแดง เป็นต้น

2.6 ความแข็งแรงและความหยุ่นตัว วัสดุที่แกร่งคือ ทนต่อความเครียดในลำดับได้สูง เช่น เหล็ก เมื่อถูกดึงยืดตัวออกแม้ภายในเนื้อเหล็กจะเกิดความเครียดขึ้นก็ตาม แต่เหล็กก็ยังคงตัวอยู่ได้หากแรงดึงนั้นยังอยู่ในพิสัยความแข็งแรงของเหล็ก

การนำวัสดุไปใช้กับงานใด ๆ นั้น ในปัจจุบันนี้มีวัสดุให้เลือกใช้ มากมายหลายชนิด ฉะนั้น ในการเลือกใช้ควรจะพิจารณาศึกษารายละเอียดในธรรมชาติและคุณสมบัติของวัสดุให้เกิดความ เชื่อมั่นในการใช้ ถึงแม้ว่าจะเสียเวลาและค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นก็ตาม แต่หากเราเลือกใช้วัสดุได้ เหมาะสมกับการผลิตผลิตภัณฑ์นั้น ๆ แล้ว จะมีผลคุ้มค่าทางเศรษฐกิจและช่วยประหยัดวัสดุอีก ด้วย

บทที่ 4 การขึ้นรูปโลหะ

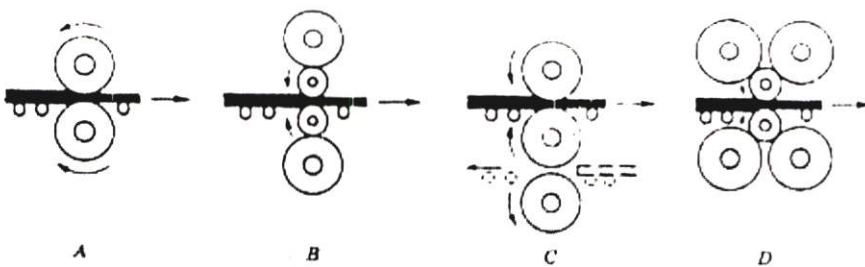
ในการขึ้นรูปโลหะจะกระทำได้ 2 แบบ คือ

1. การแปรรูปหรือขึ้นรูปร้อน
2. การแปรรูปหรือขึ้นรูปเย็น

4.1 การขึ้นรูปโลหะร้อน

การขึ้นรูปตามกรรมวิธีนี้ไม่ได้หมายถึงการกลึง กัด ใส เจาะ หรือเจียรระโน การแปรรูปหรือขึ้นรูปขณะร้อนนั้น โลหะจะต้องอยู่ในสภาวะที่ร้อนพอที่จะนำไปขึ้นรูปได้ ซึ่งโลหะเมื่อให้ความร้อนแดงจะมีลักษณะอ่อนนุ่มง่ายต่อการขึ้นรูป กล่าวคือ ใช้พลังงานน้อย แต่การขึ้นรูปร้อนมีข้อเสียตรงที่ว่าขนาดของโลหะภายหลังขึ้นรูปจะควบคุมให้ได้ใกล้เคียงที่ต้องการยาก เพราะมีการหดตัวเมื่อโลหะเย็นลง การขึ้นรูปจะผ่านการกระทำเป็นหลายขั้นตอน จึงจะออกมาเป็นชิ้นงานสำเร็จ โดยที่งานยังร้อนตลอดเวลาที่ขึ้นรูป การขึ้นรูปในสภาวะโลหะร้อนกระทำได้หลายวิธีด้วยกัน คือ

4.1.1 การรีดขึ้นรูป (Rolling) มีวิธีการโดยย่อคือ นำเหล็กที่ทำเป็นแท่งเข้าไปไว้ในเตาอบ ทำให้เหล็กนั้นร้อนโดยใช้แก๊สเป่าเข้าไป จะทำให้ลมร้อนหมุนเวียนอยู่ในเตาไปสู่เครื่องรีด เครื่องรีดจะทำการรีดเป็นรูปร่างเล็กลงตามแบบของลูกรีดเป็นตอน ๆ ไป เหลาที่ขับพาลูกกลิ้งที่หมุนไปมาได้ เพียงจะประกอบเข้าด้วยกัน และหมุนขับด้วยกำลังมอเตอร์ไฟฟ้า ดูภาพที่ 4.1 ประกอบ



ภาพที่ 4.1 แสดงการรีดขึ้นรูปด้วยลูกกลิ้ง

เครื่องรีดสร้างบนเพลานาน โดยทำเป็นร่องแบบต่าง ๆ ไว้ในเพลาดียวกัน การทำงานของลูกกลิ้งจะหมุนแล้วป้อนแท่งเหล็กเข้าไป เหล็กก็จะถูกรีดให้เล็กลง โดยผ่านการรีดหลาย ๆ ครั้ง ตามร่องที่

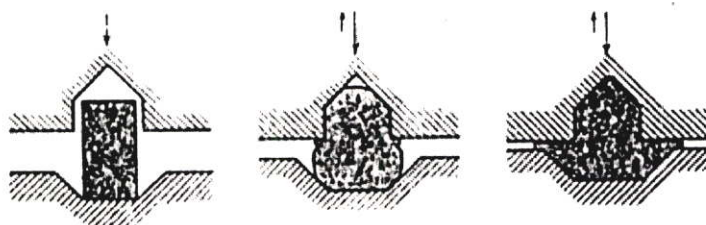
ปรากฏอยู่บนเพลาจันได้ขนาดตามต้องการ แท่งเหล็กที่นำมารีดจะมีอุณหภูมิประมาณ 2,200 องศาฟาเรนไฮต์ นำแท่งเหล็กนี้เข้าเครื่องรีด

4.1.2 การตีขึ้นรูป (Forging)

งานตีขึ้นรูปเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างให้โลหะตีขึ้น เพื่อเกิดความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน เช่น ทำให้เนื้อวัสดุละเอียดขึ้น รูพรุนต่าง ๆ ที่มีอยู่ในเนื้อเหล็กเล็กน้อย และสามารถทำให้บางส่วนของโลหะหนาขึ้นได้ โดยวิธีตีขึ้นรูป ตามปกติก่อนที่จะนำเหล็กไปตีขึ้นรูป ต้องทำการให้ความร้อนแก่เหล็กเสียก่อนอย่างช้า ๆ หรือจะอบไว้ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ก็ได้ จากนั้นจึงค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิตีเหล็ก การตีขึ้นรูปสามารถแบ่งออกได้หลายชนิดดังนี้

1. Hammer or smith forging เป็นการตีขึ้นรูปโดยการให้ความร้อนแก่เหล็ก แล้วนำมาตีขึ้นรูปบนทั่งด้วยฆ้อน อาจจะใช้แรงตีด้วยมือ หรือแรงเครื่องจักรก็ได้

2. Drop forging คือ การตีขึ้นรูปโดยการตีแบบต้องการขนาด รูปร่างที่ยุ่งยาก เช่น Connecting Rod, Spanner ซึ่งจะต้องใช้เครื่องจักรที่มีกำลังสูงมาก ๆ โดยใช้แม่แบบติดกับแท่งอีกส่วนหนึ่งจะติดกับฆ้อน แม่แบบนี้จะมีหลายชั้น เช่น ตีขึ้นเตรียม และตีขึ้นสำเร็จ ขั้นตอนการทำงานดูได้จากภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 แสดงขั้นตอนการตีอัดขึ้นรูป

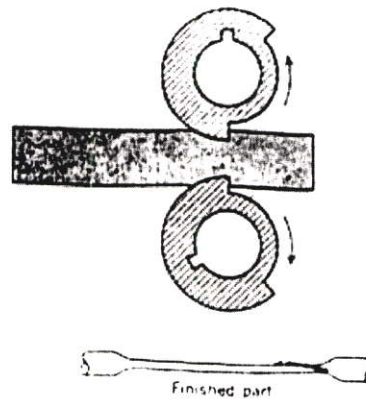
3. Upset forging เป็นกรรมวิธีผลิตงานที่มีรูปร่างเป็นบ่าหรือขอบ โดยการเตรียมชิ้นงานนั้นมาก่อนให้มีขนาดใกล้เคียงกับแบบการขึ้นรูป สามารถทำได้โดยใช้แม่แบบเข้าช่วย โดยทำเป็นขั้นตอนแบบอัตโนมัติ

4. การตีอัดขึ้นรูป (Press forging) การตีอัดขึ้นรูปโดยใช้แรงกระแทกลงบนชิ้นงาน โดยมีแม่แบบอยู่ด้วย การตีอัดจะทำต่อเนื่องลงไปบนชิ้นงานครั้งเดียวเสร็จ โดยอัดแต่แรงน้อย ๆ อัดลงไปแบบและเพิ่มแรงมากขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงขั้นสุดท้าย งานที่ได้จะมีรูปร่างทางขนานเหมือนกัน และยังมีผิวเรียบ

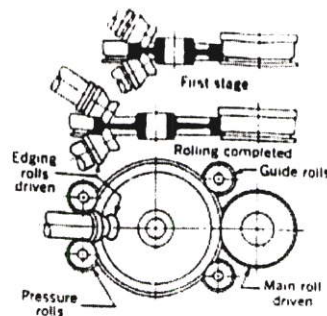
5. การตีหมุนขึ้นรูป (Roll forging) เป็นการรีดแบบใช้ลูกกลิ้งไปบนชิ้นงาน โดยนำ

ชิ้นงานที่อบให้ร้อนได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้วป้อนเข้าไปในเครื่อง ลูกกลิ้งจะหมุนชิ้นงานไปมาจนได้ขนาดตามต้องการ

การตีหมุนขึ้นรูปนี้ ใช้สำหรับผลิตงานที่มีขนาดกว้างต่าง ๆ กัน เช่น ใบพัดเครื่องบิน ใบมีดสกัดขอบสปริงหรือท่อเรียว เป็นต้น ผิวนที่ผ่านการรีดแบบนี้จะคงสภาพอยู่ได้ดีไม่บิดเบี้ยวง่าย เครื่องที่สร้างเป็นลูกกลิ้งนี้จะมีราคาแพง Roll Forging ที่ใช้การรีดแบบวงล้อ เช่น รางรถไฟ ล้อรถราง เป็นต้น ดูภาพที่ 4.3 แสดงหลักการตีหมุนขึ้นรูป และภาพที่ 4.4 ประกอบ



ภาพที่ 4.3 แสดงหลักการของการตีหมุนขึ้นรูปด้วยลูกกลิ้ง



ภาพที่ 4.4 แสดงการตีหมุนขึ้นรูปโดยลูกกลิ้ง

4.1.3 การอัด (Extrusion)

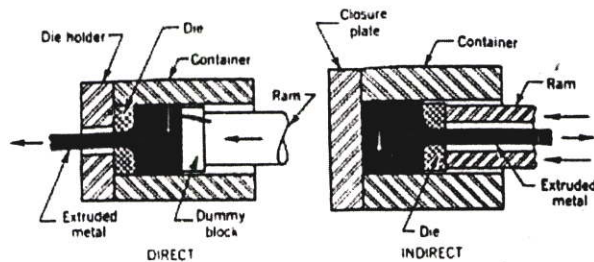
เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะในสภาวะร้อนอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งใช้แรงอัดลงบนชิ้นงานออกมาเป็นรูปขนาน อาจจะเป็นแท่งตันหรือกลวงก็ได้ กรรมวิธีนี้จะกระทำได้โดยนำชิ้นงานเข้าไปในแบบ

แล้วมีตัวบีบอัดเข้าไปด้วยแรงอัดสูง ๆ จากแรงอัดนี้จะทำให้ชิ้นงานอาจติดอยู่กับแม่แบบ หรือติดออกมากับแกนบีบก็ได้

กรรมวิธีในการอัดรีด (Extrusion) แบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

1. การอัดรีดโดยตรง (Direct extrusion) กรรมวิธีแบบนี้ประกอบไปด้วยตัวอัดและแบบพิมพ์ การทำงานก็นำชิ้นงานที่เตรียมมาเป็นทรงกลมมาเผาให้ร้อน แล้วนำไปเข้าเบ้าของแม่แบบ จากนั้นก็จะทำการอัดด้วยแรงอัดให้ชิ้นงานวิ่งออกไปข้างหน้า อาจจะเป็นรูปชิ้นงานตันหรือกลวงก็ได้ตามต้องการ ดูภาพที่ 4.5 ประกอบ

2. การอัดรีดสวนทาง (Indirect extrusion) กรรมวิธีนี้ตัวอัดบนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าขนาดของตัวอัดล่าง เมื่อตัวอัดบนอัดกระแทกเข้าไปบนชิ้นงาน จะทำให้ชิ้นงานวิ่งสวนขึ้นมาตามแม่แบบ ทำให้ได้ชิ้นงานออกมาเป็นท่อเปิดหรือกลวง



ภาพที่ 4.5 แสดงภาพหน้าตัดให้เห็นลักษณะการอัดรีดแบบ direct และ indirect

3. การอัดรีดแบบกระแทก (Impact extrusion) เป็นกรรมวิธีทำงานแบบใช้แรงอัดลงบนชิ้นงาน แล้วทำให้ชิ้นงานวิ่งสวนกลับมา อีกส่วนหนึ่งก็จะวิ่งไปตามแนวแรงอัด หรืออาจจะเป็นสวนทางเป็นแนวแกนในของตัวอัดบนก็ได้ สุดแต่ชนิดของงาน กรรมวิธีนี้จะทำให้ได้ชิ้นงานออกมาเป็นท่อหรือแท่งก็ได้

4.1.4 ท่อและกรรมวิธีการผลิตท่อ (Pipe and Tube manufacture)

ท่อที่ใช้สำหรับงานต่าง ๆ กัน เช่น ใช้ส่งน้ำ น้ำมัน พวกรอกของเหลว หรือก๊าซต่าง ๆ นั้น ย่อมแตกต่างกันไปตามความเหมาะสม ท่ออาจทำด้วยเหล็ก อะลูมิเนียม ทองแดง พลาสติก ก็ได้ ส่วนกรรมวิธีในการผลิตท่อ ย่อมมีหลายวิธีแตกต่างกันไป ในที่นี้จะจำแนกกรรมวิธีออกดังนี้

1. การเชื่อมต่อน (Butt welding)
2. การเชื่อมท่อด้วยไฟฟ้า (Electric butt welding)
3. การเชื่อมท่อเกย (Lap welding)
4. การผลิตท่อที่ไม่มีตะเข็บ (Piercing)

5. การอัดรีดท่อ (Tube extrusion)

4.1.5 การดึงขึ้นรูป (Drawing)

การดึงขึ้นรูปเป็นการผลิตแบบขึ้นรูปโดยวิธีดึงหรือดันให้ได้ชิ้นงานตามรูปร่างที่ต้องการ เช่น การทำท่อที่มีรูปร่างคล้ายขวดปากขนาน โดยด้านหนึ่งจะมีก้นตัน เป็นต้น การผลิตวิธีนี้จะนำมาทำท่อบรรจุก๊าซออกซิเจนหรือแก๊สต่าง ๆ การผลิตทำได้ดังนี้คือ

นำชิ้นงานมาป้อนขึ้นรูปคล้ายรูปถ้วยก่อน หรืองานที่ได้จากท่อที่ไม่มีตะเข็บก็ได้ จากนั้นก็จะทำการขึ้นรูปเป็นตอน ๆ ไปจะเห็นว่าการทำด้วยวิธีนี้จะต้องให้ความร้อนอย่างดี และจะถูกขึ้นรูปได้ขนาดตามแม่แบบด้วย

4.1.6 การหมุนขึ้นรูปร้อน (Hot spinning)

กรรมวิธีนี้เป็นการทำงานขึ้นรูปโดยใช้การหมุนหรือทำการรีดกลิ้งให้ได้งานตามความต้องการ อาจทำให้ได้ขอบใหญ่ ๆ หรือการลดขนาดของท่อ เช่น คอขวดท่อก็ได้ ซึ่งจะช่วยให้ได้ขนาดของงานที่มีรูปร่างตามความต้องการได้

4.2 การขึ้นรูปโลหะเย็น

เป็นกรรมวิธีขึ้นรูปโลหะที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งโลหะจะมีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ปกติ ดังนั้นจะต้องใช้กำลังในการขึ้นรูปสูงมาก เพื่อให้เกิดความเค้นในโลหะจนเลยจุดยืดหยุ่น มิฉะนั้นถ้าปล่อยหรือลดแรงที่กดออก โลหะก็จะคืนเข้ารูปเดิมไม่เกิดการแปรรูป จะเห็นว่าการขึ้นรูปเย็นมีข้อยุ่งยากกว่าการขึ้นรูปร้อน แต่มีส่วนดีอยู่ 2 ประการ คือ

1. สามารถควบคุมขนาดของโลหะในช่วงสุดท้ายได้แน่นอน
2. ผิวของโลหะสะอาดและเป็นมันเรียบ

ในอุตสาหกรรมจะใช้การแปรขึ้นรูปในสภาพเย็นในขั้นสุดท้ายหลังจากการแปรขึ้นรูปในสภาพร้อนมาก่อน เพื่อจะได้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยลง และได้ผลิตภัณฑ์ที่ดี กรรมวิธีการแปรขึ้นรูปในสภาพเย็นมีหลายประเภทเหมือนกัน พอที่จะแยกออกเป็นหมวดหมู่ ดังตารางที่ 4.1 ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ประเภทของการแปรขึ้นรูปในสภาพเย็น

1. Drawing	3. Bending	(b) Electrohydraulic
(a) Blanks	(a) Angle	(c) Magnetic
(b) Tubes	bending	6. Hobbing
(c) Embossing	(b) Roll forming	7. Extruding
(d) Wire	(c) Plate bending	(a) Cold
(e) Metal spinning	(d) Curling	(b) Impact
(f) Shear spinning	(e) Seaming	8. Shot peening
(g) Stretch forming	4. Shearing	
(h) Stretch-draw forming	(a) Blanking	
2. Squeezing	(b) Punching	
(a) Coining	(c) Cutting off	
(b) Cold rolling	(d) Trimming	
(c) Sizing	(e) Perforating	
(d) Swaging or cold forging	(f) Notching	
(e) Intraforming	(g) Slitting	
(f) Thread rolling and knurling	(h) Lancing	
(g) Riveting	(i) Shaving	
(h) Staking	5. High-energy rate	
	(a) Explosion	

ในที่นี้จะกล่าวถึงการแปรขึ้นรูปในสภาพเย็นที่สำคัญ ๆ ได้แก่

4.2.6 การผลิตท่อ (Tube finishing)

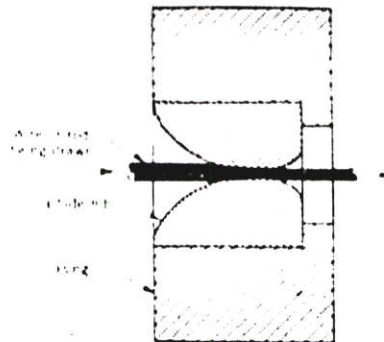
ท่อซึ่งต้องการให้มีขนาดแน่นอน ผิวเรียบ และมีความแข็งแรงสูง จะผ่านการทำขึ้นสำเร็จรูปด้วยการรีดเย็น วิธีนี้จะทำการลดขนาดและความหนาของท่อลง หลังจากที่ผ่านมาการรีดร้อนมาแล้ว สำหรับการลดขนาดที่มาก ๆ จำเป็นต้องมีการอบให้อ่อนตัวเพื่อลดความแข็งในระหว่างการทำอีกด้วย

การดึงจะกระทำด้วยแรงดึงที่สูงมาก จนทำให้โลหะที่ถูกดึงเกิดความเค้นขึ้นเกินจุดยืดหยุ่นตัวก็จะทำให้เกิดการไหลผ่านรูของแบบพิมพ์ การรีดแต่ละครั้งจะทำการลดขนาดได้สูงสุดประมาณ 40% วิธีนี้จะทำให้ท่อแข็งขึ้นมาก ถ้าหากจำเป็นต้องทำการรีดหลายครั้ง ๆ ก็จะต้องทำการอบให้อ่อนตัวทุก ๆ ครั้ง หลังจากผ่านการรีดแต่ละครั้ง

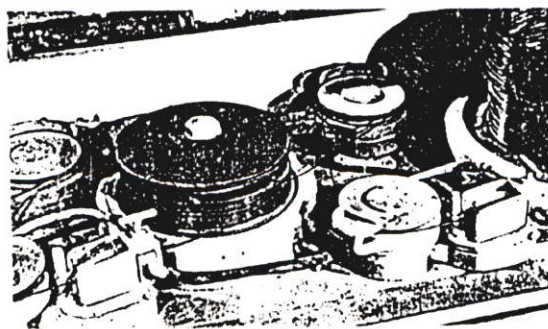
4.2.2 การดึงลวด (Wire drawing)

การดึงลวดจะทำได้โดยการดึงเหล็กเส้นผ่านแบบพิมพ์หลาย ๆ อัน ซึ่งมีรูเล็กลงไปตามลำดับ ดังภาพที่ 4.6 จนกว่าจะได้ขนาดที่ต้องการ เหล็กเส้นที่ใช้จะได้รับการรีดแล้วนำมาทำความสะอาดโดยการจุ่มลงในอ่างน้ำกรด เพื่อขจัดสะเก็ดและสนิมต่าง ๆ แล้วทาด้วยน้ำมันกันสนิม และเพื่อให้ผิวลื่น สะดวกต่อการดึงผ่านแบบพิมพ์ ส่วนมากมักจะทำด้วยทังสเตนคาร์ไบด์ แต่ในบางกรณีอาจจะใช้เพชร เช่น สำหรับทำลวดเล็ก ๆ ก็ดึงอาจจะทำเป็นแบบดึงทีละเส้น หรืออาจจะดึงแบบต่อเนื่องก็ได้ การดึงแบบทีละเส้นนั้น ขดลวดจะถูกนำไปติดตั้งไว้ในที่สำหรับวางขดลวด โดยที่ปลายข้างหนึ่งของเส้นลวดจะถูกทำให้แหลม หรือมีขนาดเล็กลง เพื่อให้สามารถสอดเข้าแบบพิมพ์ได้สะดวก ปลายที่โผล่ออกไปจากรูแบบพิมพ์จะถูกจับไว้ด้วยคีมแล้วดึงให้ยาวออกได้ แล้วม้วนเข้าที่เก็บเป็นขดไว้อีก เสร็จแล้วจึงนำมาทำการดึงซ้ำอีกในแบบพิมพ์ที่มีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ขนาดตามที่ต้องการ

สำหรับการดึงแบบต่อเนื่อง ดังภาพที่ 4.7 ลวดจะถูกป้อนผ่านแบบพิมพ์และเครื่องดึงหลาย ๆ ตัว ซึ่งวางเรียงเป็นแถว แต่การดึงจะไม่ถึงเกินขอบเขตอันหนึ่ง จำนวนของแบบพิมพ์ในชุดหนึ่ง ๆ จะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่จะดึง โดยอาจจะมีตั้งแต่ 2 ไปจนถึง 12 ตัวก็ได้



ภาพที่ 4.6 แสดงภาพหน้าตัดของแบบพิมพ์ที่ใช้ดึงลวด



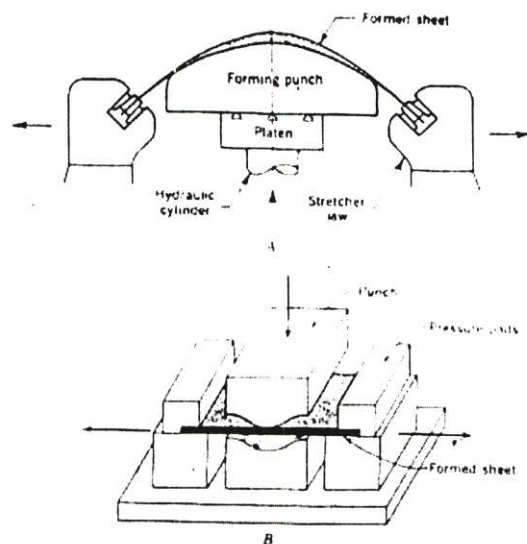
ภาพที่ 4.7 แสดงการดึงลวดแบบต่อเนื่อง

4.2.3 การหมุนขึ้นรูป

เป็นการขึ้นรูปโลหะบาง ๆ โดยการกดเข้าไปตามแบบ ซึ่งหมุนอยู่ตลอดเวลา การทำงานแบบนี้จะทำงานที่มีหน้าตัดเป็นรูปกลม และมักทำบนเครื่องกลึง ซึ่งหมุนด้วยความเร็วสูง เครื่องกลึงที่ใช้จะเป็นแบบที่มีลักษณะคล้าย ๆ กับเครื่องกลึงไม้ ยกเว้นแต่แบบที่มีการเพิ่มศูนย์ท้ายแทนเข้าไปด้วย เมื่ออัดชิ้นงานให้ติดแน่นกับแบบ

4.2.4 การดันขึ้นรูป (Stretch forming)

ในการขึ้นรูปเหล็กแผ่นขนาดใหญ่ ๆ ให้เป็นรูปร่างโค้ง ๆ เหมือน ๆ กัน จะใช้ขึ้นรูปด้วยวิธีการดันขึ้นรูปได้ผลดีมาก ส่วนมากจะใช้ดันด้วยระบบไฮดรอลิก ดังแสดงในภาพที่ 4.8 แบบแม่พิมพ์ซึ่งติดอยู่กับแกนอัดจะเคลื่อนเข้าไประหว่างตัวเลื่อนทั้งสองตัวที่จับยึดแผ่นโลหะไว้ทั้งสองข้าง แบบแม่พิมพ์จะเคลื่อนที่ขึ้นไปในแนวตั้ง และตัวเลื่อนจะเคลื่อนที่ออกจากกันในแนวนอน กำลังที่ใช้ขับเคลื่อนแบบแม่พิมพ์และตัวเลื่อนประมาณ 50 – 150 ตัน แรงดันที่เกิดขึ้นจะทำให้แผ่นโลหะเกิดความเค้นขึ้นเกินจุดยืดหยุ่น และเกิดการยุบหรือยืดตัวได้ไปตามแบบ การทำเช่นนี้จะทำให้แผ่นโลหะบางลงเล็กน้อย และเมื่อถอยแบบแม่พิมพ์ออกไปแล้วมันจะกลับคืนตัวบ้างเล็กน้อย จะไม่ได้ตามแบบแม่พิมพ์ทุกประการทีเดียว



ภาพที่ 4.8 การอัดและดึงขึ้นรูป

4.2.5 การอัดหรือการตีขึ้นรูป (Swaging or Cold forging)

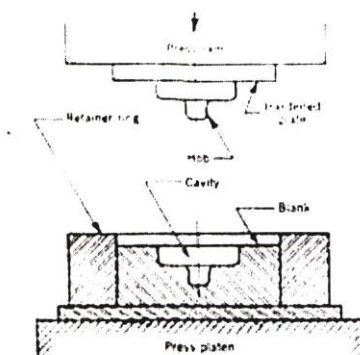
เป็นการขึ้นรูปโลหะในขณะเย็น โดยการใช้แรงอัดหรือแรงกระแทก เพื่อดันให้โลหะเข้าไปในแบบแม่พิมพ์ตามต้องการ การที่โลหะไหลเข้าแบบอาจจะเข้าไม่ทั่วถึง อาจจะเข้าไปในบาง

ทิศทางของการออกแรงดันเท่านั้น งานที่ได้จากการตีขึ้นรูป หรืองานที่ประกอบกันแล้ว บางครั้งจะต้องนำมาทำการปรับแต่งให้ได้ขนาดที่ถูกต้อง และมีผิวเรียบด้วยวิธีนี้

4.2.6 การอัดแบบหล่อ (Hobbing)

แบบที่ใช้สำหรับการหล่อ ดังภาพที่ 4.9 อาจทำด้วยกรรมวิธีที่เรียกว่า Hobbing โดยการอัดแบบ ซึ่งโลหะแข็งที่เรียกว่าตัว Hob ลงไปในเหล็กอ่อน ถ้า Hob ได้รับการกัดแต่งให้มีรูปร่างเหมือนกับชิ้นงานที่ต้องการทำทุกประการ แล้วนำมาอบชุบเพื่อให้ได้ความแข็งสูงพอที่จะทนต่อแรงอัดอันมหาศาลที่เกิดขึ้นได้

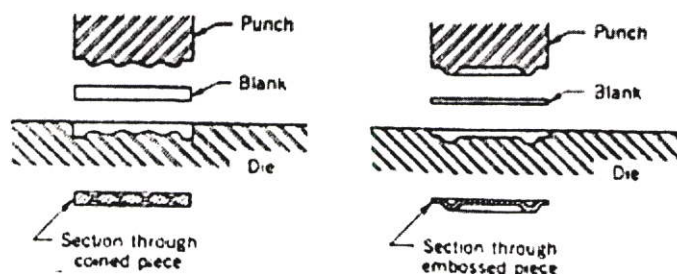
ข้อดีของ Hobbing คือ สามารถทำชิ้นงานหลายชิ้นให้มีรูปร่างเหมือนกันทุกประการได้โดยเสียค่าใช้จ่ายต่ำ ผิวของแบบหล่อที่ได้เรียบร้อยมาก และไม่จำเป็นต้องอาศัยเครื่องจักรชนิดอื่น ๆ ในการตกแต่งผิวภายในแบบซ้ำอีกเลย



ภาพที่ 4.9 แบบพิมพ์ที่ใช้ในการอัด

4.2.7 การทำเหรียญตราและการอัดนูน (Coining and Embossing)

Coining หรือการทำเหรียญตรา และ Embossing หรือการปั้นแผ่นโลหะให้เป็นตัวนูน ดังภาพที่ 4.10 นั้น เป็นการบังคับไม่ให้โลหะไหลไปตามทิศทางตามแนวขวาง แต่จะบังคับให้มันไหลเข้าไปส่วนเว้า ส่วนโค้ง หรือร่องตื้น ๆ ของแบบ เช่น การทำเหรียญตราต่าง ๆ เนื่องจากวิธีนี้ต้องการเครื่องวัดชนิดพิเศษ ซึ่งให้กำลังอัดสูง ๆ ส่วนมากจึงใช้เฉพาะสำหรับโลหะหรือโลหะผสมที่อ่อน ๆ เท่านั้น



ภาพที่ 4.10 แสดงความแตกต่างในการทำเหรียญตราและทำให้เป็นตัวนูน

4.2.8 การย้ำหัวและการย้ำมุม (Riveting and Staking)

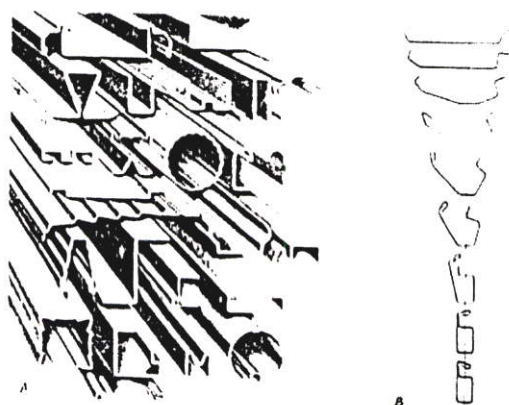
ทั้งสองวิธีนี้ใช้สำหรับการยึดหรือต่อชิ้นส่วนให้ติดกันสำหรับการย้ำมุมนั้น จะต้องเจาะรูที่ชิ้นส่วนทั้งสองเสียก่อน แล้วจึงใส่หมุดย้ำเข้าไป จากนั้นก็อัดหรือตอกปลายของหมุดย้ำให้ยุบเกิดเป็นหัว ซึ่งมีรูปร่างต่าง ๆ ตามที่ปรากฏอยู่ในตัวอัด สำหรับแองของหมุดย้ำอาจจะทำการยึดได้ โดยการเม้มปลายของมันให้งอพับติดกับชิ้นงาน

Staking เป็นการตอกหรือย้ำหัวของชิ้นส่วน เช่น หัวของเพลลาให้ติดแน่นกับอีกชิ้นส่วนหนึ่ง เช่น เฟือง

4.2.9 การรีดขึ้นรูป (Roll forming)

เครื่องรีดขึ้นรูปจะประกอบไปด้วยชุดลูกกลิ้งหลาย ๆ คู่ ซึ่งจะทำการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นชั้น ๆ ต่อเนื่องกันไป โดยชิ้นงานจะถูกป้อนเข้าไปในเครื่องหรือลูกกลิ้งตลอดเวลาไม่ขาดตอน สำหรับอัตราความเร็วในการรีดนั้นประมาณ 50 – 300 ฟุตต่อนาที

วิธีการนี้สามารถทำได้รวดเร็ว และชิ้นงานที่ได้มีรูปร่างเหมือนกันตลอด และเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ



ภาพที่ 4.11 ชิ้นส่วนที่ผลิตจากกรรมวิธีการรีดเย็น

4.2.10 การดัดเหล็กแผ่น (Plate bending)

การดัดแผ่นเหล็กให้เป็นรูปทรงกระบอก จะทำได้โดยใช้ลูกกลิ้งดัด ซึ่งประกอบด้วย ลูกกลิ้งที่มีขนาดใหญ่เท่า ๆ กัน 3 ลูก ลูกกลิ้งสองลูกจะประกอบไว้ในตำแหน่งแนอนตายตัว ส่วน อีกหนึ่งสามารถปรับเลื่อนเข้าออกได้ แผ่นโลหะจะถูกบังคับให้ผ่านลูกกลิ้งนั้น ๆ แล้วเกิดการโค้ง เป็นรูปร่างท่อขนาดต่าง ๆ กัน ได้ตามความต้องการ ซึ่งขึ้นอยู่กับ การปรับลูกกลิ้งตัวที่สาม ถ้านำไป ปรับเข้าไปชิดลูกกลิ้งคู่แรกมาก ๆ เข้าก็จะทำให้ท่อได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กลงยิ่งขึ้น เครื่องจักรที่ใช้จะมีขนาดตั้งแต่ขนาดเล็ก ๆ ที่ใช้หมุนด้วยมือไปจนถึงขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถดัด แผ่นเหล็กขนาดหนาได้ถึง $1\frac{1}{4}$ นิ้วได้

4.2.11 การเข้าตะเข็บ (Seaming)

ในการผลิตรูปทรงกระบอกขนาดต่าง ๆ เช่น กระป๋อง และผลิตภัณฑ์ที่คล้าย ๆ กันนี้ อีกมากมายหลายอย่าง โดยใช้โลหะแผ่นขนาดบาง ๆ การต่อจะใช้ตะเข็บในลักษณะต่าง ๆ กัน

Locking seam

จะใช้ทำตะเข็บตามแนวแกน ซึ่งเป็นตะเข็บที่ไม่สามารถต่อกันได้แน่นหนานัก การทำก็ทำ ได้โดยการพับขอบของแผ่นเหล็กเข้าหากัน แล้วพับเป็นตะเข็บชนิดต่าง ๆ กัน แล้วนำมาเกี่ยวกัน ใช้แรงอัดติดกันให้แน่น

Compound seam

ซึ่งบางที่เรียกว่า Gordon หรือ Box seam จะต่อกันได้แน่นหนากว่า และเหมาะ สำหรับการงานที่ละเอียด ตะเข็บทั้งสองแห่งนี้สามารถจะทำได้ด้วยมือและเครื่องจักร

Bottom seam

มีลักษณะคล้าย ๆ กับการทำตะเข็บตามแนวแกน

4.2.12 การพ่นเม็ดโลหะ (Shot speening)

การแปรขึ้นรูปในสภาพเย็นด้วยวิธีนี้ ในขั้นแรกถูกพัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ ของโลหะ โดยทำให้เกิดความเค้นขึ้นที่ผิวของโลหะ ซึ่งจะได้ทำได้โดยการพ่นเม็ดโลหะเล็ก ๆ ให้ กระทบกับผิวของโลหะด้วยความเร็วสูง ในขณะที่เม็ดโลหะกระทบกับชิ้นงาน จะทำให้รอยบุ๋มเล็ก ๆ ขึ้นเต็มไปหมด และเกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา การพ่นทำให้เกิดการไหลตัว คือ โลหะที่ ผิวส่วนบนจะเกิดการยับตัวได้ ทำให้เกิดการยึดตัวได้บ้างเล็กน้อย การยึดตัวที่ผิวบนนี้จะถูก ต่อต้านด้วยเนื้อของโลหะส่วนต่าง ๆ ซึ่งพยายามคงสภาพเดิมของมันเอาไว้ จึงทำให้เกิดความเค้น แรงอัดขึ้นที่ผิวบนและส่วนในก็เกิดความเค้นแรงดึงขึ้น นอกจากนั้นแล้วผิวของโลหะจะถูกทำให้ แข็งเล็กน้อย และจากการกระทำเช่นนี้จะมีผลทำให้ความแข็งแรงของโลหะสูงขึ้นด้วย

กระบวนการนี้ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการล้าตัวของชิ้นงาน และยังสามารถใช้ได้ทั้งกับงานที่มีรูปร่างเหมือน ๆ กันเป็นจำนวนมาก หรือจะใช้พิเศษเฉพาะส่วนหนึ่งของชิ้นงานตรงจุดที่เกิดความเค้นก็ได้ ช่วยทำให้ผิวของชิ้นงานแข็งแรงขึ้นและเพิ่มความสูงของผิว และในบางกรณีวิธีการนี้ยังใช้สำหรับทำผิวโลหะให้สวยงาม เพื่อความเหมาะสมทางการค้าได้อีกด้วย

บทที่ 5

การดึงขึ้นรูป

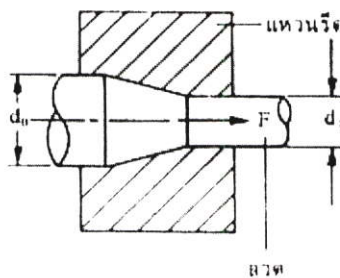
5.1 การดึงลวด

5.1.1 ค่าจำกัดความ

การดึงลวดเป็นกระบวนการดึงเส้นโกล โดยลวดเส้นใหญ่จะถูกดึงผ่านดายรีดที่ขนาดรูเล็กกว่าลวด ลวดที่ได้จะมีรูปร่างและขนาดหน้าตัดตามแหวนรีด เป็นกระบวนการขึ้นรูปที่อยู่ในประเภทใช้แรงดึงกด ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะประกอบไปด้วยความเค้นแรงดึง ละความเค้นแรงกด

ในการดึงลวดจะแบ่งแยกประเภทตามขนาดของของขดลวดที่ดึงดังนี้

การดึงหยาบ	$d = 16$ ถึง 4.2
การดึงปานกลาง	$d = 4.2$ ถึง 1.6
การดึงละเอียด	$d = 1.6$ ถึง 0.7
การดึงสูงลวด	$d < 0.7$



ภาพที่ 5.1 แสดงการดึงลวด

เครื่องดึงลวดที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น เครื่องสำหรับการดึงชั้นเดียว และเครื่องสำหรับการดึงหลายชั้น

วัสดุดิบสำหรับนำมาดึงเป็นลวด ได้แก่ เส้นลวดรีดร้อน สำหรับการดึงให้ได้ผลผลิตที่เป็นเส้นตรงวัสดุดิบส่วนใหญ่จะผ่านมาจากการรีดร้อน หรือจากการอัดเส้นร้อน

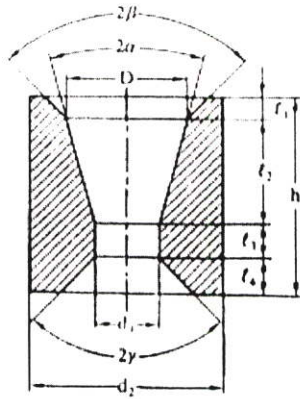
5.1.2 ดาย

ดายจะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเรียวบริเวณขาเข้า 2β ส่วนที่เป็นเรียวที่ใช้ดึง 2α ส่วนที่ใช้ลดขนาดลวด I3 และเรียวขาออก I4 โดยที่ความยาวของ l_3 จะมีค่า

$$l_3 = 0.15d_1$$

สมการที่ 5.1

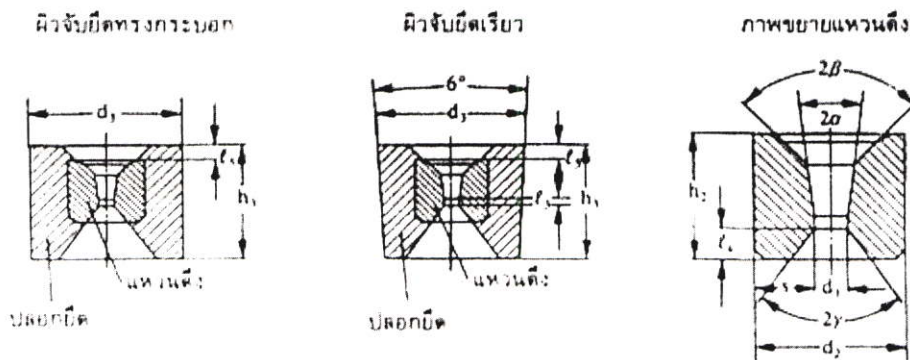
มุมเรียวของดาย 2α จะมีผลต่อแรงและความเรียบของผิวลวดที่ดึง



ภาพที่ 5.2 แสดงสัดส่วนของดาย

5.1.3 วัสดุใช้ทำดาย

เหล็กกล้าที่ใช้ทำดายเพื่อใช้ดึงลวด คือ 2203, 2453, 2080, 2436 ซึ่งดายจะมีความแข็งระหว่าง 63-67 HRC สำหรับเส้นลวดที่มีขนาดเล็กดายส่วนใหญ่จะทำจากโลหะแข็ง (Hard Metal) เกรด G10-G60

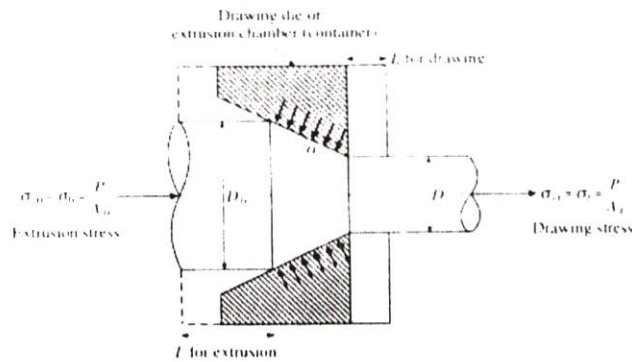


ภาพที่ 5.3 แสดงส่วนประกอบของดาย

5.2 วิธีการ Method Forming

วิธีการหาคำตอบสำหรับการคำนวณหา drawing หรือ extrusion stress หรือ Pressure อาจจะหาได้จาก 4 วิธี ดังนี้

- 1) analytical
- 2) numerical
- 3) semiempirical
- 4) empirical



ภาพที่ 5.4 แสดงองค์ประกอบทิศทางความเค้นที่เกิดขึ้นในการดึง

การหาผลเฉลยโดยการวิเคราะห์โดยตรง สำหรับปัญหาการขึ้นรูปโลหะ เช่น extrusion ทำได้ยากมาก เพราะว่าเป็นปัญหาที่ซับซ้อน ดังนั้น จำนวนข้อสมมุติต่างๆ จึงถูกนำมาใช้ เพื่อให้ง่ายแก่การวิเคราะห์ จากที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solutions) จะมีความพอเพียงกับความถูกต้อง ก็ต่อเมื่อมีข้อกำหนด เหล่านี้

1. เงื่อนไขการสมมูล คือ ต้องมีสมการสมมูล 3 สมการ
2. ความต่อเนื่องของการไหล ในที่นี้คือ วัสดุที่อัดตัวไม่ได้ และไม่มีที่ว่างเปล่า สำหรับการก่อรูปโลหะ เช่นต้องการสมการ Compatibility
3. ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain และจุด yield ถูกใช้
4. เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) รวมทั้งผลกระทบจากความเสียดทาน

สำหรับการวิเคราะห์แบบวิธี upper-and lower-bound ตัวอย่างเช่น บางสภาพถูก Relaxed สำหรับกระบวนการในการพิจารณา สำหรับตัวอย่าง วัสดุ Von Mises อาจจะถูกใช้ในการประมาณได้เป็นอย่างดี ซึ่งวัสดุที่เป็น rigid (non elastic) , homogeneous , isotropic , nonstrainhardening continuum นั้นเชื่อว่า สามารถพิจารณา ได้ที่จุด Von Mises yield

สิ่งหนึ่งที่คาดว่าจะผสมกลมกลืน ทางด้านทฤษฎีและผลเฉลยคำตอบทางการทดลอง คือ Semiempirical solutions ในเชิงปฏิบัติ ผู้นำเสนอ จะต้องพยายามนำคำตอบที่ได้จากทาง ทฤษฎีให้สอดคล้องกับผลการทดลองในทางปฏิบัติ

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 เพราะฉะนั้น ผลลัพธ์จากการคาดการณ์ ค่า Stress จากการ drawing หรือ extrusion หรือ pressures มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง ดังนั้นอาจหาค่าผลลัพธ์คำตอบโดยวิธี lower-bound ทุกๆค่าตัวแปรที่สำคัญถูก พิจารณา จากการออกแบบ flat – face ของ die extrusion ในคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

คำตอบของวิธี upper-bound ถูกสมมุติจากพลังงานจลย์ของสนามความเร็วที่ยอมรับได้

5.2.1 การดึง และการอัดแท่งลวด

จากหลักการที่ว่า Stress เป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง , bar drawing และ Forward extrusion กับ Die รูปทรงกรวย มีความคล้ายคลึงกันมาก ดังจะอธิบายต่อไป

ถ้า external Friction และ internal shearing losses ถูกแยกออกไป ค่า stress ที่ ต้องการสำหรับการ drawing หรือ extrusion จะถูกคิดอย่างง่ายๆ เมื่อให้วัสดุเปลี่ยนแปลงรูปร่าง แบบ homogeneous

$$\sigma = \bar{\sigma} \ln \frac{A_o}{A_f} = \bar{\sigma} \ln \left(\frac{1}{1-r} \right) \quad \text{สมการที่ 5.2}$$

เมื่อ σ = drawing of extrusion stress or pressure

A_o = entry or initial area

A_f = exit or initial area

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

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

ความถูกต้องสำหรับ external friction และ internal shearing redundancy losses, มีค่าสูงกว่า สำหรับ drawing stress อาจหาโดยการหารด้วยค่า efficiency $\zeta = w_h / w_f$, หรือคูณด้วย ตัวคูณแก้ไข 2 ตัว อันที่ 1 คือ ตัวทดแทนสำหรับ external friction loss $C_f(\alpha)$, ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมครึ่งของ Die (α) , และตัวที่ 2 คือตัวทดแทนสำหรับ internal shear redundancy loss $C_i(\alpha, r)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมครึ่งของ Die (α) และยังเป็นฟังก์ชันของ อัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัด (r) ค่า factors ที่ถูกต้องนี้ยังขึ้นอยู่กับ กระบวนการ เช่น drawing, extrusion. มุมครึ่งของ Die (α) คือมุมที่ผิวของ Dieกระทำกับแกนของชิ้นงาน

ดังนั้นสมการด้านบนอาจจะเขียนได้ดังนี้

$$\sigma = C_f(\alpha) C_i(\alpha, r) \bar{\sigma} \ln \frac{A_o}{A_f} \quad \text{สมการที่ 5.3}$$

และ

$$\sigma = C_f(\alpha) C_i(\alpha, r) \bar{\sigma} \ln \left(\frac{1}{1-r} \right) \quad \text{สมการที่ 5.4}$$

ถ้าอัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัด (r) , และมีการจำกัดการหล่อลื่นให้คงที่มีกราฟที่แสดงสำหรับ ช่วงลิมิตของมุม (α) , ซึ่งแปรผันสัมพันธ์กับ Stress และเทอมของงาน ซึ่งแสดงดังรูป 5.5 ที่ซึ่งสถานะก่อนหน้า งานทั้งหมดต่อหน่วยปริมาตร คือ

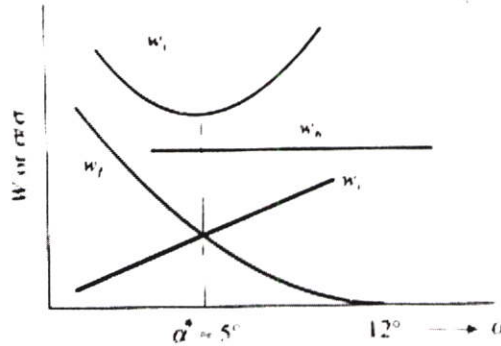
$$W_t = W_h + W_f + W_i \quad \text{สมการที่ 5.5}$$

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ homogeneous W_h จะไม่เป็น ฟังก์ชัน กับ (α) ดังนั้นให้คงที่, ค่ามุมครึ่งของ Die ที่เหมาะสมให้โดย α^* .

ทางด้านซ้ายเป็นค่าต่ำสุดของ W_t บนกราฟ และ α^* คือ อิทธิพลจาก external friction stress จะมีค่ากว้างมาก และงานมาก ดังทฤษฎีต้องการ draw หรือ extrude ชิ้นงานชิ้นหนึ่งผ่าน Die ที่ยาวมากๆ กับมุม (α) ที่เล็กมาก และถัดไป กับจนกระทั่งมันมีอิทธิพลต่อการ extrusion เช่น มุมครึ่งของ Die ที่ถูกเพิ่มอาจจะถึงช่วง dead zone ซึ่งความจำเป็นของค่าลิมิต (α) จะถูกอธิบายในภายหลังและแรงเสียดทาน ภายนอกที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดปลายสุด, α^* มุมครึ่งของ Die ที่

เหมาะสมสำหรับแรงเสียดทานที่สูงใน hot-working และ α ที่ทำจะมีค่ามากกว่า ค่าที่เหมาะสมจะทำให้ผิวของชิ้นงานมีคุณภาพที่ดีกว่าและ safe tool loading ค่ามุมครึ่งของ Die ที่เหมาะสม α^* เพิ่มขึ้นกับ ปริมาณการลดจาก $3\frac{1}{2}^{\circ}$ คือ 10% และ $8\frac{1}{2}^{\circ}$ สำหรับ 45%

สมการสำหรับ total drawing or extrusion stress หรือ total work เขียนในเทอมของ die half-angle (α) ค่ามุมที่เหมาะสมอาจจะพบโดยสมการเชิงอนุพันธ์โดยหาค่าจุดต่ำที่สุด แล้วให้สมการเท่ากับศูนย์



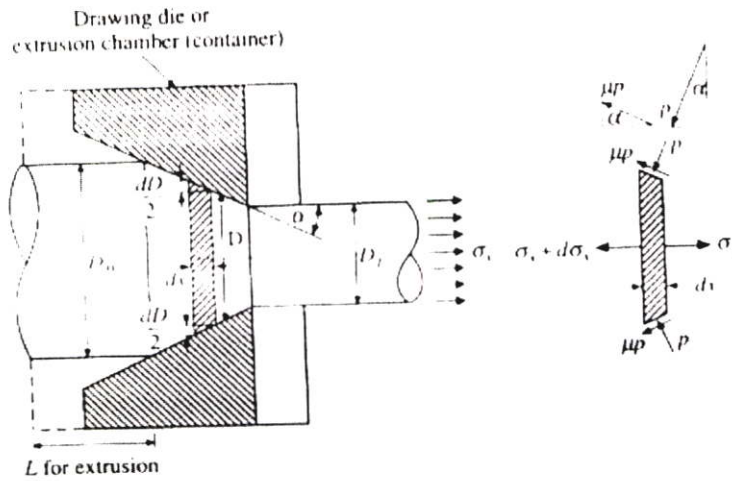
ภาพที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ที่เกิดจากเส้นโค้งของครึ่งมุมตายระหว่างการดึง

จากภาพ 5.5 ถ้าคำนวณความสัมพันธ์ระหว่าง Stress ของ drawing หรือ extrusion กับงานสำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง W_n ขณะที่ไม่คิดแรงเสียดทานจากภายนอก และ redundancy losses, ซึ่งค่าความผิดพลาดอาจจะเกิดขึ้น ซึ่งสภาวะต่อไปจะถูกพัฒนาขึ้น ดังนั้น การหาสมการของ drawing หรือ extrusion stress ซึ่งแรงเสียดทานภายนอกจะรวมในการวิเคราะห์ด้วยแต่ redundancy จะไม่คิด นั่นคือ $W_1=0$ นี้คือวิธีการหาที่เก่าแก่ที่สุด สำหรับ drawing และ extrusion

การสมดุล หรือวิธี Slab สำหรับ การดึงลวดทรงกระบอกกับ Die ทรงกรวยจะถูกใช้ ในที่นี้ $\alpha, \mu, \bar{\sigma}$ จะถูกสมมติให้คงที่

5.2.2 สภาพความสมดุลของการดึงขึ้นรูป

รูป 5.6 แสดงโลหะทรงกระบอกถูกดึงผ่าน Die ทรงกรวย และสมดุล freebody diagram บน เอลิเมนต์ของลวดโลหะ ในกระบวนการระหว่างการดึงลดขนาด



ภาพที่ 5.6 แสดงถึงส่วนของลวดที่สัมผัสกับตาย

สมดุลแรงในแนวแกนและในแนวรัศมี และให้เท่ากับศูนย์ ถ้าให้องค์ประกอบของแรงตามแนวแกน x ประกอบด้วย

1. Longitudinal stress, σ_x
2. Die pressure, P , แรงดันตั้งจากที่ผิวของ Die
3. Frictional drag, μp , on the extrusion chamber, die surface, and/or die land L , แสดงดังรูป 5.4 เมื่อ μ คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

สมดุลแรงในแนวแกน x

$$\sum F = (\sigma_x + d\sigma_x) \frac{\pi}{4} (D + dD)^2 - \sigma_x \frac{\pi}{4} D^2 + p \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha + \mu p \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha = 0 \quad \text{สมการที่ 5.6}$$

เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลาง Cone และ (α) คือมุมครึ่งของตายแสดงดังรูป 5.6 ถ้าตัดเทอมที่มีค่าน้อยมากๆ ทิ้ง

$$2rdr\sigma_x + r^2 d\sigma_x + 2prdr + \frac{2rdr\tau}{\tan \alpha} = 0 \quad \text{สมการที่ 5.7a}$$

$$Dd\sigma_x + 2[\sigma_x + p(1 + \mu \cot \alpha)dD] = 0 \quad \text{สมการที่ 5.7b}$$

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

สมดุลแรงในแนวรัศมี โดย σ_r คิดค่า Stress ที่ทำให้ Die แตกหัก

$$\sum F_r = \sigma_r (\pi D dx) + \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha - \mu p \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha = 0 \quad \text{สมการที่ 5.8}$$

และ

$$\sigma_r = -p(1 - \mu \tan \alpha) \quad \text{สมการที่ 5.9}$$

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

โดยรวมค่า yield กับสมการ (5.7) สำหรับแรงในแนวแกน และให้ $B = \mu \cot \alpha$, ทำการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ แล้วจัดรูปใหม่ให้สมการ เป็นค่าเฉลี่ยของ drawing stress

$$\frac{\sigma_x}{\bar{\sigma}} = \frac{1+B}{B} \left[1 - \left(\frac{D_f}{D_0} \right)^{2B} \right] \quad \text{สมการที่ 5.10}$$

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

B คือ $\mu \cot \alpha$

D_0 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น

D_f คือ เส้นผ่านศูนย์กลางสุดท้าย

สำหรับการ drawing และ extrusion ที่มีแรงเสียดทาน $\mu = 0$ ซึ่งแรงเสียดทานภายนอกและ redundancy ไม่คิด ดังนั้นสมการการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบ homogeneous จะต้องถูกใช้ ต่อมาคือหัวข้อ similar slab หรือ สมการสมดุสำหรับการ drawing และ extrusion ซึ่งป้องกัน ผลกระทบจากแรงเสียดทาน และ redundancy

1. การดึงผ่าน Die รูปสี่เหลี่ยมใน plane strain [5.2]

$$\frac{\sigma_x}{S} = \frac{1+B}{B} \left[1 - \left(\frac{h_f}{h_0} \right)^B \right] \quad \text{สมการที่ 5.11}$$

เมื่อ $S = 2/\sqrt{3}\sigma_o$, or $1.15\sigma_o$ ในที่นี้คือ yield (flow) stress ใน plane - strain ตามการทดสอบการอัด จนถึง Von Mises criterion และ σ_o คือ yield stress ใน uniaxial tension และ h_0, h_f คือ ความหนาเริ่มต้นและสุดท้าย ตามลำดับ

2. Close - pass plug and straight mandrel drawing กับ die ทรงกรวย

$$\frac{\sigma_x}{S} = \frac{1+B^*}{B^*} \left[1 - \left(\frac{h_f}{h_0} \right)^{B^*} \right] \quad \text{สมการที่ 5.12}$$

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

(ใช้เครื่องหมายบวกเมื่อใช้ plug drawing และเครื่องหมายลบเมื่อเป็น mandrel drawing)

ในการดึงแบบ mandrel drawing ถ้าให้ $\mu_1 - \mu_2$ ใช้สมการ (5.2) สำหรับการประยุกต์ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบ homogeneous และถ้าให้ $\mu_1 > \mu_2$ drawing stress สำหรับ mandrel stress อาจจะน้อยกว่า frictionless drawing สำหรับการลดพื้นที่หน้าตัดที่ค่าเดียวกัน

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

$$\frac{\sigma_x}{1.1\sigma_0} = \frac{1+B}{B} \left[1 - \left(\frac{D_f}{D_0} \right)^B \right] \quad \text{สมการ 5.13}$$

4. Round – bar extrusion ผ่าน die ทรงกรวย

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_0} = \frac{1+B}{B} \left[1 - \left(\frac{D_f}{D_0} \right)^{2B} \right] \quad \text{สมการที่ 5.14}$$

เมื่อ σ_n = extrusion pressure บนปลายสุดของ billet

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

หมายเหตุ สภาพทางเข้าและทางออก สำหรับ extrusion แปรรูปเป็นส่วนกลับของ อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง

5. Extrusion of flat strip ผ่านมุมของ Die ที่คงที่

$$\frac{\sigma_x}{S} = \frac{1+B}{B} \left[1 - \left(\frac{h_s}{h_f} \right)^B \right] \quad \text{สมการที่ 5.15}$$

สมการข้างบนนี้ เป็นคำตอบพื้นฐาน โดยแทนคำตอบของ lower-bound โดยในสภาวะต่อไป จะเป็นการพิจารณาคำตอบแบบ upper-bound

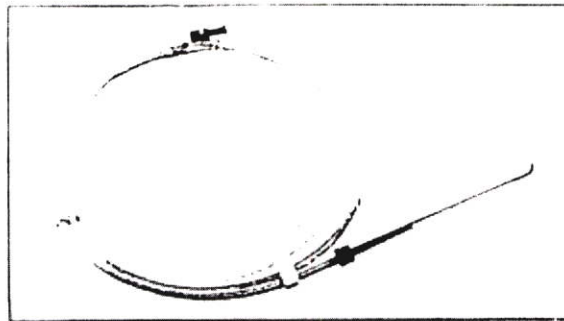
ประยุกต์งาน hot forward extrusion ผ่าน die ทรงกรวย โดยการแปลง สมการ(5.6) และจัดรูปใหม่ได้

$$-\sigma_{\text{e},0} = \bar{\sigma} \ln \left(\frac{A_0}{A_1} \right) + \frac{\mu \ln(A_0/A_1)}{\sin \alpha \cos \alpha} \quad \text{สมการที่ 5.16}$$

โดยเทอมแรกของสมการ(5.15) แทนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบ homogeneous หรือ งานน้อยมาก และเทอมที่สอง คือ external friction loss [5.3]

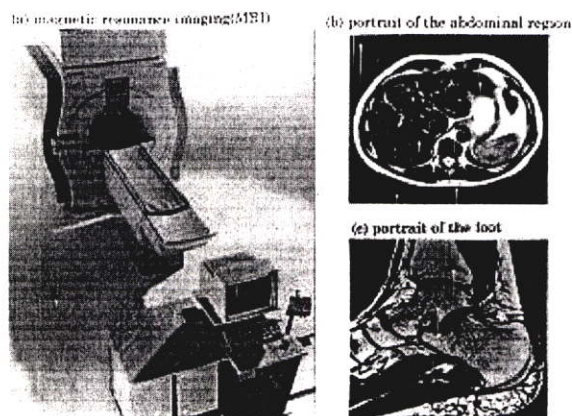
5.3 การนำไปใช้และประโยชน์

1. เป็นวิธีการหนึ่งในการลดขนาดชิ้นวัสดุที่ไม่ซับซ้อน



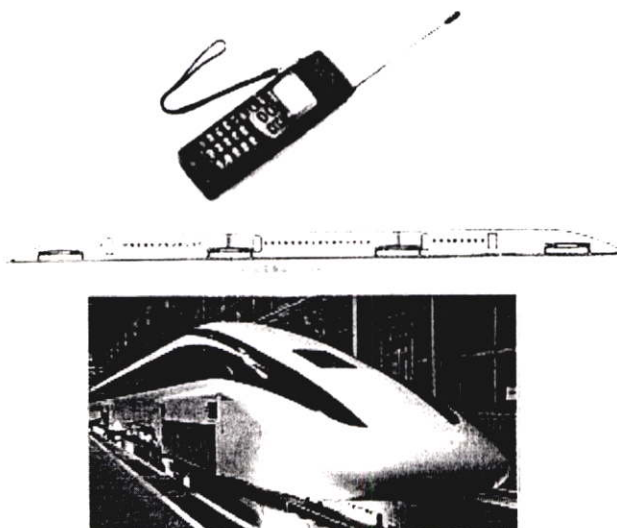
ภาพที่ 5.7 แสดงการนำลวดที่ได้จากการดึงไปใช้

2. ใช้ในการออกแบบ และผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กในการผลิตเครื่องมือแพทย์



ภาพที่ 5.8 แสดงการนำลวดที่ได้จากการดึงไปใช้ในการแพทย์

3. ใช้ในการออกแบบ และผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ทางด้านไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์



ภาพที่ 5.9 แสดงการนำลวดที่ได้จากการตีงไปใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

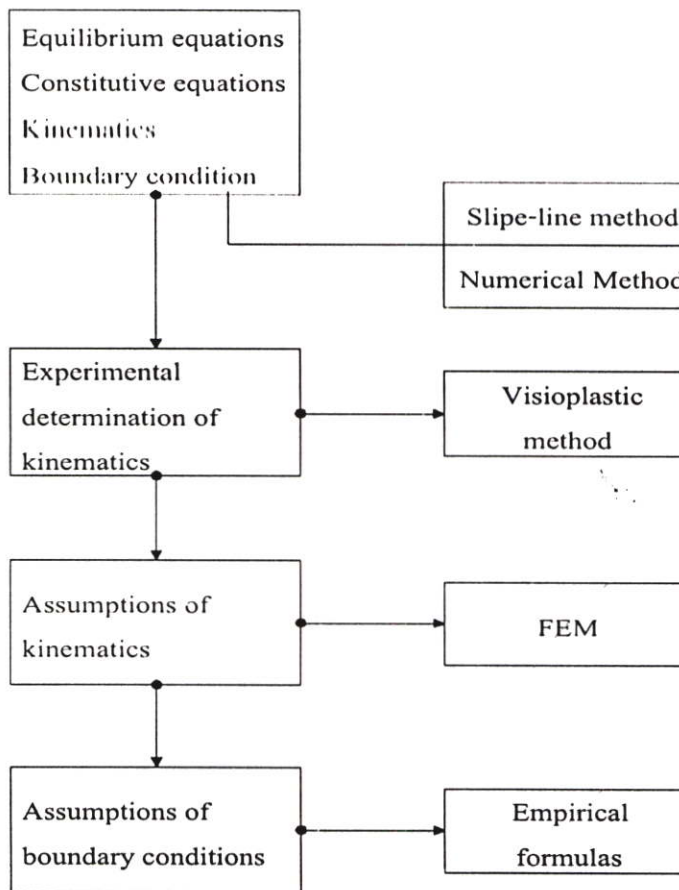
บทที่ 6

วิธีการจำลองการวิเคราะห์ห้วงวนการขึ้นรูปโลหะเบื้องต้น

6.1 วิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับห้วงวนการขึ้นรูป

6.1.1 พื้นฐาน(Introduction)

วิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้ตามภาพที่ 6.1 สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ห้วงวนการขึ้นรูปโลหะที่นำไปสู่การทำนายสนามของความเค้น ความเครียด และการเคลื่อนตัวของ



ภาพที่ 6.1 แสดง flowchart วิธีการสำหรับการคำนวณของห้วงวนการขึ้นรูปโลหะ

วัสดุ เป็นวิธีการประมาณค่าโดยอาศัยผลที่เกิดจากส่วนย่อยที่เป็น

- 1) วิธีการ Slip-line สำหรับปัญหาความเค้นหลัก
- 2) ทฤษฎีเบื้องต้นซึ่งลดขนาดจากปัญหาสามมิติไปสู่ปัญหาหนึ่งมิติโดยอาศัยขีดจำกัด

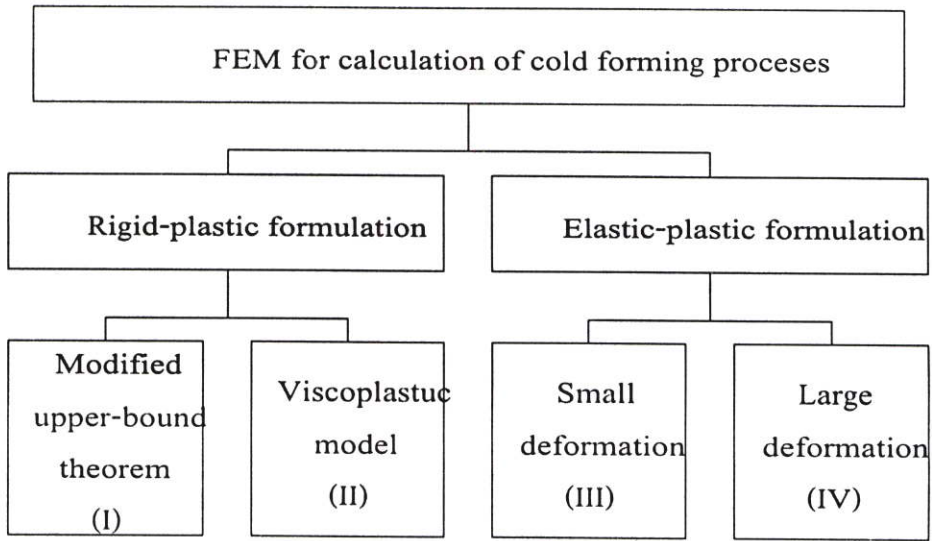
พลังงานจลย์ต่ำสุด

3) ทฤษฎีขอบเขตจำกัดล่าง และบน(lower and upper bound)

ถ้ารูปทรงของส่วนที่เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงที่ไม่ซับซ้อน มันเป็นหนทางที่จะนำไปประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ในเบื้องต้น เป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเช่นเดียวกับไฟไนท์อิลิเมนต์ (FEM) ที่นิยมนำมาใช้ก่อนนี้ FEM มีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางสำหรับวิเคราะห์ความเค้นหลักสามมิติ และขบวนการขึ้นรูปโลหะ

6.1.2 ภาพรวมของวิธีการไฟไนท์อิลิเมนต์

ขั้นตอนของวิธีการทางไฟไนท์อิลิเมนต์นั้นเป็นการพัฒนาที่แตกต่างออกไปการเป็นอิสระของการใช้แบบจำลองวัสดุ ที่เรียกว่า elastic-plastic และ rigid-plastic ที่แสดงในรูป 6.2 และด้วยการใช้ทฤษฎี plasticity ทฤษฎีการเปลี่ยนรูปร่างถูกใช้บ่อยครั้งในการวิเคราะห์ทางไฟไนท์อิลิเมนต์ สำหรับวัสดุที่สามารถอัดตัวได้แบบ isotropic ซึ่งอนุพันธ์อันดับที่ 3 อาจเขียนได้โดย



ภาพที่ 6.2 แสดงภาพFlowchart วิธีการไฟไนท์อิลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์ขบวนการขึ้นรูป

$f(J_2)=0$ เมื่อ $J_2 = -(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)$ ดังนั้นสมมติให้แบ่งแรงออกเป็นส่วนๆตามทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ทฤษฎีการไหลจะมีความแม่นยำมากสำหรับplastic strain ขนาดใหญ่

สมการของ rigid-plastic การเริ่มต้นสำหรับการพัฒนาของ FEM ไปสู่การคำนวณขบวนการขึ้นรูปซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปสู่ plastic ขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม บางปัญหา ดังเช่น การขึ้นรูปโลหะแผ่นซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างแบบ elastic เป็นวิธีที่ดีกว่าแบบจำลอง elastic-plastic ที่แสดงในตาราง 6.1

ตารางที่ 6.1 ตารางแสดงการใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์ในงานขึ้นรูปเย็น

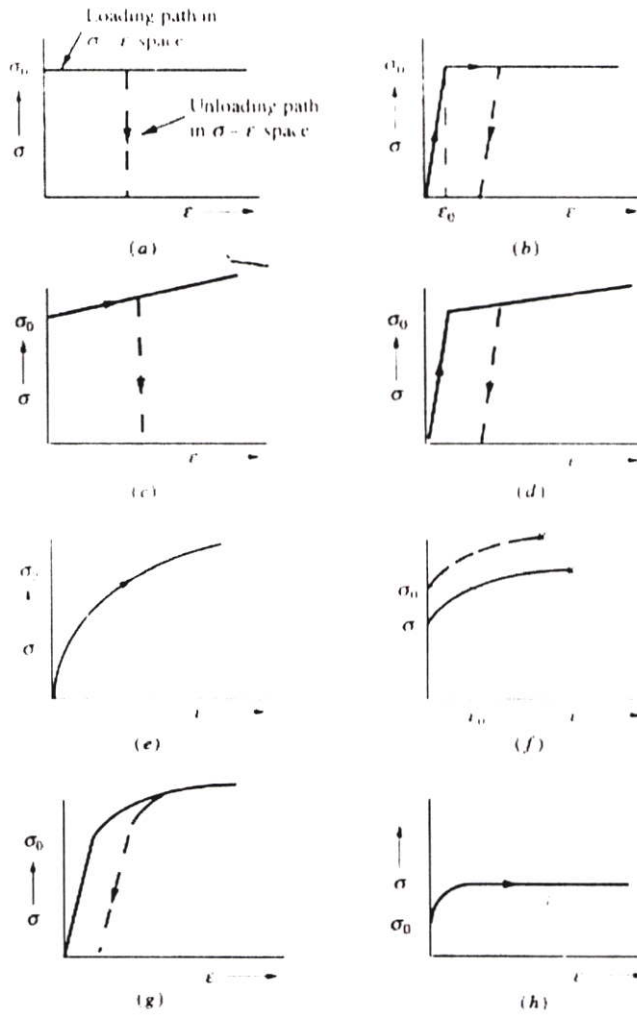
Processes \ FEM	Rigid-plastic formulation		Elastic-plastic formulation	
	(I)	(II)	(III)	(IV)
Indentation	x	x	x	x
Forging	x	x	x	x
Extrusion	x	x	x	x
Drawing	x			x
Rolling	x	x		x
Stretching		x		x
Deep drawing		x		x
Radial drawing	x		x	x
Hydraulic bulging			x	x
3D forming	x	x		x

ที่ได้กล่าวมาแล้ว ความแตกต่างของวิธีการไฟไนท์อีลิเมนต์พูดได้ว่าเป็นการใช้สมการ

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

6.2 การนำ FE ไปใช้ใน Plasticity

พฤติกรรมของ elastoplastic ในหนึ่งมิติเป็นคุณลักษณะภายในของวัสดุ elastic ซึ่งจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงในแบบ plastic ที่เป็นเชิงเส้น ภายหลังจากการเพิ่มขึ้นของระดับความเค้นที่แสดงในรูป 6.3 (g)



ภาพที่ 6.3 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

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็น plastic ไม่สามารถย้อนกลับได้เมื่อไม่มีภาระกระทำ การเริ่มการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบ plastic จะเป็นไปตามกฎของ yield

นอกจากนั้นการเปลี่ยนรูปหรือการเกิด plastic จะปรากฏขึ้นเมื่อระบบของความเค้นเป็นไปตามกฎรูปแบบการเปลี่ยนแปลงพื้นฐาน ดังเช่น

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

สมการที่ 6.1

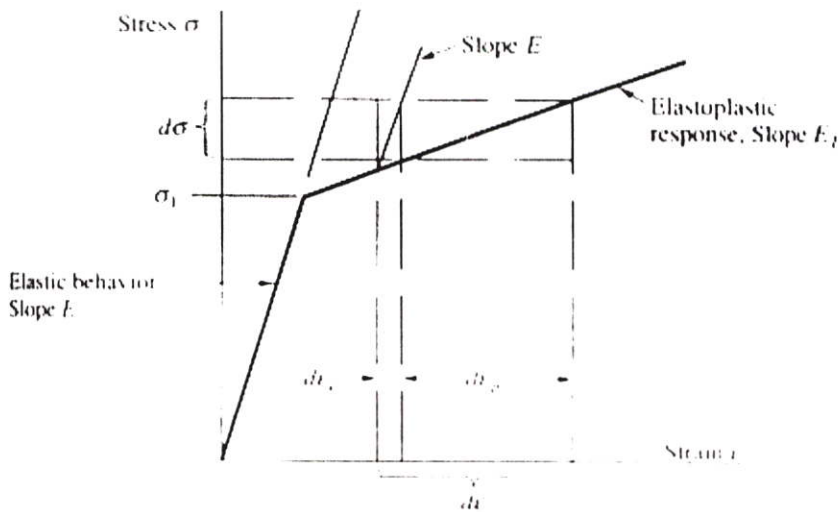
เมื่อ

H เป็นตัวแปร strain hardening (or softening)

$$\sigma \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix}$$

สมการที่ 6.2

yield condition สามารถแสดงโดยสมการ 6.1 แสดงให้เห็นที่พื้นผิว n-dimensional ช่องว่างความเค้น กับตำแหน่งความเป็นอิสระของพื้นผิวที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วของตัวแปร H อ้างถึงภาพที่ 6.4 ตัวแปร H ในสมการ 6.1สามารถอธิบายได้ดังนี้



ภาพที่ 6.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ stress-strain

$$H' = \frac{d\sigma}{d\varepsilon_p} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon - d\varepsilon_e} = \frac{E_T}{1 - E_T/E} \quad \text{สมการที่ 6.3}$$

เมื่อ E_T เป็นความชันของส่วนที่เป็น plastic ของเส้นโค้ง stress-strain ซึ่งอาจเรียกได้ว่า tangential modulus

การแบ่งส่วนของ plastic strain $d\varepsilon_p$ เป็นไปตามความสัมพันธ์ yield surface โดย

$$d\varepsilon = \lambda \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \quad \text{สมการที่ 6.4}$$

เมื่อ λ เป็น proportionality constant

การเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นของ strain นั้นประกอบด้วยส่วนของ elastic และ plastic strain ซึ่งเป็นไปตาม

$$d\varepsilon = d\varepsilon_e + d\varepsilon_p \quad \text{สมการที่ 6.5}$$

สมการที่ 6.5 อาจเขียนให้อยู่ในรูป

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad \text{สมการที่ 6.6}$$

และ

$$d\{\varepsilon\} = d\{\varepsilon\}^e + d\{\varepsilon\}^p \quad \text{สมการที่ 6.7}$$

เมื่อ e และ p เป็น elastic และ plastic strain

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

$$d\varepsilon = D^{-1} d\sigma + \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \lambda \quad \text{สมการที่ 6.8}$$

เมื่อเกิด plastic สถานะของความเค้นบน yield surface ในสมการที่ 6.1 ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นอิสระกับ H

Differentiating สมการที่ 6.1 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$dF' = \frac{\partial F'}{\partial \sigma_1} d\sigma_1 + \frac{\partial F'}{\partial \sigma_2} d\sigma_2 + \dots + \frac{\partial F'}{\partial H} dH = 0 \quad \text{สมการ 6.9}$$

หรือ

$$\left\{ \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \right\}^T d\sigma - A\lambda = 0 \quad \text{สมการที่ 6.10}$$

ซึ่งทำการแบ่งเป็นช่วงย่อย

$$A = -\frac{\partial F'}{\partial H} dH \frac{1}{\lambda} \quad \text{สมการที่ 6.11}$$

เมื่อใช้สมการ Levy-Mises สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial F'}{\partial \sigma} = \frac{3}{2\sigma} \{\sigma\}^T \quad \text{สมการที่ 6.12}$$

เมื่อ $A = n$ ความชันของเส้นโค้ง $\bar{\sigma} - \bar{\epsilon}$ สมการที่ 6.8 และ 6.10 สามารถเขียนให้อยู่ในรูป single symmetric matrix จากดังนี้

$$\begin{Bmatrix} d\epsilon \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D^{-1} & \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \\ \left(\frac{\partial F'}{\partial \sigma}\right) & -A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\sigma \\ \lambda \end{Bmatrix} \quad \text{สมการที่ 6.13}$$

ค่าคงที่ λ สามารถตัดทิ้งได้ ซึ่งแสดงผลลัพธ์ที่แน่นอน ในการหาค่าการเปลี่ยนแปลงของ stress ในการใช้ matrix ดังที่

$$d\sigma = D_{e,p}^* d\epsilon \quad \text{สมการที่ 6.14}$$

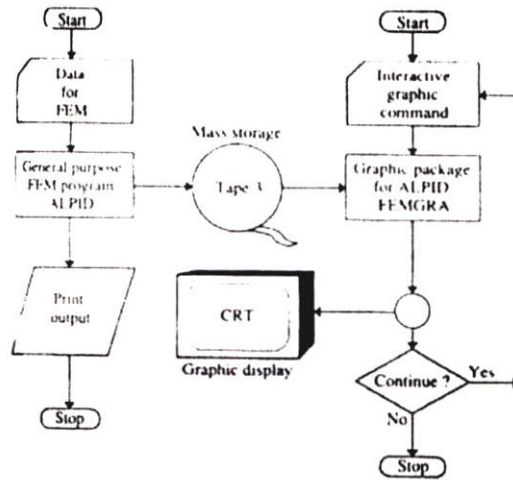
เมื่อ

$$D_{e,p}^* = D - D \left\{ \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \right\}^T \cdot D \cdot \left[A + \left\{ \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \right\}^T D \left\{ \frac{\partial F'}{\partial \sigma} \right\} \right]^{-1} \quad \text{สมการที่ 6.15}$$

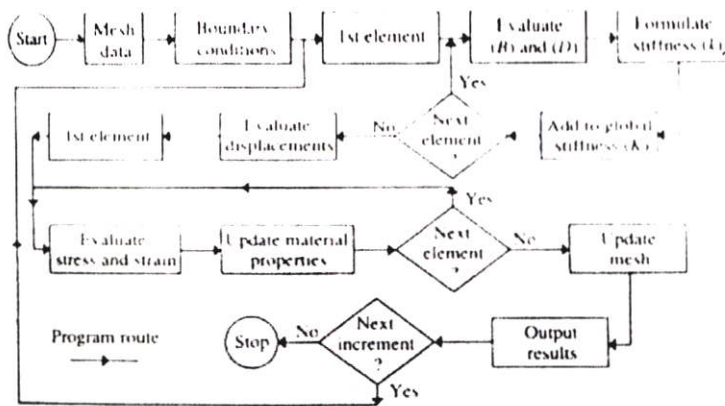
รวม matrix elasticity-plasticity $D_{e,p}^*$ เป็นเสมือน elasticity matrix D ในการวิเคราะห์ elastic ในสมการ

6.3 โครงสร้างของไฟไนท์อิลิเมนต์โปรแกรมสำหรับใช้กับคอมพิวเตอร์

ในทางคณิตศาสตร์การแบ่งย่อยและการกระจายตัวของคุณสมบัติของวัสดุเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearly) ตลอดจนกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นอาจจะใช้เทคนิค elastic-plastic ไฟไนท์อิลิเมนต์ ที่แสดงในภาพที่ 6.6 อธิบายถึงขั้นตอนไปสู่ไฟไนท์อิลิเมนต์สำหรับปัญหา plastic



ภาพที่ 6.5 โครงสร้าง และวิธีการทำซ้ำของการวิเคราะห์ช่วงการเปลี่ยนแปลง large plastic



ภาพที่ 6.6 Flowchart สำหรับวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

บทที่ 7

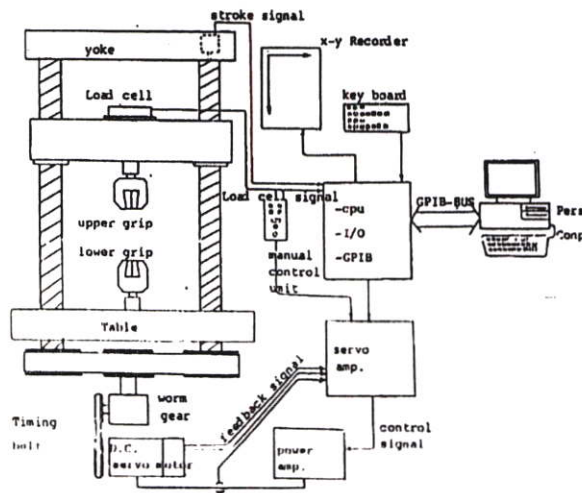
วิธีการทดลองและการจำลองในการวิเคราะห์

7.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

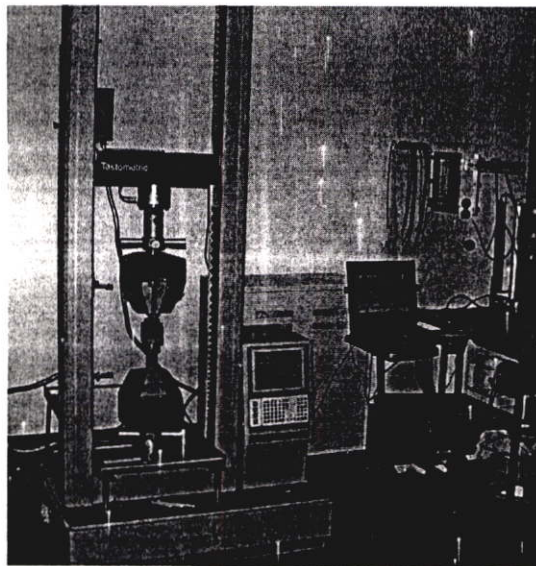
7.1.1 เครื่อง UTM

- เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) เป็นเครื่อง Testometric รุ่น M500 ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ และบันทึกผลควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ แรงดึงสูงสุด 10 ตัน มีไดอะแกรมดังแสดงในภาพที่

7.1



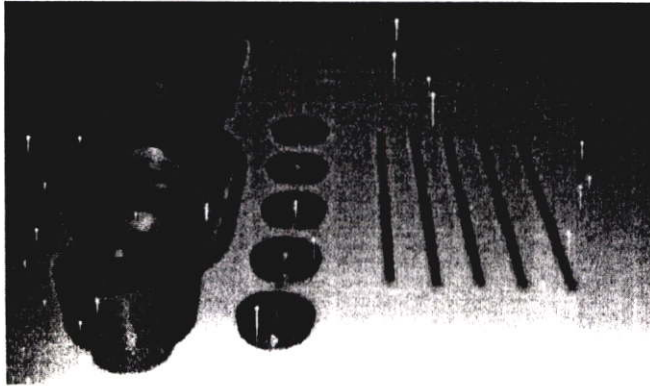
ภาพที่ 7.1 แสดงไดอะแกรมของเครื่องทดลอง



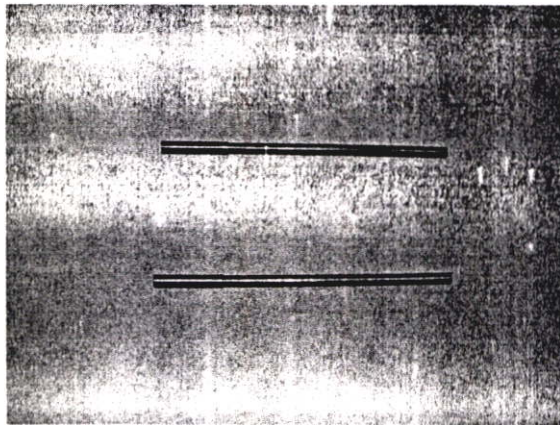
ภาพที่ 7.2 แสดงการทำงานของเครื่องทดสอบเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

7.1.2 ชุดตาย หัวจับขึ้นทดสอบ

- ชุดหัวจับตายซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อใช้จับยึดตายขณะทำการทดลอง มีลักษณะดังแสดงในรูป 7.3



ภาพที่ 7.3 อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเป็นพิเศษสำหรับการทดสอบการดึงลวดผ่านตาย



ภาพที่ 7.4 แสดงตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบจะคิดค่าการลดลงของขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวด ดังนี้

$$Re = \frac{A_0 - A_f}{A_f} \times 100$$

สมการที่ 7.1

เมื่อ

Re = สัดส่วนการลดลงของพื้นที่หน้าตัดของลวด

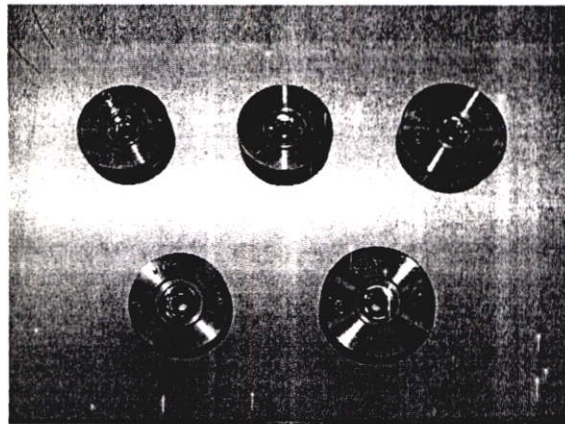
A_f = ขนาดพื้นที่หน้าตัดสุดท้ายของลวด(mm²)

A_0 = ขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เริ่มต้นของลวด(mm²)

ตารางที่ 7.1 แสดงสัดส่วนการลดขนาดของลวดที่ทดสอบ

Item	D_1	A_1	D_0	A_0	R_e
1	5	19.63	5.20	21.24	8.2
2	5	19.63	5.40	22.90	16.6
3	5	19.63	5.60	24.63	25.4
4	5	19.63	5.80	26.42	34.6
5	5	19.63	6.00	28.27	44.0

การจำลองสิ่งเจือปนลงในชิ้นงานที่นำมาทดสอบสามารถทำได้เพียงบางกรณีเท่านั้น อาทิ เช่น จำลองสิ่งเจือปนไว้บริเวณผิวด้านบนของชิ้นทดสอบ และวัสดุที่นำมาทดสอบเป็นวัสดุแข็ง ได้แก่ คาร์ไบต์



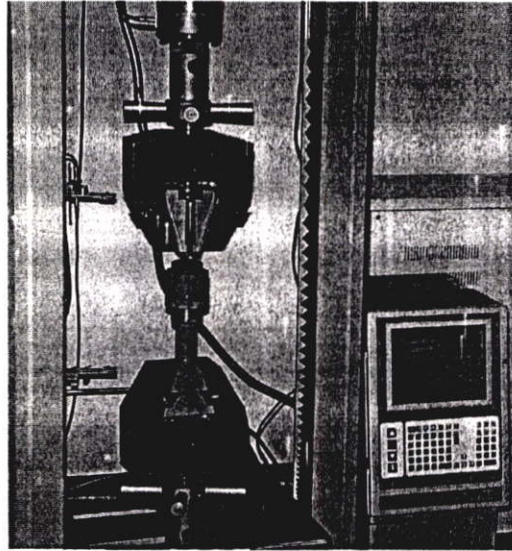
ภาพที่ 7.5 แสดงรูปฉายที่ใช้ในการทดสอบ

ฉายที่ใช้ในการทดสอบทำมาจากโลหะแข็งทั้งสแตนเลส และมีค่าครี้มุมฉายเท่ากับ 6, 8 และ 10 องศา

7.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองนี้ทำการทดลองในห้องทดสอบแรงดึง ของภาควิชา และมีลำดับขั้นตอนการทดสอบ ดังนี้

7.2.1 ติดตั้งอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นทั้งหมดบนเครื่อง UTM



ภาพที่ 7.6 แสดงการทดลองการดึงชิ้นงาน

7.2.2 หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกันบนเครื่อง UTM แล้ว นำลวดหรือชิ้นงานที่จะทดลองใส่ในเครื่องมือดังกล่าวแล้วทำการตั้งค่าต่างๆในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก่อนที่จะทำการทดสอบ โดยตั้งค่าต่างๆที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. ค่าความเร็วในการทดลอง = 2 และ 4 mm/min
2. Return Position = 200 mm
3. กำหนดสเกลวัดแรงดึงสูงสุดไว้ = 1000 kgf
4. ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

7.2.3 จากนั้นทำการดึงจนสิ้นสุดความยาว เมื่อสิ้นสุดความยาวเครื่องคอมพิวเตอร์จะทำการพล็อตกราฟผลของการทดลองลงในกระดาษเก็บข้อมูล

7.2.4 นำ Specimen ที่ผ่านการดึง ผลการทดลอง และกราฟที่ได้หลังจากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ การทดลองและเก็บข้อมูลจะทำซ้ำๆ หลายๆครั้งสำหรับแต่ละตัวอย่างจนแน่ใจว่าผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

7.3 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทดสอบ และจำลองในโปรแกรม

7.3.1 วัสดุทองแดง(จำลองเส้นลวด)

- ค่า Young's modulus (E) = 120000 Mpa
- Yield stress σ_y = 150 Mpa
- Poisson's ratio ν = 0.3
- Coefficient of friction μ = 0.05

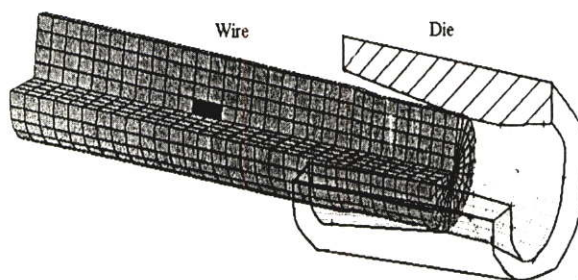
7.3.2 วัสดุที่มีความแข็งแรงสูง ได้แก่วัสดุ คาร์ไบต์(จำลองสิ่งเจือปน)

- ค่า Young's modulus (E) = 1000000 Mpa
- Yield stress σ_y = 1000 Mpa
- Poisson's ratio ν = 0.22
- Coefficient of friction μ = 0.05

7.4 การจำลองในการวิเคราะห์

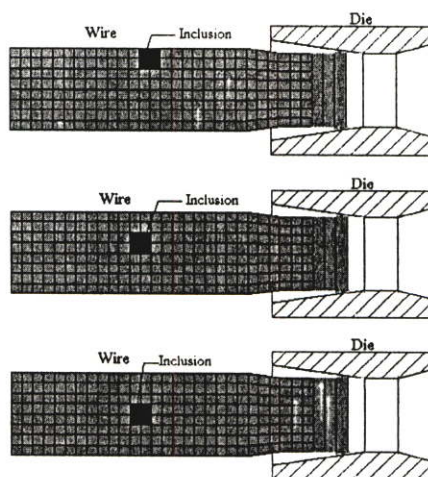
7.4.1 ทำการจำลองขนาดของลวด(ตามภาคผนวก ข.) โดยใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์คิดเป็น Tool ตัวหนึ่ง

7.4.2 จำลองสิ่งเจือปน(Inclusion)ลงในลวดแบบจำลองโดยมีคุณสมบัติตามด้านบน



ภาพที่ 7.7 แบบจำลองการดึงลวดที่มีสิ่งเจือปนอยู่ภายใน

7.4.3 สร้างแบบจำลองสิ่งเจือปนให้อยู่บริเวณต่างๆของ แบบจำลองโดยกำหนดให้อยู่ในบริเวณ แกนกลาง, บริเวณด้านใน และบริเวณผิวด้านนอกของแบบจำลอง



ภาพที่ 7.8 แสดงแบบจำลองการดึงลวดที่มีสิ่งเจือปนเกิดขึ้น ณ. ตำแหน่ง

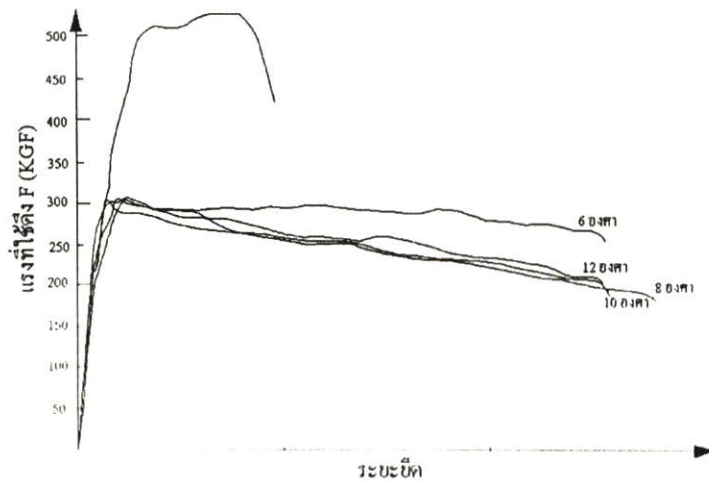
บทที่ 8

ผลการทดลอง

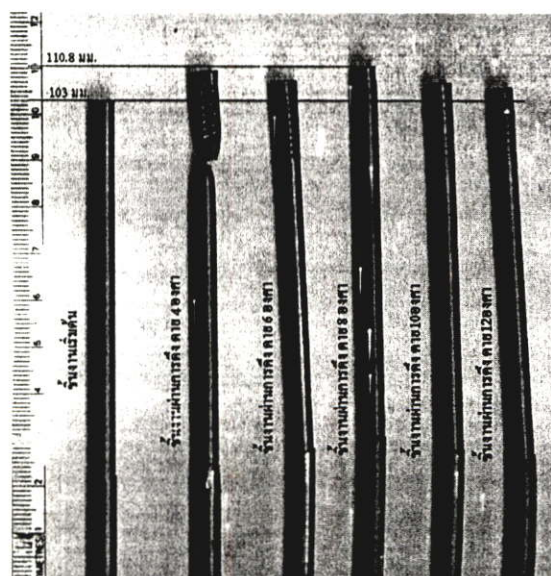
8.1 ผลที่ได้จากการทดลอง

8.1.1 ผลการทดลองในเบื้องต้น

จากการทดลองทำการดึงขึ้นทดสอบโดยให้มุมตายขนาดต่างๆ กันและกำหนดสัดส่วนการลดขนาด ประมาณ 10% ของพื้นที่หน้าตัดจะได้

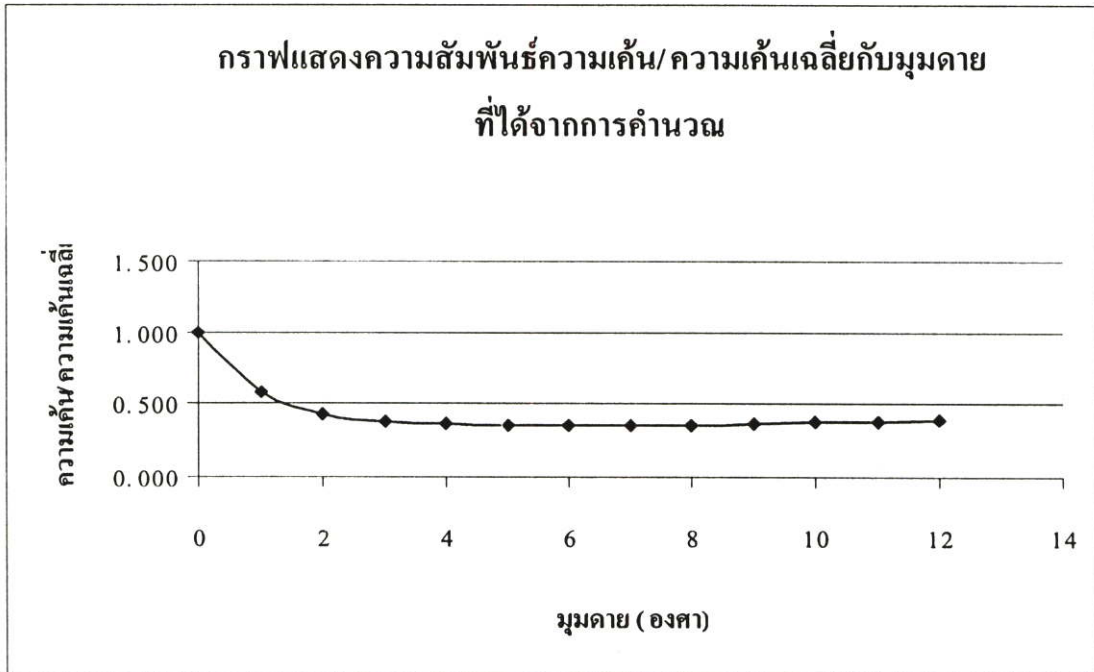


ภาพที่ 8.1 อธิบายถึงผลจากการทดลองเกี่ยวกับแรงที่ใช้กับระยะยืดที่เหมาะสม



ภาพที่ 8.2 แสดงชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบ

ภาพที่ 8.1 เป็นกราฟที่ได้จากการทดลองในการทดสอบการดึงชั้นทดสอบที่สร้างขึ้นเพื่อผลที่ได้เป็นการอ้างอิงไปสู่ การสร้างแบบจำลองและ การจำลองสิ่งเจือปนเข้าในชั้นทดสอบ จากสมการที่ 5.10 แทนค่าลงในสมการจะได้กราฟดังในภาพ 8.3



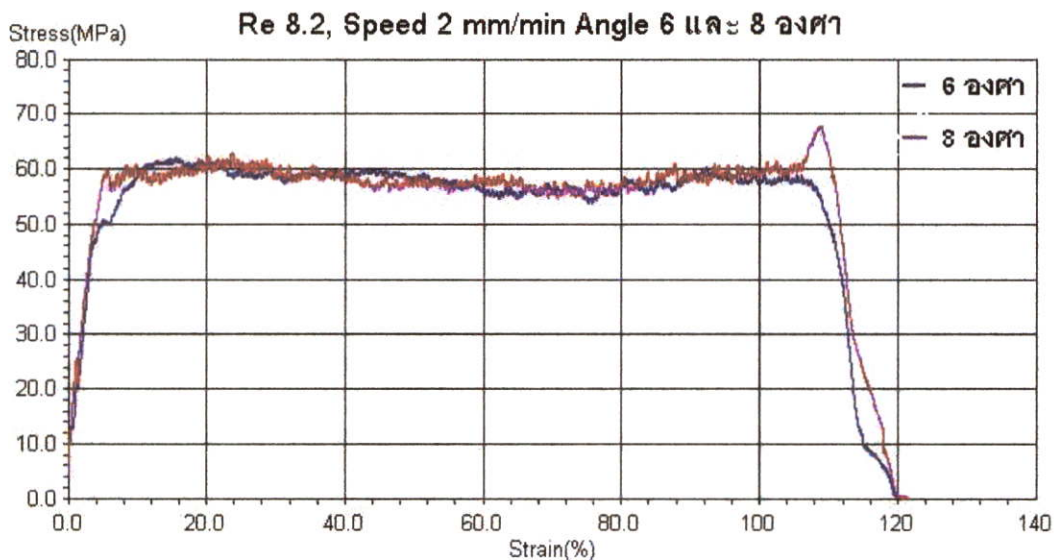
ภาพที่ 8.3 แสดงกราฟที่ได้จากการแทนค่าลงในสมการ 5.10

จากภาพที่ 8.1 และ 8.3 ที่แสดงถึงค่ามูมดายที่เหมาะสมที่จะทำการทดสอบ และการจำลองสิ่งเจือปน คือมูมดายที่ ประมาณ 6-8 องศาจะเห็นได้จากภาพที่ 8.1 แสดงระยะยืดเทียบกับแรงที่ใช้ และภาพที่ 8.3 จากใช้สมการจากทฤษฎีและแทนค่าลงไป

8.1.2 ผลจากการทดสอบชั้นทดสอบอย่างง่าย

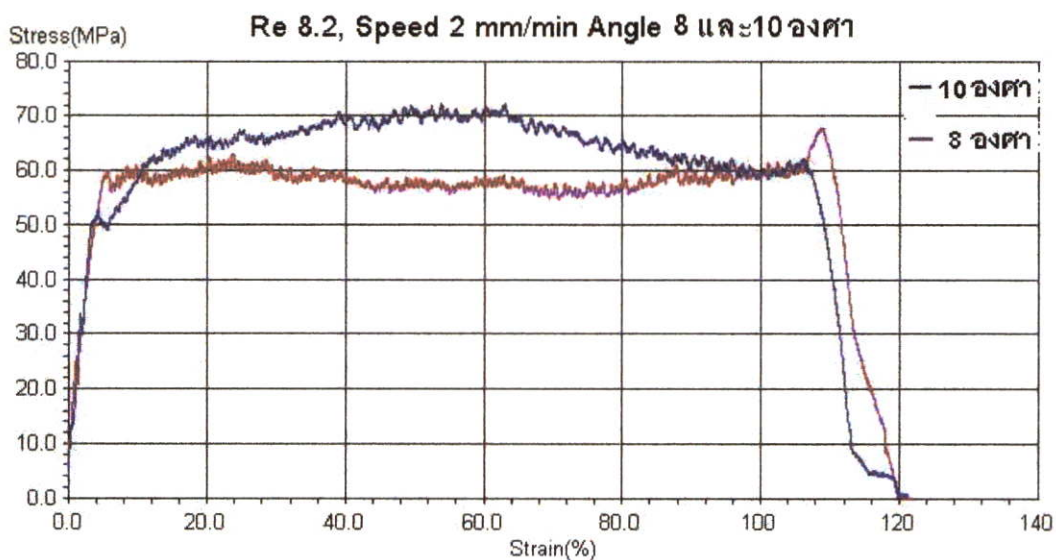
ผลที่ได้จากการทดลองโดยการสร้างชั้นทดสอบอย่างง่ายโดยไม่มีการจำลองสิ่งเจือปนลงในเส้นลวดที่ใช้ทดสอบ เมื่อได้ผลแล้วทำการเปรียบเทียบกับ การสร้างแบบจำลองอย่างง่าย ก่อนทำการสร้างแบบจำลองที่ซับซ้อนในขั้นถัดไป

กราฟความสัมพันธ์ Stress กับ Strain



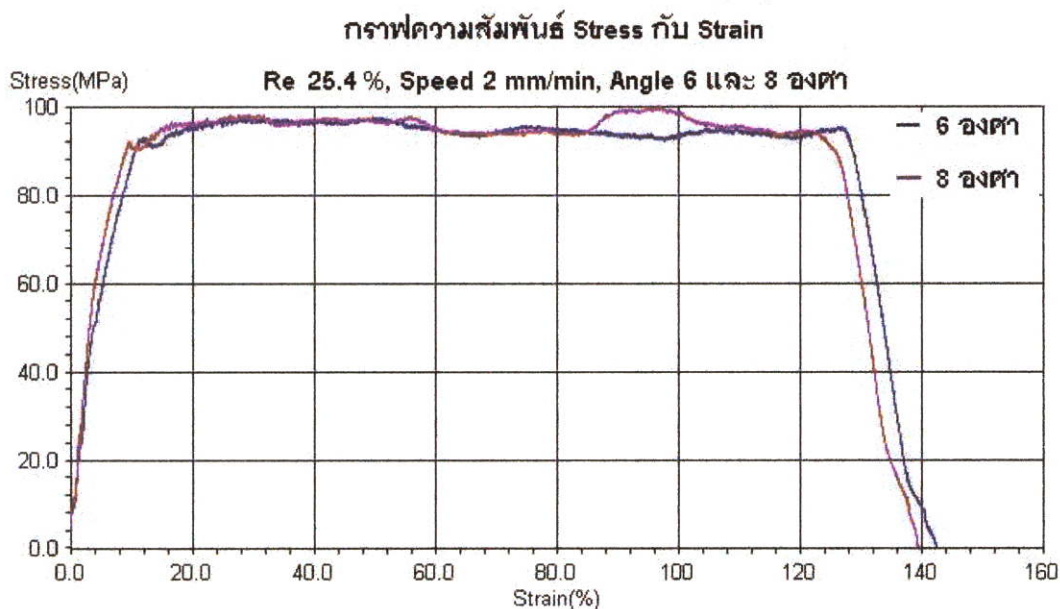
(ก) มุมครึ่งตาย 6 และ 8

กราฟความสัมพันธ์ Stress กับ Strain

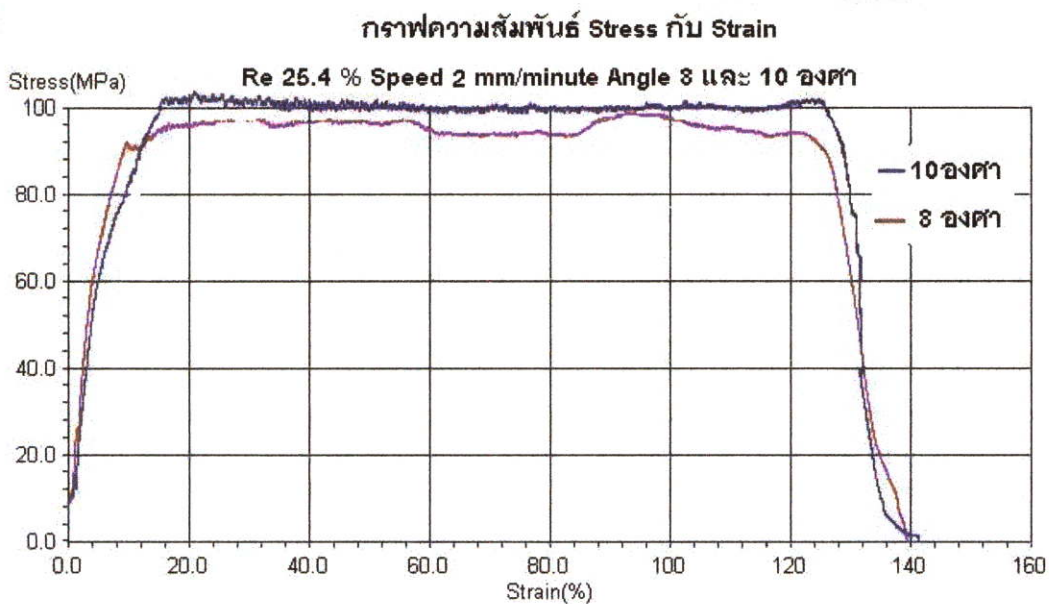


(ข) มุมครึ่งตาย 8 และ 10

ภาพที่ 8.4 ความสัมพันธ์ความเค้น กับความเครียดที่ $Re = 8.2\%$ (5.2mm) จากกราฟในภาพ 8.4 (ก) และ 8.4(ข) จะเห็นว่ามุมครึ่งตาย 10 องศาจะมีค่า ความเค้น สูงสุด และที่มุมครึ่ง (ข) ตาย 6 และ 8 องศา มีค่าความเค้นใกล้เคียงกัน แต่ที่มุมตาย 8 องศาจะมีค่าความเค้นสูงสุด

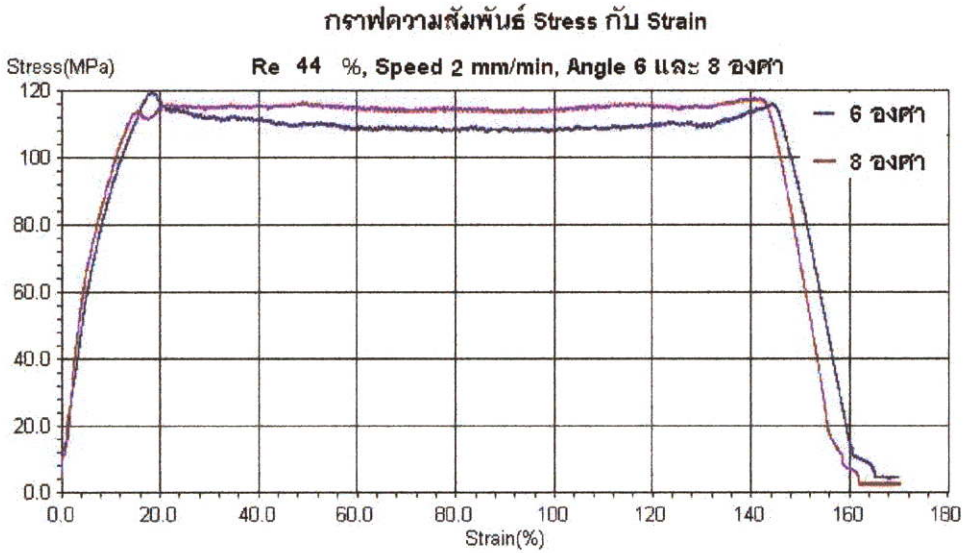


(ก) มุมครีงตาย 6 และ 8

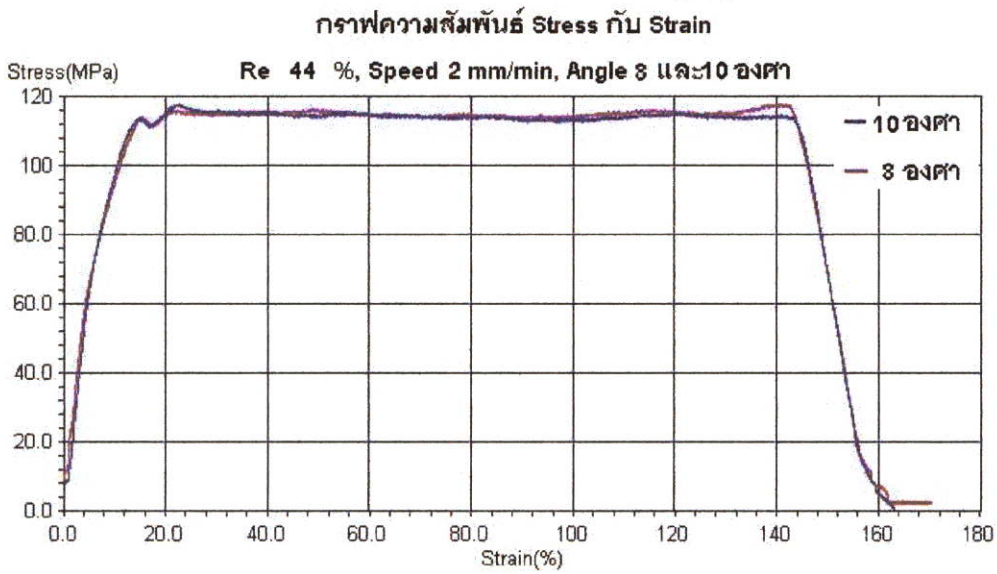


(ข) มุมครีงตาย 8 และ 10

ภาพที่ 8.5 ความสัมพันธ์ความเค้น กับความเครียดที่ $Re = 25.4\%$ (5.6mm) จากกราฟในภาพ 8.5(ก) และ 8.5(ข) จะเห็นว่ามุมครีงตาย 10 องศาจะมีค่า ความเค้น ต่ำสุดและที่มุมครีงตาย 6 และ 8 องศา มีค่าความเค้นใกล้เคียงกัน



(ก) มุมครึ่งตาย 6 และ 8

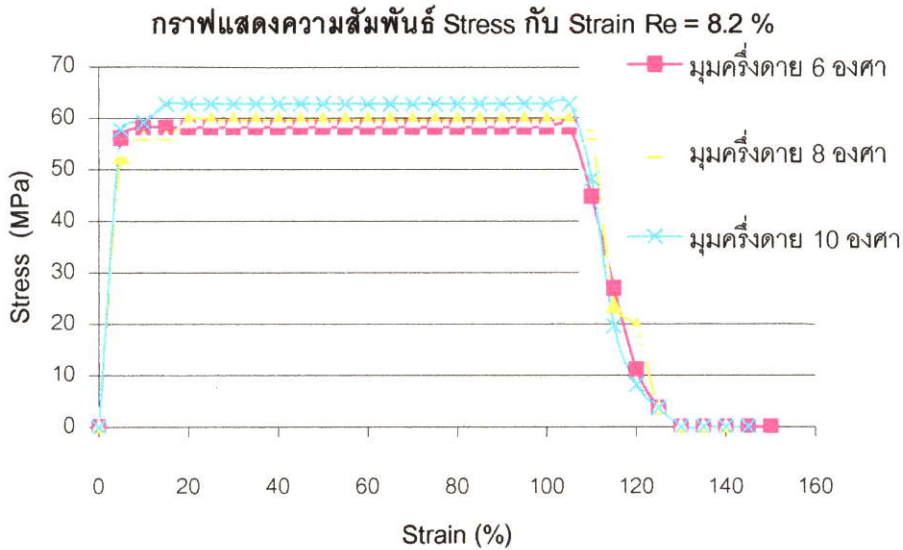


(ข) มุมครึ่งตาย 8 และ 10

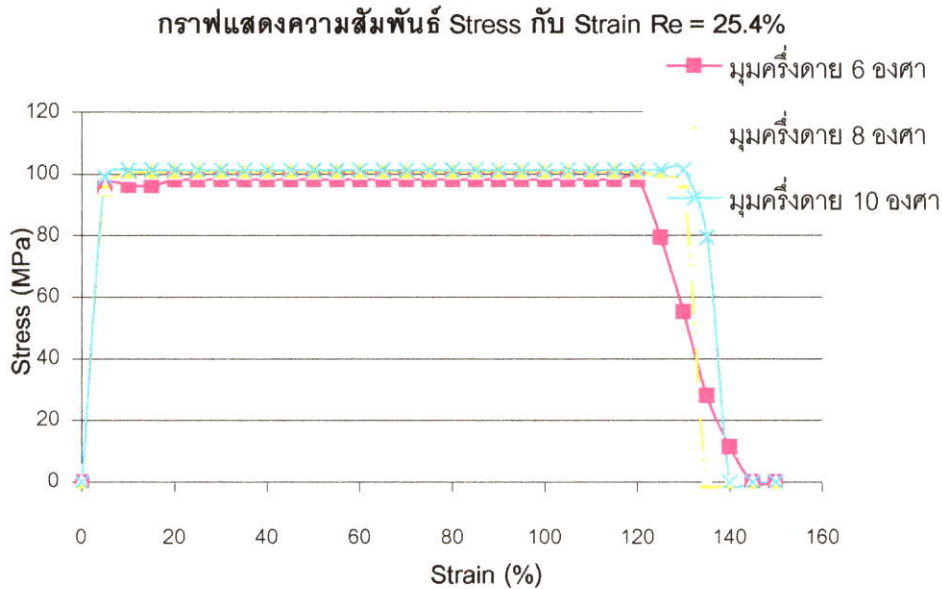
ภาพที่ 8.6 ความสัมพันธ์ความเค้น กับความเครียดที่ $Re = 44\%$ (6.0mm) จากกราฟในภาพ 8.6(ก) และ 8.6(ข) จะเห็นว่ามุมครึ่งตาย 6, 8 และ 10 องศา มีค่าความเค้นใกล้เคียงกัน

จากภาพที่ 8.4-8.6 จะแสดงให้เห็นผลการทดสอบการดึงลวดโดยไม่มีสิ่งเจือปนภายในเส้นลวด ที่มุมครึ่งตาย 6, 8 และ 10 องศา สัดส่วนอัตราการลดขนาด 8.2%, 25.4% และ 44% และแสดงให้เห็นว่าความเค้นจะเกิดขึ้นสูงที่ขนาดมุมครึ่งตายมากๆ

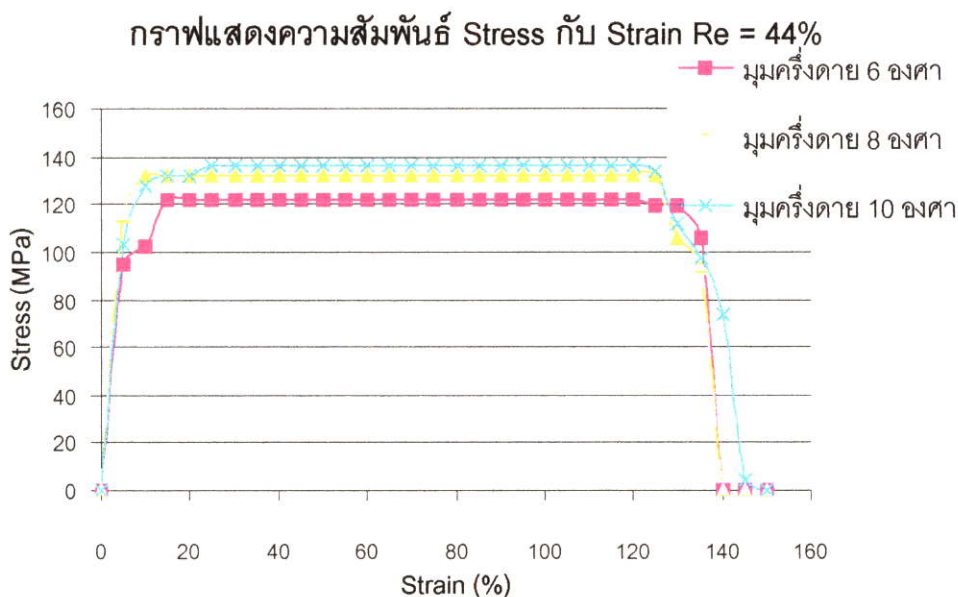
ผลจากการสร้างแบบจำลองอย่างง่าย



ภาพที่ 8.7 อธิบายถึงการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายที่ไม่มีสิ่งเจือปนในเส้นลวด จากกราฟในภาพ จะเห็นว่ามุมครึ่งตาย 10 องศาจะมีค่าความเค้นสูงสุดและที่มุมครึ่งตาย 6 และ 8 องศา มีค่าความเค้นใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 8.8 อธิบายถึงการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายที่ไม่มีสิ่งเจือปนในเส้นลวดจากกราฟในภาพ จะเห็นว่ามุมครึ่งตาย 10 องศาจะมีค่าความเค้น สูงสุดและที่มุมครึ่งตาย 6 และ 8 องศา มีค่าความเค้นใกล้เคียงกัน



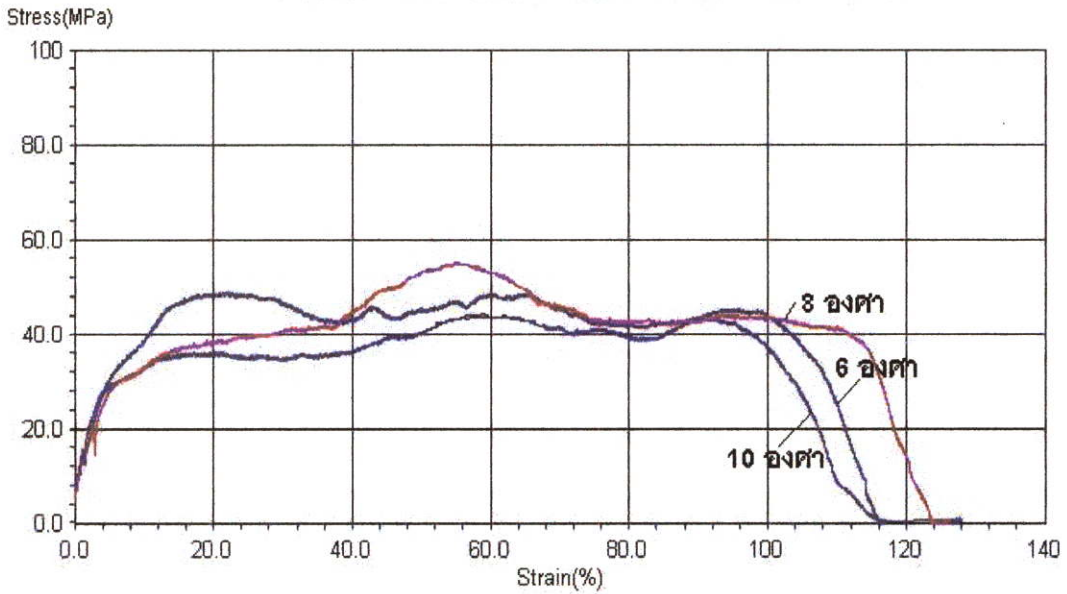
ภาพที่ 8.9 อธิบายถึงการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายที่ไม่มีสิ่งเจือปนในเส้นลวดจากกราฟในภาพ จะเห็นว่ามุมครึ่งตาย 10 องศาจะมีค่าความเค้น สูงสุดและที่มุมครึ่งตาย 6 องศา มีค่าความเค้นต่ำที่สุด

จากภาพที่ 8.4-8.9 เมื่อเปรียบเทียบขั้นตอนทดสอบอย่างง่ายกับแบบจำลองอย่างง่ายจะเห็นว่าค่าที่ได้จากการสร้างแบบจำลองมีค่าสูงกว่าการทดสอบที่ได้จากการทดสอบขั้นตอนทดสอบอย่างง่ายเพียงเล็กน้อยในทุกกรณี ซึ่งคาดว่าเกิดจากความสมบูรณ์ของคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้สร้างแบบจำลอง ในขณะที่ การสร้างขั้นตอนทดสอบอาจมีความผิดพลาดเกิดขึ้นในการทำขั้นตอนทดสอบจาก machine

8.1.3 แสดงผลการทดสอบในการจำลองสิ่งเจือปนลงในลวด

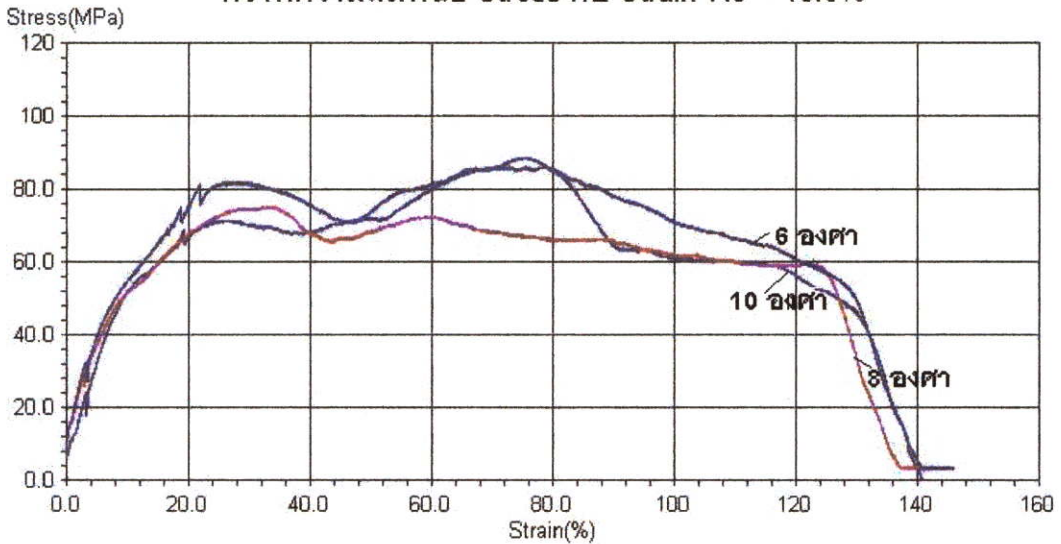
ในความเป็นจริงแล้วการสร้างชิ้นงานขึ้นมาให้มีสิ่งเจือปนอยู่เป็นสิ่งที่ยากเพราะไม่สามารถที่จะกำหนดให้สิ่งเจือปนไปเกิดบริเวณภายในลวดได้ เพราะโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นเองในระหว่างกระบวนการผลิตลวด ก่อนที่จะนำมาลดขนาดเพื่อจะไปใช้ประโยชน์ตามวัตถุประสงค์แต่ในที่นี้จะแสดงผลการทดสอบบางส่วน ที่พอจะสามารถทดสอบได้โดยการแทรกสิ่งเจือปนให้อยู่บริเวณผิวด้านบนบนเส้นลวด(ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 7)

กราฟความสัมพันธ์ Stress กับ Strain Re = 8.2%



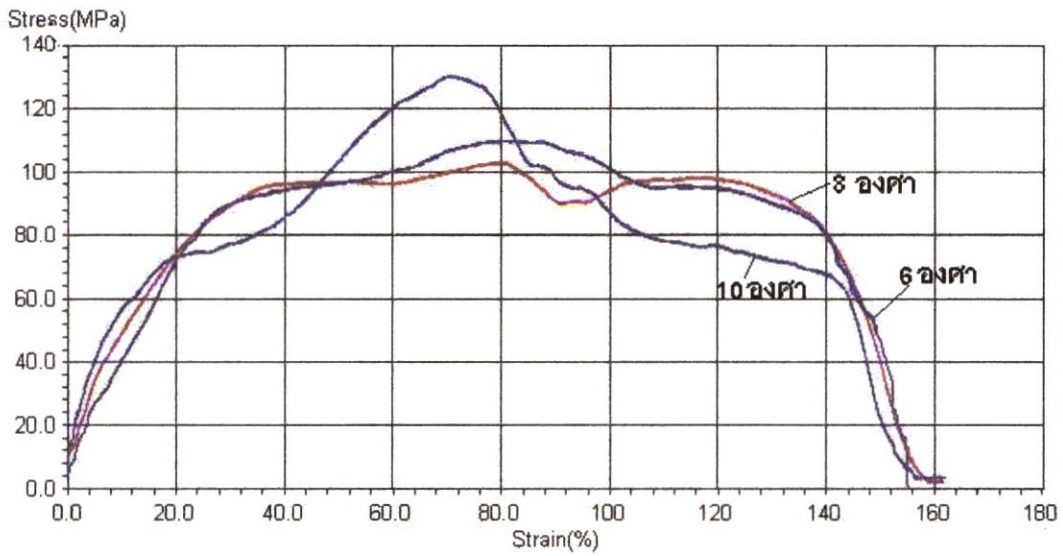
ภาพที่ 8.10 กราฟแสดงผลการทดลองโดยการจำลองสิ่งเจือปนลงในลวด Re 8.82% จากกราฟจะสังเกตเห็นบริเวณที่จำลองสิ่งเจือปนจะมีค่าความเค้นสูงสุด และ Strain สูงสุดเกิดขึ้นที่มุมครึ่งตาย 8 องศา

กราฟความสัมพันธ์ Stress กับ Strain Re = 16.6%



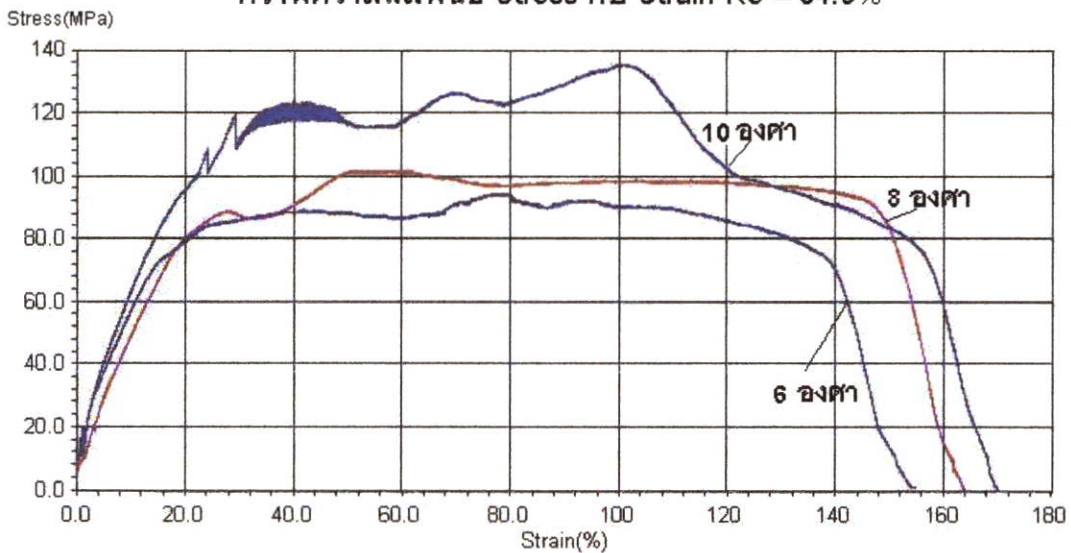
ภาพที่ 8.11 กราฟแสดงผลการทดลองโดยการจำลองสิ่งเจือปนลงในลวด Re 16.6% จากกราฟจะสังเกตเห็นบริเวณที่จำลองสิ่งเจือปนจะมีค่าความเค้นสูงสุด และความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่มุมครึ่งตาย 6 องศา และความเค้นต่ำที่มุมครึ่งตาย 8 องศา

กราฟความสัมพันธ์ Stress กับ Strain Re= 25.4%



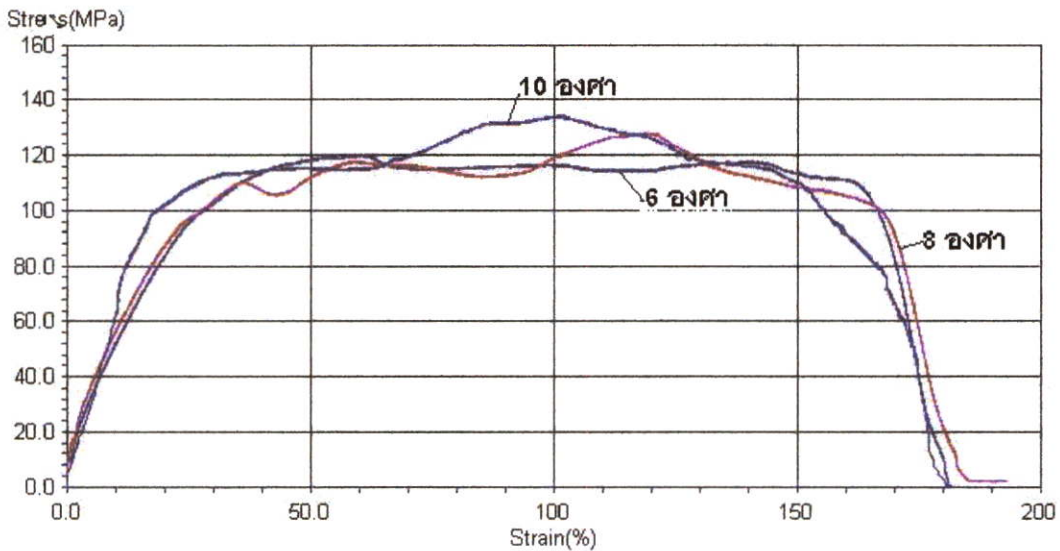
ภาพที่ 8.12 กราฟแสดงผลการทดลองโดยการจำลองสิ่งเจือปนลงในลวด Re 25.4% จากกราฟจะสังเกตเห็นบริเวณที่จำลองสิ่งเจือปนจะมีค่าความเค้นสูงสุด และความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่มุมครึ่งตาย 10 องศา และความเค้นต่ำที่มุมครึ่งตาย 8 องศา

กราฟความสัมพันธ์ Stress กับ Strain Re = 34.6%



ภาพที่ 8.13 กราฟแสดงผลการทดลองโดยการจำลองสิ่งเจือปนลงในลวด Re 34.6% จากกราฟจะสังเกตเห็นบริเวณที่จำลองสิ่งเจือปนจะมีค่าความเค้นสูงสุด และความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่มุมครึ่งตาย 10 องศา และความเค้นต่ำที่มุมครึ่งตาย 6 องศา

กราฟความสัมพันธ์ Stress กับ Strain Re= 44%

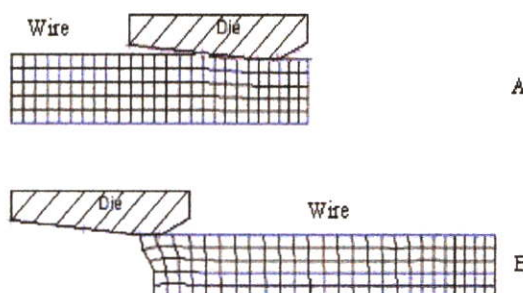


ภาพที่ 8.14 กราฟแสดงผลการทดลองโดยการจำลองสิ่งเจือปนลงในลวด Re 44% จากกราฟจะสังเกตเห็นบริเวณที่จำลองสิ่งเจือปนจะมีค่าความเค้นสูงสุด และความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่มุมครึ่งตาย 10 องศา และความเค้นต่ำที่มุมครึ่งตาย 6 องศา

จากภาพ 8.10-8.14 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสัดส่วนการลดขนาด ที่มากขึ้นจะทำให้ค่า Stress และ Strain สูงมากขึ้นด้วยอันเนื่องมาจากแรงที่ใช้ในการดึงเพิ่มมากขึ้น จะสังเกตเห็นว่าที่มุมครึ่งตาย 6 องศาจะได้รับผลกระทบน้อยกว่า มุมครึ่งตาย 10 องศาในกรณีที่อัตราส่วนการลดขนาดเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่มีสิ่งเจือปนเกิดขึ้นเหมือนกัน

8.2 ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง

ในการวิเคราะห์แบบจำลองสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแบบจำลองได้ง่าย และนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อช่วยในการที่จะทำนายผลที่จะเกิดขึ้นได้ ดังในภาพ 8.4

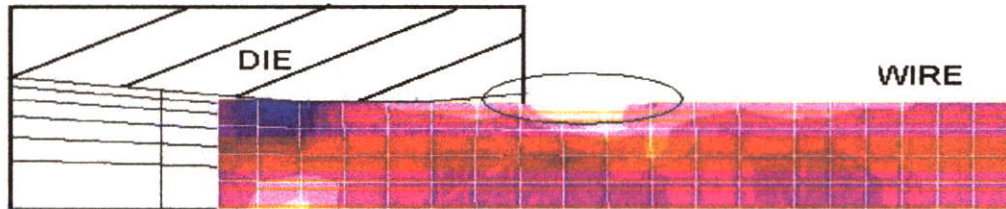


ภาพที่ 8.15 แสดงรูปแบบจำลองการดึงลวดโดยการสร้างแบบจำลอง

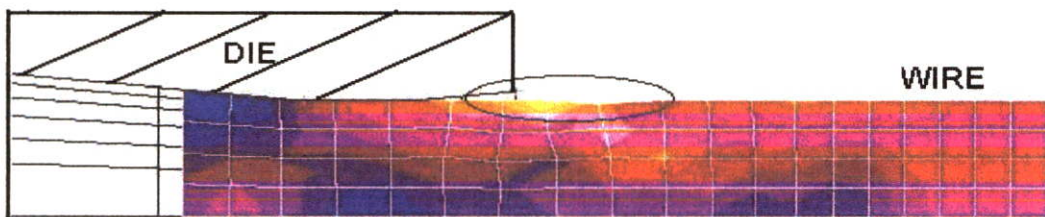
ภาพที่ 8.15a จะเป็นรูปแบบจำลองที่เริ่มต้นตั้ง และภาพที่ 8.15b จะแสดงให้เห็นการจำลองการดึงลวดผ่านตาย

8.2.1 วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

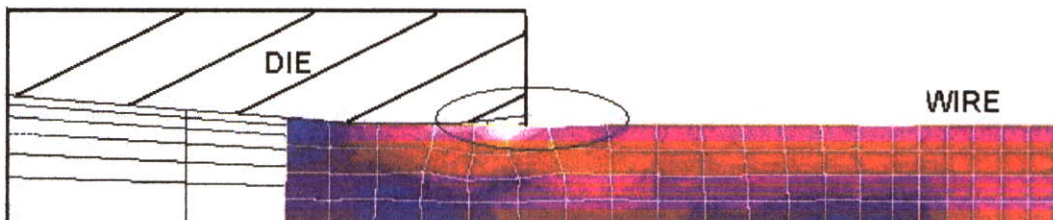
ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพจากการสร้างแบบจำลองสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงบริเวณผิวลวดได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพ 8.16



(ก) ลดขนาด 8.2 % ขณะดึงผ่านตาย

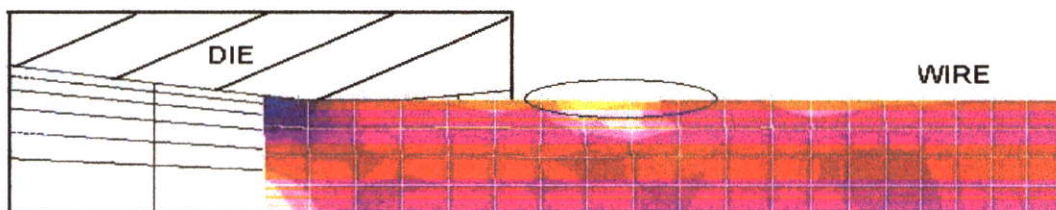


(ข) ลดขนาด 25.4% ขณะดึงผ่านตาย

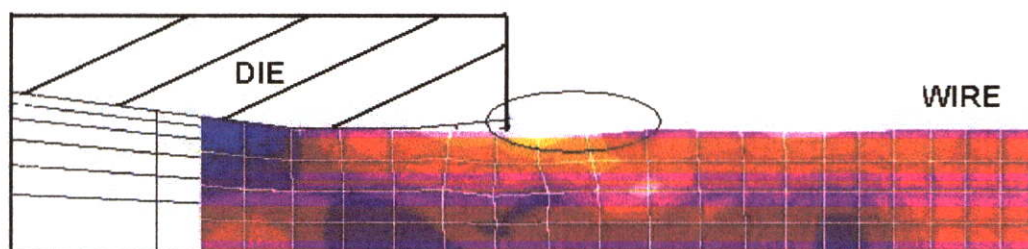


(ค) ลดขนาด 44 % ขณะดึงผ่านตาย

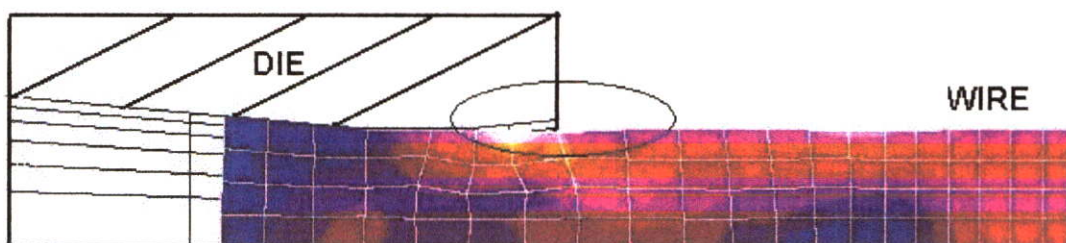
ภาพที่ 8.16 แสดงลักษณะผิวแบบจำลองที่ถูกดึงผ่านตาย โดยมุมครึ่งตาย 6 องศา จากภาพ 8.16(ก), 8.16(ข) และ 8.16(ค) จะเห็นว่าสัดส่วนการลดขนาดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีผลกระทบต่อบริเวณ ที่มีการจำลองสิ่งเจือปนลงในลวดได้อย่างชัดเจน



(ก) ลดขนาด 8.2 % ขณะดึงผ่านด้าย

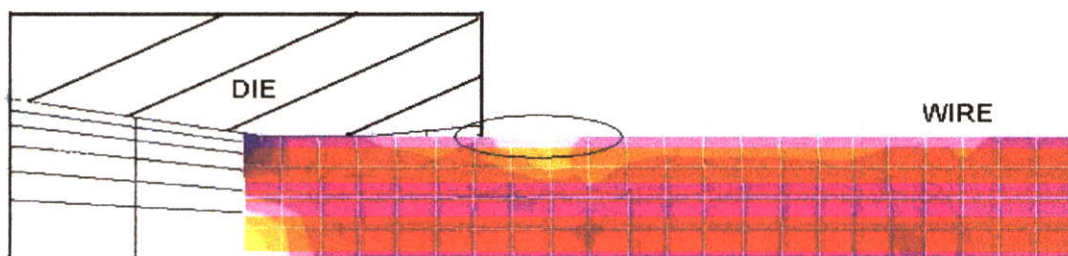


(ข) ลดขนาด 25.4 % ขณะดึงผ่านด้าย

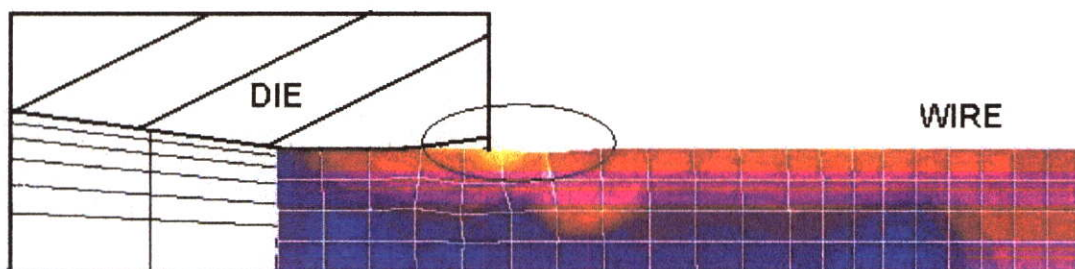


(ค) ลดขนาด 44 % ขณะดึงผ่านด้าย

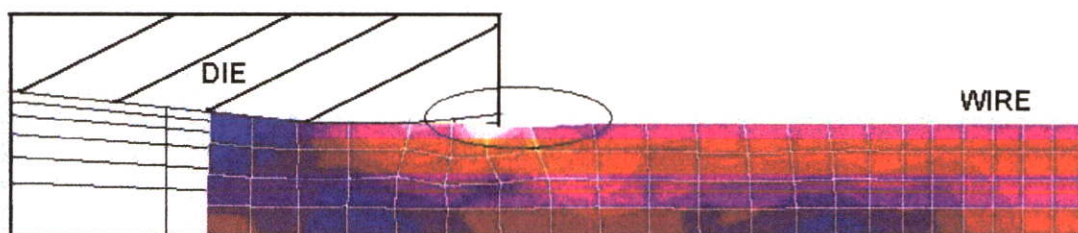
ภาพที่ 8.17 แสดงลักษณะผิวแบบจำลองที่ถูกดึงผ่านด้าย โดยมุมครึ่งด้าย 8 องศา จากภาพ 8.17(ก), 8.17(ข) และ 8.17(ค) จะเห็นว่าสัดส่วนการลดขนาดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีผลกระทบต่อบริเวณ ที่มีการจำลองสิ่งเจือปนลงในลวดได้อย่างชัดเจน



(ก) ลดขนาด 8.2 % ขณะดึงผ่านตาย



(ข) ลดขนาด 25.4 % ขณะดึงผ่านตาย



(ค) ลดขนาด 44 % ขณะดึงผ่านตาย

ภาพที่ 8.18 แสดงลักษณะผิวแบบจำลองที่ถูกดึงผ่านตาย โดยมุมครึ่งตาย 10 องศา จากภาพ 8.18 (ก), 8.18(ข) และ 8.18(ค) จะเห็นว่าสัดส่วนการลดขนาดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีผลกระทบต่อบริเวณ ที่มีการจำลองสิ่งเจือปนลงในลวดได้อย่างชัดเจน

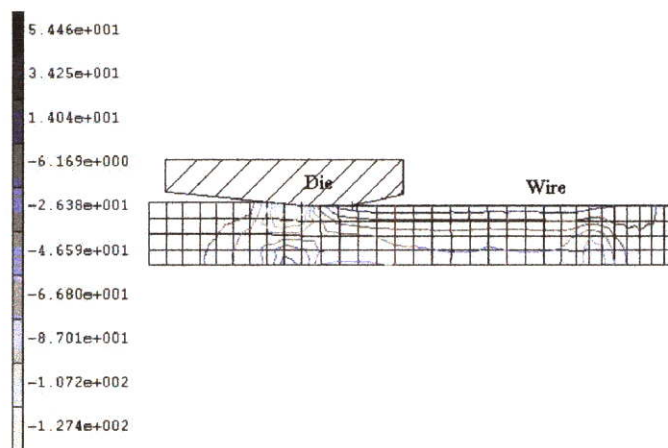
จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพพบว่าในการสร้างแบบจำลองให้มีสิ่งเจือปนบริเวณด้านใน และบริเวณแกนกลางของลวดจะเห็นการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า จำลองให้เกิดสิ่งเจือ

ป็นบริเวณผิวด้านบนของลวดมาก ในที่นี้จึงนำเพียงการจำลองสิ่งเจือปนที่เกิดบริเวณผิวมาแสดงเท่านั้น แต่หากว่าจากภาพที่ 8.16 ถึง ภาพที่ 8.18 เป็นการใช้มุมครึ่งตายในการดึงคือ 6, 8 และ 10 องศา แต่ต่างกันที่สัดส่วนการลดขนาดคือ 8.2%, 25.4 และ 44% ซึ่งจะสังเกตเห็นว่ามี การเปลี่ยนแปลงบริเวณผิว

อย่างไรก็ตามจากภาพจะสังเกตเห็นได้ว่าสัดส่วนการลดขนาดที่เพิ่มมากขึ้น จะเกิดการเปลี่ยนแปลงบริเวณผิวลวดอย่างมาก ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายฉีกขาดได้ และการเกิดสิ่งเจือปนบริเวณด้านในและแกนกลางไขว่ว่าจะไม่มีผลกระทบหากแต่ว่าจะเกิดผลกระทบมากในลวดที่มีขนาดเล็กกว่า

8.2.2 วิเคราะห์เชิงกล

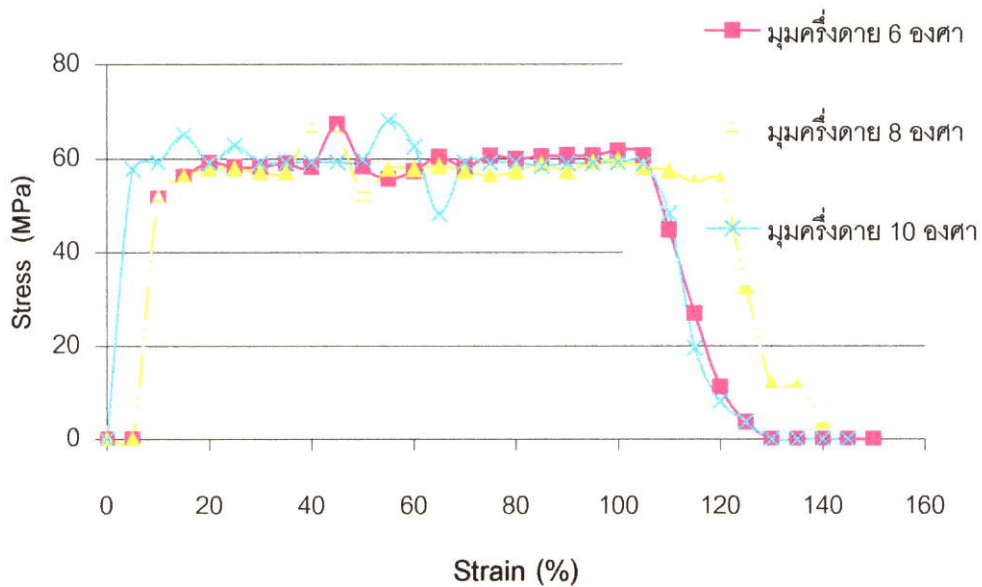
ในการวิเคราะห์เชิงกลสามารถวิเคราะห์ได้จาก stress, strain ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการดึงดังแสดงในภาพที่ 8.19



ภาพที่ 8.19 แสดงถึง Mean Normal Stress ที่เกิดขึ้นในลวดระหว่างการจำลองการดึงลวด

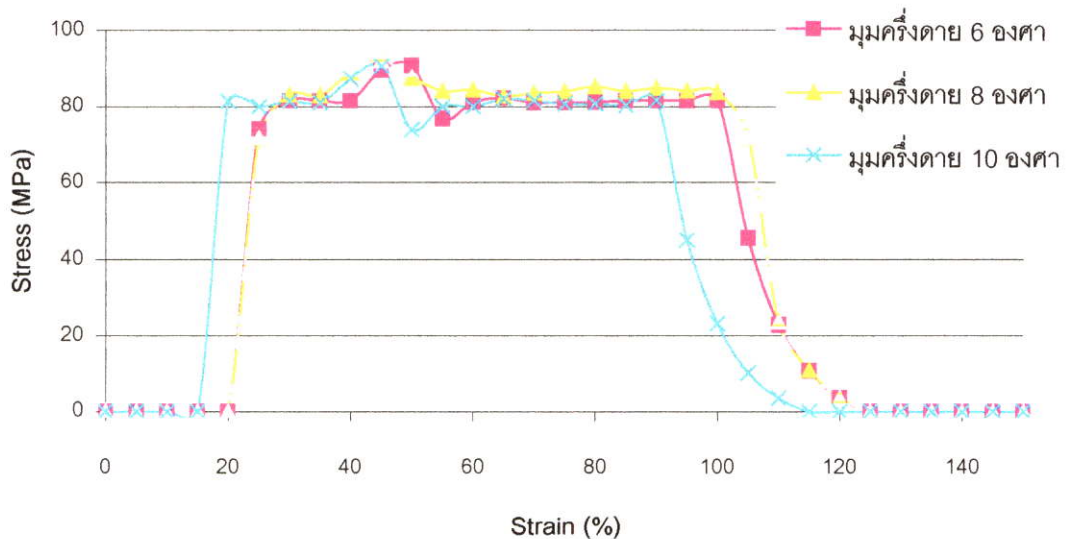
จากการสร้างแบบจำลองจะสามารถนำแรงที่กระทำในการดึงลดขนาดของลวดมาใช้ ประกอบในการหาค่าความเค้น และความเครียดเพื่อเทียบกับแบบจำลองในการทดสอบได้ และผลที่ได้มีลักษณะดังนี้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ Stress กับ Strain $Re = 8.2\%$



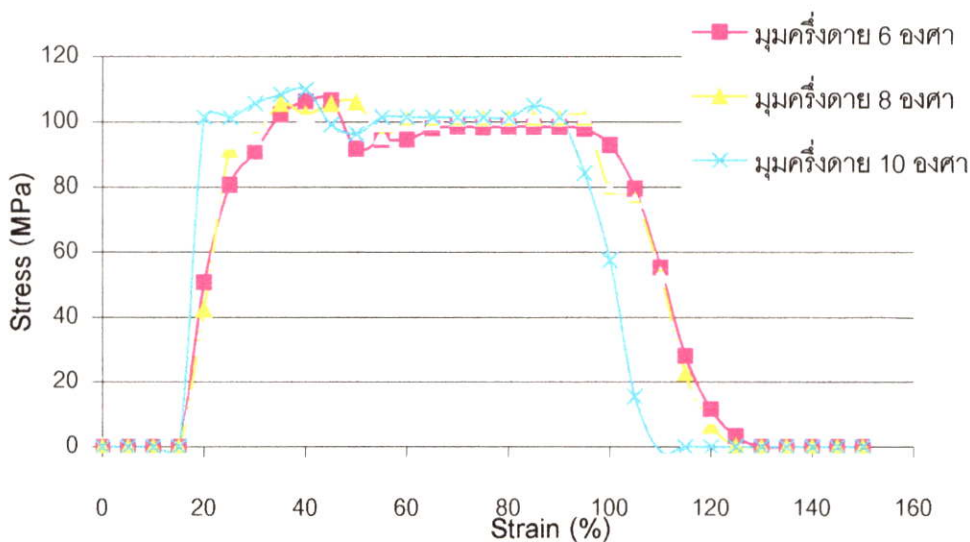
ภาพที่ 8.20 อธิบายถึงความเค้นกับความเครียด $Re = 8.82\%$ จำลอง Inclusion ผิวนบน จะเห็นว่าบริเวณที่จำลองให้มีสิ่งเจือปนจะมีค่าความเค้นที่สูงมาก

กราฟความสัมพันธ์ Stress กับ Strain $Re = 16.6\%$



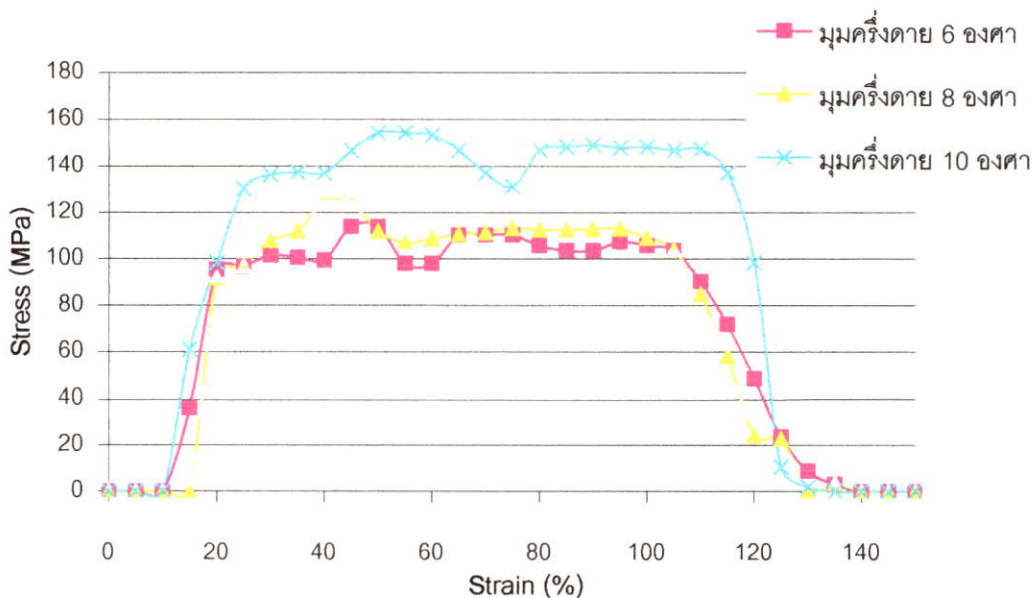
ภาพที่ 8.21 อธิบายถึงความเค้นกับความเครียด $Re = 16.6\%$ จำลอง Inclusion ผิวนบนจะเห็นว่าบริเวณที่จำลองให้มีสิ่งเจือปนจะมีค่าความเค้นที่สูงมาก

กราฟแสดงความสัมพันธ์ Stress กับ Strain $Re = 25.4\%$



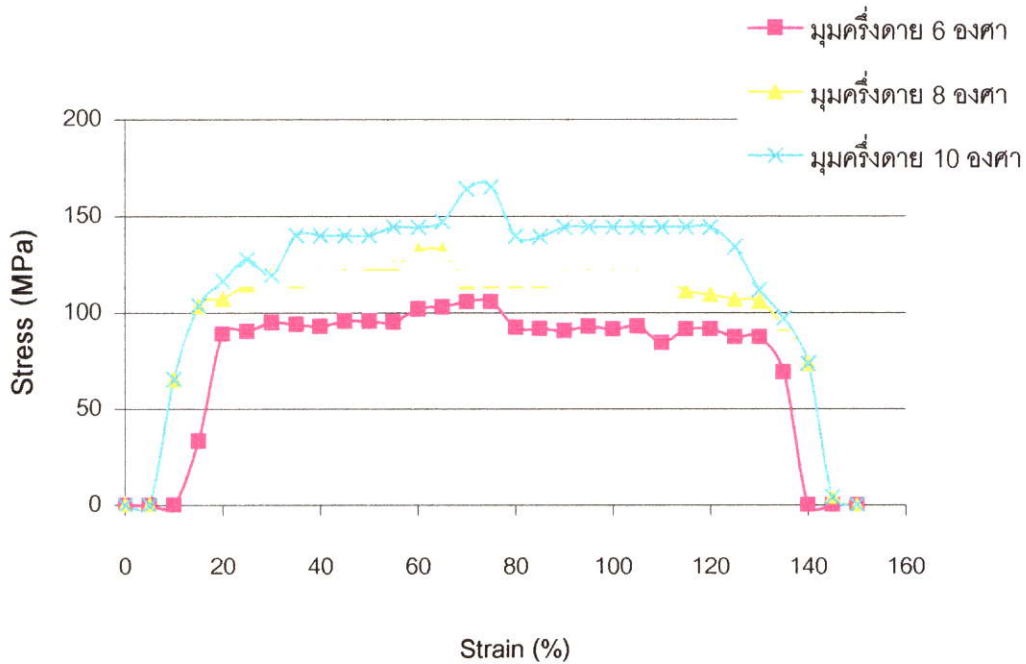
ภาพที่ 8.22 อธิบายถึงความเค้นกับความเครียด $Re = 25.4\%$ จำลอง Inclusion ผิวนบนจะเห็นว่า บริเวณที่จำลองให้มีสิ่งเจือปนจะมีค่าความเค้นที่สูงมาก

กราฟแสดงความสัมพันธ์ Stress กับ Strain $Re = 34.6\%$



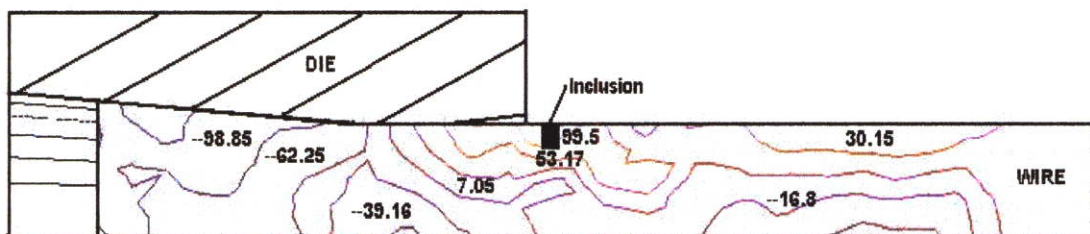
ภาพที่ 8.23 อธิบายถึงความเค้นกับความเครียด $Re = 34.6\%$ จำลอง Inclusion ผิวนบนจะเห็นว่า บริเวณที่จำลองให้มีสิ่งเจือปนจะมีค่าความเค้นที่สูงมาก

กราฟแสดงความสัมพันธ์ Stress กับ Strain Re = 44%



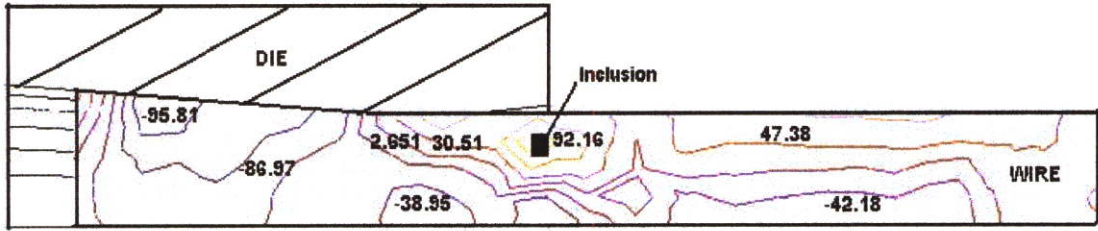
ภาพที่ 8.24 อธิบายถึงความเค้นกับความเครียด Re = 44% จำลอง Inclusion ผิวบนจะเห็นว่า บริเวณที่มีสิ่งเจือปนจะมีค่าความเค้นที่สูงมาก

ในการวิเคราะห์ความเค้นภายในเส้นลวดขณะที่กำลังดึงสามารถวิเคราะห์ได้จากสนามความเค้น ณ. บริเวณใดๆ ของลวดขณะที่ถูกดึงเคลื่อนผ่านตายเคลื่อนผ่านตาย ดังตัวอย่างต่อไปนี้

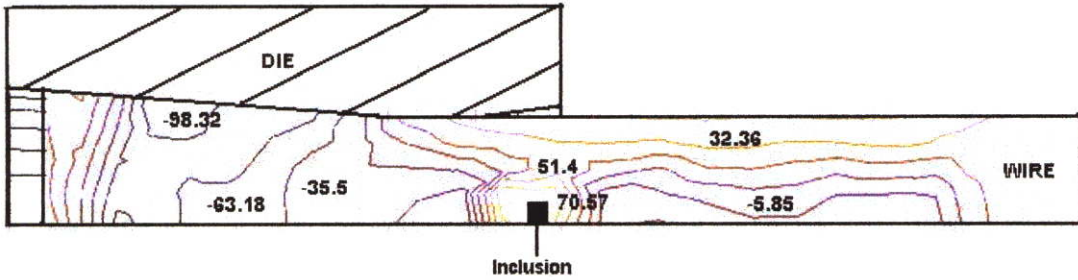


(ก) สิ่งเจือปนอยู่บริเวณผิวด้านบน

ภาพที่ 8.25 แสดงค่า Mean Normal Stress ที่เกิดขึ้นในบริเวณใดๆ มุมครึ่งตาย 6 องศา Re = 44% จากภาพ 8.25(ก), 8.25(ข) และ 8.25(ค) เป็นการวิเคราะห์ค่าความเค้นเฉลี่ย ในระหว่างการดึงลวดโดยจำลองให้มีสิ่งเจือปน ณ. บริเวณใดๆ จะเห็นว่าค่าความเค้นเฉลี่ยสูงในบริเวณที่มีสิ่งเจือปน และความเค้นเฉลี่ยเกิดขึ้นสูงสุดในแบบจำลองที่มีสิ่งเจือปนบริเวณผิวด้านบน

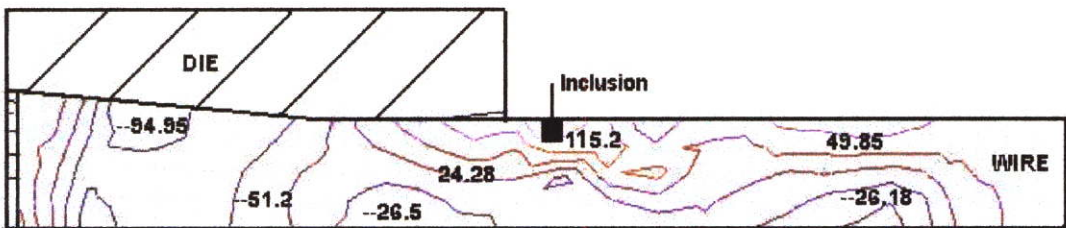


(ข) สิ่งเจือปนอยู่บริเวณด้านใน



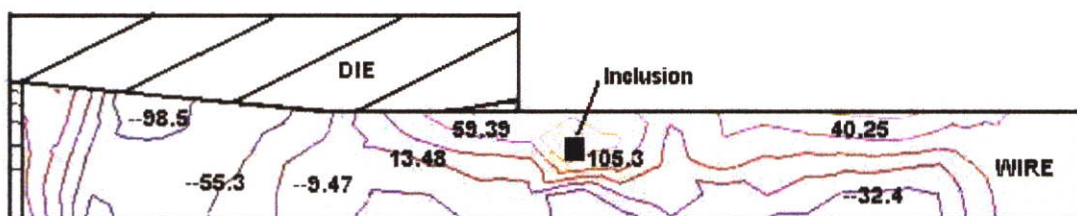
(ค) สิ่งเจือปนอยู่บริเวณแกนกลาง

ภาพที่ 8.25 (ต่อ)

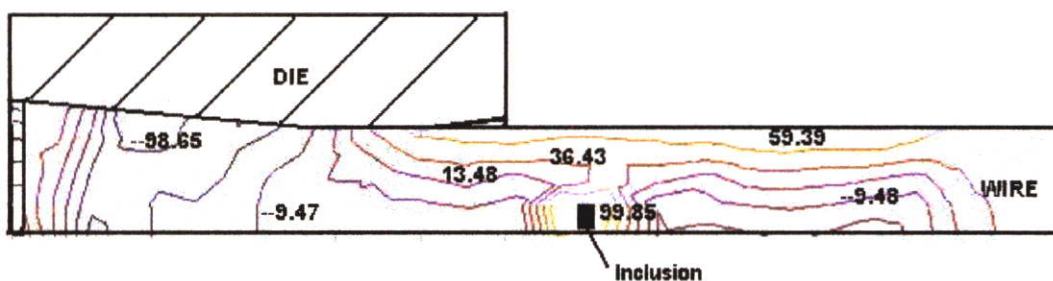


(ก) สิ่งเจือปนอยู่บริเวณผิวด้านบน

ภาพที่ 8.26 แสดงค่า Mean Normal Stress ที่เกิดขึ้นในบริเวณใดๆ มุมครึ่งตาย 8 องศา $Re = 44\%$ จากภาพ 8.26(ก), 8.26(ข) และ 8.26(ค) เป็นการวิเคราะห์หาค่าความเค้นเฉลี่ยในระหว่างการดึงลวดโดยจำลองให้มีสิ่งเจือปน ณ บริเวณใดๆ จะเห็นว่าค่าความเค้นเฉลี่ยสูงในบริเวณที่มีสิ่งเจือปน และความเค้นเฉลี่ยเกิดขึ้นสูงสุดในแบบจำลองที่มีสิ่งเจือปนบริเวณผิวด้านบน

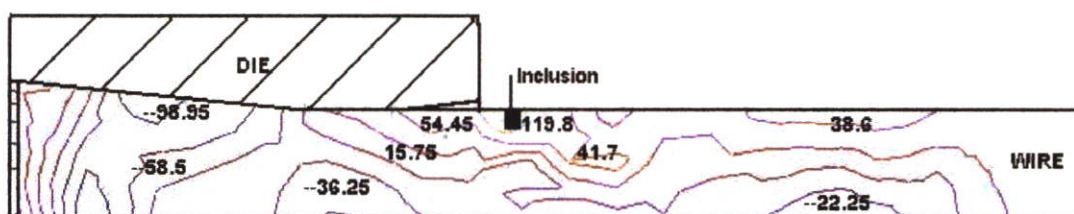


(ข) สิ่งเจือปนอยู่บริเวณด้านใน



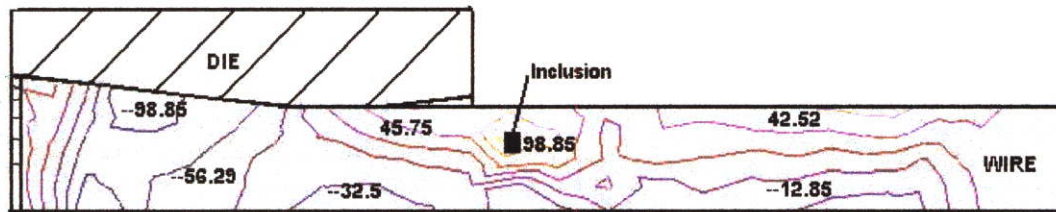
(ค) สิ่งเจือปนอยู่บริเวณแกนกลาง

ภาพที่ 8.26 (ต่อ)

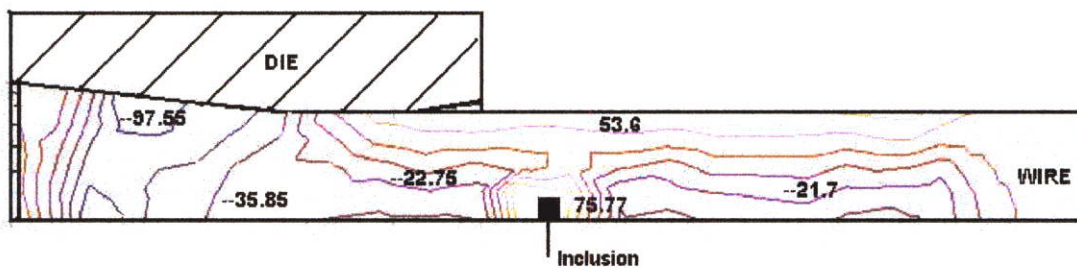


(ก) สิ่งเจือปนอยู่บริเวณผิวด้านบน

ภาพที่ 8.27 แสดงค่า Mean Normal Stress ที่เกิดขึ้นในบริเวณใดๆ มุมครึ่งตาย 10 องศา $Re = 44\%$ จากภาพ 8.27(ก), 8.27(ข) และ 8.27(ค) เป็นการวิเคราะห์หาค่าความเค้นเฉลี่ยในระหว่างการดึงลวดโดยจำลองให้มีสิ่งเจือปน ณ.บริเวณใดๆ จะเห็นว่า ค่าความเค้นเฉลี่ยสูงในบริเวณที่มีสิ่งเจือปน และความเค้นเฉลี่ยเกิดขึ้นสูงสุดในแบบจำลองที่มีสิ่งเจือปนบริเวณผิวด้านบน



(ข) สิ่งเจือปนอยู่ในบริเวณผิวด้านใน



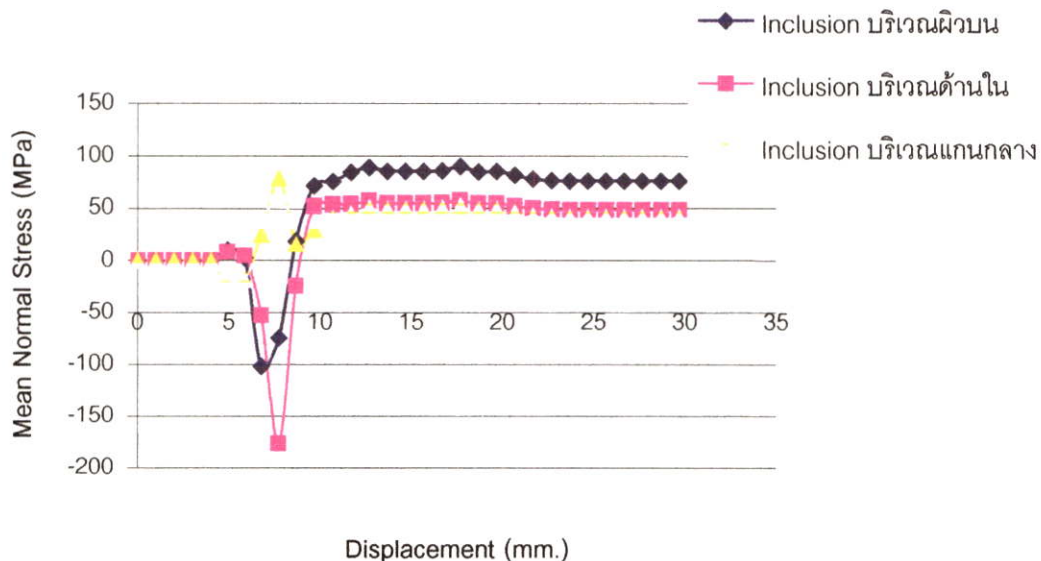
(ค) สิ่งเจือปนอยู่ในบริเวณแกนกลาง

ภาพที่ 8.27 (ต่อ)

ภาพที่ 8.25 ถึง 8.27 เป็นการแสดงให้เห็นการเกิด Mean Normal Stress ในบริเวณต่างๆ ขณะจำลองการดึงลวดที่มีสิ่งเจือปนเกิดขึ้นบริเวณใดๆ และค่าที่เป็นบวกแสดงถึงความเค้นดึงเฉลี่ย ในขณะที่ค่าที่เป็นลบแสดงถึงค่าความเค้นอัดเฉลี่ย สำหรับการวิเคราะห์เฉพาะจุดจะสามารถทำให้เจาะลึกถึงรายละเอียดต่างๆ ได้มากขึ้น โดยจะสามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังนี้

กราฟแสดง Mean Normal Stress ที่เกิดในบริเวณใด ๆ มุมครึ่งตาย 6

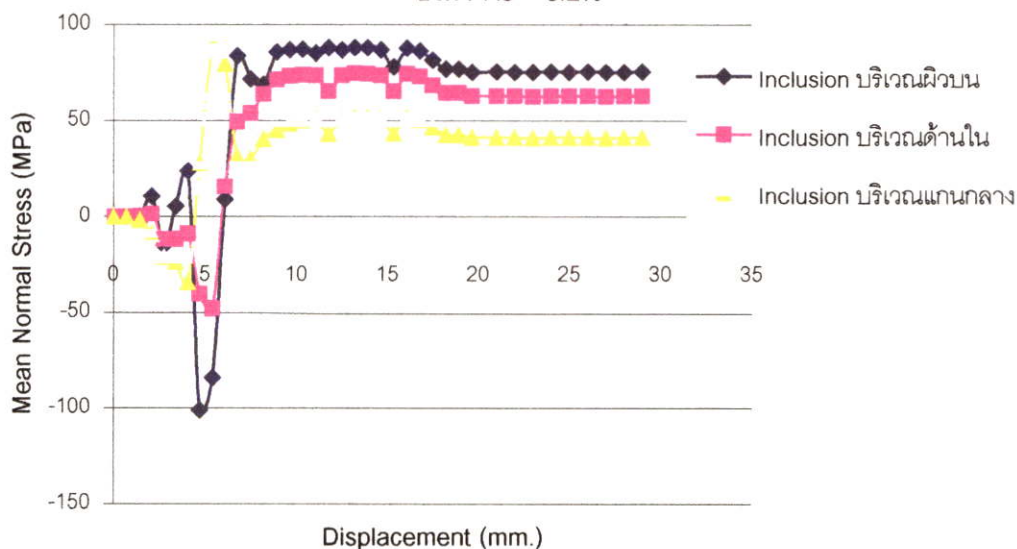
องศา Re = 8.2%



(ก) มุมครึ่งตาย 6 องศา

กราฟแสดง Mean Normal Stress ที่เกิดในบริเวณใด ๆ มุมครึ่งตาย 8

องศา Re = 8.2%

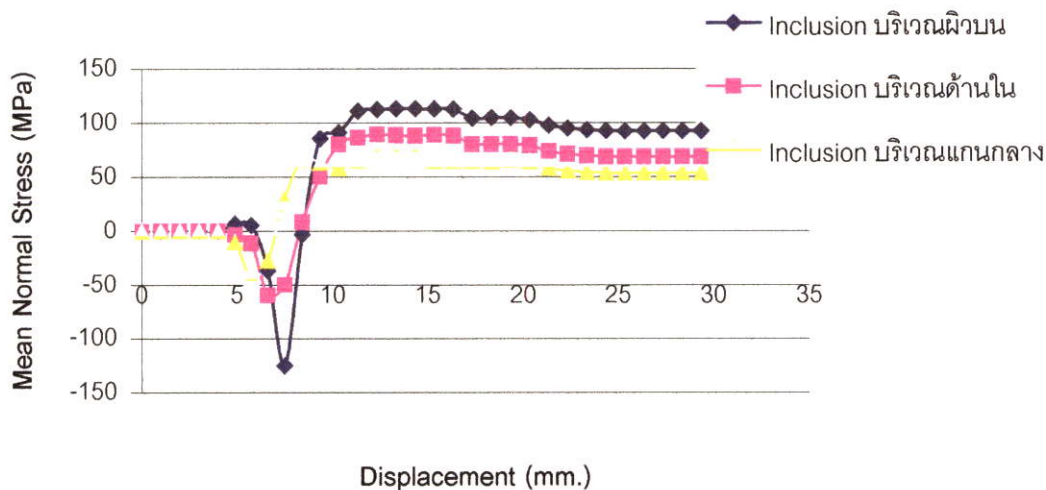


(ข) มุมครึ่งตาย 8 องศา

ภาพที่ 8.28 แสดงกราฟ Mean Normal Stress ณ บริเวณที่มี Inclusion Re = 8.2 % จากภาพด้านบนจะเห็นว่าสิ่งเจือปนที่จำลองไว้บริเวณผิวด้านบนจะมีผลให้เกิดความเค้นเฉลี่ยมากที่สุด

กราฟแสดง Mean Normal Stress ที่เกิดในบริเวณใดๆ มุมครึ่งตาย 6 องศา

Re = 16.6%

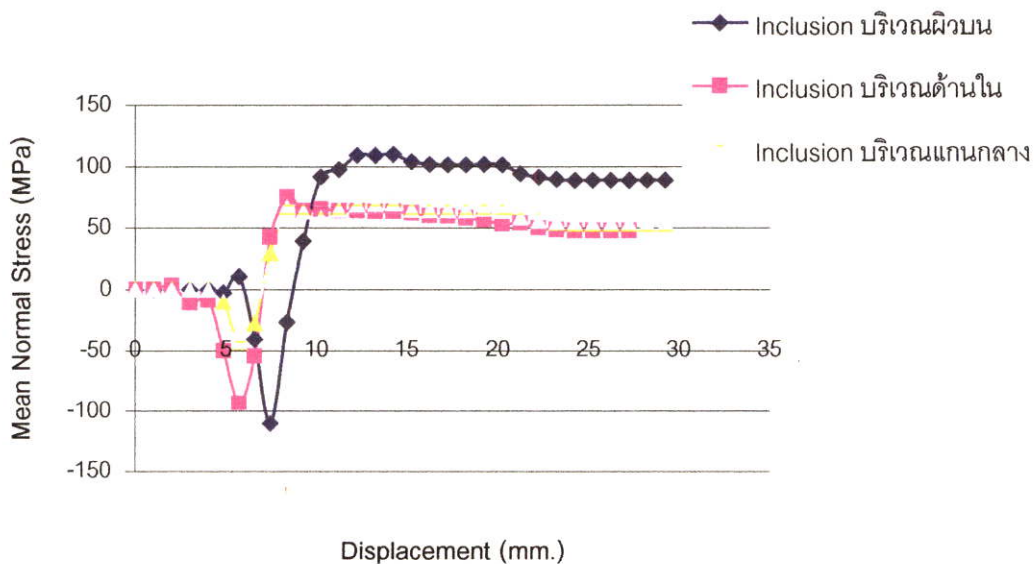


(ก) มุมครึ่งตาย 6 องศา

ภาพที่ 8.29 แสดงกราฟ Mean Normal Stress ณ บริเวณที่มี Inclusion Re = 16.6% จากภาพ 8.29 จะเห็นว่าสิ่งเจือปนที่จำลองไว้บริเวณผิวด้านบนจะมีผลให้เกิดความเค้นเฉลี่ยมากที่สุด

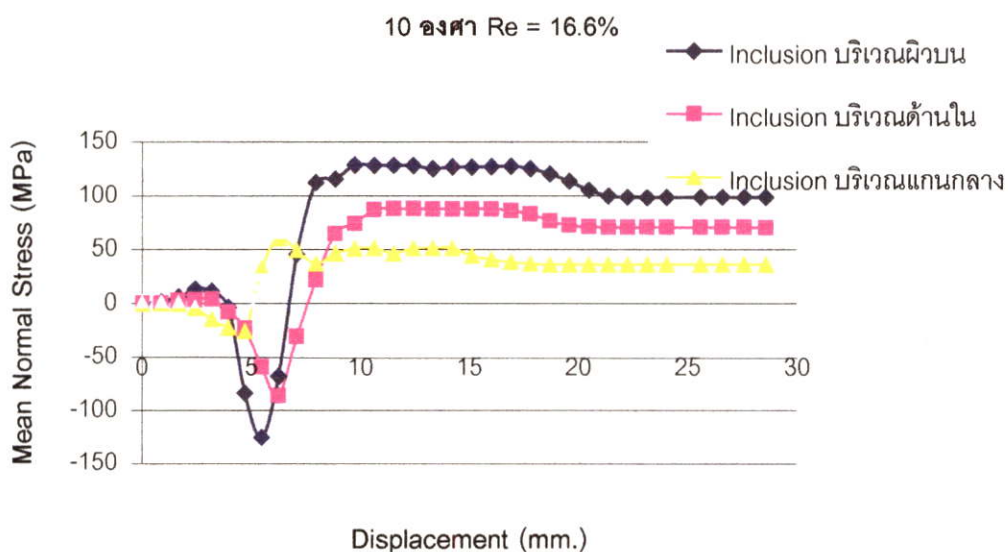
กราฟแสดง Mean Normal Stress ที่เกิดในบริเวณใดๆ มุมครึ่งตาย 8 องศา

องศา Re = 16.6%



(ข) มุมครึ่งตาย 8 องศา

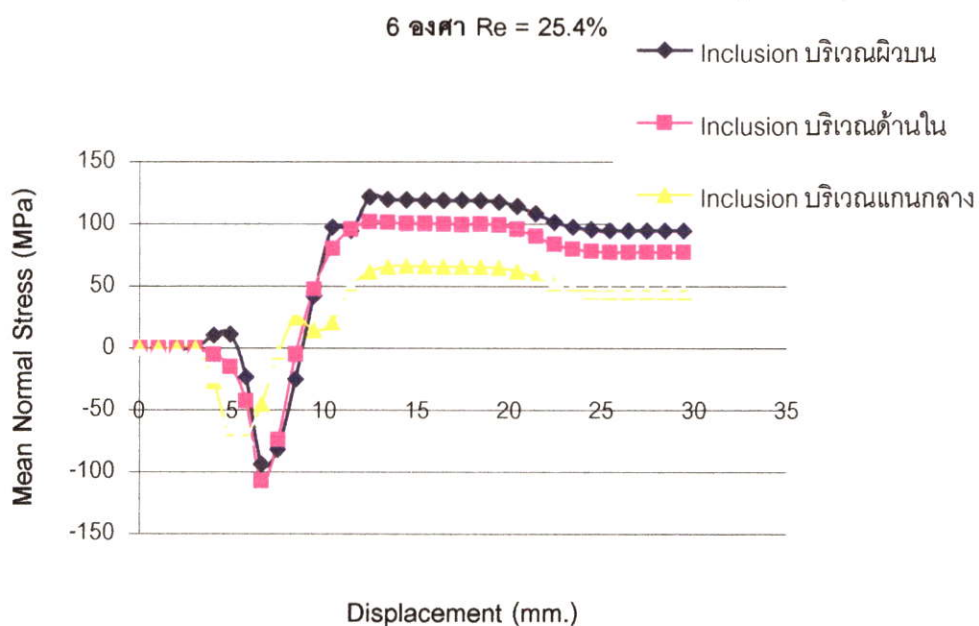
กราฟแสดง Mean Normal Stress ที่เกิดในบริเวณใดๆ มุมครึ่งตาย



(ค) มุมครึ่งตาย 10 องศา

ภาพที่ 8.29 (ต่อ)

กราฟแสดง Mean Normal Stress ที่เกิดในบริเวณใดๆ มุมครึ่งตาย

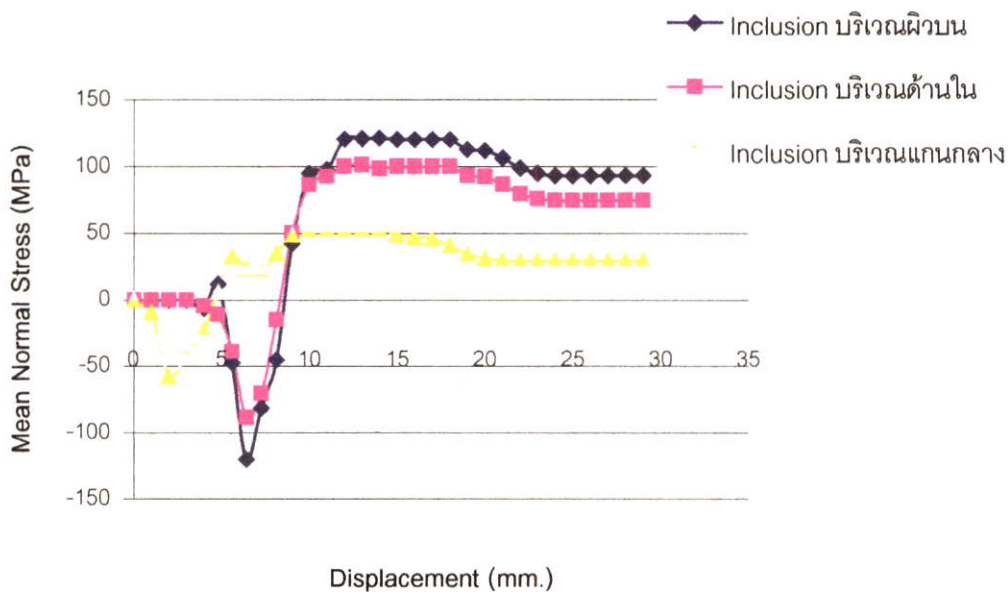


(ก) มุมครึ่งตาย 6 องศา

ภาพที่ 8.30 แสดงกราฟ Mean Normal Stress ณ บริเวณที่มี Inclusion Re = 25.4% จากภาพ 8.30 จะเห็นว่าสิ่งเจือปนที่จำลองไว้บริเวณผิวด้านบนจะมีผลให้เกิดความเค้นเฉลี่ยมากที่สุด

กราฟแสดง Mean Normal Stress ที่เกิดในบริเวณใดๆ มุมครึ่งตาย 8

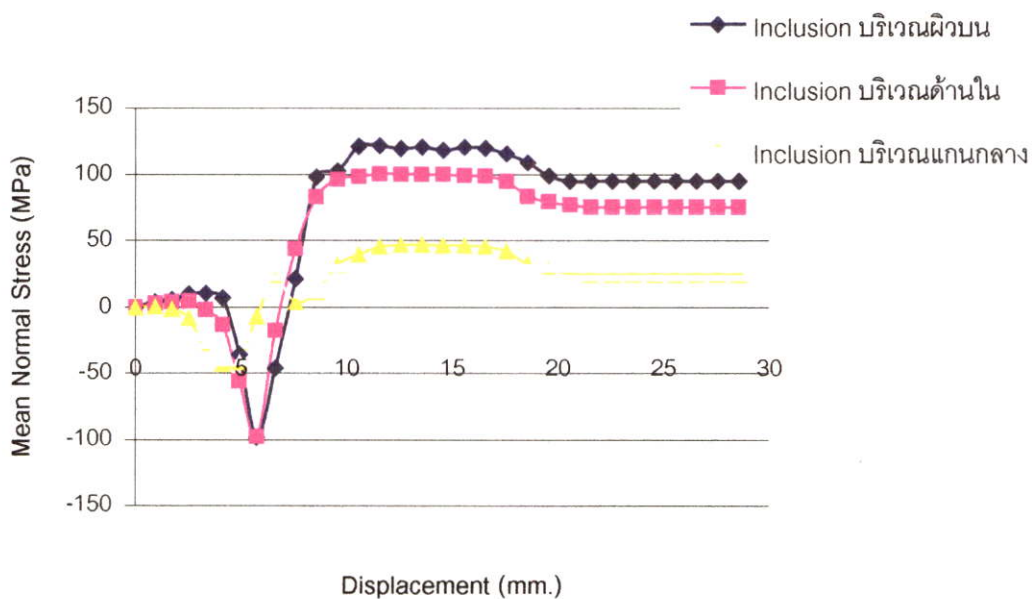
องศา Re = 25.4%



(ข) มุมครึ่งตาย 8 องศา

กราฟแสดง Mean Normal Stress ที่เกิดในบริเวณใดๆ มุมครึ่งตาย 10

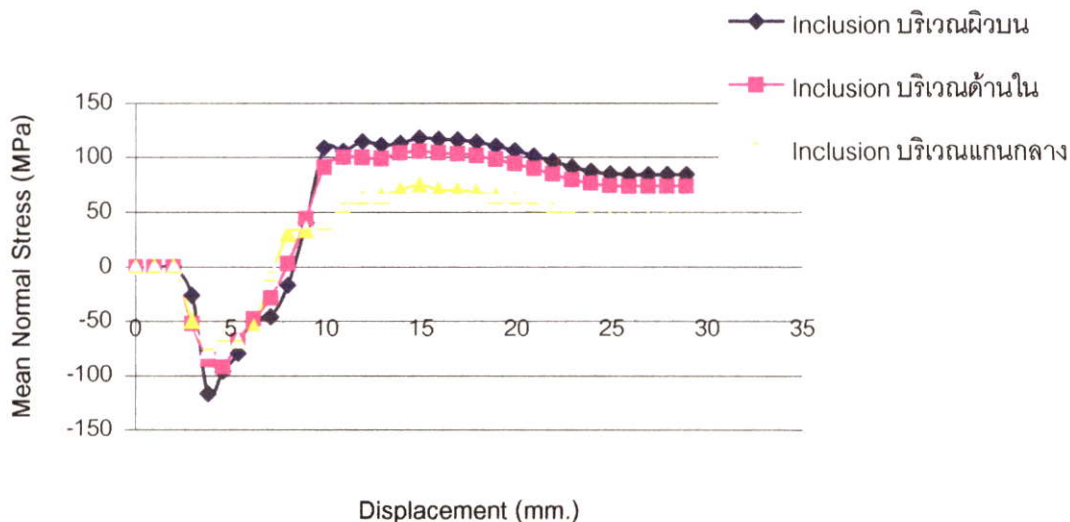
องศา Re = 25.4%



(ค) มุมครึ่งตาย 10 องศา

ภาพที่ 8.30 (ต่อ)

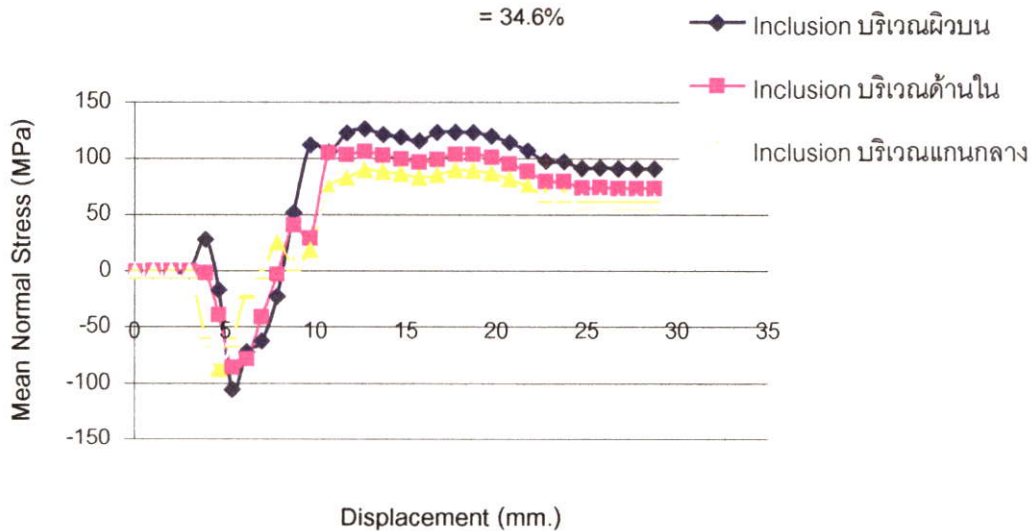
กราฟแสดง Mean Normal Stress ที่เกิดในบริเวณใดๆ มุมครึ่งตาย 6 องศา Re
= 34.6%



(ก) มุมครึ่งตาย 6 องศา

ภาพที่ 8.31 แสดงกราฟ Mean Normal Stress ณ บริเวณที่มี Inclusion Re = 34.6% จากภาพ 8.31 จะเห็นว่าสิ่งเจือปนที่จำลองไว้บริเวณผิวด้านบนจะมีผลให้เกิดความเค้นเฉลี่ยมากที่สุด

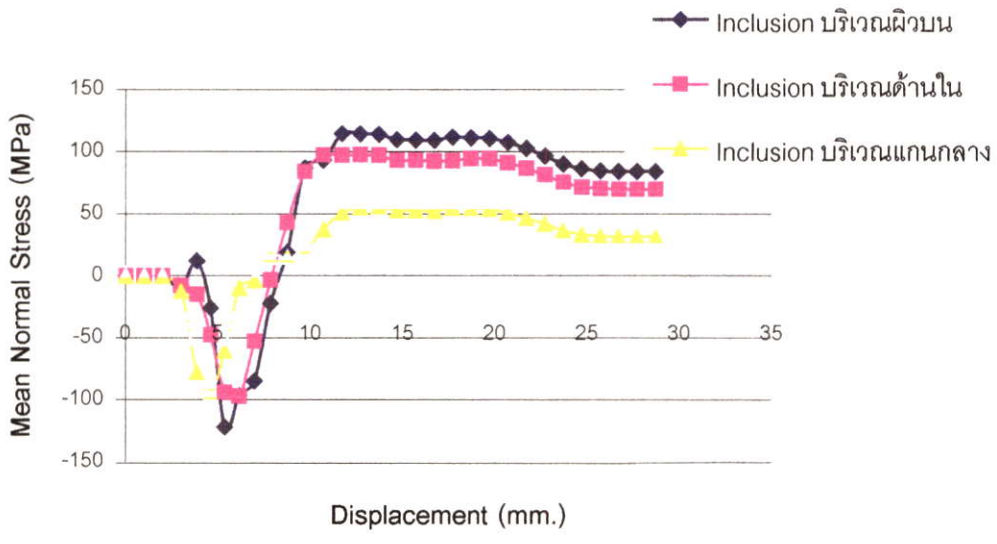
กราฟแสดง Mean Normal Stress ที่เกิดในบริเวณใดๆ มุมครึ่งตาย 8 องศา Re
= 34.6%



(ข) มุมครึ่งตาย 8 องศา

กราฟแสดง Mean Normal Stress ที่เกิดในบริเวณใดๆ มุมครึ่งตาย

10 องศา Re = 34.6%

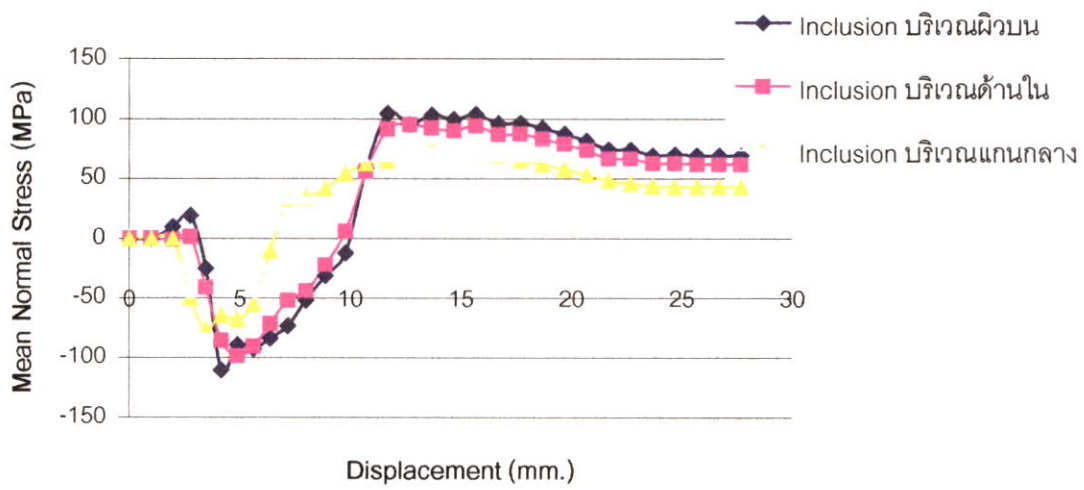


(ค) มุมครึ่งตาย 10 องศา

ภาพที่ 8.31 (ต่อ)

กราฟแสดง Mean Normal Stress ที่เกิดในบริเวณใดๆ มุมครึ่งตาย 6

องศา Re = 44%

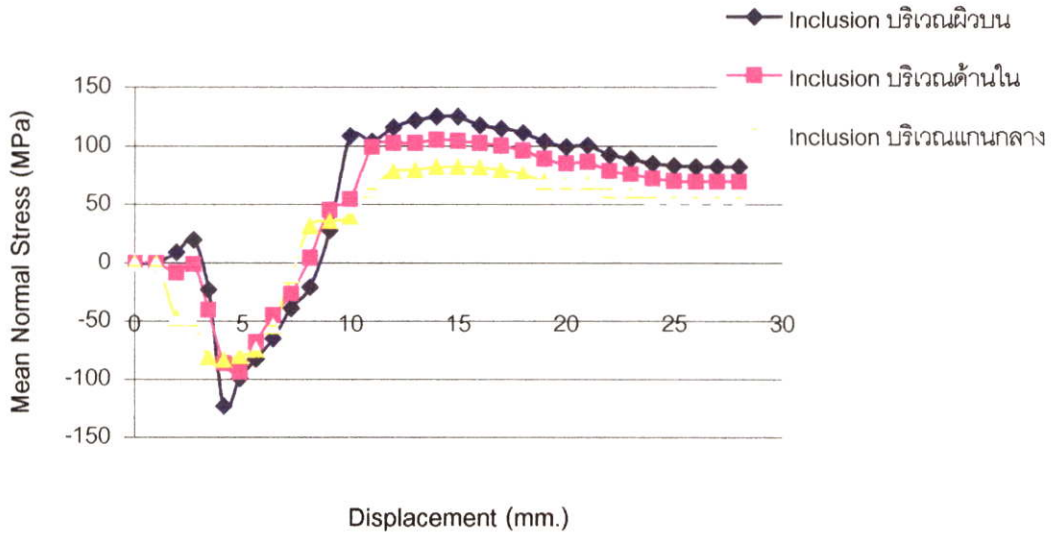


(ก) มุมครึ่งตาย 6 องศา

ภาพที่ 8.32 แสดงกราฟ Mean Normal Stress ณ บริเวณที่มี Inclusion Re = 44% จากภาพ 8.32 จะเห็นว่าสิ่งเจือปนที่จำลองไว้บริเวณผิวด้านบนจะมีผลให้เกิดความเค้นเฉลี่ย

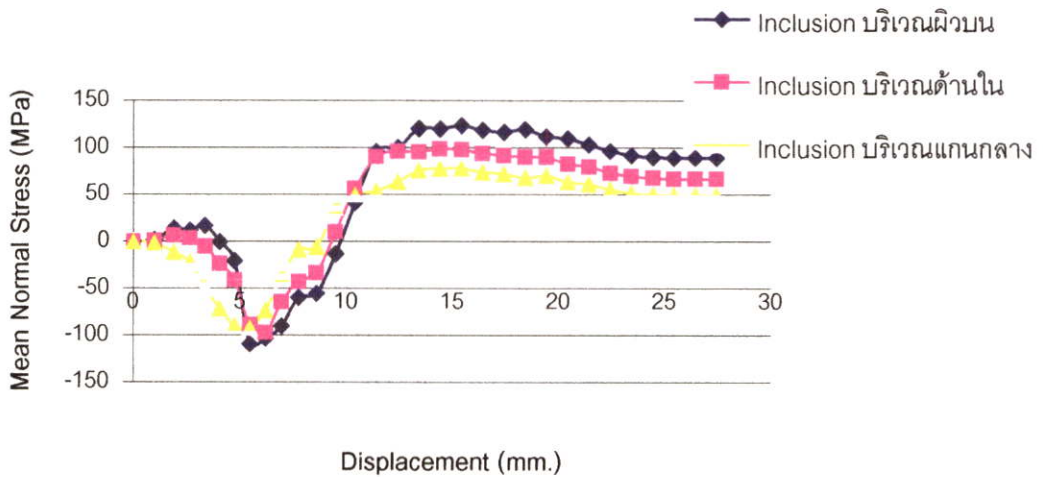
มากที่สุด

กราฟแสดง Mean Normal Stress ที่เกิดในบริเวณใดๆ มุมครึ่งตาย
8 องศา Re = 44%



(ข) มุมครึ่งตาย 8 องศา

กราฟแสดง Mean Normal Stress ที่เกิดในบริเวณใดๆ มุมครึ่งตาย 10
องศา Re = 44%



(ค) มุมครึ่งตาย 10 องศา

ภาพที่ 8.32 (ต่อ)

8.3 สรุปผลการทดลอง

1. จากการทดลองในเบื้องต้นพบว่า การสร้างขึ้นทดสอบอย่างง่ายเปรียบเทียบกับ การสร้างแบบจำลองอย่างง่ายดังในภาพที่ 8.4-8.9 พบว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้น จากการสร้างแบบจำลองมีค่ามากกว่าจากการทดสอบ ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากค่าความผิดพลาดในการสร้างขึ้นทดสอบ
2. ผลที่ได้จากการทดลองในภาพที่ 8.10-8.14 เมื่อดูแนวโน้มของกราฟแล้วพบว่า เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ภาพที่ 8.20-8.24 และจากการวิเคราะห์พบว่าความเค้นที่เกิดขึ้นแตกต่างกันราว 5-10% และสังเกตเห็นว่ากราฟที่เกิดจากการสร้างแบบจำลองจะราบเรียบกว่าจากการทดสอบ ทั้งนี้อาจเกิดจากผิวสัมผัสของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบอันผิดพลาดมาจากกรรมวิธีการผลิต
3. จากการสังเกตแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ภาพที่ 8.16-8.18 พบว่าผิวของเส้นลวดจะเกิดการฉีกขาดได้ง่ายหากมีสิ่งเจือปนอยู่บริเวณผิวด้านบน และจะมีผลมากสำหรับสัดส่วนการลดขนาดที่มาก เห็นได้ชัดจากภาพดังกล่าว
4. ในการวิเคราะห์ค่าความเค้นเฉลี่ยโดยสนามความเค้นที่เกิดขึ้นในเส้นลวดที่อยู่ระหว่างการดึง ภาพที่ 8.25-8.27 พบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยที่อ้างอิงถึง[7] คือในเส้นลวดค่าความเค้นระหว่างเริ่มเข้าตายจะมีค่าเป็นความเค้นอัด และจะมีความขึ้นเกิดขึ้นสูงในบริเวณมีสิ่งเจือปนเกิดขึ้น ค่าความเค้นเฉลี่ย(Mean Normal Stress)ที่เพิ่มมากขึ้นนี้จะทำให้เกิด การขาดของเส้นลวด
5. จากภาพ 8.28 – 8.32 ค่าความเค้นเฉลี่ยจะเกิดขึ้นสูงมาก หากมีสิ่งเจือปนบริเวณผิวด้านบน และมีค่าต่ำเมื่อมีสิ่งเจือปนบริเวณแกนกลาง จากภาพจะสรุปได้ว่า
 1. สัดส่วนการลดขนาดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดความเค้นเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน
 2. การจำลองสิ่งเจือปนในแต่ละตำแหน่งให้ผลที่ต่างกันโดยหากเกิดสิ่งเจือปนบริเวณผิวด้านบนอาจก่อให้เกิดความเสียหายได้มาก
 3. ลวดที่มีขนาดเล็กมากจะมีผลมาก ในกรณีที่เกิดสิ่งเจือปนแกนกลางลวดซึ่งจะทำให้เกิดการฉีกขาดได้ถึงแม้ว่าจะเกิดความเค้นดึงขึ้นเพียงเล็กน้อยก็ตาม

บทที่ 9

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

9.1 บทสรุป

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงขณะการขึ้นรูปด้วยการดึง ลวดที่จำลองให้มีสิ่งเจือปน(Inclusion)เกิดขึ้น ซึ่งอาจทำให้เกิดการขาดขึ้นได้ในระหว่าง กระบวนการดึงขึ้นรูป ในการจำลองให้มีสิ่งเจือปนเกิดขึ้นได้ทำภายใต้สมมุติฐานที่ทำให้เกิดสิ่งเจือปน เกิดขึ้น ณ.บริเวณใดๆของแบบจำลอง โดยกำหนดให้ขนาดและคุณสมบัติของสิ่งเจือปนณ.บริเวณ ไต่นั้นมีค่าเท่าหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด การตั้งสมมุติฐานนี้จะประเมินผลจากการเปลี่ยนแปลง ทางกายภาพ เช่นลักษณะที่เปลี่ยนไปของชั้นทดสอบ ผิวของชั้นทดสอบ และการประเมินจากค่า ความเค้นเฉลี่ย(Mean Normal Stress)ที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง หรือชั้นทดสอบ ในการสร้าง แบบจำลองนั้นอาศัยโปรแกรมในการช่วยวิเคราะห์ซึ่งจะสามารถจำลองสิ่งเจือปนให้เกิดขึ้นได้ตาม สมมุติฐานที่ตั้งไว้ พร้อมกับสร้างชุดทดสอบการดึงขึ้นมادت้วยเพื่อทำการทดสอบไปด้วยกัน ในการ สร้างแบบจำลองและทดสอบจะกำหนดให้ชั้นทดสอบเป็นทองแดง(copper) ให้มีขนาดครึ่งมุมตาย (Die Angle) เท่ากับ6,8 และ10องศา ตามความเหมาะสม และให้แบบจำลองและชั้นทดสอบมี อัตราการลดขนาดในช่วง 8-40% ผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ขนาดของมุมตายที่ใช้ได้ดีในการดึงขึ้นทดสอบนี้อยู่ในช่วง 6-8 องศา โดยวิเคราะห์ จากระยะยืด และแรงที่ในการดึง ที่สอดคล้องกันทั้งการสร้างแบบจำลอง และจากการ ทดสอบ
2. วิเคราะห์แบบจำลองเราจะสังเกตเห็นรอยฉีก และการแตกร้าวเกิดขึ้นได้ง่ายในบริเวณ ที่อยู่ระหว่างสิ่งเจือปน และลวดที่เกิดจากความเค้นดึงที่มากในบริเวณรอบๆที่มี สิ่งเจือปน และหากกำหนดให้มีสิ่งเจือปน ณ.บริเวณใดๆพบว่า
 - 2.1 จำลองให้สิ่งเจือปนอยู่บริเวณผิวด้านนอกของแบบจำลองพบว่าเกิดความเค้น ดึงเฉลี่ยมากที่สุด แต่จะทำให้ผิวของแบบจำลองชำรุดได้ง่าย จะให้เกิดการชำรุด ของผิวลดลงหากลดความเร็วในการดึง
 - 2.2 จำลองให้สิ่งเจือปนอยู่บริเวณด้านในของแบบจำลองในพบว่าเกิดความเค้นดึง เฉลี่ยเกิดขึ้นมาก กรณีนี้จะทำให้เกิดการขาด หรือความเสียหายได้เช่นกัน และจะ มีผลการฉีกขาดได้ง่ายสำหรับวัสดุที่มีความแข็งน้อย จะให้เกิดความเสียหายลด ลงหากใช้การดึงเป็นขั้น คือให้อัตราการลดขนาดลดลงแต่ดึง หลายครั้ง
 - 2.3 จำลองให้สิ่งเจือปนอยู่บริเวณแกนกลางของแบบจำลองพบว่าเกิดความเค้นแรง

ดึงเฉื่อยน้อยที่สุด แต่จะเกิดความเค้นอัดมาก ในกรณีนี้จะทำให้เกิดการขาดหรือความเสียหายได้เมื่อขนาดของชิ้นงานมีขนาดเล็ก

3. จากการวิเคราะห์การดึงลวดด้วยวิธีไฟในทอิลิเมนต์ ถ้าสิ่งเจือปน ณ. ตำแหน่งที่อยู่ด้านในสุดมีขนาดที่โตในระดับหนึ่งจะทำให้เกิดการ crack ได้ง่ายอันเนื่องมาจากค่าความเค้นดึงที่เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว
4. พบว่าเมื่อมีสิ่งเจือปนเกิดขึ้นในเส้นลวด สิ่งเจือปนเพียงเล็กน้อยจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความแข็งแรงของลวดเปลี่ยนแปลงไป

9.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองที่ได้พบว่าแนวโน้มของค่าที่ได้มีลักษณะสอดคล้องกับการสร้างแบบจำลองที่อาศัยโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ ซึ่งจะทำให้สามารถทำนายผลที่จะเกิดขึ้นได้ล่วงหน้าโดยไม่ต้องทดสอบ และผลการทดลองที่คาดเคลื่อนไปจากการสร้างแบบจำลองอาจเป็นเพราะ

1. การนำสิ่งเจือปนไปแทรกในชิ้นงานทดสอบที่ทำให้ลักษณะการเชื่อมประสานของเนื้อวัสดุมีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป
2. การจำลองโดยแบบจำลองไม่ได้คิดถึงตัวแปรของอุณหภูมิ ซึ่งอาจทำให้เกิดการคาดเคลื่อนขึ้น
3. ในการสร้างชิ้นงานทดสอบยังคงมีข้อจำกัดอยู่มากในการจำลองตำแหน่งของสิ่งเจือปนจึงไม่สามารถทำการสร้างชิ้นทดสอบมาเทียบกับการจำลอง ในหลายกรณี
4. ความผิดพลาดจากความยากในการจำลองสิ่งเจือปนลงในชิ้นทดสอบจริงเป็นอุปสรรคอย่างมากในการสร้างชิ้นทดสอบจริง ซึ่งนอกจากกรรมวิธีในการจำลองสิ่งเจือปนที่ยากแล้ว การให้ความร้อนในการจำลองสิ่งเจือปนลงในชิ้นทดสอบยังเป็นอุปสรรคที่สำคัญอย่างหนึ่งด้วย ต่อคุณสมบัติของวัสดุ ฉะนั้นจึงควรมีการหล่อเย็นบริเวณรอบ รอบในระหว่างการจำลองสิ่งเจือปนลงในชิ้นทดสอบจริง

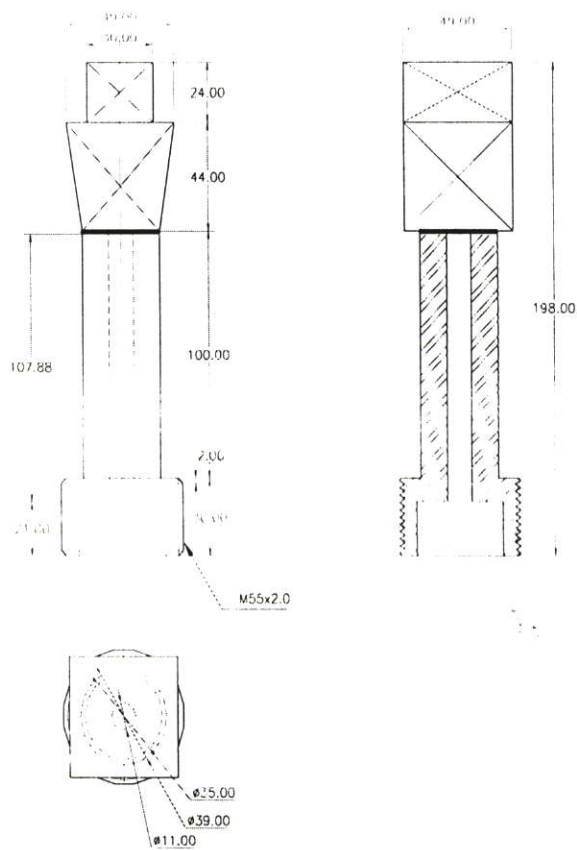
อย่างไรก็ตามวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงถึงการอาศัยการสร้างแบบจำลองช่วยวิเคราะห์ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (plasticity) ในการจำลองรูปแบบที่ไม่สามารถทำการทดสอบได้ในบางกรณี เช่นการสร้างให้มีสิ่งเจือปนบริเวณแกนกลางชิ้นทดสอบ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] ดำรง ไชยธีรานุกัฒศิริ, การขึ้นรูปโลหะ, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2521
- [2] ศาคร คันธโชติ, กรรมวิธีการผลิต, สำนักพิมพ์ไอบีเอนสโตร, พิมพ์ครั้งที่ 1, 25
- [3] J.Charkrabarty , Theory of Plasticity ,McGraw-Hill International Editions ,1987
- [4] Edward M. Mielnik, "Metalworking Science and Engineering",397-463
- [5] Honma, T. "Shape memory alloys and their application." J.JSME., 1984. pp.87-786
- [6] Kazunari Yashida, Hiroshi Tanaka."The drawability of Ni-Ti shape-memory alloy wires." Wire and bar.,no.2, 1995. pp.89-94.
- [7] Kazunari Yashida."FEM analysis of wire breaks in drawing of superfine wire with an inclusion." WIRE JOURNAL INTERNATIONAL.,March 2000. pp.102-107.

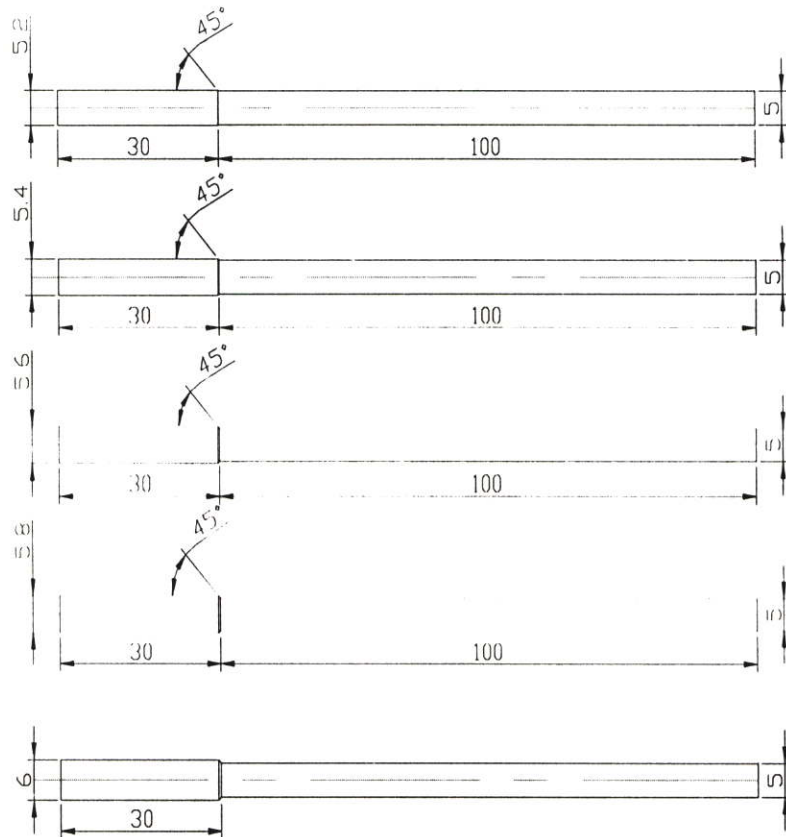
ภาคผนวก ก.

แบบของอุปกรณ์พิเศษที่นำมาประกอบการทดสอบ



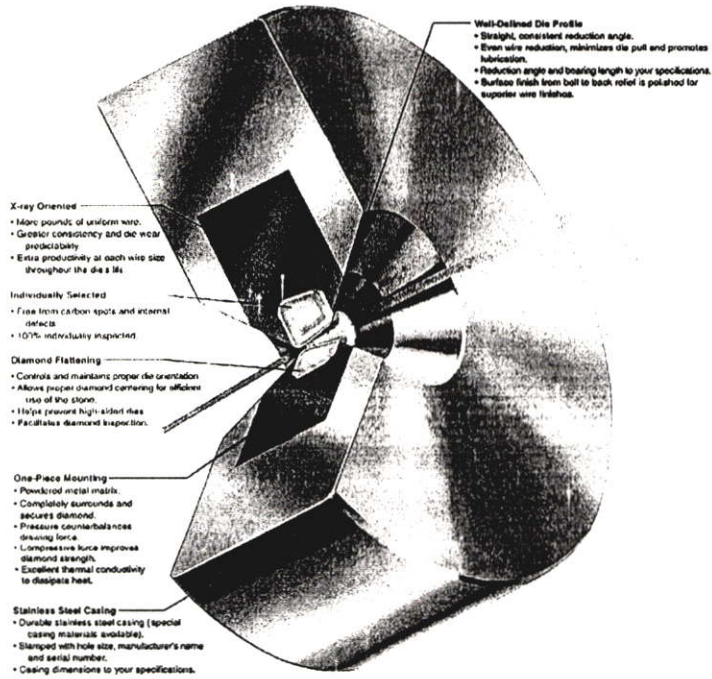
ภาคผนวก ข.

แบบลวดที่ใช้ในการทดสอบ



ภาคผนวก ค.

องค์ประกอบของดายที่ใช้ในปัจจุบัน



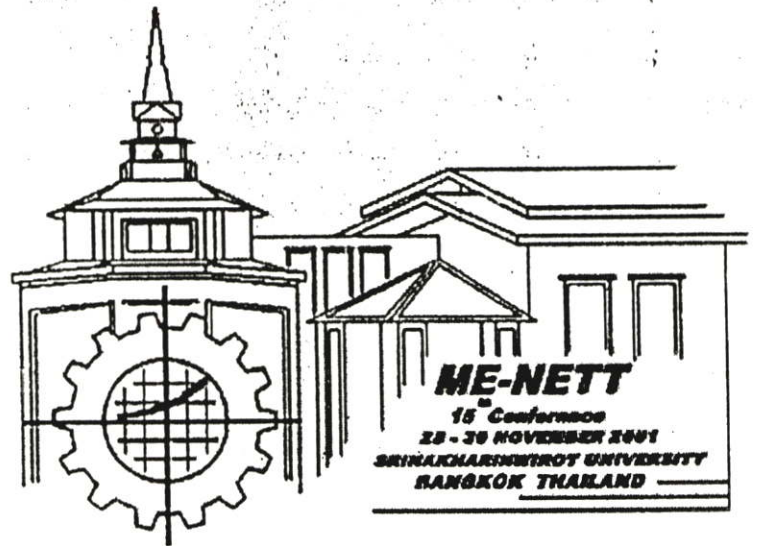
ภาคผนวก ง.

ดาบที่ใช้ในปัจจุบัน



ภาคผนวก จ.

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์



บทความวิชาการ : การประชุมวิชาการ
เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย
ครั้งที่ 15

เล่มที่ 2
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

บทความสาขา Mechanics of Materials

หน้า

- | | | |
|-----|---|----------|
| 1. | พฤติกรรมถาวรของตัวอ่อนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดฟิล์มบางมากที่มีการลามุมเทเปอร์ในระนาบเก็บข้อมูลทางแม่เหล็กไฟฟ้า
มงคล มงคลวงศ์โรจน์, วลีพรรณ กันเนื่อง | MM 1-5 |
| 2. | Thermal Model of Ultra-Thin Film Head Slider in Magnetic Storage Devices
มงคล มงคลวงศ์โรจน์, เมษา มณจิวาลัยพร | MM 6-12 |
| 3. | การออกแบบขนาดที่เหมาะสมที่สุดของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าชนิด Truncated Cycloidal
มงคล มงคลวงศ์โรจน์, ขาโยธู วงศ์สีดาแก้ว | MM 13-18 |
| 4. | การวิเคราะห์พฤติกรรมทางไดนามิกส์ของรถขณะเลี้ยวโค้ง
มงคล มงคลวงศ์โรจน์, ปิยวิทย์ มหาโพธิ์ | MM 19-24 |
| 5. | การหล่อลื่นของกาบรองลื่นเหล็กกล้าแบบทอร์โมไฮโดรไดนามิกส์ด้วยน้ำมันถั่วเหลือง
มงคล มงคลวงศ์โรจน์, อุทาน หนูจันทร์แก้ว | MM 25-30 |
| 6. | การวิเคราะห์การขาดของสวดในระหว่างการผลิตที่มีสิ่งเจือปนด้วยวิธีไฟไนท์ลิเมนต์
สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ, เพงศักดิ์ นิสกุล | MM 31-36 |
| 7. | วิธีการประมาณสมการอัตราเติบโตของรอยร้าวลำ
จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ | MM 37-42 |
| 8. | ผลกระทบของขนาด รูปร่าง และทิศทางของชิ้น ของขึ้นไต้ยต่อความแข็งแรงของโอเอสแอล
สุธีระ ประเสริฐสุวรรณ, วรวิฑู วิชาญเมธางกูร, ทัมยศ จิรสถิตสิน | MM 43-49 |
| 9. | Measurement of the Buckling Loads and Modes of Stiffened Composite Panels
ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ | MM 50-55 |
| 10. | การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นชั้นการหน่วงแบบบังคับเพื่อลดความสั่นสะเทือนในคาน
จักร จันทลักษณ์ | MM 56-61 |
| 11. | การพิจารณาอุปกรณ์ Spatial Remote Center of Compliance เสมือนเป็นแขนกลขนาน
ธรรมรัตน์ กิตติพงษ์วัฒนา, ชิต เหล่าวัฒนา | MM 62-65 |
| 12. | การศึกษาอิทธิพลระยะห่างของตำแหน่งครอว์บีดจากขอบของคานที่มีผลต่อการลากชิ้นรูปงานกลึงที่
เหลี่ยมผืนผ้าของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม
ไพฑูลย์ หาญมนต์ | MM 66-70 |
| 13. | Determination of Metal Forming Press Accuracy Using a Laser Based System
Dipl.-Ing Jan Walkert, Kusol Prommul | MM 71-75 |
| 14. | A Decoupled Electrical - Thermal and Mechanical Model for Resistance Spot Welding
C. Srikunwong, T. Dupuy, Y. Bienvenu | MM 76-84 |
| 15. | การศึกษาแรงต้านทานรวมที่กระทำต่อใบมีดของรถไถพรวนขนาดเล็ก
สุรินทร์ พงศ์สุภสมิทธิ, ชนัดต์ รัตนสุมาวงศ์, พงศชาติ ชิประชา, สุรัชย์ วงษ์ทัศนีย์กร, อธิป สิทธิโชค
พันธ์ | MM 85-92 |

การวิเคราะห์การขาดของลวดในระหว่างการดึงลวดที่มีสิ่งเจือปนด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์

AN ANALYSIS OF WIRE BREAKS OF A WIRE WITH AN INCLUSION DURING WIRE DRAWING BY FINITE ELEMENT METHOD

รศ.สมชัย นรเศรษฐโสภณ , พงษ์ศักดิ์ นิสปกกุล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร 66(2)326-9987 , โทรสาร 66(2)326-9053 , E-Mail: s3062031@kmitl.ac.th

Somchai Norasethasopon , Pongsak Nissapakul
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut 's Institute of Technology Ladkrabang
Chalongkung Road Ladkrabang Bangkok Thailand 10520
Tel : (662)326-9987 , Fax : (662)326-9053 , E-Mail: s3062031@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลของการวิเคราะห์การขาดของลวดที่มีสิ่งเจือปนอยู่ ณ ตำแหน่งใดๆในเส้นลวดระหว่างการดึงลวดผ่านตายด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ โดยใช้วิธีการทดลองและนำเสนอผลกระทบของมุมตายที่มีต่อความเค้นดึงในเส้นลวดทองแดงซึ่งดึงด้วยอัตราลดขนาดลง 10 % ไว้ด้วย จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้ทราบค่ามุมครึ่งตายที่เหมาะสมสำหรับการดึงขึ้นรูปลวดทองแดง แล้วใช้ค่ามุมครึ่งตายที่เหมาะสมจากการทดลองดังกล่าวทำการวิเคราะห์ผลของสิ่งเจือปน ณ ตำแหน่งใดๆในเส้นลวดที่กระทบต่อการขาดของเส้นลวดในระหว่างการดึงลวดด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์นั้นนับได้ว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

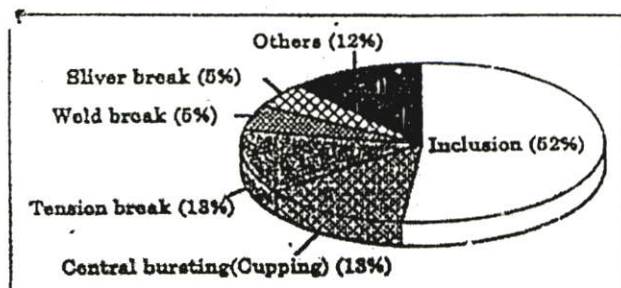
ABSTRACT

This research presents the analysis results of wire breaks of a wire with a random location inclusion during wire drawing by finite element method. The effects of die angle on the drawing stress during the single-pass 10 % reduction copper wire drawing by experiment are also presented. The optimum half-die angle for copper wire drawing is found. By using this experimental optimum half-die angle, the effects of a random location inclusion on wire break of a wire during wire drawing are investigated. These finite element analysis results are satisfied.

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตของกระบวนการดึงขึ้นรูปโลหะมีความก้าวหน้าไปอย่างมากหากแต่ว่าก็ยังคงต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตกันต่อไปอย่างต่อเนื่อง การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตดังกล่าวทำกันอยู่ในหลายรูปแบบ และหลากหลายวิธี วิธีหนึ่งที่ยอมรับในการ

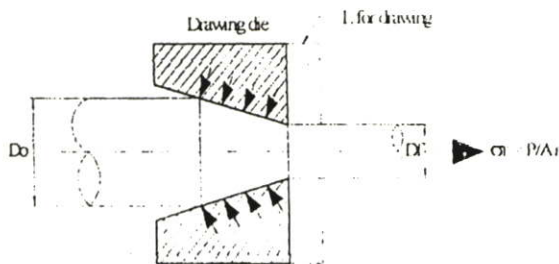
พัฒนากระบวนการผลิตการดึงขึ้นรูปโลหะก็ คือ ใช้วิธีสร้างรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Math Model) ขึ้นมาศึกษาแก้ปัญหา นอกจากนั้นแล้วการพัฒนาทางงานวิจัยทางด้านการดึงขึ้นรูปโลหะที่จำเป็นที่จะต้องทำอีกวิธีหนึ่ง คือ การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆต่อความเค้นและพฤติกรรมของลวดและตาย (Die) จากการทำทดลอง (Experiment) ควบคู่กันไปด้วย เพื่อจะได้เปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณ กับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองว่าถูกต้องหรือเป็นไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในทางอุตสาหกรรมการผลิต เพราะหากกำหนดวิธีการผลิตที่ถูกต้องแล้วจะทำให้สามารถประหยัดเวลา ต้นทุนการผลิตลดลง และยังได้งานเพิ่มขึ้นอีกด้วย งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการและผลการศึกษารายละเอียดของการเกิดสิ่งเจือปนขึ้นในเส้นลวดขณะดึงขึ้นรูปด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์ เพื่อจะได้เป็นแนวทางในการศึกษาถึงผลกระทบของตัวพารามิเตอร์อื่นๆที่สำคัญ รวมทั้งพฤติกรรมของลวดและตายที่เกิดจากการดึงขึ้นรูปโลหะต่อไป ซึ่งจะเป็นแบบอย่างที่ดีในการพัฒนา ออกแบบหรือคำนวณที่ถูกต้อง และเหมาะสมต่อไป ในรูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของสิ่งเจือปนที่มีผลกระทบต่อขาดของลวดระหว่างการดึงลวดมากถึง 52% เมื่อเทียบกับการขาดจากสาเหตุอื่น [2]



รูปที่ 1 อิทธิพลของสิ่งเจือปนในเส้นลวดที่มีผลกระทบต่อขาดในระหว่างการดึงขึ้นรูปลวด

2. ทฤษฎี

สิ่งสำคัญอย่างยิ่งสิ่งหนึ่งในกระบวนการดึงขึ้นรูปโลหะที่จะต้องพิจารณอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้เลยก็คือ ความเค้นดึงที่เกิดขึ้นในเส้นลวดขณะดึงขึ้นรูปโลหะ เพราะความเค้นดึงในเส้นลวดจะเป็นตัวแปรสำคัญที่จะมีผลต่อการขาดของเส้นลวดขณะดึงขึ้นรูป การออกแบบตายที่ดีจะช่วยให้สามารถลดค่าความเค้นดึงนี้ลงได้



รูปที่ 2 ลักษณะของเส้นลวดที่ไหลผ่านตาย ความเค้นดึง และความเค้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นลวดกับตาย

ความเค้นที่เกิดขึ้นในเส้นลวดขณะไหลผ่านตายจะเป็นความเค้นที่มีคุณสมบัติอยู่ในช่วงพลาสติกของวัสดุที่ใช้ทำลวดนั้นๆ การ Deform ของเส้นลวดก็เกิดการ Deform อยู่ในช่วงพลาสติกเช่นกัน คือเป็นการ Deform อย่างถาวร ลักษณะของเส้นลวดที่ไหลผ่านตาย ความเค้นดึง และครวมเค้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นลวดกับตาย จะเป็นดังแสดงในรูปที่ 1

จากหลักสภาวะการแปรรูปของความเค้น การดึงลวดผ่านตายรูปทรงกรวย ไม่เกิดการสูญเสียแรงเฉือนภายใน และแรงเสียดทานภายนอก ดังนั้นสมการความเค้นที่เกิดจากการดึงลดขนาดในกรณีนี้เป็นการ Deform แบบโฮโมจีเนียส จึงเขียนได้เป็น

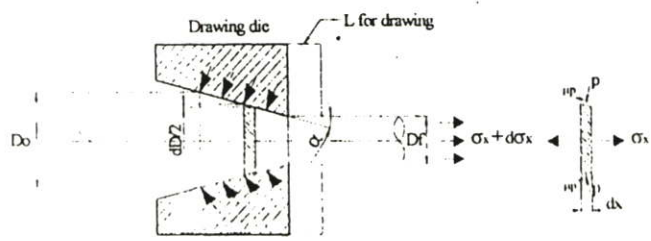
$$\sigma = \bar{\sigma} \ln \frac{A_0}{A_f} = \bar{\sigma} \ln \left(\frac{1}{1-r} \right) \quad \dots(1)$$

- เมื่อ σ = ความเค้น
- A_0 = พื้นที่หน้าตัดด้านทางเข้าตาย
- A_f = พื้นที่หน้าตัดด้านทางออกของตาย
- r = สัดส่วนการลดพื้นที่หน้าตัด $(A_0 - A_f) / A_0$

พิจารณาค่าแก้สำหรับแรงเสียดทานภายใน และแรงเฉือนภายนอกที่เกิดการสูญเสีย จากสมการข้างบนสามารถเขียนได้ใหม่ ดังนี้

$$\sigma = c_f(\alpha) c_r(\alpha, r) \bar{\sigma} \ln \frac{A_0}{A_f} \quad \dots(2)$$

$$\sigma = c_f(\alpha) c_r(\alpha, r) \bar{\sigma} \ln \frac{1}{1-r} \quad \dots(3)$$



รูปที่ 3 องค์ประกอบของความเค้นที่เกิดขึ้นบนเส้นลวดในช่วงความยาว dx ขณะเส้นลวดถูกดึงผ่านตาย

จากรูปที่ 3 สามารถเขียนสมการผลรวมของแรงในแนวแกน x ได้คือ

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

เมื่อ D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลาง และ α เป็นมุมครึ่งหนึ่งของตาย ดังแสดงในรูปที่ 2

ถ้าไม่คิดผลของค่าที่มีขนาดเล็ก และจะง่ายขึ้น โดยที่

$$D d\sigma_x + 2[\sigma_x + p(1 + \mu \cot \alpha) dD] = 0 \quad \dots(5)$$

$$2r dr d\sigma_x + r^2 d\sigma_x + 2p dr + \frac{2r dr r}{\tan \alpha} = 0 \quad \dots(6)$$

ในทำนองเดียวกัน พิจารณาผลรวมของแรงในแนวรัศมี จะได้ความเค้นในแนวรัศมี หรือความเค้นที่จะทำให้ตายแตก (Die-Breaking Stress) คือ

$$\sum F_r = \sigma_r (\pi D dx) + \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha - \mu p \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha = 0 \quad \dots(7)$$

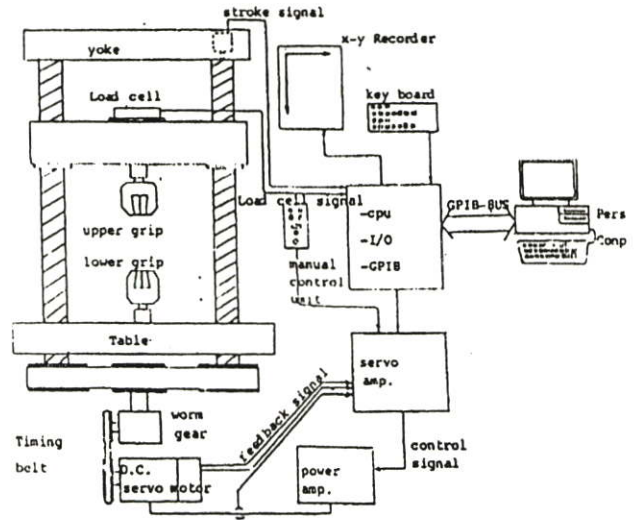
และ

$$\sigma_r = -p(1 - \mu \tan \alpha) \quad \dots(8)$$

ในกรณีที่มุมมีขนาดเล็ก $\mu \tan \alpha$ ไม่จำเป็นต้องนำมาคิดได้ แผล $\sigma_r = -p$ ให้ $b = \mu \cot \alpha$ ทำการอินทิเกรตผลลัพธ์สมการอนุพันธ์ และจัดรูปสมการใหม่ให้ง่ายขึ้น ได้สมการความเค้นดึงเฉลี่ยเป็น

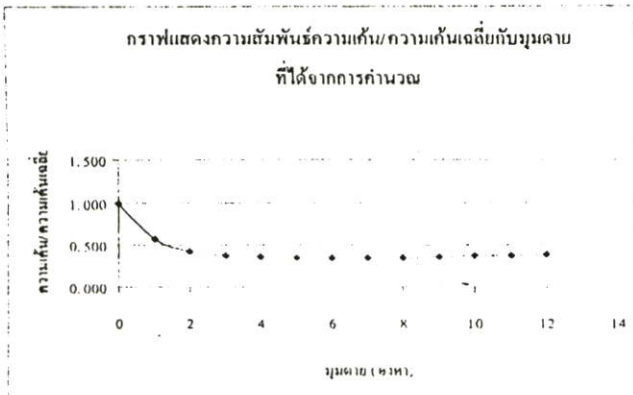
$$\frac{\sigma}{\bar{\sigma}} = \left[1 + \frac{1}{B} \right] \left\{ 1 - \left[\frac{D_f}{D_0} \right]^{2n} \right\} \quad \dots(9)$$

- B = $\mu \cot \alpha$
- D_0, D_f = เส้นผ่าศูนย์กลางก่อนและหลังการดึง
- α = มุมครึ่งตาย
- μ = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
- $\bar{\sigma}$ = ความเค้นไหลเฉลี่ย (Mean Flow Stress)



รูปที่ 5 โดอะแกรมของเครื่องทดสอบ

1. เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ระบบขับเคลื่อน วัตผล และบันทึกผลควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ แรงดึงสูงสุด 10 ตัน มีโดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 5
2. ชุดหัวจับตายซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อใช้จับยึดตายขณะทำการทดลอง
3. ชุดของตัวตายที่มีขนาดของมุมเอียงต่าง ๆ กันได้แก่ขนาดมุม 4°, 6°, 8°, 10° และ 12°
4. ลวดหรือชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบใช้กับมุมครึ่งตายขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้วัสดุทองแดง ลวดขนาดคิดเป็นการลดขนาด 10 % และ 20 % ของขนาดเดิม

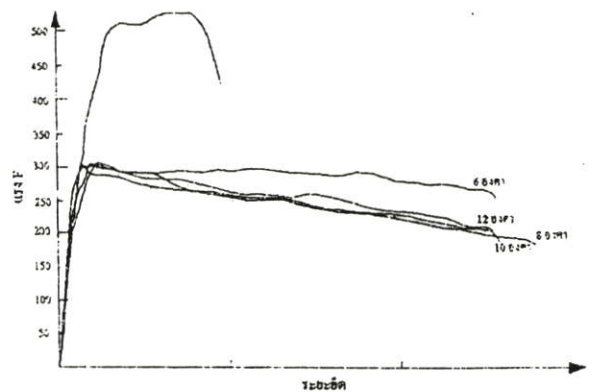


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ความเค้นต่อความเค้นเฉลี่ยกับมุมตายที่ได้จากการคำนวณ

3. วิธีการวิเคราะห์ และการประเมินผลในเบื้องต้นเพื่อหาค่าความเหมาะสมจากการทดลอง

ในเบื้องต้นจะทำการทดลองเพื่อหาค่ามุมตายที่เหมาะสมสำหรับใช้ในกรณีพัฒนาการวิเคราะห์ลวดกรณีที่มีสิ่งเจือปนเข้ามาเกี่ยวข้องกับตัว ซึ่งสิ่งเจือปนนี้จะเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการขาดจากกระบวนการดึงขึ้นรูปลวด โดยตัวแปรที่สำคัญคือมุมของตัวตายที่ส่งผลโดยตรงในระหว่างดึงขึ้นรูปลวด

- เครื่องมือ และอุปกรณ์ทดลอง
- เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ประกอบการทดลองประกอบด้วย



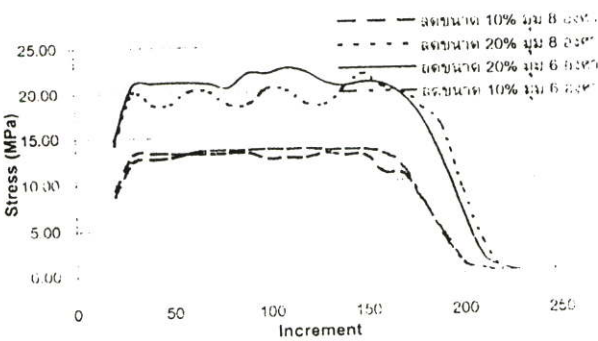
รูปที่ 6 ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ของแรงกับระยะยืดระหว่างดึงลวด

รูปที่ 6 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะยืด ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดลองดึงลวดผ่านตายที่มีมุมตายขนาดต่าง ๆ กัน โดยกำหนดอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดไว้คงที่ที่ 10 % เพื่อหาค่ามุมของตายที่เหมาะสมไว้เปรียบเทียบกับกรณีวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4. วิธีการวิเคราะห์ และประเมินผลโดยการใช้ Math Model

ในขั้นตอนนี้ต่อมาเป็นการอาศัยวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยความสอดคล้องกับหัวข้อก่อนหน้าในการวิเคราะห์ปัญหา

กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในช่วงของการดึง



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของความเค้นในช่วงของการดึง

จากรูปที่ 7 เป็นการสร้างแบบจำลองของการดึงลวดโดยกำหนดให้มีการลดขนาด และใช้มุมในการดึงตามกำหนด และจากรูปที่ 7 นี้จะสัมพันธ์กับผลของการทดลองในรูปที่ 6 คือในช่วงมุมของการดึง 8 องศาจะให้ระยะยืดที่ต่ำกว่าในช่วงมุม 6 องศาอีกทั้งยังใช้แรงน้อยกว่าอีกด้วย

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุ และเงื่อนไขที่ใช้ในการดึงลวดด้วยวิธีไฟในอิลลิเมนต์

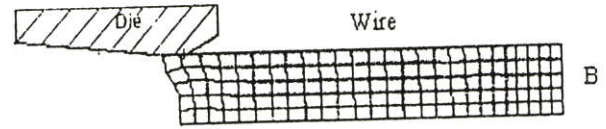
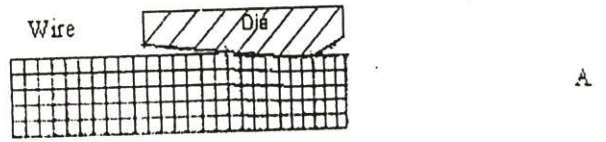
	Copper(wire)	WC(Inclusion)
Young's modulus E(Mpa)	120000	1000000
Yield stress σ_Y (Mpa)	150	1000
Poisson's ratio ν	0.3	0.2
Die half angle α (Deg)	8	
Reduction Re(%)	10, 20	
Coefficient of friction μ	0.05	

4.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบ

ของกระบวนการดึงขึ้นรูปอย่างง่าย

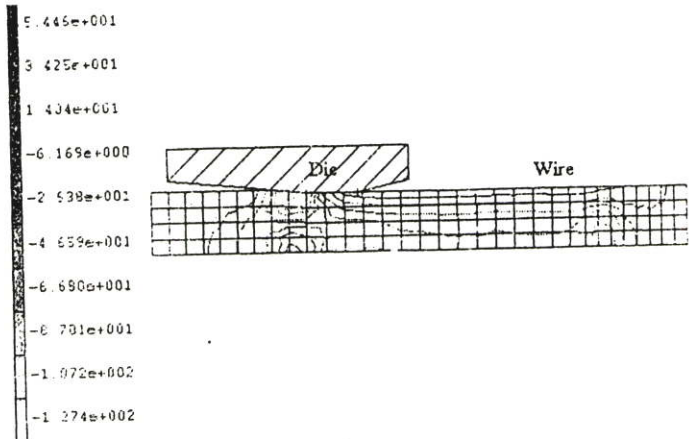
ในหัวข้อนี้ได้แสดงให้เห็นถึงแบบจำลองอย่างง่ายที่ใช้เป็น

แบบอย่างพื้นฐานในการวิเคราะห์



รูปที่ 8 รูปแบบจำลองการดึงลวดด้วยวิธีไฟในอิลลิเมนต์

จากรูปที่ 8 เป็นการสร้างแบบจำลองในการดึงลวดโดยรูปที่ 7(a) จะเป็นแบบจำลองก่อนการดึงลวดผ่านตาย และรูปที่ 7(b)จะเป็นแบบจำลองของการดึงลวดผ่านตายโดยขนาดได้มีความลดขนาดลง เมื่อเกิดขี้นด้วยการดึงลวดให้ขนาดลดลง 10 % โดยใช้มุมตาย 6 องศาที่แสดงในรูปที่ 8 นั้นเป็นเพียงตัวอย่าง อย่างง่ายที่สร้างขึ้นโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟในอิลลิเมนต์ โดยแบบจำลองนี้จะพิจารณาเพียง 2 มิติ คิดเพียง 1 ใน 4 ส่วนของลวดที่สมมาตรกัน



รูปที่ 9 ค่า Mean Normal Stress ที่เกิดขึ้นในลวดระหว่างการจำลองการดึงลวด

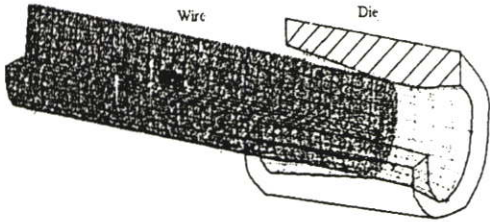
ในการจำลองโดยวิธีสร้างแบบจำลองทางไฟในอิลลิเมนต์เราจะสามารถวิเคราะห์ผลได้จากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางกายภาพ และค่าคุณสมบัติของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูปที่ 9 อาทิเช่น ความเค้น ความเครียด และลักษณะการจัดเป็นต้น

4.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบ

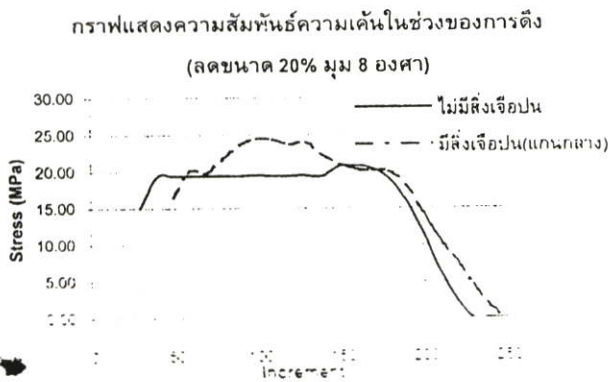
ของกระบวนการดึงขึ้นรูปที่มีสิ่งเจือปนเกิดขึ้นในเส้นลวด

การจำลองสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการดึงลวดด้วยวิธีทางไฟในอิลลิเมนต์ จะกำหนดให้สิ่งเจือปนมีขนาดประมาณใกล้เคียงกัน (แสดงในรูปที่ 10) และในงานวิจัยนี้ได้จำลองให้สิ่งเจือปนให้

เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใดๆซึ่งสอดคล้องกับการเกิดสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้นจริง (แสดงในรูปที่ 12) ในการสร้างแบบจำลองเพื่อการวิเคราะห์จะใช้แบบจำลอง 3 มิติ

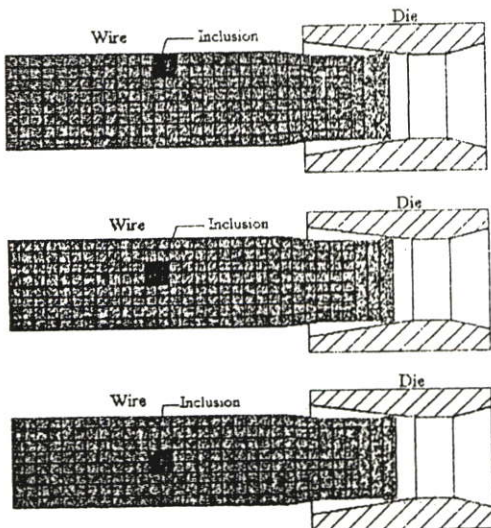


รูปที่ 10 แบบจำลองการดึงลวดที่มีสิ่งเจือปนอยู่ภายใน



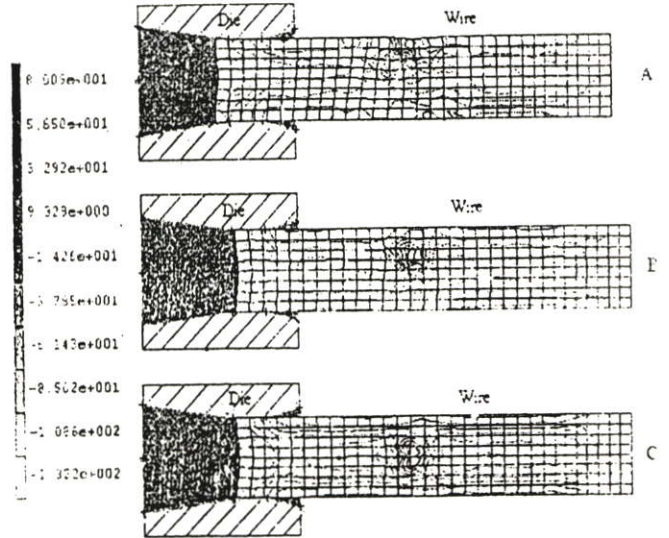
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของความเค้นในช่วงของการดึง

จากรูปที่ 11 จะผลจากแบบจำลองที่เปรียบเทียบการดึงลวดที่มี และไม่มีสิ่งเจือปนโดยกำหนดให้ลดขนาด 20 %มุมที่ใช้ในการดึง 8 องศา



รูปที่ 12 แบบจำลองการดึงลวดที่มีสิ่งเจือปนเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ

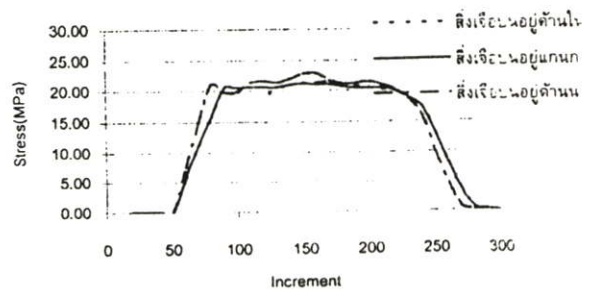
จากแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์ลิเมนต์ในรูปข้างบนเราจะวิเคราะห์หาสาเหตุที่อาจจะทำให้เกิดการขาดที่เป็นไปได้มากที่สุด จากการพิจารณาความเค้นแรงดึงที่เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการดึงลวด (แสดงในรูปที่ 13) ในแต่ละตำแหน่งมีสิ่งเจือปนผสมอยู่ในลวด



รูปที่ 13 Mean Normal Stress ในลวดที่เกิดขึ้นในระหว่างการดึง

จากรูปด้านบนจะเห็นได้ชัดเจนว่ารูป 13(a) จะมีอิทธิพลต่อระดับความเครียดบริเวณผิวลวดสูงมากเนื่องจากการจำลองให้เกิดสิ่งเจือปนบริเวณติดกับผิวของลวด ในขณะที่รูป 13(b) จำลองให้มีสิ่งเจือปนอยู่บริเวณด้านในลวด และ 13(c)จำลองให้มีสิ่งเจือปนอยู่บริเวณตรงแกนกลางของลวดก็ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และ ค่าความแข็งแรงเปลี่ยนไป อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของความเค้นภายใน

กราฟความสัมพันธ์ความเค้นในช่วงของการดึง



รูปที่ 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นในช่วงของการดึง

จากการพิจารณารูปที่ 14 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากการเกิดสิ่งเจือปนในบริเวณต่างๆจะให้ผลที่แตกต่างกันโดยความเค้นจะมีค่าสูงสุดในบริเวณที่มีสิ่งเจือปนอยู่ด้านนอก และจะเกิดความเค้นใกล้เคียงกันเมื่อสิ่งเจือปนอยู่ด้านใน ดังแสดงในกราฟ

5. สรุป และคำแนะนำ

ในส่วนของผลการทดลองจะแบ่งเป็นส่วนของผลการทดลองจากการทำการจำลองในเบื้องต้นบางส่วนจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ และผลที่เกิดจากการจำลองสภาวะการเกิดสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้นในเส้นลวดจนเป็นสาเหตุการขาดบ่อยครั้งในกระบวนการการดึงลวดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1. จากรูปที่ 4 และ รูปที่ 6 จะแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของมุมที่ใช้ในการดึงลวดซึ่งจะอยู่ในช่วงประมาณ 6 - 8 องศา ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
2. เมื่อยมีสิ่งเจือปนเกิดขึ้นในเส้นลวด สิ่งเจือปนที่หนาแน่นก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความแข็งแรงของลวดเปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในรูปที่ 13
3. เราจะสังเกตเห็นรอยฉีก และการแตกร้าวเกิดขึ้นได้ง่ายในบริเวณที่อยู่ระหว่างสิ่งเจือปน และลวดที่เกิดจากความเค้นสูงที่มากในบริเวณรอบๆที่มีสิ่งเจือปน
4. จากการวิเคราะห์การดึงลวดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ถ้าลวดมีสิ่งเจือปนอยู่ ณ. ตำแหน่งที่ต่างกันจะมีผลที่แตกต่างกัน ดังเช่นเมื่อสิ่งเจือปนเกิดขึ้นบริเวณผิวด้านบนของลวดในระหว่างกระบวนการดึงอาจทำให้เกิดการฉีกขาดที่บริเวณผิวได้ง่าย
5. จากการวิเคราะห์การดึงลวดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ถ้าสิ่งเจือปน ณ. ตำแหน่งที่อยู่ด้านในสุดมีขนาดที่โตในระดับหนึ่งจะทำให้เกิดการ crack ได้ง่ายอันเนื่องมาจากค่าความเค้นดึงที่เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว
6. ผู้ที่สนใจสามารถทำการศึกษา ทำวิจัย และพัฒนาต่อไปได้ในครั้งนี้เป็นเพียงผลการวิจัยในบางส่วน ของกระบวนการดึงลวด ซึ่งต้องอาศัยการจำลองสภาวะการทดลองที่สอดคล้องกับความป็นจริงที่จะทำได้ในบางกรณี

6. กิตติประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอขอบคุณ รศ.สมชัย นรเศรษฐ์โถกาน และ Professor. Kazunari Yoshida พร้อมคณะจาก Tokai University Japan ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยในครั้งนี้จนเป็นผลสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Edward M. Mielnik, Metalworking Science and Engineering, 397-463
- [2] Kazunari Yashida, Hiroshi Tanaka ;The drawability of Ni-Ti shape-memory alloy wires, Wire and bar, 89-94(1995) 2, 45

- [3] Honma, T., Shape memory alloys and their application, J. JSME, 87-786(1984), 517
- [4] J.Charkrabarty, Theory of Plasticity, McGraw-Hill International Editions, 1987

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายพงษ์ศักดิ์ นิสภกุล
วัน เดือน ปีเกิด	29 พฤศจิกายน 2516
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 2540
ประสบการณ์การทำงาน	
2542 : (จนถึงปัจจุบัน)	VENTURE ENGINEERING CO.,LTD. 97 Ramkumhang Soi 48 Humark Bangkok Bangkok Thailand 10240 Tel (02)3772651 , (01)6913555
ผลงานที่เคยได้รับการตีพิมพ์	
2542 :	"Programmable logic control ", การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12
2544 :	"An Analysis Wire Drawing With Inclusion ", การประชุม วิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15