



# วิทยานิพนธ์

ศึกษาการทำนายการปริแตกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของ  
เส้นลวดทองแดงขณะดึงเส้นลวดผ่านด้ายด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

**THE STUDY OF PREDICTION OF CENTRAL BURST  
DEFECT OF COPPER WIRE DURING DRAWING USING  
FINITE ELEMENT METHOD**

นายชนกฤต ม่วงสวัสดิ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2550



## ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

### ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ศึกษาการทำนายการปริแตกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดงขณะดึงเส้นลวดผ่านคานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

The Study of Prediction of Central Burst Defect of Copper Wire During Drawing Using Finite Element Method

นามผู้วิจัย นายชนกฤต ม่วงสวัสดิ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

( อาจารย์ธีรารงค์ พุทธาพิทักษ์ผล, Ph.D. )

กรรมการ

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภสิทธิ์ รอดขวัญ, Ph.D. )

กรรมการ

( อาจารย์สุชาติ เหลืองประเสริฐ, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย กฤษไมตรี, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์วินัย อางคงหาญ, M.A. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 1 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2550

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ศึกษาการทำนายการปริแตกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดงขณะดึงเส้นลวดผ่าน  
คานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

The Study of Prediction of Central Burst Defect of Copper Wire During Drawing Using Finite  
Element Method

โดย

นายชนกฤต ม่วงสวัสดิ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2550

ชนกฤต ม่วงสวัสดิ์ 2550: ศึกษาการทำนายการปริแตกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของ  
เส้นลวดทองแดงขณะดึงเส้นลวดผ่านคายด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ปรียญวิทยวิศวกรรม  
ศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชา  
วิศวกรรมเครื่องกล ปรธานกรรมการที่ปรึกษา: อาจารย์ธีรพงศ์ พุทธาพิทักษ์ผล, Ph.D.  
100 หน้า

การปริแตกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดนั้นเป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นภายใน  
เส้นลวดขณะกระบวนการดึงขึ้นรูปและกระบวนการอัดขึ้นรูปและไม่สามารถสังเกตเห็นได้จาก  
ภายนอกซึ่งถ้านำเส้นลวดดังกล่าวไปใช้งานจะทำให้เกิดการแตกหักได้ง่ายกว่าเส้นลวดปกติ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อวิเคราะห์และทำนายการปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้น  
ลวดขณะถูกดึงผ่านคายและถูกดันผ่านคายโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้สมมุติฐานของ Reddy  
*et al.* (1996) เพื่อจำลองกระบวนการดึงขึ้นรูปและอัดขึ้นรูปโดยกำหนดให้เส้นลวดมีพฤติกรรม  
การเสียรูปแบบ อีลาสติก-พลาสติก โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นไฮโดรสแตติกบริเวณ  
แกนกลางของเส้นลวดพบว่ารอยปริแตกจะเกิดขึ้นเมื่อค่าความเค้นไฮโดรสแตติกบริเวณรอยแตก  
นั้นมีค่าเท่ากับศูนย์

จากผลการศึกษาพบว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายการเกิดรอยปริแตกที่เกิดขึ้น  
บริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการดึงขึ้นรูปและอัดขึ้นรูปได้และพบว่าปัจจัยสำคัญที่มีผล  
ต่อการเกิดรอยปริแตก คืออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด และความยาวของช่วงการลดขนาด

ชนกฤต ม่วงสวัสดิ์  
ลายมือชื่อนิติ

ธีรพงศ์ พุทธาพิทักษ์ผล  
ลายมือชื่อประธานกรรมการ

24 / 10 / 2550.

Thanakrit Muangsawat 2007: The Study of Prediction of Central Burst Defect of Copper Wire During Drawing Using Finite Element Method. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Mr. Tumrong Puttapitukporn, Ph.D. 100 pages.

The central burst is internal defects of wire during drawing and extrusion processes. It is impossible to detect these defects by means of a simple surface inspection of the workpiece. Consequently, this defected wire is easier to break than the normal wire.

The objective of this research is to study the prediction of central burst defects of wire during drawing and extrusion processes using the finite element method. Based on the assumption of Reddy *et al.* (1996) and using elastic-plastic finite element analysis, the distribution of hydrostatic stress in the deformation zone was observed. It was found that the hydrostatic stress became zero at the site of deflection initiation.

The results showed that the finite element method could effectively predict central burst defects of wire during drawing and extrusion. Furthermore, the most significant parameters for central burst defects occurring are the reduction area and the length of the die.

Thanakrit Muangsawat  
Student's signature

Tumrong Puttapitukporn 24 / May / 2007  
Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.ธำรงค์ พุทธาพิทักษ์ผล ประธานกรรมการที่ปรึกษาที่ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยตลอดจนให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจสอบข้อบกพร่องต่างๆ ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ กรรมการที่ปรึกษาวิชาเอก อาจารย์ ดร.สุชาติ เหลืองประเสริฐ ประธานกรรมการวิชาการ ที่กรุณาให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้องทุกคนที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนในด้านการศึกษตลอดมา รวมถึงขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้

ธนกฤต ม่วงสวัสดิ์

พฤษภาคม 2550

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	22
อุปกรณ์	22
วิธีการ	22
ผลและวิจารณ์	32
ผล	32
วิจารณ์	42
สรุปและข้อเสนอแนะ	50
สรุป	50
ข้อเสนอแนะ	51
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	52
ภาคผนวก	55
ภาคผนวก ก ขนาดของเส้นลวด	56
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์กระบวนการดิ่งขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	58
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์กระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	75
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์กระบวนการดิ่งขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กพริสซิฟไฟไนต์เอลิเมนต์	96
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	101

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	อุณหภูมิการตกผลึกใหม่ของโลหะชนิดต่างๆ	8
2	ความเร็วในการดึงสำหรับกระบวนการดึงขึ้นเดียว	15
3	คุณสมบัติของวัสดุเหล็ก (SAE 1090)	24
4	คุณสมบัติของวัสดุทองแดง (OFHC)	25
5	ผลการทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางขณะทำการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	36
6	แสดงผลการทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางในกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	41
7	ความเค้นดึงขึ้นรูป (drawing stress)	46
8	ความเค้นอัดขึ้นรูป (extrusion stress)	47
9	ผลการทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางขณะทำการดึงขึ้นรูปเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ด้วยวิธีเอ็กพริสิทไฟไนต์เอลิเมนต์	49
ตารางผนวกที่		
ก1	แสดงขนาดของลวดที่ผ่านกระบวนการดึงขึ้นรูป	57
ก2	แสดงขนาดของลวดที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป	57

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงหน้าตัดของคายที่ใช้ในการดึงลวด	13
2	แสดงกระบวนการดึงลวดแบบต่อเนื่อง	14
3	การอัดขึ้นรูปโดยตรง	16
4	การอัดขึ้นรูปทางอ้อม	17
5	แบบจำลองของอนุภาค	18
6	ลักษณะการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่ไม่เกิดรอยปริแตก	19
7	ลักษณะการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่เกิดรอยปริแตก	19
8	ลักษณะการเกิดรอยแตกและการขยายตัว	20
9	ลักษณะของคายที่ใช้ในกระบวนการดึงขึ้นรูป	26
10	เงื่อนไขขอบเขตของการดึงขึ้นรูป	27
11	แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการดึงขึ้นรูป	28
12	ลักษณะของคายที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูป	29
13	เงื่อนไขขอบเขตของการอัดขึ้นรูป	30
14	แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการอัดขึ้นรูป	31
15	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการดึงขึ้นรูปในแบบจำลองที่เกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลาง ( $\%r=45$ , $L/R_1=1.5$ เหล็ก (SAE1090))	32
16	ความเค้นไฮโดรสแตติก ที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการดึงขึ้นรูป ในแบบจำลองที่ไม่เกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลาง ( $\%r=45$ , $L/R_1=1.6$ เหล็ก (SAE1090))	33
17	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการดึงขึ้นรูป ในแบบจำลองที่เกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลาง ( $\%r=45$ , $L/R_1=1.5$ ทองแดง (OFHC))	34

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการดึงขึ้นรูป ในแบบจำลองที่ไม่เกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลาง ( $\%r=45$ , $L/R_1=1.6$ ทองแดง (OFHC))	35
19	ความเค้นไฮโดรสแตติก ที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการดึงขึ้นรูป ในแบบจำลองที่เกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลาง ( $R_1/R_2 = 1.2$ , $\alpha=15^\circ$ , เหล็ก (SAE 1090))	37
20	ความเค้นไฮโดรสแตติก ที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการอัดขึ้นรูป ในแบบจำลองที่ไม่เกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลาง ( $R_1/R_2 = 1.2$ , $\alpha=14^\circ$ , เหล็ก (SAE 1090))	38
21	ความเค้นไฮโดรสแตติก ที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการอัดขึ้นรูป ในแบบจำลองที่เกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลาง ( $R_1/R_2 = 1.2$ , $\alpha=15^\circ$ , ทองแดง (OFHC))	39
22	ความเค้นไฮโดรสแตติก ที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการอัดขึ้นรูป ในแบบจำลองที่ไม่เกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลาง ( $R_1/R_2 = 1.2$ , $\alpha=14^\circ$ , ทองแดง (OFHC))	39
23	แสดงการทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางขณะทำการดึงขึ้นรูปเส้นลวด เหล็ก (SAE 1090) เปรียบเทียบกับการศึกษาของ Reddy <i>et al.</i> (2000)	42
24	แสดงการทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) และทองแดง (OFHC) จากกระบวนการดึงขึ้นรูป เปรียบเทียบกับการศึกษาของ Reddy <i>et al.</i> (2000)	43
25	การทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางขณะทำการอัดขึ้นรูปของวัสดุเหล็ก (SAE 1090) และทองแดง (OFHC) เปรียบเทียบกับค่า Chrysler Processing Standard	44
26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นดึงขึ้นรูป (drawing stress) กับอัตราการผลิตพื้นที่หน้าตัด	46

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นอัดขึ้นรูป (extrusion stress) กับอัตราการลดพื้นที่หน้าตัด	48
28	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์แบบสถิติ และแบบเอ็กพริสิท	49
ภาพผนวกที่		
ข1	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 10% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.1	59
ข2	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 10% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.2	59
ข3	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 10% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.3	60
ข4	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 10% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.4	60
ข5	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 30% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.2	61
ข6	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 30% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.3	61

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข7	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 30% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.4	62
ข8	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 30% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.5	62
ข9	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.3	63
ข10	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.4	63
ข11	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.5	64
ข12	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.6	64
ข13	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.4	65
ข14	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.5	65

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข15	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.6	66
ข16	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.7	66
ข17	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 10% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.1	67
ข18	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 10% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.2	67
ข19	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 10% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.3	68
ข20	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 10% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.4	68
ข21	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 30% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.2	69
ข22	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 30% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.3	69

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข23 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 30% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.4	70
ข24 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 30% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.5	70
ข25 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.3	71
ข26 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.4	71
ข27 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.5	72
ข28 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.6	72
ข29 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.4	73
ข30 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และอัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.5	73

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
ข31	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และอัตราส่วน <math>L/R_1</math> เท่ากับ 1.6</p>	74
ข32	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และอัตราส่วน <math>L/R_1</math> เท่ากับ 1.7</p>	74
ค1	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.05 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>1^\circ</math></p>	76
ค2	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.05 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>2^\circ</math></p>	76
ค2	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.05 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>3^\circ</math></p>	77
ค4	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.05 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>4^\circ</math></p>	77
ค5	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.1 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>4^\circ</math></p>	78
ค6	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.1 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>5^\circ</math></p>	78

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ค7	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน $R_1/R_2$ เท่ากับ 1.1 และขนาดครึ่งมุมดาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ $6^\circ$	79
ค8	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน $R_1/R_2$ เท่ากับ 1.1 และขนาดครึ่งมุมดาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ $7^\circ$	79
ค9	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน $R_1/R_2$ เท่ากับ 1.15 และขนาดครึ่งมุมดาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ $9^\circ$	80
ค10	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน $R_1/R_2$ เท่ากับ 1.15 และขนาดครึ่งมุมดาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ $10^\circ$	80
ค11	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน $R_1/R_2$ เท่ากับ 1.15 และขนาดครึ่งมุมดาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ $11^\circ$	81
ค12	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน $R_1/R_2$ เท่ากับ 1.15 และขนาดครึ่งมุมดาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ $12^\circ$	81
ค13	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน $R_1/R_2$ เท่ากับ 1.2 และขนาดครึ่งมุมดาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ $14^\circ$	82
ค14	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน $R_1/R_2$ เท่ากับ 1.2 และขนาดครึ่งมุมดาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ $15^\circ$	82

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
ค15	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.2 และขนาดครึ่งมุมดาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>16^\circ</math></p>	83
ค16	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.2 และขนาดครึ่งมุมดาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>17^\circ</math></p>	83
ค17	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.25 และขนาดครึ่งมุมดาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>15^\circ</math></p>	84
ค18	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.25 และขนาดครึ่งมุมดาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>16^\circ</math></p>	84
ค19	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.25 และขนาดครึ่งมุมดาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>17^\circ</math></p>	85
ค20	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.25 และขนาดครึ่งมุมดาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>18^\circ</math></p>	85
ค21	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.05 และขนาดครึ่งมุมดาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>1^\circ</math></p>	86
ค22	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.05 และขนาดครึ่งมุมดาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>2^\circ</math></p>	86

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
ค23	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.05 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>3^\circ</math></p>	87
ค24	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.05 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>4^\circ</math></p>	87
ค25	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.1 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>4^\circ</math></p>	88
ค26	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.1 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>5^\circ</math></p>	88
ค27	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.1 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>6^\circ</math></p>	89
ค28	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.1 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>7^\circ</math></p>	89
ค29	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.15 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>9^\circ</math></p>	90
ค30	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.15 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>10^\circ</math></p>	90

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
ค31	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.15 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>11^\circ</math></p>	91
ค32	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.15 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>12^\circ</math></p>	91
ค33	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.2 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>14^\circ</math></p>	92
ค34	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.2 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>15^\circ</math></p>	92
ค35	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.2 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>16^\circ</math></p>	93
ค36	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.2 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>17^\circ</math></p>	93
ค37	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.25 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>15^\circ</math></p>	94
ค38	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.25 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>16^\circ</math></p>	94

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
ค39	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.25 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>17^\circ</math></p>	95
ค40	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน <math>R_1/R_2</math> เท่ากับ 1.25 และขนาดครึ่งมุมตาย (<math>\alpha</math>) เท่ากับ <math>18^\circ</math></p>	95
ง1	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กพริสิทไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และ อัตราส่วน <math>L/R_1</math> เท่ากับ 1.3</p>	97
ง2	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กพริสิทไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และ อัตราส่วน <math>L/R_1</math> เท่ากับ 1.4</p>	97
ง3	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กพริสิทไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และ อัตราส่วน <math>L/R_1</math> เท่ากับ 1.5</p>	98
ง4	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กพริสิทไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และ อัตราส่วน <math>L/R_1</math> เท่ากับ 1.6</p>	98
ง5	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กพริสิทไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และ อัตราส่วน <math>L/R_1</math> เท่ากับ 1.4</p>	99
ง6	<p>ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กพริสิทไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และ อัตราส่วน <math>L/R_1</math> เท่ากับ 1.5</p>	99

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ง7	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กพริสิทไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และ อัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.6	100
ง8	ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กพริสิทไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และ อัตราส่วน $L/R_1$ เท่ากับ 1.7	100

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$A_1$	=	พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดก่อนการลดขนาด [หน่วยเป็น ตารางเมตร]
$A_2$	=	พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดหลังการลดขนาด [หน่วยเป็น ตารางเมตร]
$E$	=	ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น [หน่วยเป็น GPa]
$F_{back}$	=	แรงอัดขึ้นรูป [หน่วยเป็น นิวตัน, N]
$F_{front}$	=	แรงดึงขึ้นรูป [หน่วยเป็น นิวตัน, N]
$L$	=	ความยาวของคานบริเวณลดขนาด [หน่วยเป็น เมตร]
$R_1$	=	รัศมีเริ่มต้นของเส้นลวด [หน่วยเป็น เมตร]
$R_2$	=	รัศมีของเส้นลวดที่ผ่านการลดขนาดแล้ว [หน่วยเป็น เมตร]
$S_y$	=	ความเค้นคราก (yield stress) [หน่วยเป็น MPa]
$t_s$	=	ความเค้นเฉือนในแนวสัมผัสระหว่างเส้นลวดกับคาน (shear stress) [หน่วยเป็น MPa]
$V_{max}$	=	ความเร็วสูงสุดที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป [หน่วยเป็น m/s]
$^{\circ}C$	=	องศาเซลเซียส
$^{\circ}F$	=	องศาฟาเรนไฮต์
$\rho$	=	ความหนาแน่น [หน่วยเป็น kg/m <sup>3</sup> ]
$\mu$	=	สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน
$\nu$	=	อัตราส่วนปัวซอง (poisson's ratio)
$\sigma_{1,2,3}$	=	ความเค้นหลัก (principle stress) ที่ 1, 2 และ 3 [หน่วยเป็น MPa]
$\sigma_b$	=	ความเค้นอัดขึ้นรูป (extrusion stress) [หน่วยเป็น MPa]
$\sigma_f$	=	ความเค้นดึงขึ้นรูป (drawing stress) [หน่วยเป็น MPa]
$\sigma_H$	=	ความเค้นไฮโดรสแตติก [หน่วยเป็น MPa]
$\bar{\sigma}$	=	ความเค้น (generalized stress) [หน่วยเป็น MPa]
$\bar{\epsilon}$	=	ความเครียด (generalized strain)
$\bar{\epsilon}^{pl}$	=	ความเครียดแบบพลาสติก (plastic strain)
%r	=	เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัด [หน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์]
MPa	=	Mega Pascal (10 <sup>6</sup> N/m <sup>2</sup> )
GPa	=	Giga Pascal (10 <sup>9</sup> N/m <sup>2</sup> )

ศึกษาการทำนายการปริแตกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดงขณะดึงเส้น  
ลวดผ่านตายด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

**The Study of Prediction of Central Burst Defect of Copper Wire During Drawing  
Using Finite Element Method**

คำนำ

การขึ้นรูปโลหะเป็นกระบวนการเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเพื่อนำไปใช้งาน  
ในรูปแบบต่างๆซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี โดยทั่วไปจะนิยมใช้วัสดุเหนียว (ductile material) ในการขึ้น  
รูปเนื่องจากมีคุณสมบัติการยืดหยุ่นตัวที่ดี การดึงขึ้นรูปลวด (wire drawing) และอัดขึ้นรูป  
(extrusion) เป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่มีลักษณะกระบวนการผลิตที่คล้ายคลึงกัน โดยการดึง  
ขึ้นรูปลวดจะทำการดึงเส้นลวดจากด้านหน้าผ่านตายขนาดต่างเพื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ  
เส้นลวดให้ได้ขนาดตามต้องการ แต่การอัดขึ้นรูปมีลักษณะการผลิตคือจะทำการดันเส้นลวดจาก  
ด้านหลังผ่านตาย กระบวนการผลิตเช่นนี้อาจเป็นสาเหตุของการปริแตกบริเวณแกนกลาง (central  
burst) ของเส้นลวดได้ ซึ่งถ้านำเส้นลวดดังกล่าวไปใช้งานจะทำให้เกิดการแตกหักได้ง่ายกว่าเส้น  
ลวดปกติ โดยปัจจัยที่ทำให้เกิดการปริแตกเกิดจากการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดที่รวดเร็วเกินไป  
รูปร่างของตาย และความเสียดทานระหว่างผิวของเส้นลวดกับตาย

การศึกษาการปริแตกบริเวณแกนกลางในการดึงขึ้นรูป และการอัดขึ้นรูปสามารถแบ่งออก  
ได้สองวิธีคือ การวิเคราะห์จากการทดสอบชิ้นงานจริง ซึ่งมีความยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูง และการ  
วิเคราะห์โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีความรวดเร็วและมีค่าใช้จ่ายต่ำ ปัจจุบันวิธี  
ไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เข้ามามีบทบาทที่สำคัญในการวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าว เพราะมีการพัฒนา  
โปรแกรมให้ใช้วิเคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อนในการวิเคราะห์มากขึ้นและให้ความแม่นยำในการ  
คำนวณสูงขึ้น

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษากระบวนการดึงเส้นลวดผ่านตายด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายการ  
ปริแตกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวด โดยสร้างแบบจำลองกระบวนการดึงขึ้นรูปด้วยวิธี  
ไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเค้น ในบริเวณแกนกลางของเส้นลวด ซึ่งจาก  
การศึกษาของ Reddy *et al.* (1996) พบว่าการปริแตกที่บริเวณแกนกลางของเส้นลวดจะเกิดขึ้นเมื่อ

ความเค้นไฮโดรสแตติก (hydrostatic stress) ที่บริเวณรอยแตกมีค่าเท่ากับศูนย์ และนำผลการศึกษาจากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ Reddy *et al.* (2000) และจากความคล้ายคลึงกันของกระบวนการดึงขึ้นรูปและกระบวนการอัดขึ้นรูป ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมการทำนายการปริแตกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของชิ้นงานขณะทำการอัดขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลงานวิจัยนี้สามารถทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้นลวดระหว่างกระบวนการดึงขึ้นรูป และกระบวนการอัดขึ้นรูปซึ่งทำให้ง่ายต่อการป้องกันการเกิดการปริแตก ลดต้นทุนในการออกแบบคายทดสอบด้วยชิ้นงานจริง และยังช่วยให้กระบวนการผลิตเส้นลวดมีคุณภาพสูงสุด

## วัตถุประสงค์

1. วิเคราะห์และทำนายการแปรแถบบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะถูกดึงผ่านคานาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

## การตรวจเอกสาร

### 1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปีน (2548) ได้วิเคราะห์หรือแตกร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดงขณะทำการดึงเส้นลวดผ่านคานเพื่อลดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดลง โดยการทดลองดึงเส้นลวดผ่านคานขนาดต่างๆที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้นลวด และนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับการดึงเส้นลวดผ่านคานโดยการอบคืนตัวของเส้นลวดที่อุณหภูมิต่างๆ ก่อนที่จะนำไปดึงลดขนาดในครั้งต่อไป จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการอบคืนตัวของเส้นลวดที่อุณหภูมิต่างกันสามารถลดปัญหาการปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้นลวดได้ และยังพบอีกว่าขนาดมุมคานที่โตมีผลทำให้เกิดรอยแตกร้าวบริเวณแกนกลางของเส้นลวดมากกว่าขนาดมุมคานที่มีค่าน้อย

Cho *et al.* (2002) ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดและความยาวที่ใช้ในการลดขนาด ที่มีผลกระทบต่อปริแตกของเส้นลวดในกระบวนการดึงขึ้นรูปลวดทองแดง ผู้วิจัยพบว่าปริแตกบริเวณแกนกลางจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ นอกจากนี้ความเสียหายจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดึง (back tension) มีค่าเท่ากับ 28% ของแรงดึงขึ้นรูปและพบว่าความยาวที่ใช้ในการลดขนาดไม่มีผลต่อการขาดของเส้นลวด

Gouveia *et al.* (1996) ได้นำทฤษฎีความเสียหายของโลหะเหนียวมาประยุกต์ร่วมกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดวัสดุที่ใช้เป็นแบบลิจิดพลาสติก (rigid-plastic) เพื่อทำนายความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานขณะทำการขึ้นรูป (bulk metal forming) โดยเลือกทฤษฎีความเสียหายของโลหะเหนียวต่างๆมาศึกษาเปรียบเทียบกับผลการทดลองด้วยชิ้นงานจริง และกำหนดลักษณะของวัสดุที่นำมาทดสอบเป็นสี่ชนิดคือ แบบทรงกระบอก, ทรงกระบอกกลวง, ทรงกระบอกลาดเอียง และทรงกระบอกที่มีรีบริดตรงกลาง จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่าทฤษฎีความเสียหายทั้งหมดให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลอง

Hambli and Levet (2000) ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปของวัสดุเพื่อตรวจสอบความเสียหาย การเกิดและขยายตัวของรอยแตก โดยใช้หลักการแบบกลศาสตร์ของการเสียหาย (continuum damage mechanics) ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆของกระบวนการขึ้นรูปที่มีผลต่อรูปร่างของชิ้นงาน พบว่าสามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำนายการเกิดและขยายตัวของ

การปริแตกที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจากกระบวนการผลิตได้ และสามารถนำแบบจำลองไปแก้ไขกระบวนการผลิตเพื่อไม่ให้เกิดข้อบกพร่องในชิ้นงานจริงได้ ในกรณีการอัดขึ้นรูปพบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นให้ผลตรงกับการทดลองโดยใช้ชิ้นงานจริง

Ko and Kim (2000) ศึกษาการปริแตกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยใช้หลักการความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่ทำจากวัสดุเหนียวของ Cockcroft and Latham (1968) และหลักการการเปลี่ยนแปลงขนาดของความเค้นไฮโดรสแตติกที่บริเวณแกนกลางของชิ้นงานเพื่อทำนายการเกิดรอยปริแตก ผู้วิจัยพบว่าสามารถหาขนาดมุมคายและอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ไม่ทำให้เกิดการปริแตกภายในของเส้นลวดขึ้น เมื่อนำผลการศึกษาที่ได้เปรียบเทียบกับค่าคำนวณทางตัวเลขและผลจากการทดลองกับชิ้นงานจริงพบว่าให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน

Komori (2003) ศึกษาการกลไกการเกิดรอยแตกร้าวของโลหะเหนียวขณะทำการดึงขึ้นรูปโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบกับชิ้นงานจริง ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ร่วมกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วิเคราะห์ลักษณะการเกิดและการขยายตัวของรอยแตกร้าวในเนื้อโลหะ พบว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถจำลองลักษณะการเกิดรอยแตกในเนื้อโลหะหรือที่เรียกว่า รอยแตกรูปตัววี (chevron) ที่ปรากฏเป็นช่วงๆในแกนกลางของชิ้นงานระหว่างทำการดึงขึ้นรูปได้ การวิเคราะห์ทฤษฎีความเสียหายของโลหะเหนียวที่มีต่อการทำนายการเกิดและการขยายตัวของรอยแตกร้าวในการดึงขึ้นรูปผู้วิจัยพบว่า ทฤษฎีความเสียหายของ Gurson (1977) และของ Oyane (1972) ได้ผลตรงกับผลการทดลองด้วยชิ้นงานจริง การวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีความเสียหายของ Cockcroft and Latham (1968) และทฤษฎีความเสียหายของ Brozzo (1972) ตรงกับผลการทดลองด้วยชิ้นงานจริงบางส่วน ทฤษฎีความเสียหายของวัสดุเหนียวของ Freundenthal (1950) ไม่สอดคล้องกับผลการทดลองด้วยชิ้นงานจริง

Lim and Dunne (1997) ได้ศึกษาพฤติกรรมการขยายตัวของรูพรุนในเนื้อวัสดุในขณะที่ถูกอัดขึ้นรูป โดยสร้างสมการความสัมพันธ์แบบอีลาสติกและวิสโคพลาสติก (elastic-viscoplastic) จำลองพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของอลูมิเนียมอัลลอยในกระบวนการอัดขึ้นรูป ผู้วิจัยพบว่าการปริแตกที่แกนกลางเกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานได้รับความเค้นที่เหมาะสมรูพรุนที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุจะเกิดการขยายตัวทำให้เกิดรอยแตกขึ้น โดยตัวแปรที่ควบคุมการเกิดรอยแตกในแกนกลางของชิ้นงานคือการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด และขนาดของมุมคาย ผลการศึกษายังพบอีกว่าการเพิ่มแรงเสียดทานที่ผิว

ของชิ้นงานกับคายจะช่วยป้องกันการเกิดรอยปริแตกได้ การเพิ่มแรงเสียดทานมีผลทำให้ค่าความเค้นไฮโดรสแตติกมีค่าลดลง แต่การเพิ่มแรงเสียดทานอาจทำให้เกิดรอยแตกที่ผิวของชิ้นงานได้

Mc Veigh and Liu (2005) ได้ศึกษาการเกิดรอยแตกบริเวณแกนกลางของชิ้นงานอลูมิเนียมอัลลอยในขณะที่ทำการอัดขึ้นรูปแบบเย็น (cold extrusion) โดยใช้แบบจำลองเซลล์ (cell model) ร่วมกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองกระบวนการอัดขึ้นรูป พบว่าแบบจำลองสามารถแสดงลักษณะการแตกที่เกิดขึ้นเป็นระยะไม่ต่อเนื่องกันบริเวณแกนกลางของชิ้นงาน โดยรอยปริแตกบริเวณแกนกลางของชิ้นงานจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นไฮโดรสแตติก (hydrostatic stress) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และการเพิ่มค่าแรงเสียดทานที่ผิวจะช่วยลดการเกิดรอยแตกบริเวณแกนกลางในขณะเดียวกัน จะเพิ่มความน่าจะเป็นในการเกิดรอยแตกที่ผิวของชิ้นงานด้วย

Oh (1995) นำทฤษฎีการแตกร้าวของโลหะเหนียวชนิดต่างๆมาวิเคราะห์ และได้เสนอทฤษฎีการแตกร้าวของโลหะเหนียวใหม่ขึ้น จากการศึกษาค่าของความเค้นที่ตำแหน่งต่างๆของชิ้นงานที่ทำจากวัสดุเหนียวขณะดึงขึ้นรูป ผู้วิจัยพบว่าสมการที่สร้างขึ้นสามารถตรวจสอบการแตกร้าวของวัสดุเหนียวได้

Reddy *et al.* (2000) ได้ศึกษาทฤษฎีความเสียหายของชิ้นงานจากการดึงขึ้นรูป เพื่อทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการดึงลดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด พบว่าทฤษฎีความเสียหายของวัสดุเหนียวของ Thomason (1990) และ Dhar (1996) สามารถอธิบายการปริแตกของชิ้นงานได้ แต่ทฤษฎีนี้มีความยุ่งยากที่จะนำไปใช้ในการออกแบบคาย เนื่องจากต้องการตัวแปรคุณสมบัติของวัสดุที่ได้จากการทดสอบเท่านั้นและผู้วิจัยทำการศึกษาการปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้นลวดจากการเปลี่ยนแปลงค่าของความเค้นไฮโดรสแตติก ที่บริเวณแกนกลางของลวด เพื่อทำนายการเกิดการปริแตกบริเวณแกนกลางและพบว่าสามารถทำนายการเกิดการปริแตกบริเวณแกนกลางได้และเป็นวิธีที่ง่ายที่จะใช้ในการออกแบบคาย

Saanouni *et al.* (2004) ศึกษาการปริแตกที่เกิดขึ้นในกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยใช้หลักการแบบกลศาสตร์ของการเสียหาย (continuum damage mechanics) ประยุกต์ร่วมกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า อัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัด, มุมครึ่งคาย, ความเสียดทานที่ผิวและคุณสมบัติของโลหะเหนียวมีผลทำให้เกิดการปริแตกบริเวณแกนกลางขึ้น และยังพบอีกว่าหลักการที่สร้างขึ้นสามารถทำนายความเสียหายที่เกิดขึ้นได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะลักษณะการแตกรูปตัววี (chevron) มีลักษณะใกล้เคียงกับผลการทดลองมาก

Saleh *et al.* (2005) ได้ศึกษาการขยายตัวของรูพรุนในเนื้อวัสดุระหว่างกระบวนการดึงขึ้นรูปและกระบวนการอัดขึ้นรูปผ่านดายรูปกรวย (conical die) โดยใช้สมการที่เกี่ยวกับการกระจายความเค้นขณะทำการลดพื้นที่หน้าตัดผ่านดายที่พัฒนาจากหลักการของ Shield (1995), Gurson (1977) และ Tvergaard (1981) เพื่อตรวจสอบตัวแปรต่างๆของกระบวนการขึ้นรูปรวมถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นในกระบวนการขึ้นรูปที่มีผลต่อการขยายตัวของรูพรุน ผู้วิจัยพบว่าการลดลงของค่าความหนาแน่นของวัสดุเป็นผลมาจากการใช้ดายที่มีขนาดมุมใหญ่เกินไป และการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ละน้อยหลายครั้งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการการขยายตัวของรูพรุน

Staub and Boyer (1998) ได้ศึกษาการปริแตกที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยใช้หลักการของ Rice and Tracey (1981) และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเป็นแบบอีลาสโตพลาสติก (elasto-plastic) นำผลการศึกษาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่นๆพบว่าหลักการของ Rice and Tracey (1981) สามารถใช้ในการจำลองพฤติกรรมของวัสดุแบบของแข็งยุบตัวได้ (compressible solid) และการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นในกระบวนการอัดขึ้นรูปมีผลต่อความเสียหายที่เกิดขึ้น

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การขึ้นรูปโลหะ การขึ้นรูปโลหะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากกระทำให้ผลึกโครงสร้างภายในเนื้อโลหะเกิดการเคลื่อนย้าย การเคลื่อนย้ายของผลึกโครงสร้างสามารถทำได้โดยการขึ้นรูปร้อนและการขึ้นรูปเย็น การขึ้นรูปเย็นต้องทำที่อุณหภูมิปกติซึ่งต้องใช้แรงในการขึ้นรูปสูง การขึ้นรูปร้อนจะทำที่อุณหภูมิสูง แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปน้อยกว่าการขึ้นรูปเย็น

2.1.1 ปฏิบัติการทางงานร้อนของโลหะ (hot working of metal) โลหะแท่งจะมีประโยชน์ใช้สอยมากขึ้นเมื่อมีการนำมาเปลี่ยนรูป ให้เหมาะในการนำไปใช้กับขบวนการผลิตต่างๆ โลหะแท่งเย็นจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปพรรณของมันได้ยาก จึงต้องมีการใช้กรรมวิธีทางงานร้อน ซึ่งสามารถครอบคลุมถึงการเปลี่ยนรูปไปเป็นเหล็กโครงสร้าง, แท่งวัตถุดิบยาว หรือในรูปแผ่น แต่เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะมีการตกละเอียดและเกิดการออกซิเดชัน (oxidation) ที่บริเวณผิวของงาน ดังนั้นสำหรับบริเวณผิวงานจึงจะทำการปรับผิวด้วยกรรมวิธีทางงานเย็น ซึ่งอาจรวมถึงการปรับขนาดมิติให้ถูกต้องขึ้นและการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วย วิธีการขึ้นรูปโลหะที่อุณหภูมิสูงจะมีการจัดเรียงผลึกใหม่ (recrystallization temperature) ดังนั้นขบวนการจึงมีความแตกต่างไปจาก

การแปรรูปโลหะ โดยการหล่อ, การขึ้นรูปโดยใช้แม่แบบ (molding), การตบแต่งภายหลัง (machining) หรือการขจัดเศษ (chip removal)

การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (plastic deformation) มีวิธีการในการทำให้โลหะมีความสามารถในการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกและมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปได้แก่กรรมวิธีทางงานร้อนและกรรมวิธีทางงานเย็น เช่นเดียวกับวิธีการทางโลหะกรรมต่างๆไป ความแตกต่างระหว่างงานร้อนและงานเย็นนั้น สำหรับงานร้อนนั้นเมื่อโลหะผ่านกรรมวิธีของมันแรงที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปของโลหะจะน้อยและคุณสมบัติทางกลมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่ในงานเย็นจะต้องใช้แรงมากและผลงานที่ได้จะมีความแข็งแรงมากขึ้น และในงานร้อนความหนาของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปมาก ในขณะที่ปฏิบัติการทางงานเย็นบางอย่าง เช่น การรีดโลหะแผ่นขึ้นสำเร็จความหนาแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงเลย งานร้อนเป็นการเปลี่ยนรูปโลหะในขณะที่มันมีการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่อุณหภูมิเหนืออุณหภูมิการจัดเรียงผลึกใหม่ ซึ่งแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของวัสดุ แต่ไม่ได้หมายความว่าจำเป็นต้องทำงานร้อนที่อุณหภูมิสูง ๆ เช่น ตะกั่วและดีบุกจะถูกทำงานร้อนที่อุณหภูมิห้อง สำหรับอุณหภูมิของโลหะบางชนิดที่มีการจัดเรียงผลึกใหม่แสดงไว้ดังนี้

ตารางที่ 1 อุณหภูมิการตกผลึกใหม่ของโลหะชนิดต่างๆ

Metal	Recrystallization temperature °F (°C)
Aluminum	300 (150)
Copper	390 (200)
Gold	390 (200)
Iron	840 (450)
Lead	Below room temperature
Magnesium	300 (150)
Nickel	1100 (590)
Silver	390 (200)
Tin	390 (200)
Zinc	At room temperature

ที่มา: ชนรัตน์ และ มณฑล (2546)

ถึงแม้ว่างานร้อนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินกว่าอุณหภูมิของการจัดเรียงผลึก แต่จะไม่ทำให้เกิดความแข็งแรงจากความเครียด (strain hardening) หรือการลู่เข้าของความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นรวมทั้งไม่มีผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานด้วย แต่มักจะมีผลในการลดค่าของจุดคราก (yield strength) ดังนั้นจุดที่มีความเครียดเพิ่มขึ้นจะไม่มี การเพิ่มภาระความเค้นบนวัสดุ และจะทำให้ความเหนียว ลดลงจึงเป็นไปได้ที่จะเปลี่ยนรูปร่างของโลหะไปได้มากโดยใช้แรงขนาดกลางโดยไม่ทำให้เกิดการฉีกขาด อุณหภูมิการจัดเรียงผลึกของโลหะ จะเป็นเครื่องบ่งบอก่างานที่ทำนั้นเป็นงานร้อนหรืองานเย็นสำหรับเหล็กกล้าอุณหภูมิการจัดเรียงตัวจะอยู่ในช่วง 500 -700°C แต่ส่วนมากแล้วจะทำให้ที่อุณหภูมิสูงกว่าการจัดเรียงตัวของผลึก โลหะบางชนิดเช่น ตะกั่วและดีบุก มีช่วงการจัดเรียงผลึกที่อุณหภูมิต่ำ จึงสามารถทำงานร้อนได้ที่อุณหภูมิห้องแต่โดยมากแล้วจำเป็นต้องมีการเพิ่มความร้อนให้แก่โลหะบ้าง ส่วนประกอบของโลหะผสมจะมีผลต่ออุณหภูมิที่ใช้ ซึ่งโดยปกติแล้ว โลหะผสมจะช่วยเพิ่มอุณหภูมิของการจัดเรียงผลึกขึ้น อนึ่งอุณหภูมิการจัดเรียงผลึกอาจเพิ่มโดยงานเย็นที่ทำมาก่อนแล้วก็ได้ระหว่างการปฏิบัติการทางงานร้อน ทั้งหลายโลหะจะอยู่ในสภาพพลาสติกและถูกขึ้นรูปได้ด้วยแรงดัน ซึ่งงานร้อนมีข้อดีดังต่อไปนี้

- สามารถจัดรูพรุนในเนื้อโลหะได้ โดยการบีบ
- สารมลทินจะถูกจัดออกไปได้บางส่วน และที่เหลือจะกระจายไปทั่วเนื้อโลหะ
- เกรนที่มีลักษณะหยาบและยาวจะถูกทำให้ละเอียดขึ้นได้ เนื่องจากการทำงานนี้จะอยู่ในช่วงของการจัดเรียงผลึก จึงสามารถทำให้เกรนละเอียดได้ถ้าทำงานร้อนไปจนถึงอุณหภูมิต่ำสุดที่มีการจัดเรียงตัวของผลึก
- โดยทั่วไปคุณสมบัติทางกายภาพจะดีขึ้น เนื่องจากเกรนละเอียดที่ได้ เช่นมีความเหนียว, ความต้านทานต่อการถูกกระแทกและความเป็นอันหนึ่งอันเดียวของเนื้อโลหะเพิ่มขึ้น รวมทั้งจะเพิ่มขึ้น รวมทั้งจะเพิ่มความแข็งแรงซึ่งจะมีมากที่สุดในทิศทางการไหลของโลหะ ขณะทำการรีด
- ใช้พลังงานน้อยในการเปลี่ยนรูป

แต่ข้อเสียของงานร้อนที่ไม่สามารถละลายได้ก็มาจากอุณหภูมิที่สูง ซึ่งจะทำให้เกิดการตกสะเก็ดทำให้ได้ผิวสำเร็จไม่ดีรวมทั้งต้องมีพิถีพิถันความเผื่อในช่วงกว้างขึ้นด้วย รวมทั้งค่าใช้จ่ายในเรื่องของอุปกรณ์และการบำรุงรักษาที่แพง แต่อย่างไรก็ตามการดำเนินขบวนการประหยัดเมื่อเปรียบเทียบกับขบวนการทางงานเย็น คำว่าฮอต ฟินิช (hot finished) หมายถึง แท่ง, แผ่นหรือรูปพรรณเหล็กกล้าซึ่งขึ้นรูปในสภาพที่ถูกรีดจากการปฏิบัติทางงานร้อนซึ่งอาจทำการลดสะเก็ดบางชนิด และมักใช้ในงานที่ไม่คำนึงถึงพิถีพิถันความเผื่อในช่วงแคบ ๆ เช่นใช้ในการทำสะพาน เรือ หรือ

รฟไฟ อย่างไรก็ตามเนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่น้อยกว่า 0.25% จะทำให้มันสามารถเชื่อมได้ดีและมีความสามารถในการนำเนื้อโลหะออกได้สูง

2.1.2 กรรมวิธีทางงานเย็นของโลหะ (cold working of metal) เมื่อโลหะถูกรีดอัด ไหล หรือดึงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของการจัดเรียงผลึก เรียกการกระทำเหล่านี้ว่าการทำงานเย็น ซึ่งโลหะส่วนมากมักถูกทำงานเย็นที่อุณหภูมิห้อง และแม้ว่าระหว่างการปฏิบัติงานในการขึ้นรูปจะทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานสูงขึ้นก็ตาม แต่มันก็จะไม่มากเท่ากับอุณหภูมิในงานร้อน กรรมวิธีทางงานร้อนหรือการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของการจัดเรียงผลึก จะทำให้ขนาดของเกรนละเอียดขึ้น ส่วนกรรมวิธีทางงานเย็นจะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของเกรนและขนาดที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการปฏิบัติการจะเป็นไปได้เล็กน้อย นอกจากนี้กรรมวิธีทางงานเย็นจะให้ผลดีในเรื่องของความแข็งแรง, ความสามารถในการนำเนื้อโลหะ (machinability), ความถูกต้องของขนาดมิติ และผิวงานสำเร็จที่เรียบดีขึ้น และเนื่องจากเกิดการออกซิเดชันน้อยกว่าในงานร้อน งานเย็นจึงสามารถให้ปริมาณที่มากกว่าของการรีดโลหะแผ่นและฟอล์ย (foil) แต่งงานเย็นมีข้อเสียคือต้องใช้แรงในการขึ้นรูปมาก

หลักการของกรรมวิธีทางงานเย็น (principles of cold working) เพื่อให้เข้าใจถึงหลักการของการปฏิบัติการทางงานเย็น จำเป็นต้องมีความรู้ในเรื่องโครงสร้างของโลหะ โลหะทั้งหลายในธรรมชาตินั้นประกอบด้วยเกรนที่มีขนาดและรูปร่างต่างๆ กัน ซึ่งเกรน (grain) เหล่านี้อาจเห็นได้จากกล้องขยายกำลังสูง ในเนื้อโลหะที่ผ่านการขัดสีด้วยกรด (etching) มาอย่างถูกต้อง เกรนแต่ละเกรนจะเกิดมาจากกลุ่มของอะตอมที่มีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบเรียกว่าตารางผลึก (lattice) ซึ่งการเรียงตัวนี้จะแตกต่างกันไปในแต่ละเกรน เมื่อวัสดุถูกทำงานเย็น การเปลี่ยนรูปร่างของมันจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเกรน เช่น การแตกออก, การเคลื่อนที่ของอะตอม, และการบิดเบี้ยวของตารางผลึก ระนาบที่เคลื่อนที่ไป (slip plane) จะเกิดขึ้นผ่านบริเวณตารางผลึกที่จุดซึ่งพันธะยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมอ่อนแอที่สุด การเรียงตัวของอะตอมจะเคลื่อนที่เมื่อมีการเลื่อนของระนาบอะตอมแต่พันธะระหว่างอะตอมจะไม่เปลี่ยน ในกรณีซึ่งมีการรวมตัวกันใหม่ (reorientation) จะเรียกว่าการเกิดการทวีคูณ (twinning) ในตารางผลึกที่มีการทวีคูณด้านหนึ่ง จะมีการก่อตัวในรูปแบบที่แตกต่างจากด้านอื่นๆ แต่จะเหมือนกับด้านที่ติดกันซึ่งโดยปรกติแล้วการเลื่อนของระนาบจะเป็นผลทั่วไปจากการเปลี่ยนรูปร่างมากกว่า

แรงกดดันที่ใช้ในงานเย็นจะมากกว่าที่ใช้กับงานร้อน เนื่องจากความแข็งแรงของโลหะมีมากกว่าโลหะในงานเย็นจะไม่เปลี่ยนรูปอย่างถาวร จนกระทั่งมันได้รับความเค้นจนเกินขีดจำกัด

ความยืดหยุ่น (elastic limit) และเนื่องจากไม่สามารถทำการจัดเรียงผลึกของเกรนได้ใหม่ จึงไม่มีทางทำให้เกรนที่บิดเบี้ยวหรือแตกออกกลับเข้าไปรูปเดิมได้ ขณะที่มีการเปลี่ยนรูปของเกรนต่อไป จะมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงนี้มากขึ้น อันจะเป็นผลในการเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงของโลหะ ซึ่งเรียกว่าเป็นการทำให้โลหะแข็งจากความเครียด (strain hardened) และสำหรับโลหะที่ไม่ตอบสนองต่อกรรมวิธีทางความร้อนวิธีนี้ เป็นวิธีเดียวที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของมัน ได้อันนี้ปรากฏการณ์นี้อาจเกิดได้จาก การต้านทานของการเปลี่ยนตำแหน่งอะตอม (atomic dislocation), การแตกของอะตอม (fragmentation) หรือ การต้านทานการบิดของตารางผลึก (lattice distortion) สิ่งใดสิ่งหนึ่งหรือทั้ง 3 สิ่งรวมกัน

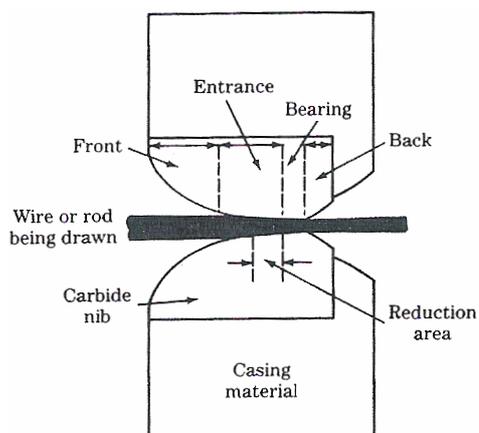
การเปลี่ยนรูปร่างทางงานเย็นที่โลหะจะทนได้นั้นขึ้นกับ ความเหนียว (ductile) ของเนื้อโลหะ ซึ่งถ้ามีมากเท่าไรมันก็สามารถรับการเปลี่ยนรูปร่างได้ดีเท่านั้น โลหะบริสุทธิ์จะทนต่อการเปลี่ยนรูปร่างได้มากกว่าพวกโลหะผสมเนื่องจากธาตุผสมจะเพิ่มแนวโน้มและความรวดเร็วในการแข็งตัวจากความเครียด (strain hardening) และโลหะที่มีเกรนขนาดใหญ่จะมีความเหนียวมากกว่าโลหะที่มีเกรนขนาดเล็กเมื่อโลหะถูกเปลี่ยนรูป จะเกิดความเค้นอย่างรุนแรงในเนื้อโลหะเรียกว่า ความเค้นตกค้าง (residual stress) ซึ่งความเค้นอันไม่พึงปรารถนานี้จะสามารถกำจัดออกได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิของโลหะจนต่ำกว่าช่วงการจัดเรียงผลึก (recrystallization) เล็กน้อย ที่อุณหภูมินี้ความเค้นจะสลายตัวไปโดยไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพหรือโครงสร้างของเกรน ด้วยวิธีการนี้จะสามารถกำจัดผลเสียอันเนื่องมาจากกรรมวิธีทางงานเย็นได้ตามต้องการ อย่างไรก็ตามความเค้นตกค้างนี้อาจจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติขณะใช้งานของผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น การทำให้ผิวหน้าของโลหะมีความเค้นอัดในขณะที่ได้ผิวหน้ามีความเค้นจากแรงดึง จะช่วยลดความล้าที่จะเกิดขึ้นขณะใช้งานได้ วิธีการที่ใช้ทำให้เกิดความเค้นในสภาพดังกล่าวอาจทำได้โดยการใช้อุปกรณ์ยิงด้วยเม็ดโลหะ (shot peening)

ข้อดีและข้อจำกัด (advantages and limitations) ผลิตภัณฑ์จำนวนมากจะเข้าสู่ขั้นตอนทางงานเย็นหลังจากการรีดร้อน เพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นที่ยอมรับในเชิงการค้า เช่น แถบโลหะยาว (strips) และแผ่นเหล็กที่ผ่านการรีดร้อนจะนิ่ม, มีผิวหน้าที่ไม่เรียบร้อยทั้งยังขาดขนาดมิติที่แน่นอน และมีคุณสมบัติทางกายภาพไม่ดี การรีดเย็นจะสามารถจัดข้อบกพร่องเหล่านี้ได้ในขณะที่ขนาดลดลงเพียงเล็กน้อย และสำหรับโลหะที่ไม่ตอบสนองต่อกรรมวิธีทางความร้อน กรรมวิธีทางงานเย็นเป็นเพียงวิธีเดียวที่จะเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงให้กับเนื้อวัสดุ นอกจากนี้ยังสามารถใช้กรรมวิธีทางงานเย็นในการอัดไหลสำหรับวัสดุเหนียวได้อีกด้วย แต่กรรมวิธีต้องการอุปกรณ์ที่แข็งแรงและแรงดันมากกว่ากรรมวิธีทางงานร้อนเป็นอย่างมาก การแตกหักของชิ้นงานที่รับการปฏิบัติการทาง

งานเย็นสามารถเกิดขึ้นได้ถ้ามันได้รับการเปลี่ยนรูปมากจนเกินไป ข้อจำกัดนี้อาจลดลงได้ถ้านำชิ้นงานไปผ่านการอบอ่อนก่อนเข้าขบวนการ และสำหรับกรณีทั่วไปแล้วการทำงานเย็นจะให้ผลดังต่อไปนี้

- จะยังคงมีความเค้นตกค้างอยู่ในเนื้อวัสดุ จนกว่าจะมีการกำจัดออกไปโดยกรรมวิธีทางความร้อน
- จะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวและการถูกอัดของเส้น โครงสร้าง
- ความแข็งแรงและความแข็งจะเพิ่มขึ้นเป็นการแปรผกผันกับความเหนียว
- อุณหภูมิของการจัดเรียงผลึกใหม่ในเหล็กกล้าจะเพิ่มสูงขึ้น
- จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของผิว
- สามารถรักษาพิสัยความคลาดเคลื่อนของขนาดมิติที่แคบๆ ไว้ได้
- ปริมาณการผลิตสามารถทำได้เร็วและมากจึงทำให้คุ้มค่าในเชิงการค้า

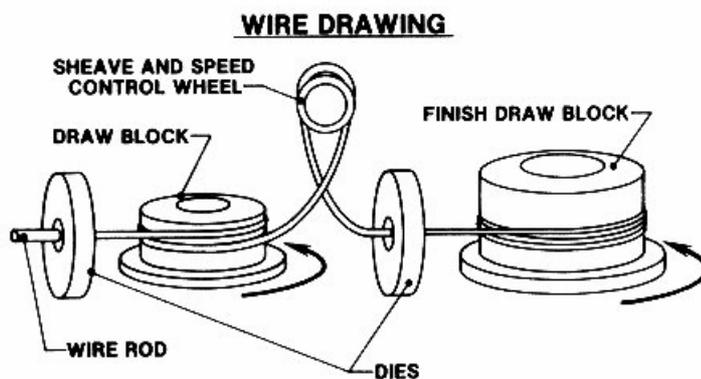
2.2 กระบวนการดึงขึ้นรูปลวด (wire drawing process) ลวดทำขึ้นได้โดยนำแท่งลวดที่ผ่านการรีดร้อนไปเข้าขบวนการดึงเย็น (cold drawing) โดยใช้ด้ายหนึ่งอันหรือมากกว่าดังแสดงในภาพที่ 1 เพื่อลดขนาดของเส้นลวดและเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพ แท่งลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 มิลลิเมตร จะถูกรีดได้จากแท่งเหล็กขนาดกลาง (billet) และนำไปทำความสะอาดในอ่างน้ำกรด เพื่อขจัดสะเก็ดฝอย, สนิมและสารที่เคลือบผิวออก จากนั้นจะเคลือบผิวใหม่ด้วยสารบางตัวเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (oxidation) และทำให้กรดที่ตกค้างอยู่เป็นกลาง นอกจากนี้สารที่เคลือบจะทำตัวเสมือนสารหล่อลื่นซึ่งอาจใช้เป็นตัวยึดเกาะสารหล่อลื่นที่จะใส่เข้าไปภายหลังอีกด้วย



ภาพที่ 1 แสดงหน้าตัดของคายนที่ใช้ในการดึงลวด

ที่มา: แม้น และ สมชัย (2543)

กระบวนการทั้งแบบดึงทีละช่วง (single draft) และการดึงแบบต่อเนื่อง (continuous drawing) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการดึงลวดสำหรับวิธีแรก จะนำปลายของลวดที่ขดไว้รอบแกน (reel or flange) ไปทำให้แหลม เพื่อที่สามารถนำเข้าไปในคายนได้ ปลายลวดแหลมที่ผ่านคายนออกมา จะถูกยึดไว้ด้วยคีมบนแท่นดึง (draw bench) จากนั้นลวดจะถูกดึงผ่านคายนด้วยความยาวที่จะสามารถนำไปพันรอบแท่งดึง (drawing block) แล้วแท่งดึงนี้จะดึงลวดผ่านคายนไปพันรอบตัวของมันจนได้เป็นขดลวดการปฏิบัติการเหล่านี้จะถูกทำซ้ำๆ กันด้วยคายนและแท่งดึงที่มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ขนาดสุดท้ายที่ต้องการ



ก.



ข.

ภาพที่ 2 แสดงกระบวนการดึงลวดแบบต่อเนื่อง

ที่มา: ปิ่น (2548)

ในการดึงแบบต่อเนื่อง ในภาพที่ 2 ลวดจะถูกป้อนเข้าสู่คายและแท่งดึง (draw block) ซึ่งต่อเรียงอนุกรมกันอยู่หลายๆ ชุด ด้วยวิธีการแบบนี้จะสามารถดึงลวดได้ปริมาณมากภายใต้การดึงเพียงครั้งเดียวก่อนที่ลวดโลหะจะแข็งจนต้องการการอบอ่อน จำนวนของคายในอนุกรมขึ้นกับชนิดของโลหะและธาตุผสมซึ่งอาจจะมีได้ในระหว่าง 4-12 ชุด โดยปกติแล้วคายนี้อาจจะทำจากทั้งสแตนคาร์ไบต์ แต่ในกรณีที่ต้องการทำเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดให้เล็กมากๆ คายที่ใช้จะต้องทำมาจากเพชร

เกณฑ์การขึ้นรูป ในการดึงลวดจะหาได้จากสัดส่วนของพื้นที่หน้าตัดก่อนการดึงและหลังการดึง

$$\varphi_h = \ln \frac{A_1}{A_2} \quad (1)$$

โดยที่  $A_1$  คือ พื้นที่หน้าตัดก่อนการลดขนาด

$A_2$  คือ พื้นที่หน้าตัดหลังการลดขนาด

สัมประสิทธิ์ความแรงเสียดทาน ( $\mu$ ) จะมีค่าระหว่าง 0.02-0.05 ค่าเฉลี่ย 0.035

ตารางที่ 2 ความเร็วในการดึงสำหรับกระบวนการดึงขึ้นเดียว

วัสดุ	ความเค้นแรงดึง $\sigma_f$ (N/mm <sup>2</sup> )	$V_{\max}$ (m/s)
ลวดเหล็ก	400	20
	800	15
	1300	10
ทองแดง (อ่อน)	250	20
ทองเหลือง+บรอนซ์	400	
อลูมิเนียม	80-100	25
อลูมิเนียมผสม		

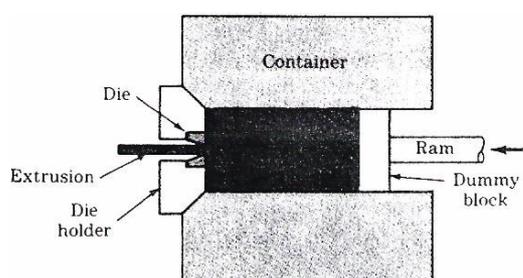
ที่มา: คำรง (2521)

2.3 กระบวนการอัดขึ้นรูปลวด (wire extrusion process) โลหะที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนได้สามารถอัดขึ้นรูปให้เป็นงานที่มีรูปร่างหน้าตัดสม่ำเสมอโดยใช้ความดันเข้าช่วย การอัดขึ้นรูปนี้ใช้กันมานานแล้วในกระบวนการผลิตอิฐ, กระเบื้องกลวง (hollow tile) และท่อดิน (soil pipe) ไปจนกระทั่งในการผลิตมักโรนี โลหะบางชนิด เช่น ตะกั่วและดีบุกสามารถทำการอัดขึ้นรูปในขณะที่เย็นได้ ในขณะที่โลหะชนิดอื่นต้องให้ความร้อนจนมันมีสภาพการเปลี่ยนรูปของพลาสติก ก่อนทำการดันขึ้นรูปในการอัดขึ้นรูปนั้นจะแตกต่างกันไปบ้างตามการประยุกต์ใช้ และชนิด

ของโลหะ แต่หลักการโดยย่อของมันก็คือการให้ความดันกับโลหะ ซึ่งถูกจำกัดอยู่ในห้องแรงดัน (pressure chamber) ผ่านแม่แบบหรือดายที่ได้รับการขึ้นรูปมาเป็นพิเศษผลิตภัณฑ์จากกระบวนการนี้ได้แก่ แท่ง, ท่อ, อุปกรณ์ปรับแบบ (modeling trim), เหล็กโครงสร้าง, กระสุนปืนทองเหลือง (brass cartridges) และเคเบิ้ลเคเบิลตะกั่ว แรงกดที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปโลหะมักจะได้จากไฮดรอลิก ซึ่งกระทำในแนวนอน อัตราเร็วของการปฏิบัติการขึ้นอยู่กับอุณหภูมิกับชนิดของวัสดุซึ่งอัตราเร็วนี้อาจมีได้ตั้งแต่ไม่กี่เซนติเมตรต่อวินาทีไปจนถึง 4.6 เมตรต่อวินาที

ข้อดีของการอัดขึ้นรูปคือ มันสามารถผลิตวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง, ขนาดถูกต้องและมีผิวสำเร็จที่ดี รวมทั้งสามารถให้อัตราการผลิตที่สูงในขณะที่ราคาของแม่พิมพ์ไม่แพง รูปแบบของงานสามารถทำได้มากกว่ากระบวนการอื่นๆ ยกเว้นการหล่อ และเกือบไม่มีข้อจำกัดสำหรับความยาวที่ต่อเนื่องกัน นอกจากนี้การที่ด้ามมีราคาไม่แพงจึงใช้ในการผลิตชิ้นงานต่างๆ ได้คุ้มทุน กระบวนการนี้มีข้อจำกัดคือชิ้นงานต้องมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันตลอดชิ้นงานและอัตราเร็วของมันยังช้ากว่าการรีดถึงสามเท่าอย่างไรก็ดีกระบวนการอัดขึ้นรูปยังแบ่งออกเป็นหลายแบบด้วยกัน

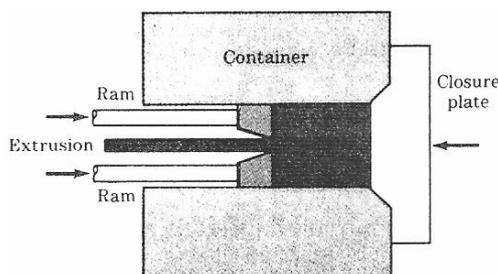
การอัดขึ้นรูปโดยตรง (direct extrusion) การดันขึ้นรูปโดยตรงได้อธิบายไว้ในภาพที่ 3 แท่งเหล็กขนาดกลาง (billet) จะถูกทำให้ร้อนแล้วใส่ลงในห้องอัดของดาย (die chamber) แท่งกันซึม (dummy block) และลูกกระทุ้งจะอัดเข้าไปในแบบ โลหะจะถูกดันไหลผ่านช่องทางเปิดของดายจนเหลือเนื้อโลหะเพียงเล็กน้อย จากนั้นแท่งโลหะจะถูกตัดออกไปใช้งาน ส่วนปลายที่เหลือจากการตัดจะนำออกจากดายภายหลัง



ภาพที่ 3 การอัดขึ้นรูปโดยตรง

ที่มา: แม้น และ สมชัย (2543)

การอัดขึ้นรูปทางอ้อม (indirect extrusion) การอัดขึ้นรูปนี้ก็คล้ายกับการอัดขึ้นรูปโดยตรง เว้นแต่โลหะไหลผ่านไส้กลางของลูกกระทุ้ง ซึ่งวิธีนี้จะใช้แรงขั้บน้อยกว่าเนื่องจากไม่มีแรงเสียดทานระหว่างแท่งเหล็กกับผนังห้องอัด ข้อจำกัดของมันอยู่ที่ความแข็งแรงของลูกกระทุ้งเนื่องจากภายในลูกกระทุ้งจำเป็นต้องมีรูกลวง และยากแก่การจัดหาอุปกรณ์ในการรองรับแท่งโลหะที่ถูกดันออกมา



ภาพที่ 4 การอัดขึ้นรูปทางอ้อม

ที่มา: แม้น และ สมชัย (2543)

เกณฑ์การขึ้นรูปในการอัดขึ้นรูปจะหาได้จากสัดส่วนของพื้นที่หน้าตัดก่อนการอัดและหลังการอัด

$$\phi_h = \ln \frac{A_1}{A_2} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{A_1}{A_2} \quad (3)$$

โดยที่  $\phi_h$  คือ เกณฑ์การขึ้นรูป

$A_1$  คือ พื้นที่หน้าตัดก่อนการลดขนาด

$A_2$  คือ พื้นที่หน้าตัดหลังการลดขนาด

$\lambda$  คือ อัตราลดหน้าตัด

2.4 การศึกษาการเกิดรอยปริแตกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวด จากการศึกษาการขึ้นรูปแบบเส้นทั้งสองวิธีคือกระบวนการดึงขึ้นรูปและกระบวนการอัดขึ้นรูปอาจทำให้การเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้นลวดหลังจากผ่านกระบวนการผลิต ถึงแม้ว่าข้อบกพร่องนี้จะไม่เกิดขึ้นบ่อยแต่ก็มีความสำคัญเนื่องจากไม่สามารถสังเกตเห็นได้จากภายนอกหากนำชิ้นงานที่เกิดการปริแตกไปใช้งานจะทำให้เกิดความเสียหายได้ง่าย จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าสาเหตุของการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางนั้นมีหลายสาเหตุด้วยกันเช่น มุมของตาย, อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด และแรงเสียดทานที่ผิวของชิ้นงานกับตาย

2.4.1 แบบจำลองการขยายตัวของช่องว่างของอนุภาค เนื่องจากโครงสร้างที่ซับซ้อนของวัสดุ Mc Veigh and Liu (2005) ได้สร้างแบบจำลองพื้นฐานของพฤติกรรมของการเกิดรอยปริแตกขึ้นบริเวณแกนกลางของวัสดุโดยกำหนดให้อนุภาคแขวนลอย (second phase particles) มีลักษณะเป็นทรงกลมอยู่ภายในเนื้อวัสดุดังภาพที่ 5ก และกำหนดให้อนุภาคกับเนื้อของวัสดุไม่เกาะติดกัน การไม่เกาะติดกันของอนุภาคกับเนื้อของวัสดุนั้นทำให้อนุภาคนั้นมีพฤติกรรมเหมือนเป็นช่องว่างในเนื้อวัสดุ

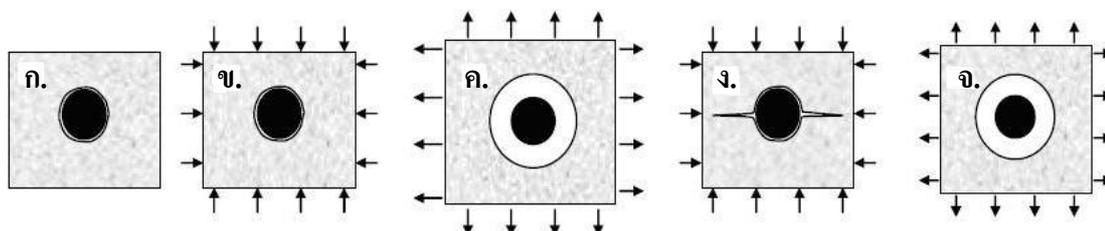
ภาพที่ 5ก รอยปริแตกเกิดการเคลื่อนตัวภายหลังการเกิดการครากของวัสดุ

ภาพที่ 5ข รอยปริแตกไม่มีการเปลี่ยนขนาดถ้ารับความเค้นกด

ภาพที่ 5ค ที่ความเค้นดึงรอยปริแตกจะขยายตัวออก

ภาพที่ 5ง ที่ความเค้นกดรอยปริแตกไม่สามารถปิดได้สนิท

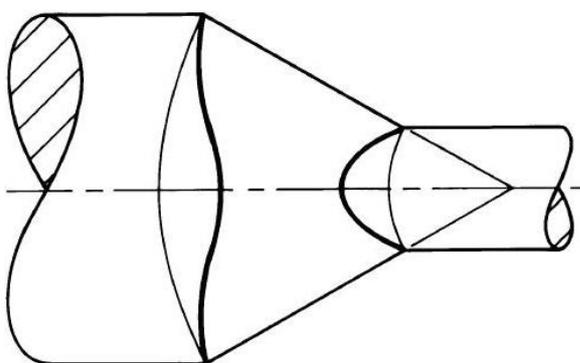
ภาพที่ 5จ ถ้าสภาวะความเค้นกลับไปสู่ความเค้นกดรอยปริแตกจะขยายกลับไป  
ที่ขนาดก่อนเกิดความเค้นกด ภาพที่ 5ค ทั้งนี้



ภาพที่ 5 แบบจำลองของอนุภาค

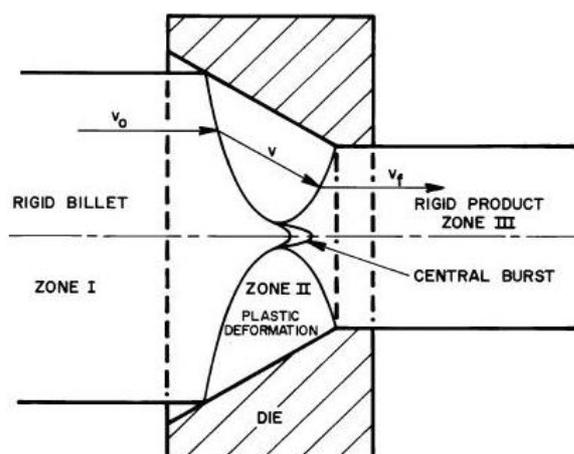
ที่มา: Mc Veigh and Liu (2005)

2.4.2 การเกิดรอยปริแตกขึ้นในชิ้นงานขณะทำการขึ้นรูป การทำความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการการขยายตัวของรอยปริแตก โดยพิจารณาบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ซึ่งสามารถแสดงด้วยบริเวณที่เป็นวงกลมในภาพที่ 6 จากการศึกษาพบว่าบริเวณการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกมีลักษณะดังภาพที่ 6 จะไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดรอยปริแตกขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การเลือกขนาดของคายที่เหมาะสม แต่ถ้าเพิ่มขนาดมุมคาย ผิวของบริเวณการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่ทั้งสองด้านจะไม่ติดกัน เกิดช่องว่างที่บริเวณแกนกลางของชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 7 ความเร็วของชิ้นงานที่ทางออกจะมากกว่าความเร็วของชิ้นงานที่ทางเข้าการลดขนาด



ภาพที่ 6 ลักษณะการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่ไม่เกิดรอยปริแตก

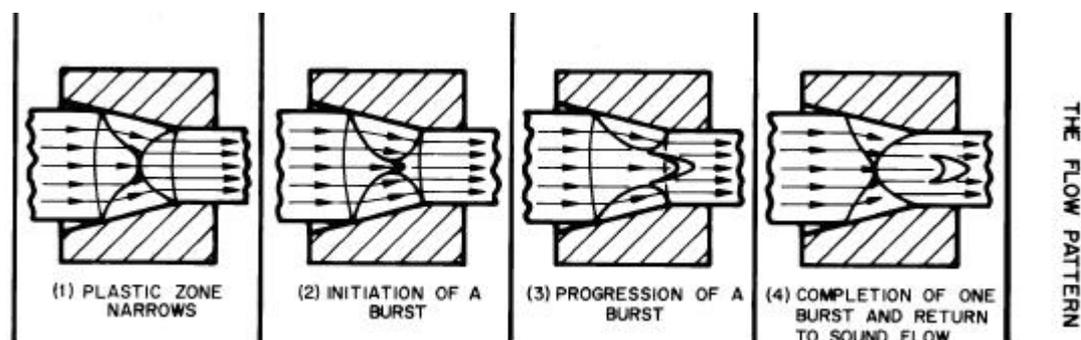
ที่มา: Avitzur (1997)



ภาพที่ 7 ลักษณะการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่เกิดรอยปริแตก

ที่มา: Avitzur (1997)

รอยแตกจะเกิดเริ่มเกิดขึ้นที่จุดสัมผัสของบริเวณการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่เกิดขึ้นรอบๆ ชิ้นงาน ขณะที่ลวดเคลื่อนที่ไปข้างหน้ารอยแตกขนาดเล็กก็จะขยายตัวจนกระทั่งออกไปนอกตาย เนื่องจากลักษณะการไหลเป็นแบบไม่คงที่ทำให้เกิดการรอยแตกเป็นช่วงๆ



ภาพที่ 8 ลักษณะการเกิดรอยแตกและการขยายตัว

ที่มา: Avitzur (1997)

2.5 หลักการการเปลี่ยนแปลงความเค้น การศึกษาก่อนหน้านี้เกี่ยวกับการดิ่งขึ้นรูปและการอัดขึ้นรูป พบว่ามีลักษณะพื้นฐานในการเปลี่ยนรูปร่างที่คล้ายคลึงกันรวมทั้งการเกิดรอยปริแตก บริเวณแกนกลางของชิ้นงานขณะทำการขึ้นรูปด้วย สาเหตุที่สำคัญของการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางของชิ้นงานขณะทำการดิ่งขึ้นรูปและการอัดขึ้นรูปคือขนาดของมุมตาย และอัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน ด้วยขนาดของมุมตาย และอัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่เหมาะสมจะทำให้เกิดรอยปริแตกขึ้น Reddy *et al.* (2000) ได้ทำการศึกษาลักษณะของความเค้นที่เกิดขึ้นที่บริเวณของรอยปริแตก พบว่าที่บริเวณรอยปริแตกนั้นจะมีค่าความเค้นไฮโดรสถิกเท่ากับศูนย์

2.6 การวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปของโลหะด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การวิเคราะห์กระบวนการดิ่งขึ้นรูปและอัดขึ้นรูปของเส้นลวดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ที่โยงยึดกันด้วยจุดต่อ (node) การเปลี่ยนรูปของแต่ละเอลิเมนต์จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขความต่อเนื่องของการขจัด สมดุลของแรงเมื่อรวมแต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกันก็จะเป็นลักษณะการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานทั้งหมดที่สอดคล้องกัน และเงื่อนไขของปริมาตรของชิ้นงานก่อนและหลังการเปลี่ยนรูปจะต้องไม่เปลี่ยนแปลง

โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้วิเคราะห์การการดึงขึ้นรูปและอัดขึ้นรูปของเส้นลวดที่มีประสิทธิภาพสูง อาทิเช่น LS-DYNA, ABAQUS เป็นต้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ปัญหาที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถสร้างและแบ่งชิ้นงานแต่ละบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ (mesh) ได้ตามจำนวนและชนิดที่ต้องการได้ พร้อมทั้งสามารถระบุเงื่อนไขขอบ, แรง หรือการขจัดที่แต่ละจุดต่อ รวมทั้งสามารถระบุอุณหภูมิของแต่ละจุดต่อได้ด้วย ในกรณีของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์งานขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยตรง หรือ โปรแกรม Deform2D, 3D จะใช้งานตีขึ้นรูป (forging) เป็นต้นซึ่งโปรแกรมดังกล่าวจะมีความสามารถที่สูงกว่า อาทิเช่น

- สามารถปรับเปลี่ยนเอลิเมนต์ได้อย่างอัตโนมัติ (adaptive mesh) กล่าวคือในบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปมาก โปรแกรมจะทำการปรับเอลิเมนต์ ซึ่งจะทำการคำนวณผลลัพธ์ได้รวดเร็วและได้ผลที่ละเอียดแม่นยำมากขึ้น
- สามารถจะสร้างแบบแม่พิมพ์ กำหนดผิวแม่พิมพ์ และจัดวางตำแหน่งของแม่พิมพ์ เช่น หัวกด, แม่พิมพ์ และแผ่นยึดจับชิ้นงานอย่างอัตโนมัติ
- มีแบบจำลองของวัสดุและเกณฑ์การคราก หลากหลายให้เลือกใช้ให้เหมาะสมกับวัสดุชนิดต่างๆ
- มีส่วนของการอ่านผลลัพธ์ที่สามารถที่จะแสดงผลในรูปแบบเงตสีที่เข้าใจง่ายสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้มาทำรายงานหรือการนำเสนอด้วยโปรแกรมอื่นๆ ได้

# อุปกรณ์และวิธีการ

## อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ (CPU Intel Pentium IV 1.6 GHz., RAM 1 GB., Hard disk 60 GB.)
2. เครื่องพิมพ์ชนิดใช้แสงเลเซอร์ (Laser Printer)
3. โปรแกรมวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

## วิธีการ

จากการศึกษาพบว่าลักษณะของกระบวนการดึงขึ้นรูปของเส้นลวดมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับกระบวนการอัดขึ้นรูปของเส้นลวดทั้งลักษณะของคาย ลักษณะการเปลี่ยนรูปของเส้นลวด และลักษณะของการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้นลวด แต่จะมีจุดที่แตกต่างกันคือกระบวนการดึงขึ้นรูปนั้นต้องใช้แรงดึงเส้นลวดจากด้านหน้าแต่ในกระบวนการอัดขึ้นรูปจะใช้แรงดันเส้นลวดจากด้านหลัง ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมการศึกษาการทำนายการเกิดรอยปริแตกที่เกิดขึ้นในกระบวนการอัดขึ้นรูปของเส้นลวด

### 1. การศึกษาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.1 การทำนายการปริแตกที่แกนกลางของเส้นลวด การวิเคราะห์การเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการดึงขึ้นรูปและการอัดขึ้นรูปผู้วิจัยใช้สมมุติฐานของ Reddy *et al.* (1996) ที่เสนอการปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้นลวดจะเกิดขึ้นเมื่อค่าความเค้นไฮโดรสแตติก (hydrostatic stress) ที่บริเวณรอยปริแตกนั้นมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังสมการ

$$\sigma_H = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = 0 \quad (4)$$

โดยที่  $\sigma_H$  คือ ความเค้นไฮโดรสแตติก (hydrostatic stress)

$\sigma_{1,2,3}$  คือ ความเค้นหลัก (principal stress) ของแกน 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

เนื่องจากผู้วิจัยทำการศึกษาที่สภาวะคงตัว (steady state) ความยาวของเส้นลวดที่ผ่านบริเวณการลดขนาดแล้วกำหนดให้มีความยาวไม่น้อยกว่าสามเท่าของรัศมีของเส้นลวดที่ผ่านการลดขนาดแล้ว ( $3R_2$ ) และความยาวของเส้นลวดที่ยังไม่ผ่านการลดขนาดต้องมีความยาวไม่น้อยกว่าสามเท่าของรัศมีเริ่มต้นของเส้นลวด ( $3R_1$ )

1.2 การทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการดึงขึ้นรูป ผู้วิจัยทำการศึกษาเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Reddy *et al.* (2000) ที่ทำนายการเกิดรอยปริแตกของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปแบบ ลิจิด-พลาสติก (rigid-plastic) โดยผู้วิจัยสร้างแบบจำลองกระบวนการดักด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และใช้พฤติกรรมวัสดุแบบ อีลาสติก-พลาสติก (elastic-plastic) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างคายกับเส้นลวดมีค่าเท่ากับ 0.05 เพื่อทำการศึกษาปัจจัยของตัวแปรของรูปทรงของคายที่มีผลต่อการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางของลวดคือ อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) และอัตราส่วนระหว่างความยาวของคายกับรัศมีเริ่มต้นของเส้นลวด ( $L/R_1$ ) โดยกำหนดอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดเป็นค่าคงที่ และทำการเปลี่ยนอัตราส่วน  $L/R_1$  ของแบบจำลองครั้งละ 0.1 จนกระทั่งค่าของความเค้นไฮโดรสแตติกที่บริเวณแกนกลางของเส้นลวดมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะเป็จุดที่เกิดการปริแตกที่แกนกลางของเส้นลวดและทำการศึกษาต่อไปโดยเปลี่ยนวัสดุเป็น ทองแดง (OFHC) และทำการศึกษาเช่นเดียวกัน โดยอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดกำหนดตามสมการ

$$\%r = \left[ 1 - \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2 \right] \times 100 \quad (5)$$

โดย  $R_1$  คือ รัศมีของเส้นลวดก่อนการลดขนาด

$R_2$  คือ รัศมีของเส้นลวดหลังการลดขนาด

1.3 การทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการอัดขึ้นรูป ทำการศึกษาโดยสร้างแบบจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้คายเป็นแบบ คายรูปกรวย (conical die) โดยกำหนดให้เส้นลวดทำจากเหล็กและทองแดงตามลำดับ กำหนดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ผิวเท่ากับศูนย์และศึกษาตัวแปรของคายที่มีผลต่อการเกิดรอยปริแตก

บริเวณแกนกลางโดยกำหนดอัตราลดขนาด ( $R_1/R_2$ ) เป็นค่าคงที่ และทำการเปลี่ยนขนาดครึ่งมูมดา (CA) ของแบบจำลองครึ่งละ 1 องศา จนกระทั่งพบค่าความเค้นเส้นไฮโครสแตติกที่บริเวณแกนกลางของชิ้นงานมีค่าเป็นศูนย์ และนำผลการศึกษาที่ได้เปรียบเทียบกับค่า Chrysler Processing Standard (Sriram and Van Tyne, 2002)

## 2. คุณสมบัติของวัสดุ (material properties)

ในการศึกษา ผู้วิจัยเลือกใช้เส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) และทองแดง (OFHC) ในการขึ้นรูป โดยเส้นลวดมีรัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.0125 เมตร กำหนดให้วัสดุทั้งสองชนิดมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น-พลาสติก (elastic-plastic) และกำหนดให้วัสดุมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอมีคุณสมบัติทางกลเหมือนกันทุกทิศทาง (isotropic material)

2.1 คุณสมบัติของเหล็ก (SAE 1090) กำหนดตามการศึกษาของ Reddy *et al.* (2000) ค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุต่างๆ ในช่วงความยืดหยุ่น (elasticity) กำหนดตามตารางที่ 3 ความเค้นคราก (yield stress) มีค่าเท่ากับ 464 MPa ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในช่วงพลาสติกกำหนดตามสมการ

$$\bar{\sigma} = 1115 \bar{\epsilon}^{-0.19} \text{ MPa} \quad (6)$$

โดย  $\bar{\sigma}$  คือ ความเค้น (generalized stress)

$\bar{\epsilon}$  คือ ความเครียด (generalized strain)

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของวัสดุเหล็ก (SAE 1090)

ลักษณะของวัสดุ	ความหนาแน่น, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	ความเค้นคราก, $S_y$ (MPa)	ค่าโมดูลัสของความ ยืดหยุ่น, $E$ (GPa)	ค่าอัตราส่วนปัว ซอง, $\nu$
Isotropic	7850	464	210	0.3

2.1.1 คุณสมบัติของวัสดุทองแดง (OFHC) กำหนดตามการศึกษาของ Anand (1996) ค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุต่างๆในช่วงความยืดหยุ่น (elasticity) กำหนดตามตารางที่ 4 ความเค้นครากมีค่าเท่ากับ 90 MPa ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในช่วงพลาสติกกำหนดตามสมการ

$$\bar{\sigma} = 90 + 292(\bar{\epsilon}^{pl})^{0.31} \quad (7)$$

โดยที่  $\bar{\epsilon}^{pl}$  คือ ค่าความเครียดแบบพลาสติก (plastic strain)

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของวัสดุทองแดง (OFHC)

ลักษณะของวัสดุ	ความหนาแน่น, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	ความเค้นคราก, $S_y$ (MPa)	ค่าโมดูลัสของความ ยืดหยุ่น, $E$ (GPa)	ค่าอัตราส่วนปัว ซอง, $\nu$
Isotropic	8960	90	124	0.34

### 3. การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการดึงขึ้นรูป (drawing process)

3.1 การสร้างแบบจำลองของกระบวนการดึงขึ้นรูป สร้างตามการศึกษาของ Reddy *et al.* (2000) ดังภาพที่ 9 มีลักษณะของคานในช่วงทำการลดขนาด (L) กำหนดตามสมการที่ 8 มีความยาวของคานในช่วงหลังการลดขนาดเท่ากับรัศมีของเส้นลวดที่ผ่านการลดขนาดแล้ว ( $R_2$ ) ทำการจำลองคานของ Reddy *et al.* (2000) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดให้คานมีลักษณะเป็นแบบ 2 มิติ สมมาตรรอบแกน Z (axisymmetric) คานที่ใช้ในการขึ้นรูปต้องเป็นวัสดุที่แข็งมากดังนั้นในการสร้างแบบจำลองจึงกำหนดให้คานเป็นวัสดุแข็งเกร็ง (rigid body) ไม่เกิดการเปลี่ยนรูปขณะทำการคำนวณ

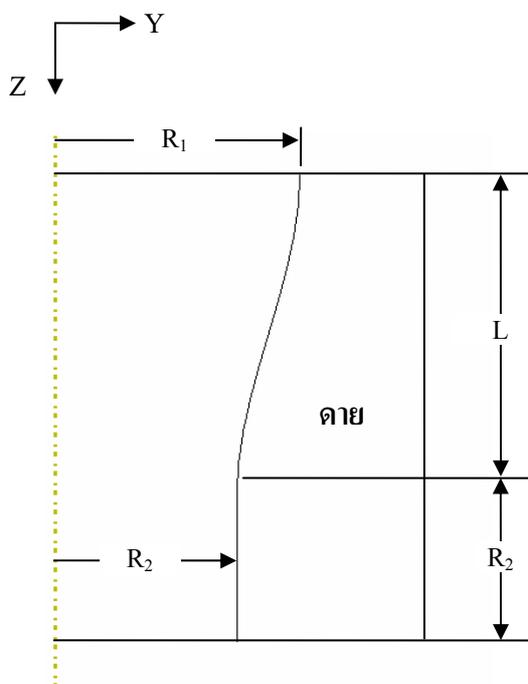
สมการที่ใช้ในการสร้างขอบเขตของคานในบริเวณการลดขนาด (L)

$$R(z) = R_1 + (R_1 - R_2) \left( 2 \frac{z^3}{L^3} - 3 \frac{z^2}{L^2} \right) \quad (8)$$

โดยที่  $R(z)$  คือ รัศมีของคานที่ตำแหน่ง  $z$

$L$  คือ ความยาวของคานยบริเวณทำการลดขนาด

$z$  คือ ตำแหน่งที่แกนกลางของเส้นลวดในบริเวณทำการลดขนาด ( $L$ )



ภาพที่ 9 ลักษณะของคานยที่ใช้ในกระบวนการดึงขึ้นรูป

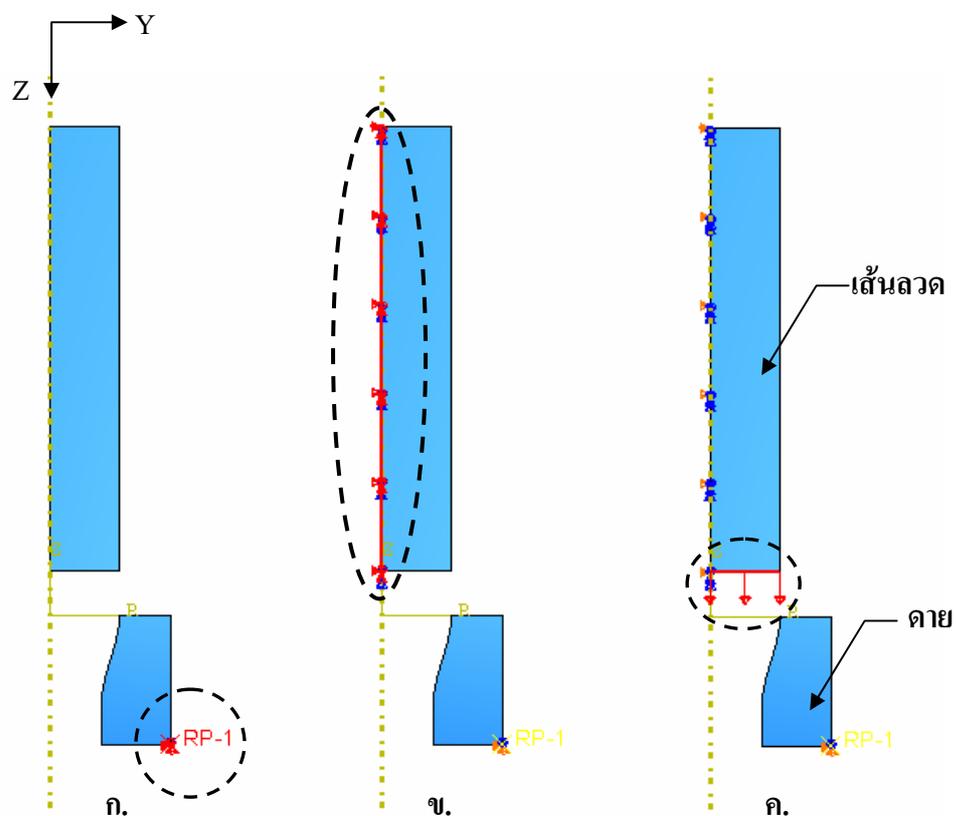
3.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ในงานวิจัยนี้กำหนดให้การคำนวณเป็นแบบสถิต (static) มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ผิวระหว่างคานยกับเส้นลวด เท่ากับ 0.05 ตามการศึกษาของ Reddy *et al.* (2000) และเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ของการวิเคราะห์กำหนดโดย

เงื่อนไขที่ 1 กำหนดให้คานยไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่งในทุกทิศทาง ภาพที่ 10ก

เงื่อนไขที่ 2 กำหนดให้บริเวณแกนกลางของเส้นลวดไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y ภาพที่ 10ข

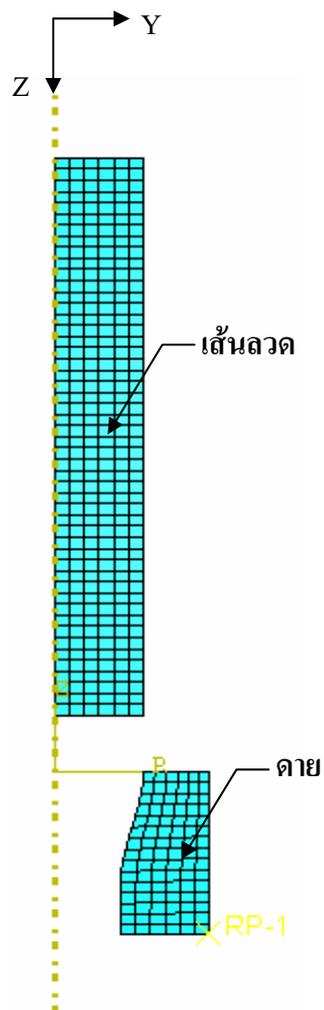
เงื่อนไขที่ 3 ให้เส้นลวดเคลื่อนที่ผ่านคานยโดยกำหนดให้เกิดการเคลื่อนที่บริเวณผิวด้านหน้าของเส้นลวดในแกน Z เพื่อทำการดึงเส้นลวดผ่านคานย ภาพที่ 10ค

เงื่อนไขที่ 4 กำหนดให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ผิวเท่ากับ 0.05



ภาพที่ 10 เงื่อนไขขอบเขตของการดิ่งขึ้นรูป

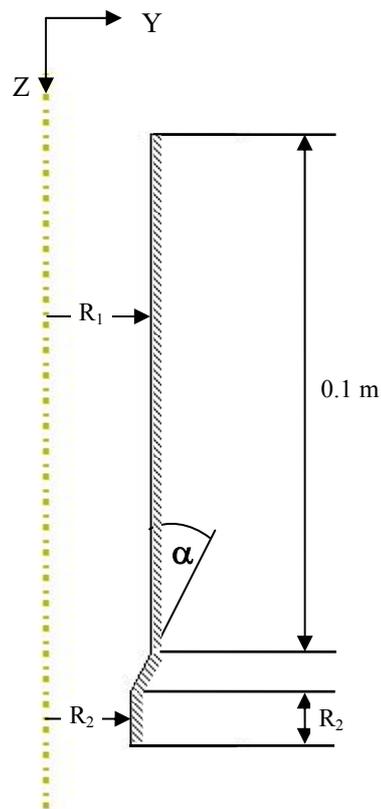
3.3 การแบ่งเอลิเมนต์ (mesh) การแบ่งเอลิเมนต์ของเส้นลวดใช้เอลิเมนต์ทรงสี่เหลี่ยมสี่จุดต่อสมมาตรรอบแกน Z (axisymetry element) จำนวน 300 เอลิเมนต์ การแบ่งเอลิเมนต์ของคานใช้เอลิเมนต์ทรงสี่เหลี่ยมสี่จุดต่อสมมาตรรอบแกน Z จำนวนเอลิเมนต์แบ่งตามอัตราส่วนของโปรแกรมแบบจำลองกระบวนการดิ่งขึ้นรูปที่ทำการแบ่งเอลิเมนต์แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการดึงขึ้นรูป

#### 4. การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการอัดขึ้นรูป (extrusion process)

4.1 การสร้างแบบจำลองของกระบวนการ กระบวนการอัดขึ้นรูปที่นำมาทำการศึกษาเพื่อทำการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น เป็นผลการศึกษาของ Sriram and Van Tyne (2002) ที่มีลักษณะของดายเป็นดายรูปกรวย (conical die) ทำการจำลองรูปทรงของดายโดยใช้ตัวแปร 2 ตัวคือ ขนาดครึ่งมุมดาย ( $\alpha$ ) และอัตราส่วน  $R_1/R_2$  กำหนดให้ดายเป็นวัสดุแข็งเกร็ง (rigid body) แบบจำลองของดายมีลักษณะเป็นแบบ 2 มิติ สมมาตรรอบแกน Z (axisymmetry)



ภาพที่ 12 ลักษณะของคานที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูป

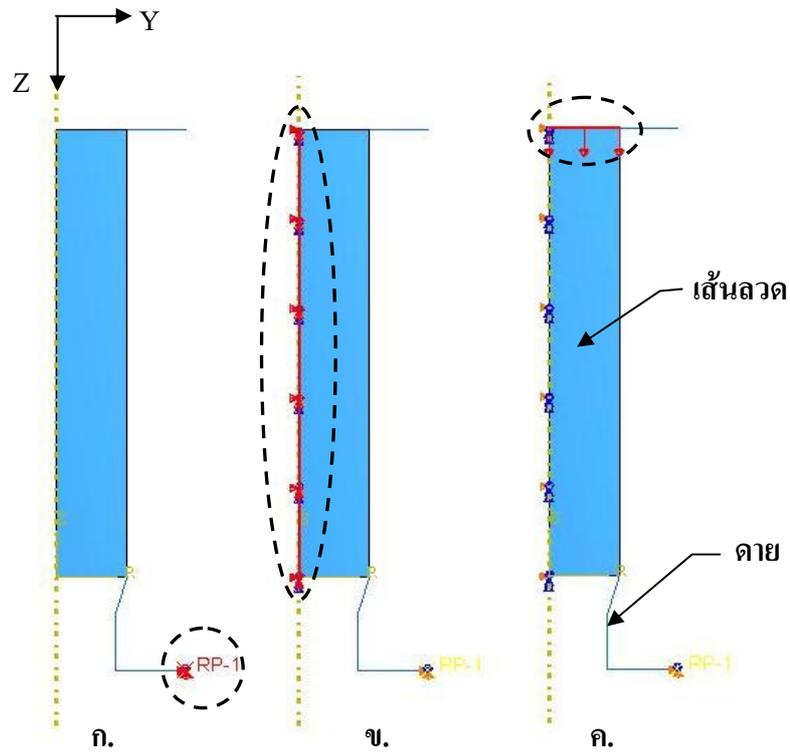
4.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการวิเคราะห์ ในงานวิจัยนี้กำหนดให้การคำนวณเป็นแบบสถิต (static) ไม่มีแรงเสียดทานที่ผิวตามการศึกษาของ Sriram and Van Tyne (2002) และเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ของการวิเคราะห์กำหนดโดย

เงื่อนไขที่ 1 กำหนดให้คานไม่มีการเคลื่อนที่ในทุกทิศทาง ภาพที่ 13ก

เงื่อนไขที่ 2 กำหนดให้บริเวณแกนกลางของเส้นลวดไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y ภาพที่ 13ข

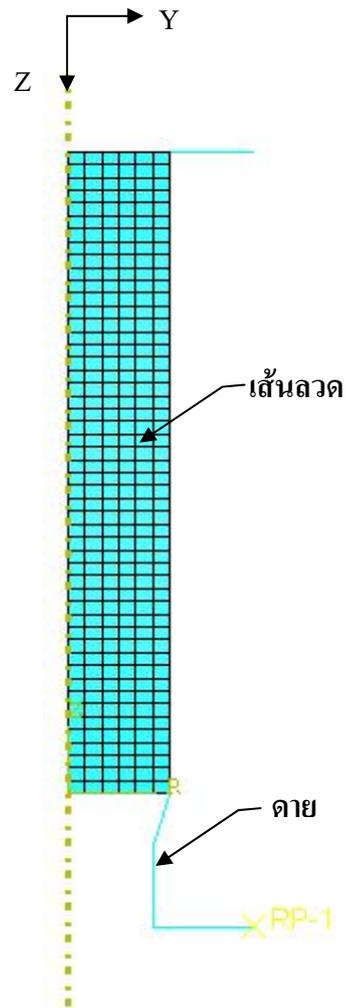
เงื่อนไขที่ 3 ให้เส้นลวดเคลื่อนที่ผ่านคานโดยกำหนดให้เกิดการเคลื่อนที่บริเวณผิวด้านหลังของเส้นลวดในแกน Z เพื่อทำการดันเส้นลวดผ่านคาน ภาพที่ 13ค

เงื่อนไขที่ 4 กำหนดให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ผิวเท่ากับศูนย์



ภาพที่ 13 เงื่อนไขขอบเขตของการอัดขึ้นรูป

4.3 การแบ่งเอลิเมนต์ (mesh) การแบ่งเอลิเมนต์ของเส้นลวดใช้เอลิเมนต์ทรงสี่เหลี่ยมสี่จุดต่อสมมาตรรอบแกน Z (axisymmetric element) จำนวน 300 เอลิเมนต์ การแบ่งเอลิเมนต์ของคานใช้เอลิเมนต์เส้นตรงสองจุดต่อสมมาตรรอบแกน Z จำนวนเอลิเมนต์แบ่งตามอัตราส่วนของโปรแกรมแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการอัดขึ้นรูปแสดงในภาพที่ 14



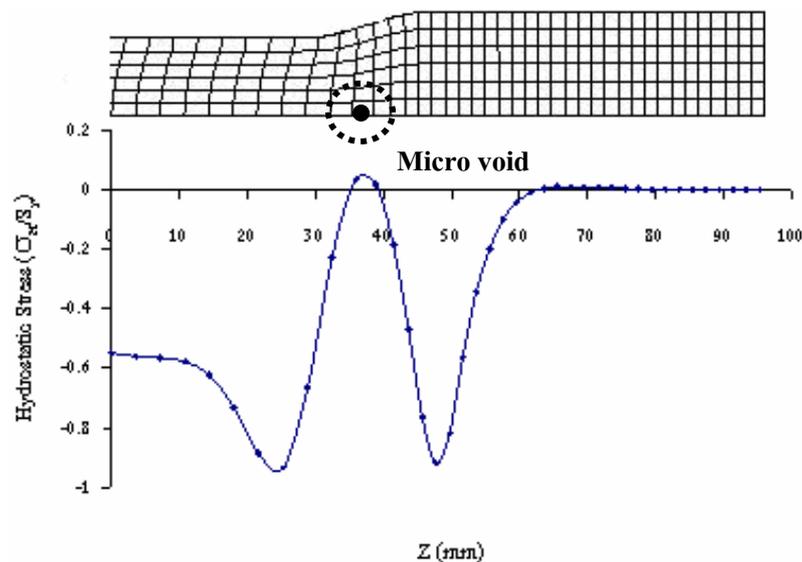
ภาพที่ 14 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการอัดขึ้นรูป

## ผลและวิจารณ์

### ผล

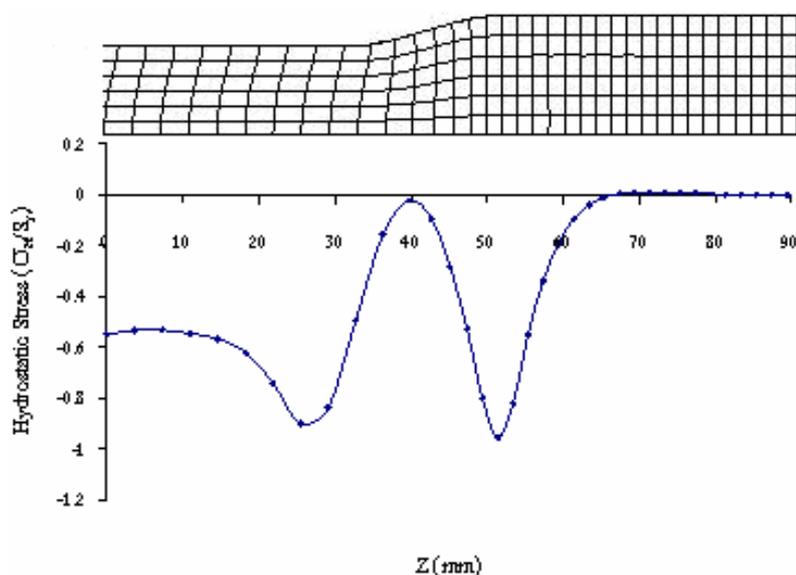
#### 1. การทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางในการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์ และ ที่อัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.5 ของเส้นลวดเหล็กพบว่าเกิดการปริแตกที่บริเวณแกนกลางของเส้นลวด โดยค่าความเค้นไฮโดรสแตติกที่บริเวณทำการลดขนาดมีค่าตัดแกนศูนย์และเป็นบวกเท่ากับ 0.0328 การเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของชิ้นงานจะมีค่าเป็นลบเมื่อชิ้นงานผ่านการลดขนาดแล้ว และค่าความเค้นไฮโดรสแตติกจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าเป็นบวกเมื่อชิ้นงานเริ่มเข้าสู่บริเวณการลดขนาดและมีค่าลดลงเมื่อผ่านบริเวณการลดขนาดไปแล้ว ที่บริเวณที่ยังไม่ได้ทำการลดขนาดค่าความเค้นไฮโดรสแตติกจะมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยลักษณะของความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลาง และตำแหน่งที่เกิดรอยปริแตกขึ้นแสดงในภาพที่ 15



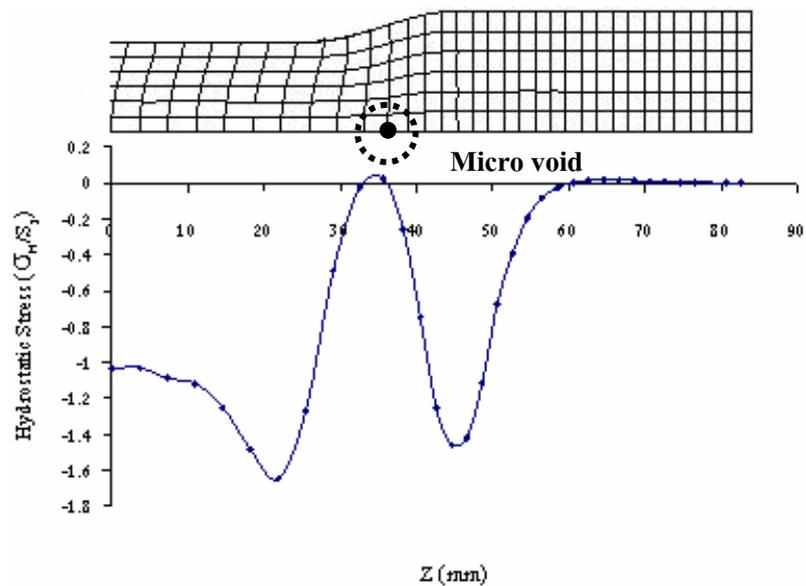
ภาพที่ 15 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการดึงขึ้นรูปในแบบจำลองที่เกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลาง ( $\%r=45$ ,  $L/R_1=1.5$  เหล็ก (SAE1090))

จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์ และที่อัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.6 ของเส้นลวดเหล็กพบว่าไม่เกิดการปริแตกที่บริเวณแกนกลางของเส้นลวดโดยค่าความเค้นไฮโดรสแตติกที่บริเวณทำการลดขนาดสูงสุดเท่ากับ -0.0224 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเค้นไฮโดรสแตติกบริเวณแกนกลางของชิ้นงานมีลักษณะเหมือนกับแบบจำลองที่พบรอยปริแตกบริเวณแกนกลางคือค่าความเค้นไฮโดรสแตติกจะมีค่าเป็นลบเมื่อชิ้นงานผ่านการลดขนาดและค่าความเค้นไฮโดรสแตติกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อชิ้นงานเริ่มเข้าสู่บริเวณการลดขนาดแต่จะไม่เท่ากับศูนย์ดังภาพที่ 16



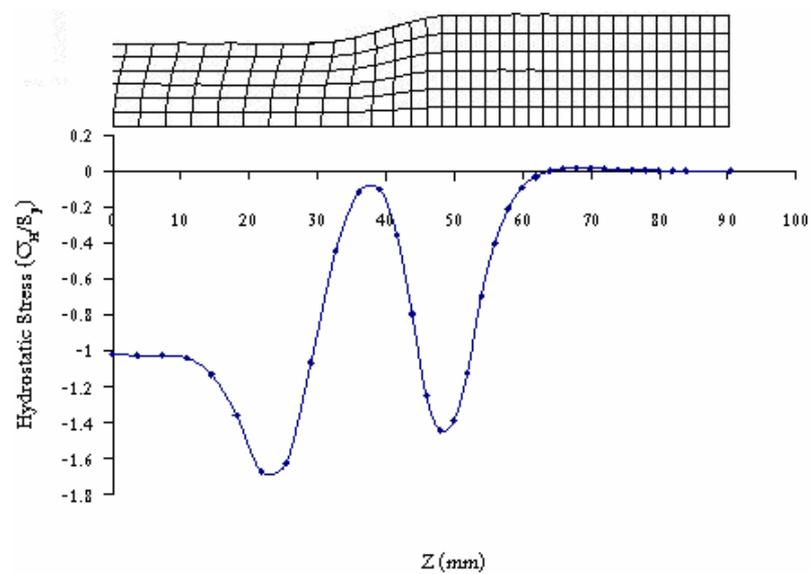
ภาพที่ 16 ความเค้นไฮโดรสแตติก ที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการดึงขึ้นรูป ในแบบจำลองที่ไม่เกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลาง ( $\%r=45$ ,  $L/R_1=1.6$  เหล็ก (SAE1090))

จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์ และที่อัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.5 ของเส้นลวดทองแดงพบว่าเกิดการปริแตกที่บริเวณแกนกลางของเส้นลวดโดยค่าความเค้นไฮโดรสแตติกที่บริเวณทำการลดขนาดมีค่าตัดแกนศูนย์และเป็นบวกเท่ากับ 0.0253 การเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดงจะมีลักษณะเหมือนกับเส้นลวดเหล็กที่อัตราส่วนเดียวกัน โดยลักษณะของความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลาง และตำแหน่งที่เกิดรอยปริแตกขึ้นแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการดึงขึ้นรูป ในแบบจำลองที่เกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลาง ( $\%r=45$ ,  $L/R_1=1.5$  ทองแดง (OFHC))

จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการผลิตพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์ และ ที่อัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.6 ของเส้นลวดทองแดงพบว่าไม่เกิดการปริแตกที่บริเวณแกนกลางของเส้นลวดโดยค่าความเค้นไฮโดรสแตติกที่บริเวณทำการลดขนาดมีค่าสูงสุดเท่ากับ -0.1006 การเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดจะมีลักษณะเหมือนกับเส้นลวดเหล็กที่อัตราส่วนเดียวกัน โดยลักษณะของความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลาง และตำแหน่งที่เกิดรอยปริแตกขึ้นแสดงในภาพที่ 18



**ภาพที่ 18** ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการดึงขึ้นรูป ในแบบจำลองที่ไม่เกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลาง ( $\%r=45$ ,  $L/R_1=1.6$  ทองแดง (OFHC))

ผลการวิเคราะห์การปริแตกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดจากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด 10, 30, 40 และ 45 เปอร์เซ็นต์ และการเปลี่ยนอัตราส่วน  $L/R_1$  ของแบบจำลองจนกระทั่งพบว่าค่าความเค้นไฮโดรสแตติกที่บริเวณแกนกลางของเส้นลวดมีค่าเป็นศูนย์แสดงในตารางที่ 5 โดยทำการวิเคราะห์เส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) และทองแดง (OFHC)

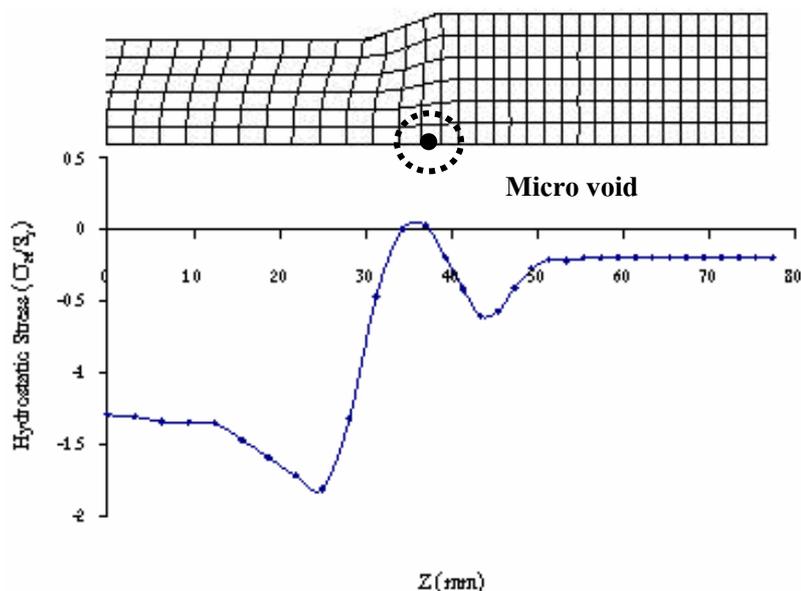
ตารางที่ 5 ผลการทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางขณะทำการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%)	$L/R_1$	การเกิดรอยปริแตก	
		เหล็ก (SAE1090)	ทองแดง (OFHC)
10	1.1	เกิด	เกิด
10	1.2	เกิด	เกิด
10	1.3	ไม่เกิด	ไม่เกิด
10	1.4	ไม่เกิด	ไม่เกิด
30	1.2	เกิด	เกิด
30	1.3	เกิด	เกิด
30	1.4	ไม่เกิด	ไม่เกิด
30	1.5	ไม่เกิด	ไม่เกิด
40	1.3	เกิด	เกิด
40	1.4	เกิด	เกิด
40	1.5	ไม่เกิด	ไม่เกิด
40	1.6	ไม่เกิด	ไม่เกิด
45	1.4	เกิด	เกิด
45	1.5	เกิด	เกิด
45	1.6	ไม่เกิด	ไม่เกิด
45	1.7	ไม่เกิด	ไม่เกิด

## 2. การทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางในการอัดขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

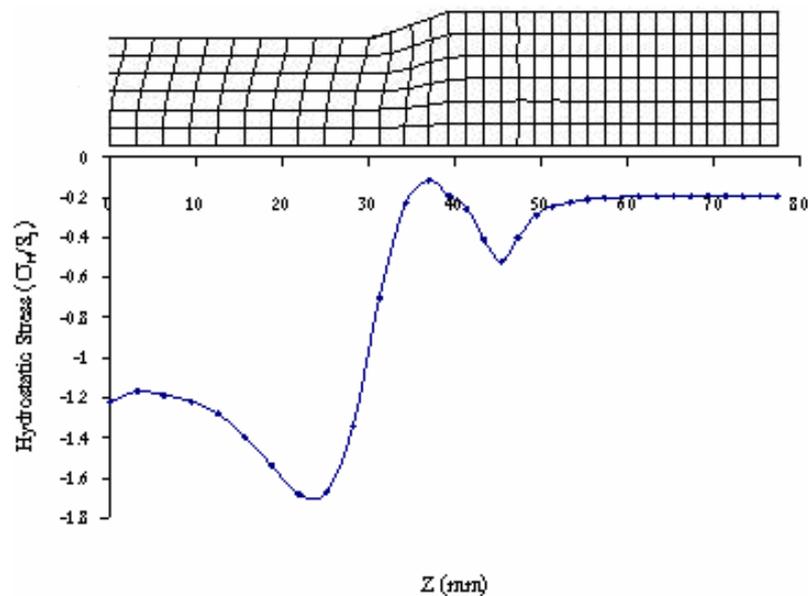
ผลจากการวิเคราะห์การอัดขึ้นรูปเส้นลวดเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดขนาด ( $R_1/R_2$ ) เท่ากับ 1.25 และขนาดครึ่งมุมตาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $17^\circ$  พบการปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้นลวด โดยค่าความเค้นไฮโดรสแตติกที่บริเวณทำการลดขนาดตัดแกนศูนย์และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.0331 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของ

ชิ้นงานจะมีลักษณะคล้ายกับการดึงขึ้นรูปโดยจะมีค่าเป็นลบเมื่อขึ้นงานผ่านการลดขนาดและค่าความเค้นไฮโดรสแตติกจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าเป็นบวกเมื่อขึ้นงานเริ่มเข้าสู่บริเวณการลดขนาดและมีค่าลดลงเมื่อผ่านบริเวณลดขนาดไปแล้ว ที่ลักษณะความเค้นไฮโดรสแตติกแตกต่างจากการดึงขึ้นรูปคือที่บริเวณที่ยังไม่ได้ทำการลดขนาดค่าความเค้นไฮโดรสแตติกจะมีค่าเป็นลบ โดยลักษณะของความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลาง และตำแหน่งที่เกิดรอยปริแตกขึ้นแสดงในภาพที่ 19



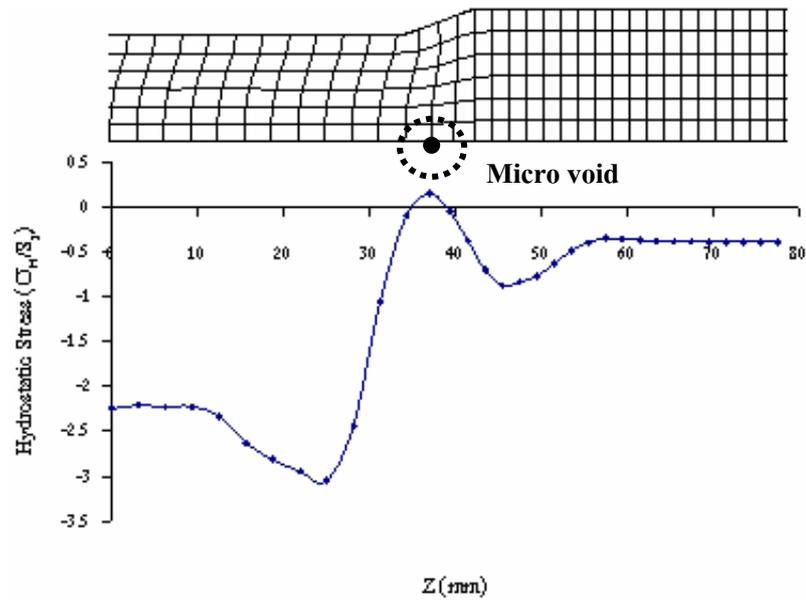
**ภาพที่ 19** ความเค้นไฮโดรสแตติก ที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการอัดขึ้นรูป ในแบบจำลองที่เกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลาง ( $R_1/R_2 = 1.25$ ,  $\alpha = 17^\circ$ , เหล็ก (SAE 1090))

จากการทดลองการอัดขึ้นรูปเส้นลวดเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดขนาด ( $R_1/R_2$ ) เท่ากับ 1.25 และขนาดมุมครึ่งมุมตาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $16^\circ$  ไม่พบการปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้นลวด โดยค่าความเค้นไฮโดรสแตติกที่บริเวณทำการลดขนาดมีค่าสูงสุดเท่ากับ -0.1152 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของชิ้นงานจะมีลักษณะคล้ายกับการแบบจำลองที่เกิดการปริแตกบริเวณแกนกลางลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเค้นไฮโดรสแตติกแสดงในภาพที่ 20

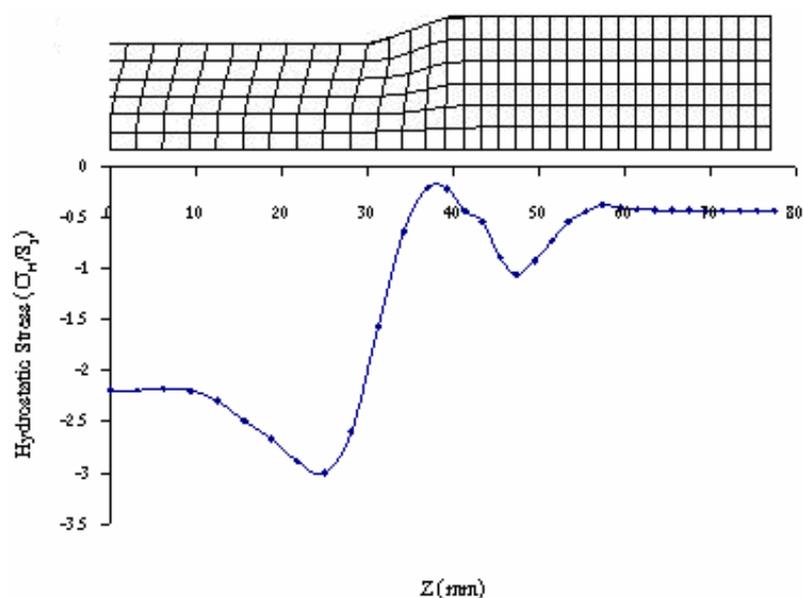


ภาพที่ 20 ความเค้นไฮโดรสแตติก ที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการอัดขึ้นรูป ในแบบจำลองที่ไม่เกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลาง ( $R_1/R_2 = 1.25$ ,  $\alpha = 16^\circ$ , เหล็ก (SAE 1090))

จากการวิเคราะห์การอัดขึ้นรูปเส้นลวดทองแดงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราลดขนาด ( $R_1/R_2$ ) เท่ากับ 1.25 และขนาดมุมครึ่งมุมคาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $17^\circ$  พบว่าเกิดการปริแตกที่บริเวณแกนกลางของเส้นลวดโดยค่าความเค้นไฮโดรสแตติกที่บริเวณทำการลดขนาดมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.1492 และที่อัตราลดขนาด ( $R_1/R_2$ ) เท่ากับ 1.25 และขนาดมุมครึ่งมุมคาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $16^\circ$  ไม่พบการปริแตกที่บริเวณแกนกลางของเส้นลวดโดยค่าความเค้นไฮโดรสแตติกที่บริเวณทำการลดขนาดมีค่าสูงสุดเท่ากับ -0.0214 โดยลักษณะของความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางและตำแหน่งที่เกิดรอยปริแตกขึ้นแสดงในภาพที่ 21 และภาพที่ 22 ตามลำดับ



ภาพที่ 21 ความเค้นไฮโดรสแตติก ที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการอัดขึ้นรูป ในแบบจำลองที่เกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลาง ( $R_1/R_2 = 1.25$ ,  $\alpha = 17^\circ$ , ทองแดง (OFHC))



ภาพที่ 22 ความเค้นไฮโดรสแตติก ที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการอัดขึ้นรูป ในแบบจำลองที่ไม่เกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลาง ( $R_1/R_2 = 1.25$ ,  $\alpha = 16^\circ$ , ทองแดง (OFHC))

ผลการศึกษาการวิเคราะห์การปริแตกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดจากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการอัดขึ้นรูปโดยกำหนดอัตราการลดขนาด ( $R_1/R_2$ ) เท่ากับ 1.05, 1.1, 1.15, 1.2 และ 1.25 และทำการเปลี่ยนขนาดครึ่งมุมตาย ( $\alpha$ ) จนกระทั่งพบว่าค่าความเค้นไฮโดรสแตติกที่บริเวณแกนกลางของเส้นลวดมีค่าเป็นศูนย์แสดงในตารางที่ 6 โดยทำการวิเคราะห์เส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) และเส้นลวดทองแดง (OFHC)

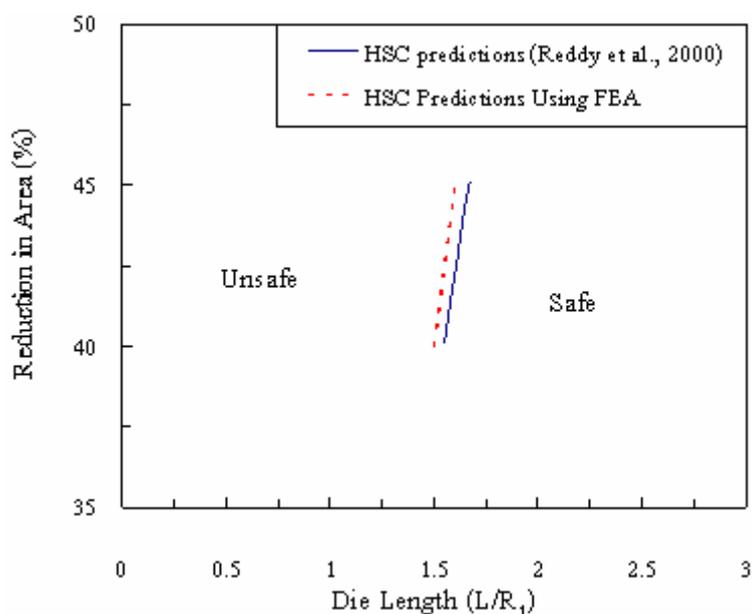
ตารางที่ 6 แสดงผลการทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางในกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อัตราส่วนการลด ขนาด ( $R_1/R_2$ )	ขนาดครึ่งมุมคาย (degree) ( $\alpha$ )	การเกิดรอยปริแตก	
		เหล็ก (SAE1090)	ทองแดง (OFHC)
1.05	1°	ไม่เกิด	ไม่เกิด
1.05	2°	ไม่เกิด	ไม่เกิด
1.05	3°	เกิด	เกิด
1.05	4°	เกิด	เกิด
1.1	4°	ไม่เกิด	ไม่เกิด
1.1	5°	ไม่เกิด	ไม่เกิด
1.1	6°	เกิด	เกิด
1.1	7°	เกิด	เกิด
1.15	9°	ไม่เกิด	ไม่เกิด
1.15	10°	ไม่เกิด	ไม่เกิด
1.15	11°	เกิด	เกิด
1.15	12°	เกิด	เกิด
1.2	14°	ไม่เกิด	ไม่เกิด
1.2	15°	ไม่เกิด	ไม่เกิด
1.2	16°	เกิด	เกิด
1.2	17°	เกิด	เกิด
1.25	15°	ไม่เกิด	ไม่เกิด
1.25	16°	ไม่เกิด	ไม่เกิด
1.25	17°	เกิด	เกิด
1.25	18°	เกิด	เกิด

## วิจารณ์

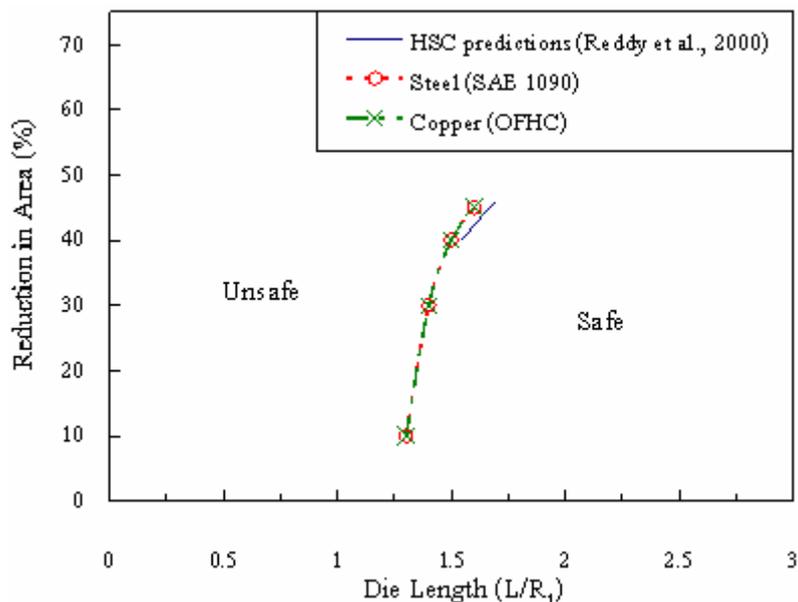
### 1. ผลการทำนายการเกิดรอยปริแตกขณะทำการดึงขึ้นรูป

ผู้วิจัยได้นำผลการวิเคราะห์จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับการศึกษาของ Reddy *et al.* (2000) และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนการลดพื้นที่ กับ อัตราส่วน  $L/R_1$  ดังภาพที่ 23 พบว่าการศึกษาทั้งสองวิธีให้ผลที่สอดคล้องกัน แต่ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดมากกว่า 45 เปอร์เซ็นต์ วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่สามารถวิเคราะห์หาการปริแตกที่เกิดขึ้นได้เพราะเกิดการผิดรูปของเส้นลวดอย่างมากในบริเวณหน้าสัมผัสที่ทางเข้าดาย



ภาพที่ 23 แสดงการทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางขณะทำการดึงขึ้นรูปเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) เปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ Reddy *et al.* (2000)

ผู้วิจัยได้นำผลการวิเคราะห์การดึงขึ้นรูปเส้นลวดทองแดงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์การดึงขึ้นรูปเหล็กและผลการศึกษาของ Reddy *et al.* (2000) พบว่าผลการวิเคราะห์การดึงขึ้นรูปเส้นลวดทองแดงและเส้นลวดเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 40 และ 45 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเท่ากัน แสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 แสดงการทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) และทองแดง (OFHC) จากกระบวนการดิ่งขึ้นรูปเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Reddy *et al.* (2000)

ผลการวิเคราะห์การดิ่งขึ้นรูปเส้นลวดเหล็กและเส้นลวดทองแดงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีค่าเท่ากับดังภาพที่ 24 และผลการวิเคราะห์ขอบเขตที่ปลอดภัยในการออกแบบคายที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูปเส้นลวดเหล็กและเส้นลวดทองแดง พบว่ามีค่าเท่ากับทุกอัตราการลดพื้นที่หน้าตัด จากผลการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้นลวดในการดิ่งขึ้นรูป คืออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด และความยาวของช่วงการลดขนาด

จากผลการวิเคราะห์พบว่าที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดสูงผลการวิเคราะห์จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าลู่ออกจากกราฟของ Reddy *et al.* (2000) ทั้งนี้อาจจะเกิดจากความเค้นเฉือนในแนวสัมผัสระหว่างผิวของเส้นลวดกับคาย ( $t_s$ ) มีค่ามากกว่า  $\frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}}$  ซึ่งผู้วิจัยไม่สามารถปรับค่าความเค้น  $t_s$  ให้เป็นไปตามเงื่อนไข

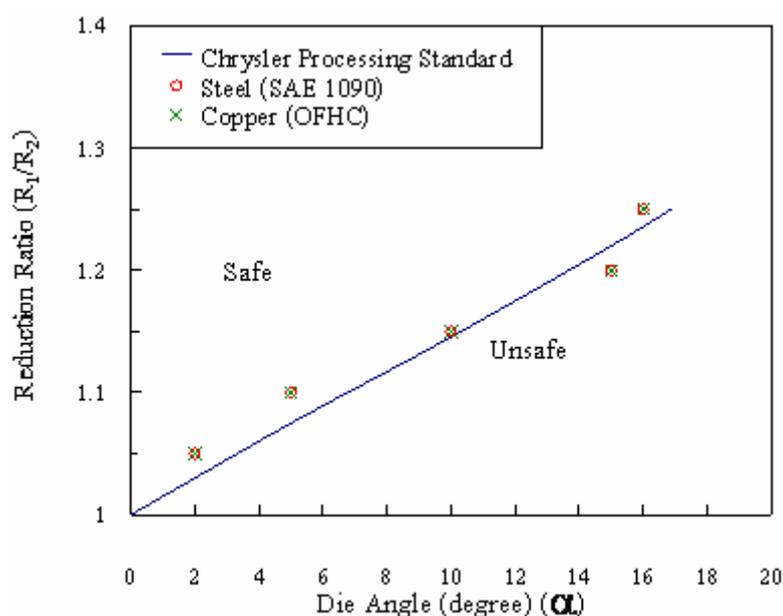
$$|t_s| = f|t_n| \quad \text{เมื่อ} \quad |t_s| \leq \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}}$$

$$|t_s| = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \quad \text{เมื่อ} \quad |t_s| > \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}}$$

ดังนั้นจึงพบว่าเกิดการเสียรูปของเส้นลวดอย่างมากในบริเวณหน้าสัมผัสระหว่างเส้นลวดกับคายน

## 2. ผลการทำนายการการเกิดรอยปริแตกขณะทำการอัดขึ้นรูป

ผู้วิจัยได้นำผลการวิเคราะห์การอัดขึ้นรูปเส้นลวดเหล็กและเส้นลวดทองแดงจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับค่า Chrysler Processing Standard (Sriram and Van Tyne, 2002) และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการลดขนาด ( $R_1/R_2$ ) กับ ขนาดมุมครึ่งมุมคายน ดังภาพที่ 25 พบว่าให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกัน และเส้นลวดเหล็กและเส้นลวดทองแดงมีผลการวิเคราะห์เท่ากัน แต่ที่อัตราการลดขนาดมากกว่า 1.25 วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่สามารถวิเคราะห์หาการปริแตกที่เกิดขึ้นได้



ภาพที่ 25 การทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางขณะทำการอัดขึ้นรูปของวัสดุเหล็ก (SAE 1090) และทองแดง (OFHC) เปรียบเทียบกับค่า Chrysler Processing Standard

นอกจากนี้ยังพบอีกว่ามีความปลอดภัยมากขึ้นถ้าเราทำนายการปริแตกของกระบวนการอัดขึ้นรูปของเหล็ก และทองแดงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากผลการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยสำคัญที่มีผล

ต่อการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้นลวดในการอัดขึ้นรูปคืออัตราส่วนการลดขนาด และขนาดครึ่งมุมคาย

### 3. การศึกษาความเค้นขึ้นรูป

การศึกษาความเค้นขึ้นรูปแบ่งเป็น ความเค้นดึงขึ้นรูป และความเค้นอัดขึ้นรูป

3.1 ความเค้นดึงขึ้นรูป (drawing stress) ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความเค้นดึงขึ้นรูป จากแบบจำลองที่ไม่พบรอยปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็กและเส้นลวดทองแดง ได้ผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 7 และนำผลการวิเคราะห์ความเค้นดึงขึ้นรูปมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นดึงขึ้นรูปกับ อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด พบว่าค่าความเค้นดึงขึ้นรูปจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการลดพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น และความเค้นดึงขึ้นรูปเส้นลวดทองแดงมีค่ามากกว่าความเค้นดึงขึ้นรูปของเส้นลวดเหล็ก แสดงในภาพที่ 26

โดยความเค้นดึงขึ้นรูปกำหนดตามสมการ

$$\sigma_f = \frac{F_{front}}{A_2} \quad (9)$$

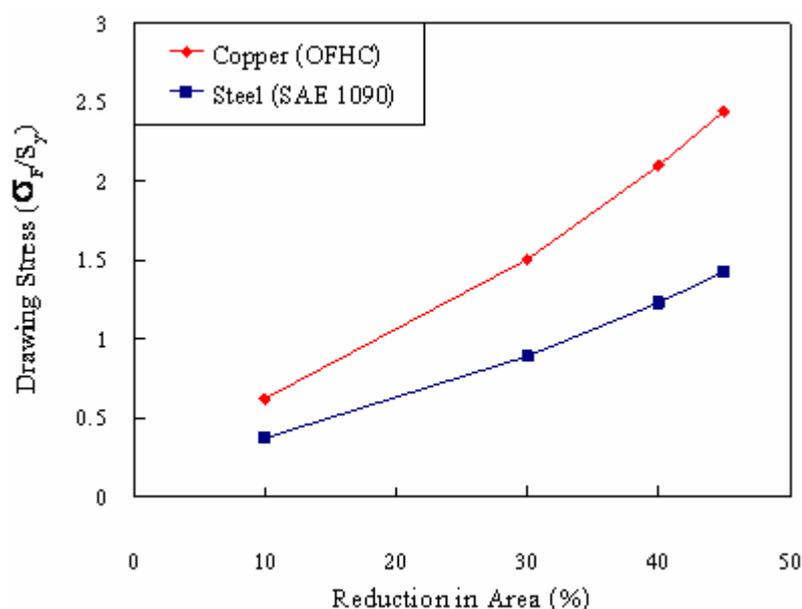
โดย  $F_{front}$  คือ แรงดึงขึ้นรูป

$\sigma_f$  คือ ความเค้นดึงขึ้นรูป

$A_2$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดหลังการลดขนาด

ตารางที่ 7 ความเค้นดึงขึ้นรูป (drawing stress)

อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%)	L/R <sub>1</sub>	ความเค้นดึงขึ้นรูป (drawing stress) ( $\sigma_f/S_y$ )	
		เหล็ก (SAE 1090)	ทองแดง (OFHC)
10	1.3	0.375	0.624
30	1.4	0.893	1.507
40	1.5	1.232	2.101
45	1.6	1.427	2.446



ภาพที่ 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นดึงขึ้นรูป (drawing stress) กับอัตราการลดพื้นที่หน้าตัด

3.2 ความเค้นอัดขึ้นรูป (extrusion stress) ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความเค้นอัดขึ้นรูป จากแบบจำลองที่ไม่พบรอยปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็กและเส้นลวดทองแดง ได้ผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 8 และนำผลการวิเคราะห์ความเค้นดึงขึ้นรูปมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นอัดขึ้นรูปกับ อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด พบว่าค่าความเค้นอัดขึ้นรูปจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการลดพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น และความเค้นอัดขึ้นรูปเส้นลวดทองแดงมีค่ามากกว่าความเค้นดึงขึ้นรูปของเส้นลวดเหล็ก แสดงในภาพที่ 27

$$\sigma_b = \frac{F_{back}}{A_1} \quad (10)$$

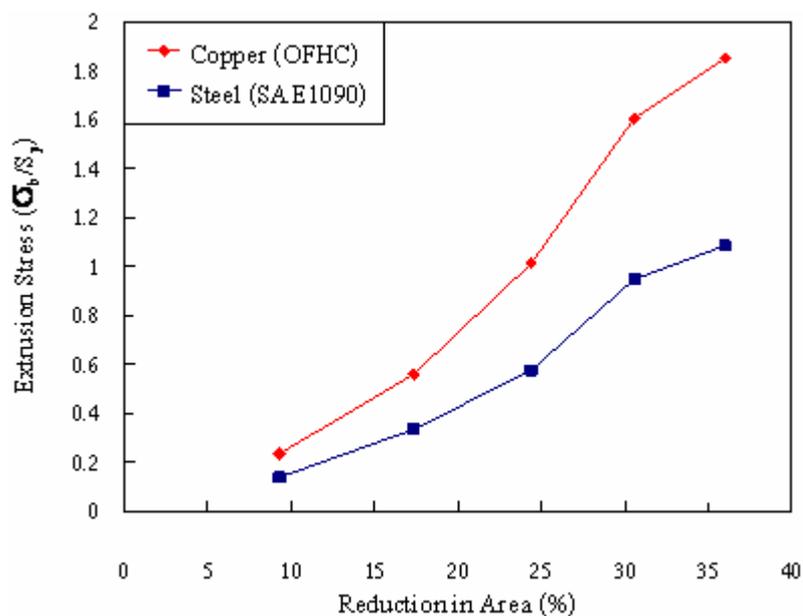
โดย  $F_{back}$  คือ แรงดันขึ้นรูป

$\sigma_b$  คือ ความเค้นอัดขึ้นรูป

$A_1$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดหลังการลดขนาด

ตารางที่ 8 ความเค้นอัดขึ้นรูป (extrusion stress)

อัตราการผลิตพื้นที่หน้าตัด (%)	$R_1/R_2$	ขนาดครึ่งมุมตาย ( $\alpha$ )	ความเค้นอัดขึ้นรูป (extrusion stress) ( $\sigma/S_y$ )	
			เหล็ก (SAE 1090)	ทองแดง (OFHC)
9.3	1.05	2	0.140	0.235
17.36	1.1	5	0.335	0.562
24.39	1.15	10	0.577	1.013
30.56	1.2	15	0.949	1.606
36	1.25	16	1.085	1.851



ภาพที่ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นอัดขึ้นรูป (extrusion stress) กับอัตราการลดพื้นที่หน้าตัด

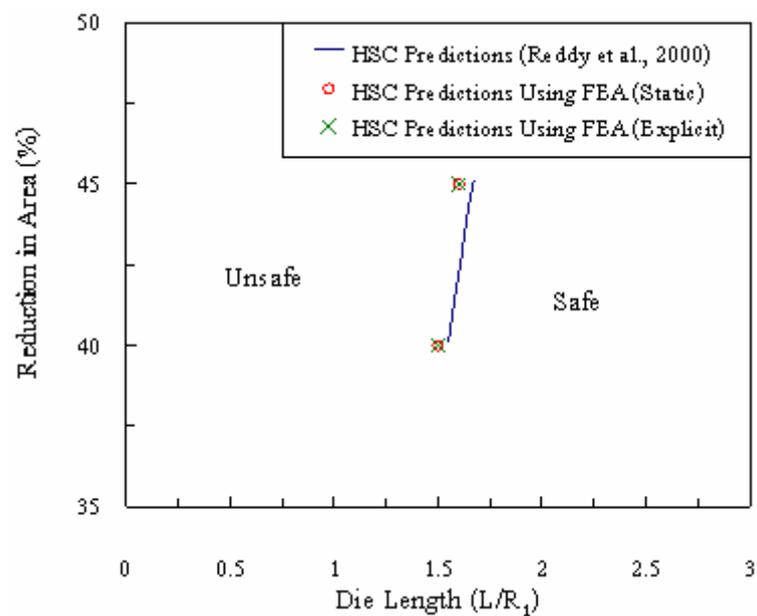
#### 4. การทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางในการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กพริสิทไฟไนต์เอลิเมนต์

การศึกษการทำนายการปริแตกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ด้วยวิธีเอ็กพริสิทไฟไนต์เอลิเมนต์ (explicit finite element method) เพื่อทำการเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์แบบสถิต (static) โดยกำหนดให้การคำนวณเป็นแบบกึ่งสถิต (quasi-static) โดยความเร็วในการดึงขึ้นรูปจะมีค่าน้อยมาก จนพลังงานจลน์ (kinetic energy) มีค่า 5-10 เปอร์เซ็นต์ ของพลังงานภายใน (internal energy) ในระหว่างการวิเคราะห์

แบบจำลองการดึงขึ้นรูปมีลักษณะเดียวกับแบบจำลองของการวิเคราะห์แบบสถิต โดยทำการเปลี่ยนความเร็วในการดึงลวดจนพบว่าความเร็วในการดึงขึ้นรูปเท่ากับ 1 เมตร/วินาที จะให้ค่าพลังงานจลน์และพลังงานภายในเป็นไปตามเงื่อนไขข้างต้น ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 9 และภาพที่ 28 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบสถิตและแบบเอ็กพริสิท

ตารางที่ 9 ผลการทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางขณะทำการดึงขึ้นรูปเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ด้วยวิธีเอ็กพริสิทไฟไนต์เอลิเมนต์

อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%)	$L/R_1$	การเกิดรอยปริแตก
40	1.3	เกิด
40	1.4	เกิด
40	1.5	ไม่เกิด
40	1.6	ไม่เกิด
45	1.4	เกิด
45	1.5	เกิด
45	1.6	ไม่เกิด
45	1.7	ไม่เกิด



ภาพที่ 28 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์แบบสถิต และแบบเอ็กพริสิท

จากผลการวิเคราะห์แบบสถิต และแบบเอ็กพริสิท พบว่าให้ผลการวิเคราะห์ที่คล้ายคลึงกัน แต่ความเร็วในการคำนวณจากการวิเคราะห์แบบสถิตเร็วกว่า การวิเคราะห์แบบเอ็กพริสิท ประมาณ 2.1 เท่า

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

1. จากการศึกษาการทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางขณะทำการดึงขึ้นรูปและการอัดขึ้นรูปของเส้นลวดทองแดง (OFHC) และเหล็ก (SAE 1090) โดยใช้สมมุติฐานจากการศึกษาของ Reddy *et al.* (1996) สามารถทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้นลวดได้
2. จากผลศึกษาพบว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้นลวดในการดึงขึ้นรูปและการอัดขึ้นรูป คืออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด และความยาวของช่วงการลดขนาด
3. จากการศึกษาการทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางของเส้นลวดขณะทำการดึงขึ้นรูป และการอัดขึ้นรูปพบว่าหลักการการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นไฮโดรสแตติก ไม่สามารถทำนายการเกิดรอยปริแตกที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดสูงๆ ได้ เพราะเกิดการผิดรูปของเส้นลวดอย่างมากในบริเวณหน้าสัมผัสที่ทางเข้าตาย
4. จากการศึกษาความเค้นดึงขึ้นรูปพบว่าความเค้นดึงขึ้นรูปจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการลดพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น และพบว่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นดึงขึ้นรูปกับค่าความเค้นครากของเส้นลวดทองแดงมีค่ามากกว่าเส้นลวดเหล็ก
5. จากการศึกษาความเค้นอัดขึ้นรูปพบว่าความเค้นอัดขึ้นรูปจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการลดพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น และพบว่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นอัดขึ้นรูปกับค่าความเค้นครากของเส้นลวดทองแดงมีค่ามากกว่าเส้นลวดเหล็ก
6. จากการศึกษาการทำนายการเกิดรอยปริแตกบริเวณแกนกลางในการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กพริสทิฟไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการดึงขึ้นรูปเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) พบว่ามีผลการวิเคราะห์คล้ายคลึงกับการวิเคราะห์แบบสถิต แต่ใช้เวลาในการวิเคราะห์มากกว่า ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงเลือกการคำนวณเป็นแบบสถิต

### ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยต่อไปนั้นควรทำการเขียนโปรแกรมย่อย (subroutine) ในโปรแกรม UMAT เพื่อ  
ดึงค่าความเค้นมาปรับแก้ และป้อนเข้าสู่สมการใหม่เพื่อความแม่นยำของผลการทดลองที่อัตราการ  
ลดขนาดสูงๆ

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ดำรง ไชยธีรานุกัฒศิริ. 2521. การขึ้นรูปโลหะ. บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ.
- ธนรัตน์ แต้วัฒนา และ มณฑล แสงประไพพิทย. 2546. กรรมวิธีการผลิต. บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ.
- ปิ่น ประมาพันธ์. 2548. การวิเคราะห์ข้อบกพร่องในลักษณะการปริแตกที่เกิดขึ้นในแกนกลางของเส้นลวดขณะดึงเส้นลวดผ่านตายโดยวิธีทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- แม่น อมรสิทธิ์, รองศาสตราจารย์. และ สมชัย อัครทิวา. 2543. วัสดุวิศวกรรม. แมคกรอ-ฮิล อินเทอร์เน็ตเนชันแนล เอ็นเตอร์ไพรส์, ینگค์, กรุงเทพฯ. แปลจาก William F. Smith. 1997. **Principles of Materials Science and Engineering.** McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
- Anand, L. 1996. **Test Data for a Well-Annealed OFHC Copper Material.** Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- Avitzur, B. 1968. **Metal Forming: Processes and Analysis.** McGraw-Hill Book Co., New York.
- Avitzur, B. 1983. **Handbook of Metal Forming Processes.** John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Cho, H., H.H. Jo, S.G. Lee, B.M. Kim and Y.J. Kim. Effect of Reduction Ratio, Inclusion Size and Distance between Inclusions on Wire Breaks in Cu Fine Wire Drawing. **Journal of Materials Processing Technology.** 2002 (130-131): 416-420.

- Gouveia, B.P.P.A., J.M.C. Rodrigues and P.A.F. Martins. Fracture Predicting in Bulk Metal Forming. **International Journal of Mechanical Sciences**. 1996 (38): 361-372.
- Hambli, R. and D.B. Levet. Damage and Fracture Simulation during the Extrusion Processes. **Computer Methods in Applied Mechanics Engineering**. 2000 (186): 109-120.
- Ko, D.C. and B.M. Kim. The Prediction of Central Burst Defects in Extrusion and Wire Drawing. **Journal of Materials Processing Technology**. 2000 (102): 1924.
- Komori, K. Effect of Ductile Fracture Criteria on Chevron Crack Formation and Evolution in Drawing. **International Journal of Mechanical Sciences**. 2003 (45): 141-160.
- Lim, L.G. and F.P.E. Dunne. Modeling Void Nucleation and Growth in Axisymmetric Extrusion. **Journal of Engineering Manufacture**. 1997 (211): 285-297.
- McVeigh, C. and W.K. Liu. Prediction of Central Bursting during Axisymmetric Cold Extrusion of a Metal Alloy Containing Particles. **International Journal of Solids and Structures**. 2005.
- Oh, H.K. Determination of Ductile Fracture (Ductility) at Any Stress State by Means of The Uniaxial Tensile Test. **Journal of Materials Processing Technology**. 1995 (53): 582-587.
- Reddy, N.V., P.M. Dixit and G.K. Lal. Central Bursting and Optimal Die Profile for Axisymmetric Extrusion. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. 1996 (118): 579-584.
- Reddy, N.V., P.M. Dixit and G.K. Lal. Ductile Fracture Criteria and its Prediction in Axisymmetric Drawing. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. 2000 (40): 95-111.

- Saanouni, K., J.F. Mariage, A. Cherouat and P. Lestriez. Numerical Prediction of Discontinuous Central Bursting in Axisymmetric Forward Extrusion by Continuum Damage Mechanics. **Computers and Structures**. 2004 (82): 2309-2332.
- Saleh, Ch. A.R., A.R. Ragab and S.N. Samy. Prediction of Void Growth in Drawing and Extrusion of Voided Metals. **Mechanics of Materials**. 2005 (37): 915-924.
- Sriram, S. and C.J. Van Tyne. Criterion for Prevention of Central Bursting in Forward Extrusions through Spherical Dies Using the Finite Element Method. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. 2002 (124): 65.
- Staub, C. and J.C. Boyer. A Ductile Growth Model for Elasto-Plastic Material. **Journal of Materials Processing Technology**. 1998 (77): 9-16.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
ขนาดของเส้นลวด

ตารางผนวกที่ ก1 แสดงขนาดของลวดที่ผ่านกระบวนการดึงขึ้นรูป

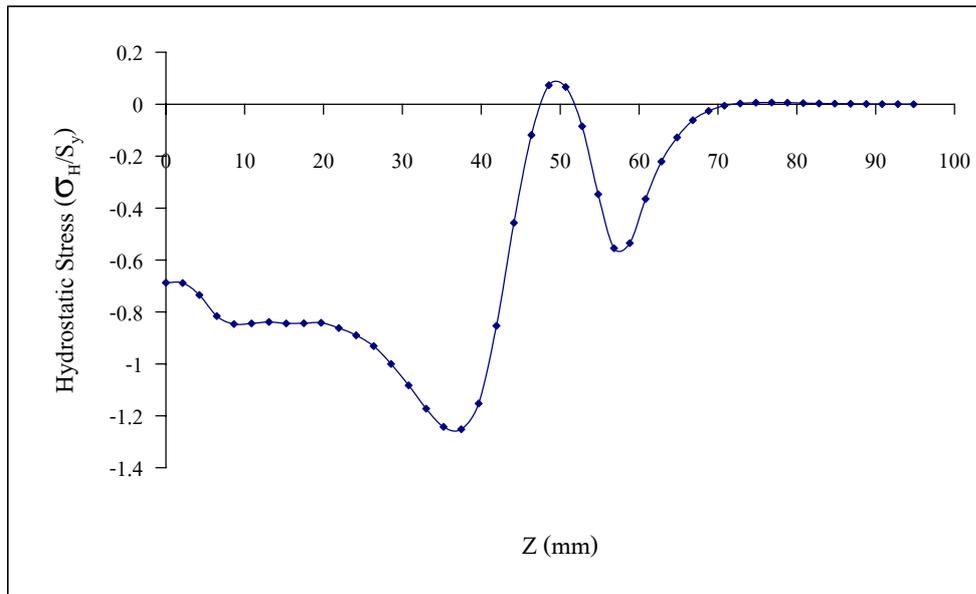
อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) (เปอร์เซ็นต์)	พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร)	รัศมีของเส้นลวด (เมตร)
0	0.000491 (A <sub>1</sub> )	0.0125 (R <sub>1</sub> )
10	0.000442 (A <sub>2</sub> )	0.0119 (R <sub>2</sub> )
30	0.000344 (A <sub>2</sub> )	0.0105 (R <sub>2</sub> )
40	0.000295 (A <sub>2</sub> )	0.0097 (R <sub>2</sub> )
45	0.000270 (A <sub>2</sub> )	0.0093 (R <sub>2</sub> )

ตารางผนวกที่ ก2 แสดงขนาดของลวดที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

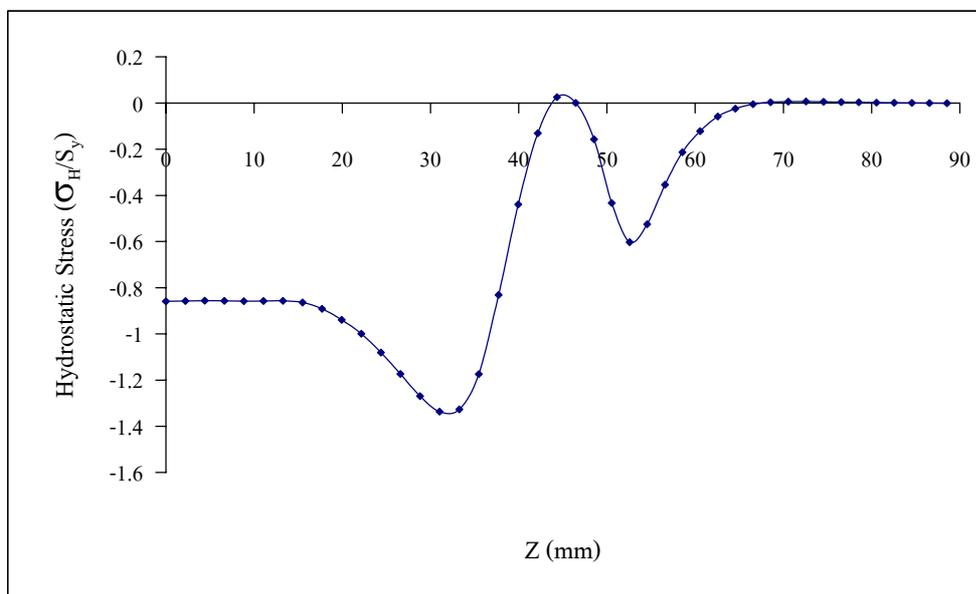
อัตราส่วนการลดขนาด (R <sub>1</sub> /R <sub>2</sub> )	อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) (เปอร์เซ็นต์)	พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร)	รัศมีของเส้นลวด (เมตร)
1	0	0.000491 (A <sub>1</sub> )	0.0125 (R <sub>1</sub> )
1.05	9.3	0.000445 (A <sub>2</sub> )	0.0119 (R <sub>2</sub> )
1.1	17.36	0.000405 (A <sub>2</sub> )	0.0114 (R <sub>2</sub> )
1.15	24.39	0.000371 (A <sub>2</sub> )	0.0109 (R <sub>2</sub> )
1.2	30.56	0.000341 (A <sub>2</sub> )	0.0104 (R <sub>2</sub> )
1.25	36	0.000314 (A <sub>2</sub> )	0.01 (R <sub>2</sub> )

**ภาคผนวก ข**

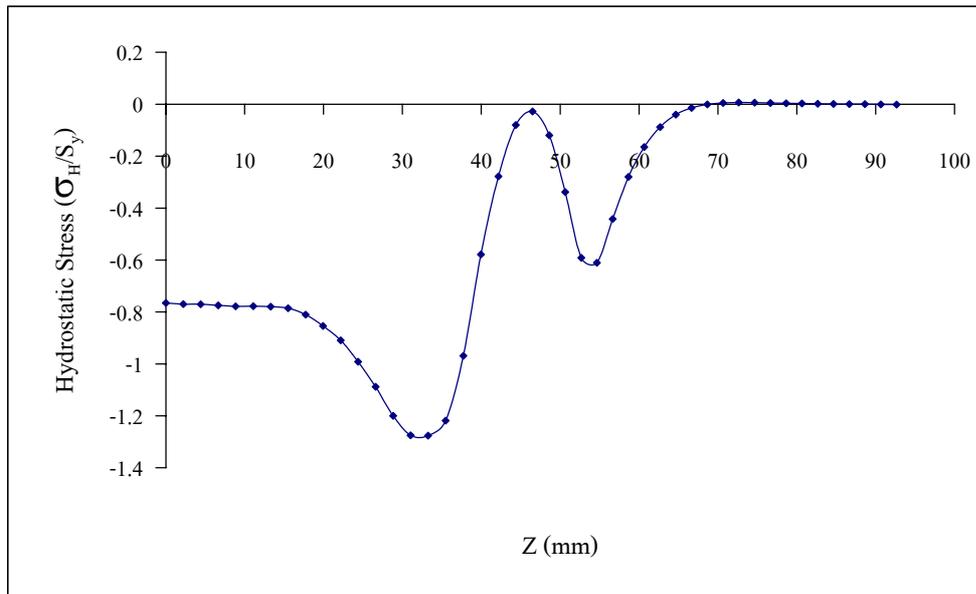
ผลการวิเคราะห์กระบวนการดิ่งขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



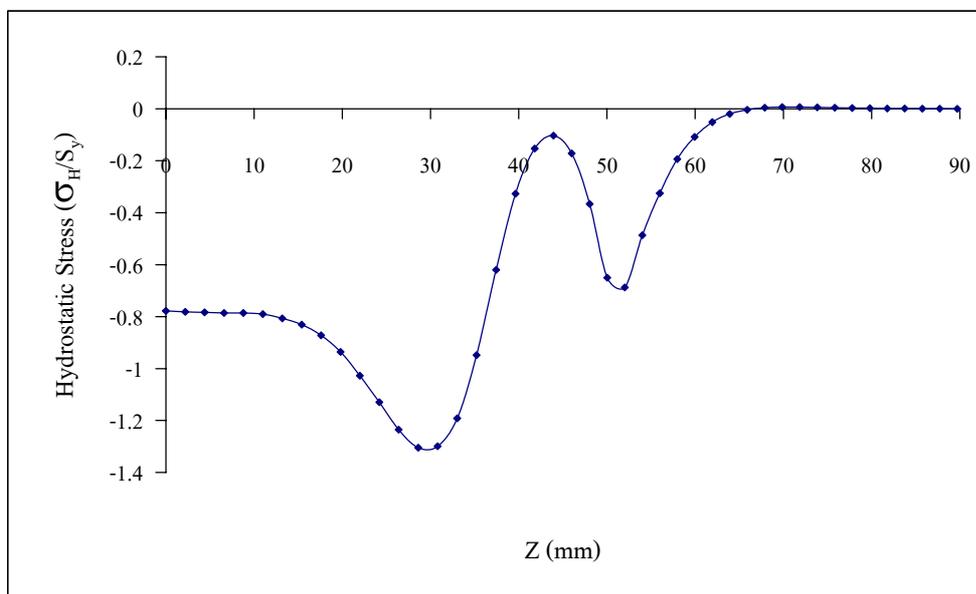
ภาพผนวกที่ ข1 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 10% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.1



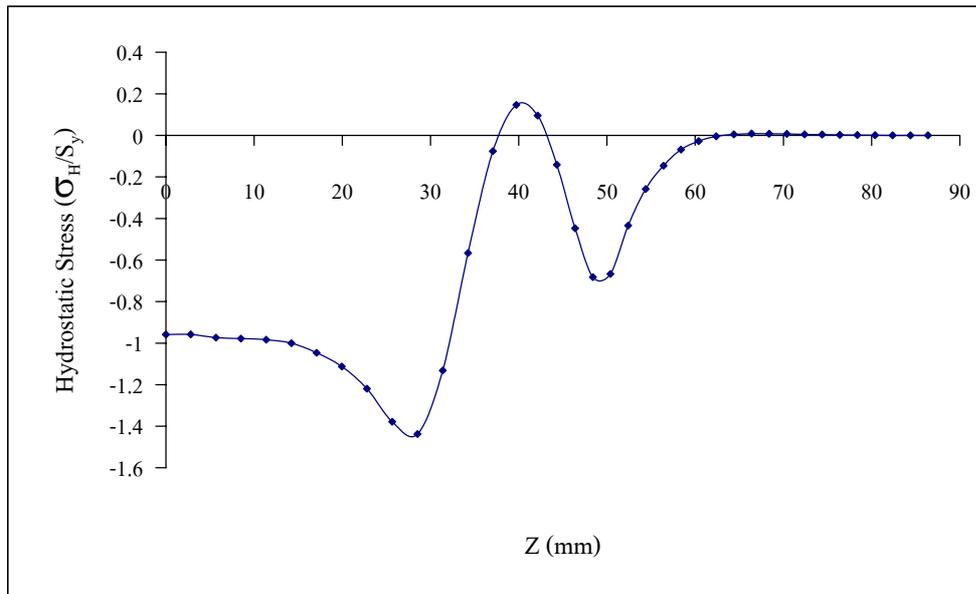
ภาพผนวกที่ ข2 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 10% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.2



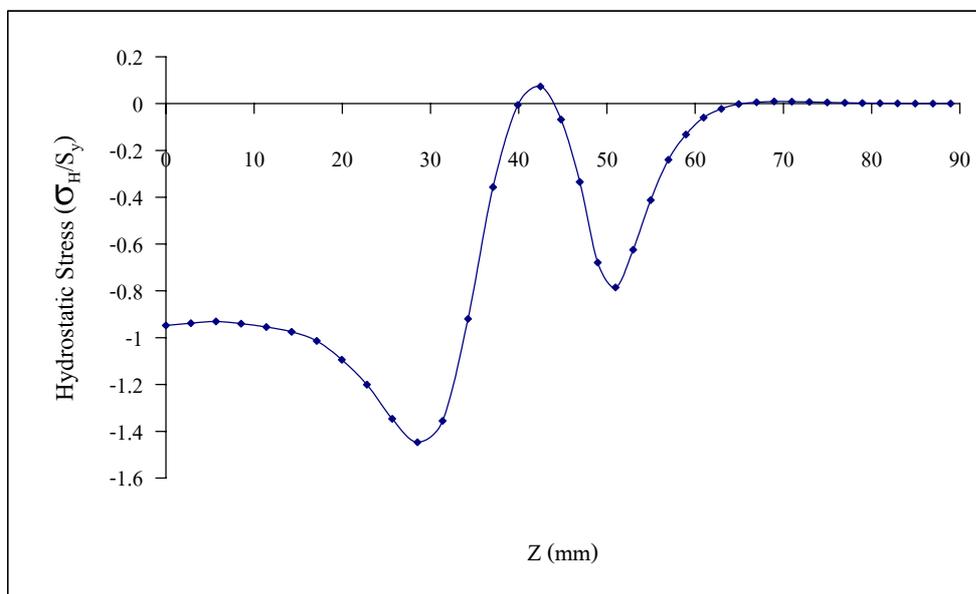
ภาพผนวกที่ 3 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 10% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.3



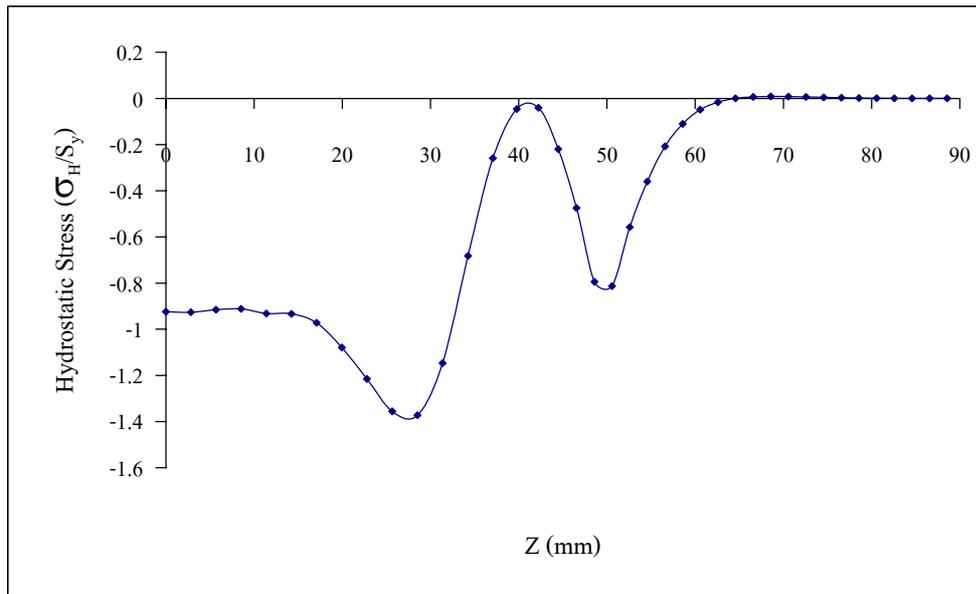
ภาพผนวกที่ 4 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 10% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.4



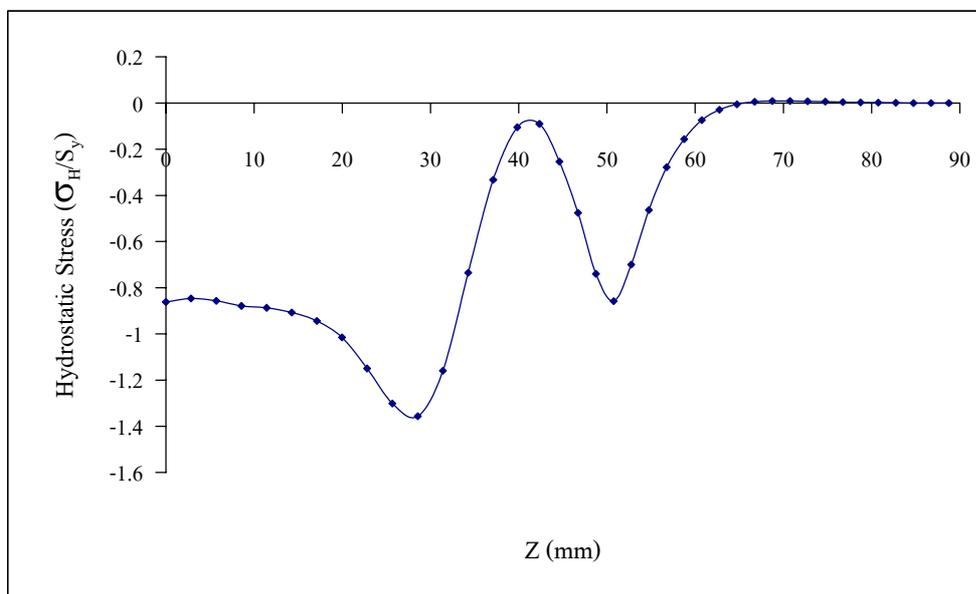
ภาพผนวกที่ ข5 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 30% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.2



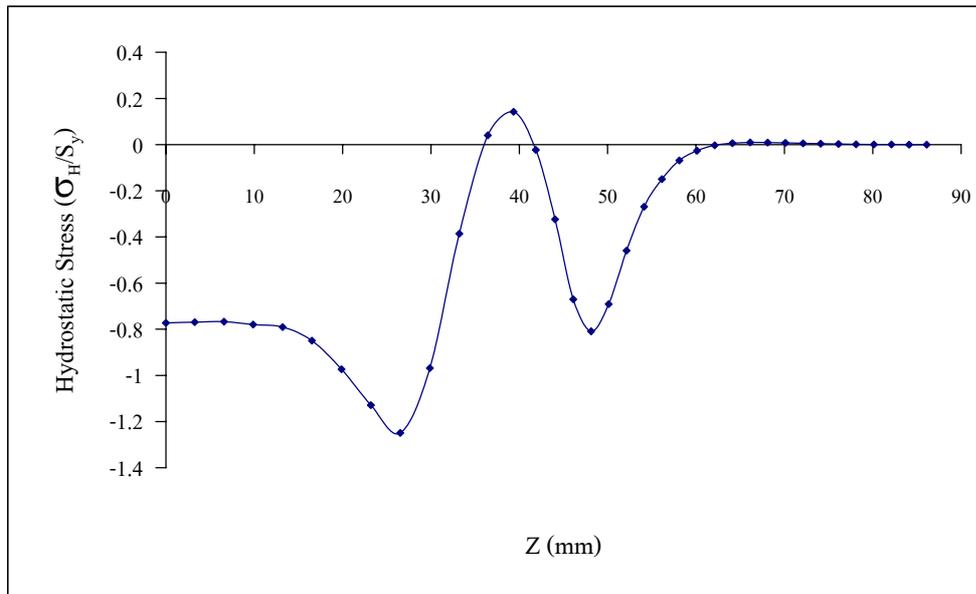
ภาพผนวกที่ ข6 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 30% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.3



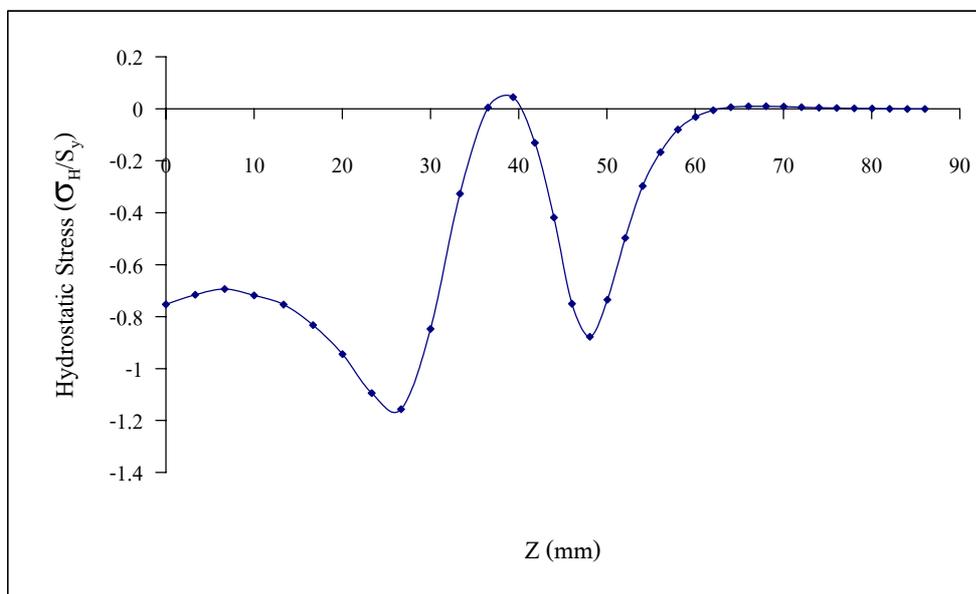
ภาพผนวกที่ ๗ ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 30% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.4



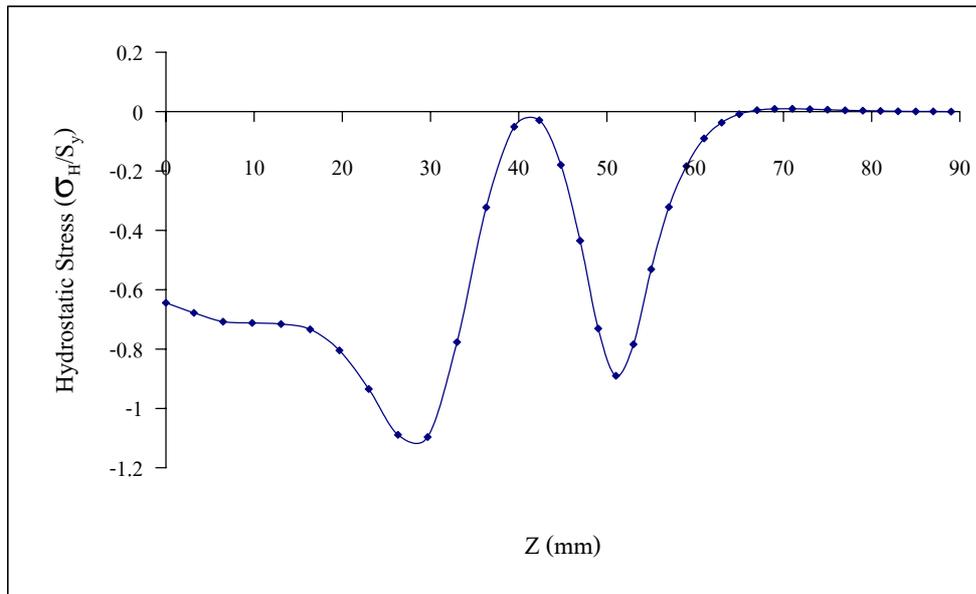
ภาพผนวกที่ ๘ ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 30% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.5



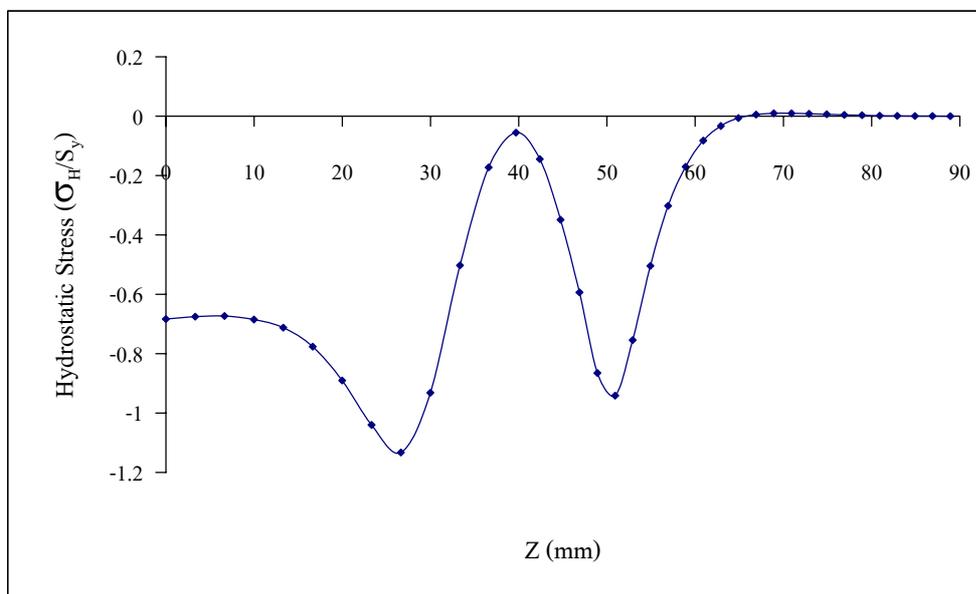
ภาพผนวกที่ ข9 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.3



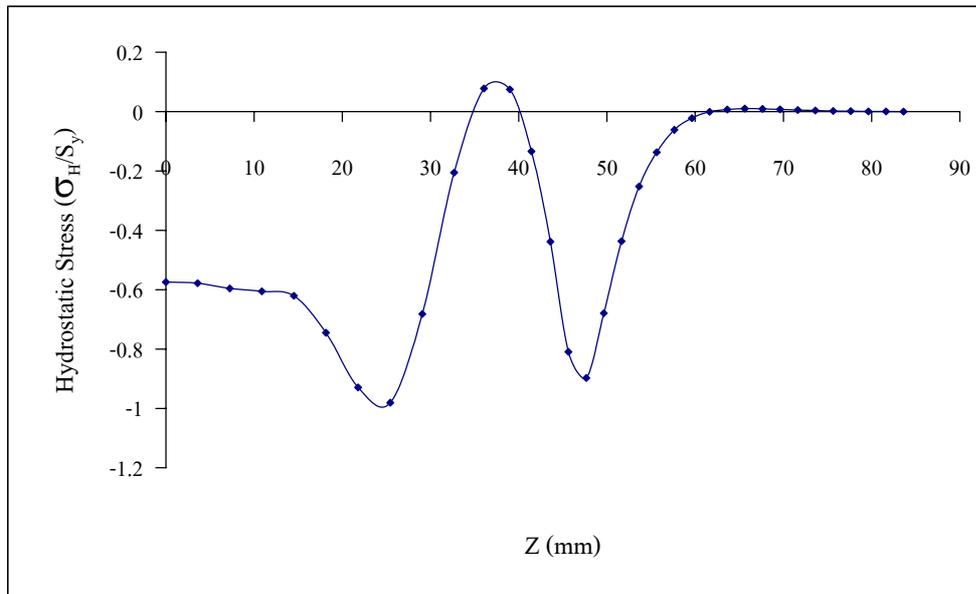
ภาพผนวกที่ ข10 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.4



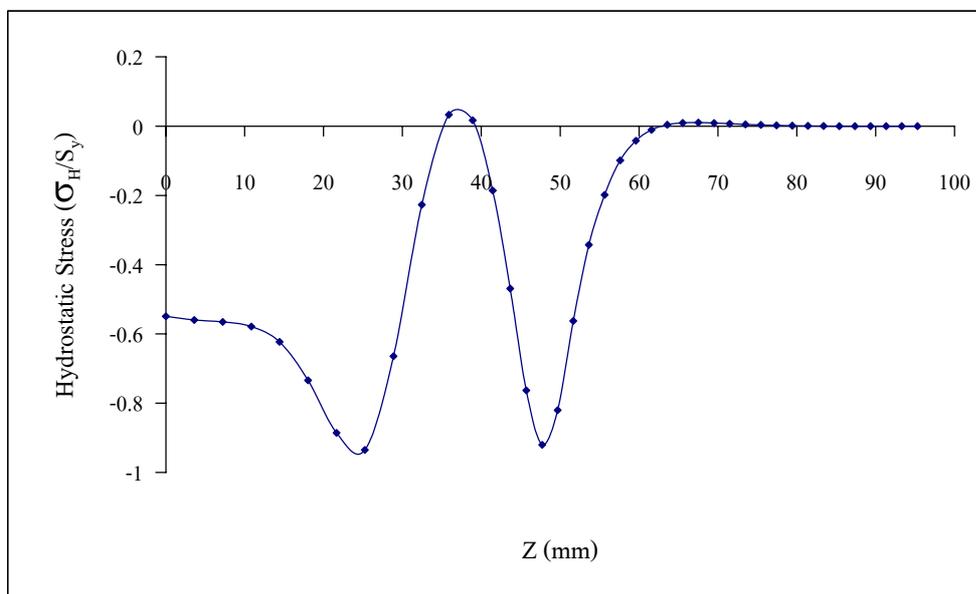
ภาพผนวกที่ ข11 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และ อัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.5



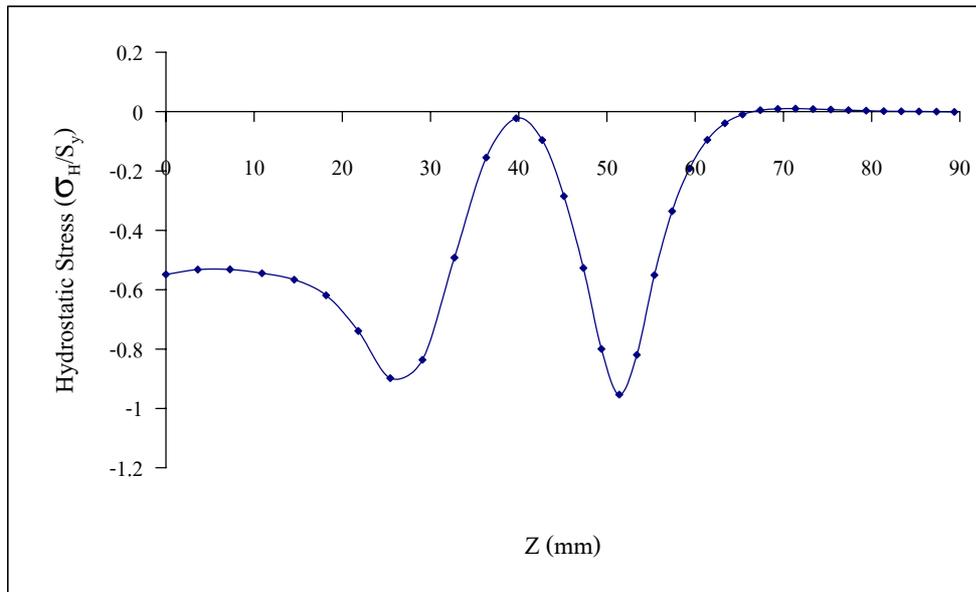
ภาพผนวกที่ ข12 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และ อัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.6



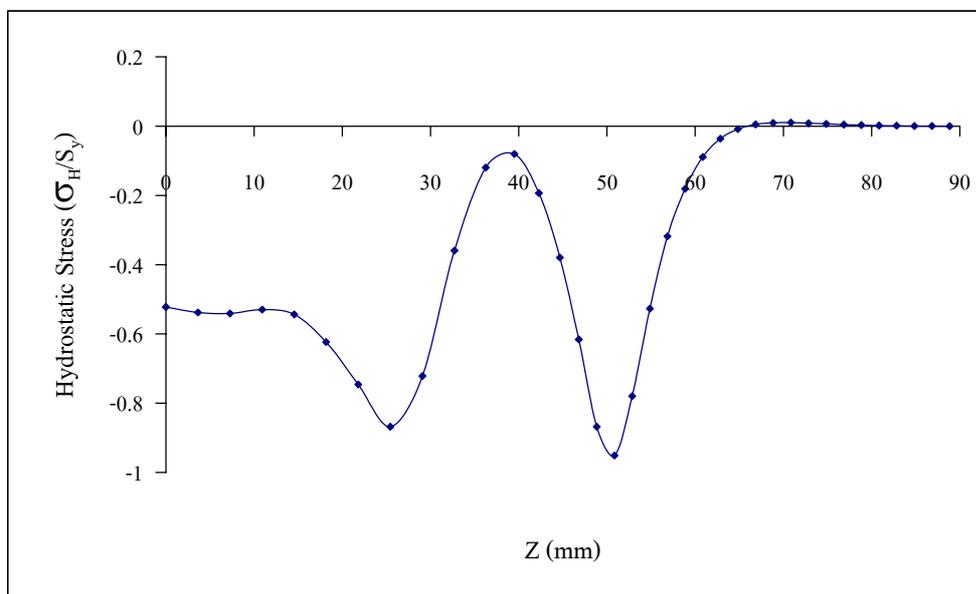
ภาพผนวกที่ 13 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.4



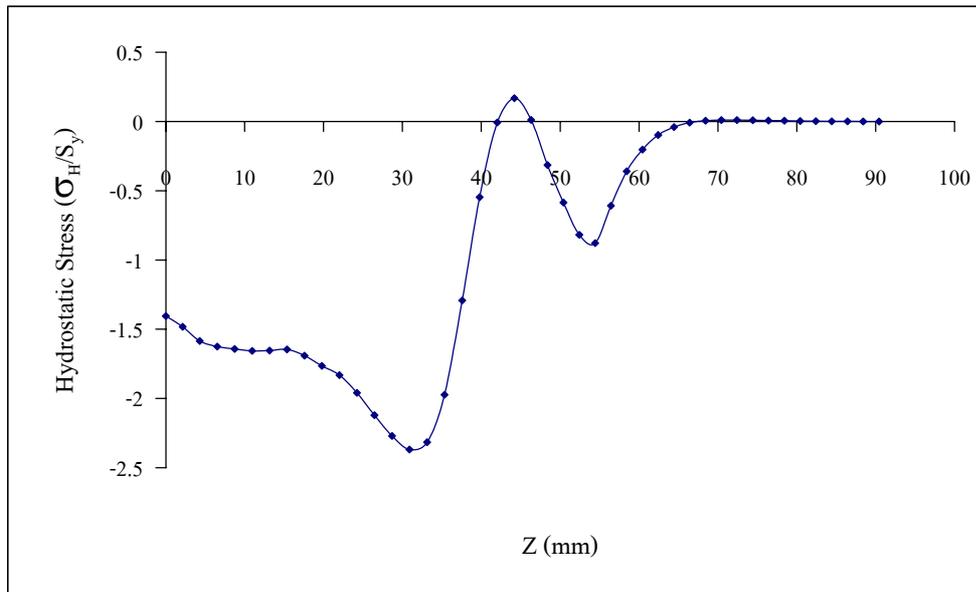
ภาพผนวกที่ 14 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.5



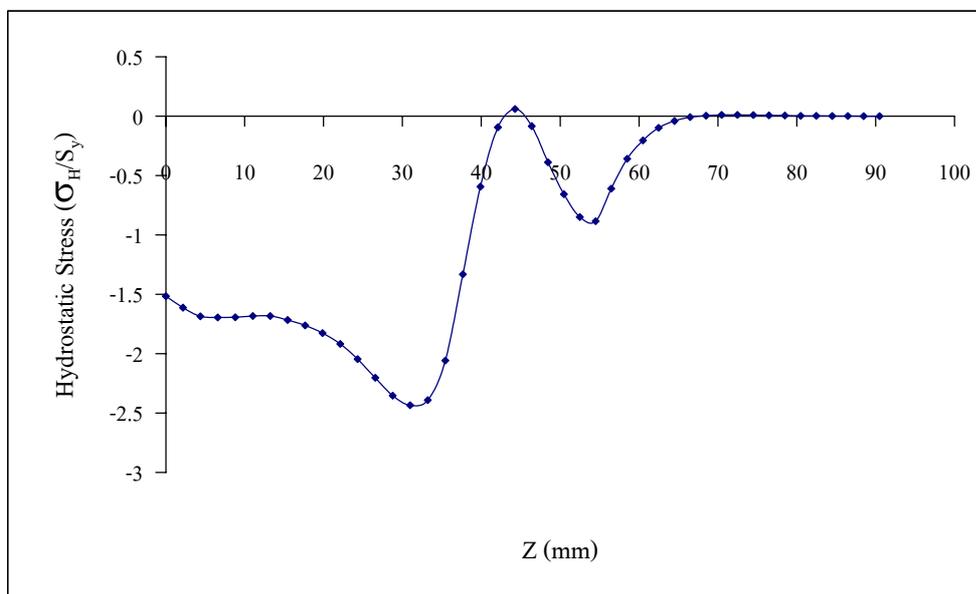
ภาพผนวกที่ 15 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และ อัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.6



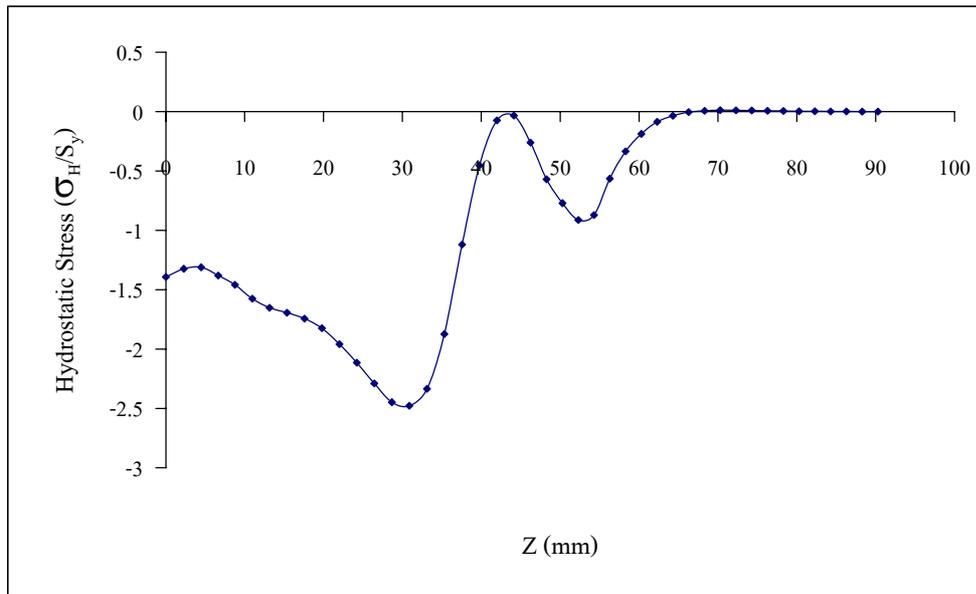
ภาพผนวกที่ 16 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และ อัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.7



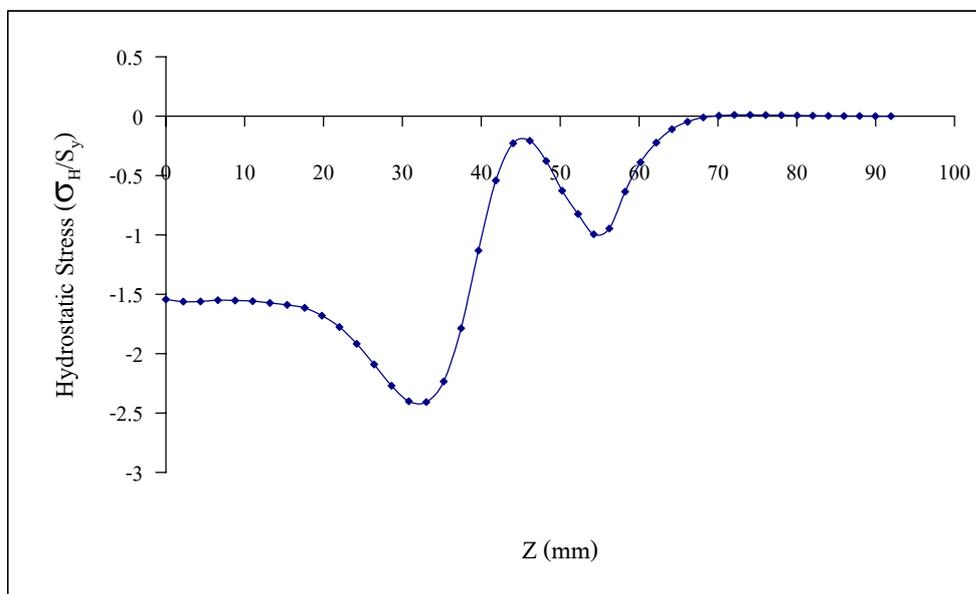
ภาพผนวกที่ ข17 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 10% และ อัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.1



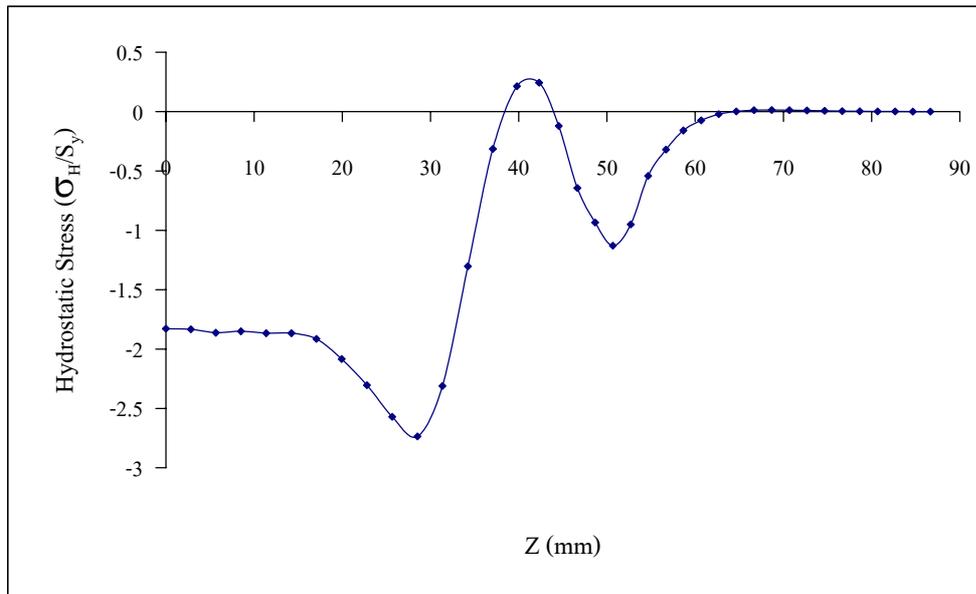
ภาพผนวกที่ ข18 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 10% และ อัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.2



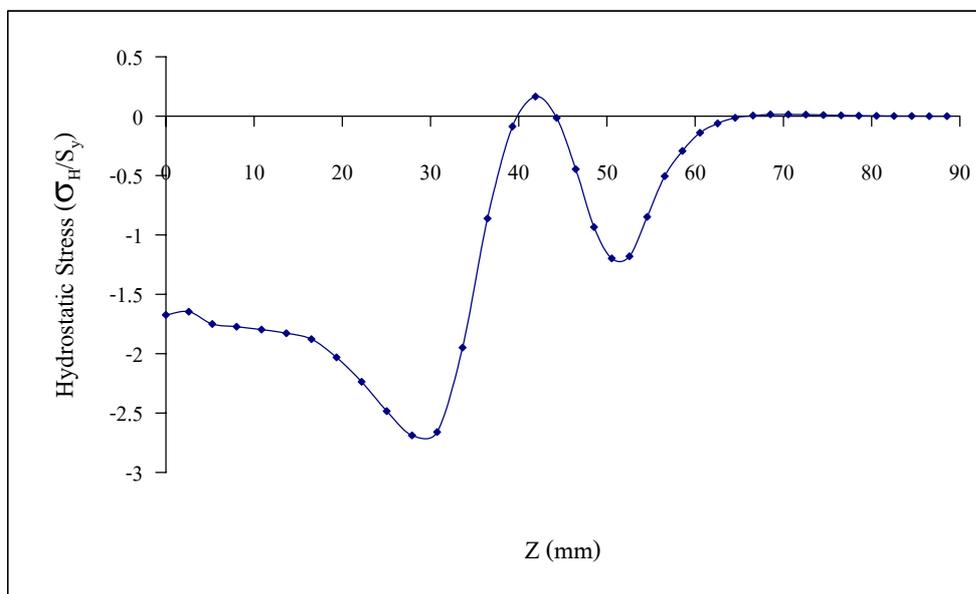
ภาพผนวกที่ ๑๙ ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 10% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.3



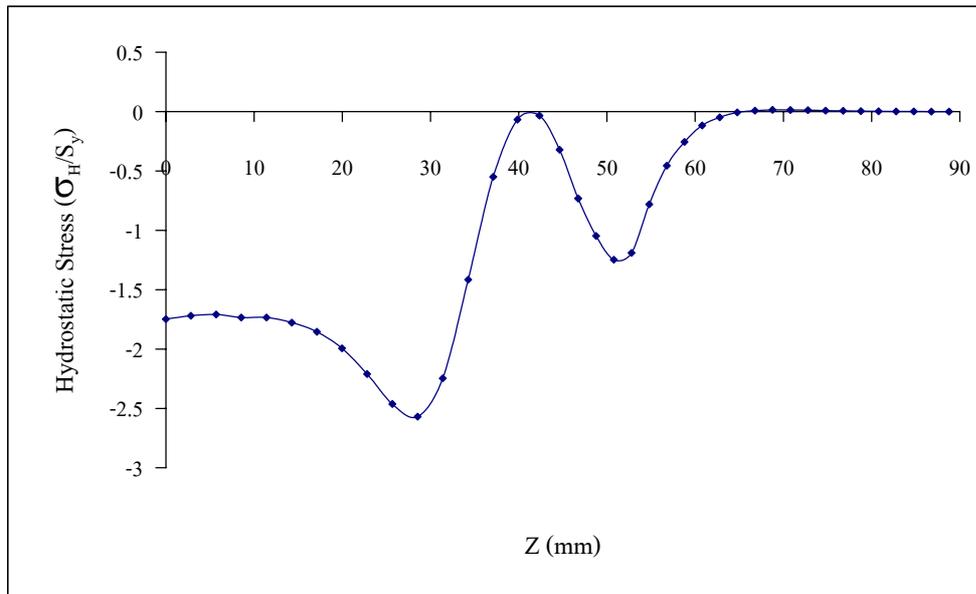
ภาพผนวกที่ ๒๐ ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 10% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.4



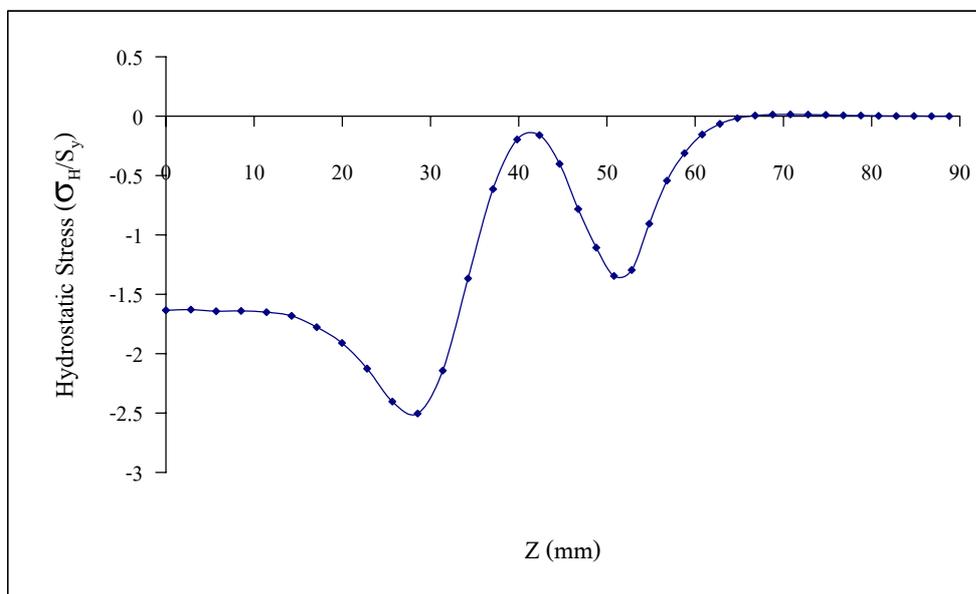
ภาพผนวกที่ ข21 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 30% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.2



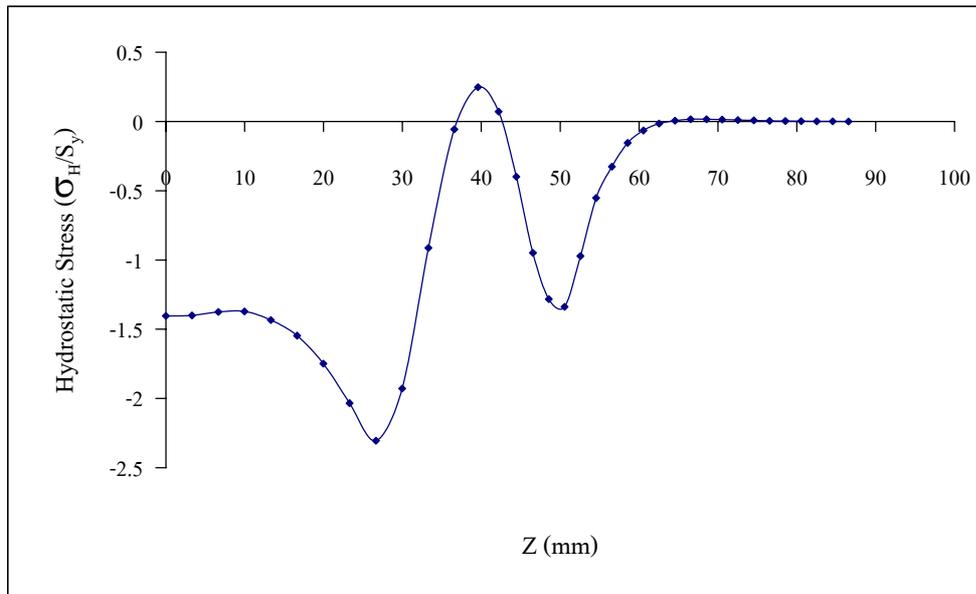
ภาพผนวกที่ ข22 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 30% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.3



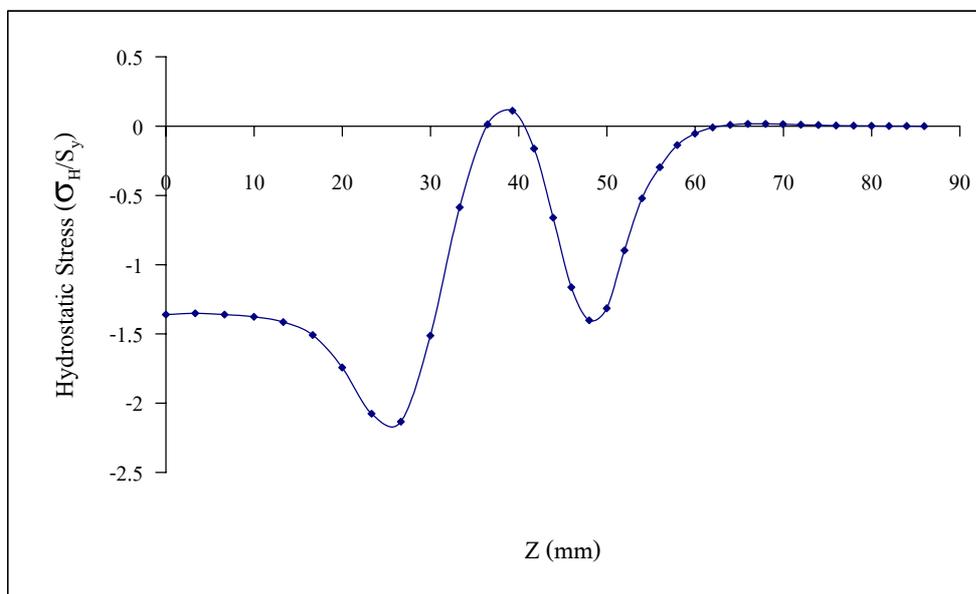
ภาพผนวกที่ ข23 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 30% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.4



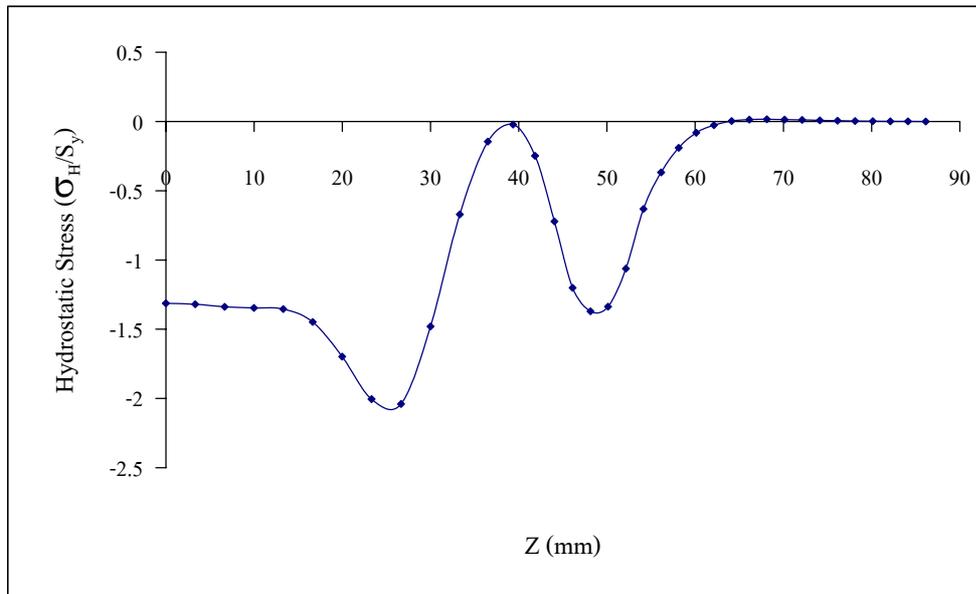
ภาพผนวกที่ ข24 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 30% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.5



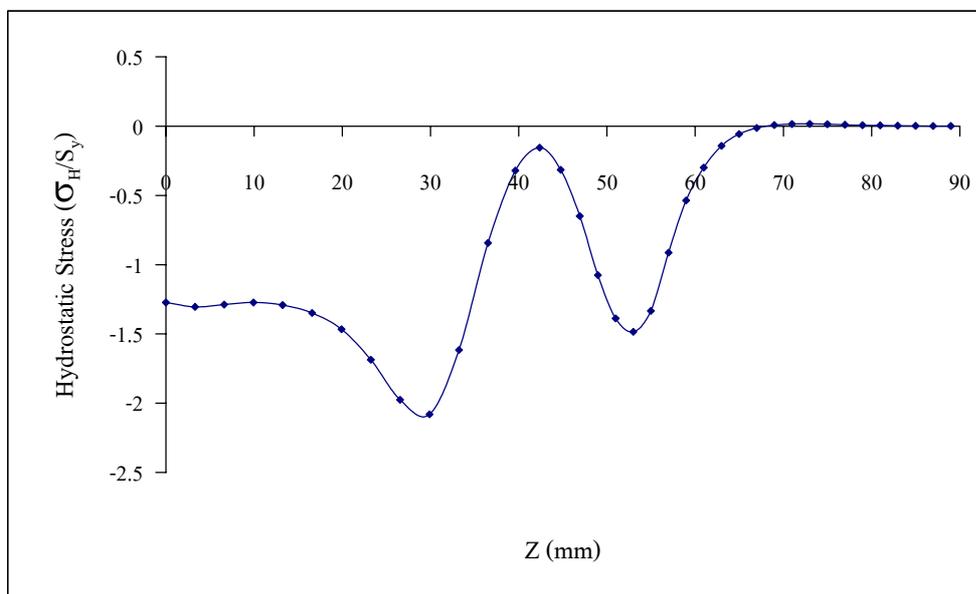
ภาพผนวกที่ ข25 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.3



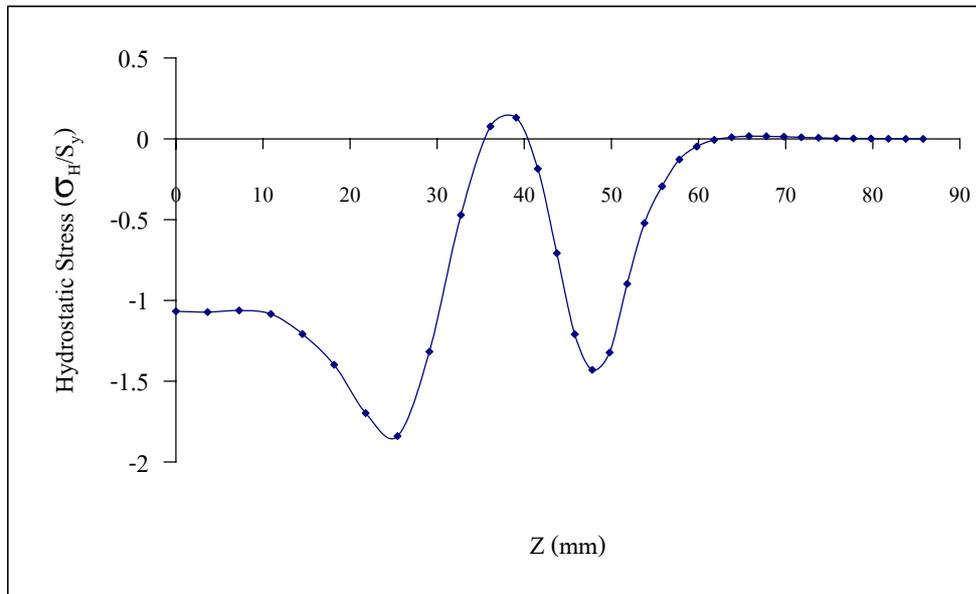
ภาพผนวกที่ ข26 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.4



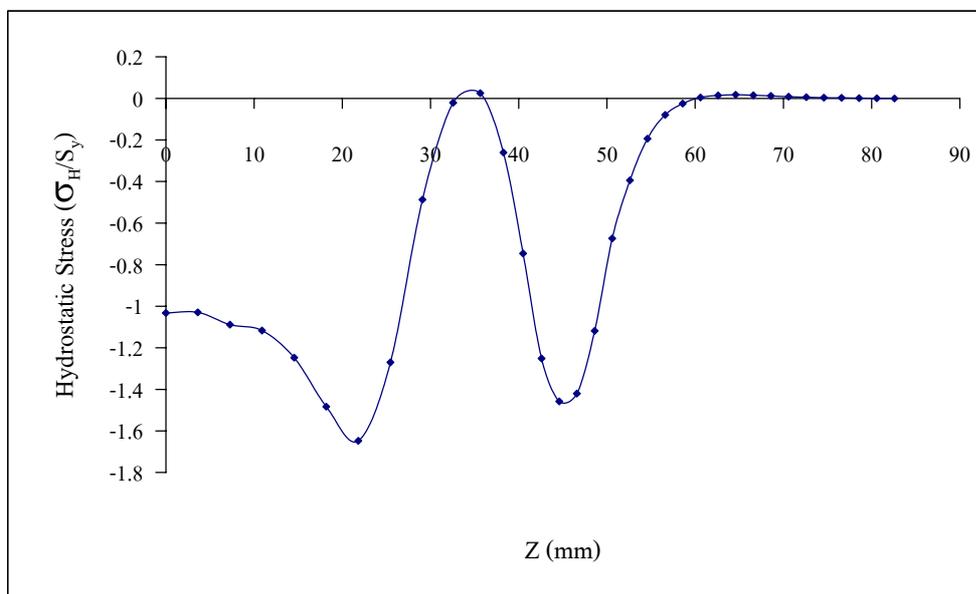
ภาพผนวกที่ ข27 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.5



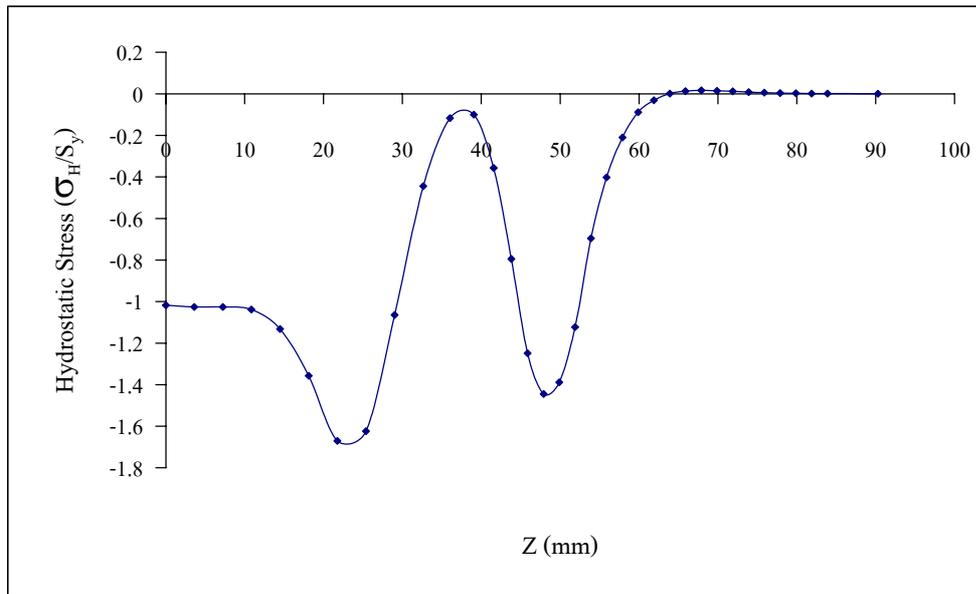
ภาพผนวกที่ ข28 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.6



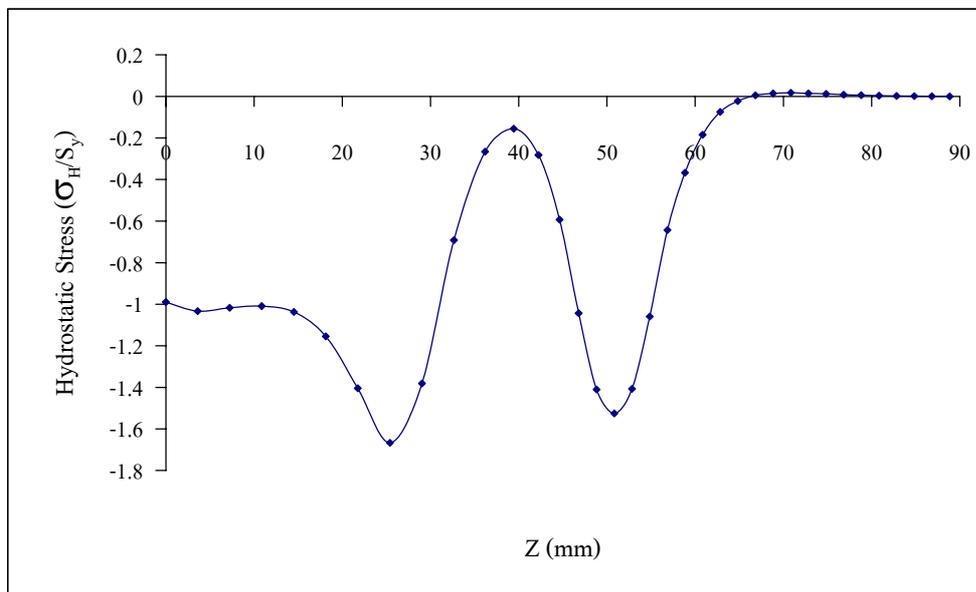
ภาพผนวกที่ ข29 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และ อัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.4



ภาพผนวกที่ ข30 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และ อัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.5



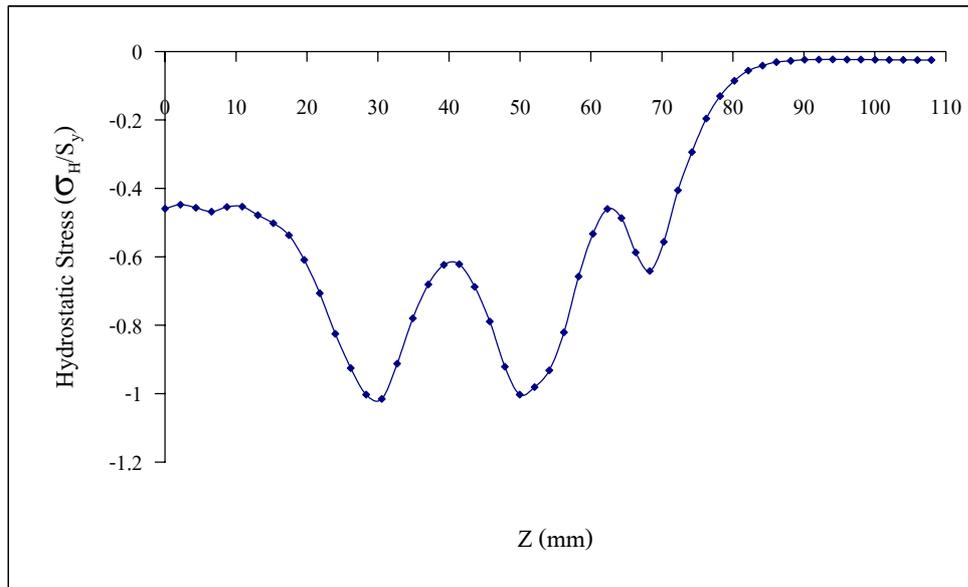
ภาพผนวกที่ ข31 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.6



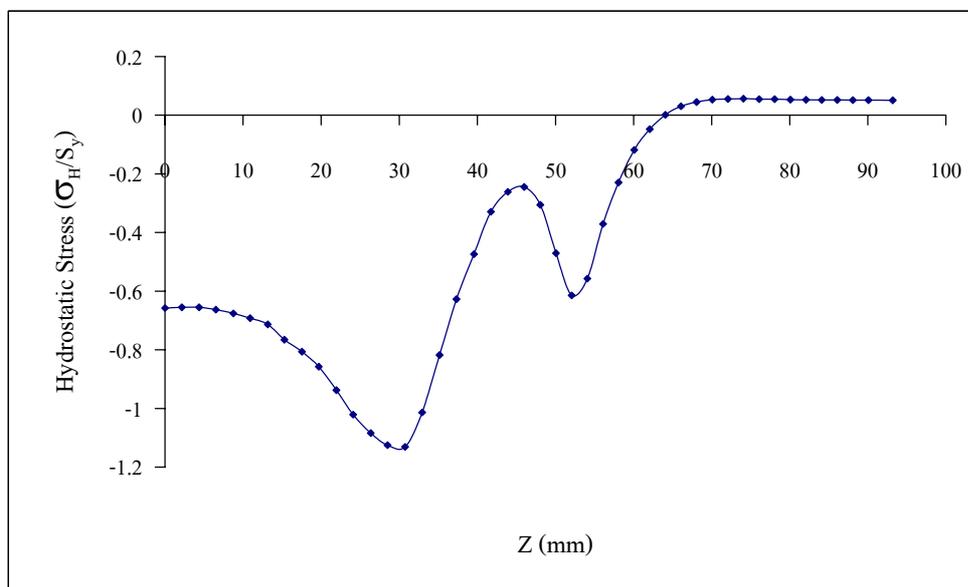
ภาพผนวกที่ ข32 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการดึงขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และอัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.7

**ภาคผนวก ค**

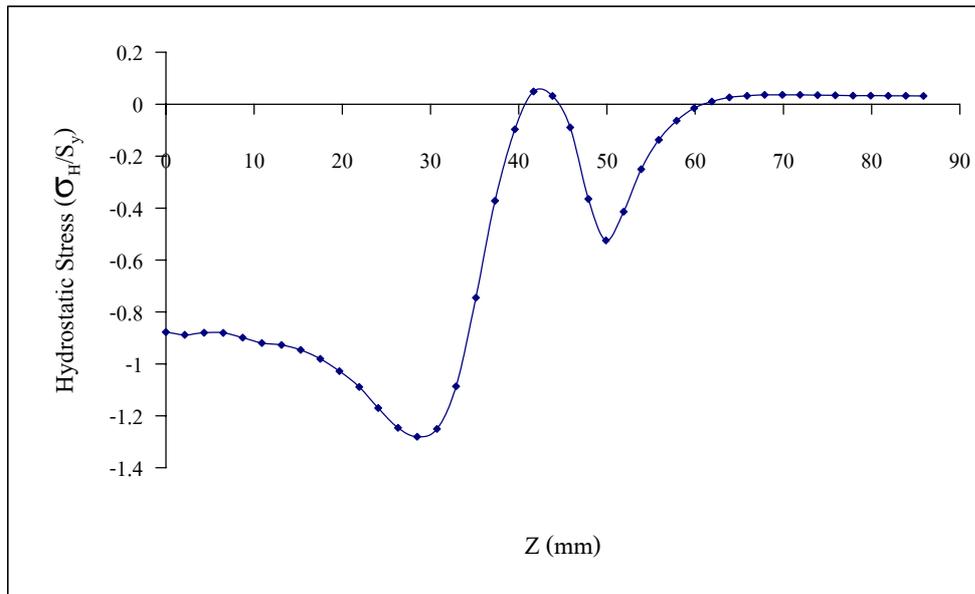
ผลการวิเคราะห์กระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



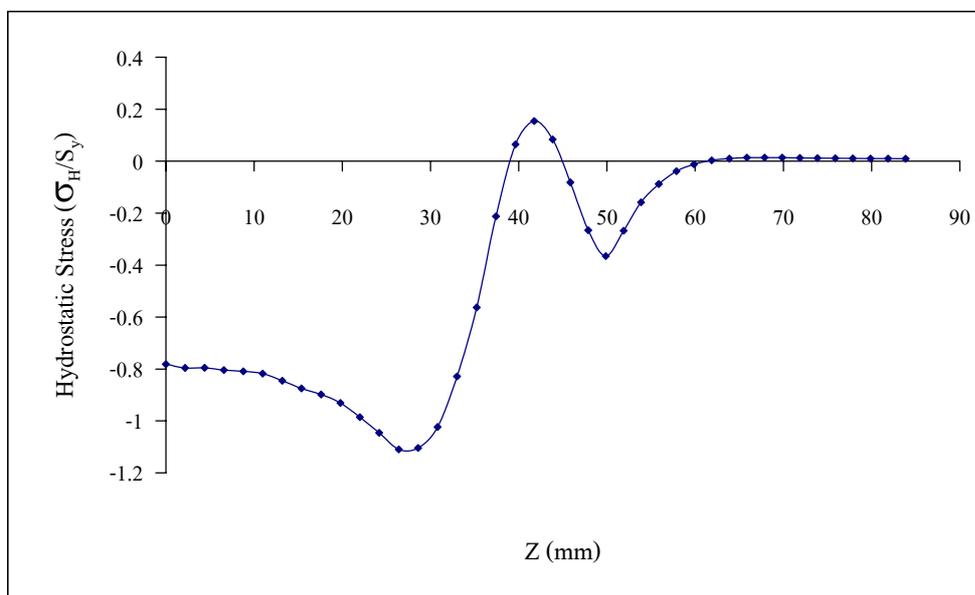
ภาพผนวกที่ ค1 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.05 และขนาดครึ่งมุมตาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $1^\circ$



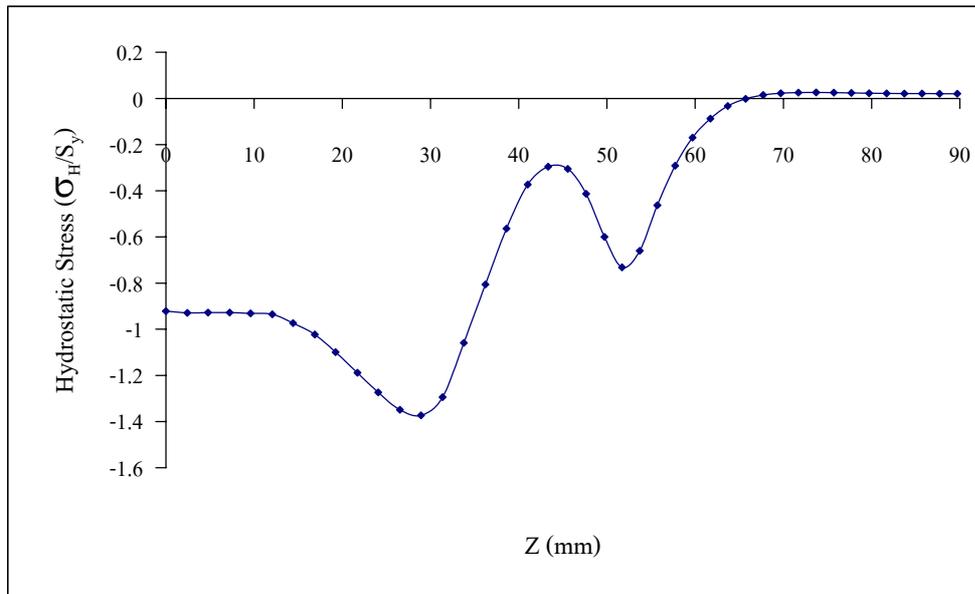
ภาพผนวกที่ ค2 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.05 และขนาดครึ่งมุมตาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $2^\circ$



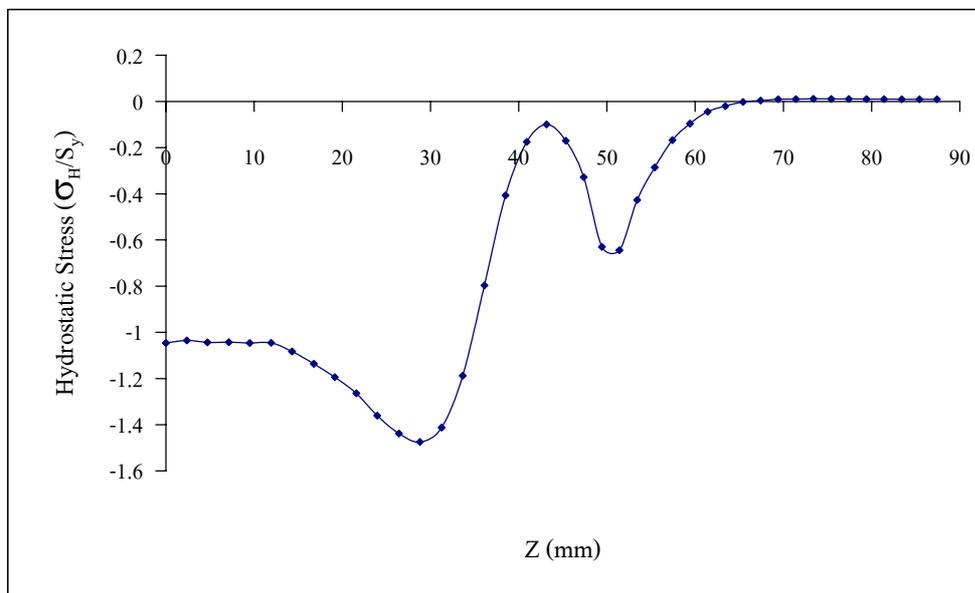
**ภาพผนวกที่ ค3** ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.05 และขนาดครึ่งมุมดาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $3^\circ$



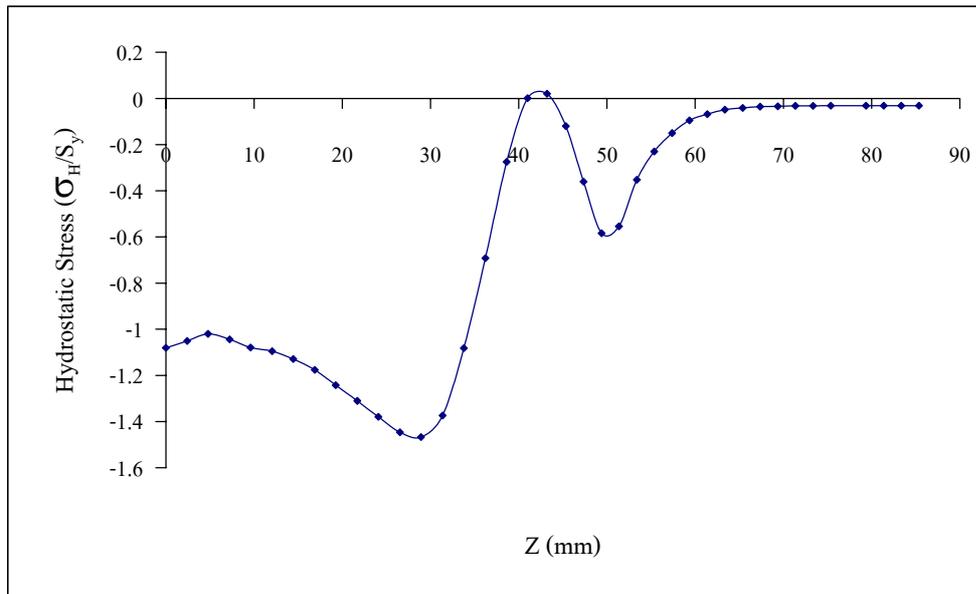
**ภาพผนวกที่ ค4** ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.05 และขนาดครึ่งมุมดาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $4^\circ$



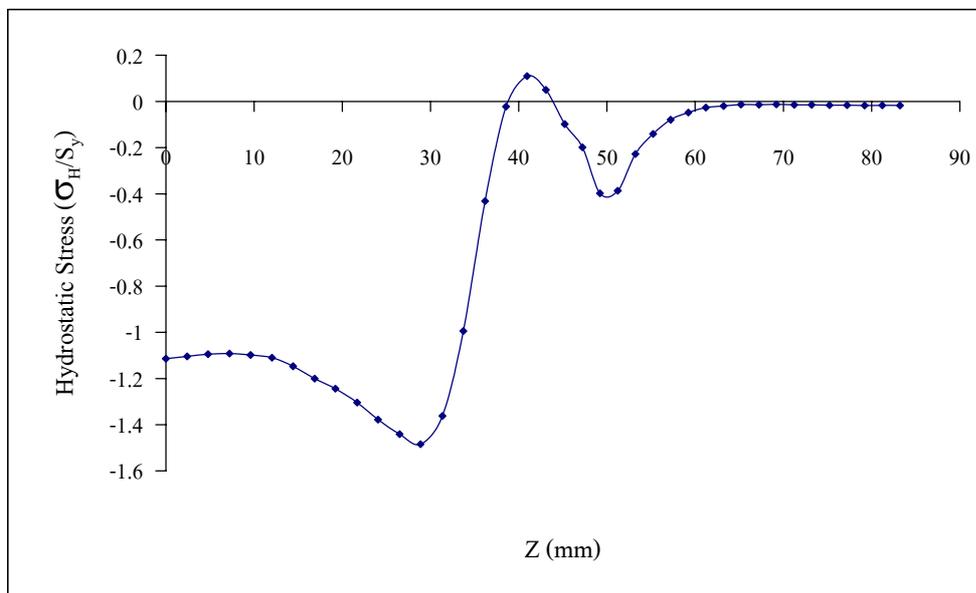
ภาพผนวกที่ ค5 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.1 และขนาดครึ่งมุมคาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $4^\circ$



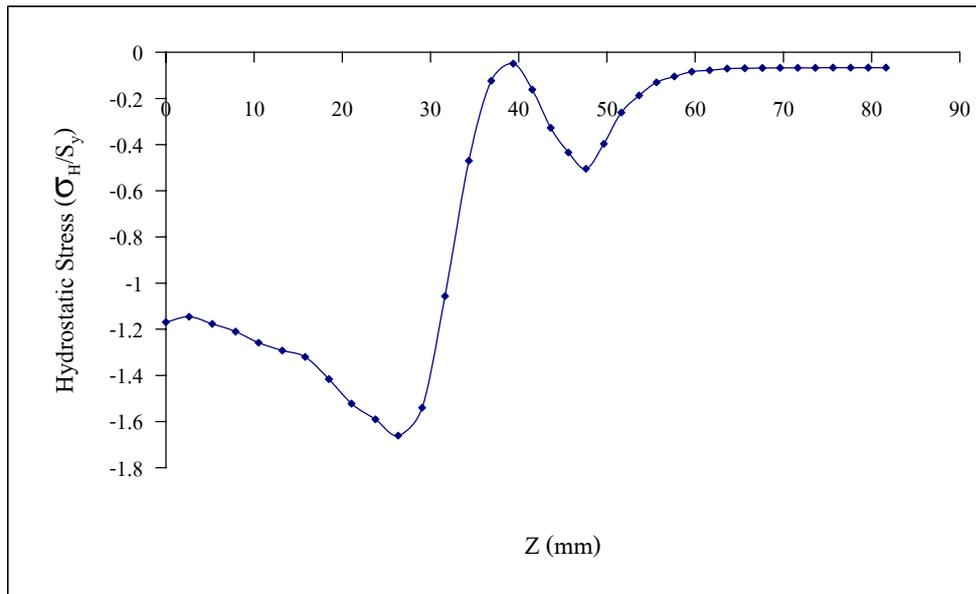
ภาพผนวกที่ ค6 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.1 และขนาดครึ่งมุมคาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $5^\circ$



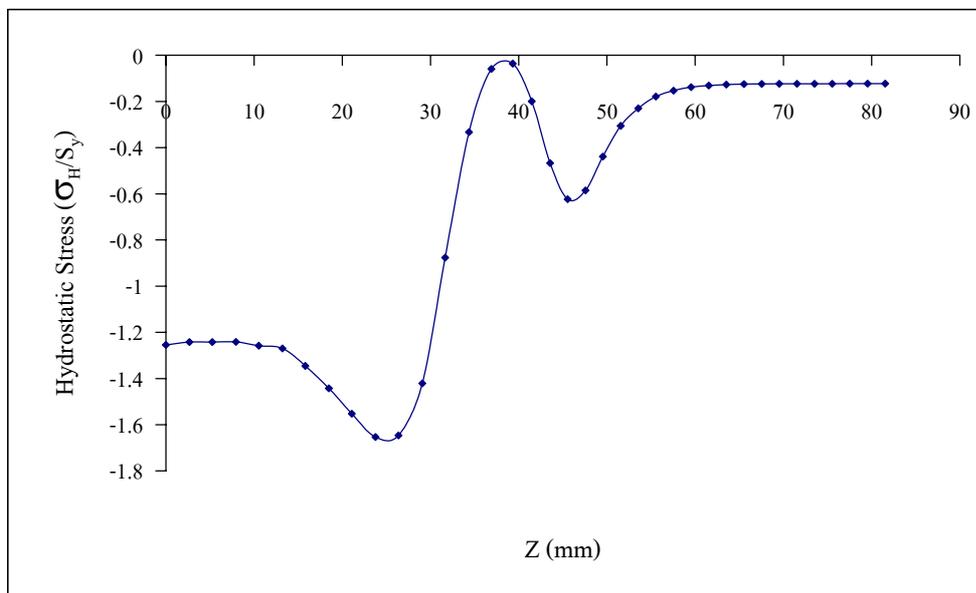
ภาพผนวกที่ ๗ ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.1 และขนาดครึ่งมุมคาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $6^\circ$



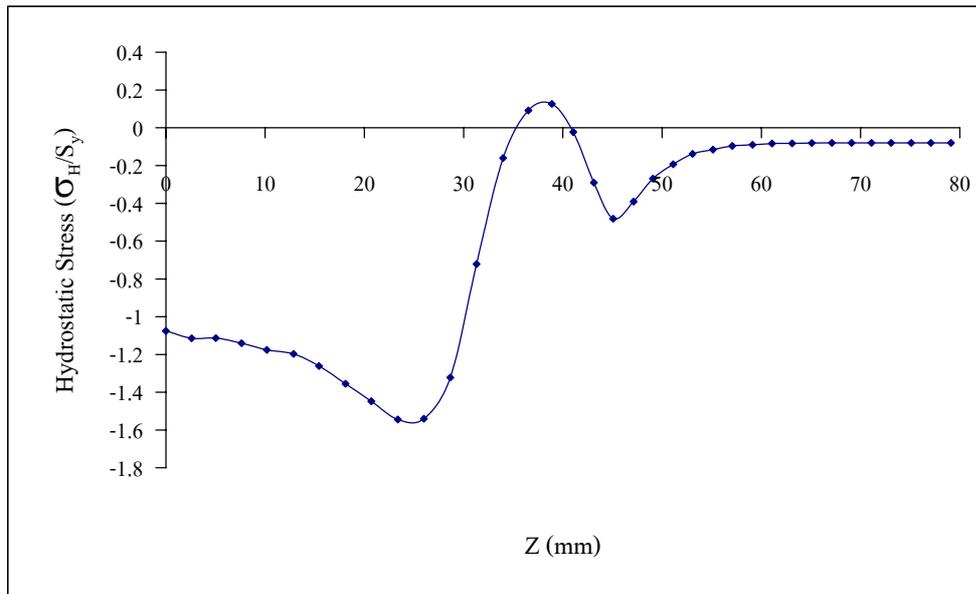
ภาพผนวกที่ ๘ ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.1 และขนาดครึ่งมุมคาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $7^\circ$



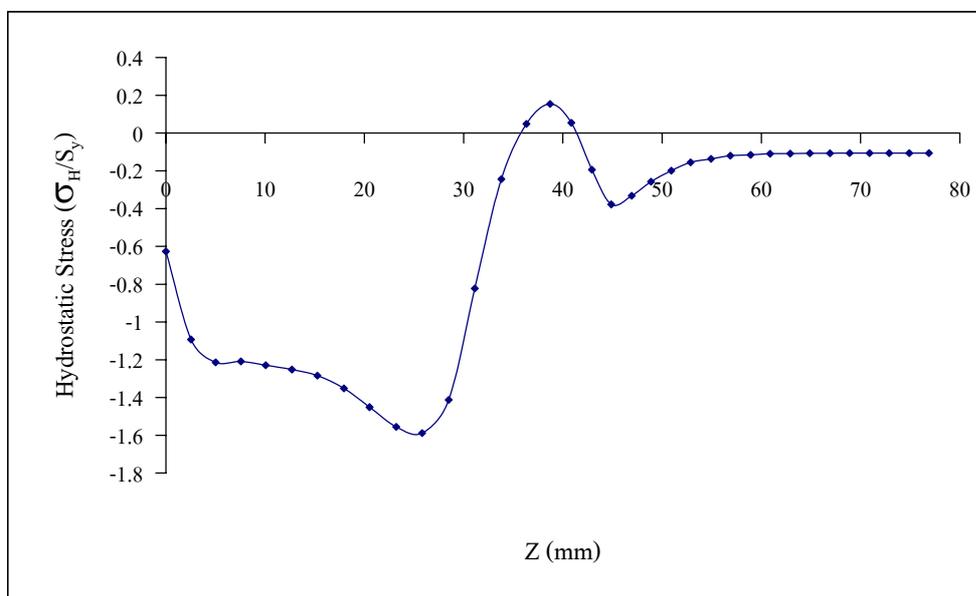
ภาพผนวกที่ ๙ ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.15 และขนาดครึ่งมุมคาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $9^\circ$



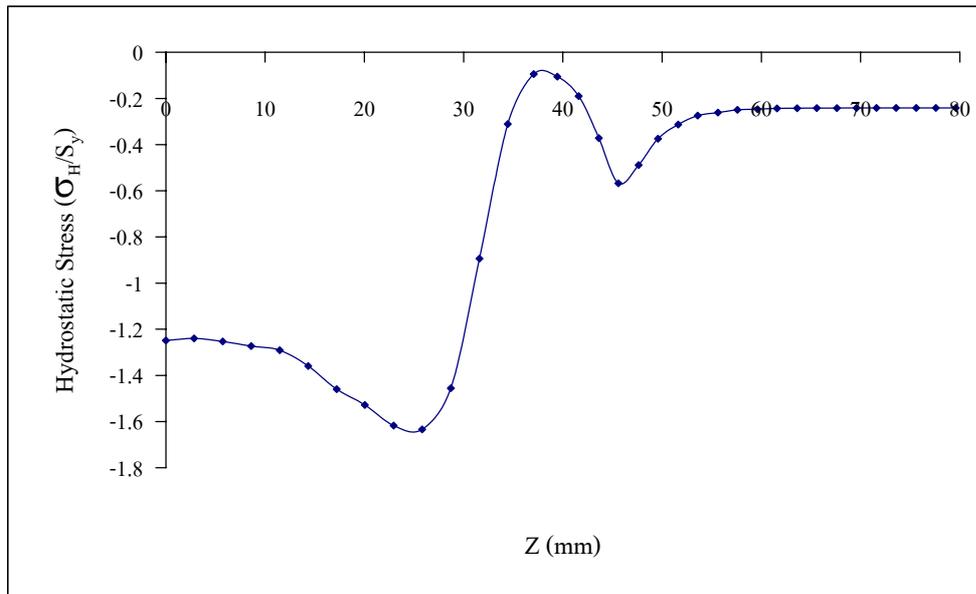
ภาพผนวกที่ ๑๐ ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.15 และขนาดครึ่งมุมคาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $10^\circ$



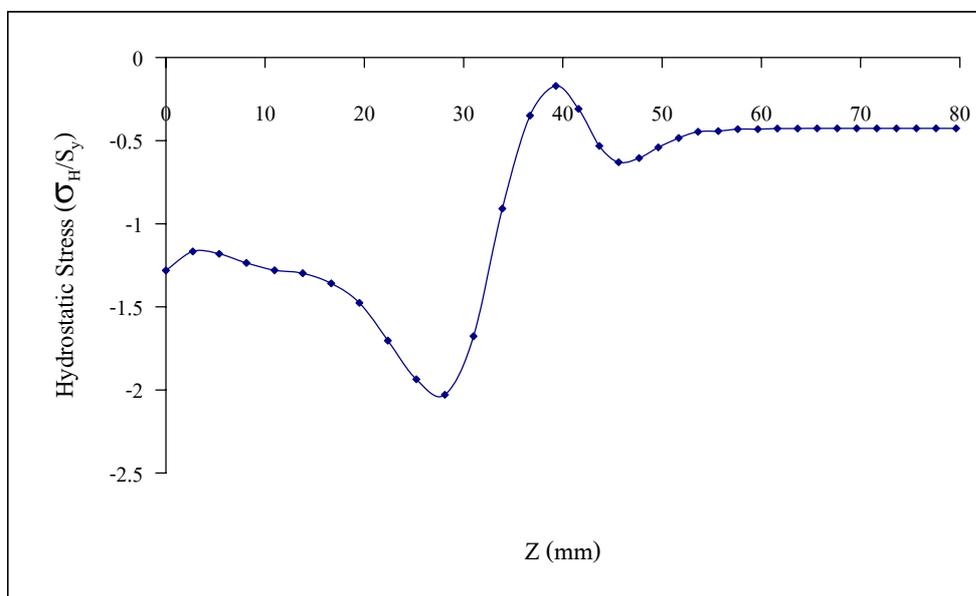
ภาพผนวกที่ 11 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.15 และขนาดครึ่งมุมดาบ ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $11^\circ$



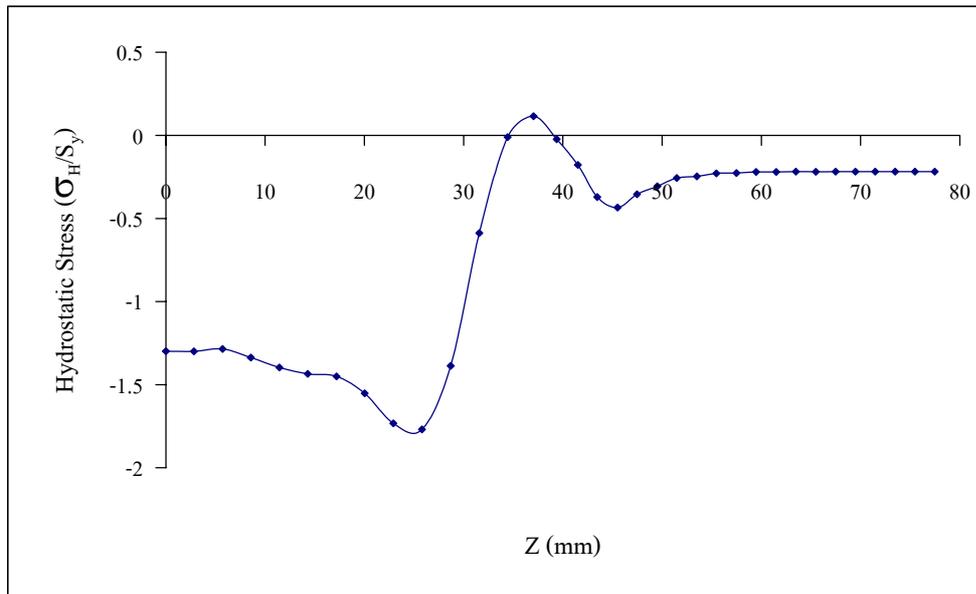
ภาพผนวกที่ 12 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.15 และขนาดครึ่งมุมดาบ ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $12^\circ$



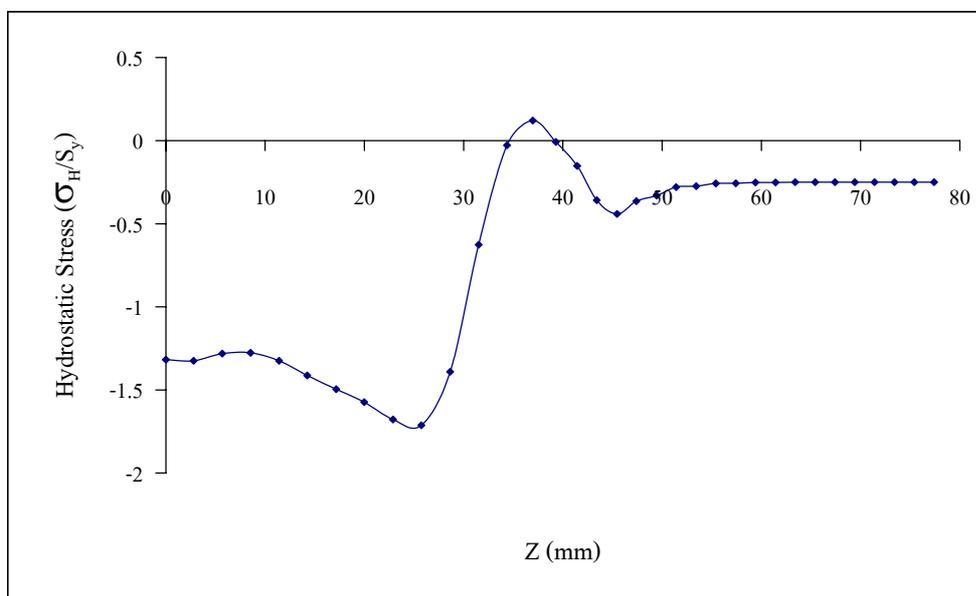
ภาพผนวกที่ ค13 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำก้าอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.2 และขนาดครึ่งมุมดาบ ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $14^\circ$



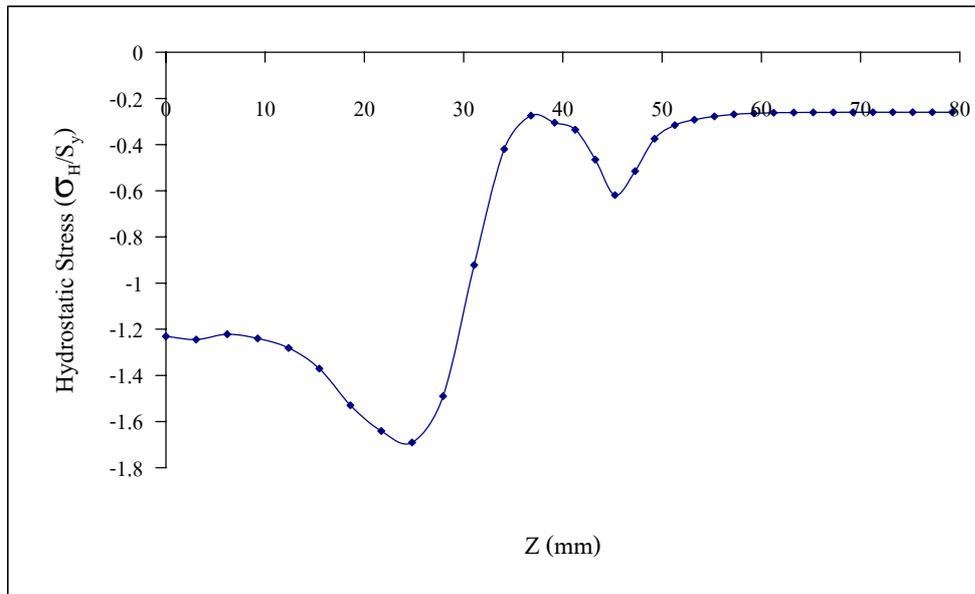
ภาพผนวกที่ ค14 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำก้าอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.2 และขนาดครึ่งมุมดาบ ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $15^\circ$



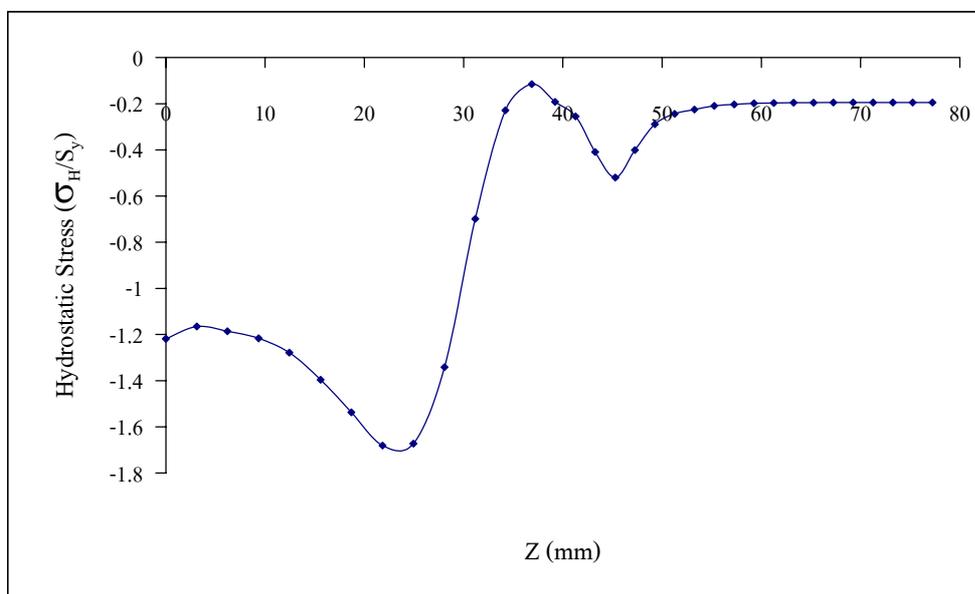
ภาพผนวกที่ ค15 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำก้าอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.2 และขนาดครึ่งมุมดาบ ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $16^\circ$



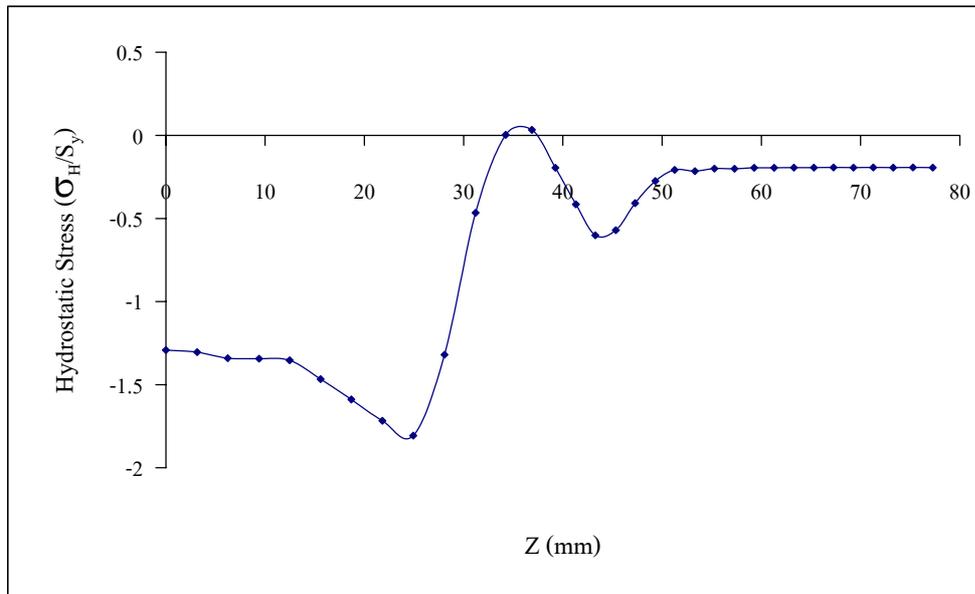
ภาพผนวกที่ ค16 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำก้าอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.2 และขนาดครึ่งมุมดาบ ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $17^\circ$



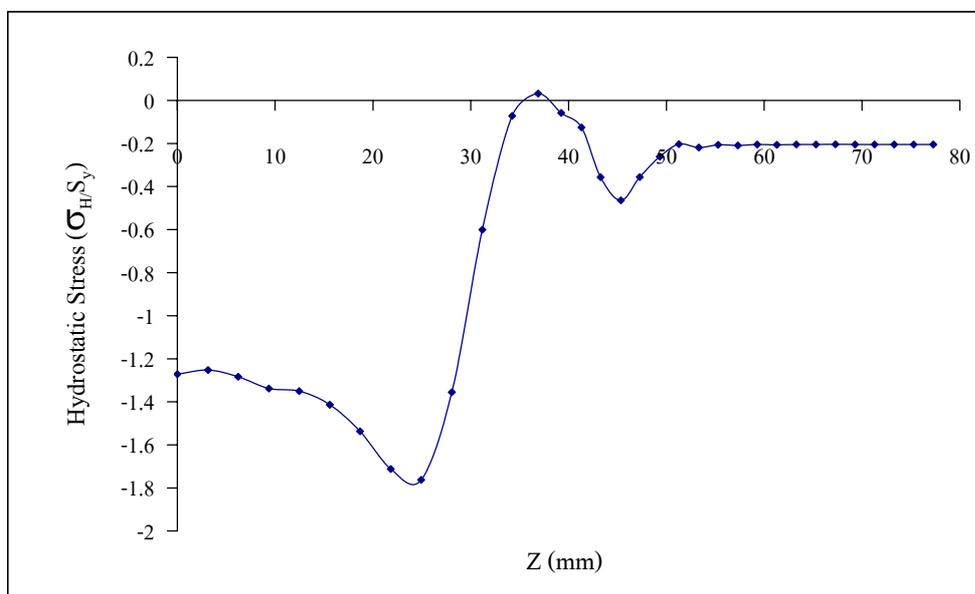
ภาพผนวกที่ ค17 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำกาอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.25 และขนาดครึ่งมุมดาบ ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $15^\circ$



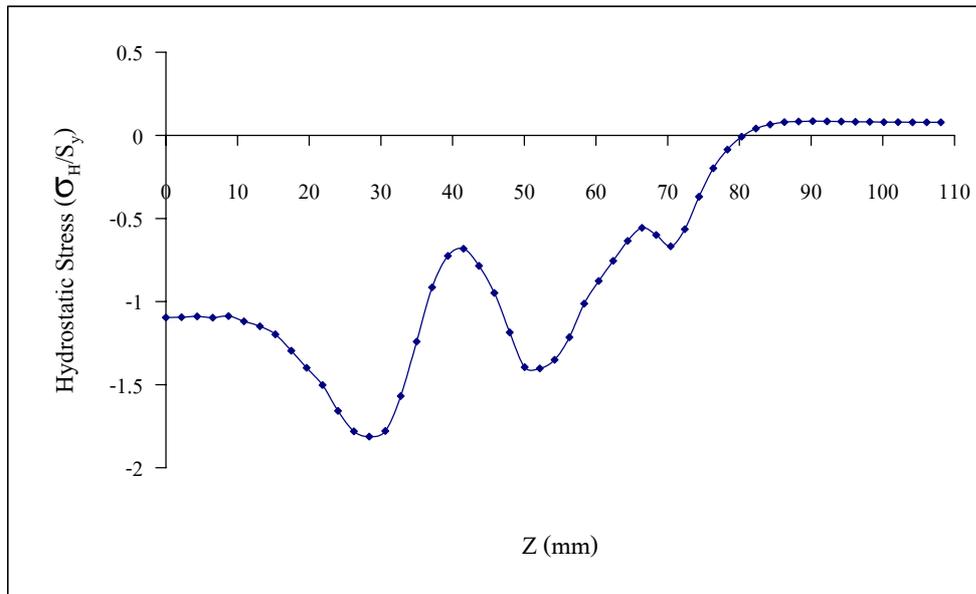
ภาพผนวกที่ ค18 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำกาอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.25 และขนาดครึ่งมุมดาบ ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $16^\circ$



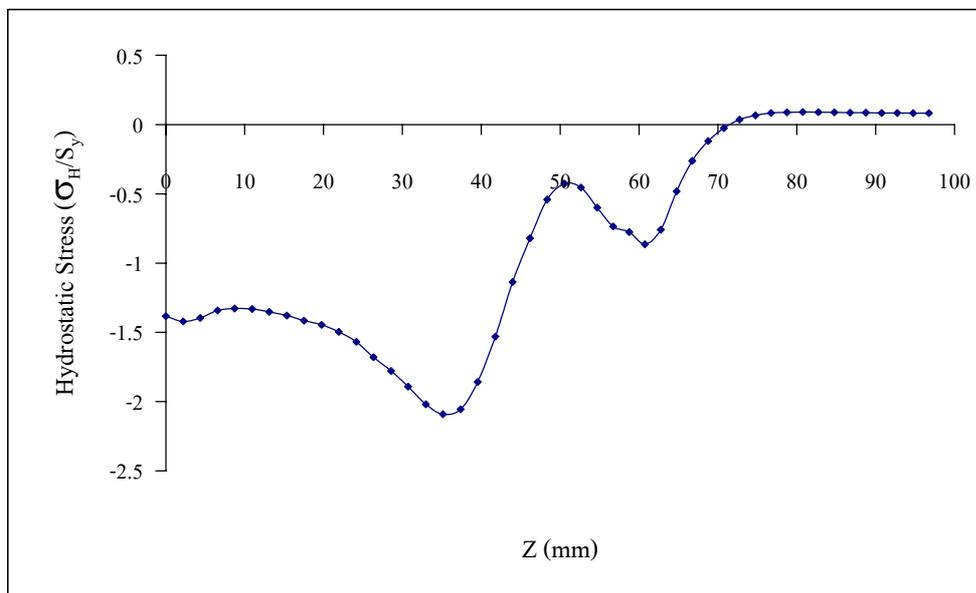
ภาพผนวกที่ ค19 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำกาอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.25 และขนาดครึ่งมุมดาบ ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $17^\circ$



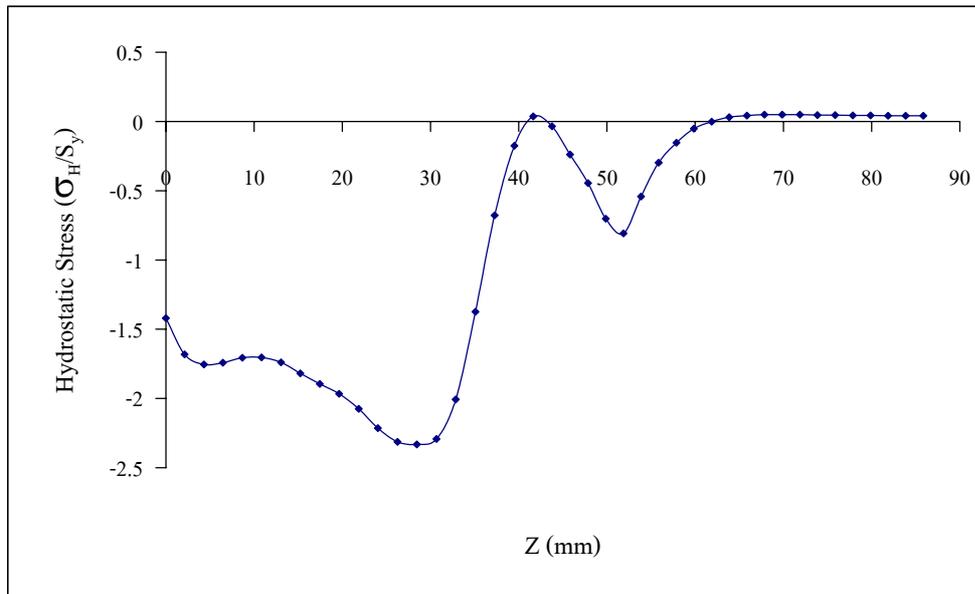
ภาพผนวกที่ ค20 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE 1090) ขณะทำกาอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.25 และขนาดครึ่งมุมดาบ ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $18^\circ$



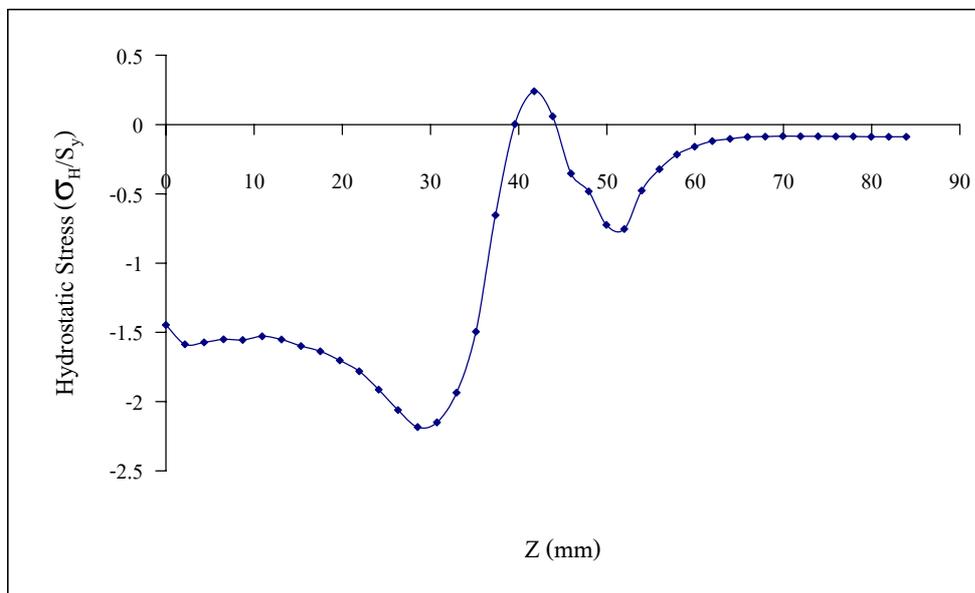
ภาพผนวกที่ ค21 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.05 และขนาดครึ่งมุมดาบ ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $1^\circ$



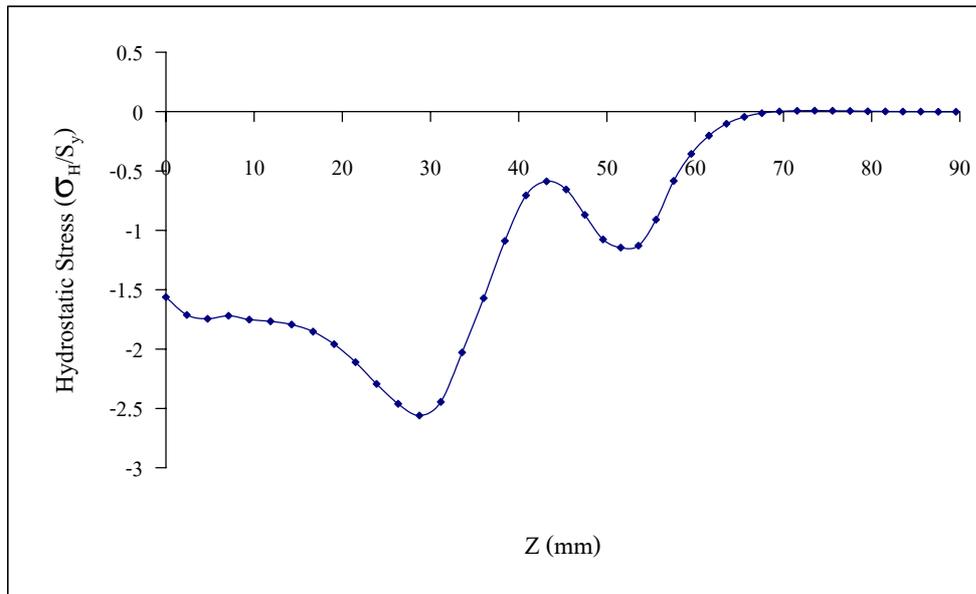
ภาพผนวกที่ ค22 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.05 และขนาดครึ่งมุมดาบ ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $2^\circ$



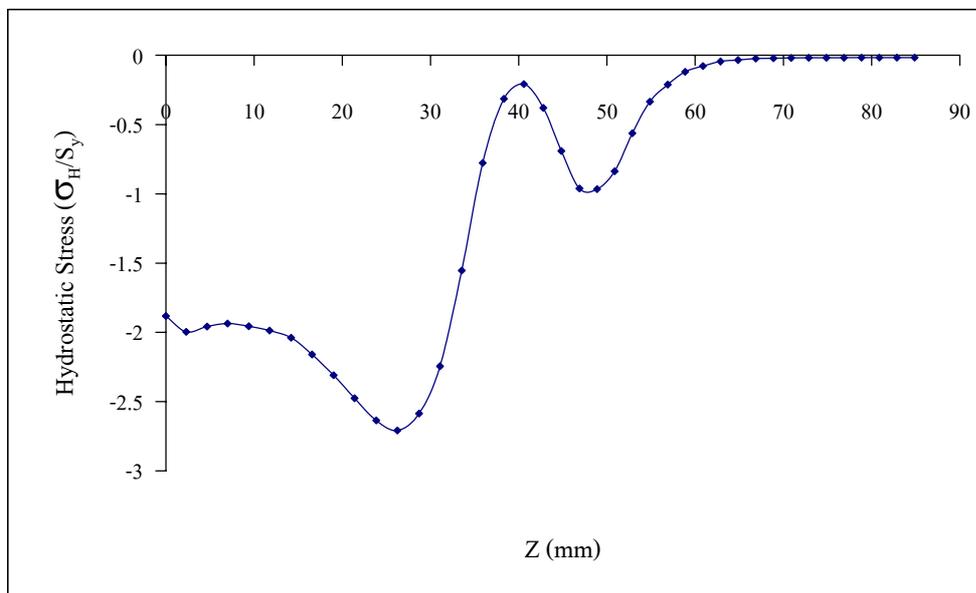
ภาพผนวกที่ ค23 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.05 และขนาดครึ่งมุมดาวย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $3^\circ$



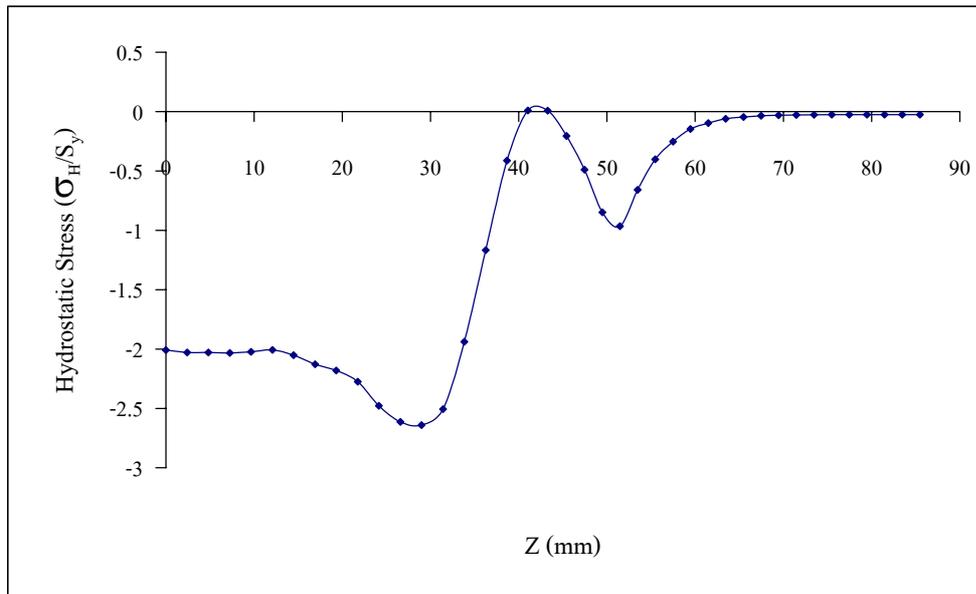
ภาพผนวกที่ ค24 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.05 และขนาดครึ่งมุมดาวย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $4^\circ$



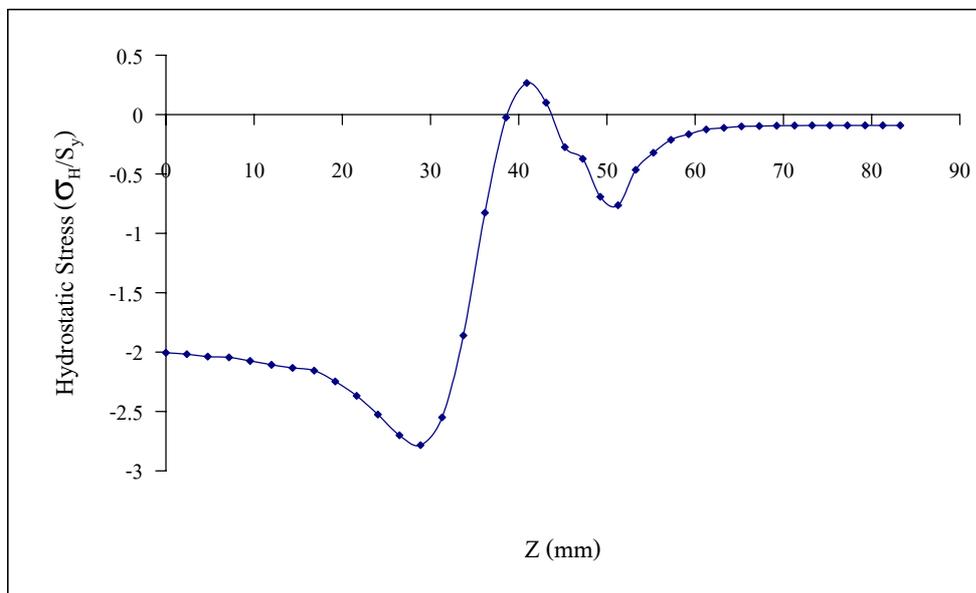
ภาพผนวกที่ ค25 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.1 และขนาดครึ่งมุมคาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $4^\circ$



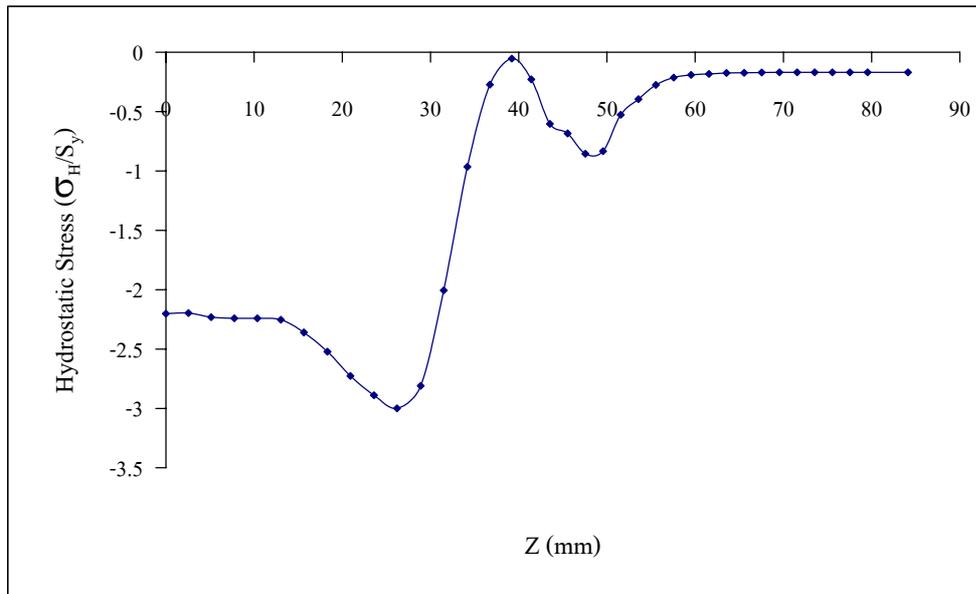
ภาพผนวกที่ ค26 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.1 และขนาดครึ่งมุมคาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $5^\circ$



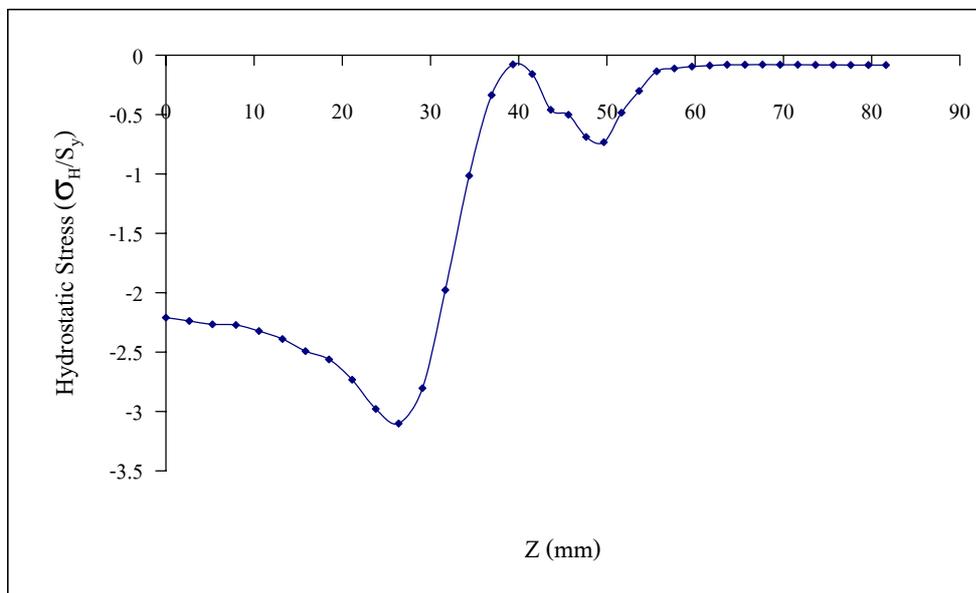
ภาพผนวกที่ ค27 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.1 และขนาดครึ่งมุมคาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $6^\circ$



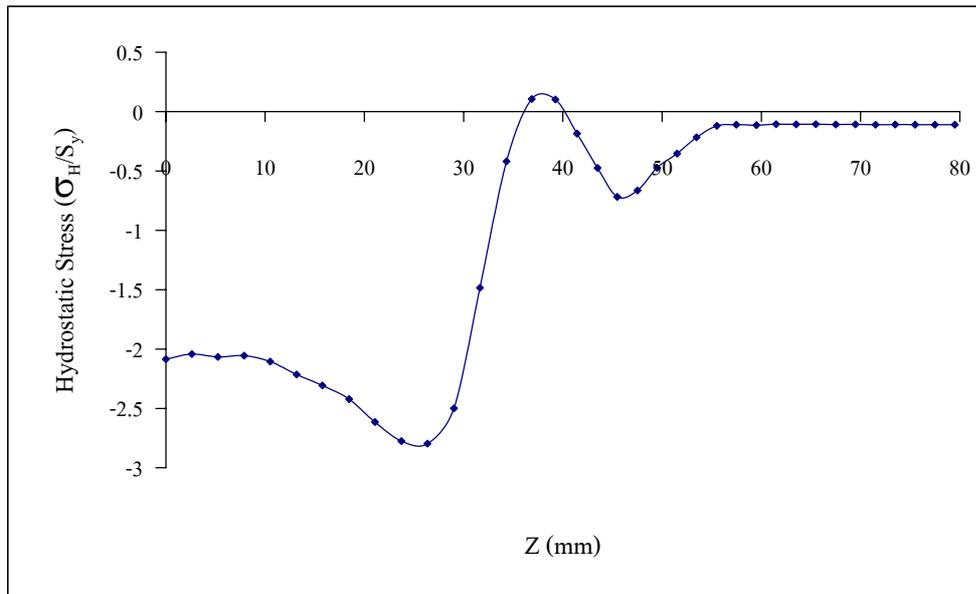
ภาพผนวกที่ ค28 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.1 และขนาดครึ่งมุมคาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $7^\circ$



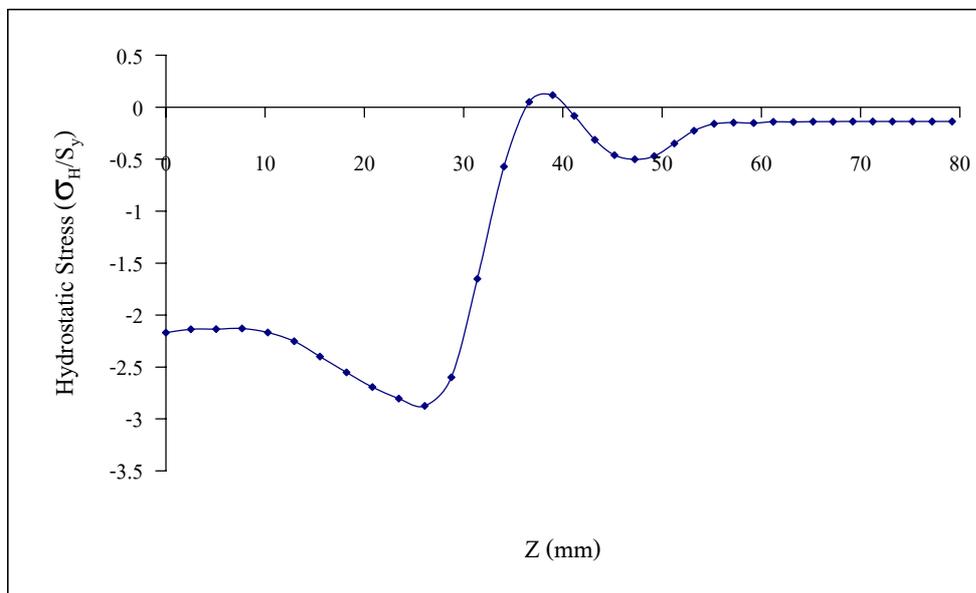
ภาพผนวกที่ ค29 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.15 และขนาดครึ่งมุมดาบ ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $9^\circ$



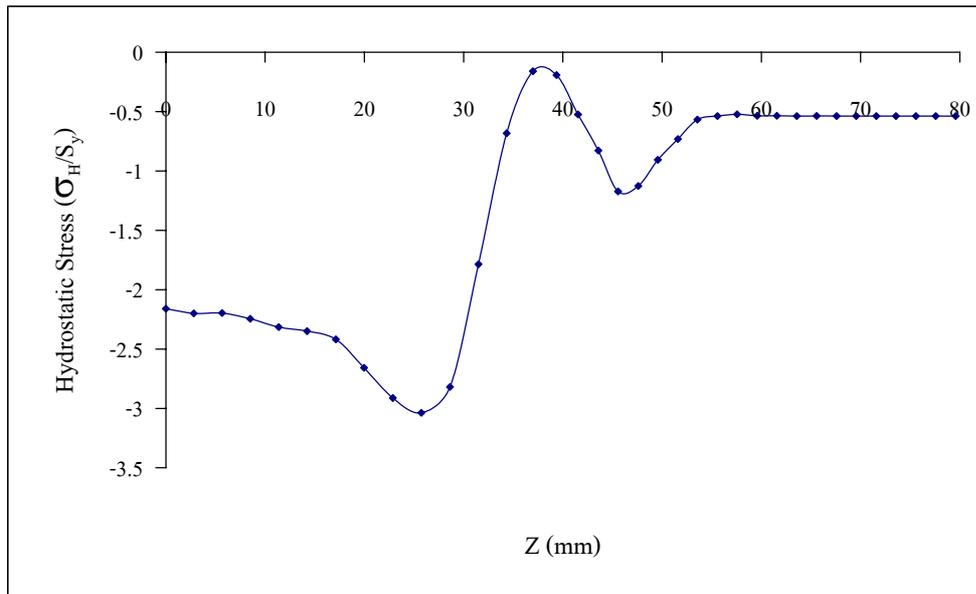
ภาพผนวกที่ ค30 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.15 และขนาดครึ่งมุมดาบ ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $10^\circ$



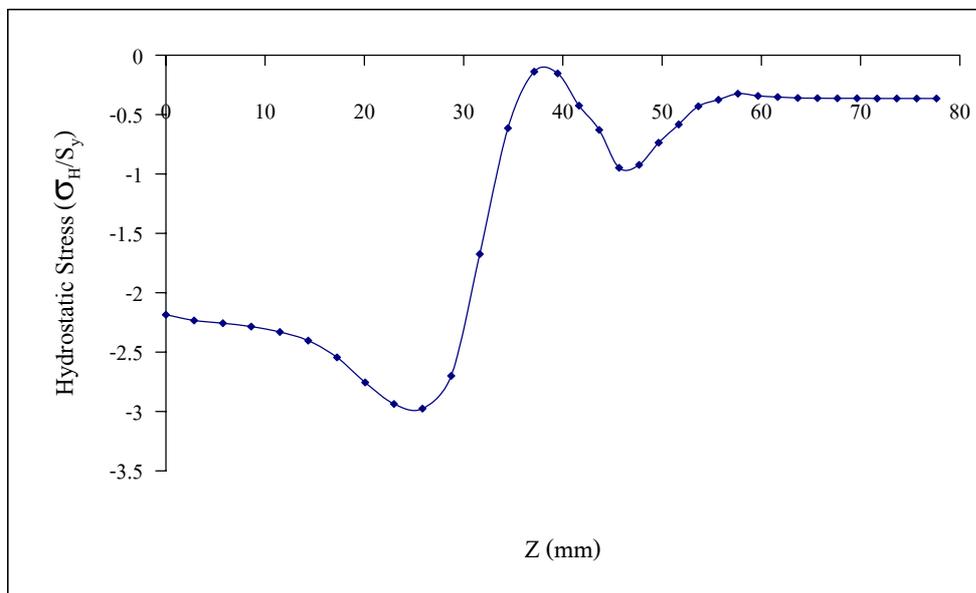
ภาพผนวกที่ ค31 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.15 และขนาดครึ่งมุมตาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $11^\circ$



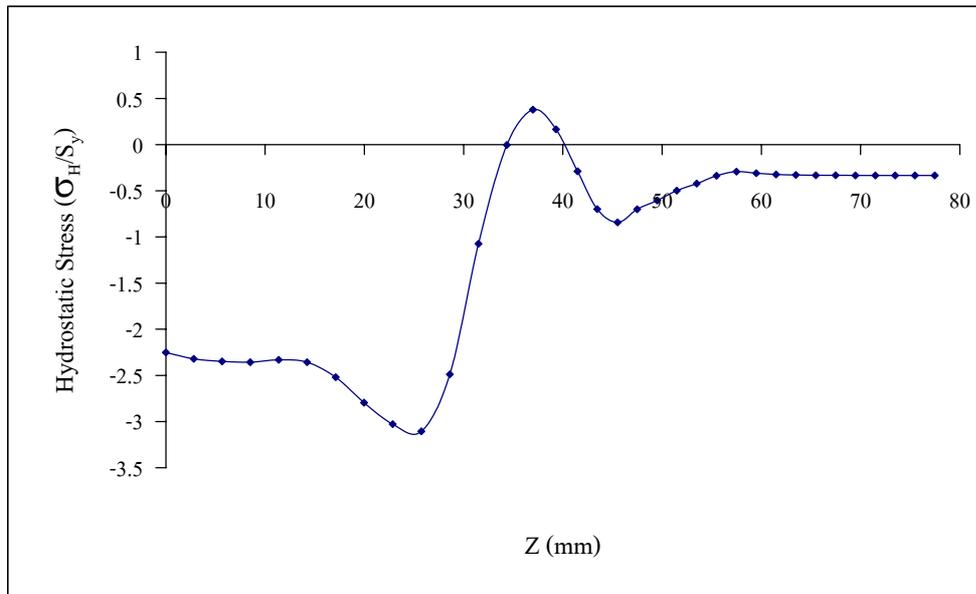
ภาพผนวกที่ ค32 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.15 และขนาดครึ่งมุมตาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $12^\circ$



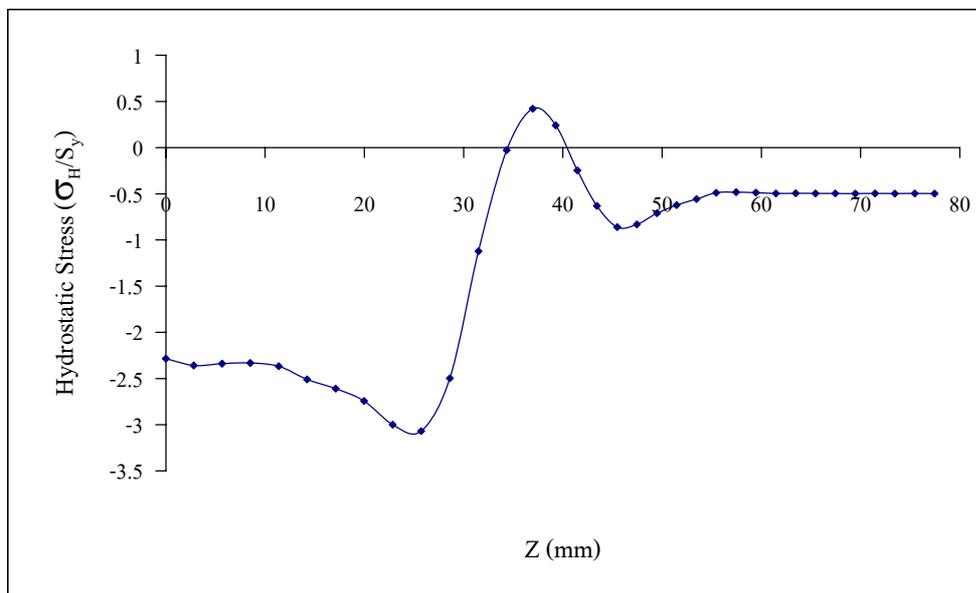
ภาพผนวกที่ ค33 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.2 และขนาดครึ่งมุมดาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $14^\circ$



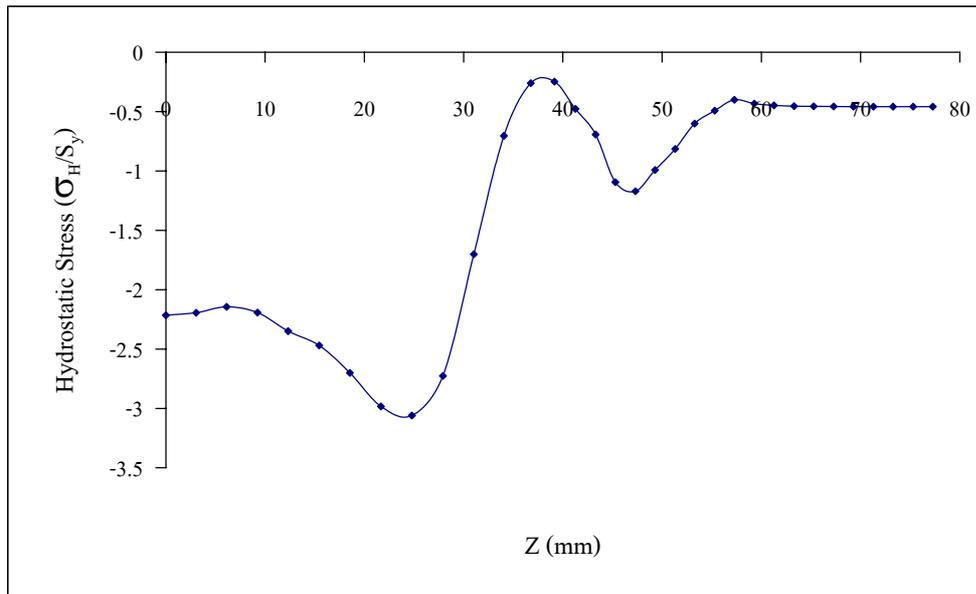
ภาพผนวกที่ ค34 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.2 และขนาดครึ่งมุมดาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $15^\circ$



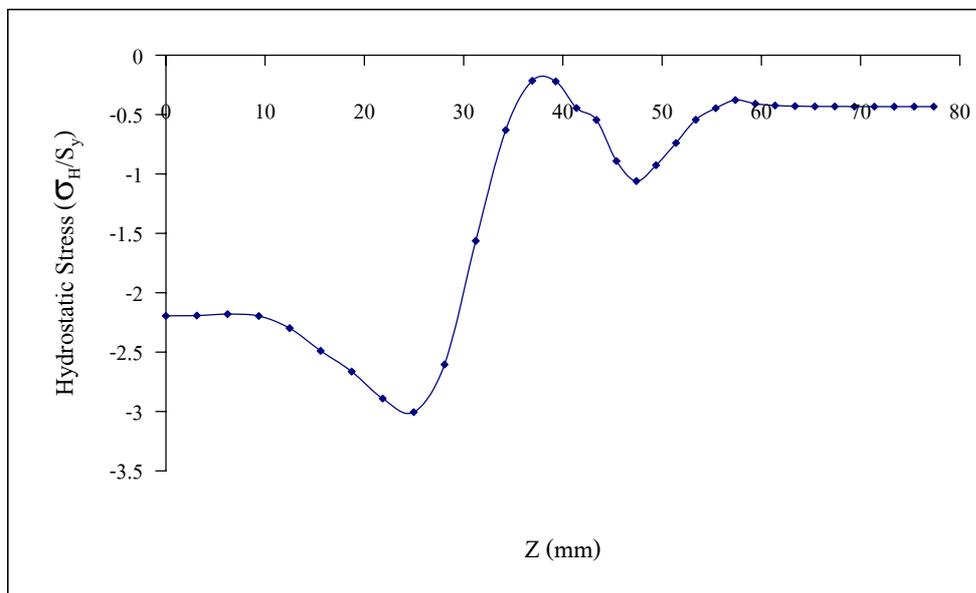
ภาพผนวกที่ ค35 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.2 และขนาดครึ่งมุมคาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $16^\circ$



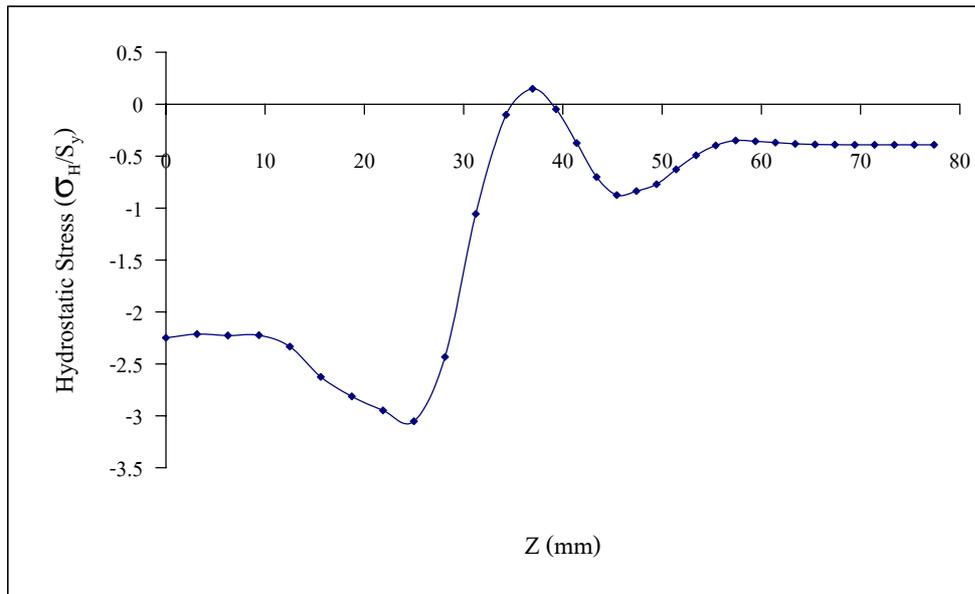
ภาพผนวกที่ ค36 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.2 และขนาดครึ่งมุมคาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $17^\circ$



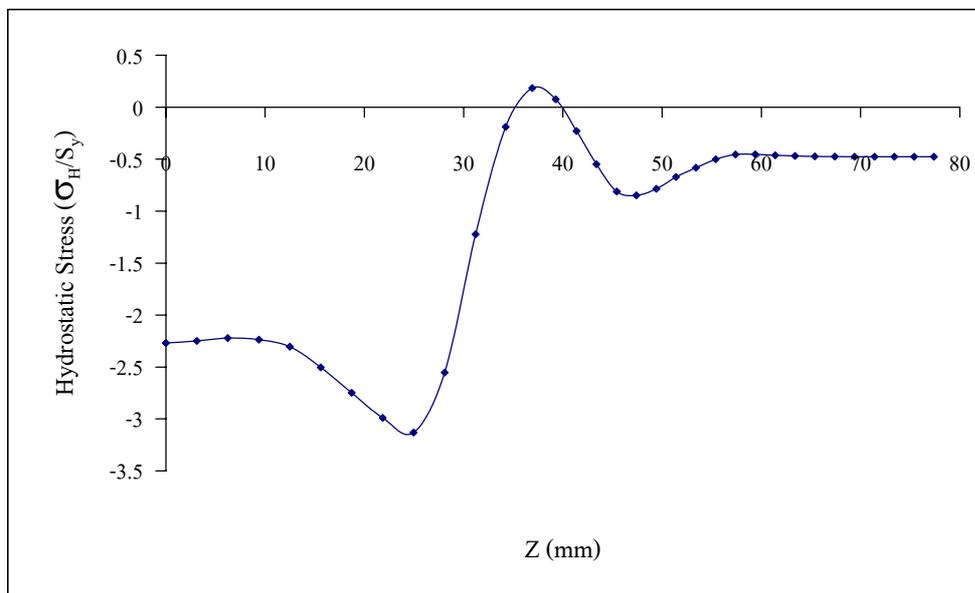
ภาพผนวกที่ ค37 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.25 และขนาดครึ่งมุมตาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $15^\circ$



ภาพผนวกที่ ค38 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.25 และขนาดครึ่งมุมตาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $16^\circ$



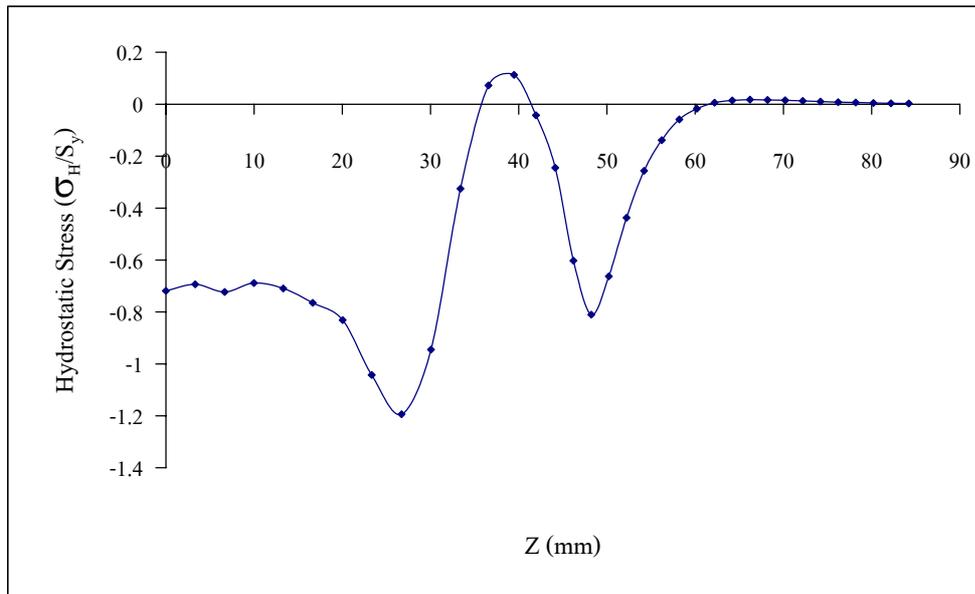
ภาพผนวกที่ ค39 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.25 และขนาดครึ่งมุมตาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $17^\circ$



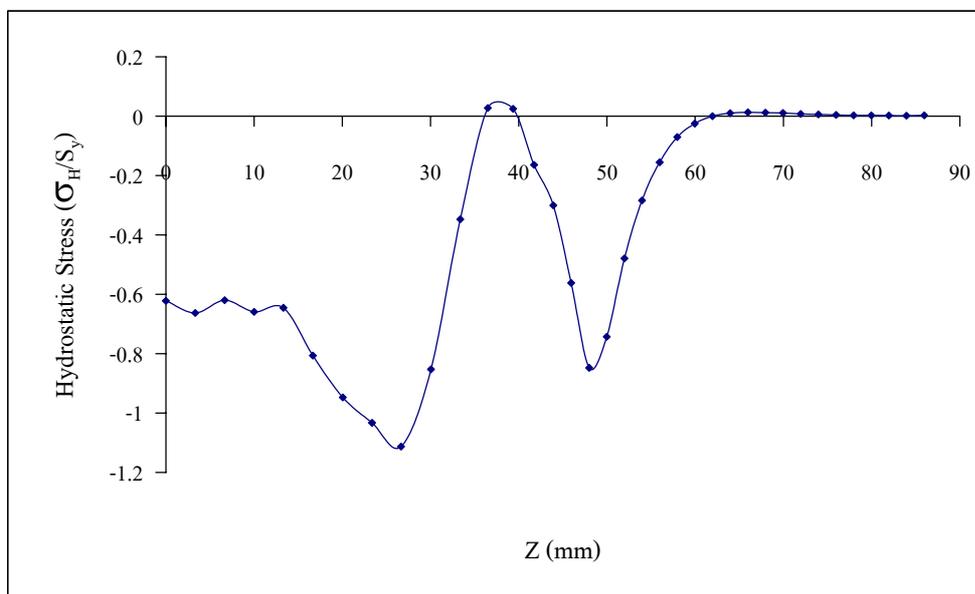
ภาพผนวกที่ ค40 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดทองแดง (OFHC) ขณะทำการอัดขึ้นรูปที่อัตราส่วน  $R_1/R_2$  เท่ากับ 1.25 และขนาดครึ่งมุมตาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $18^\circ$

### ภาคผนวก ง

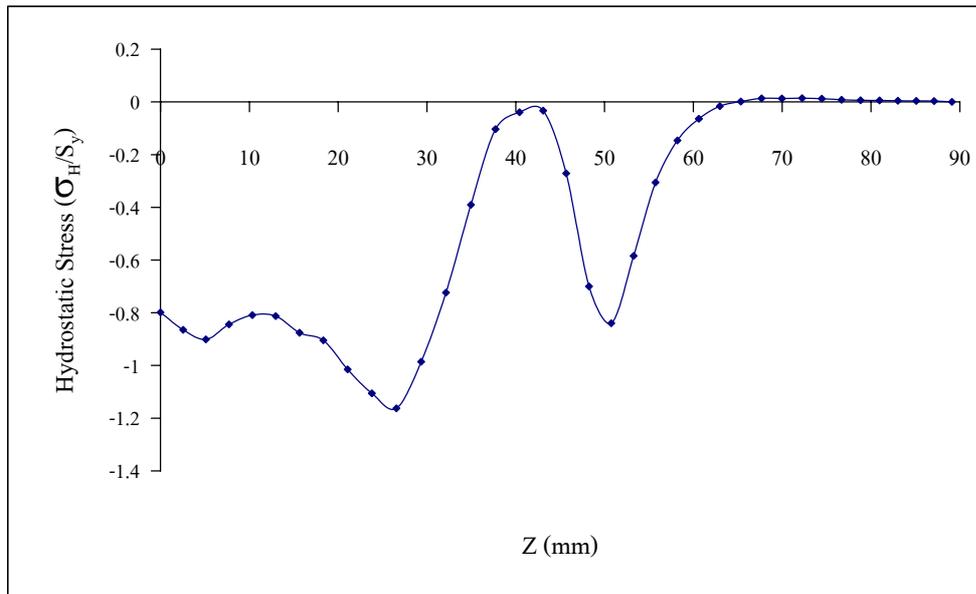
ผลการวิเคราะห์กระบวนการดิ่งขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กพริสซิฟไฟไนต์เอลิเมนต์



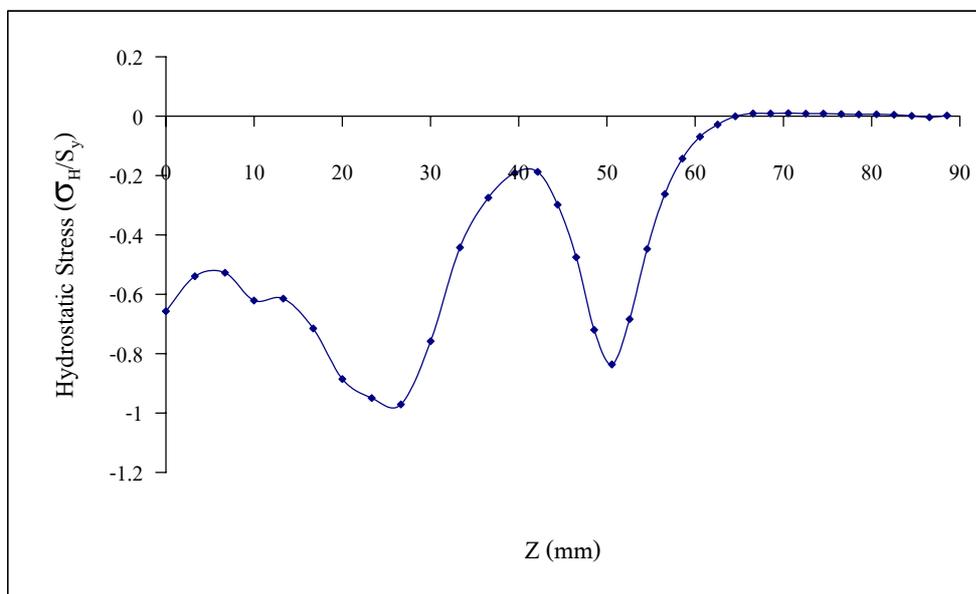
**ภาพผนวกที่ 31** ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กพริสทิฟไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และ อัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.3



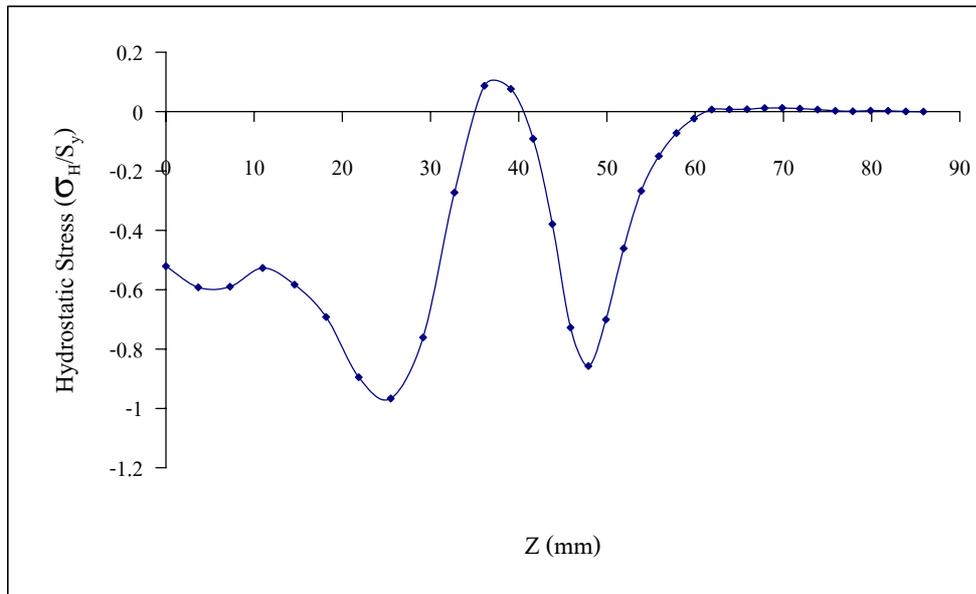
**ภาพผนวกที่ 32** ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กพริสทิฟไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และ อัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.4



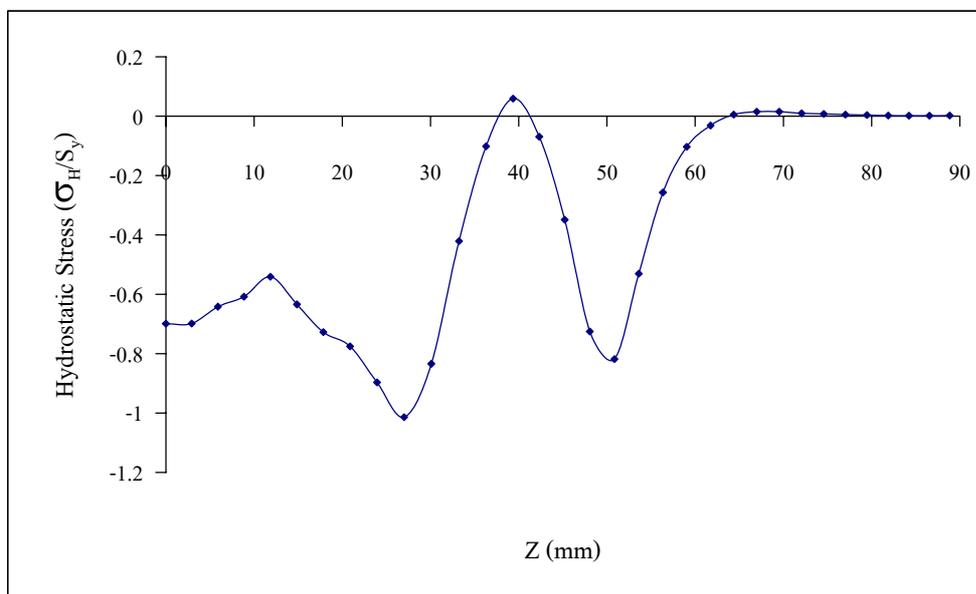
ภาพผนวกที่ 33 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กพริสซิฟไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และ อัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.5



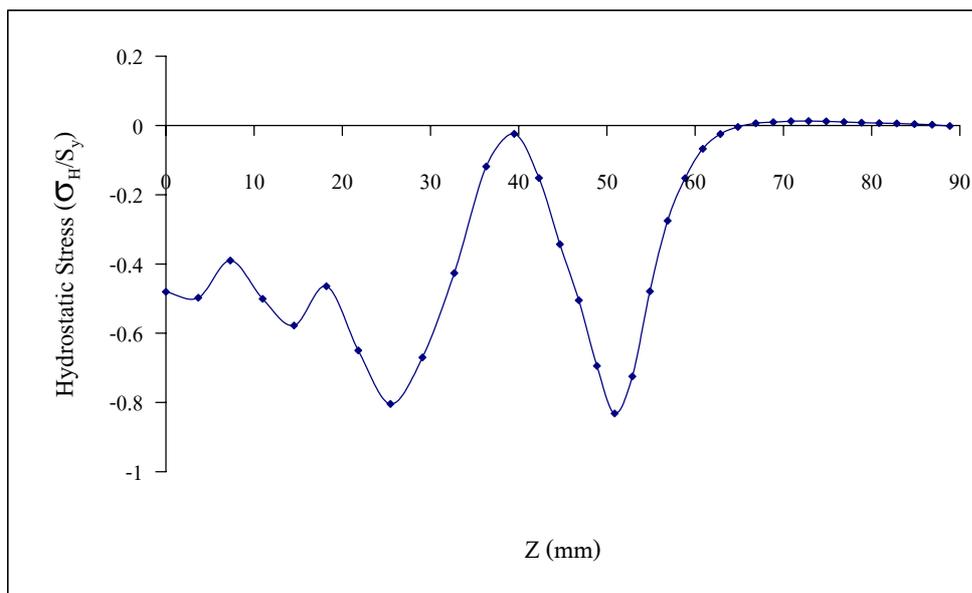
ภาพผนวกที่ 34 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กพริสซิฟไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 40% และ อัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.6



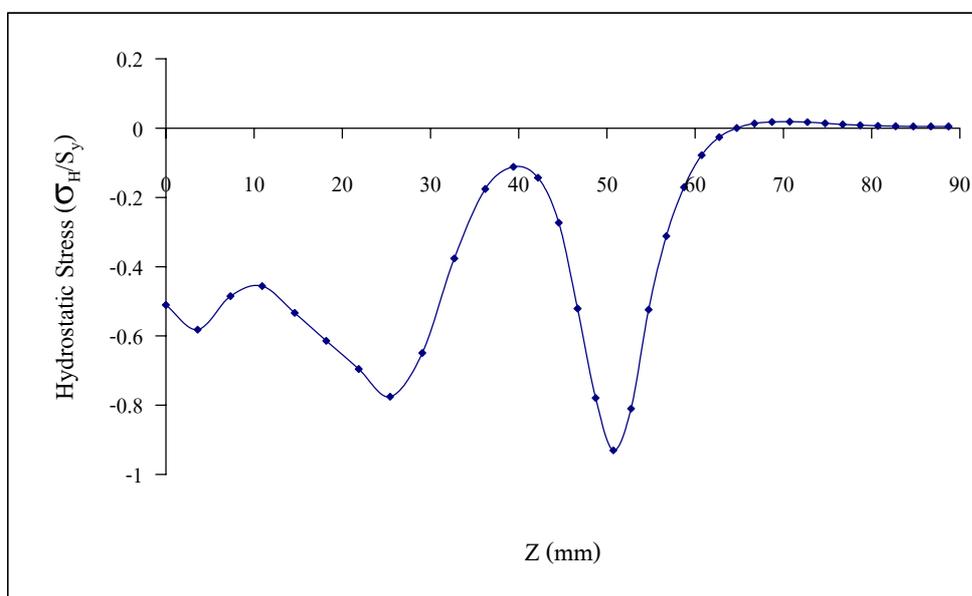
ภาพผนวกที่ 35 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กพริสทิฟไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และ อัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.4



ภาพผนวกที่ 36 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กพริสทิฟไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และ อัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.5



ภาพผนวกที่ ๓7 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กพริสซิฟไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และ อัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.6



ภาพผนวกที่ ๓8 ความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเส้นลวดเหล็ก (SAE1090) ขณะทำการดึงขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กพริสซิฟไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%r) เท่ากับ 45% และ อัตราส่วน  $L/R_1$  เท่ากับ 1.7

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล

นายชนกฤต ม่วงสวัสดิ์

วัน เดือน ปี ที่เกิด

วันที่ 14 กันยายน 2524

สถานที่เกิด

อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก

ประวัติการศึกษา

วศ.บ. (วิศวกรรมอาหาร)

สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล (2547)