สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

# การศึกษาที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปท่อแบบเจซีโอด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

# The Study of JCO Pipe Forming by Finite Element Method

T119243

ปรัชญ์ เพชรวิไลกุล

ผิดก ศักดาเยี่ยงยงค์

พงษ์พัฒน์ กิจขจรกุล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 119243
วัน,เดือน,ปี - 6 S.A. 2554

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การศึกษาการขึ้นรูปท่อแบบเจซีโอด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

# The Study of JCO Pipe Forming by Finite Element Method


โดย

ปรัชญ์ เพชรวิไลกุล

ผิดก ศักดาเยี่ยงยงค์

พงษ์พัฒน์ กิจบจรกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว


ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2553

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการขึ้นรูปท่อแบบเจซีโอด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

The Study of JCO Pipe Forming by Finite Element Method


ผู้จัดทำ

1. นาย ปรัชญ์ เพชรวิไลกุล รหัสประจำตัว 50010913
2. นาย ผิดก ศักดาเยี่ยงยงค์ รหัสประจำตัว 50010992
3. นาย พงษ์พัฒน์ กิจบจรกุล รหัสประจำตัว 50011015

_____ อาจารย์ที่ปรึกษา

( รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว )


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การศึกษาการขึ้นรูปท่อแบบเจซีโอด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

นาย ปรัชญ์ เพชรวิไลกุล 50010913
นาย ผิดก ศักดาเยี่ยงยงค์ 50010992
นาย พงษ์พัฒน์ กิจขจรกุล 50011015
รศ.ดร. จำลอง ปราบแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ปีการศึกษา 2553

**บทคัดย่อ**

โครงงานนี้เกิดขึ้นจากการไปศึกษาดูงานที่บริษัท แคนนาดอยล์ ไปป์ จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทผลิตท่อส่งน้ำมันและก๊าซพบว่าในกระบวนการผลิตของการเปลี่ยนขนาดของผลิตภัณฑ์จะเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการลองผิดลองถูกเพื่อหาค่าระยะกดของการขึ้นรูปท่อแบบเจซีโอ การศึกษาครั้งนี้เป็นการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองการขึ้นรูปเพื่อหาระยะกดของหัวกดและระยะห่างของดาย และทำนายรูปร่างสุดท้ายของท่อหลังจากการขึ้นรูปท่อแบบเจซีโอตามมาตรฐาน API 5L X-65 เพื่อขึ้นรูปเป็นท่อขนาด 660 มิลลิเมตร หนา 37 มิลลิเมตร ยาว 6 เมตร จากการศึกษาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า ระยะกดและระยะห่างดายที่เหมาะสมมีค่า 24 มิลลิเมตร โดยค่าความผิดพลาดความกลมมีค่าเท่ากับ 1.04% อย่างไรก็ตามค่าที่ใช้จริงในการปฏิบัติระยะกดมีค่าเท่ากับ 27 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Study of JCO Pipe Forming by Finite Element Method

Pratch Petchwilaikul 50010913

Phidok Sakdayeangyong 50010992

Pongpat kitkhajornkul 50011015

Assoc.Prof.Dr. Chamlong Prabkeao Advisor

Asst.Prof.Dr. Monsak Pimsarn Co. Advisor

2010

## ABSTRACT

This project was inspired after the summer internship program of Canadoil Pipe Co.,Ltd. The purpose of this project is to find a suitable punch stroke and die distance by using finite element method. The obtained results were used in the actual operation and the companson used are ovality and pipe diameter. The X-65 steel pipe 660 mm in diameter is numerically tested. The simulated results show that the suitable punch stroke and die distance are 24 mm and 240 mm, respectively, the percent error of ovality is 1.04. However, when these parameters were used in actual operation, the punch stroke has to be changed to 27 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ ช่วยเหลือ และสนับสนุนเป็นอย่างดีจากบุคคลที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ช่วยให้คำแนะนำและให้ข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องาน และการแก้ปัญหาต่างๆที่พบระหว่างการทำโครงงาน ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

อาจารย์ ภูดิท ชัยดิลกพัฒนกุล ที่ให้คำปรึกษาทางด้านทฤษฎี

บริษัทแคนนาดอยล์ ไปป์ จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านข้อมูลและการทดลองต่างๆ ในการทำโครงงานนี้

พี่ นัทธร เมืองสง และ พี่ โกสินทร์ จันพอพันธ์ ซึ่งเป็นผู้เสนอหัวข้อโครงงานนี้ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงาน

ข้าพเจ้าขอขอบคุณบุคคลต่างๆดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น รวมทั้งเพื่อนๆ ที่ให้กำลังจนงานนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ปรัชญ์ เพชรวิไลกุล
ผิดก ศักดาเยี่ยงยงค์
พงษ์พัฒน์ กิจขจรกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....V

สารบัญรูป.....VI

**บทที่ 1 บทนำ**

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....2

1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....2

1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....2

1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....2

**บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**.....3

**บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน**

3.1 กระบวนการขึ้นรูปท่อโลหะ.....7

3.1.1 กระบวนการขึ้นรูปท่อแบบ Three Roll Bending.....7

3.1.2 กระบวนการขึ้นรูปท่อแบบ UOE.....8

3.1.3 กระบวนการขึ้นรูปท่อแบบ JCO.....8

3.2 ความเค้น (Stress).....9

3.2.1 รูปแบบและชนิดของความเค้นที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำ.....9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

3.3 ความเครียดและการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง.....10

3.3.1 การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป.....11

3.3.2 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป.....11

3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด.....12

3.4.1 Rigid – Perfectly Plastic.....13

3.4.2 Elastic - Perfectly Plastic.....14

3.4.3 Rigid – Linearly Strain Hardening Plastic.....15

3.4.4 Linear Elastic – Linearly Strain Hardening Plastic.....15

3.4.5 Nonlinear Strain Hardening Plastic.....16

3.4.6 Rigid Nonlinear Strain Hardening Plastic.....17

3.4.7 Linear Elastic – Nonlinear Strain Hardening Plastic.....18

3.4.8 Elastic – Steady State Plastic.....18

3.5 ทฤษฎีการขึ้นรูปงานโลหะแผ่นโดยการดัดงอ.....19

3.5.1 ทฤษฎีการงอ.....19

3.5.2 แกนสะเทิน.....20

3.5.3 การไหลตัวของโลหะในการขึ้นรูป.....22

3.5.4 การเคลื่อนไหวของโลหะระหว่างการขึ้นรูป.....23

3.5.5 การดีดกลับตัวของชิ้นงาน.....23

3.5.6 ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณค่า Springback.....25

3.6 การคำนวณหาค่าความผิดพลาดความกลม.....29

**บทที่ 4 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**.....31

4.1 การหาผลวิเคราะห์การขึ้นรูปท่อด้วยโปรแกรม.....31

4.2 แบบจำลองการขึ้นรูปที่ใช้ในการศึกษา.....33

4.2.1 การขึ้นรูปจริง.....33

4.2.2 การขึ้นรูปโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์.....37

4.2.3 การจำลองด้วยโดยใช้โปรแกรม Ansys.....42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

**บทที่ 5 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล**.....53

5.1 ผลการจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....53

5.1.1 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อระยะห่างดาย เท่ากับ 240 มิลลิเมตร.....53

5.1.2 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อระยะห่างดาย เท่ากับ 320 มิลลิเมตร.....56

5.1.3 เปรียบเทียบผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อระยะห่างดาย เท่ากับ 240 มิลลิเมตร และระยะห่างดายเท่ากับ 320 มิลลิเมตร.....58

5.2 ผลที่ได้จากการทดลอง.....59

**บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ**.....62

6.1 สรุปผลการทดลอง.....62

6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....63

6.2.1 ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทำงานวิจัย.....63

6.2.2 ข้อเสนอแนะ.....63

บรรณานุกรม.....65

ภาคผนวก.....66

ภาคผนวก ก. ภาพโรงงาน Canadoil Pipe Co.,Ltd. .....67

ภาคผนวก ข. ตารางระยะห่างดายเปรียบเทียบความหนาของท่อ .....69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 แสดงตารางค่าคุณสมบัติวัสดุ.....38

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองของเครื่องจักร.....3
รูปที่ 2.2 แสดงการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....4
รูปที่ 2.3 แสดงรูปร่างสุดท้ายจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....4
รูปที่ 2.4 แสดงรูปร่างสุดท้ายของท่อที่ผ่านการขึ้นรูป.....4
รูปที่ 2.5 แสดงรูปร่างสุดท้ายของท่อของระยะกดต่างๆกัน.....5
รูปที่ 2.6 แสดงความเค้นตกค้างของหัวกดขนาดต่างๆกัน.....5
รูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นตกค้างของหัวกดขนาดต่างๆกัน.....6
รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีของหัวกดกับความกลมของท่อ.....6
รูปที่ 3.1 กระบวนการขึ้นรูปทั้ง 3 แบบ.....7
รูปที่ 3.2 กระบวนการขึ้นรูปแบบเจซีโอ.....8
รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของแรงดึงและแรงกด.....10
รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของแรงเฉือน.....10
รูปที่ 3.5 ลักษณะของความเครียด.....12
รูปที่ 3.6 แสดงภาพความเค้น–ความเครียด (Stress – Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)13
รูปที่ 3.7 การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากแรงกดของ
อลูมิเนียมและตะกั่ว.....13
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรม
เป็นแบบ Rigid - Perfectly Plastic.....14
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรม
เป็นแบบ Elastic - Perfectly Plastic.....14
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรม
เป็นแบบ Rigid – Linearly Strain Hardening Plastic.....15
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรม
เป็นแบบ Linear Elastic – Linearly Strain Hardening Plastic.....16
รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรม
เป็นแบบ Nonlinear Strain Hardening Plastic.....17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรม
เป็นแบบ Rigid Nonlinear Strain Hardening Plastic.....17
รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรม
เป็นแบบ Linear Elastic – Nonlinear Strain Hardening Plastic.....18
รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรม
เป็นแบบ Elastic – Steady State Plastic.....19
รูป 3.16 ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ของการงอ.....21
รูปที่ 3.17 การไหลของโลหะและการบิดงอ.....22
รูปที่ 3.18 การเปลี่ยนรูปแบบของความเค้นในการงอโลหะ.....24
รูปที่ 3.19 แสดงปรากฏการณ์เกิด Springback.....25
รูปที่ 3.20 แสดง Diagrams maximum-shear-stress และ กฎเกณฑ์ของการเปลี่ยนรูปพลังงาน.....26
รูปที่ 3.21 แสดงพิกัดสำหรับการวิเคราะห์ระบบการงอ.....27
รูปที่ 3.22 แสดงความเค้นกระจายช่วง Elastic และ Plastic.....27
รูปที่ 3.23 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีค่ามากที่สุด และ เส้นผ่านศูนย์กลางที่มีค่าน้อยที่สุด.....30
รูปที่ 4.1 แผนผังการวิเคราะห์การขึ้นรูปท่อ.....32
รูปที่ 4.2 แสดงส่วนประกอบของเครื่อง JCO.....33
รูปที่ 4.3 แสดงระยะกดและระยะห่างดาย.....33
รูปที่ 4.4 แสดงการเลื่อนแผ่นโลหะเพื่อกดครั้งที่ 2.....34
รูปที่ 4.5 แสดงภาพหลังจากการกดครั้งที่ 14.....35
รูปที่ 4.6 แสดงภาพหลังจากการหมุนแผ่นโลหะ.....35
รูปที่ 4.7 แสดงภาพหลังจากการกดครั้งที่ 14.....36
รูปที่ 4.8 แสดงภาพหลังจากการกดครั้งสุดท้าย.....36
รูปที่ 4.9 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....37
รูปที่ 4.10 แสดงคุณสมบัติของแผ่นโลหะแบบ Bilinear strain hardening.....38
รูปที่ 4.11 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของหัวกด.....39
รูปที่ 4.12 แสดงภาพขยายการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของหัวกด.....39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.13 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแผ่นโลหะ.....40
รูปที่ 4.14 แสดงภาพดาย.....40
รูปที่ 4.15 แสดงความเร็วในการเคลื่อนที่ลงของหัวกด.....41
รูปที่ 4.16 แสดงหน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรม.....42
รูปที่ 4.17 แสดงหน้าต่าง Preferences for GUI Filtering.....42
รูปที่ 4.18 แสดงหน้าต่าง Update Geometry.....43
รูปที่ 4.19 แสดงโมเดลการหลังจากการขึ้นรูปที่ขอบแผ่นโลหะ.....43
รูปที่ 4.20 แสดงหน้าต่าง Element Type.....44
รูปที่ 4.21 แสดงหน้าต่างการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ.....44
รูปที่ 4.22 แสดงหน้าต่าง Rigid properties.....45
รูปที่ 4.23 โมเดลรูปเครื่องเจซีโอ.....45
รูปที่ 4.24 แสดงการแบ่งเส้นตรงจุดสัมผัสให้ละเอียดขึ้น.....46
รูปที่ 4.25 แสดงหน้าต่าง Element size.....46
รูปที่ 4.26 แสดงการ Mesh เป็นแบบ Free Meshing.....47
รูปที่ 4.27 แสดงหน้าต่าง EDPart.....47
รูปที่ 4.28 แสดงหน้าต่าง Contact Parameter.....48
รูปที่ 4.29 แสดงหน้าต่าง Add New Array Parameter.....48
รูปที่ 4.30 แสดงหน้าต่าง Add New Array Parameter.....49
รูปที่4.31 แสดงหน้าต่างค่าของตัวแปรอาเรย์.....49
รูปที่ 4.32 แสดงหน้าต่างการใส่ค่าตัวแปรของระยะกด.....50
รูปที่ 4.33 แสดงหน้าต่าง Add Curve Data.....50
รูปที่ 4.34 แสดงหน้าต่าง Specify Load.....51
รูปที่ 4.35 แสดงหน้าต่าง Solution Time.....52
รูปที่ 4.36 แสดงหน้าต่าง Specify File Output Frequency.....52
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะกดและเส้นผ่านศูนย์กลาง.....53
รูปที่ 5.2 แสดงการวัดส่วนโค้งหลังการกดครั้งที่ 2.....54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.3 แสดงการวัดส่วนโค้งหลังการกดครั้งที่ 5.....54
รูปที่ 5.4 แสดงการวัดส่วนโค้งหลังการกดครั้งที่ 9.....55
รูปที่ 5.5 แสดงการวัดส่วนโค้งหลังการกดครั้งสุดท้าย.....55
รูปที่ 5.6 แสดงการวัดค่า Dmax และ Dmin ของระยะห่างดาย 320 มิลลิเมตร.....56
รูปที่ 5.7 แสดงการวัดส่วนโค้งหลังการกดครั้งสุดท้าย.....57
รูปที่ 5.8 แสดงการวัดค่า Dmax และ Dmin ของระยะห่างดาย 320 มิลลิเมตร.....57
รูปที่ 5.9 แสดงค่าความเค้นตกค้างในการใช้ระยะดาย 240 มิลลิเมตร.....58
รูปที่ 5.10 แสดงค่าความเค้นตกค้างในการใช้ระยะดาย 320 มิลลิเมตร.....59
รูปที่ 5.11 แสดงภาพหลังจากการทดลองกดครั้งที่ 2.....59
รูปที่ 5.12 แสดงภาพหลังจากการทดลองกดครั้งที่ 5.....60
รูปที่ 5.13 แสดงภาพหลังจากการทดลองกดครั้งที่ 9.....60
รูปที่ 5.14 แสดงภาพหลังจากการทดลองกดครั้งที่ 28.....61
รูปที่ 5.15 แสดงภาพหลังจากการกดครั้งสุดท้ายของท่อ.....61
รูปที่ ก.1 ภาพภายในโรงงาน Canadoil Pipe.....67
รูปที่ ก.2 ภาพเครื่อง JCO.....67
รูปที่ ก.3 ภาพขณะ Operate เครื่อง JCO.....68
รูปที่ ก.4 ภาพแผงควบคุมเครื่อง JCO.....68
รูปที่ ข.1 ตารางระยะห่างดาย 240 มิลลิเมตรเปรียบเทียบความหนาของท่อ.....69
รูปที่ ข.2 ตารางระยะห่างดาย 320 มิลลิเมตรเปรียบเทียบความหนาของท่อ.....70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สืบเนื่องจากในปัจจุบันมีการขยายตัวทางด้านอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ทำให้มีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสวนทางกับแหล่งพลังงานที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง มีผลให้ราคาของน้ำมันและก๊าซธรรมชาติมีมูลค่าสูงขึ้น ทำให้มีการขยายการขุดเจาะน้ำมันและก๊าซไปยังบริเวณที่มีแหล่งพลังงานสูงคือมหาสมุทรในระยะทางไกลและมีความลึกมาก ซึ่งมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนยิ่งขึ้น ส่งผลให้มีความต้องการใช้ท่อที่มีความหนาและมีความสามารถทนต่อแรงดันของน้ำในมหาสมุทร รวมถึงทนต่อการกัดกร่อน การออกแบบและการผลิตท่อจึงต้องให้ความสำคัญด้านคุณสมบัติและความแข็งแรงของท่อ

บริษัทแคนนาดอยล์ ไปป์ จำกัด เป็นบริษัทขนาดใหญ่ที่ผลิตและส่งออกท่อโลหะไปทั่วโลก ท่อที่ผลิตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 4 นิ้ว ถึง 170 นิ้ว ตามมาตรฐานการผลิตท่อต่างๆ เช่น API5L เป็นต้น ซึ่งมีศูนย์กลางการผลิตอยู่ในประเทศไทย โดยทางบริษัทมีกระบวนการขึ้นรูป 2 แบบที่ใช้ในการผลิตท่อคือกระบวนการขึ้นรูปท่อบาง เรียกว่า Three Rolls Bending (3RB) และกระบวนการขึ้นรูปท่อหนา เรียกว่า กระบวนการผลิตแบบ JCO ซึ่งในกระบวนการการผลิตท่อหนาสำหรับผลิตภัณฑ์ใหม่นั้น ทางบริษัทต้องนำแผ่นโลหะมาทำการขึ้นรูปโดยการลองผิดลองถูกหาค่าระยะกดที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ท่อที่มีขนาดตามความต้องการ ส่งผลให้เกิดการสิ้นเปลืองในด้านของระยะเวลาและค่าใช้จ่ายของวัสดุที่เสีย

โครงงานนี้ได้ศึกษาในส่วนของการขึ้นรูปแบบ JCO โดยจัดทำขึ้นเพื่อเสนอแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตของทางบริษัท โดยทำการจำลองกระบวนการขึ้นรูปท่อโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่าระยะกดก่อนการผลิตจริง โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความใกล้เคียงกับการทดลองจริงในระดับหนึ่ง ซึ่งคาดว่าการใช้วิธีระเบียบไฟไนต์เอลิมเนต์จะช่วยในออกแบบและจำลองชิ้นงานก่อนนำไปปฏิบัติจริงทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาที่ใช้ในการหาค่าระยะกดในการขึ้นรูปโดยการลองผิดลองถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย**

1.2.1 ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการหาค่าระยะกดและระยะห่างดายเพื่อลดต้นทุนการผลิตแทนการลองผิดลองถูก

1.2.2 ทดลองหาระยะกดและระยะห่างของดายเปรียบเทียบกับผลที่จำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

**1.3 สมมติฐานของการศึกษา**

1.3.1 แผ่นเหล็กที่ใช้มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Homogenous)

1.3.2 ขณะทำการขึ้นรูป แผ่นเหล็กโดนกดอย่างสม่ำเสมอ

1.3.3 เครื่อง JCO มีค่าความต้านทานแรงมากกว่าแผ่นเหล็กที่ใช้ขึ้นรูป จึงถือว่าส่วนประกอบของเครื่อง JCO ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างขณะขึ้นรูป

1.3.4 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ไม่เปลี่ยนแปลงตามความดันในระหว่างการขึ้นรูป

**1.4 ขอบเขตของการวิจัย**

1.4.1 ทำการศึกษาคุณสมบัติของแผ่นวัสดุที่ใช้

1.4.2 ทำการศึกษากระบวนการขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยวิธีต่างๆ

1.4.3 ทำการศึกษาพฤติกรรมของแผ่นวัสดุที่เกิดขึ้นจากการกดของดาย ด้วยการทดลอง วิธีทางทฤษฎีและทางด้านไฟไนต์อิลิเม้นต์

**1.5 ขั้นตอนการศึกษา**

1.5.1 ศึกษากระบวนการขึ้นรูปท่อด้วยเครื่อง JCO

1.5.2 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Ansys เพื่อใช้ในการจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.5.3 สร้างโมเดลเครื่องจักร JCO ในแบบจำลองในโปรแกรม

1.5.4 หาระยะกดที่เหมาะสมจากโมเดลที่ใช้ในการจำลองด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.5.5 นำผลที่ได้จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

1.5.6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิจัยและการทดลอง เพื่อวิเคราะห์การออกแบบดายเพื่อหาระยะชดเชยสำหรับขึ้นรูปท่อโลหะ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับการทดลอง ได้มีการศึกษาบทความและผลการวิจัยที่ผ่านมา เพื่อหาข้อมูลพื้นฐานของการศึกษางานวิจัย รวมทั้งใช้เป็นแนวทางเพื่อศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการขึ้นรูปท่อโลหะ ที่ใช้เหล็กเป็นวัสดุมีดังนี้

จากงานวิจัยของ Ying Gao , Qiang Li , Lechun Xiao (2009) ทำการจำลองกระบวนการขึ้นรูปแบบ JCO โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายรูปร่างสุดท้ายของท่อหลังจากการขึ้นรูปท่อมาตรฐาน API5L-X80 ความหนา 22 มิลลิเมตรและรัศมีภายนอก 1219 มิลลิเมตร โดยทำการวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไข Plane strain

เมื่อแรงกระทำจากภายนอกกำหนดให้มาถึงค่าที่แน่นอน วัสดุจะอยู่ในช่วงพลาสติก (Plastic state) ค่าความเค้นจะเท่ากับค่าความเค้น Von Mises

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_x)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\left(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2\right)} = \sigma_s \qquad (2.1)$$

ค่าคุณสมบัติของวัสดุสามารถหาได้จากการตอบสนองของความเค้นและความเครียด จากการทดสอบแรงดึง ซึ่งประกอบด้วย ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น(Young's Modulus) 260 GPa, อัตราส่วนปัวซอง(Poisson's ratio) 0.3, ความเค้นคราก(Yield Strength) 530 MPa, ความเค้นสูงสุด(Ultimate Strength) 719 MPa,

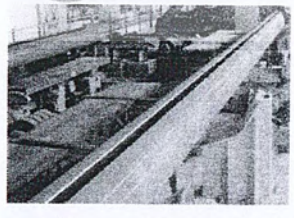
**รูปที่ 2.1** แสดงแบบจำลองของเครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจำลองด้วยการทำแบบ(Simulation) ได้ใช้ระยะในการกดของหัวกดในระยะต่างๆ ดังนี้คือ 20.7 mm (ระยะกดจากโรงงาน), 20.2mm, 19.7mm ซึ่งพบว่าระยะที่เหมาะสมที่สุดของระยะกดในการขึ้นรูปท่อคือ 19.7mm ตามที่แสดงในรูปที่ 2.2 และ รูปที่ 2.3

**รูปที่ 2.2** แสดงการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ **รูปที่ 2.3** แสดงรูปร่างสุดท้ายจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สรุปผลการวิจัยพบว่า จากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับท่อมาตรฐาน API5L-X80 ความหนา 22 มิลลิเมตร รัศมีภายนอก 1219 มิลลิเมตรคือ รูปร่างสุดท้ายของท่อมีผลโดยตรงจากระยะกดของหัวกดโดยได้ระยะกดที่เหมาะสมเท่ากับ 19.7 มิลลิเมตรและมีความสอดคล้องกับผลการทดลองชิ้นงานจริงเป็นอย่างมาก



**รูปที่ 2.4** แสดงรูปร่างสุดท้ายของท่อที่ผ่านการขึ้นรูป

จากงานวิจัยของ Ying Gao , Qiang Li , Lechun Xiao (2009) การวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการขึ้นรูปท่อขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของการขนส่งทางพลังงานและใช้กันอย่างกว้างขวางในการขนส่ง

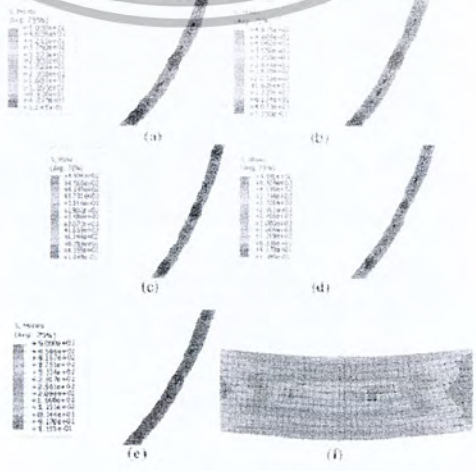
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันและก๊าซในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองเพื่อหาระยะกดของหัวกดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อให้ได้ท่อที่มีรูปร่างกลมตามต้องการ

สำหรับท่อขนาด X-70 เส้นผ่านศูนย์กลาง 508 มม. หนา 14.6 มม. ซึ่งผลกระทบบนรูปร่างสุดท้ายของท่อเนื่องจากระยะกด ระยะกดที่ใช้ในการกด คือ 35 มม. 34 มม.33 มม.32 มม.30 มม. ซึ่งถูกเลือกในการจำลองกระบวนการขึ้นรูปท่อ ภายใต้สภาวะ plane strain ซึ่งพบว่า รูปร่างสุดท้ายของท่อได้ระยะกดที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 30 มม. ผลจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงในรูปที่ 2.5

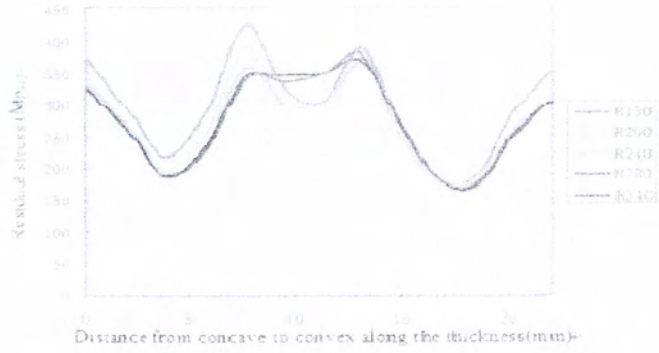
**รูปที่ 2.5** แสดงรูปร่างสุดท้ายของท่อของระยะกดต่างๆกัน

จากงานวิจัยของ Ying Gao, Lijuan Wang, Qiang Li (2010)ทำการจำลองประกวนการขึ้นรูปแบบ JCO โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเม้นต์ของท่อมาตรฐาน API5L-X80 ความหนา 22 มิลลิเมตร รัศมีภายนอก 1219 มิลลิเมตรเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีของหัวกดและการดีดกลับของแผ่นโลหะและทำการวิเคราะห์สนามความเค้น และรูปร่างหลังจากการขึ้นรูป



**รูปที่ 2.6** แสดงความเค้นตกค้างของหัวกดขนาดต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.7** แสดงการเปรียบเทียบความเค้นตกค้างของหัวกดขนาดต่างๆกัน

จากการทดลองพบว่า การเพิ่มรัศมีความโค้งของหัวกดจะทำให้พื้นที่ความเค้นและความเครียดขยายออกไปและบริเวณขอบตรงที่ไม่เสียรูปของสองจุดที่อยู่ใกล้กันลดลง และรัศมีความโค้งของหัวกดที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการดีดกลับลดลง และ รัศมีความโค้งของหัวกดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ท่อมีความกลมมากขึ้นในระยะห่างของการกดที่เท่ากัน

**รูปที่ 2.8** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีของหัวกดกับความกลมของท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

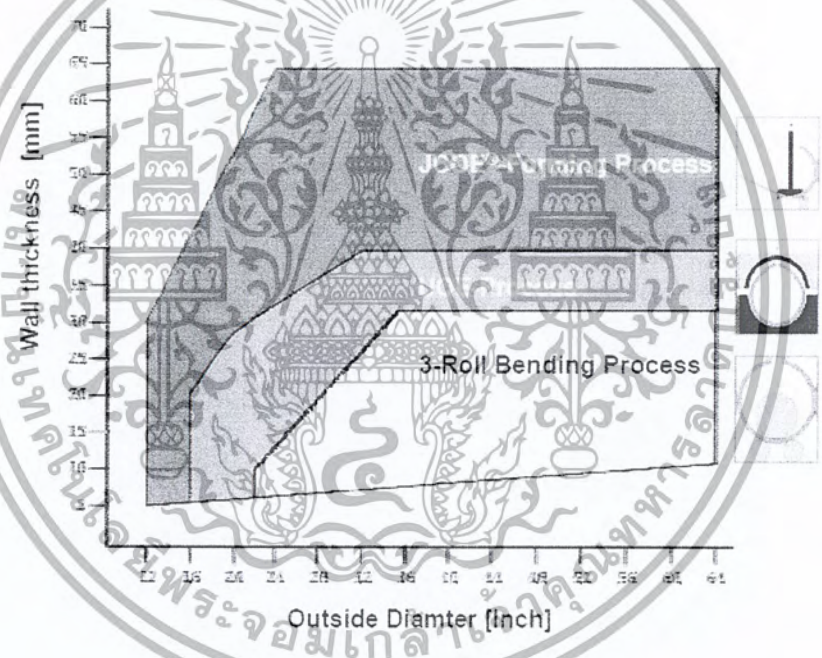
# บทที่ 3

# ทฤษฎีพื้นฐาน

## 3.1 กระบวนการขึ้นรูปท่อโลหะ

การขึ้นรูปท่อที่นิยมโดยทั่วไปมี 3 แบบ คือ

1. กระบวนการขึ้นรูปแบบ Three roll bending
2. กระบวนการขึ้นรูปแบบ UOE
3. กระบวนการขึ้นรูปแบบ JCO




รูปที่ 3.1 กระบวนการขึ้นรูปทั้ง 3 แบบ

### 3.1.1 กระบวนการขึ้นรูปท่อแบบ Three Roll Bending

แผ่นโลหะถูกขึ้นรูปเป็นท่อที่มีตะเข็บโดยการผ่านเครื่องหมุนดัดที่มีจุดรองรับทั้งบนและล่างของแผ่นโลหะรวมกัน 3 จุด ขอบของแผ่นโลหะจะยังไม่ได้ถูกดัดและยังคงตรงอยู่หลังจากการขึ้นรูปครั้งแรก ท่อจะถูกส่งไปยังเครื่องดัดขอบ ขณะที่ 2 ขอบตามแนวยาวของแผ่นโลหะถูกจีบโดยตัวดัดในกระบวนการต่อเนื่อง จากรูปที่ 3.1 จะพบว่า กระบวนการขึ้นรูปท่อแบบ Three Roll Bending จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

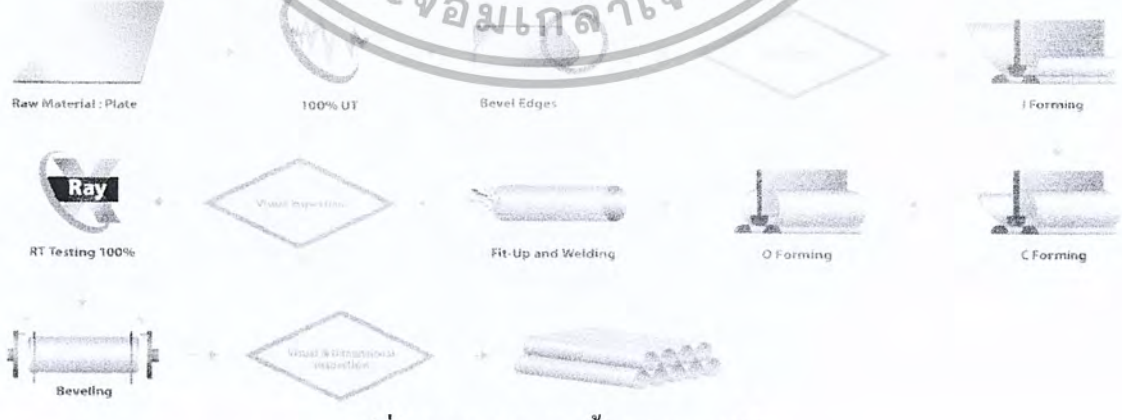
สามารถขึ้นรูปท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 มิลลิเมตร ถึง 62 มิลลิเมตร และความหนาของท่อไม่เกิน 30 มิลลิเมตร

**3.1.2 กระบวนการขึ้นรูปท่อแบบ UOE**

เริ่มจากการดัดแผ่นโลหะเป็นรูปตัว U ก่อนและขั้นตอนต่อมาคือ ดัดเป็นรูปตัว O และขั้นตอนสุดท้ายคือ การทำท่อให้กลมโดยใช้ตัวขยายทางกล จากรูปที่ 3.1 จะพบว่า กระบวนการขึ้นรูปท่อแบบ UOE จะสามารถขึ้นรูปท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ถึง 62 มิลลิเมตร และความหนาของท่อไม่เกิน 35 มิลลิเมตร วิธีนี้สามารถขึ้นรูปท่อที่ความหนามากกว่าการขึ้นรูปแบบ Three Roll Bending และให้ผลผลิตที่สูงที่สุด แต่ต้นทุนก็สูงด้วยเช่นกัน

**3.1.3 กระบวนการขึ้นรูปท่อแบบ JCO**

กระบวนการผลิตแบบ JCO/JCOE แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักคือ 1) การขึ้นรูป JCO 2) การเชื่อม และ 3) การขยายตัว โดยกระบวนการแรกเริ่มจากการดัดขอบแผ่นเหล็กด้วยเครื่อง pre-bend จากนั้นนำมาเข้าเครื่อง JCO โดยครึ่งหนึ่งของแผ่นเหล็กจะถูกดัดเป็นขั้นๆ โดยหัวกดของเครื่องจักรเคลื่อนที่ลงมากดทีละขั้นตอนจนเป็นรูปร่างตัว J และอีกครึ่งหนึ่งก็ถูกกระทำเหมือนกันจนได้เป็นรูปร่างตัว C และสุดท้ายหัวกดของเครื่องจะกดที่ตรงกลางแผ่นและได้รูปร่างตัว O หลังจากนั้นนำท่อไปเชื่อมที่ตะเข็บโดยใช้การเชื่อมแบบซับเมอร์ก ขั้นตอนสุดท้ายนำไปเข้าเครื่องขยายเพื่อทำท่อให้กลมตามขนาดที่ต้องการ จากรูปที่ 3.2 จะพบว่า กระบวนการขึ้นรูปท่อแบบ JCO จะสามารถขึ้นรูปท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ถึง 62 มิลลิเมตร และความหนาของท่อไม่เกิน 65 มิลลิเมตร วิธีนี้สามารถขึ้นรูปท่อที่ความหนามากกว่าการขึ้นรูปแบบ Three Roll Bending และ UOE




**รูปที่ 3.2** กระบวนการขึ้นรูปแบบเจซีโอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของกระวานการขึ้นรูปท่อแบบ JCO

1. มีความยืดหยุ่นสูง และสามารถผลิตท่อหนาขนาดเล็กที่มีความหนามากได้ดี

2. ใช้เวลาเปลี่ยนอุปกรณ์น้อย

3. อุปกรณ์มีราคาถูก

4. มีอายุการใช้งานสูง

5. ใช้งานง่าย

### 3.2 ความเค้น (Stress)

ความเค้น หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดค่านี้ จึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน การหาค่าความเค้นสามารถหาได้จากสมการดังนี้ คือ

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{3.1}$$

เมื่อ $\sigma$ = ความเค้น ( Stress ) มีหน่วยเป็นปาสกาล (Pa , 1 Pa = 1 $N/m^2$)
หรือ $kgf/mm^2$ หรือ psi ($lbf/m^2$)

F = แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น N หรือ kgf หรือ lbf

A = พื้นที่หน้าตัดขวางที่แรงกระทำ มีหน่วยเป็น $m^2$ หรือ $mm^2$ หรือ $in^2$

#### 3.2.1 รูปแบบและชนิดของความเค้นที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำ

3.2.1.1 ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress)

เกิดขึ้นเมื่อแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้ขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 3.3a

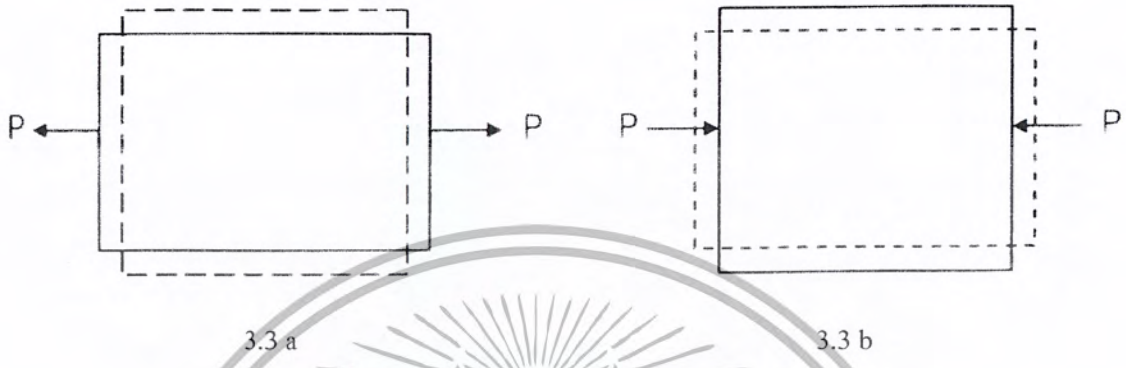
3.2.1.2 ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress)

เกิดขึ้นเมื่อมีแรงการกระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังรูปที่ 3.3b

3.2.1.3 ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress)

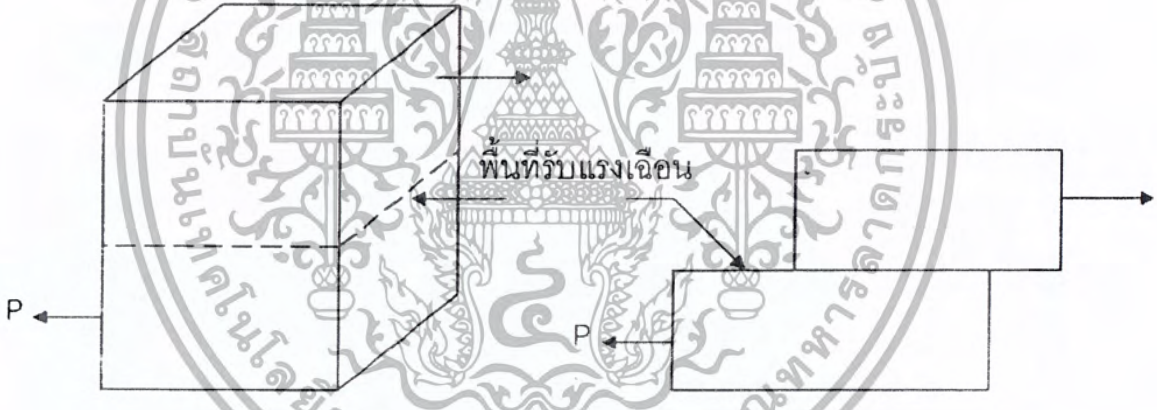
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้สัญลักษณ์ $\tau$ เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวางเพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังรูปที่ 3.4 มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง A ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน




3.3 a 3.3 b

**รูปที่ 3.3** แสดงลักษณะของแรงดึงและแรงกด




**รูปที่ 3.4** แสดงลักษณะของแรงเฉือน

### 3.3 ความเครียดและการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Stress and Deformation)

ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนแปลงของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1 การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป

การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวเนื่องจากผลของความเค้น จะเคลื่อนเข้ากับตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุยังคงรูปเดิมไว้ได้

### 3.3.2 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป

การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปแบบคงรูป ถึงแม้ว่าแรงที่กระทำต่อวัสดุนั้นจะหมดไปแล้วก็ตามวัสดุทุกชนิดจะมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทั้งสองแบบ ขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำกับความเค้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุนั้นๆ

การวัดและคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่สองลักษณะ แบบแรก คือ เส้นตรงความเครียดที่วัดได้ จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ดังรูปที่ 3.3a ค่าความเครียดจะเท่ากับความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเท่าเดิม ดังสมการ

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{Lo} \tag{3.2}$$

เมื่อ $\varepsilon$ = ความเครียดเชิงเส้น

$L_0$ = ความยาวเดิมของวัสดุที่สนใจ หรือ Gage Length

$\Delta L$ = ความยามที่เปลี่ยนไป $(L-L_0)$

แบบที่สอง คือ แบบเฉือน เรียกว่า ความเครียดเฉือน (Shear Strain) ใช้วัดความเครียดกรณีแรงที่กระทำมีลักษณะเป็นแรงเฉือน ($\tau$) ดังรูป 3.4 ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ ดังสมการ

$$\gamma = \frac{a}{h} \tag{3.3}$$

เมื่อ $\gamma$ = $\tan\theta \approx \theta$ (Radian ในกรณีที่เป็นมุมเล็ก)

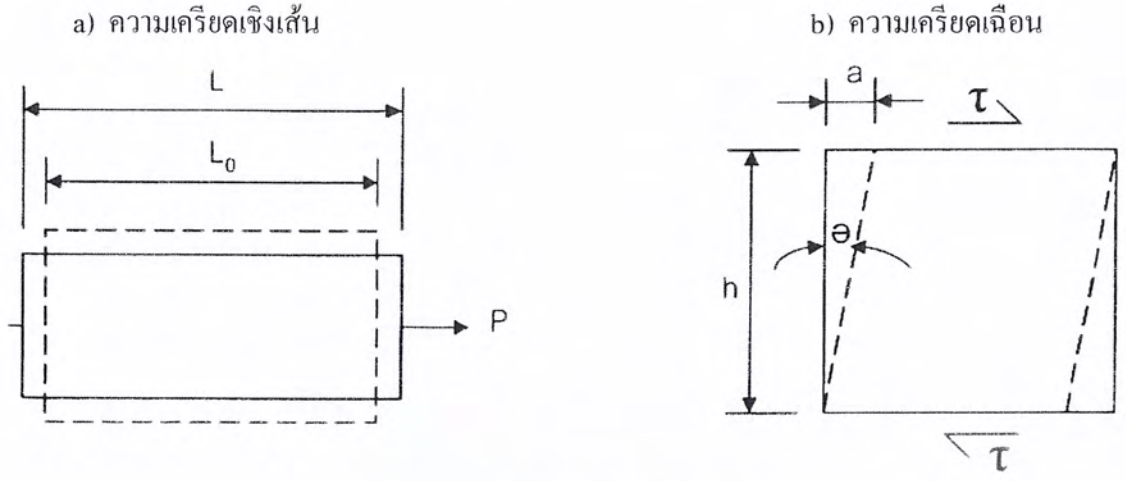
a = ระยะที่เคลื่อนที่ไป (Displacement)

h = ระยะห่างระหว่างระนาบ

$\theta$ = มุมที่เปลี่ยนไป

ค่าความเครียดทั้งสองแบบไม่มีหน่วย เพราะตัวตั้งและตัวหารมีหน่วยเป็นความยาวอยู่แล้ว

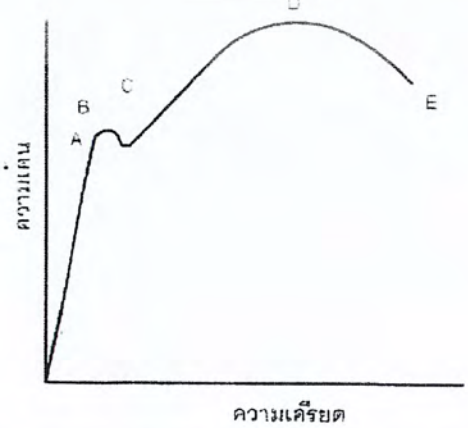
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.5** ลักษณะของความเครียด

### 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress – Strain Relationship)

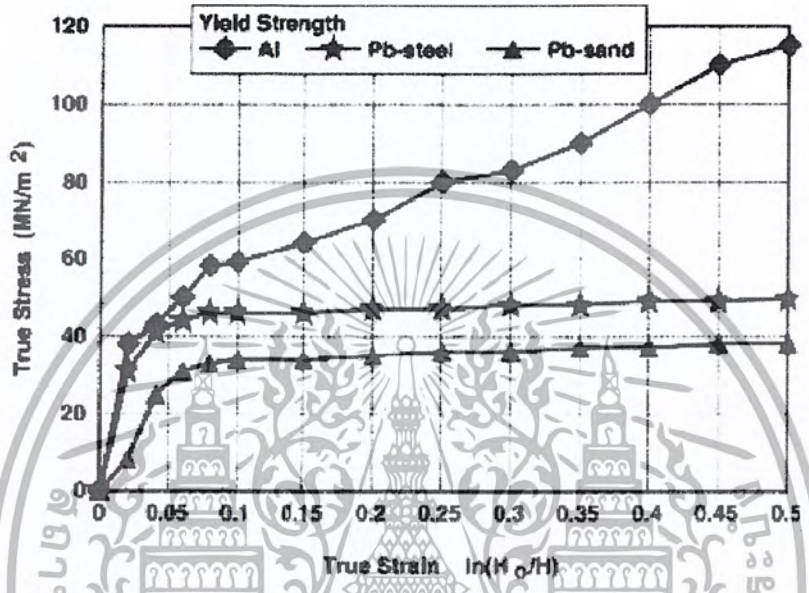
จากประการสำคัญอย่างหนึ่ง ของการออกแบบอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล รวมทั้งงานโครงสร้างต่างๆ ต้องคำนึงถึงค่า Stress และ Strain ของวัสดุที่ทำ เพราะค่าเหล่านี้มีผลต่อการทำให้เสียรูปวัสดุแบบคงรูปไปจากความต้องการมากน้อยอย่างไร และจะมีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุเป็นอย่างมาก จากการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด จากกราฟเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งกราฟดังกล่าวสามารถมาจากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก ซึ่งค่าความเค้นกับความเครียดที่ได้ในแต่ละช่วงนั้นเป็นผลมาจากการยืดตัวของวัสดุที่เกิดจากการทดสอบแรงดึง สามารถแสดงค่าให้เห็นได้ในรูปที่ 3.5 กราฟแสดงความเค้า-ความเครียดแบบมีจุดคลาก นอกจากนั้น ยังแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ ความเหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ด้วย




**รูปที่ 3.6** แสดงภาพความเค้น – ความเครียด (Stress – Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะนั้น เกี่ยวข้องโดยตรงกับการศึกษาสมบัติทางกลของโลหะ ซึ่งเป็นการศึกษาพฤติกรรมที่วัสดุแสดงออกมาเมื่อถูกแรงภายนอกมากระทำซึ่งสิ่งสำคัญที่สุดในการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะคือ การหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดโดยโลหะแต่ละชนิดก็จะมีความสัมพันธ์แตกต่างกันไป เช่นตะกั่วกับอลูมิเนียมจะมีกราฟความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันตามที่แสดงในรูป




**รูปที่** 3.7 การทดสอบหาความสัมพันธ์ระห่างความเค้นและความเครียดจากแรงกดของอลูมิเนียมและตะกั่ว

โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในอุดมคติ (Idealized stress-strain curve) ที่แสดงถึงพฤติกรรมต่างๆของโลหะสามารถแบ่งได้ออกเป็น 7 แบบ และแต่ละแบบมีสมการที่หาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังนี้

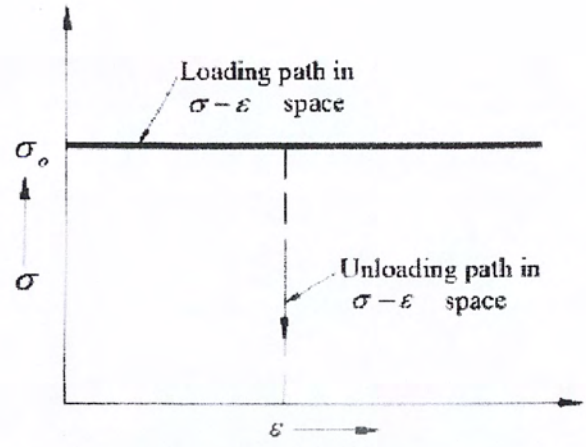
### 3.4.1 Rigid – Perfectly Plastic

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Rigid - Perfectly Plastic ซึ่งวัสดุอย่างนี้เมื่อถูกแรงกระทำก็จะเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรในทันที ตามที่แสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งมีสมการความสัมพันธ์คือ

$$\sigma = \sigma_0 \tag{3.4}$$

เมื่อ $\sigma_0$ = ความเค้นที่จุดคราก (Yield Stress)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.8** ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Rigid - Perfectly Plastic

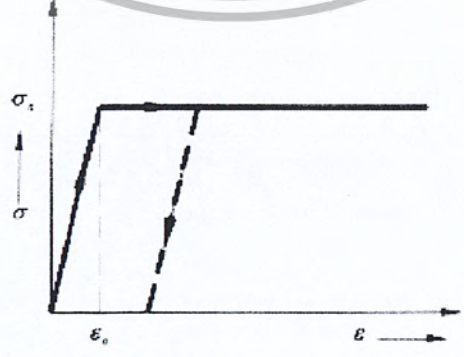
### 3.4.2 Elastic - Perfectly Plastic

โลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Elastic – Perfectly Plastic นั้นเป็นโลหะที่หากถูกแรงกระทำแล้วยังไม่ถึงจุดคราก จะสามารถคืนตัวได้ แต่เมื่อถูกกระทำเลยจุดครากแล้วโลหะนั้นจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่อไปแม้ไม่มีการเพิ่มแรงกระทำ ตามที่แสดงในรูป 3.9 และมีสมการความสัมพันธ์คือ

$$\sigma = E\varepsilon \quad ; \quad \sigma = 0 \text{ ถึง } \sigma_0 \tag{3.5}$$

$$\sigma = \sigma_0 \quad ; \quad \sigma \geq \sigma_0 \tag{3.6}$$

เมื่อ E = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)




**รูปที่ 3.9** ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Elastic - Perfectly Plastic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3 Rigid – Linearly Strain Hardening Plastic

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Rigid – Linearly Strain Hardening Plastic ตามที่แสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งพฤติกรรมของโลหะในช่วงหลังจุดครากนั้น หากต้องการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะต่อไปจะต้องเพิ่มแรงกระทำ ซึ่งพฤติกรรมแบบนี้เรียกว่า การทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain Hardening) มีสมการความสัมพันธ์คือ

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon \tag{3.7}$$

เมื่อ K = ค่าคงที่

**รูปที่ 3.10** ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Rigid – Lincarly Strain Hardening Plastic

### 3.4.4 Linear Elastic – Linearly Strain Hardening Plastic

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Linear Elastic – Linearly Strain Hardening Plastic ตามที่แสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่ง พฤติกรรมของโลหะก่อนจุดครากนั้นเป็นแบบเชิงเส้น และในช่วงหลังจากจุดครากก็เป็นการทำให้แข็งด้วยความเครียดแบบเชิงเส้น (Linearly Strain Hardening) เช่นกัน โดยมีความสมการสัมพันธ์คือ

$$\sigma = E\varepsilon \quad ; \quad 0 \leq \sigma \leq \sigma_0 \tag{3.8}$$

$$\sigma = \sigma_0 K\epsilon \quad ; \quad \sigma \geq \sigma_0 \tag{3.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ K = ค่าคงที่

**รูปที่ 3.11** ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Linear Elastic – Linearly Strain Hardening Plastic

### 3.4.5 Nonlinear Strain Hardening Plastic

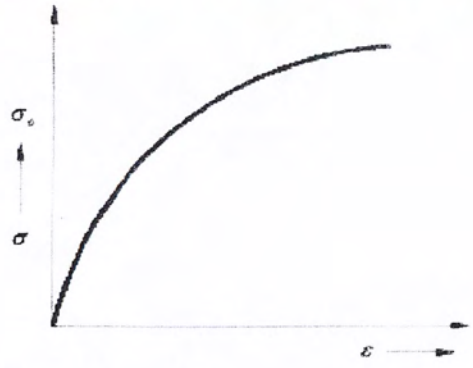
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Nonlinear Strain Hardening Plastic ตามที่แสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งพฤติกรรมของโลหะนั้นไม่แสดงจุดคราก ที่ชัดเจน โดยกราฟความสัมพันธ์มีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นตลอดเวลาที่มีแรงกระทำ สมการความสัมพันธ์แบบนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Hollomon – Ludwik Power Law เนื่องจากได้มาจากการทดลองของ Hollomon และ Ludwik ซึ่งมีสมการคือ

$$\sigma = K\varepsilon^{n} \quad ; \quad 0 < n < 1 \tag{3.10}$$

เมื่อ K และ n คือค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



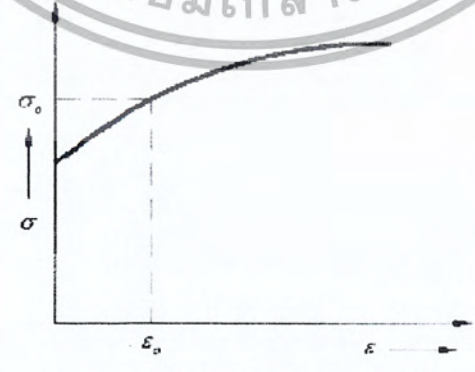

**รูปที่ 3.12** ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Nonlinear Strain Hardening Plastic

### 3.4.6 Rigid Nonlinear Strain Hardening Plastic

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Rigid Nonlinear Strain Hardening Plastic ตามที่แสดงในรูปที่ 3.13 โดยความสัมพันธ์เหล่านี้ไม่พิจารณาในช่วงอีลาสติก เนื่องจากมีช่วงที่แคบมาก เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงพลาสติกที่มีสมการคือ

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n \tag{3.11}$$

เมื่อ K และ n คือค่าคงที่




**รูปที่ 3.13** ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Rigid Nonlinear Strain Hardening Plastic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
119243

### 3.4.7 Linear Elastic – Nonlinear Strain Hardening Plastic

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Linear Elastic – Nonlinear Strain Hardening Plastic ตามที่แสดงในรูปที่ 3.14 โดยความสัมพันธ์แบบนี้ในช่วงอีลาสติกจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้น และในช่วงพลาสติกมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีสมการคือ

$$\sigma = E\varepsilon \quad ; \quad 0 \leq \sigma \leq \sigma_0 \tag{3.12}$$

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad ; \quad \sigma > \sigma_0 \ , \ 0 < n < 1 \tag{3.13}$$

เมื่อ K และ n คือค่าคงที่

**รูปที่ 3.14** ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Linear Elastic – Nonlinear Strain Hardening Plastic

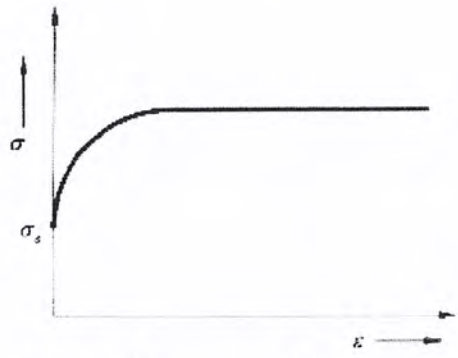
### 3.4.8 Elastic – Steady State Plastic

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Elastic – Steady State Plastic ตามที่แสดงในรูปที่ 3.15 โดยมีความสมการสัมพันธ์คือ

$$\sigma = \sigma_0 + C[1 - e^{Dc}]^n \tag{3.14}$$

เมื่อ C , D และ n คือค่าของโลหะแต่ละชนิดซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด (Strain rate) และอุณหภูมิของโลหะในขณะที่ถูกแรงกระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.15** ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Elastic – Steady State Plastic

## 3.5 ทฤษฎีการขึ้นรูปงานโลหะแผ่นโดยการดัดงอ (Forming)

ขบวนการในการขึ้นรูปโลหะทั้งหมดนั้นนับว่าขบวนการงอขึ้นรูป (Bending) เป็นขบวนการที่ง่ายที่สุดที่ใช้งานกับเครื่องปั๊มโลหะ ซึ่งขบวนการงอขึ้นรูปนี้อาจทดลองได้ โดยใช้เครื่องมือง่ายๆ ภายในบ้านทำก็ได้ ขบวนการงอขึ้นรูปนั้นเป็นขบวนการอันหนึ่งในหลายๆขบวนการของขบวนการขึ้นรูปโดยการดัดงอ ซึ่งขบวนการนี้จะถูกใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษาถึงสภาพของการขึ้นรูปชิ้นงาน ขบวนการขึ้นรูปโดยการดัดงอนั้นมีกรรมวิธีที่แตกต่างไปจากขบวนการตัดขึ้นรูป (Cutting) และขบวนการลากขึ้นรูป (Drowing) เป็นอย่างมาก

### 3.5.1 ทฤษฎีการงอ (Bending Theory)

ในการขึ้นรูปโลหะ โดยการงอขึ้นรูปนั้น เราต้องให้แรงแก่ชิ้นงาน ทั้งนี้เพื่อให้ชิ้นงานนั้นเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ซึ่งแรงที่ให้แก่ชิ้นงานนั้นจะต้องไม่ทำให้ความเค้นที่เกิดบนชิ้นงานมากกว่าความเค้าดึงสูงสุดของชิ้นงานนั้น และจะต้องไม่น้อยกว่าจุดยืดหยุ่นจำกัดของชิ้นงาน

เมื่อเราให้แรงแก่ชิ้นงานเพื่อการงอ จะปรากฏว่าความเค้นของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจะเริ่มจากจุดที่ต่ำกว่าความแข็งแรงสูงสุดของโลหะนั้น และความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นจะแผ่กระจายไปยังส่วนต่างๆ ของชิ้นงาน ซึ่งขณะที่แผ่กระจายนั้น ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานก็จะค่อยๆลดลงด้วยจนถึงบริเวณที่ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานเป็นศูนย์ ซึ่งลักษณะการเกิดความเค้นบนชิ้นงานแบบนี้จะทำให้เกิดการบิดงอของชิ้นงานมากกว่าจะเกิดการฉีกขาด สำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง อย่างถาวรของโลหะนั้น ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานจะต้องผ่านจุดยืดหยุ่นจำกัดและจุดล้าตัวด้วย การแสดงถึงการเกิดแรงที่ใช้ในการงอบนดายชนิดต่างๆกัน สำหรับวี-ดาย (V-die) นั้น เราจะพบว่ามีการแผ่ กระจายของแรงเกิดขึ้นมากที่สุด ส่วนยู-ดาย (U die) และ วิปปิ้ง-ดาย (Wiping-die) นั้น นิยมใช้ในการผลิตชิ้นงานมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแผ่กระจายของแรงเฉือนที่ใช้บนดาย สำหรับขบวนการตัดขึ้นรูปนั้น จะมีขนาดของการแผ่กระจายของแรงเท่ากับขนาดของช่องว่างระหว่างคมตัดของดายที่ได้ตั้งเอาไว้ ตามปกติจะมีค่าประมาณ 10 % ของความหนาของชิ้นงาน สำหรับการแผ่กระจายของแรงที่ใช้ในการงอนั้น จะมีขนาดของการแผ่กระจายบนชิ้นงานในการงอนั้นมากกว่าแรงเฉือน ซึ่งขนาดของการแผ่กระจายบนชิ้นงานในการงอนั้นจะมีขนาดเท่ากับความหนาของชิ้นงานบวกกับรัศมีของพันช์และรัศมีของดาย

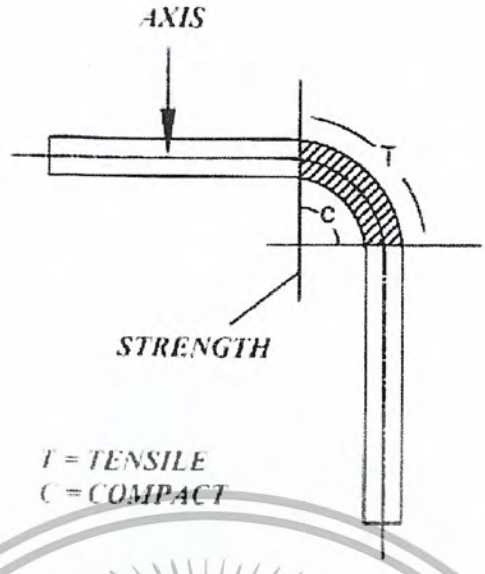
การงอ (Bending) นั้น มีลักษณะความแตกต่างของการเกิดความเค้นของโลหะเฉพาะที่เท่านั้น ความเค้นที่เกิดเฉพาะที่นี้จะเกิดขึ้นตรงรัศมีของการงอของชิ้นงานเท่านั้น ส่วนพื้นที่ของชิ้นงานส่วนที่เหลือนั้น จะไม่มีความเค้นเกิดขึ้นเลย การแสดงพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ได้ผ่านขบวนการงอมาแล้ว ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานนั้นเราจะสังเกตได้ดังนี้ โลหะที่อยู่วงนอกของรัศมีการงอจะยืดออก แสดงให้เห็นว่ามีความเค้นดึงเกิดขึ้น ส่วนโลหะที่อยู่ด้านในของรัศมีการงอจะหดตัวเข้า แสดงให้เห็นว่ามีความเค้นอัดเกิดขึ้น ดังนั้นถ้ามีการฉีกขาดปรากฏขึ้นระหว่างการงอ มันจะเกิดขึ้นที่ส่วนนอกของการงอ แต่ถ้ามีรอยย่น มันจะเกิดขึ้นที่ด้านในของการงอ

**3.5.2 แกนสะเทิน (Neutral Axis)**

ทั้งนี้เพราะว่าชิ้นงานนั้นได้เกิดความเค้นดึงที่ด้านหนึ่ง และอีกด้านหนึ่งนั้นได้เกิดความเค้าอัดขึ้น การกลับตรงข้ามของความเค้นทั้งสองนี้จะต้องเกิดขึ้นตรงบริเวณใกล้ๆเส้นแกนกลางของความหนาของชิ้นงาน ความเค้นดึงและความเค้นอัดจะเกิดขึ้นมากที่สุด ตรงบริเวณด้านของนอกทั้งสองข้ามของความหนาของชิ้นงาน และความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งสองนี้จะค่อยๆลดลงเมื่อระยะห่างเข้ามาใกล้กับเส้นแกนกลางของความหนาของชิ้นงาน และความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งสองนี้จะค่อยๆ ลดลงๆ เมื่อระยะห่างเข้ามาใกล้กับเส้นแกนกลางของความหนาของชิ้นงาน ซึ่งเส้นแกนกลางของความหนาหรือบริเวณใกล้ๆ เส้นแกนกลางของความหนาจะมีความเค้นเป็นศูนย์ คือ ไม่เกิดความเค้นขึ้นเลย เส้นที่ไม่มีความเค้นเกิดขึ้นเลย เราเรียกว่า "แกนสะเทิน" (Neutral Axis)

ก่อนที่จะมีการงอของชิ้นงานนั้นขนาดความยาวที่แท้จริงของชิ้นงานได้ถูกกำหนดไว้แน่นอนแล้ว ดังนั้นความยาวของแกนสะเทินที่เกิดจากการงอชิ้นงานนั้นจะเท่ากับความยาวเดิมของชิ้นงาน ส่วนความยาวด้านนอกรัศมีการงอจะมีความยาวเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันความยาวด้านในรัศมีการงอจะมีความยาวที่แท้จริงของชิ้นงาน เพื่อทำการงอได้อย่างไร ซึ่งขนาดที่แท้จริงของชิ้นงานก่อนที่จะนำมางอนั้น ก็จะหาได้จากแกนสะเทินของชิ้นงานหลังจากงอแล้วนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูป 3.16** ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ของการงอ

เมื่อเราทำการงอชิ้นงานครั้งแรกแกนสะเทินจะเกิดขึ้นใกล้เส้นแบ่งครึ่งความหนาของชิ้นงาน แต่เมื่อเราทำการงอต่อไปแกนสะเทินจะเลื่อนเข้ามาทางด้านในหรือด้านที่เกิดการอัดตัว (Compression) ซึ่งมักจะเป็นเช่นนี้เสมอ ยิ่งถ้าเป็นการงอชิ้นงานที่มีความหนามากๆด้วยแล้ว สำหรับการวัดระยะของแกนสะเทินนั้น จะวัดจากผิวด้านในของรัศมีการงอ หรือด้านที่เกิดการอัดตัวออกไปหาแกนสะเทิน การงอชิ้นงานบางๆจะมีพื้นที่ในการงอ (Bending area) น้อย ซึ่งเมื่อทำการงอแล้ว ผิวด้านนอกรัศมีของการงอจะให้ขนาดที่ไม่ถูกต้อง แต่พื้นผิวด้านในของการงอซึ่งถูกอัดติดกับขอบรัศมีของดายน์จะให้ขนาดที่ถูกต้อง ดังนั้นในการออกแบบดายน์เราจะต้องระวังเรื่องนี้ด้วย

เมื่อทำการงอโลหะแผ่น ระยะของแกนสะเทินจะอยู่ห่างจากด้านที่เกิดการอัดตัวเป็นระยะประมาณ 4/10 เท่าของความหนาของชิ้นงาน

ลักษณะการเกิดของแกนสะเทิน มีดังต่อไปนี้

- ถ้าความหนาของโลหะแผ่นคงที่ ขณะที่รัศมีการงอลดลง แกนสะเทินจะเลื่อนตัวมาอยู่ด้านที่เกิดการอัดตัว

- ถ้ารัศมีของการงอคงที่ ขณะที่ความหนาของโลหะแผ่นเพิ่มขึ้น แกนสะเทินจะเลื่อนตัวมาทางด้านที่เกิดการอัดตัว

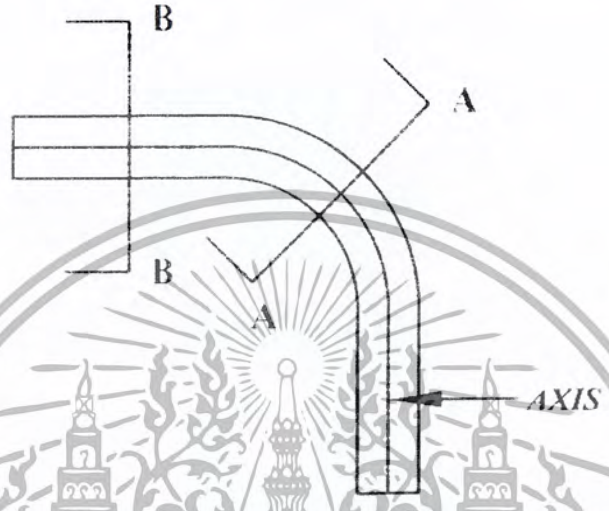
- ถ้ารัศมีของการงอและความหนาของโลหะแผ่นคงที่ ขณะที่มุมของการงอได้เพิ่มขึ้น แกนสะเทินจะเลื่อนตัวมาทางด้านที่เกิดการอัดตัว

- ถ้าไม่มีความเค้นเกิดขึ้นบนชิ้นงาน แกนสะเทินจะอยู่ตรงกลางของความหนาของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.5.3 การไหลตัวของโลหะในการขึ้นรูป (Metal Flow)**

เพราะว่าโลหะบริเวณที่เรางอนั้นมีความเค้นเกิดขึ้น ซึ่งมันจะทำให้เกิดการลื่นไหลตัวของโลหะ ความเค้นดึงที่ทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะจะไปทำให้ความหนาของชิ้นงานในบริเวณที่งอมีขนาดลดลง ส่วนความเค้นอัดที่ทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะจะไปเพิ่มขนาดความกว้างของชิ้นงานให้เพิ่มขึ้น ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.17 จากรูป เป็นการแสดงถึงการบิดงอของแท่งโลหะเมื่อได้รับการงอ




**รูปที่ 3.17** การไหลของโลหะและการบิดงอ

เมื่อเรางอแท่งโลหะ จะทำให้เกิดการบิดงอทางพื้นที่หน้าตัดอย่างมาก แต่ถ้าเป็นการบิดงอโลหะแผ่น การเกิดการบิดงอนี้เกือบจะไม่มีเลย จากรูปที่ 3.17 จะเห็นได้ว่า เมื่อแท่งโลหะได้ถูกงอความเค้นอัดจะทำให้ความกว้างของชิ้นงานบริเวณที่ทำการงอเพิ่มขึ้น 3.2 มม. ซึ่งการไหลตัวของโลหะ เราจะเห็นได้ชัดก็ต่อเมื่อความหนาและความกว้างของชิ้นงานเกือบจะเท่ากัน แต่ในโลหะแผ่นนั้นจะไม่เป็นไปดังที่กล่าวไว้ ทั้งนี้เพราะว่าความกว้างมากกว่าความหนาของของชิ้นงานหลายเท่า ความกว้างที่มากกว่านี้จะต้านทานการเพิ่มตัวของโลหะที่เกิดขึ้นจากแรงอัด เมื่อมันไม่สามารถจะเพิ่มทางด้านการอัดตัวได้ ความเค้นอัดก็จะไปเพิ่มทางด้านการดึงตัว ซึ่งอยู่ตรงข้ามกัน ซึ่งการที่มันเพิ่มทางด้านการดึงตัวนี้ จะทำให้ความหนาของชิ้นงานเกือบจะไม่เปลี่ยนแปลง ลักษณะของการไหลตัวของโลหะระหว่างการขึ้นรูปโดยการดัดงอ มีดังต่อไปนี้

ถ้าแท่งโลหะได้ถูกนำมางอ จะทำให้เกิดการบิดงอทางพื้นที่หน้าตัดอย่างมาก และจะมีการไหลตัวของโลหะทำให้ความหนาของแท่งโลหะลดลงเล็กน้อย แต่จะไปเพิ่มทางด้านความกว้างมากขึ้น

ถ้าแท่งโลหะได้ถูกนำมางอ จะมีการงอทางพื้นที่หน้าตัดเล็กน้อย แต่ความหนาจะลดลงอย่างมาก และไม่มีการเพิ่มตัวขึ้นทางความกว้างเลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเรางอโลหะแผ่น โอกาสที่จะเกิดการฉีกขาดมีมาก ทั้งนี้เพราะว่าการมีอัตราความกว้างมากต่อความหนาที่น้อย ส่วนรอยย่นที่ปรากฏขึ้นเสมอเมื่อเรางอโลหะแผ่นหรือแท่งโลหะอย่างแรง ทั้งนี้เพราะว่าอัตราความกว้างน้อยต่อความหนามากจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเพิ่มทางด้านอักตัวมากขึ้น

ขนาดของการไหลตัวของโลหะซึ่งมีความสัมพันธ์กับสิ่งต่างๆ คือ

- เมื่อรัศมีของการงอ (Bend of radius) ยาวขึ้น จะทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะน้อย
- โลหะที่บางกว่าจะเกิดการไหลตัวของโลหะน้อยกว่า
- มุมของการงอ (Degree of bend) แคบ จะทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะน้อย
- ถ้าเป็นการงอช่วงแคบ (Norrow bend) จะทำให้มีการไหลตัวของโลหะเนื่องจาดแรงดึงมีน้อย แต่การไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงอัดมีมาก
- ถ้าเป็นการงอช่วงกว้าง (Wide bend) จะทำให้มีการไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงดึงมีมาก แต่การไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงอัดมีน้อย
- ถ้าเป็นโลหะที่แข็ง จะทำให้มีการไหลตัวของโลหะทางด้านการดึงตัวมาก และทางด้านนี้ก็มีโอกาสที่จะฉีกขาดได้ง่าย
- ถ้าเป็นโลหะที่อ่อน จะทำให้มีการไหลตัวของโลหะทางด้านการอัดตัวมากและทางด้านนี้ก็มีโอกาสที่จะเกิดรอยย่นได้ง่าย

### 3.5.4 การเคลื่อนไหวของโลหะระหว่างการขึ้นรูป (Metal Movement)

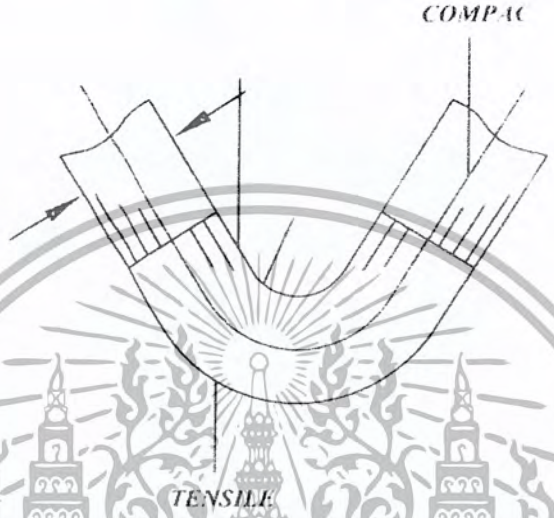
ระหว่างการทำการงอชิ้นงานนั้น พื้นที่ส่วนของแผ่นชิ้นงาน (Blank) ได้ถูกยึดเอาไว้ด้วยแผ่นโลหะที่เราเรียกว่า "แผ่นโลหะกด" พื้นที่ส่วนที่เหลือของชิ้นงานจะเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงย่อมแล้วแต่รูปร่างที่เราต้องการ ชิ้นงานจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ขึ้นหรือลงด้วยพั้นซ์ ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างเข้าไปในดายน์ การที่ชิ้นงานเคลื่อนตัว (Movement) ผ่านช่องว่างนี้เรียกว่า "การเหวี่ยงตัวของชิ้นงาน" (Swing) และลักษณะการเกิดอาการเช่นนี้ เราจะพบเสมอในการงอชิ้นงานในดายน์เท่านั้น ซึ่งลักษณะการเคลื่อนไหวของโลหะนั้น มักจะไม่ปรากฏในขบวนการกดขึ้นรูป (Embossing) ยืดขึ้นรูป (Stretching) และลากขึ้นรูป (Drawing)

### 3.5.5 การดีดกลับตัวของชิ้นงาน

เมื่อได้ทำการงอชิ้นงานแล้ว จะมีความเค้นเกิดขึ้นในบริเวณที่ทำการงอ และความเค้นที่เกิดขึ้นนี้ จะมีความแตกต่างกันคือไม่เหมือนกันทุกจุด ซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดการดีดตัวกลับของชิ้นงาน ความเค้นดึงจะเกิดขึ้นมากที่สุดที่ผิวด้านนอกของการงอ และจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะของชิ้นงานเข้าใกล้ศูนย์กลางของความหนา ซึ่งความเค้นที่เกิดขึ้นนี้จะกลายเป็นศูนย์ที่แกนสะเทิน จากรูปที่ 3.18 เป็นการแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความเค้นดึงและความเค้นอักในบริเวณที่มีการงอ จากรูปจะเห็นได้ว่าที่จุด O นั้น ความเค้นดึงจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจุดนี้จะอยู่บนแกนสะเทิน และค่าความเค้นจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุด x ที่ผิวด้านนอกของชิ้นงาน ที่จุด x นี้จะมีค่าความเค้นดึงเกิดขึ้นมากที่สุด ในการวิเคราะห์หาความเค้นที่เกิดขึ้นในการงอชิ้นงาน เราจะใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นตัวแสดง ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถ้าเป็นการออกแบบงานที่ดีแล้ว ความเค้นที่เกิดขึ้นที่จุด x จะต้องมีค่าต่ำกว่าความแข็งแรงทางดึงสูงสุดของชิ้นงานนั้น ถ้ามีค่ามากกว่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ชิ้นงานจะเกิดการฉีกขาดได้ระหว่างที่มีการงอ




**รูปที่ 3.18** การเปลี่ยนรูปแบบของความเค้นในการงอโลหะ

จากรูปที่ 3.18 เราจะเห็นได้ว่า ตรงบริเวณส่วนที่ใกล้กับแกนสะเทินนั้นจะมีความเค้นที่เกิดขึ้นต่ำกว่าจุดยืดหยุ่นจำกัด สำหรับโลหะส่วนนี้นั้นได้ถูกแสดงด้วยแถบเล็กๆ ที่เรียกว่า "แถบยืดหยุ่นจำกัด" แถบเล็กนี้จะอยู่ทั้งสองข้างของแกนสะเทิน สำหรับโลหะที่ห่างไปจากแถบกลางของชิ้นงานจะมีความเค้นเกิดขึ้นมากกว่าจุดความแข็งล้ำตัวของชิ้นงานนั้น และที่บริเวณนี้จะมีเปลี่ยนแปลงของโลหะอย่างถาวร เมื่อเราทำการงอชิ้นงานในขณะที่ดึงเอาพั้นซ์ออกไปนั้น ส่วนที่เป็นแถบยืดหยุ่นเล็กๆ ก็จะยายามดึงตัวกลับเข้าอยู่ในตำแหน่งเดิม แต่ก็ไม่สามารถจะดึงตัวกลับคืนได้หมด เพราะว่ามีการต้านทานของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงของโลหะอย่างถาวร ดังนั้นจึงมีการดีดกลับเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การที่โลหะดีดตัวกลับนี้เรียกว่า "Springback" การที่โลหะต้องดีดกลับก็เพราะว่าต้องการให้อยู่ภาวะสมดุลนั่นเอง สำหรับส่วนที่เป็นแถบยืดหยุ่นเล็กๆ นั้นจะเป็นตัวทำให้เกิดแรงของการดีดกลับรอบจุด O ดังที่แสดงไว้แล้ว ซึ่งตามความจริงแล้ว ในช่วงของการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรของโลหะ (Plastic deformation) ก็ยังคงมีส่วนที่เป็นความยืดหยุ่นปนอยู่เล็กน้อย ซึ่งส่วนนี้จะไปเพิ่มแรงในการดีดกลับให้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.5.6 ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณค่า Springback**

ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณได้มาจากบทความของ Tseng ซึ่งสมการที่ใช้เป็นการวิเคราะห์ว่าการเสียรูปในเชิงพลาสติก Elastic-Perfectly plastic การขึ้นรูปโลหะด้วยการพับขึ้นรูป เมื่อให้โหลดกับวัสดุ ($M_{fb}$) วัสดุจะเกิดการงอตัวความเค้นจะเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ หลังจากวัสดุไม่ได้รับโหลด ($M_{unload}$) วัสดุจะเกิดการงอตัวเกิดขึ้น แต่มุมที่เกิดขึ้นไม่เท่ากับมุมที่เกิดจากการรับโหลด เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เพราะวัสดุเกิดการ Springback ($K_s$) จากรูปที่ 3.19 แสดงรูปร่างระหว่างวัสดุที่ได้รับโหลดกับวัสดุที่ไม่มีโหลด

$$Ks = \frac{\alpha - \Delta\alpha}{\alpha} \tag{3.4}$$

โดยที่

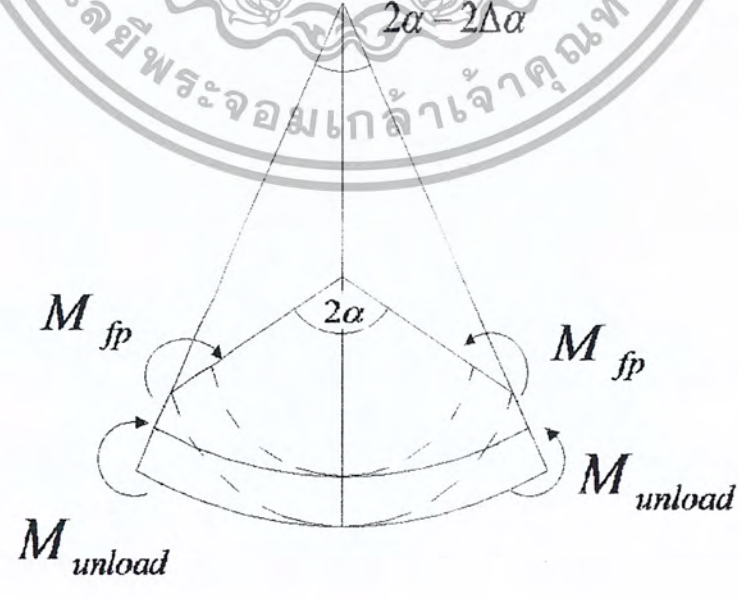
$$Ks = 1 - \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \tag{3.5}$$

เมื่อ Ks = ค่าการเกิด Springback

$2\alpha$ = ค่ามุมการพับขณะมีโหลด

$\Delta\alpha$ = ค่ามุมที่ได้จากการพับ

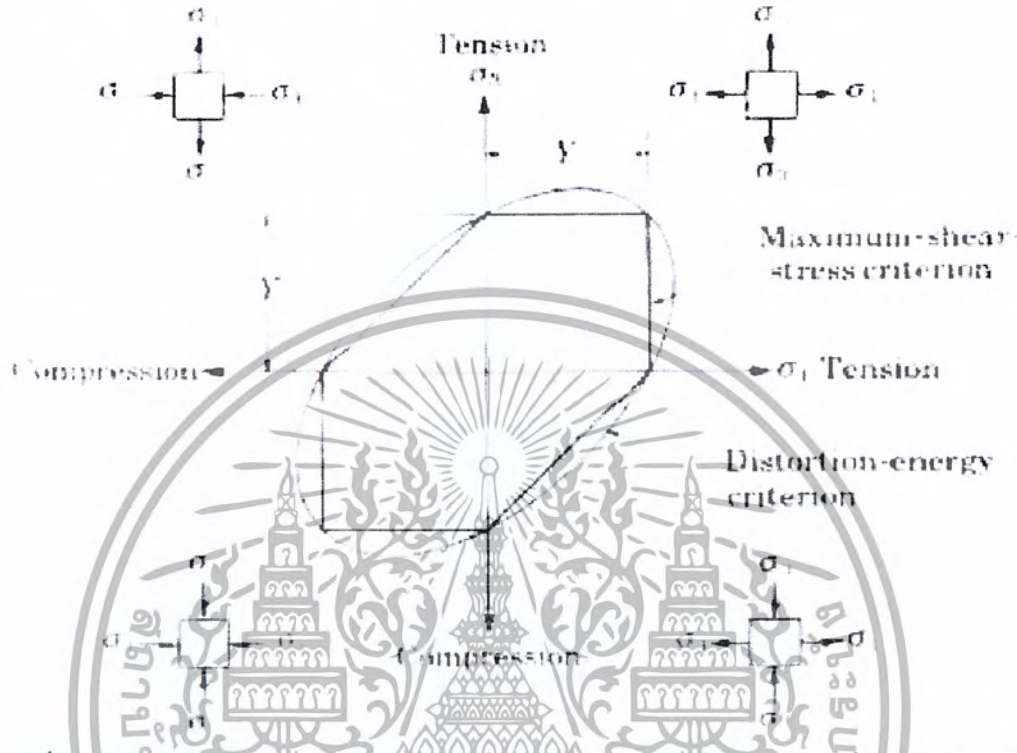
จากการพยายามที่จะกลับสู่สภาพปกติ ความเค้นตกค้างส่งผลให้วัสดุเกิดการดีดกลับมาบางส่วน ความแตกต่างของครึ่งของมุมการงอที่เกิดจากการ Springback; $\Delta\alpha$




**รูปที่ 3.19** แสดงปรากฏการณ์เกิด Springback

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการข้างต้นสามารถอธิบายที่มาโดยการสันนิษฐานให้พฤติกรรมของวัสดุเป็นแบบ Isotopic จากสภาวะการทดสอบการพับและการอัดแรงตึงผิว หรือความตึงเครียดที่เกิดจากการโค้งงอของวัสดุ ไม่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้านความกว้างของวัสดุ $\sigma$




**รูปที่ 3.20** แสดง Diagrams maximum-shear-stress และ กฎเกณฑ์ของการเปลี่ยนรูปพลังงาน

จากกฎเกณฑ์ของสภาวะความตึงเครียด ($\sigma 2 = 0$) สามารถแสดงให้เห็นจากรูปที่ 3.20 ดังนั้น $\sigma 2 > 0$ $\sigma 3 > 0$ และ $\sigma 2$ จะมีค่าเป็น 0 ตลอดเวลาจากความตึงเครียดในแนวราบ เพราะฉะนั้น

$\sigma max = Y$

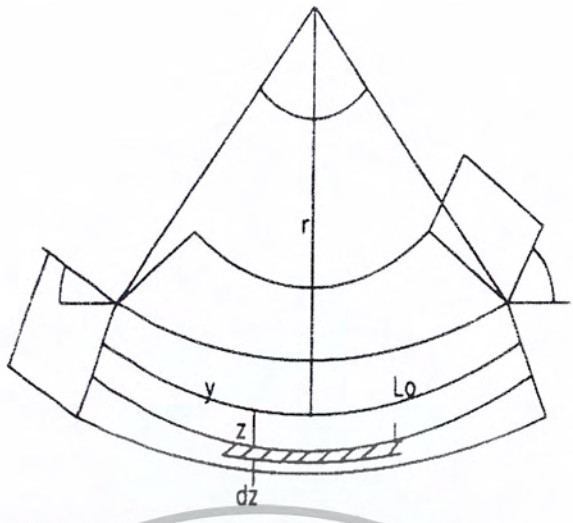
โดยที่ $\sigma_0 = Y'$ (3.6)

เมื่อ Y' = ค่า Yield Stress ที่แนวระนาบ จากสมการ

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} Y' = 1.15 Y_0 \quad (3.7)$$

กำหนดให้ $Y_0$ คือ Yield stress ในแนวแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.21** แสดงพิกัดสำหรับการวิเคราะห์ระบบการงอ

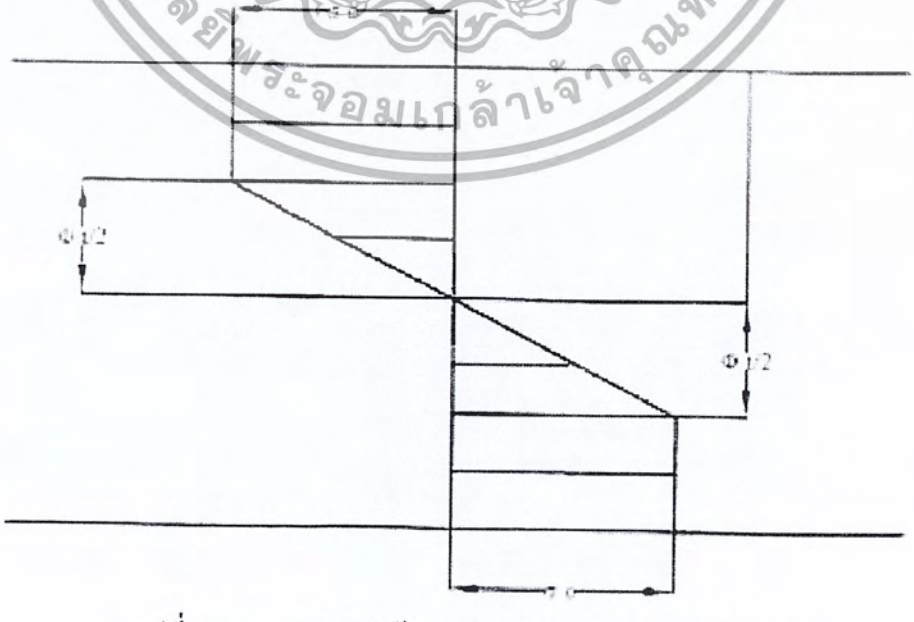
จากการวิเคราะห์รูปที่ 3.21 ความเค้น $\sigma$ ความเครียด $\varepsilon$ ในกระบวนการพับ จนกระจายไปตามแกน Z การวิเคราะห์ค่าของ Elastic – Perfect plastic ของวัสดุ $M_p$ สามารถหาได้จากสมการรูปที่ 3.16

$$\sigma_0 = \left\{ \frac{zE/[r(1-V^2)]}{\sigma_0} \right\} \tag{3.8}$$

$$0 \leq |z| \leq \phi t/2 \leq |z| \leq t/2$$

เมื่อ ค่า E คือค่า Young's modulus

V คือค่า Poisson ratio



**รูปที่ 3.22** แสดงความเค้นกระจายช่วง Elastic และ Plastic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการโค้งงอก่อให้เกิดปัจจัยสำคัญที่สามารถ คำนวณสมการได้ดังนี้

$$M_{jp} = (\sigma_0)\frac{t^2}{4} - \sigma_0^3\left[\frac{(1-v^2)\left(r_p+\frac{t}{2}\right)}{E}\right]^2/3 \quad (3.9)$$

โดยที่ $r = r_p + \frac{t}{2}$

$r_p$ = รัศมีของ punch

จากข้อสรุป ความแตกต่างระหว่างการกระทำที่มี $M_{fp}$ และไม่มี $M_{unload}$ จากรูป 3.19 ค่าความแตกต่างของ Springback ที่ได้รับความเค้นที่เกิดขึ้น

$$\Delta\varepsilon = \frac{z}{r} - \frac{z}{r'} \quad (3.10)$$

เงื่อนไขความเค้นแนวระนาบภายหลังการให้โหลด $\sigma_y = \frac{\Delta\varepsilon E}{(1-v^2)}$

เมื่อ r ได้จากความเครียดสุดท้ายหรือหลังจากการเกิด Springback หรือความเครียดที่เกิดหลังจากการปลดโหลด เพราะฉะนั้น

$$M_{unload} = \frac{2E}{(1-v^2)\int_0^{t/2}\Delta\varepsilon z dz}$$

$$= \frac{Et^3(1/r-1/r^t)}{[12(1-v^2)]} \quad (3.11)$$

เนื่องด้วยการเคลื่อนตัวของชิ้นทดสอบในสภาวะที่ไม่มีโหลด ผลของโมเมนต์มีค่าเป็นศูนย์

$$M_{fp} - M_{unload} = 0$$

$$M_{fp} - M_{unload} = Et^3(1/r - 1/r')/[12(1-v^2)]$$

หรือ

$$1/r - 1/r' = 12(1-v^2)M_{fp}/(Et^3) \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.19 องศาการพับ $2\alpha$ และองศาที่ได้หลังจากการพับ(Springback) $2\alpha - 2\Delta\alpha$ แรงที่เกิดขึ้นหลังจากการปล่อยโหลดออกเป็นการเกิด Springback ฉะนั้น Ks หาได้จาก

$$Ks = (\alpha - \Delta\alpha)/\alpha = r/r' = 1 - r(1/r - 1/r') \quad (3.13)$$

จากสมการ 3.12 แทนที่ในสมการ 3.13 โดยที่ $r = r_p + \frac{t}{2}$

$$Ks = 1 - \frac{12(1-v^2)(rp/t+12)M_{fp}}{Et^3} \quad (3.14)$$

ฉะนั้น แทนสมการ 3.16 ในสมการ 3.22

$$Ks = 1 - 3(1-v^2)\left(\frac{rp}{t} + \frac{1}{2}\right)\left(\frac{\sigma_2}{E}\right) + 4[(1-v^2)(r_p/t + 1/2)(\sigma_0/E)]^3 \quad (3.15)$$

จากสมการที่ 3.23 ถ้า $t << r_p$ ให้ V = 0.366 และ $Y_0 = 0.866\,\sigma_0$ สามารถปรับปรุงสมการได้ดังนี้

$$Ks = 1 - 3(r_p Y_0)/(E/t) + 4[(r_p Y_0)/(Et)]^3 \quad (3.16)$$

**3.6 การคำนวณหาค่าความผิดพลาดความกลม**

ในการวิจัยขึ้นรูปท่อขนาด 660 มิลลิเมตร หนา 37 มิลลิเมตร ยาว 6 เมตร ค่าความผิดพลาดความกลมวัดได้จากค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ซึ่งหาได้จากสมการ 3.17

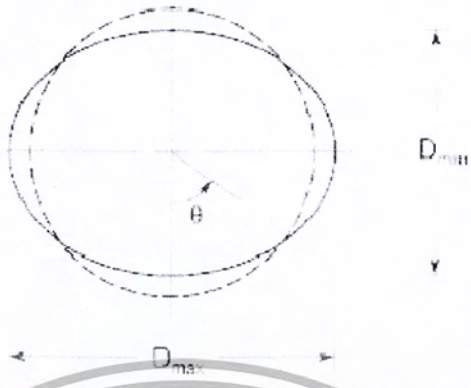
$$\text{Initial Ovality} = \frac{\text{Dmax-Dmin}}{\text{Dmax}-\text{Dmin}} \quad (3.17)$$

$D_{max}$ = เส้นผ่านศูนย์กลางที่มีค่ามากที่สุด

$D_{mim}$ = เส้นผ่านศูนย์กลางที่มีค่าน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีค่ามากที่สุด และ เส้นผ่านศูนย์กลางที่มีค่าน้อยที่สุด คือค่าที่วัดได้จาก รูปที่ 3.23




**รูปที่ 3.23** แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีค่ามากที่สุด และ เส้นผ่านศูนย์กลางที่มีค่าน้อยที่สุด

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4

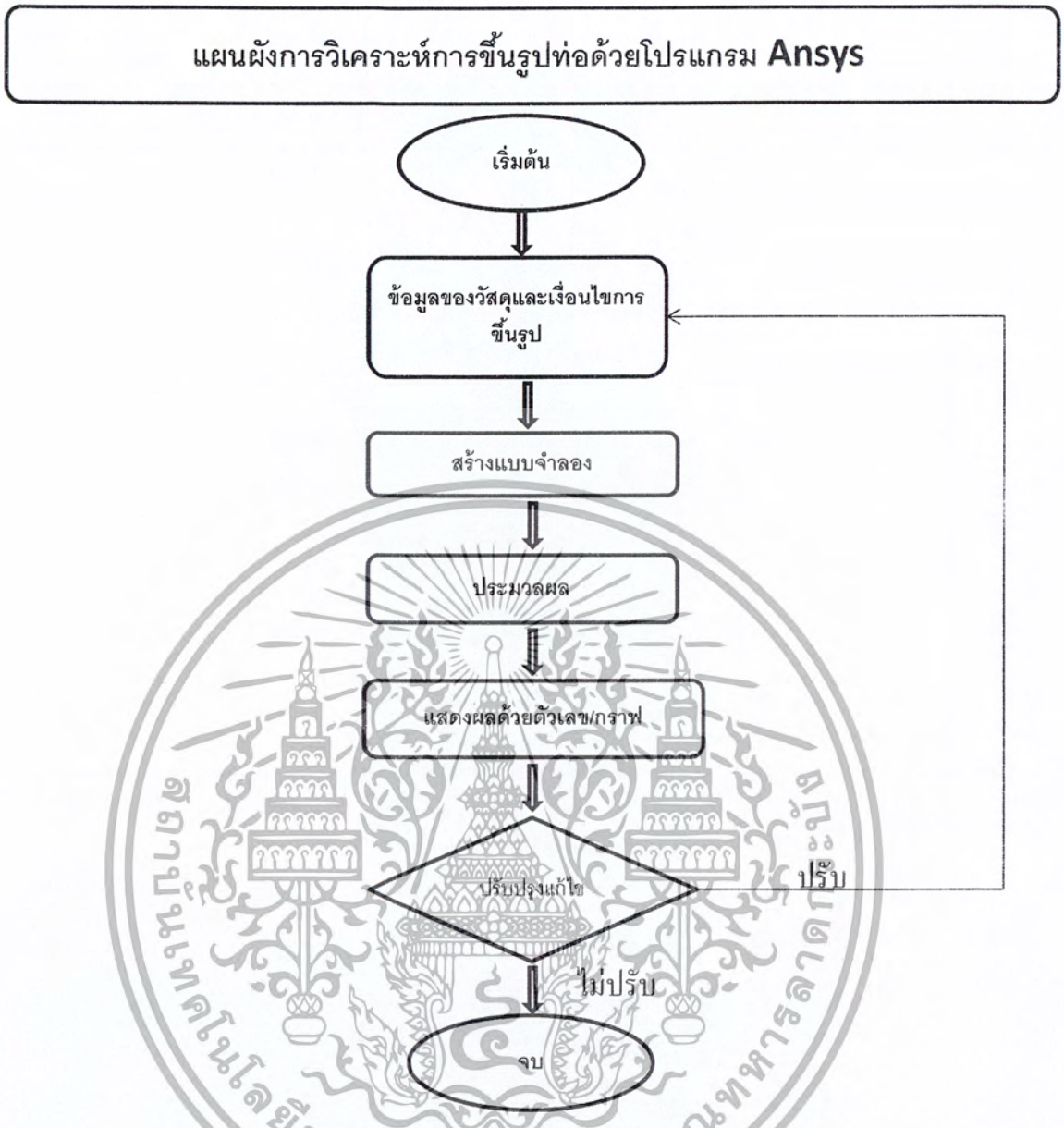
## การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การศึกษาและวิจัยการขึ้นรูปท่อด้วยวิธีเจซีโอ(JCO) ในครั้งนี้ ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Ansys 11 โดยแผนการวิเคราะห์การขึ้นรูปท่อด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะทำการวิเคราะห์ตัวแปรที่กำหนด โดยการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมครั้งนี้ไม่คิดผลกระทบของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป นอกจากได้ทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แล้วได้มีการทดลองเปรียบเทียบด้วย เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากทั้งสองวิธีนี้ ว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งได้พิจารณาควบคุมตัวแปรที่มีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นเหล็ก ที่ผ่านกระบวนการกดจากปลายด้านนอกเข้าสู่กึ่งกลางของแผ่นเหล็ก ซึ่งมีดาย (Dies) เป็นตัวรองรับโดยมีตัวแปรที่พิจารณาดังนี้คือ ระยะกดของหัวกด ระยะห่างของดาย (Dies)

### 4.1 การหาผลวิเคราะห์การขึ้นรูปท่อด้วยโปรแกรม

การหาผลวิเคราะห์การขึ้นรูปท่อด้วยโปรแกรม Ansys เริ่มต้นจากกำหนดข้อมูลของวัสดุและเงื่อนไขในการขึ้นรูป ลำดับต่อมาคือการสร้างแบบจำลองของเครื่องเจซีโอ (JCO) เมื่อสร้างแบบจำลองแล้ว จึงสั่งให้โปรแกรมเริ่มทำการคำนวณและประมวลผล โดยผลลัพธ์ของการคำนวณที่ต้องการคือ ระยะของหัวกดที่จะทำให้รูปร่างสุดท้ายของชิ้นงานกลมตามที่ต้องการจากกระบวนการขึ้นรูป แล้วนำรูปร่างสุดท้ายจากการคำนวณมาวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางไม่ได้ผลตามที่ต้องการ ต้องนำมาปรับหาระยะกดอีกครั้งจนกว่ารูปร่างสุดท้ายของการคำนวณมีค่าตามที่ต้องการจึงถือว่าการคำนวณของโปรแกรมสิ้นสุด แผนผังการวิเคราะห์การขึ้นรูปท่อด้วยโปรแกรมแสดงในรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

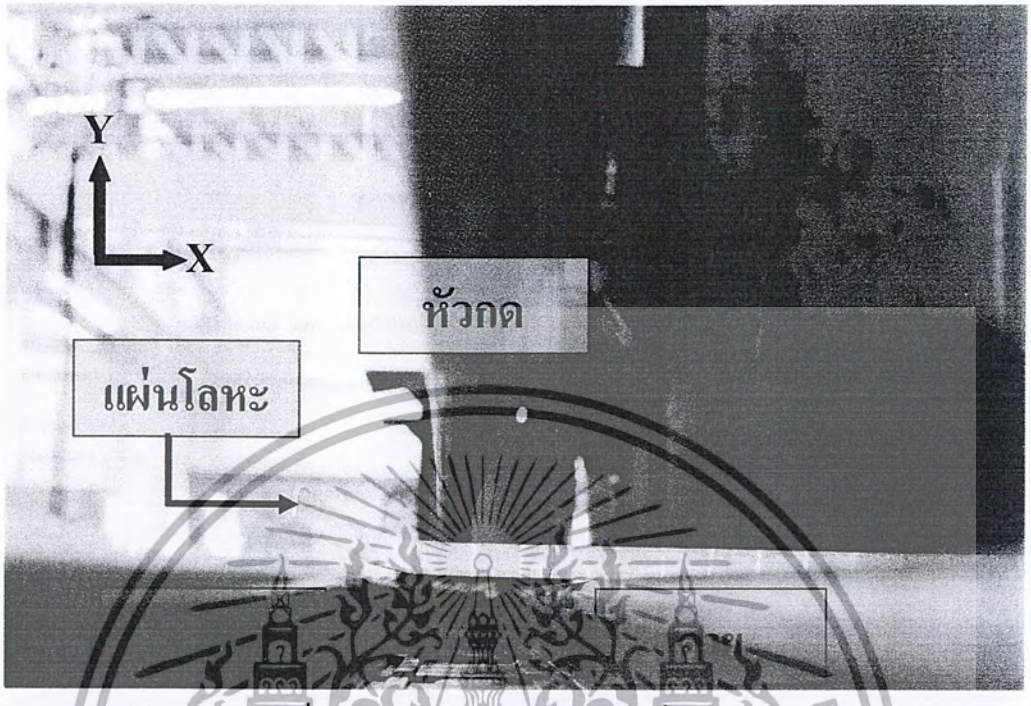



รูปที่ 4.1 แผนผังการวิเคราะห์การขึ้นรูปท่อ

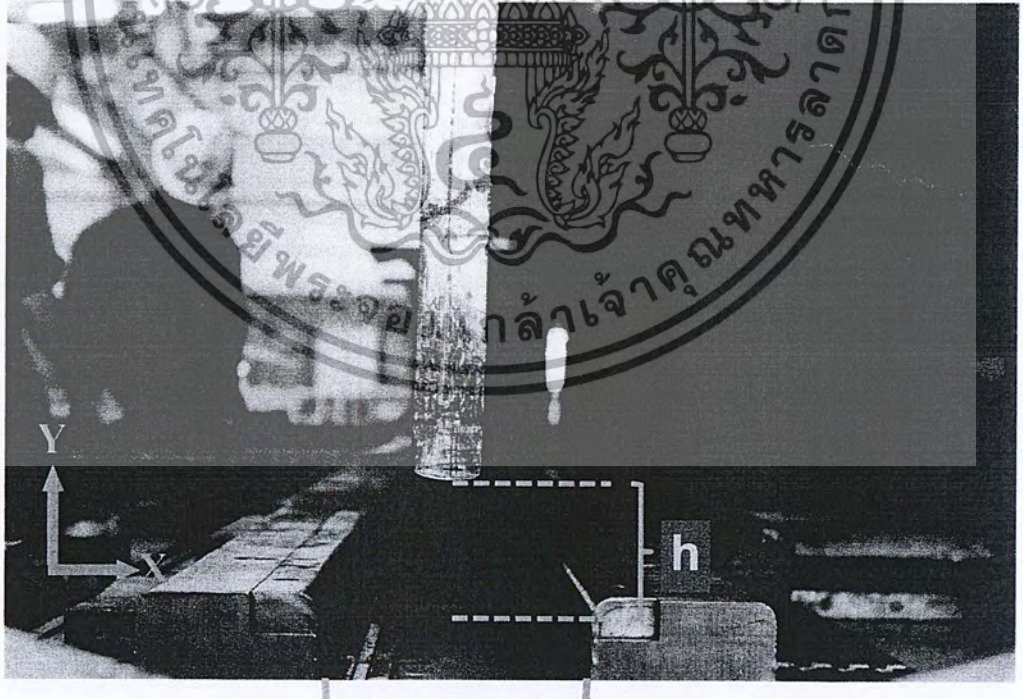
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 แบบจำลองการขึ้นรูปที่ใช้ในการศึกษา

### 4.2.1 การขึ้นรูปจริง




**รูปที่ 4.2** แสดงส่วนประกอบของเครื่อง JCO




**รูปที่ 4.3** แสดงระยะกดและระยะห่างดาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบของเครื่องจักร JCO

1. หัวกด (Blade)

2. แผ่นโลหะ (Plate)

3. ดาย (Die)

ขั้นตอนการขึ้นรูปในกระบวนการจริง

1. ตั้งระยะห่างดายเท่ากับ 240 มิลลิเมตรดังที่แสดงในรูป 4.3

2. นำแผ่นโลหะวางดังที่แสดงในรูป 4.2

3. หัวกดจะเคลื่อนที่ลงตามแนวแกน Y ระยะกดที่ใช้เท่ากับ 27 มิลลิเมตร(โดยวัดตั้งแต่หัวกดเริ่มสัมผัสแผ่นโลหะ)

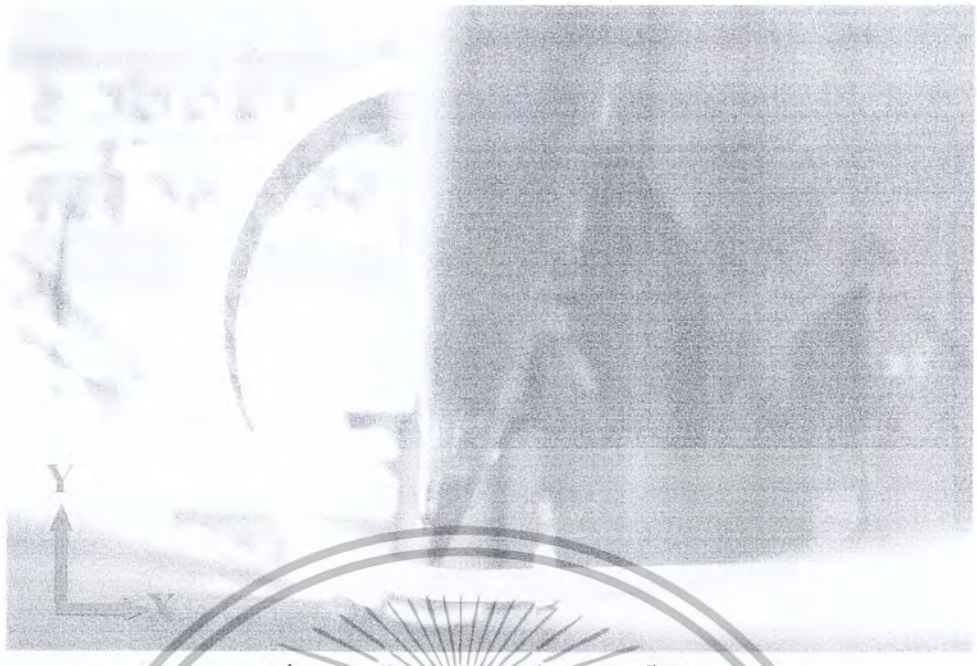
4. หัวกดจะค้างอยู่เป็นเวลา 6 วินาที แล้วเคลื่อนที่ขึ้นตามแนวแกน Y จนสุด

5. การกดครั้งที่ 2 แผ่นโลหะจะเคลื่อนที่ตามแนวแกน X ไปทางขวามือของรูปที่ 4.2 เป็นระยะทางเท่ากับ 55 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.4

**รูปที่ 4.4** แสดงการเลื่อนแผ่นโลหะเพื่อกดครั้งที่ 2

1. ทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 2 ถึง ขั้นตอนที่ 5 อีกครั้ง จนกดครบทั้งหมด 14 ครั้ง แผ่นเหล็กจะกลายเป็นลักษณะของตัว J ดังที่แสดงในรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.5** แสดงภาพหลังจากการกดครั้งที่ 14

2. หลังจากการกดครั้งที่ 14 จะทำการหมุนแผ่นโลหะเพื่อทำการขึ้นรูปอีกด้านของแผ่นโลหะดัง แสดงในรูปที่ 4.6

**รูปที่ 4.6** แสดงภาพหลังจากการหมุนแผ่นโลหะ

3. ทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 2 ถึง ขั้นตอนที่ 5 อีกครั้ง จนกดครบทั้งหมดอีก 14 ครั้ง แผ่นเหล็กจะ กลายเป็นลักษณะของตัว C ดังที่แสดงในรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

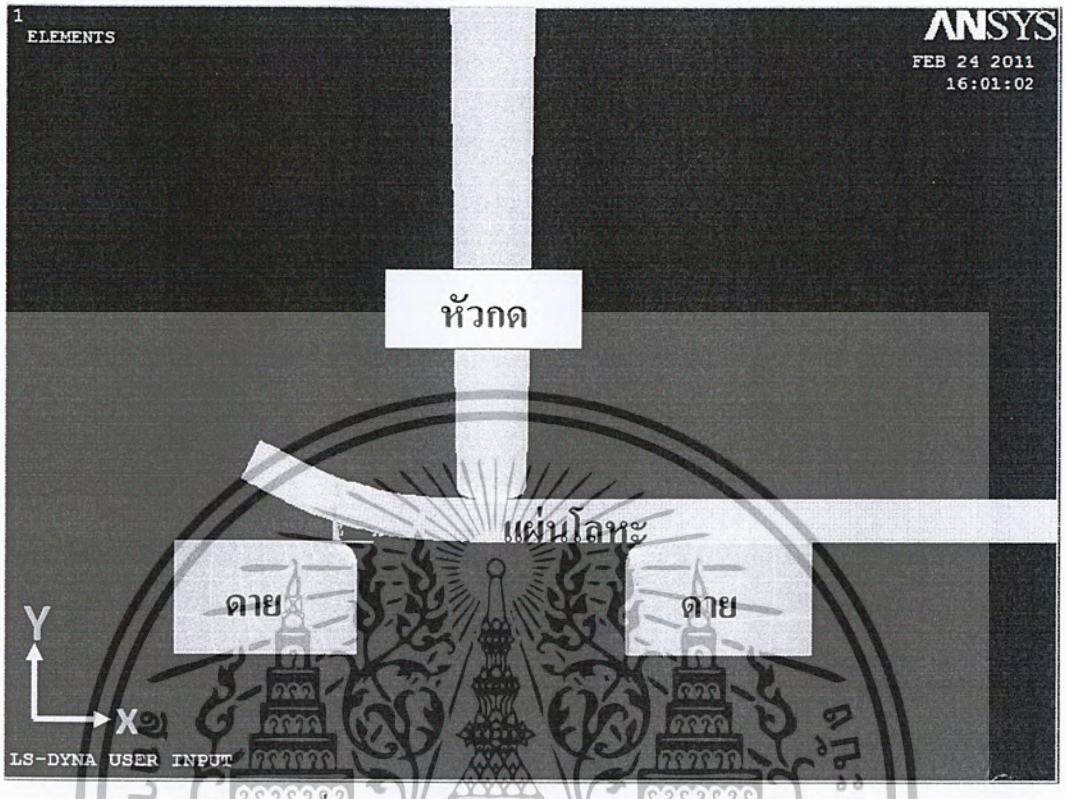
**รูปที่ 4.7** แสดงภาพหลังจากการกดครั้งที่ 14

4. หลังจากกดทั้งหมด 28 ครั้ง จนกลายเป็นรูป ตัว C แล้ว ทำการกดครั้งสุดท้ายกึ่งกลางของท่อ เพื่อให้ท่อกลายเป็นรูปตัว O ดังที่แสดงในรูป 4.8

**รูปที่ 4.8** แสดงภาพหลังจากการกดครั้งสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.2 การขึ้นรูปโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์




รูปที่ 4.9 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 4.9 ประกอบด้วย

1. หัวกด (Blade)

- หัวกดมีค่าความต้านทานแรงมากกว่าแผ่นโลหะที่ใช้ในการขึ้นรูป จึงถือว่าเป็นวัตถุแข็งเกร็(Rigid Body) ไม่เกิดการเปลี่ยนรูปในขณะขึ้นรูป

- ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานไม่เปลี่ยนแปลงตามความดันในขณะขึ้นรูป คือ มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพียงค่าเดียวตลอดการขึ้นรูป ในที่นี้กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.5

2. แผ่นโลหะ (Plate)

- เป็นวัสดุที่มีการเสียรูปได้ (Deformable body)

- คุณสมบัติของแผ่นโลหะเป็นแบบ Bilinear strain hardening ดังรูปที่ 4.9

- ทำการวิเคราะห์แบบ Explicit dynamic ภายใต้เงื่อนไข Plane strain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการจำลองการขึ้นรูปขอบแผ่นโลหะตามมาตรฐาน API5L X65 เพื่อผลิตท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 660 มิลลิเมตร หนา 37 มิลลิเมตร กว้าง 1958 มิลลิเมตร

- คุณสมบัติทางกลของแผ่นโลหะเป็นดังตารางที่ 4.1

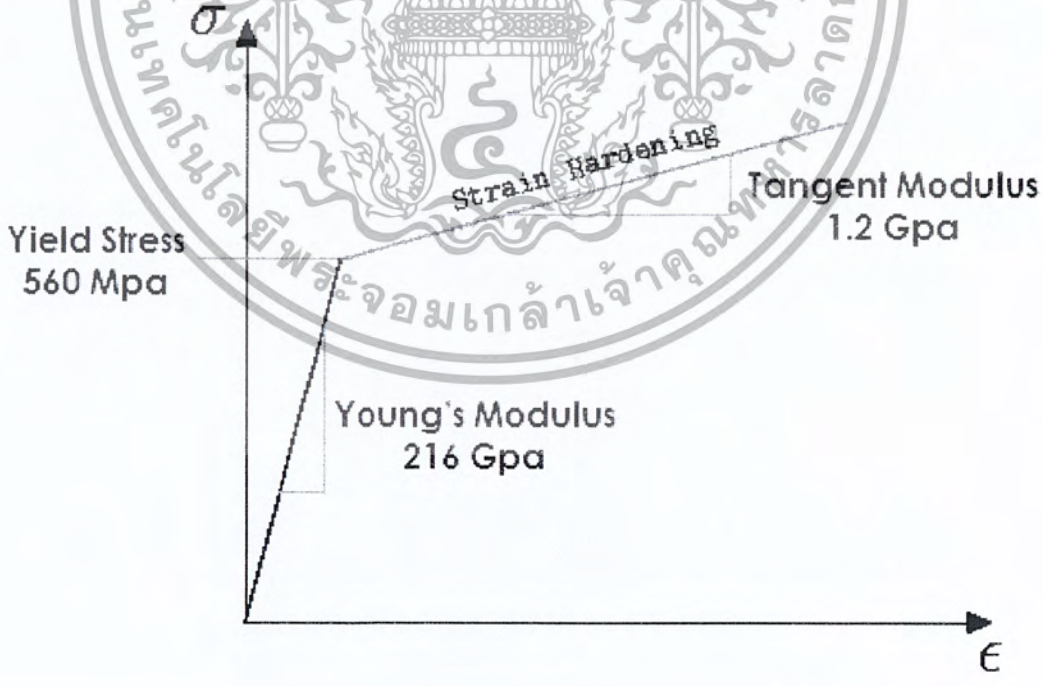
| Young's Modulus | Poisson's Ratio | Yield Stress | Tangent modulus |
|---|---|---|---|
| 216 GPa | 0.27 | 560 Mpa | 1.2 Gpa |

**ตารางที่ 4.1** แสดงตารางค่าคุณสมบัติวัสดุ

3. ดาย (Die)

- หัวกดมีค่าความต้านทานแรงมากกว่าแผ่นโลหะที่ใช้ในการขึ้นรูป จึงถือว่าเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) ไม่เกิดการเปลี่ยนรูปในขณะขึ้นรูป

- ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานไม่เปลี่ยนแปลงตามความดันในขณะขึ้นรูป คือ มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพียงค่าเดียวตลอดการขึ้นรูป ในที่นี้กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.5




**รูปที่ 4.10** แสดงคุณสมบัติของแผ่นโลหะแบบ Bilinear strain hardening

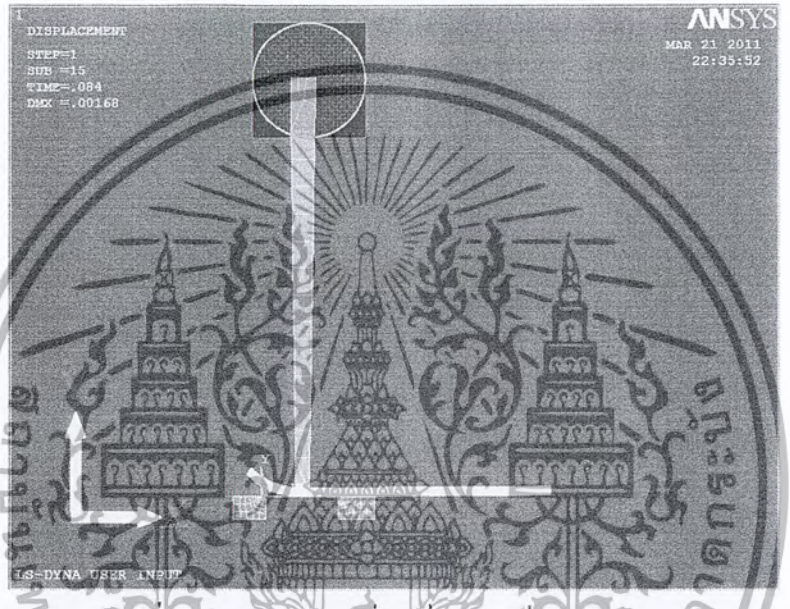
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขที่ใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

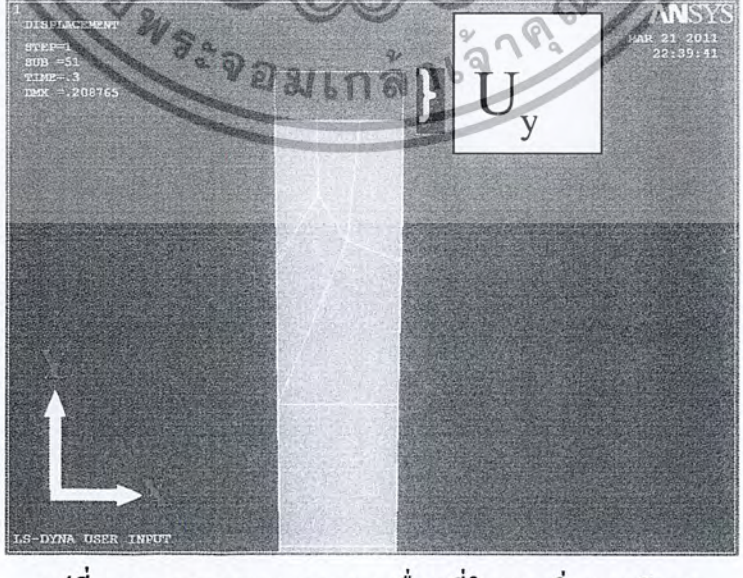
1. สภาวะขอบ (Boundary Condition)

(1) หัวกด (Blade)

ในขณะการดัดขึ้นรูปกำหนดให้หัวกดเคลื่อนที่ได้เฉพาะแนวดิ่งเป็นระยะ $U_y$ แต่ $U_x = 0$, $\theta_z = 0$ และให้มีการเคลื่อนที่ในแนวราบในขณะเครื่องจักรเคลื่อนที่ตามระยะเลื่อน $U_x$ แต่ $U_y = 0$, $\theta_z = 0$ แสดงดังรูปที่ 4.11




**รูปที่ 4.11** แสดงการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของหัวกด

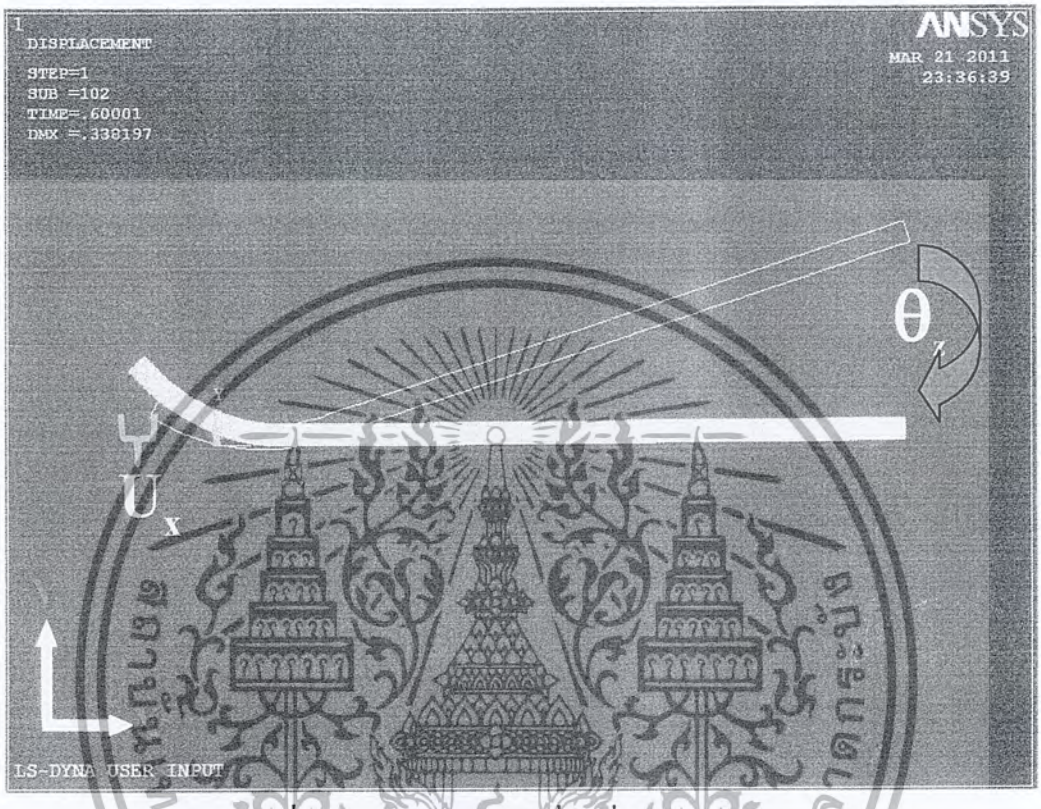



**รูปที่ 4.12** แสดงภาพขยายการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของหัวกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) แผ่นเหล็ก (Plate)

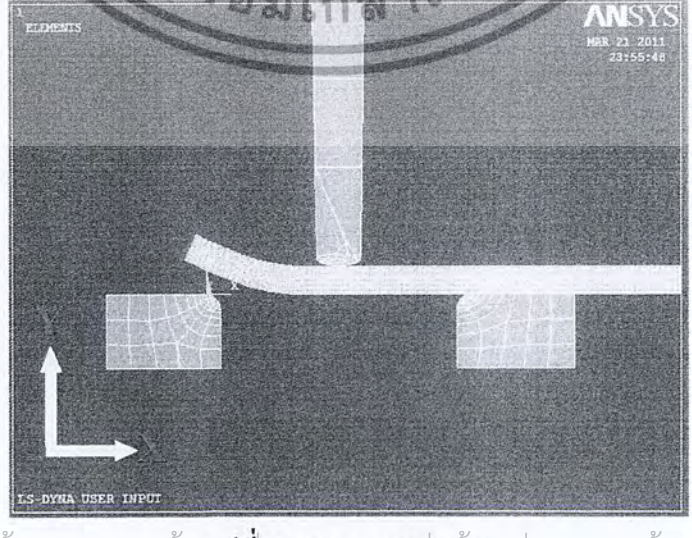
หลังจากการดัดขึ้นรูปกำหนดให้แผ่นโลหะเคลื่อนที่ได้ในแนวราบเป็นระยะ $U_{x1}$ ($U_y$ = 0) และให้มีการหมุนในแนวแกนZ ในขณะเครื่องจักรเคลื่อนที่ตามระยะเลื่อน $\theta_z$ ($U_y = 0$) แสดงดังรูปที่ 4.13




**รูปที่ 4.13** แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแผ่นโลหะ

(3) ดาย (Die)

กำหนดให้ดายไม่มีการเคลื่อนที่ ($U_x$ =0,$U_y$ = 0, $\theta_z$ = 0) แสดงดังรูปที่ 4.14




**รูปที่ 4.14** แสดงภาพดาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การกำหนดการสัมผัส (Contact criteria)

การสัมผัสของดายกับแผ่นโลหะ กำหนดให้มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.5

2. การกำหนดความเร็วของหัวกด

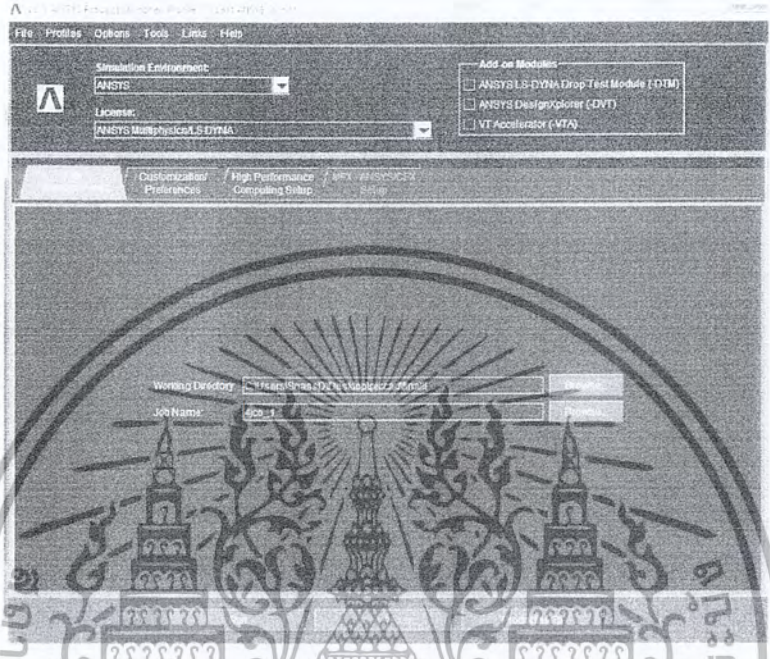
ให้หัวกดเคลื่อนที่ลงในแนวดิ่งเป็นระยะ 26 มิลลิเมตร และกดค้างไว้เป็นเวลา 3 วินาที เพื่อกดขึ้นรูปท่อ

**รูปที่ 4.15** แสดงความเร็วในการเคลื่อนที่ลงของหัวกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

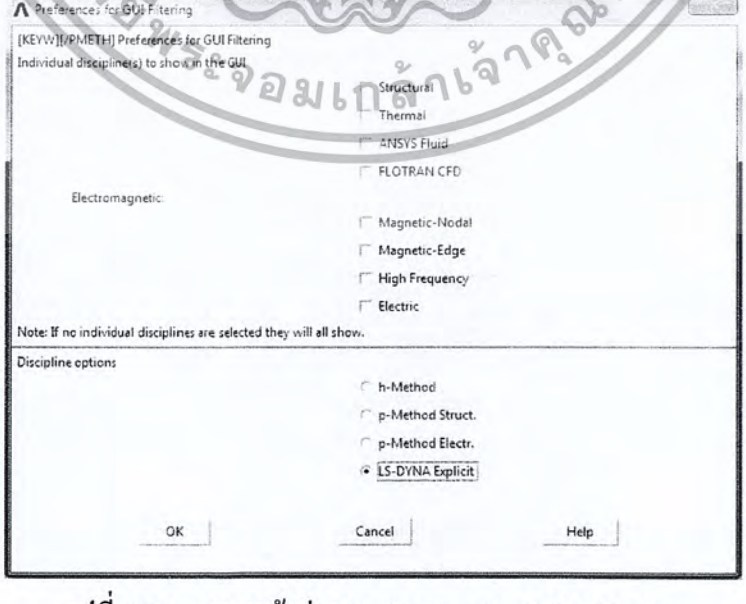
### 4.2.3 การจำลองด้วยโดยใช้โปรแกรม Ansys

เริ่มจากการเปิดโปรแกรม Ansys Product Launcher ขึ้นมาจากนั้นช่อง License เลือก Ansys Multiphysics/LS-DYNA เพื่อทำการใช้ในส่วนการวิเคราะห์แบบ Explicit Dynamics ดังแสดงในรูปที่ 4.16 จากนั้นกด Run เพื่อเข้าโปรแกรม




**รูปที่ 4.16** แสดงหน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรม

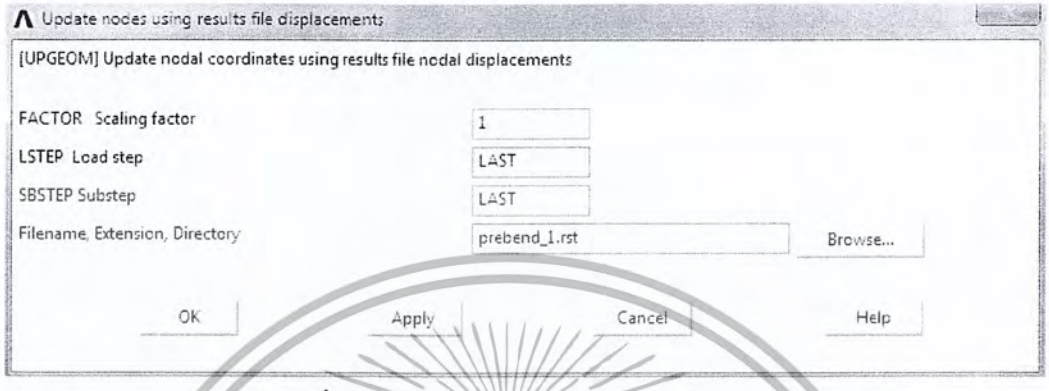
ทำการเปิดการวิเคราะห์แบบ Explicit Dynamics โดยคลิกที่ Ansys Main Menu/Preferences จากนั้นเลือก LS-DYNA Explicit ดังแสดงในรูปที่ 4.17




**รูปที่ 4.17** แสดงหน้าต่าง Preferences for GUI Filtering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นเริ่มทำการสร้างโมเดลโดยเริ่มจากการนำเข้าโมเดลหลังจากทำการขึ้นรูปที่ขอบแผ่นโลหะโดยเลือกที่ Main Menu > Preprocessor > Modeling > Update Geom เลือกไฟล์โมเดลการขึ้นรูปที่ ขอบดังแสดงในรูปที่ 4.18 จะได้โมเดลการหลังจากการขึ้นรูปที่ขอบแผ่นโลหะดังแสดงในรูปที่ 4.19

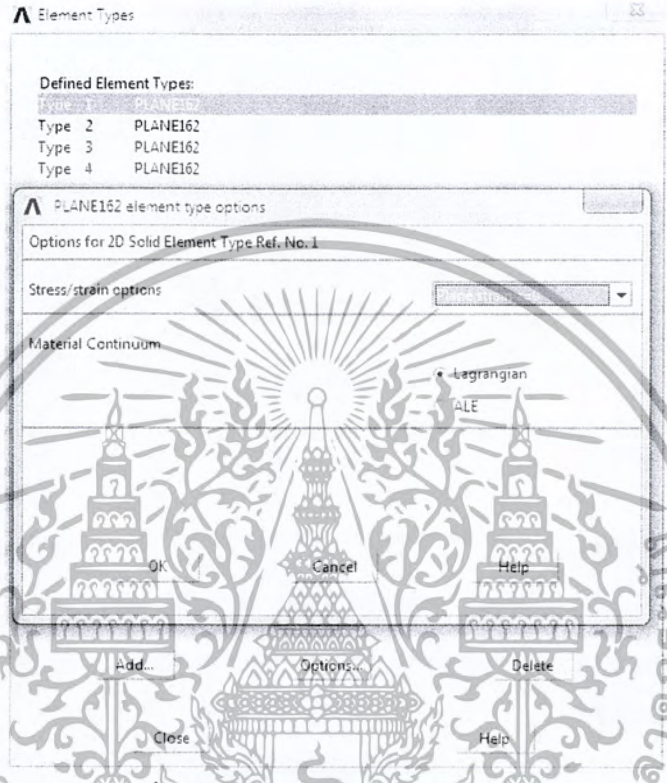



**รูปที่ 4.18** แสดงหน้าต่าง Update Geometry

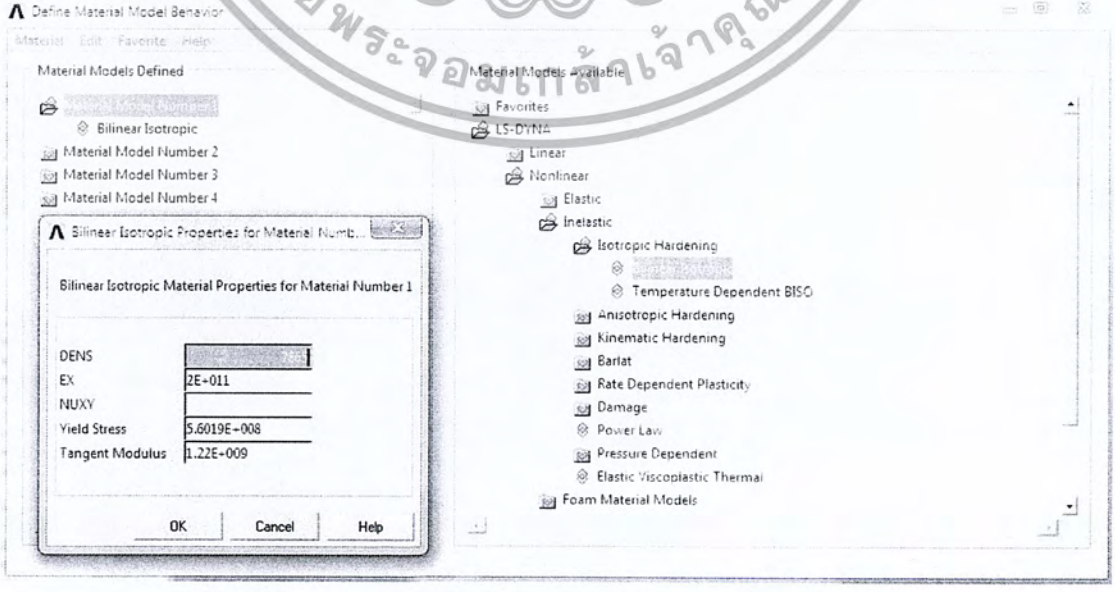
**รูปที่ 4.19** แสดงโมเดลการหลังจากการขึ้นรูปที่ขอบแผ่นโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการสร้างชนิดของเอลิเมนต์โดยเลือก Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete จากนั้นกด Add แล้วเลือกเอลิเมนต์ชนิด Plane162 ซึ่งเป็นเอลิเมนต์สองมิติที่ใช้สำหรับวิเคราะห์แบบ Explicit Dynamics จากนั้นคลิกที่ Options ในช่อง Stress/strain options เลือก Plane strain เพื่อทำการวิเคราะห์เป็นแบบ Plane strain ดังแสดงในรูปที่ 4.20



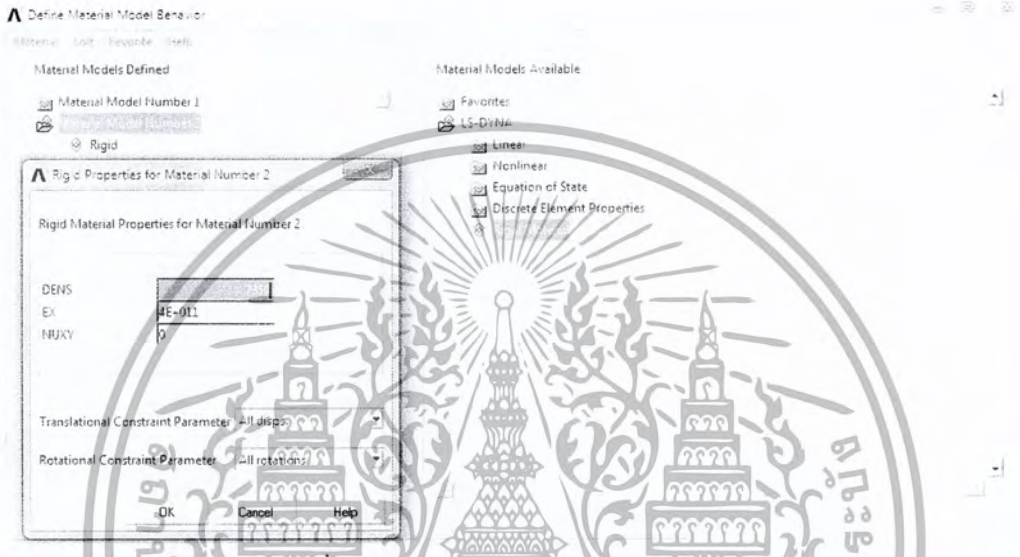

**รูปที่ 4.20** แสดงหน้าต่าง Element Type




**รูปที่ 4.21** แสดงหน้าต่างการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.21 แสดงการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุโดยกำหนดคุณสมบัติของแผ่นโลหะโดยเลือกที่ Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models โดยกดให้เป็นแบบ Bilinear Isotropic Strain Hardening แล้วทำการกรอกค่าคุณสมบัติต่างๆคือ ความหนาแน่น ยังโมดูลัส ความเค้นจุดคราก และความชันสัมผัสที่จุดคราก จากนั้นทำการกำหนดคุณสมบัติของหัวกดและดายโดยกำหนดให้เป็นวัสดุแข็งเกร็งโดยกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ในทุกแกนและไม่มีการหมุนในทุกแกน ดังแสดงในรูปที่ 4.22



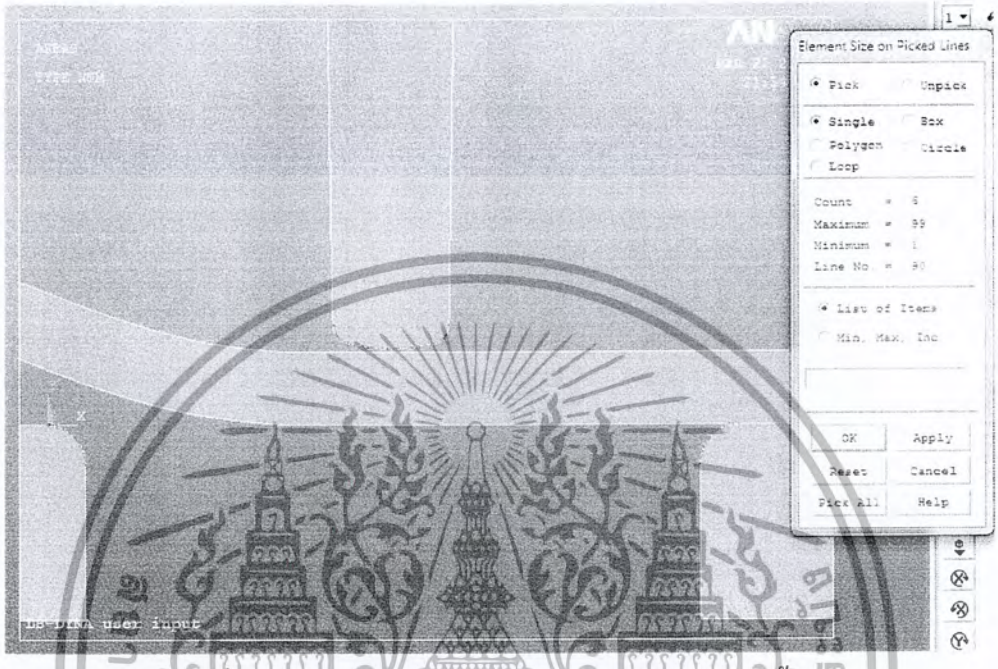

**รูปที่ 4.22** แสดงหน้าต่าง Rigid properties

จากนั้นทำการสปเอลิเมนต์ที่ไม่ต้องการและทำการสร้างโมเดลตามเครื่องจักรจริงโดยเลือกที่ Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create เพื่อทำการสร้างโมเดลจะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.23

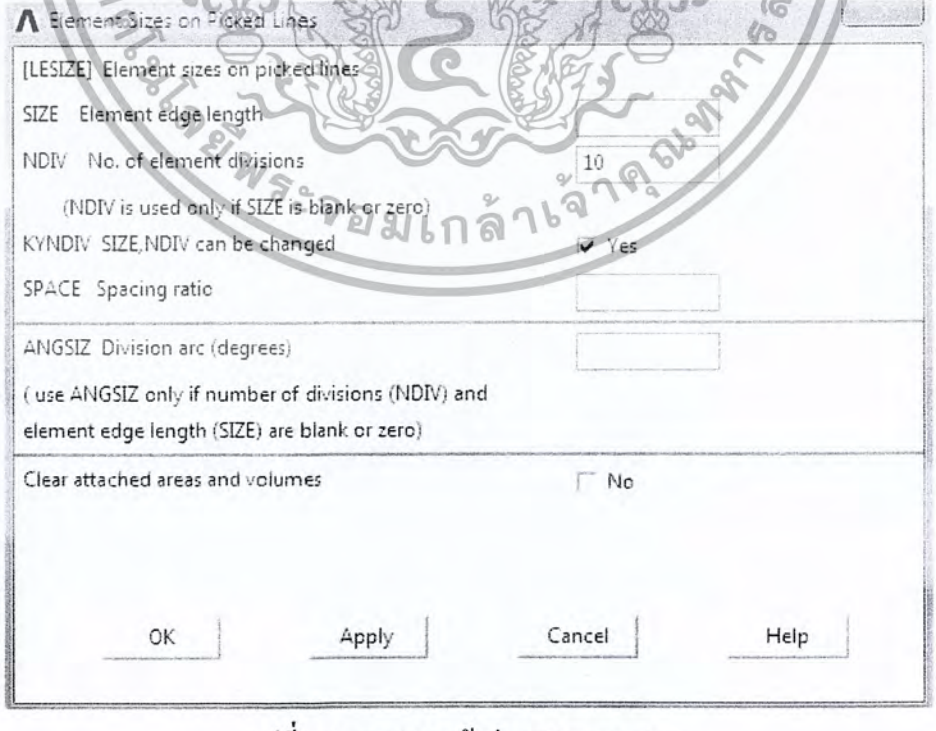
**รูปที่ 4.23** โมเดลรูปเครื่องเจซีโอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.24 แสดงการแบ่งเส้นตรงจุดสัมผัสให้ละเอียดขึ้นโดยเลือกที่ Main Menu > Preprocessor > Meshing >Size Cntrls > ManualSize > Layers > Picked Lines แล้วเลือกเส้นตรงจุดสัมผัสที่ต้องการจากนั้นกด OK จะได้หน้าต่างขึ้นมาดังแสดงในรูปที่ 4.25 จากที่กำหนดให้แบ่งแต่ละเส้นที่เลือกให้เป็น 10 ส่วน



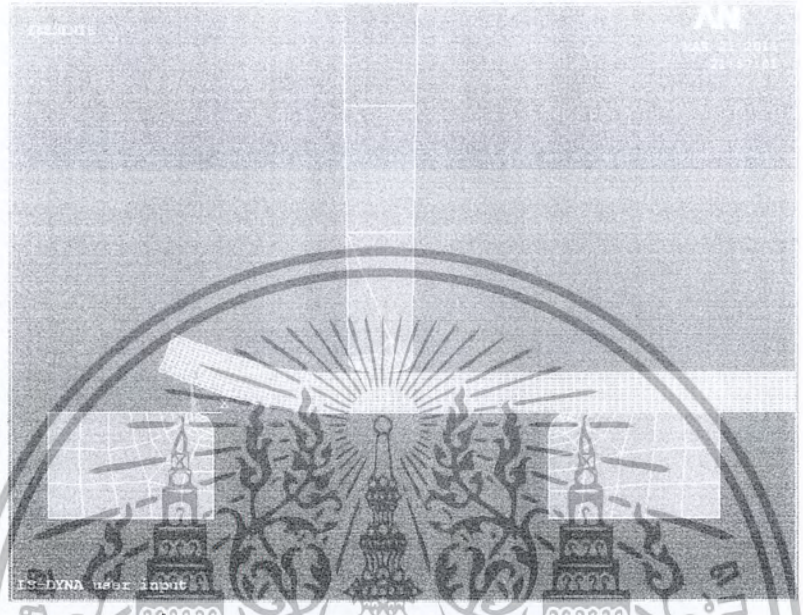

**รูปที่ 4.24** แสดงการแบ่งเส้นตรงจุดสัมผัสให้ละเอียดขึ้น




**รูปที่ 4.25** แสดงหน้าต่าง Element size

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการ Mesh โดยทำการ Mesh เป็นแบบ Free Meshing โดยเลือกที่ Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Free แล้วเลือกพื้นที่ที่ต้องการ Mesh จะได้โมเดลดังแสดงในรูปที่ 4.26



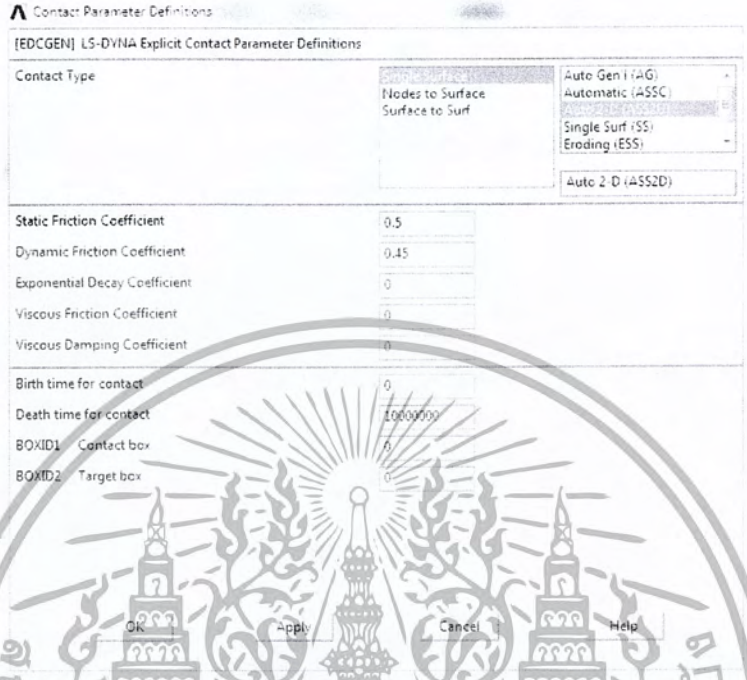

**รูปที่ 4.26** แสดงการ Mesh เป็นแบบ Free Meshing

ทำการสร้างสิ้นส่วนทั้งหมดโดยเลือกที่ Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Parts Options จากนั้นเลือก Create All Parts โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างขึ้นมาดังแสดงในรูปที่ 4.27

**รูปที่ 4.27** แสดงหน้าต่าง EDPart

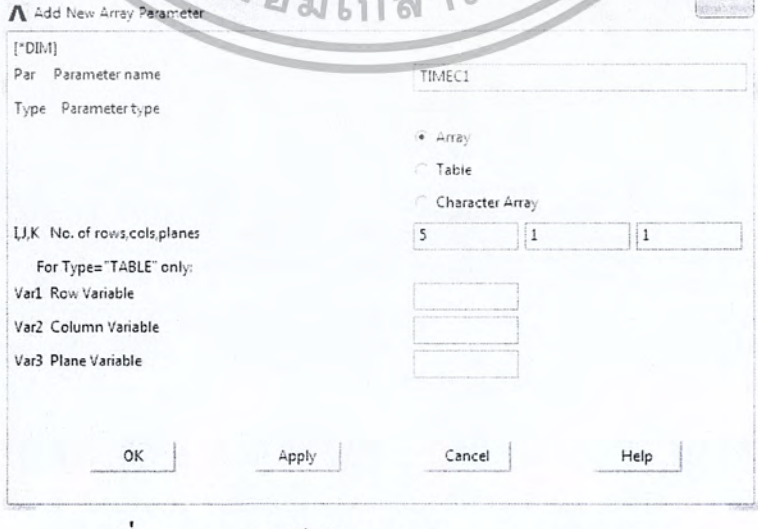
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการกำหนดตัวแปรผิวสัมผัสโดยกำหนดให้ผิดสัมผัสชนิด Surface to Surface แบบ Auro 2-D และทำการกำหนดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ ดังแสดงในรูปที่ 4.28



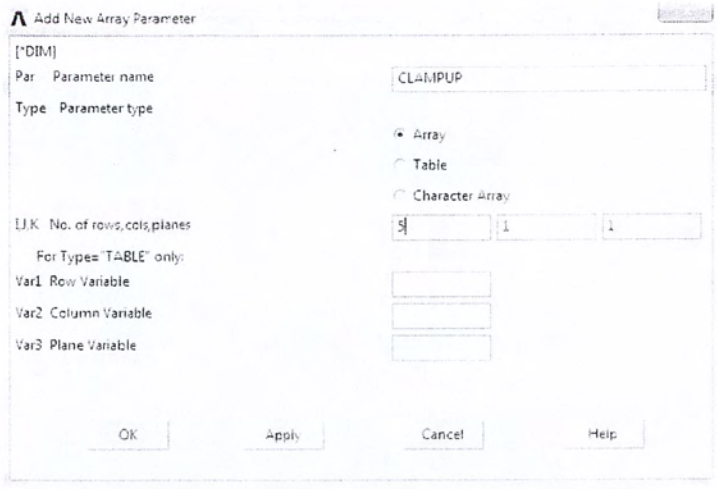

**รูปที่ 4.28** แสดงหน้าต่าง Contact Parameter

จากนั้นทำการสร้างตัวแปรอาเรย์เพื่อใช้ในการกำหนดโหลดที่เราจะใส่ให้กับการจำลองของเรา โดยเลือกที่ Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Define/Edit จากนั้นกด Add จะได้หน้าต่างดังแสดงในรูปที่ 4.29 โดยตัวแปรอาเรย์แรกที่สร้างคือตัวแปร TIMEC1 โดยมีขนาดเท่ากับ 5x1 และตัวแปร CLAMPUP มีขนาดเท่ากับ 5x1 เช่นกันดังแสดงในรูปที่ 4.29 และรูปที่ 4.30




**รูปที่ 4.29** แสดงหน้าต่าง Add New Array Parameter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

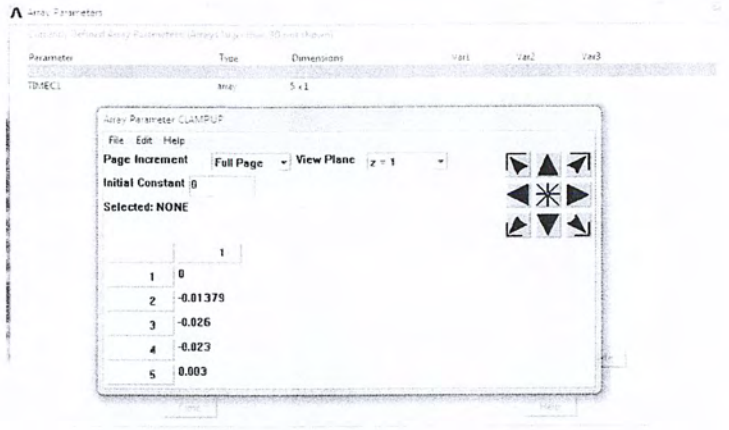



**รูปที่ 4.30** แสดงหน้าต่าง Add New Array Parameter

จากนั้นใส่ค่าของตัวแปรอาเรย์โดยกดที่ Edit จะมีหน้าต่างขึ้นมาให้ใส่ค่าตัวแปรของ TIMEC1 ดังแสดงในรูปที่ 4.31 และใส่ค่าตัวแปรของระยะกดที่ต้องการของตัวแปร CLAMPUP ดังแสดงในรูปที่ 4.32

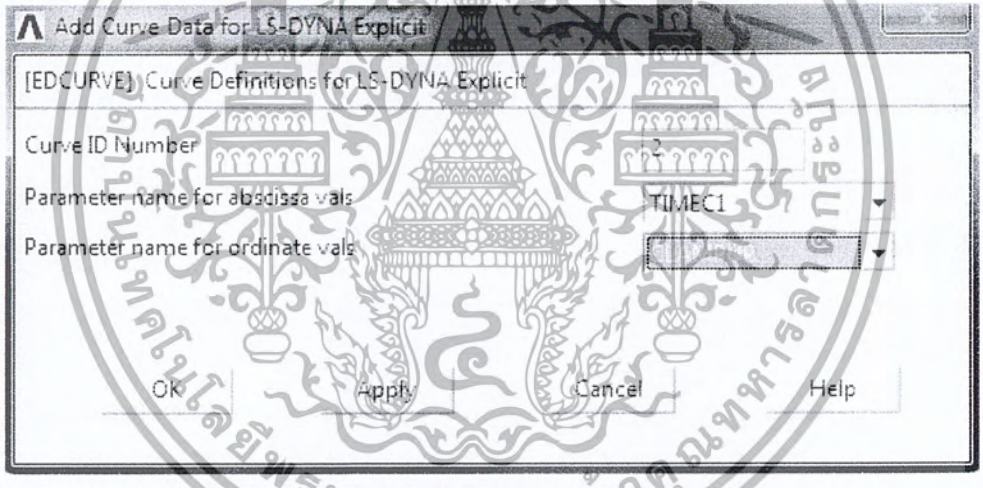
**รูปที่ 4.31** แสดงหน้าต่างค่าของตัวแปรอาเรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.32** แสดงหน้าต่างการใส่ค่าตัวแปรของระยะกด

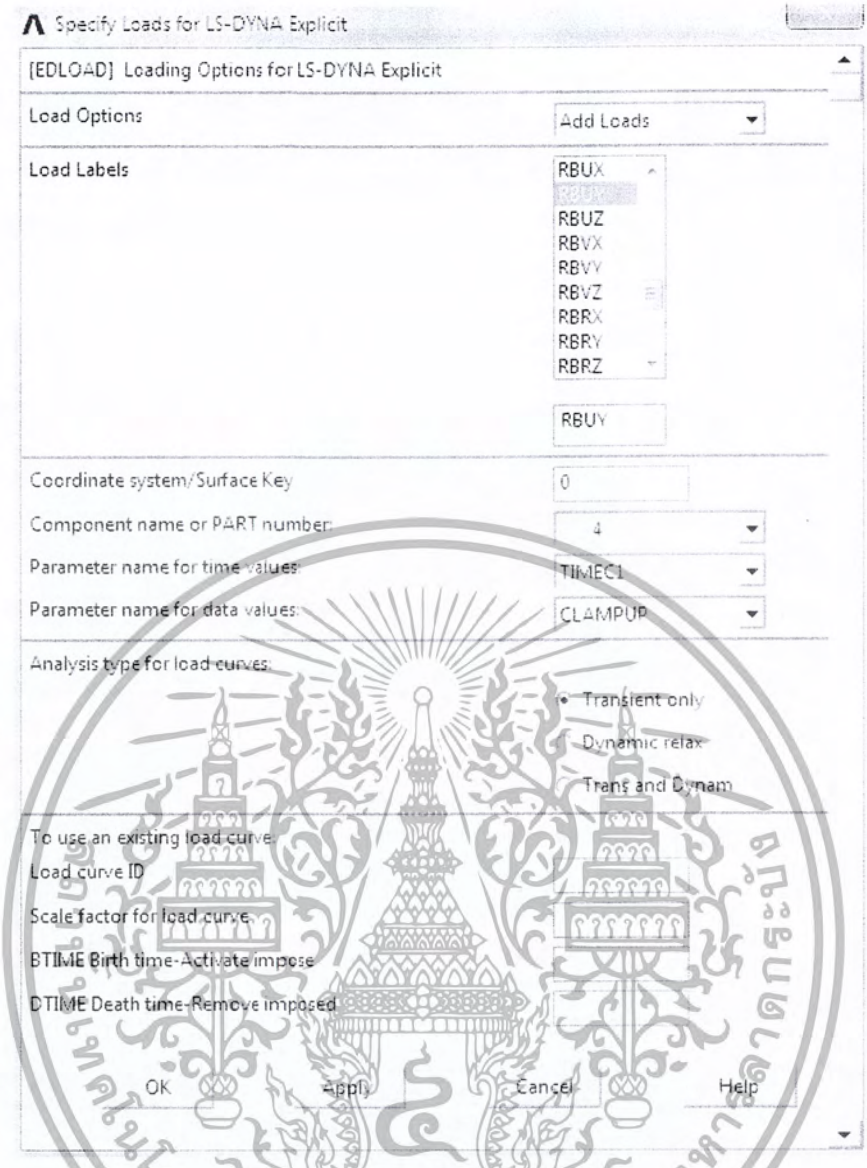
ทำการสร้างเส้นโค้งของโหลดในรูปของเวลาและระยะกดโดยเลือกที่ Main Menu > Solution > Loading Options > Curve Options > Add Curve จากนั้นเลือกตัวแปรอาเรย์ TIMEC1 และ CLAMPUP แล้วกด OK ดังแสดงในรูปที่ 4.33




**รูปที่ 4.33** แสดงหน้าต่าง Add Curve Data

ทำการใส่โหลดในการจำลองโดยการเลือกที่ Main Menu > Solution > Loading Options > Specify Loads ทำการใส่โหลดในแนวแกน Y ให้กับชิ้นส่วนที่ 4 โดยใช้ตัวแปรเวลาและระยะกดคือ TIMEC1 และ CLAMPUP ดังแสดงในรูปที่ 4.34

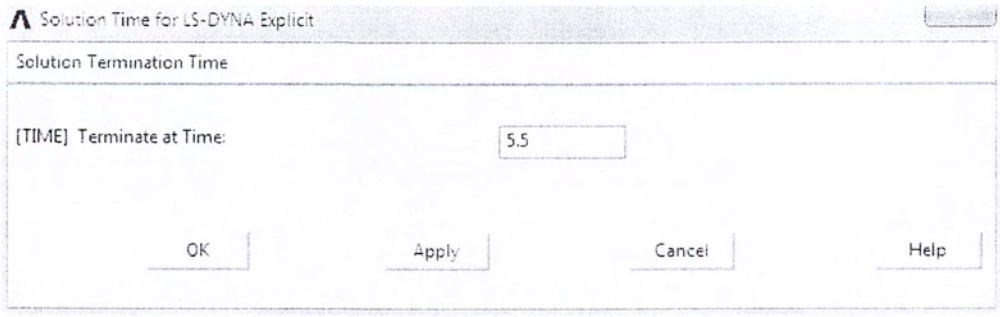
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



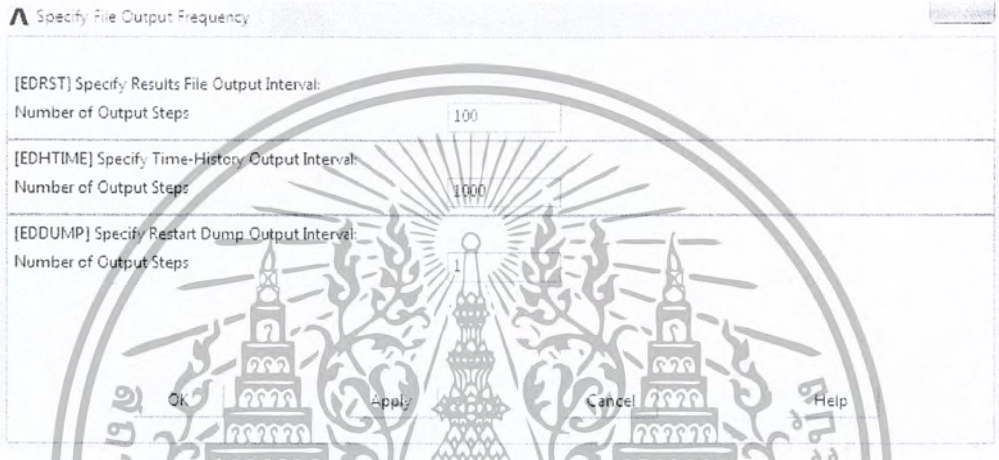

รูปที่ 4.34 แสดงหน้าต่าง Specify Load

ทำการกำหนดเวลาสิ้นสุดการคำนวณ โดยเลือกที่ Main Menu > Solution > Time Controls > Solution Time ใส่ค่าเวลาที่สิ้นสุดการคำนวณคือ 5.5 วินาทีดังแสดงในรูปที่ 4.35 และทำการกำหนดจำนวนขั้นของเวลาที่จะบันทึกในข้อมูลเท่ากับ 100 ขั้นดังแสดงในรูปที่ 4.36 จากนั้นเริ่มทำการจำลองโดยเลือกที่ Main Menu > Solution > Solve โปรแกรมก็จะเริ่มทำการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.35** แสดงหน้าต่าง Solution Time




**รูปที่ 4.36** แสดงหน้าต่าง Specify File Output Frequency

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5

## ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

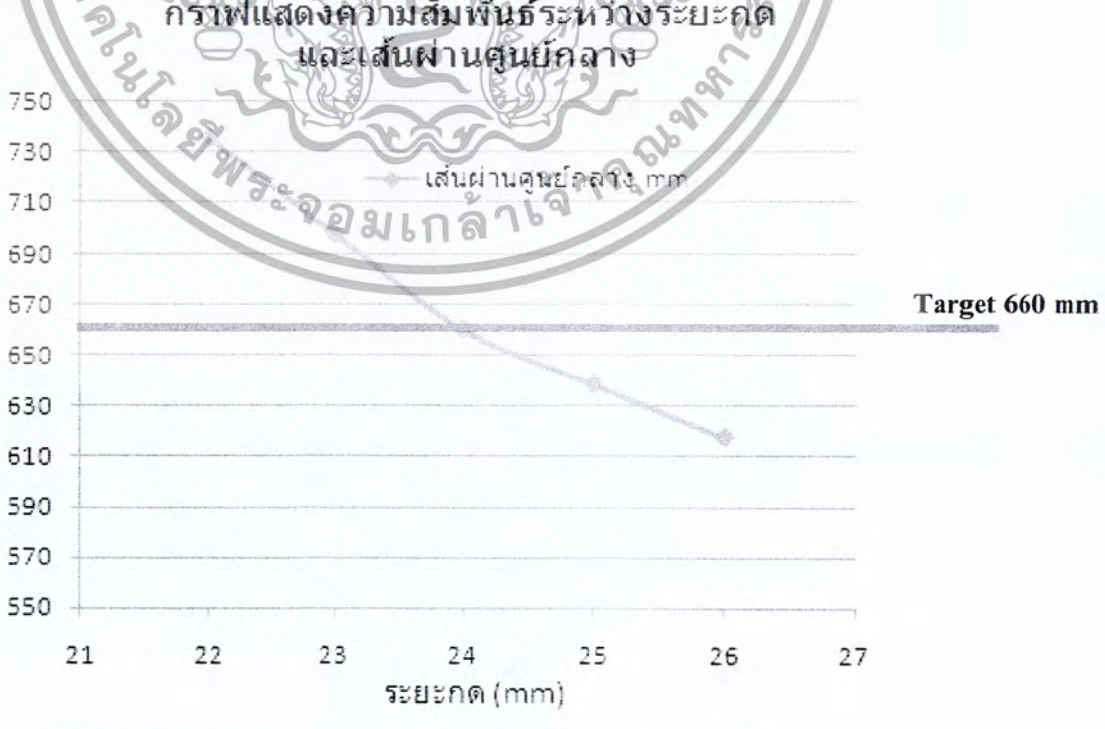
ในการดำเนินงานวิจัยการขึ้นรูปท่อในครั้งนี้ ได้ทำการพิจารณาตามตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปท่อจำนวน 2 ตัวแปรคือ ระยะกดของหัวกด และระยะห่างของดาย การดำเนินการวิจัยครั้งนี้แบ่งการดำเนินงานวิจัยออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟน์เอลิเมนต์แล้วนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไปทำการทดลองขึ้นรูปจริง

### 5.1 ผลการจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

นำโมเดลที่เราสร้างไว้มาทำการปรับค่าระยะกดที่ระยะกดต่างๆทำให้เราสามารถทราบได้ว่าที่ระยะกดต่างๆทำให้ท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางแปรตามค่าระยะกดนั้นๆ

#### 5.1.1 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อระยะห่างดายเท่ากับ 240 มิลลิเมตร

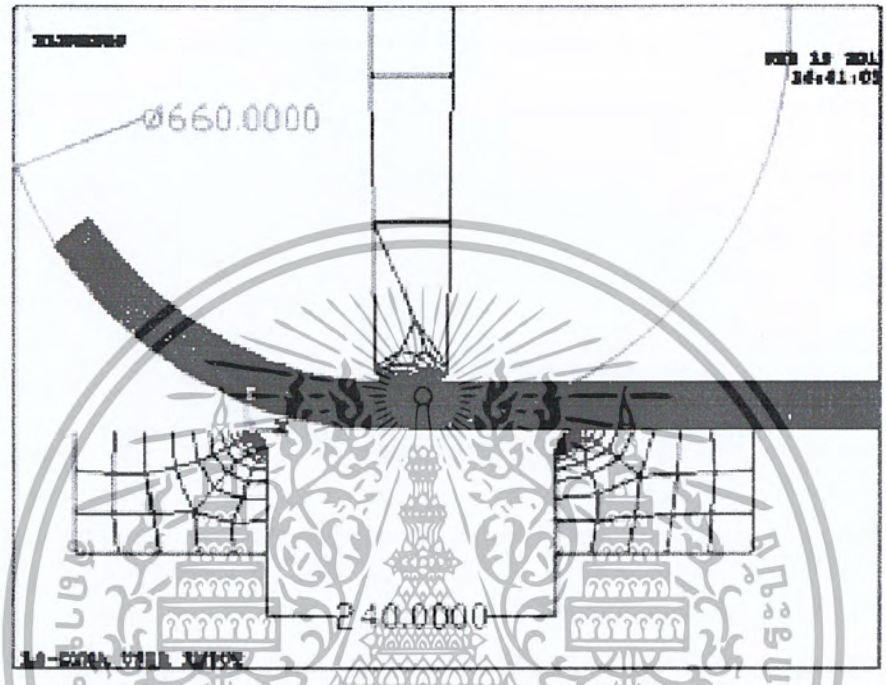
จากการนำโมเดลที่สร้างไว้มาทำการปรับค่าระยะกดทำให้ทราบว่าระยะกดและเส้นผ่านศูนย์กลางท่อมีความสัมพันธ์ค่อนข้างเป็นเส้นตรงดังแสดงดังรูปที่ 5.1 แสดงกราฟค่าระยะกดต่างๆกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเมื่อระยะห่างดายเท่ากับ 240 มิลลิเมตร



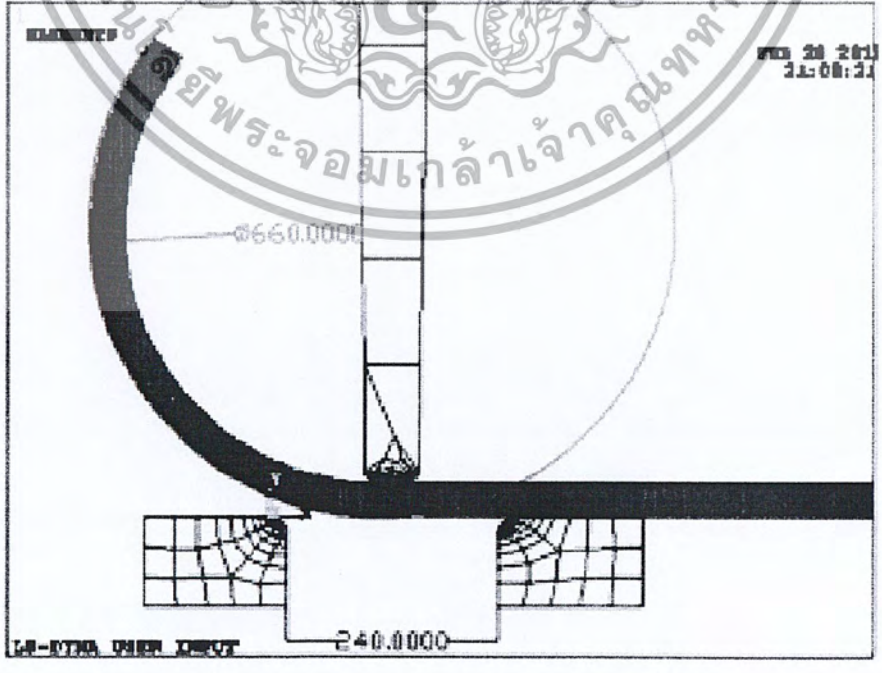

**รูปที่ 5.1** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะกดและเส้นผ่านศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองข้างต้นทำให้เราทราบได้ว่าค่าระยะกดที่ทำให้ท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 660 มิลลิเมตร และใช้ระยะห่างของดายเท่ากับ 240 มิลลิเมตร คือ ระยะกดเท่ากับ 24 มิลลิเมตร โดยเริ่มวัดจากครั้งแรกที่หัวกดสัมผัสกับแผ่นโลหะถึงระยะสุดท้ายของหัวกด รูปที่ 5.2, 5.3, 5.4และ 5.5 จะแสดงการวัดส่วนโค้งหลังจากการกดครั้งที่ 2, 5, 9 และ ครั้งสุดท้าย ตามลำดับ

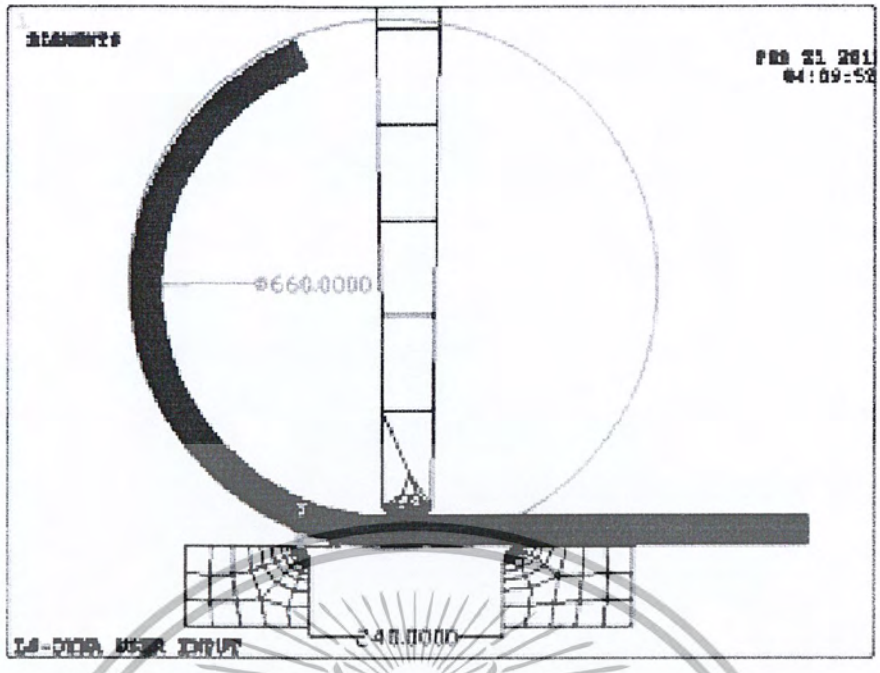



รูปที่ 5.2 แสดงการวัดส่วนโค้งหลังการกดครั้งที่ 2

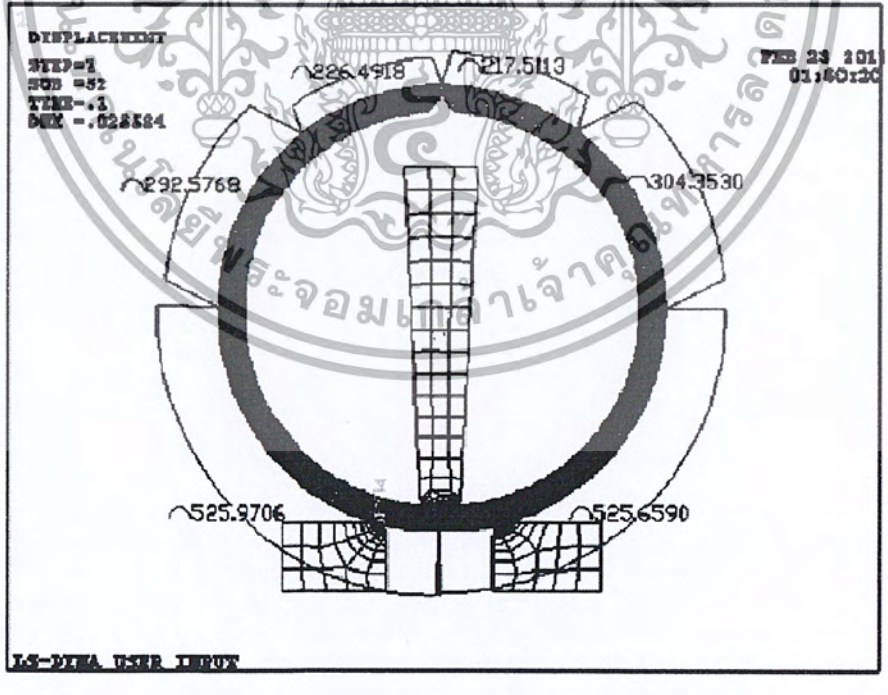



**รูปที่ 5.3** แสดงการวัดส่วนโค้งหลังการกดครั้งที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

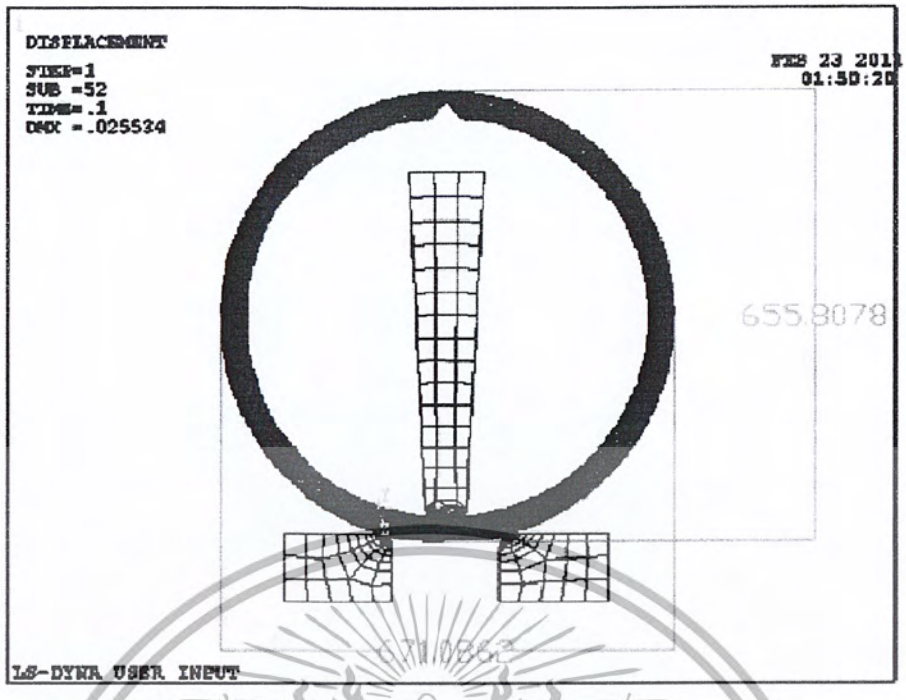



รูปที่ 5.4 แสดงการวัดส่วนโค้งหลังการกดครั้งที่ 9




**รูปที่ 5.5** แสดงการวัดส่วนโค้งหลังการกดครั้งสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 5.6** แสดงการวัดค่า Dmax และ Dmin ของระยะห่างดาย 320 มิลลิเมตร

หลังจากการจำลองการกดครั้งสุดท้ายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถวัดเส้นรอบวงเพื่อทำการตรวจสอบเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 5.5 ซึ่งได้เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 665.8153 มิลลิเมตรและทำการตรวจสอบค่าความไม่กลม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.21

$$\frac{671.0862 - 655.8078}{671.0862 + 655.8078} \times 100 = 1.04\ \%$$

ซึ่งค่า $D_{max} = 671.0862\ mm$

$D_{min} = 655.8078\ mm$

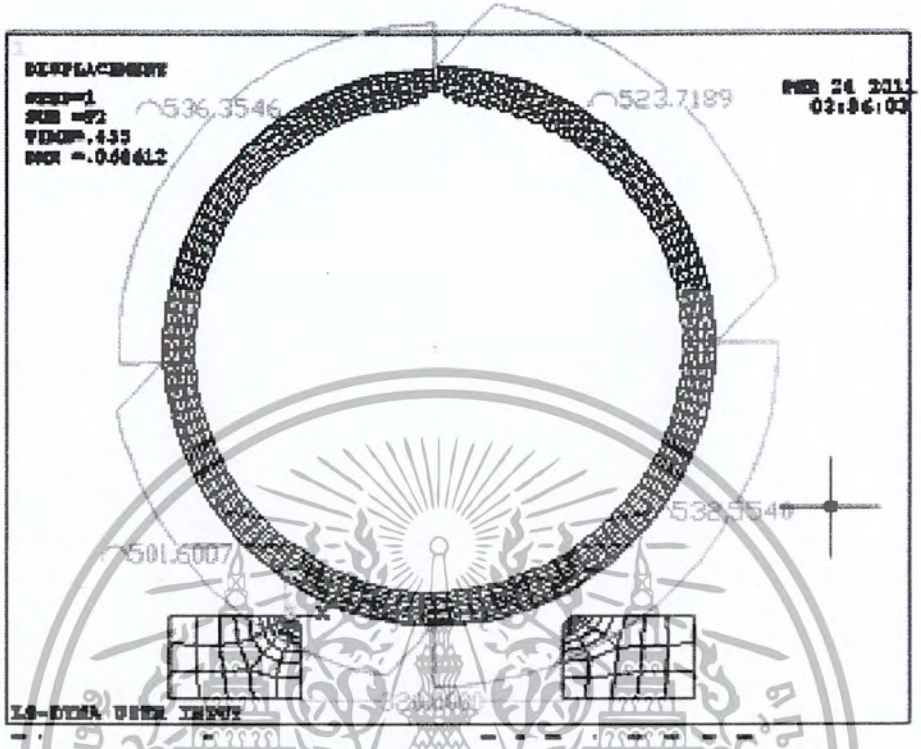
และคำนวณค่าความไม่กลมได้เท่ากับ 1.044 %

**5.1.2 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อระยะห่างดายเท่ากับ 320 มิลลิเมตร**

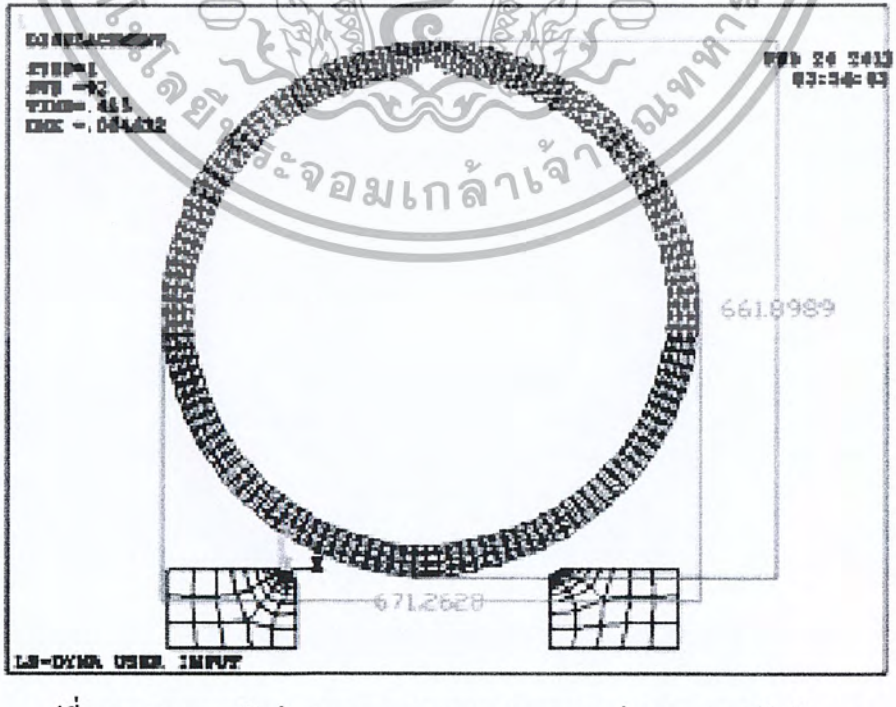
จากผลการจำลองข้างต้นทำให้เราทราบได้ว่าค่าระยะกดที่ทำให้ท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 660 มิลลิเมตร และใช้ระยะห่างของดายเท่ากับ 320 มิลลิเมตร คือ ระยะกดเท่ากับ 38 มิลลิเมตร โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มวัดจากครั้งแรกที่หัวกดสัมผัสกับแผ่นโลหะถึงระยะสุดท้ายของหัวกด รูปที่ 5.7 จะแสดงการวัดส่วนโค้งหลังจากการกดครั้งสุดท้าย




รูปที่ 5.7 แสดงการวัดส่วนโค้งหลังการกดครั้งสุดท้าย




**รูปที่ 5.8** แสดงการวัดค่า Dmax และ Dmin ของระยะห่างดาย 320 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากการจำลองการกดครั้งสุดท้ายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถวัดเส้นรอบวงเพื่อทำการตรวจสอบเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 5.5 ซึ่งได้เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 666.3453 มิลลิเมตรและทำการตรวจสอบค่าความไม่กลม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.21

$$\frac{671.2620 - 661.8989}{671.2620 + 661.8989} \times 100 = 0.702\ \%$$

ซึ่งค่า $D_{max} = 671.2620$ mm

$D_{mim} = 661.8989$ mm

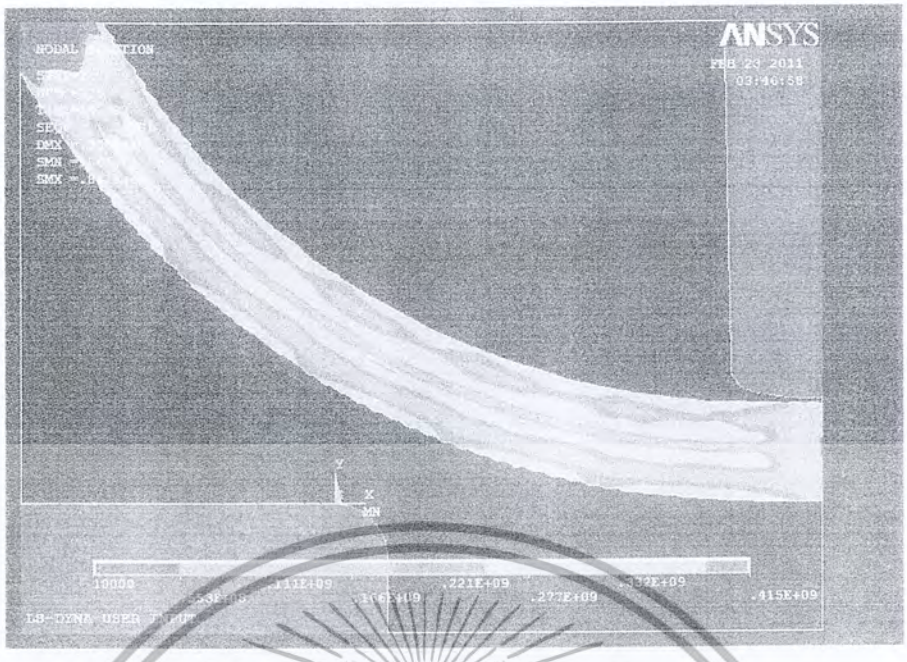
และคำนวณค่าความไม่กลมได้เท่ากับ 0.702 %

**5.1.3 เปรียบเทียบผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อระยะห่างดายเท่ากับ 240 มิลลิเมตร และระยะห่างดายเท่ากับ 320 มิลลิเมตร**

หลังจากการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แล้ววิเคราะห์ความเค้นตกค้างหลังจากการกดครั้ง 5 เปรียบเทียบระหว่างดาย 240 มิลลิเมตร และ320 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ พบว่า ค่าความเค้นตกค้างของการใช้ระยะห่างดาย 240 มิลลิเมตร มีค่ามากกว่า การใช้ระยะดาย 320 มิลลิเมตร

**รูปที่ 5.9** แสดงค่าความเค้นตกค้างในการใช้ระยะดาย 240 มิลลิเมตร

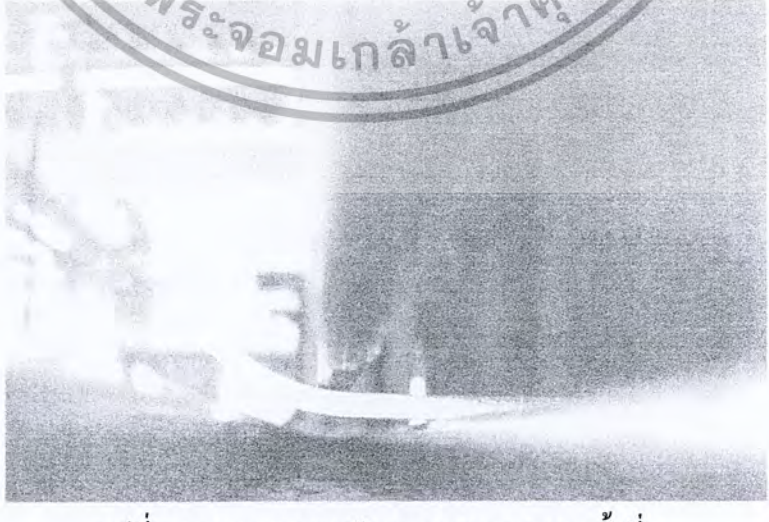
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 5.10** แสดงค่าความเค้นตกค้างในการใช้ระยะดาย 320 มิลลิเมตร

**5.2 ผลที่ได้จากการทดลอง**

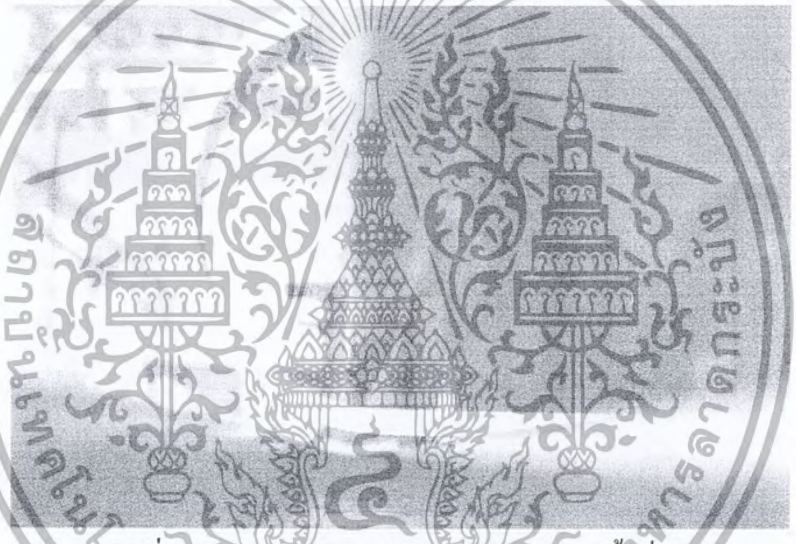
จากการทดลองที่โรงงานโดยเริ่มจากการตัดแผ่นโลหะหนา 37 มิลลิเมตร กว้าง 1958 มิลลิเมตร และยาว 200 มิลลิเมตร มาทำการขึ้นรูปที่ขอบทั้งสองข้างด้วยเครื่องขึ้นรูปท่อที่ขอบ (Prebending Machine) เพื่อให้ได้รัศมีความโค้งตามที่ต้องการ จากนั้นนำแผ่นโลหะมาทำการขึ้นรูปด้วยเครื่อง JCO โดยมีระยะห่างดายเท่ากับ 240 มิลลิเมตรและทำการกดทีละขั้นแต่ละครั้งมีเลื่อนของแผ่นเหล็กเท่ากับ 55 มิลลิเมตร ได้ค่าระยะกดที่ทำให้ท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 660 มิลลิเมตร คือ 27 มิลลิเมตรและรูปที่ 5.12, 5.13, 5.14 และ 5.15 จะแสดงรูปหลังจากการกดครั้งที่ 2, 5, 9 และ 28 ตามลำดับ



**รูปที่ 5.11** แสดงภาพหลังจากการทดลองกดครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่ 5.12** แสดงภาพหลังจากการทดลองกดครั้งที่ 5



**รูปที่ 5.13** แสดงภาพหลังจากการทดลองกดครั้งที่ 9

**รูปที่ 5.14** แสดงภาพหลังจากการทดลองกดครั้งที่ 28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่ 5.15** แสดงภาพหลังจากการกดครั้งสุดท้ายของท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 6

# บทสรุปและข้อเสนอแนะ

## 6.1 สรุปผลการทดลอง

สำหรับโครงการนี้ เป็นการศึกษาหาระยะกดที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปท่อแบบเจซีโอ โดยเป็นการศึกษาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และจากการทดลอง เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตท่อหนาของทางบริษัท โดยผลที่ได้จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองอย่างมาก โดยตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด 2 ตัวแปรคือ ระยะกดของหัวกด 5 ระยะ และระยะห่างของดาย 2 ขนาด โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ การจำลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทดลองขึ้นรูปท่อจากทางโรงงาน

สำหรับการใช้ระยะห่างของดายเท่ากับ 240 มิลลิเมตรสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. สำหรับการจำลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อขึ้นรูปเป็นท่อขนาด 660 มิลลิเมตร หนา 37 มิลลิเมตร โดยใช้ดายหมายเลข 2 ระยะห่าง 240 มิลลิเมตร และจากการทดลองใช้ระยะกด ทั้งหมด 5 ระยะคือ 22, 23, 24, 25 และ 26 มิลลิเมตร และระยะกดจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า ระยะกดเท่ากับ 24 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 665.8153 มิลลิเมตร

2. จากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ วัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดและน้อยที่สุดได้มีค่าเท่ากับ 671.0868 และ 655.8078 มิลลิเมตร ตามลำดับ และสามารถวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่กลมได้เท่ากับ 1.044 %

3. สำหรับการทดลองขึ้นรูปท่อจากทางโรงงานเพื่อขึ้นรูปเป็นท่อขนาด 660 มิลลิเมตร หนา 37 มิลลิเมตร พบว่าจะได้ระยะกดเท่ากับ 27 มิลลิเมตร

พบว่า ระยะกดที่ได้จากการจำลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ และระยะกดที่ได้จากการทดลองขึ้นรูปท่อจากทางโรงงาน มีค่าความแตกต่างเท่ากับ 3 มิลลิเมตร อาจเนื่องมาจากระยะคราวนิ่งมีระยะห่าง 3 มิลลิเมตร และอาจมีค่าตัวแปรอื่นนอกเหนือจากการศึกษา และเกิดจากการแบบจำลองที่สร้างขึ้นมามีความละเอียดไม่เพียงพอเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเครื่องจักรที่ใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการใช้ระยะห่างของดายเท่ากับ 320 มิลลิเมตรสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. สำหรับการจำลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อขึ้นรูปเป็นท่อขนาด 660 มิลลิเมตร หนา 37 มิลลิเมตร โดยใช้ดายหมายเลข 3 ระยะห่าง 320 พบว่า ระยะกดเท่ากับ 38 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 666.3453 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นการเปลี่ยนระยะห่างจองดายที่จะส่งให้ทางโรงงาน

2. จากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ วัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดและน้อยที่สุดได้มีค่าเท่ากับ 671.2620 และ 661.8989 มิลลิเมตร ตามลำดับ และสามารถวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่กลมได้เท่ากับ 0.702 %

สำหรับโครงการนี้ เป็นการศึกษาหาระยะกดที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปท่อแบบเจซีโอ โดยเป็นการศึกษาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และจากการทดลอง เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตท่อหนาของทางบริษัท โดยผลที่ได้จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองอย่างมากจึงถือว่าเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาก่อนการผลิตจริง

## 6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

### 6.2.1 ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทำงานวิจัย

1. ในขั้นตอนการศึกษาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ANSYS ใช้ระยะเวลาในการศึกษานานเนื่องจากต้องทำการศึกษาใหม่

2. การไปศึกษากระบวนการจริงที่โรงงานทำได้ยาก เนื่องจากจำเป็นต้องผ่านขั้นตอนการติดต่อหลายขั้นตอน

3. การเดินทางใช้ระยะเวลาค่อนข้างนานเนื่องจากระยะทางค่อนข้างไกล

### 6.2.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในขั้นตอนการขึ้นรูปไม่ได้คำนึงถึงผลตัวแปรอื่นนอกเหนือจากระยะกด ระยะห่างของดายและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป ซึ่งทำให้ผลที่ได้คลาดเคลื่อน

2. ความเที่ยงตรงของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งหากขาดการซ่อมบำรุงที่เหมาะสม ผลที่ได้อาจเกิดความคลาดเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในกระบวนการขึ้นรูปที่ใช้ในการวิเคราะห์เลือกใช้ค่าจากงานวิจัยในลักษณะเดียวกัน ซึ่งอาจคลาดเคลื่อนกับค่าที่เกิดขึ้นจริง

4. ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ได้กำหนดให้หัวกดและดายเป็นวัตถุแข็งเกร็ง ซึ่งในการทดลองอาจเกิดการยุบตัวของหัวกดและดาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บรรณานุกรม

[1] Ansel C. Ugural."Mechanics of Materials," John Wiley & Sons,Inc.2007

[2] Ying Gao, Qiang Li, Meng Xianchang, "Numerical simulation of JCO pipe forming," Computer Science and Information Engineering ,2009 WRI World Congress,vol.2, pp.233-237

[3] Ying Gao, Qiang Li, Lifeng Fan, Xu Wang, "Applications of Finite Element Method in Large-diameter Longitudinal Welded Pipe,"Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2009. ICMTMA '09. International Conference ,vol.3,pp.22-25

[4] Ying Gao, Lijuan Wang, Qiang Li, Lifeng Fan, "Die parameter optimization in JCO bending based on FEM," Computer Engineering and Technology,2010 2nd International Conference ,pp.677-680

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

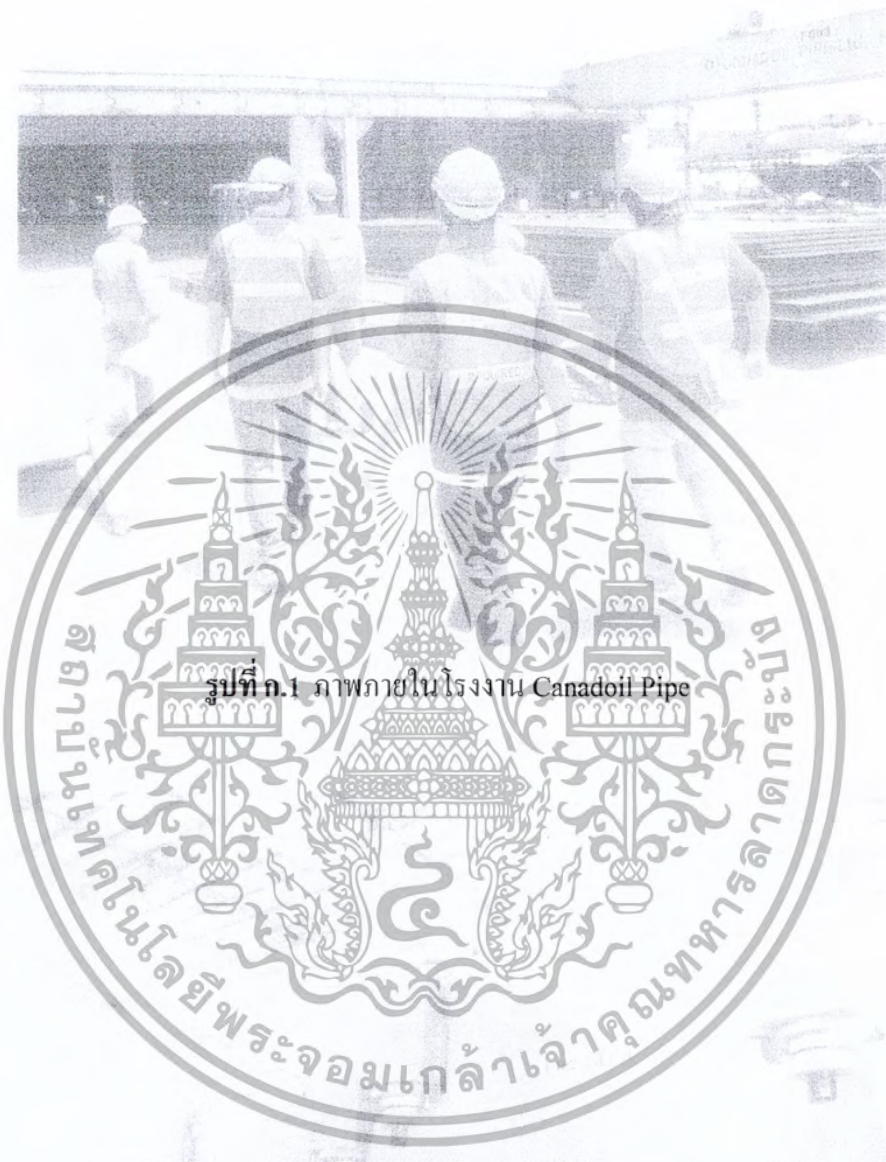
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ก.**

**ภาพโรงงาน Canadoil Pipe Co.,Ltd.**



**รูปที่ ก.1** ภาพภายในโรงงาน Canadoil Pipe

**รูปที่ ก.2** ภาพเครื่อง JCO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่ ก.3** ภาพขณะ Operate เครื่อง JCO

**รูปที่ ก.4** ภาพแผงควบคุมเครื่อง JCO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ข.**

**ตารางระยะห่างดายเปรียบเทียบความหนาของท่อ**

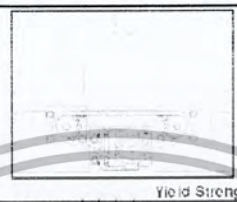
21

Canadoil Pipe Ltd.
A Canadoil Group Company
"World Class Provider of Piping Solutions"
CANADOIL GROUP

**JCO Bending Machine 4000 ton**

Die No. 3
Pipe diameter :26-38 inch
**Thickness:** 6-42 mm.
Length : 6000 mm

D =240



| Steel grade | | B | | X42 | | X46 | | X52 | | X56 | | X60 | | X65 | | X70 | | X80 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Yield Strength | Yield (Mpa) | 245 | 430 | 290 | 495 | 320 | 525 | 360 | 530 | 390 | 545 | 415 | 565 | 450 | 600 | 485 | 635 | 555 | 705 | 710 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 |
| | Kg/mm² | 25 | 46 | 30 | 51 | 33 | 54 | 37 | 54 | 40 | 56 | 42 | 58 | 46 | 61 | 47 | 65 | 57 | 72 | 72 | 77 | 82 | 87 | 92 | 97 | 102 |
| WALL THICKNESS (MM) | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 17 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 19 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 21 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 23 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 24 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 25 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 26 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 27 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 28 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 29 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 31 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 32 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 33 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 34 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 35 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 36 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 37 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 38 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 39 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 41 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 42 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

**Remark:**
**Green Zone** is less than 80% of machine capability (we can accept order and send BOQ)
**Yellow Zone** is 80-89% of JCO machine capability (the order shall be approved by GM before provide BOQ)
**Red Zone** is 90-100% of JCO machine capability (the order shall be approved by GM before provide BOQ)
**Gray Zone** is over capacity

**รูปที่ ข.1** ตารางระยะห่างดาย 240 มิลลิเมตรเปรียบเทียบความหนาของท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CANADOIL GROUP

**Canadoil Pipe Ltd.**
A Canadoil Group Company
"World Class Provider of Piping Solutions"

## JCO Bending Machine 4000 ton

Die No. 4
Pipe diameter 40-44 inch
**Thickness:** 43-80 mm.
Length 6000 mm

D =320

| Steel grade | Yield Strength | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | B | | X42 | | X46 | | X52 | | X56 | | X60 | | X65 | | X70 | | X80 | | | | | | |
| Yield (Mpa) | 245 | 450 | 290 | 495 | 320 | 525 | 360 | 530 | 390 | 545 | 415 | 565 | 450 | 600 | 465 | 635 | 555 | 705 | 710 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 |
| Kg/mm² | 25 | 46 | 30 | 51 | 33 | 54 | 37 | 54 | 40 | 56 | 42 | 58 | 46 | 61 | 47 | 65 | 57 | 72 | 72 | 77 | 82 | 87 | 92 | 97 | 102 |

WALL THICKNESS (MM)

6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42

**Remark:**

**Green Zone** is less than 80% of machine capability (we can accept order and send BOQ)
**Yellow Zone** is 80-89% of JCO machine capability (the order shall be approved by GM before provide BOQ)
**Red Zone** is 90-100% of JCO machine capability (the order shall be approved by GM before provide BOQ)
**Gray Zone** is over capacity

**รูปที่ ข.2** ตารางระยะห่างดาย 320 มิลลิเมตรเปรียบเทียบความหนาของท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

# การศึกษาการขึ้นรูปท่อแบบเจซีโอด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

## The Study of JCO Pipe Forming by Finite Element Method

นาย ปรัชญ์ เพชรวิไลกุล 50010913, นาย ผิดก ศักดาเยี่ยงยงค์ 50010992 และ นาย พงษ์พัฒน์ กิจขจรกุล 50011015

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(รศ.ดร. จำลอง ปราบแก้ว)

**บทคัดย่อ**

โครงงานนี้เกิดขึ้นจากการไปศึกษาดูงานที่บริษัท แคนนาดอยล์ ไปป์ จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทผลิตท่อส่งน้ำมันและก๊าซพบว่าในกระบวนการผลิตของการเปลี่ยนขนาดของผลิตภัณฑ์จะเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการลองผิดลองถูกเพื่อหาค่าระยะกดของการขึ้นรูปท่อแบบเจซีโอ การศึกษาครั้งนี้เป็นการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองการขึ้นรูปเพื่อหาระยะกดของหัวกดและระยะห่างของดาย และทำนายรูปร่างสุดท้ายของท่อหลังจากการขึ้นรูปท่อแบบเจซีโอตามมาตรฐาน API 5L X-65 เพื่อขึ้นรูปเป็นท่อขนาด 660 มิลลิเมตร หนา 37 มิลลิเมตร ยาว 6 เมตร จากการศึกษาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า ระยะกดและระยะห่างดายที่เหมาะสมมีค่า 24 มิลลิเมตร โดยค่าความผิดพลาดความกลมมีค่าเท่ากับ 1.04% อย่างไรก็ตามค่าที่ใช้จริงในการปฏิบัติระยะกดมีค่าเท่ากับ 27 มิลลิเมตร

***คำหลัก:*** JCO/JCOE, Straight Seam Submerged Arc Weld Pipe, Numerical simulation

**Abstract**

This project was inspired after the summer internship program of Canadoil Pipe Co.,Ltd. The purpose of this project is to find a suitable punch stroke and die distance by using finite element method. The obtained results were used in the actual operation and the companson used are ovality and pipe diameter. The X-65 steel pipe 660 mm in diameter is numerically tested. The simulated results show that the suitable punch stroke and die distance are 24 mm and 240 mm, respectively, the percent error of ovality is 1.04. However, when these parameters were used in actual operation, the punch stroke has to be changed to 27 mm.

**Keywords**: JCO/JCOE, Straight Seam Submerged Arc Weld Pipe, Numerical simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. บทนำ

ในปัจจุบัน เนื่องจากความต้องการของน้ำมันและก๊าซที่สูงขึ้น จึงเกิดการขยายการขุดเจาะน้ำมันและก๊าซอย่างรวดเร็ว ทำให้มีความต้องการในการใช้ท่อที่มีขนาดหนามากขึ้นเพื่อใช้ในการขนส่งผ่านระยะทางไกลและผ่านมหาสมุทรบริเวณที่มีความลึกมากขึ้น ความสามารถในการออกแบบและการผลิตท่อจึงมีผลสำคัญต่อความต้องการด้านคุณสมบัติและคุณภาพของท่อ

บริษัทแคนนาดอยล์ ไปป์ จำกัด เป็นบริษัทขนาดใหญ่ที่ผลิตและส่งออกท่อโลหะไปทั่วโลก ท่อที่ผลิตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 4 นิ้ว ถึง 170 นิ้ว ตามมาตรฐานการผลิตท่อต่างๆ เช่น API5L เป็นต้น ซึ่งมีศูนย์กลางการผลิตอยู่ในประเทศไทย โดยมีกระบวนการขึ้นรูป 2 แบบที่ใช้ในการผลิตท่อคือ กระบวนการขึ้นรูปท่อบาง เรียกว่า Three Rolls Bending (3RB) และกระบวนการขึ้นรูปท่อหนา เรียกว่า กระบวนการผลิตแบบ JCO ซึ่งในกระบวนการการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ใหม่ต้องมีการทดลองโดยการลองผิดลองถูก ซึ่งทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายที่มีมูลค่าสูงก่อนที่จะได้ค่าตัวแปรต่างๆที่สำคัญในการผลิต

ในโครงงานนี้ทำในส่วนของการขึ้นรูปแบบ JCO โดยจัดทำขึ้นเพื่อเสนอแนวทางในการหาค่าระยะกดที่แปรตามระยะห่างของดายและทำนายรูปร่างสุดท้ายของท่อโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบและจำลองชิ้นงานก่อนนำไปปฏิบัติจริงคาดว่าจะช่วยทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาที่ต้องใช้ในการหาค่าตัวแปรที่สำคัญในการขึ้นรูป ก่อนทดสอบโดยการลองผิดลองถูก

## 2. รายละเอียดของกระบวนการผลิตแบบ JCO/JCOE

กระบวนการผลิตแบบ JCO/JCOE แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักคือ 1) การขึ้นรูป JCO 2) การเชื่อม และ 3) การขยายตัว โดยกระบวนการแรกเริ่มจากการดัดขอบแผ่นเหล็กด้วยเครื่อง pre-bend จากนั้นนำมาเข้าเครื่อง JCO โดยครึ่งหนึ่งของแผ่นเหล็กจะถูกดัดเป็นขั้นๆ โดยหัวกดของเครื่องจักรเคลื่อนที่ลงมากดทีละขั้นตอนจนเป็นรูปร่างตัว J และอีกครึ่งหนึ่งก็ถูกกระทำเหมือนกันจนได้เป็นรูปร่างตัว C และสุดท้ายหัวกดของเครื่องจะกดที่ตรงกลางแผ่นและได้รูปร่างตัว O หลังจากนั้นนำท่อไปเชื่อมที่ตะเข็บโดยใช้การเชื่อมแบบซับเมอร์ก ขั้นตอนสุดท้ายนำไปเข้าเครื่องขยายเพื่อทำท่อให้กลมตามขนาดที่ต้องการ

กระบวนการผลิตแบบ JCO/JCOE เป็นกระบวนการผลิตท่อหนาซึ่ง Three Rolls Bending ไม่สามารถทำได้ ส่งผลให้กระบวนการผลิต JCO มีความต้องการสูงขึ้นสืบเนื่องจากมีความต้องการท่อที่หนาขึ้นเพื่อใช้ในบริเวณที่มีความลึกสูงและทนต่อการกัดกร่อน

## 3. วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษากระบวนการขึ้นรูปท่อด้วยเครื่อง JCO
2. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Ansys เพื่อใช้ในการจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
3. สร้างโมเดลเครื่องจักร JCO ในแบบจำลองในโปรแกรม
4. หาระยะกดที่เหมาะสมจากโมเดลที่ใช้ในการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
5. นำผลที่ได้จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับข้อมูลจากบริษัท

## 4. ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการขึ้นรูปแบบ JCO

ตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อการขึ้นรูปแบบ JCO คือ ระยะกด ระยะห่างดาย และรัศมีของหัวกด โดยรัศมีของหัวกดจะมีผลต่อการดีดกลับคือ ถ้าเพิ่มรัศมีของหัวกดมากขึ้นจะทำให้เกิดการดีดกลับลดลง[4] และระยะกดซึ่งแปรผันตามระยะห่างดายจะมีผลโดยตรงกับรูปร่างสุดท้ายของท่อโดยตรง

ความกลมของท่อมีความสำคัญอย่างมากในการเกิดการเสียหายอันเนื่องมาจากภาระภายนอกระหว่างการวางท่อและระหว่างใช้งาน โดยเปอร์เซนต์ความไม่กลมหนึ่งเปอร์เซนต์จะทำให้ลดความสามารถในการทนต่อแรงดันจากภายนอก 30-40% และ เปอร์เซนต์ความไม่กลม 5% ทำให้ลดความสามารถในการทนต่อแรงดันจากภายนอกถึง 50% [5]

## 5. ไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดล

การวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการขึ้นรูปท่อด้วยวิธี JCO ซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปท่อ X-65 ความหนาของท่อ 37 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 600 มิลลิเมตร โดยมีค่าคุณสมบัติของวัสดุตามตารางที่ 1 โดยกำหนดให้วัสดุมีคุณสมบัติเป็นแบบ Bilinear Hardening โดยทำการวิเคราะห์แบบ Explicit Dynamic ภายใต้เงื่อนไข Plane strain และทำการเลือกใช้เอลิเมนต์ทรง 4 เหลี่ยม 4 โหนด Plane162 เนื่องจากเป็นเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

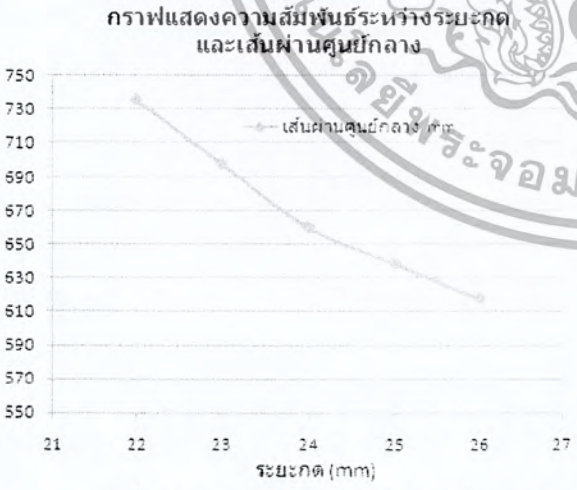
ลิเมนต์พื้นฐานในการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติแบบ Explicit Dynamic

| Young's Modulus | Poisson's Ratio | Yield Stress | Tangent modulus |
|---|---|---|---|
| 216 GPa | 0.27 | 560 Mpa | 1.2 Gpa |

**ตารางที่ 1 ค่าคุณสมบัติของวัสดุ**

สร้างโมเดลของเครื่อง JCO ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยให้ดายและหัวกดเป็นวัสดุแข็งเกร็งส่วนแผ่นวัสดุสามารถเปลี่ยนรูปได้และทำการหาค่าระยะกดที่เหมาะสมโดยปรับเปลี่ยนค่าของระยะกดเป็นค่าต่าง ๆแล้วพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะกดกับรูปทรงสุดท้ายดังแสดงในรูปที่ 2

รูปที่ 1 แสดงโมเดลเครื่อง JCO

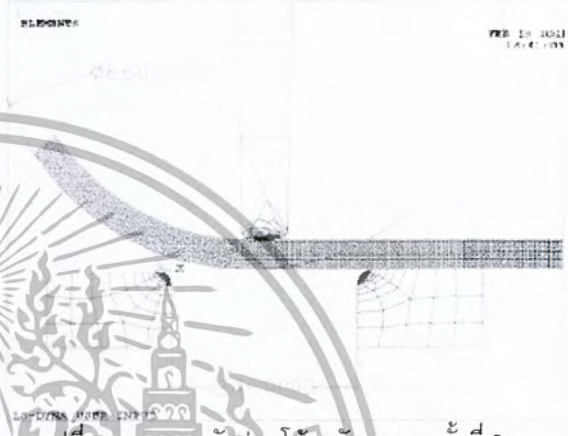



**รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะกด**

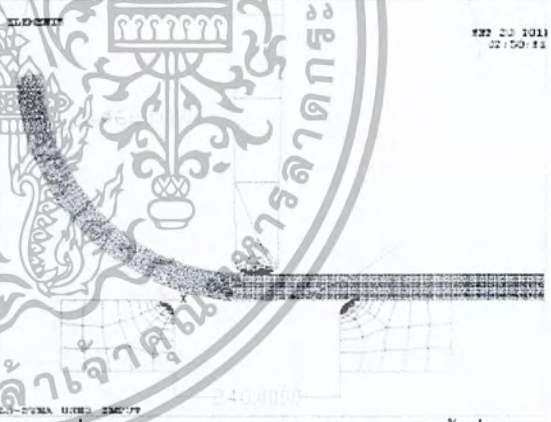
**และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก**

**6. ผลการจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**

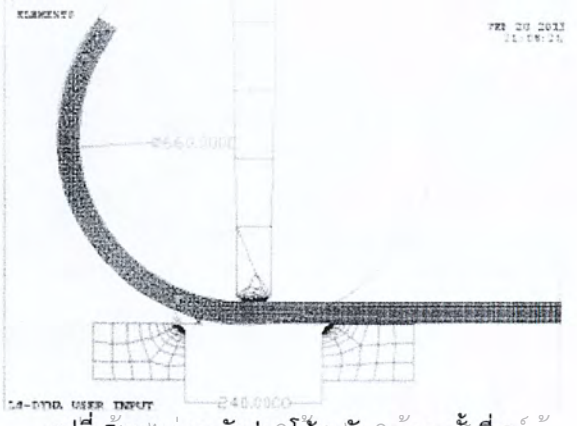
จากผลการจำลองได้ค่าระยะกดเท่ากับ 24 มิลลิเมตร ระยะห่างดาย 240 มิลลิเมตร จะทำให้สามารถขึ้นรูปท่อได้เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 660 มิลลิเมตร ตามต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3 ,4 ,5 และ 6 แสดงการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกหลังการกดครั้งที่ 2 ,5 ,9 และ 12 ตามลำดับ



รูปที่ 3 แสดงการวัดส่วนโค้งหลังการกดครั้งที่ 2

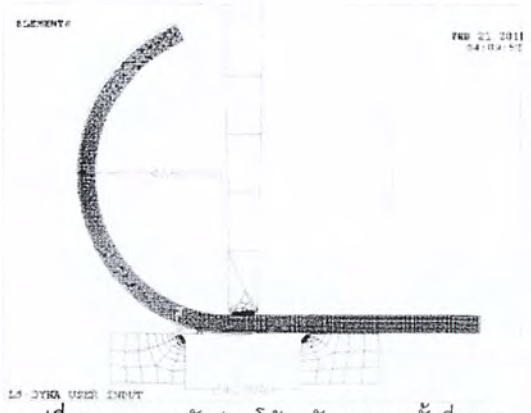


รูปที่ 4 แสดงการวัดส่วนโค้งหลังการกดครั้งที่ 5



รูปที่ 5 แสดงการวัดส่วนโค้งหลังการกดครั้งที่ 9

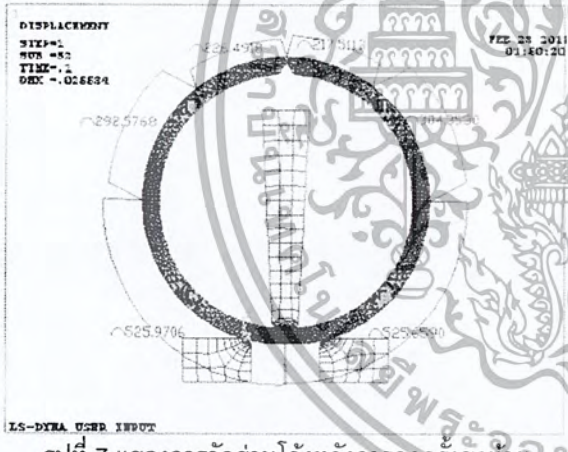
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



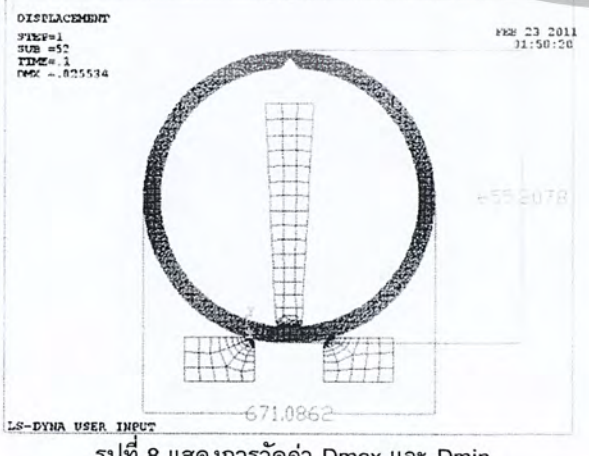
รูปที่ 6 แสดงการวัดส่วนโค้งหลังการกดครั้งที่ 12

หลังจากจำลองการกดครั้งสุดท้าย สามารถวัดเส้นรอบวงเพื่อทำการตรวจสอบเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งได้เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 665.8153 มิลลิเมตรและทำการตรวจสอบค่าความไม่กลมได้เท่ากับ 1.044% สามารถคำนวนได้จากสมการที่ 1

$$\text{Initial Ovality} = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} - D_{min}} \quad (1)$$



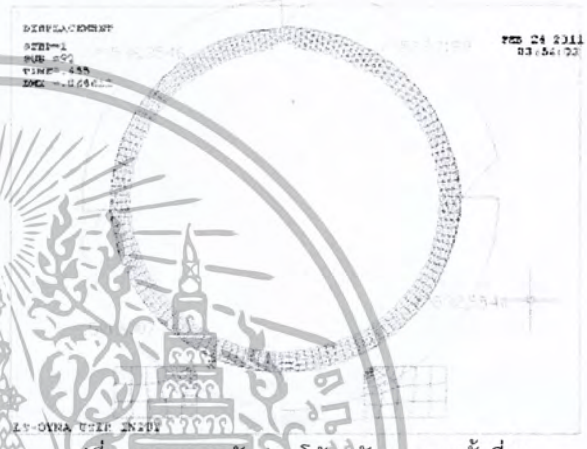
รูปที่ 7 แสดงการวัดส่วนโค้งหลังการกดครั้งสุดท้าย



รูปที่ 8 แสดงการวัดค่า Dmax และ Dmin

**7. ผลการจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการใช้ระยะห่างดาย 320 มิลลิเมตร**

หลังจากจำลองการกดครั้งสุดท้าย จากการเปลี่ยนระยะห่างดายเป็น 320 มิลลิเมตร สามารถวัดเส้นรอบวงเพื่อทำการตรวจสอบเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งได้เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 666.3453 มิลลิเมตรและทำการตรวจสอบค่าความไม่กลมได้เท่ากับ 0.702% สามารถคำนวนได้จากสมการที่ 1



รูปที่ 9 แสดงการวัดส่วนโค้งหลังการกดครั้งที่ 2

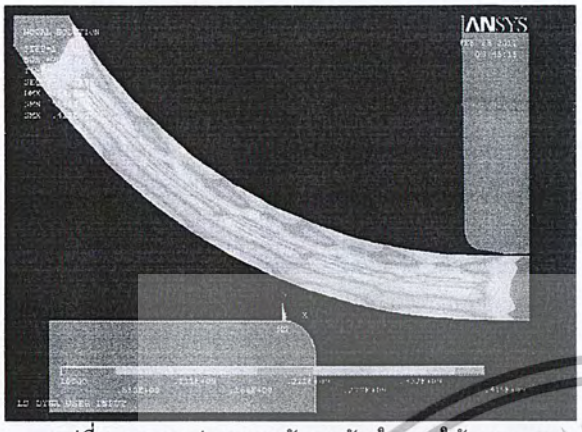
รูปที่ 10 แสดงการวัดค่า Dmax และ Dmin ของระยะห่างดาย 320 มิลลิเมตร

**8. การวิเคราะห์ความเค้นตกค้างเปรียบเทียบระหว่างระยะห่างดาย 240 และ 320 มิลลิเมตร**

หลังจากการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แล้ว วิเคราะห์ความเค้นตกค้างหลังจากการกดครั้ง 5 เปรียบเทียบระหว่างดาย 240 มิลลิเมตร และ 320 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 10 และ 11 ตามลำดับ พบว่า ค่าความเค้นตกค้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการใช้ระยะห่างดาย 240 มิลลิเมตร มีค่ามากกว่า การใช้ระยะดาย 320 มิลลิเมตร




รูปที่ 11 แสดงค่าความเค้นตกค้างในการใช้ระยะดาย 240 มิลลิเมตร

รูปที่ 12 แสดงค่าความเค้นตกค้างในการใช้ระยะดาย 320 มิลลิเมตร

## 9. สรุป และคำแนะนำ

การขึ้นรูปท่อแบบ JCO ของแผ่นโลหะขนาด 660X37X6000mm ถูกจำลองโดยโปรแกรม Ansys ในการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ข้อสรุปดังนี้

1.ใช้ระยะกด 24 มิลลิเมตรโดยวัดจากครั้งที่สัมผัสแผ่นโลหะถึงระยะสุดท้ายในการขึ้นรูปท่อขนาด 660X37X6000mm

2.การกระจายของความเค้นตกค้างลดลงเมื่อใช้ระยะห่างดายที่เพิ่มมากขึ้น

ถ้ามีความต้องการเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่แม่นยำต้องมีการคำนึงถึงแกนสะเทิน(neutral axis)

## 10. เอกสารอ้างอิง

[1] Ansel C. Ugural."Mechanics of Materials," John Wiley & Sons,Inc.2007

[2] Ying Gao, Qiang Li, Meng Xianchang, "Numerical simulation of JCO pipe forming," Computer Science and Information Engineering ,2009 WRI World Congress,vol.2, pp.233-237

[3] Ying Gao, Qiang Li, Lifeng Fan, Xu Wang, "Applications of Finite Element Method in Large-diameter Longitudinal Welded Pipe,"Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2009. ICMTMA '09. International Conference ,vol.3,pp.22-25

[4] Ying Gao, Lijuan Wang, Qiang Li, Lifeng Fan, "Die parameter optimization in JCO bending based on FEM," Computer Engineering and Technology,2010 2nd International Conference ,pp.677-680

[5] Stelios Kyriakides, Edmundo Corona, "Mechanics of Offshore Pipelines," Elsevier,2007 ,pp.108-109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้