

รูปร่างเริ่มต้นที่เหมาะสมของถ้วยทรงกระบอกในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก

(กรณี : เหล็กกล้าไร้สนิม SUS, 304)

Optimum blank-size of a cylindrical cup in deep drawing process

(case : Stainless steel, SUS 304)

ปริญญานิพนธ์

ของ

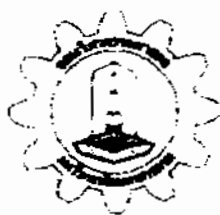
วรวิดิ	บุตรจันทร์	53010372018
สุพัฒพงษ์	ทิพย์ภูมิ	53010372022

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม



คณะกรรมการสอบปริญญาโท ได้พิจารณาปริญญาโทฉบับนี้แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต ของมหาวิทยาลัย
มหาสารคาม

คณะกรรมการสอบปริญญาโท

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุตสาคร อินธิเดช)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิช บุปผไชติ)

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท

มหาวิทยาลัยมหาสารคามได้อนุมัติให้รับปริญญาโทฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิช บุปผไชติ)

หัวหน้าสำนักวิศวกรรมศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บพิธ บุปผโชติ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์และอาจารย์บุญส่ง ฤทธิ์ตา ที่ได้ให้คำแนะนำ แนวคิด ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆมาโดยตลอด จนปริญญานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ ผู้จัดทำปริญญานิพนธ์จึงขอกราบ

ผู้จัดทำปริญญานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ ที่อนุเคราะห์ให้ใช้โปรแกรมคำนวณทางคอมพิวเตอร์ (Dynaform)

ผู้จัดทำปริญญานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องราวต่างๆ รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ผู้จัดทำปริญญานิพนธ์ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ช่วยสละเวลาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยแก้ไขข้อบกพร่องมาโดยตลอด

ผู้จัดทำปริญญานิพนธ์ ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ได้ช่วยทั้งแรงกาย แรงใจ รวมถึงความรู้ความสามารถ จนทำให้ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

วรวิมล บุตรจันทร์

สุพัฒพงษ์ ทิพย์ภูมิ

ชื่อเรื่อง	รูปร่างเริ่มต้นที่เหมาะสมของถ้วยทรงกระบอกในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก (กรณีศึกษา : เหล็กกล้าไร้สนิม, SUS 304)
ผู้วิจัย	นายวรวิทย์ บุตรจันทร์ นายสุพัฒพงษ์ ทิพย์ภูมิ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บพิตร บุปผาโชติ
ปริญญา	วศ.บ. สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2557

บทคัดย่อ

ปัญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปร่างชิ้นงานเริ่มต้นต่อการเกิดคลื่นที่บริเวณปากถ้วยทรงกระบอกในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรมสำเร็จรูป LS-DYNA วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) หนา 2 มิลลิเมตร รูปร่างของชิ้นงานทดสอบมี 3 แบบคือ 1) วงกลม 2) ทฤษฎีของ Kishor N. & Kumar D.R. และ 3) ทฤษฎีของ A.M. Zaky, A.B. Nassr & M.G. El-Sebaie จากผลการทดลองพบว่า การปรับเปลี่ยนรูปร่างชิ้นงานเริ่มต้นโดยใช้ทฤษฎีของ A.M. Zaky, A.B. Nassr & M.G. El-Sebaie จะทำให้เกิดคลื่นบริเวณปากถ้วยน้อยกว่าใช้ทฤษฎีของ Kishor N. & Kumar D.R.

TITLE	Optimum Blank-size of Cylindrical Cup in Deep Drawing Process (Case Study: Stainless Steel, SUS 304)
AUTHOR	Mr. Worawut Butjan Mr. Supatpong Tippoon
ADVISOR	Asst. Prof. Bopit Bubphaehot, Ph.D.
DEGREE	B Eng (Manufacturing Engineering)
UNIVERSITY	Maharakham University YEAR 2014

ABSTRACT

This project aims to study the effect of blank-size on the earing of a cylindrical cup in deep drawing process by using finite element analysis from LS-DYNA program. The material used in the experimental was stainless steel (SUS304) with 2 mm. thick. The geometry of specimen had 3 types as 1) circle, 2) theory of Kishor N. & Kumar D.R. and 3) theory of A.M. Zaky, A.B. Nassr & M.G. El-Sebaie. From experimental, the geometry of blank-size modified by theory of A.M. Zaky, A.B. Nassr & M.G. El Sebaie provided the smaller earing than that from the theory of Kishor N. & Kumar D.R.

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์	2
ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
ขอบเขต	2
งบประมาณ	3
สถานที่ดำเนินการ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
กระบวนการลากขึ้นรูป	4
องค์ประกอบของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป	4
พฤติกรรมการไหลตัวของโลหะแผ่น	5
อัตราส่วนการดึงขึ้นรูป	6
แรงในการจับยึดชิ้นงาน	7
ระยะช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์	8
รัศมีพันซ์และรัศมีตาย	9
การดึงขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างชิ้นงานไม่สมมาตร	10
ข้อบกพร่องในการดึงขึ้นรูป	11
การเกิดรอยย่นที่ปีกถ้วยเหนือนั่งถ้วย	11
เกิดการฉีกขาดที่ก้นถ้วยบริเวณเหนือรัศมีพันซ์	12
เกิดการดัดขาดรอบพันซ์บริเวณระหว่างรัศมีพันซ์และรัศมีตาย	12
แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป	13
เหล็กกล้าไร้สนิม	14
เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก	14
ทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304	15
ทฤษฎีของ Naval Kishor และ D. Ravi Kumar	15
การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของรูปทรงแผ่นขึ้นงานเริ่มต้นเพื่อลดการเกิดรอยดึง	17

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การทดลองกับรูปทรงของแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นที่ผ่านการปรับแก้	18
ทฤษฎีของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie	20
3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	23
การเตรียมอุปกรณ์และชิ้นงานในการทดลอง	23
แผ่นชิ้นงานตามทฤษฎีและสมการของ Naval Kishor และ D. Ravi Kumar	26
แผ่นชิ้นงานตามทฤษฎีและสมการของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie	27
วิธีการวิจัยและดำเนินการ	28
4 ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	29
ผลการศึกษาเงื่อนไขและปัจจัย	29
ความเค้นและความเครียดที่แท้จริง	29
ขีดจำกัดการลากขึ้นรูปลึกที่มีผลต่อวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304	30
ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงาน	33
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	37
สรุปผลการศึกษา	37
ข้อเสนอแนะ	37
บรรณานุกรม	38
ภาคผนวก	40
ภาคผนวก ก การคำนวณและแบบงานผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการศึกษา	41
ภาคผนวก ข การใช้โปรแกรมคำนวณทางคอมพิวเตอร์	44
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์และจำลองภาพการลากขึ้นรูป	63
ประวัติย่อผู้วิจัย	70

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ความเร็วในการลากขึ้นรูป	9
2 ชนิด ส่วนผสม สมบัติทางกล และการใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304)	14

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 องค์ประกอบหลักของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปและลักษณะของแม่พิมพ์ก่อนการขึ้นรูปและระหว่างการขึ้นรูป	4
2.2 แสดงพฤติกรรมและทิศทางการไหลตัวของโลหะแผ่นของกระบวนการดึงขึ้นรูป	5
2.3 กลไกที่ทำให้ปฏิกิริยาขึ้นงานหนาขึ้นและเกิดการย่น	6
2.4 ลักษณะการจับยึดแผ่นขึ้นงานเปล่าแบบส่งกำลังจากตายคู่ขึ้น	7
2.5 ระยะช่องว่างแม่พิมพ์รัศมีพันซ์และรัศมีตาย	8
2.6 การเกิดรอยย่นของขึ้นงาน	11
2.7 การฉีกขาดที่ก้นด้วยบริเวณเหนือรัศมีพันซ์	12
2.8 การฉีกขาดรอบพันซ์	12
2.9 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป	13
2.10 แบบจำลองแบบตาข่าย (meshed) ที่ใช้ในการขึ้นรูปพิมพ์ลึก, สร้างขึ้นในตัวประมวลผลก่อนของ LSDYNA	17
2.11 วิธีการของการรับแก้แผ่นขึ้นงาน	19
2.12 รูปร่างและตำแหน่งขององค์ประกอบก่อนและหลังการลดขนาดขอบ	20
2.13 การเปลี่ยนแปลงของขอบขึ้นงาน	21
2.14 การปรับแก้ขึ้นงานแผ่นเปล่า	22
3.1 การเตรียมเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304)	23
3.2 การเตรียมตะไบแบน	23
3.3 การเตรียมเวอร์เนียร์ไมเตอร์คาลิเปอร์	24
3.4 การเตรียมเครื่องเจียระไน	24
3.5 การเตรียมเครื่องตัดแผ่นโลหะ	25
3.6 การเตรียมขึ้นงานก่อนทำการตะไบลบมุม	25
3.7 แบบที่ทำการเขียนขึ้นมาจากโปรแกรม Auto Cad (Kishor N. และ Kumar D.R.)	26
3.8 ขึ้นงานที่ได้ผ่านการตะไบจนไปถึงรอยเส้นประแล้ว (Kishor N. และ Kumar D.R.)	26
3.9 แบบที่ทำการเขียนขึ้นมาจากโปรแกรม Auto Cad (A.M. Zaky, A.B. Nassr and M.G. El-Sebaie)	27

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3.10 ชิ้นงานที่ได้ผ่านการตะไบจนไปถึงรอยเส้นประแล้ว (A.M. Zaky, A.B. Nassr and M.G. El-Sebaie)	27
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริง	29
4.2 กราฟแสดงขีดจำกัดการลากขึ้นรูปแผ่นเปล่าเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร	30
4.3 กราฟแสดงขีดจำกัดการลากขึ้นรูปแผ่นเปล่าเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ย้ายจุดศูนย์กลาง 6.2 มิลลิเมตร	30
4.4 กราฟแสดงขีดจำกัดการลากขึ้นรูปแผ่นเปล่าเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ย้ายจุดศูนย์กลาง 12.4 มิลลิเมตร	31
4.5 กราฟแสดงขีดจำกัดการลากขึ้นรูปแผ่นเปล่าเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ย้ายจุดศูนย์กลาง 18.6 มิลลิเมตร	31
4.6 กราฟแสดงขีดจำกัดการลากขึ้นรูปแผ่นเปล่าเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากขอบชิ้นงาน 1.2 มิลลิเมตร	32
4.7 กราฟแสดงขีดจำกัดการลากขึ้นรูปแผ่นเปล่าเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากขอบชิ้นงาน 2.4 มิลลิเมตร	32
4.8 กราฟแสดงขีดจำกัดการลากขึ้นรูปแผ่นเปล่าเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากขอบชิ้นงาน 3.6 มิลลิเมตร	33
4.9 การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร	33
4.10 การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ย้ายจุดศูนย์กลาง 6.2 มิลลิเมตร	34
4.11 การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ย้ายจุดศูนย์กลาง 6.2 มิลลิเมตร	34
4.12 การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ย้ายจุดศูนย์กลาง 6.2 มิลลิเมตร	35
4.13 การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากขอบของชิ้นงาน 1.2 มิลลิเมตร	35
4.14 การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากขอบของชิ้นงาน 2.4 มิลลิเมตร	36

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

4.15 การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร สบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากขอบของชิ้นงาน 3.6 มิลลิเมตร	36
---	----

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมต้องการผลิตชิ้นงานให้ได้คุณภาพและมีความเที่ยงตรงตามแบบ และต้องการผลิตชิ้นงานในปริมาณสูงขึ้น จึงมีการใช้แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปเข้ามาช่วยในการผลิตอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการบำรุงรักษาใช้ต้นทุนต่ำ ใช้เวลาในติดตั้งหรือการถอดประกอบน้อย ผลิตชิ้นงานได้หลากหลายรูปแบบ และมีคุณภาพสูงขึ้น เพื่อเพิ่มความสามารถในด้านการผลิตให้กับโรงงาน

แม่พิมพ์โลหะงานลากขึ้นรูป(Dep drawing) ได้มีการพัฒนาขึ้นเรื่อยๆโดยเฉพาะประเทศที่มีความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีไม่ว่าจะเป็น เยอรมัน อเมริกา อังกฤษ และญี่ปุ่น เป็นต้น ซึ่งประเทศเหล่านี้มีความชำนาญในด้านการออกแบบแม่พิมพ์ แต่อย่างไรก็ตามมักจะประสบปัญหาอยู่เป็นประจำ เช่น การเกิดรอยแตก การเกิดรอยย่น(Draw radius) ที่ใหญ่เกินไป การฉีกขาด ค่าClearanceระหว่างPunchกับDieน้อยเกินไปมากเกินไปหรือไม่สม่ำเสมอ มีแรงกดที่Blank holderมากเกินไป จึงทำให้เกิดชิ้นงานเสียหายเป็นจำนวนมาก ซึ่งการแก้ปัญหาต่างๆเหล่านี้ ขึ้นอยู่ประสบการณ์และความชำนาญงานของวิศวกร ที่จะวิเคราะห์สาเหตุข้อบกพร่องและแก้ปัญหาหรือทำการออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นมาใหม่ ให้ได้มาตรฐานและถูกต้อง แต่ก็มีบางปัญหาที่ไม่สามารถแก้ไขได้เนื่องจากไม่ได้เกิดขึ้นจากการออกแบบแม่พิมพ์ แต่เกิดขึ้นจากวัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานไม่เหมาะสมในการศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป

เนื่องจากในปัจจุบันนี้ทางด้านอุตสาหกรรมแม่พิมพ์โลหะมีความต้องการที่จะลดอัตราการสิ้นเปลืองของวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตให้ได้มากที่สุด และรวมถึงการที่จะทำให้ไม่เกิดรอยคลื่นที่ปลายด้วยหลังการลากขึ้นรูป ซึ่งจะช่วยให้โรงงานอุตสาหกรรมสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการที่จะต้องนำรอยคลื่นนี้ไปตัดแต่ง ในการศึกษาค้นคว้าและได้ทำการทดลอง ได้ศึกษาเกี่ยวกับรูปร่างชิ้นงานเริ่มต้นที่เหมาะสมในการลากขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) โดยได้นำทฤษฎีของ Kishor N. และ Kumar D.R. มาเปรียบเทียบกับทฤษฎีของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie ซึ่งทั้งลองทฤษฎีนี้ได้กล่าวถึงเรื่องการปรับลดขนาดชิ้นงานแผ่นเปล่าก่อนทำการลากขึ้นรูป เพื่อที่จะทำให้วัสดุในการขึ้นรูปนั้นไม่รอยคลื่นที่ปลายด้วย ไม่เกิดการเสียหายและไม่ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองวัสดุที่เกิดจากปัญหาต่างๆที่ได้กล่าวมาในข้างต้น ทำให้สามารถลดต้นทุนหรือค่าใช้จ่าย สามารถลดระยะเวลาในการผลิต และยังช่วยทำให้ชิ้นงานที่ผลิตออกมามีมาตรฐานยิ่งขึ้นเป็นที่ยอมรับทั่วไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากระบวนการลากขึ้นรูปและรูปร่างชิ้นงานเริ่มต้นที่เหมาะสม
2. เพื่อลดรอยคลื่นที่บริเวณปลายถ้วย ลดปัญหาการเกิดรอยย่นและลดปัญหาการเกิดการฉีกขาดในกระบวนการลากขึ้นรูป

ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงความเหมาะสมในการลากขึ้นรูปชิ้นงานที่เหมาะสม
2. สามารถแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการลากขึ้นรูป
3. รู้และเข้าใจในการออกแบบและสร้างแผ่นขึ้นงานลากขึ้นรูป
4. ได้ทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการลากขึ้นรูป
5. สามารถลดรอยคลื่นที่บริเวณปลายถ้วยได้
6. สามารถช่วยลดการสิ้นเปลืองวัสดุและค่าใช้จ่ายลงได้
7. ได้ชิ้นงานตามที่ต้องการหลังการลากขึ้นรูป

ขอบเขต

ตัวแปรต้น

1. รูปร่างชิ้นงานเริ่มต้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร
 - การปรับเปลี่ยนรูปร่างชิ้นงานแผ่นเปล่าตามสมการของ Kishor N. และ Kumar D.R.
 - การปรับเปลี่ยนรูปร่างชิ้นงานแผ่นเปล่าตามสมการของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie

ตัวแปรตาม

1. ความหนาของผิวถ้วยหลังการลากขึ้นรูป
2. ความสูงของรอยคลื่นที่ปลายถ้วยในแต่ละทิศทางการรีด
3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นซ์และตาย
4. รอยย่นที่บริเวณต่างๆของถ้วย
5. การฉีกขาดที่บริเวณต่างๆของถ้วย

ตัวแปรควบคุม

1. ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองคือ เหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304)
2. ระยะช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์
3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นชิ้นงานเริ่มต้น 85 มิลลิเมตร
4. ขนาดความหนาของแผ่นชิ้นงานเริ่มต้น 2 มิลลิเมตร
5. แรงในการจับยึดชิ้นงาน
6. อัตราส่วนในการดึงขึ้นรูป
7. รัศมีพื้นซ์และตาย
8. สารหล่อลื่นมาตรฐานเบอร์ 40
9. แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป
10. จำลองการขึ้นรูปด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

สถานที่ดำเนินการศึกษา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

แผนกช่างกลโรงงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการลากขึ้นรูปลึก (Deep drawing)

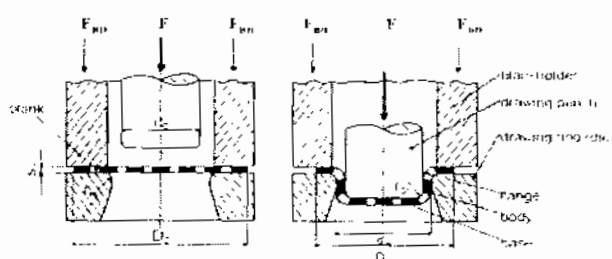
กระบวนการลากขึ้นรูปลึก คือ การแปรรูปโลหะแผ่นเรียบให้เป็นรูปถ้วยหรือลักษณะที่เป็นเปลือกหอยโดยไม่มีรอยตะเข็บบนผิวชิ้นงาน ซึ่งในการลากขึ้นรูปจะพบว่าโลหะแผ่นที่นำมาขึ้นรูปอาจมีรูปร่างไม่ได้ตามที่ต้องการ เช่น เกิดรอยย่น ซึ่งมักจะเกิดในบริเวณที่มีค่าความเครียดอัตราสูง ๆ และการอีกขาดมักเกิดขึ้นในบริเวณที่โลหะแผ่นมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างทันทีทันใดเป็นต้น

สามารถจำแนกกระบวนการลากขึ้นรูปโดยอาศัยลักษณะของการลากขึ้นรูปได้ 3 ประเภท คือ

- 1) การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์โลหะ (Deep drawing using dies)
- 2) การขึ้นรูปโดยใช้แรงดันจากของไหล (Deep drawing using a working medium)
- 3) การขึ้นรูปโดยไฟฟ้าเป็นตัวกระตุ้น (Deep drawing by energy activation)

องค์ประกอบของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป

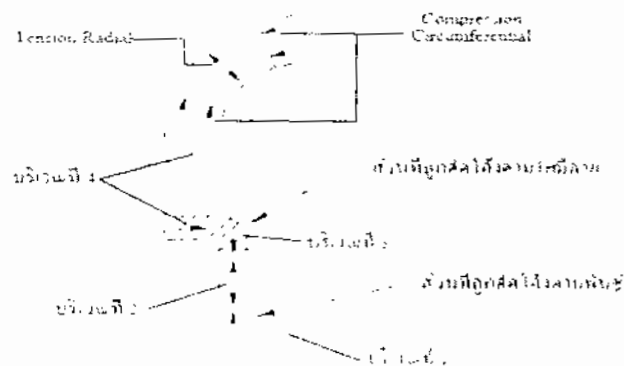
องค์ประกอบหลักของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปและลักษณะแม่พิมพ์ก่อนการขึ้นรูปส่วนที่สัมผัสโดยตรงกับแผ่นชิ้นงานเปล่า มีอยู่ 3 ส่วน คือ ส่วนของ พันช์ ดาย และ แผ่นจับยึดชิ้นงาน ขณะทำการขึ้นรูปแรงจากเครื่องปั๊ม (F) จะถูกส่งผ่านมายังพันช์เพื่อดันให้โลหะแผ่นไหลตัวเคลื่อนเข้าไปในช่องดายขณะเดียวกันก็มีแรงจับชิ้นงาน (F_{BH}) เพื่อควบคุมการไหลตัวของโลหะแผ่นดังที่ได้แสดงในภาพประกอบ 2.1



ภาพประกอบ 2.1 องค์ประกอบหลักของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปและลักษณะของแม่พิมพ์ก่อนการขึ้นรูปและระหว่างการขึ้นรูป ที่มา: (วรวิทย์ พลบุพผา และคณะ. 2553)

พฤติกรรมการไหลตัวของโลหะแผ่น

แรงกดจากพันธจะส่งผ่านมาที่บริเวณกันด้วย (บริเวณที่ 1) ส่งผลให้เกิดการดัดโค้งของแผ่นโลหะ 2 บริเวณ คือ ส่วนโค้งตามรัศมีพันธ (บริเวณที่ 2) และส่วนโค้งตามรัศมีตาย (บริเวณที่ 3) เมื่อพันธเคลื่อนที่ลงล่างส่วนของแผ่นโลหะที่เป็นผนังถ้วยในแนวตั้งจะทำหน้าที่ในการส่งผ่านแรงที่กระทำที่กันด้วยไปยังบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปถาวร (ส่วนของปีกถ้วย Flange) และส่วนโค้งตามรัศมีตายที่แสดงในภาพประกอบ 2.2



ภาพประกอบ 2.2 แสดงพฤติกรรมและทิศทางการไหลตัวของโลหะแผ่นของกระบวนการดัดขึ้นรูป
ที่มา: (วรวิทย์ พลบุพผา และคณะ, 2553)

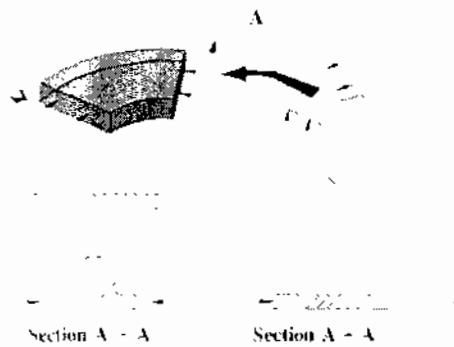
บริเวณที่ 1 ส่วนของกันด้วยแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปเกิดขึ้น พันธจะพาเนื้อโลหะส่วนนี้เคลื่อนที่ตามเข้าไปในช่องว่างตาย และเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นโลหะบริเวณนี้น้อยมาก

บริเวณที่ 2 ส่วนของแผ่นโลหะที่ถูกดัดโค้งตามรัศมีพันธ และผนังถ้วยในแนวตั้งที่ผ่านการเปลี่ยนรูปที่สมบูรณ์มาแล้ว แต่เนื่องจากเป็นส่วนที่ส่งผ่านแรงจากกันด้วยทำให้เกิดความเค้นดัดในแนวแกน ส่งผลให้บริเวณนี้มีโอกาสเกิดการยืดตัวและบางลงของแผ่นโลหะบางกรณีก็เกิดการฉีกขาดขึ้นที่บริเวณนี้

บริเวณที่ 3 เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรในส่วนที่ถูกดัดโค้งตามรัศมีตาย

บริเวณที่ 4 ส่วนของปีกถ้วยเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรมากที่สุดบริเวณนี้เกิดความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงที่เกิดจากปริมาตรของเนื้อโลหะที่มีมากที่ขอบด้านนอกของแผ่นเปล่าพยายามเบียดเพื่อไหลเข้าไปในช่องว่างตายตามแรงดึงจากพันธ และเกิดความเค้นดัดในแนวรัศมีที่เกิดจากการดึงของพันธ การขยายตัวของวัสดุเนื่องจากการเบียดหรือการอัดตัวของวัสดุเนื่องจากการเบียดหรือการอัดตัวในแนวเส้นรอบวงจะทำให้เกิดการขยายตัวในแนวรัศมีและเกิดการฉีกขาดการไหลตัว (แรงเสียดทาน) มักจะพบว่าแผ่น

โลหะที่บริเวณนี้จะมี ความหนาเพิ่มมากขึ้น หรือเกิดการย่น เนื่องจากการอัดตัวในแนวเส้นรอบวง ทำให้เกิดการขยายออกใน 2 แนวแกน คือ ขยายตามแนวรัศมีและขยายออกตามแนวความหนาของแผ่นโลหะ ในบางกรณี เช่น โลหะแผ่นบาง เมื่อค่าความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงสูงขึ้น จะเกิดการโก่งตัวแทนที่จะหนาขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 2.3 กรณีนี้จะพบปัญหาการย่นบนปีกถ้วยร่วมด้วย



ภาพประกอบ 2 3 กลไกที่ทำให้ชิ้นงานหนาขึ้นและเกิดการย่น ที่มา: (วรวิทย์ พสพพสา และคณะ, 2553)

อัตราส่วนการดึงขึ้นรูป

ความยากง่ายในการดึงขึ้นรูปสามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วนการดึงขึ้นรูป หาได้จากอัตราส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นโลหะเปล่าต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพินซ์ดังแสดงในสมการที่ (2.1)

$$\text{Ratio (Drawing } \beta) = \frac{d_0}{d_1} \quad (2.1)$$

วัสดุแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการดึงขึ้นรูปได้ไม่เท่ากัน คุณสมบัตินี้เรียกว่า ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการดึงขึ้นรูป (Limiting Drawing Ratio) แต่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุเพียงอย่างเดียว จะขึ้นอยู่กับความหนาที่เปลี่ยนไปด้วย ถ้าวัสดุมีความหนามากขึ้นโอกาสในการดึงขึ้นรูปได้สำเร็จก็เพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้นค่าความหนาของผิวตาย ผิวของแผ่นจับขึ้นงาน การหล่อลื่นก็มีผลโดยตรงต่อค่า β_{max} ด้วย

แรงในการจับยึดชิ้นงาน (Blank Force Holder)

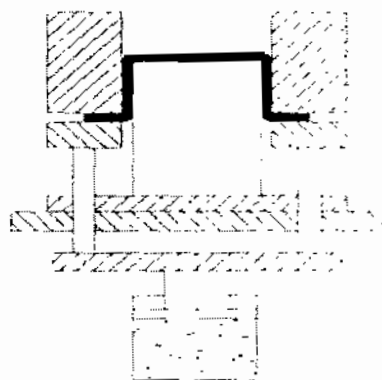
ขณะที่ทำการดึงชิ้นรูปจะเกิดความเค้นอัดในท่บริเวณปีกของถ้วย การใช้แผ่นจับยึดชิ้นงานกดบนบริเวณนี้จะช่วยลดปัญหาการเกิดรอยย่น ซึ่งขนาดของแรงกดที่ใช้ต้องมีความเหมาะสม ถ้าแรงกดน้อยเกินไปจะส่งผลให้เกิดรอยย่นบนปีกและเกิดความเสียหายกับชิ้นงาน ในทางตรงกันข้ามถ้าแรงกดบนแผ่นจับยึดชิ้นงานมากเกินไปจะทำให้เกิดการฉีกขาดบริเวณผนังถ้วยบริเวณเหนือรัศมีพื้นซึ้นมาเล็กน้อยขนาดของแรงดันในการจับยึดชิ้นงานที่เหมาะสมหาได้จากสมการที่ (2.2)

$$P_{BH} = 10^{-3} C [(\beta - 1)^{-3} + \frac{0.005d_0}{T} \sigma_w] \quad (2.2)$$

ดังนั้น แรงในการจับยึดชิ้นงานสามารถคำนวณได้จากสมการที่

$$F_{BH} = P_{BH} \times A_{BH} \quad (2.3)$$

แรงดันที่ใช้ในการจับยึดชิ้นงานจะถูกส่งแรงมาจากตายคู่ชั้นที่อยู่ใต้โบลสเตอร์ของเครื่องปั๊มผ่านแท่งส่งแรงดัน (Cushion Pin) ดังแสดงในภาพประกอบ 2.4 การทำงานของตายคู่ชั้นสามารถควบคุมให้คงที่และสามารถปรับตั้งได้ แรงในการจับยึดชิ้นงานที่กระจายบนแผ่นจับยึดชิ้นงานและจะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งเริ่มต้นเมื่อแผ่นโลหะถูกดึงให้ไหลเข้าไปในช่องตายก็จะเหลือพื้นที่บริเวณปีกลดลงทำให้แรงจับยึดน้อยลง



ภาพประกอบ 2.4 ลักษณะการจับยึดแผ่นชิ้นงานเปล่าแบบส่งกำลังจากตายคู่ชั้น ที่มา: (วรวิทย์ พลบุพผา และคณะ, 2553)

ระยะช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ (Tool Clearance)

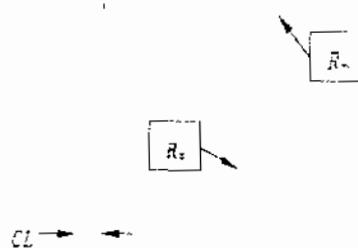
ระยะช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ หมายถึง ช่องว่างที่อยู่ระหว่างพินซ์และดายดังแสดงในภาพประกอบ 2.5 การออกแบบระยะช่องว่างแม่พิมพ์ที่ใหญ่เกินไปจะทำให้รูปร่างของถ้วยบริเวณปากถ้วยด้านบนขยายออกหลังการขึ้นรูปไม่เป็นทรงกระบอก ในขณะที่การใช้ช่องว่างแม่พิมพ์ที่เล็กเกินไปจะส่งผลให้เกิดการรีดสควมหนาผนังที่บริเวณขอบถ้วยด้านบน และต้องเพิ่มแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป ซึ่งอาจทำให้เกิดการฉีกขาดของชิ้นงานได้ ค่าระยะช่องว่างแม่พิมพ์ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุชิ้นงาน ดังแสดงในสมการที่ (2.4)

$$C_L = T + 0.07 \sqrt{10T} \quad \text{สำหรับเหล็กแผ่น} \quad (2.4 \text{ ก})$$

$$C_L = T + 0.02 \sqrt{10T} \quad \text{สำหรับแผ่นอลูมิเนียม} \quad (2.4 \text{ ข})$$

$$C_L = T + 0.04 \sqrt{10T} \quad \text{สำหรับโลหะนอกกลุ่มเหล็ก} \quad (2.4 \text{ ค})$$

$$C_L = T + 0.20 \sqrt{10T} \quad \text{สำหรับโลหะผสมอลูมิเนียมสูง} \quad (2.4 \text{ ง})$$



ภาพประกอบ 2.5 ระยะช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์รีดมีพินซ์และรีดมีดาย ที่มว. (วรวิดิ พลบุพผา และคณะ. 2553)

ค่าระยะช่องว่างที่แนะนำนี้ใช้สำหรับงานรูปถ้วยทรงกระบอกที่มีลักษณะสมมาตรรอบแนวแกน ส่วนงานรูปทรงอื่นๆ เช่น ถ้วยสี่เหลี่ยม บริเวณที่เป็นมุมรีดมีความจำเป็นต้องมีระยะช่องว่างระหว่างพินซ์และดายมากกว่าบริเวณที่เป็นแนวตรงเนื่องจากมีปริมาณของเนื้อวัสดุที่จะไหลเข้ามากกว่า

ตาราง 1 ความเร็วในการลากขึ้นรูป

วัสดุขึ้นงาน	ความเร็วในการลากขึ้นรูป (ฟุต/นาที)
อลูมิเนียม	98
ทองเหลือง	148
สแตนเลส สตีล	40
เหล็กกล้า	59
สังกะสี	72

ที่มา: (พิทักษ์ โสนิราช และ วีระพงษ์ ปลื้มชัยภูมิ. 2555: 23)

รัศมีพันซ์และรัศมีตาย

การกำหนดรัศมีตายดังแสดงในภาพประกอบ 2.5 ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ้วยและความหนาของแผ่นโลหะ รัศมีตายที่มีขนาดใหญ่จะช่วยให้แผ่นโลหะไหลตัวง่ายขึ้น ลดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป แต่รัศมีตายที่มีขนาดใหญ่ก็ทำให้สูญเสียพื้นที่ในการจับยึดแผ่นโลหะ และเพิ่มโอกาสในการเกิดรอยยับบนปีกถ้วย ดังนั้นจึงต้องออกแบบรัศมีตายให้มีขนาดพอเหมาะ แนะนำวิธีการหาค่ารัศมีตายที่เหมาะสม ดังสมการที่ (2.5)

$$R_D = 0.035 [50 + (d_1 - d_0)] \sqrt{T} \quad (2.5)$$

โดยที่ R_D คือ รัศมีของตาย

d_0 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะแผ่น (blank) ก่อนทำการขึ้นรูป

d_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูป

T คือ ความหนาของโลหะแผ่นก่อนทำการขึ้นรูป

และค่ารัศมีตายที่เหมาะสมก็ยังสามารถหาได้จากสมการที่ (2.6)

$$P_D = (5 - 10) \times T \quad (2.6)$$

ส่วนรัศมีพันซ์ R_p ควรจะใหญ่กว่ารัศมีตายประมาณ 3-5 เท่า ค่ารัศมีพันซ์ต้องไม่เล็กกว่ารัศมีตายเนื่องจากอาจทำให้เกิดการกดฉีกเนื้อโลหะให้แยกจากกันเหมือนกับแม่พิมพ์ตัดเฉือนได้

การดึงขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างไม่สมมาตร

ชิ้นงานที่มีลักษณะไม่สมมาตร เช่น รูปถ้วยสี่เหลี่ยม หรือถ้วยวงรี ความเสียหายที่เกิดขึ้นคือ เกิดรอยยับที่ปีกถ้วย เกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณมุมรัศมีพันซ์ หรือรอยฉีกขาดที่เกิดจากการไหลตัวไม่เท่ากันที่บริเวณต่างๆของชิ้นงานที่บริเวณส่วนปีกของชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยม โดยเฉพาะขอบปีกตรงบริเวณรัศมีโค้งจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการโก่งตัวและเกิดรอยยับได้มากที่สุดเพราะเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงมาก และบริเวณรัศมีมุมโค้งเกิดความเค้นดัดด้วย ทำให้การไหลตัวช้ากว่าบริเวณขอบเส้นตรงของถ้วยจึงทำให้เนื้อวัสดุเกิดรัศมีมุมโค้งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการโก่งตัวหรือเกิดรอยยับ ดังนั้นการดึงขึ้นรูปจึงจำเป็นต้องใช้แรงในการ ดึงขึ้นรูปที่สูงขึ้นเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้น ในบางครั้งจะทำให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดตรงบริเวณรัศมีมุมโค้งที่กันถ้วย และรัศมีที่ปากของถ้วยสี่เหลี่ยม เพราะบริเวณนี้จะเกิดความเค้นดัดที่สูง และความหนาของชิ้นงานบริเวณนี้จะลดลงด้วย จึงทำให้เกิดการฉีกขาดได้ง่าย ความสามารถในการดึงขึ้นรูปหรือการเปลี่ยนรูปของแผ่นโลหะขึ้นกับความหนาของวัสดุและอัตราส่วนการขึ้นรูป (กรณีของแผ่นโลหะเป่าและหน้าตัดพื้นที่ที่ไม่กลมคิดค่าอัตราส่วนการดึงขึ้นรูปจากการคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางว่าเป็นวงกลมที่มีพื้นที่เท่ากัน) สำหรับการดึงขึ้นรูปที่ใช้อัตราส่วนการดึงขึ้นรูปเท่ากับ 2.0 สำหรับแผ่นโลหะบาง ($d_0 / t > 25-40$) นั้นจะมีความไวต่อการเกิดรอยยับมาก เพราะมีโมเมนต์ความเฉื่อยในการต้านการโก่งตัวและการเกิดรอยยับต่ำ จึงต้องการแรงกดบนแผ่นจับชิ้นงานที่มากกว่าแผ่นโลหะที่มีความหนามาก สำหรับแผ่นโลหะหนา ($d_0 / T < 25$) โดยทั่วไปมีแนวโน้มที่จะเกิดรอยยับได้ยากทำให้สามารถดึงขึ้นรูปได้โดยไม่ต้องใช้แผ่นจับชิ้นงานและวัสดุที่มีค่า r_m (Normal anisotropy) ที่ต่ำจะต้องใช้แรงกดของแผ่นจับชิ้นงานที่สูง และแรงกดบนแผ่นจับชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุมีค่า r_m เพลนาร์แอนไอโซโทรปี Δr (Planar anisotropy) สูงขึ้นด้วย ดังนั้นการแก้ปัญหาการโก่งตัวหรือการเกิดรอยยับสามารถแก้ไขโดยการใช้รัศมีมุมโค้งของพันซ์และคายใหญ่ขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้วัสดุมีการไหลตัวได้ง่ายขึ้นหรือโดยการเลือกใช้สารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติที่ดีเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นโลหะกับผิวของแม่พิมพ์ให้มีการไหลตัวได้ง่ายขึ้น และยังสามารถแก้ไขปัญหาการเกิดรอยยับได้โดยการนำตัวดรอป (Drawbead) เข้ามาช่วยเพื่อกักการไหลตัวของวัสดุที่บริเวณในแนวตรงให้มีการไหลตัวที่ช้าลงหรือไหลตัวเท่ากับบริเวณขอบปีกตรงรัศมีโค้ง ซึ่งมีการไหลตัวที่ช้าอยู่แล้ว

ข้อบกพร่องในงานดัดขึ้นรูปลึก

ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการดัดขึ้นรูปลึก บ่งบอกถึงการกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการที่ไม่เหมาะสม เช่น แรงในการจับยึดชิ้นงาน และความเร็วของการขึ้นรูป การกำหนดเงื่อนไขของแม่พิมพ์ เช่น รัศมีแม่พิมพ์ การหล่อลื่น การขัดผิวแม่พิมพ์ และการติดตั้งดรอว์บีด รายละเอียดของข้อบกพร่องหลักๆได้อธิบายไว้ดังต่อไปนี้

การเกิดรอยย่นที่ปากถ้วยหรือผนังถ้วย

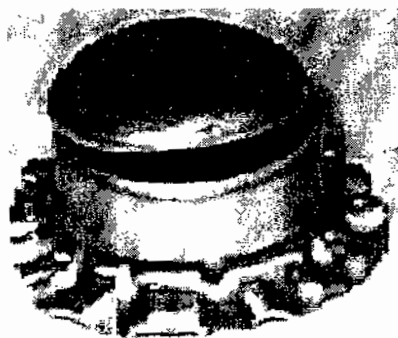


ภาพประกอบ 2.6 การเกิดรอยย่นของชิ้นงาน ที่มา: (วรวิทย์ พลบุพผา และคณะ, 2553)

จากภาพประกอบ 2.6 รอยย่นจะเกิดจากความเค้นแรงอัดที่เกิดในแนวเส้นรอบวงที่ปากถ้วยในขณะที่เนื้อโลหะบริเวณนั้นถูกดึงให้ไหลตัวลงในปากตายและรอยย่นนี้จะไม่สามารถรีดให้หมดไปได้ เมื่อพUNCH เคลื่อนที่ลงจึงพาเอาแผ่นโลหะที่ย่นนี้ไหลลงไปเป็นส่วนของผนังถ้วย สาเหตุอาจเกิดจาก

- 1) ค่าอัตราส่วนการดัดขึ้นรูป (β) สูงเกินไป
- 2) แรงกดบนแผ่นจับชิ้นงานไม่เพียงพอ
- 3) ผิวหน้าตายหรือแผ่นจับชิ้นงานไม่ได้ระนาบ
- 4) รัศมีตายใหญ่เกินไป(พื้นที่ในการจับยึดที่ปากถ้วยน้อย)

เกิดการฉีกขาดที่ก้นด้วยบริเวณเหนือรัศมีพันซ์

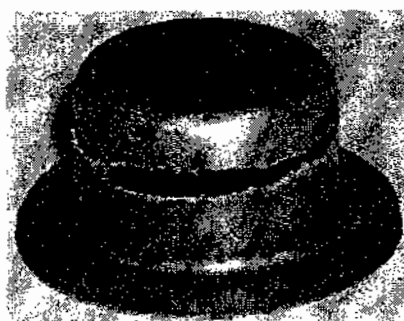


ภาพประกอบ 2.7 การฉีกขาดที่ก้นด้วยบริเวณเหนือรัศมีพันซ์ ที่มา: (วรวิทย์ พลบุพผา และคณะ. 2553)

บริเวณผนังตรงทำหน้าที่ในการส่งผ่านแรงจากพันธึ่ไปดึงให้ชิ้นงานบริเวณปีกด้วยเกิดการเปลี่ยนรูปและไหลลงไปในช่วงว่าง ดวยจึงเกิดความเค้นแรงดึงสูง ถ้าค่าความเค้นแรงดึงที่เกิดขึ้นสูงเกินค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุก็จะทำให้เกิดการฉีกขาด ดังแสดงในภาพประกอบ 2.7 ดังนั้นสาเหตุที่เป็นไปได้และวิธีการแก้ไขดังนี้

- 1) ใช้แรงกดแผ่นจับชิ้นงานสูงเกินไป
- 2) เกิดความเสียดทานสูงระหว่างผิวชิ้นงานบริเวณปีกด้วยและผิวหน้าตาย รวมถึงรัศมีตาย และระหว่างผิวชิ้นงานและผิวหน้าแผ่นจับชิ้นงาน
- 3) ค่าอัตราส่วนการดึงขึ้นรูป (β) สูงเกินไป

เกิดการตัดขาดรอบพันธึ่บริเวณระหว่างรัศมีพันซ์และรัศมีตาย



ภาพประกอบ 2.8 การฉีกขาดรอบพันธึ่บริเวณระหว่างรัศมีพันซ์และรัศมีตาย ที่มา: (วรวิทย์ พลบุพผา และคณะ. 2553)

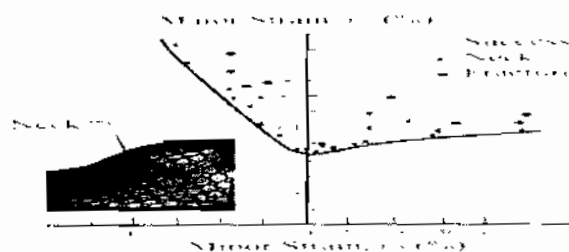
จากภาพประกอบ 2.8 พันซ์จะไม่ทำหน้าที่ในการพาชิ้นงานให้ไหลลงในปากตวยแต่จะทำหน้าที่ในการตัดเฉือนแทน ซึ่งมีสาเหตุมาจาก

- 1) รัศมีพันซ์และด้ายเล็กเกินไป
- 2) ใช้แรงกดแผ่นจับชิ้นงานสูงเกินไป
- 3) ความเร็วในการทำงานสูงเกินไป

แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

ความเครียดสูงสุดของความเครียดหลัก (ϵ_1) และความเครียดรอง (ϵ_2) สามารถกำหนดโดยการวัดความเครียดที่เกิดการคอดและการแตกบนแผ่นโลหะด้วยการใช้กริดวงกลม การวิจัยทางด้านนี้ Keeler เป็นผู้บุกเบิกก่อนตั้งแต่ปี ค.ศ. 1961 และเผยแพร่ในปี ค.ศ. 1965 โดยการพล็อตความเครียดหลักสูงสุดลงมาถึงความเครียดหลักต่ำสุด ซึ่งหาได้จากกริดวงกลมเปลี่ยนรูปเป็นวงรีที่เกิดการคอดและการแตกหลังการยืดแบบสองแกน (Biaxial stretching $\epsilon > 0$; $\epsilon > 0$) หลังจากนั้น Goodwin ทำการวิจัยในปี ค.ศ. 1968 โดยการพล็อตเส้นโค้งรอบๆ บริเวณการดึงและการกด ($\epsilon > 0$; $\epsilon < 0$) โดยใช้การทดสอบเชิงกลที่แตกต่างกัน ดังนั้น แผนภาพ Keeler และ Goodwin จึงใช้ร่วมกัน และเรียกว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

ความเครียดที่พบในบริเวณที่มีการคอดเฉพาะแห่งสามารถหาได้โดยการทดลองด้วยโหลดที่กระทำในวิธีที่ต่างกัน เทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุดคือการพิมพ์หรือกัดกริดวงกลม ลงบนแผ่นโลหะก่อนนำมาขึ้นรูป วงกลมเหล่านี้บิดเบี้ยวไปเป็นวงรีระหว่างการขึ้นรูป หลังจากนั้นจึงหาความเครียดหลักโดยวัดเส้นผ่านศูนย์กลางหลักและเส้นผ่านศูนย์กลางรองของวงรี ความเครียดนี้อาจเขียนในรูปของความเครียดจริงหรือความเครียดวิศวกรรม และค่าความเครียดของวงกลมที่มีการคอดทั้งหมดหรือบางส่วนถือว่า “เสียหาย” ส่วนความเครียดของวงกลมที่ห่างออกไปจากนี้ถือว่า “ปลอดภัย” เมื่อลงจุดความเครียดเหล่านี้ก็สามารถสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปและพฤติกรรมการยืดตัวของแผ่นโลหะที่อยู่บนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป



ภาพประกอบ 2.9 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ที่มา: (วรวิทย์ พลบุพผา และคณะ. 2553)

เหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) หรือเหล็กกล้าสแตนเลส นิยมใช้กับงานที่ทนการกัดกร่อนจากสารเคมีทั้งในสภาวะปกติหรือที่อุณหภูมิสูงๆ เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของโครเมียมมากกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ โดยโครเมียมที่เติมเข้าไปนั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันการกัดกร่อน ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากโครเมียมรวมตัวกับออกซิเจนกลายเป็นโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) มีลักษณะเป็นชั้นบางๆ (thin film) ปิดผิวของเหล็กไว้ไม่ให้เหล็กทำปฏิกิริยากับออกซิเจนกลายเป็นสนิมได้ ฟิล์มของโครเมียมออกไซด์นี้จะมีสมบัติเป็นแพสซีวิตี้ (passivity) หรือเป็นแคโทดิก (cathodic) มีลักษณะคล้ายเกราะป้องกันไม่ให้เนื้อเหล็กทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (electrochemical) แล้วเกิดการกัดกร่อนขึ้นได้

ตาราง 2 ชนิด ส่วนผสม สมบัติทางกล และการใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304)

คุณสมบัติทางกล	ความเค้นแรงดึงสูงสุด (MPa) 515
	ความเค้น ณ จุดคราก (MPa) 205
	ความเหนียว (LL; 50 mm) 40
สภาวะ	อบอ่อน
ชนิด	ออสเทนิติก
การใช้งาน	อุปกรณ์เคมีและการผลิตอาหาร
ส่วนผสม (wt%)	คาร์บอน (C) $\leq 0.08\%$
	แมงกานีส (Mn) $\leq 2.00\%$
	นิกเกิล (Ni) $\leq 9.00\%$
	โครเมียม (Cr) $< 19.00\%$

ที่มา: (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2556: 198)

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก

เหล็กกลุ่มนี้ได้แก่ โครม-นิกเกิล 300 และโครม-นิกเกิล-แมงกานีส 200 นิกเกิลที่ผสมอยู่ในเหล็กกลุ่มนี้จะทำออสเทนไนต์มีเสถียรภาพและเกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้อง โดยทั้ง 2 กลุ่มนี้ไม่สามารถชุบแข็งได้ และแม่เหล็กดูดไม่ติด หากต้องการเพิ่มความแข็งต้องใช้วิธีขึ้นรูปเย็น

สแตนเลสกลุ่มนี้นิยมใช้มากที่สุดคือ 18-8 โครเมียม-นิกเกิล โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของคาร์บอน โดยจะมีเหล็ก 74 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนถึง 1 เปอร์เซ็นต์ หากปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า 0.03 เปอร์เซ็นต์ จะไม่มีคาร์ไบด์เกิดขึ้น

โดยปกติแล้วสแตนเลสกลุ่มนี้จะทนการกัดกร่อนดีกว่ากลุ่มเฟอร์ริติกและมาร์เทนซิติก ถ้าหากมีการทำความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 480-860 องศาเซลเซียส จะทำให้โครเมียมคาร์ไบด์เกิดขึ้นที่ขอบเกรนโดยการตกผลึก ทำให้บริเวณรอบผิวนิกคาร์ไบด์มีปริมาณโครเมียมที่ต่ำลงและอาจเป็นสาเหตุของการกัดกร่อนที่เรียกว่า การกัดกร่อนตามแนวขอบเกรน (intergranular corrosion)

ทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม sus 304

พฤติกรรมของแผ่นโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการลากลื่นรูป ในระหว่างการเปลี่ยนรูปถาวร สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นความเครียดและคุณสมบัติของวัสดุเป็นแบบแลนไอโซทรอปี (Anisotrop)

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2.7)$$

โดยที่	σ	คือ ความเค้นที่แท้จริง
	K	คือ สัมประสิทธิ์ความแข็งแรง
	ε	คือ ความเครียดที่แท้จริง
	n	คือ การทำให้แข็งด้วยความเครียด

ทฤษฎีของ Naval Kishor และ D. Ravi Kumar

ความสามารถในการขึ้นรูปโลหะขึ้นอยู่กับสองปัจจัย คือ

- 1) ความสามารถของวัสดุบริเวณริมขอบในการไหลได้อย่างราบรื่นในระนาบของแผ่นภายใต้แรงเฉือน
- 2) ความสามารถของวัสดุผนังด้านข้างที่จะต้านทานการเปลี่ยนรูปในทิศทางตามความหนา

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (2.8)$$

- โดยที่ r คือ อัตราส่วนความเครียดช่วงวัสดุ
 ϵ_w คือ ความเครียดแท้จริงในทิศทางความกว้าง
 ϵ_r คือ ความเครียดแท้จริงในทิศทางความหนา

โดยทั่วไปแผ่นโลหะจะเป็นวัสดุแอนไอโซทรอปิก กล่าวคือคุณสมบัติของแผ่นจะแตกต่างกันไปในทิศทางที่แตกต่างกัน การเฉลี่ยอัตราส่วนความเครียดช่วงพลาสติก ($\bar{r}$) ให้อัตราส่วนของการเฉลี่ยความแข็งแรงในการไหลในระนาบของแผ่นเพื่อเฉลี่ยความแข็งแรงในการไหลปกติกับระนาบของแผ่น $\bar{r}$ ที่สูงกว่าหมายถึงความต้านทานที่สูงขึ้นในการทำให้บางลง คือ ถ้วยที่ลิกก็สามารถลากขึ้นรูปได้ตั้งนั้นค่าที่สูงของ $\bar{r}$ หมายถึงวัสดุมีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดีมากคือค่า LDR สูง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่น่าพอใจสำหรับการดำเนินการทางการลากขึ้นรูปพื้ลิกแต่วัสดุที่มีแอนไอโซทรอปิกสูงยังนำไปสู่การเกิดรอยดิ่งในถ้วยที่ขึ้นรูปการเกิดรอยดิ่งถูกให้คำจำกัดความว่าเป็นการก่อตัวที่โค้งงออยู่ด้านบนของถ้วยขึ้นรูป รอยดิ่งจะเกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของโลหะที่ไม่สม่ำเสมอในทิศทางที่แตกต่างกันและเกี่ยวข้องโดยตรงกับแอนไอโซทรอปิกเชิงระนาบ (Δr) การคลาดเคลื่อนของความแข็งแรงในการไหลในระนาบของแผ่นโลหะจะถูกเรียกว่าเป็นแอนไอโซทรอปิกเชิงระนาบ

ในกรณีของวัสดุไอโซทรอปิกที่ซึ่งแอนไอโซทรอปิกเชิงระนาบ (Δr) เป็นศูนย์รอยดิ่งจะไม่ก่อตัว แต่แผ่นโลหะที่ถูกผลิตโดยการรีดเย็นและการอบอ่อน/หลอมและเนื่องจากการเรียงตัวของผลึกในระนาบหรือทิศทางใดทิศทางหนึ่งได้ก่อตัวขึ้นในแผ่นโลหะ ซึ่งส่งผลในสมบัติแอนไอโซทรอปิกในแผ่นโลหะ ถ้า Δr เป็นบวกรอยดิ่งก่อตัวที่ 0 องศา และ 90 องศาไปในทิศทางกรริด และรอยดิ่งก่อตัวที่ +45 องศาไปในทิศทางกรริดถ้าหาก Δr เป็นลบ ตามหลักการแผ่นโลหะที่ $\bar{r}$ สูงมากและ Δr เป็นศูนย์เป็นสิ่งที่ดีสำหรับการลากขึ้นรูปพื้ลิกเพื่อขึ้นรูปถ้วยที่ลิกมากในการขึ้นรูปเพียงครั้งเดียว แต่แทบจะเป็นไปไม่ได้ในการผลิตแผ่นโลหะที่มีแอนไอโซทรอปิกที่สูงมากกว่าปกติและมีแอนไอโซทรอปิกเชิงระนาบเป็นศูนย์ส่วนใหญ่แผ่นโลหะ ซึ่งมีค่าแอนไอโซทรอปิกสูงเป็นปกติแอนไอโซทรอปิกเชิงระนาบก็จะสูงด้วย นำไปสู่การเกิดรอยดิ่งอย่างมีนัยสำคัญ การเกิดรอยดิ่งไม่เป็นที่พึงปรารถนาเนื่องจากมันต้องมีขั้นตอนกระบวนการเพิ่มเติมที่ซึ่งขอบด้านบนไม่สม่ำเสมอของถ้วยจะต้องถูกตัดแต่ง สิ่งนี้ส่งผลในการสูญเสียของวัสดุ อัตราการผลิตและค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น

การหาค่าเหมาะสมที่สุดของรูปทรงแผ่นขึ้นงานเริ่มต้นเพื่อลดการเกิดรอยดิ่ง

1) ขั้นตอนที่น่ามาใช้สำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุดของรูปทรงแผ่นขึ้นงานเริ่มต้นเพื่อลดการเกิดรอยดิ่ง ความสูงสุดท้ายของถ้วยจากถ้วยขึ้นรูปถูกคำนวณโดยใช้สมการ (2.9) จากระยะช่วงชักของพื้นที่ที่กำหนดไว้ ความสูงสุดท้ายของถ้วยถูกคำนวณโดยใช้

$$D^2 = d^2 + 4dh \quad (2.9)$$

โดยที่ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นขึ้นงาน
d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางพื้นที่
h คือ ความสูงถ้วย

2) แผ่นขึ้นงานทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร ถูกทำการจำลองและทิศทางการก่อตัวของรอยดิ่งถูกตั้งข้อสังเกต ในการทำงานขณะนี้ รอยดิ่งถูกพบที่ 0 องศา และ 90 องศา ไปยังทิศทางการรีดเนื่องจากบวกค่า Δr โดยทั่วไปแล้วสำหรับวัสดุ SUS 304 แผ่นขึ้นงานสามารถจะปรับแก้โดยวิธีใดวิธีหนึ่งโดยการกำจัดวัสดุจาก 0 องศา และ 90 องศา ไปในทิศทางการรีดหรือโดยการเพิ่มวัสดุใน 45 องศา ไปยังทิศทางการรีด พบว่าวิธีแรกของการหาค่าเหมาะสมที่สุดดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการที่สอง

STEP 2 TIME = 3187803E-003



ภาพประกอบ 2.10 แบบจำลองแบบตาข่าย (meshed) ที่ใช้ในการขึ้นรูปพิมพ์ลิ่กสร้างชิ้นในตัวประมวลผลก่อนของ LSDYNA ที่มา: (Kishor N. and Kumar D.R , 2002)

3) ค่า Δr_1 และ Δr_2 ถูกตรวจสอบดังต่อไปนี้

$$\Delta r_1 = r_0 - r_{45} \quad (2.10)$$

$$\Delta r_2 = r_{90} - r_{45} \quad (2.11)$$

4) สำหรับการปรับแก้แผ่นชิ้นงานทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตามต้องการถูกวาดลงบนกระดาษกราฟและแบ่งออกเป็นแปดส่วนเท่าๆ กัน โดยการลากแปดเส้นจากจุดศูนย์กลางที่ระยะห่าง 45 องศา พิกัดของจุดซึ่งเส้นเหล่านี้บรรจบกับเส้นรอบวงที่แสดงในภาพประกอบ 2.11

5) เพื่อลดวัสดุใน 0 องศา และ 90 องศา ไปในทิศทางการรีด, พิกัดเดียวกันของสี่จุดใหม่ที่ได้มา (สองจุดในแต่ละแกน x และแกน y) จุดเหล่านี้จะเป็นหมายเลข 1', 3', 5' และ 7' พิกัด x และ y ของสี่จุดเหล่านี้ว่าจะได้มาดังนี้

$$\text{การปรับแก้ พิกัด } X = R - 3\Delta r_1 \quad (2.12)$$

$$\text{การปรับแก้ พิกัด } Y = R - 3\Delta r_2 \quad (2.13)$$

ในที่นี้ R คือรัศมีของชิ้นงานวงกลม Δr_1 และ Δr_2 ถูกคำนวณจากสมการ (2.10) และ (2.11) พิกัดดังกล่าวข้างต้นได้มาหลังจากการเผ่าสังเกตการไหลของวัสดุในจำนวนมากของการจำลอง

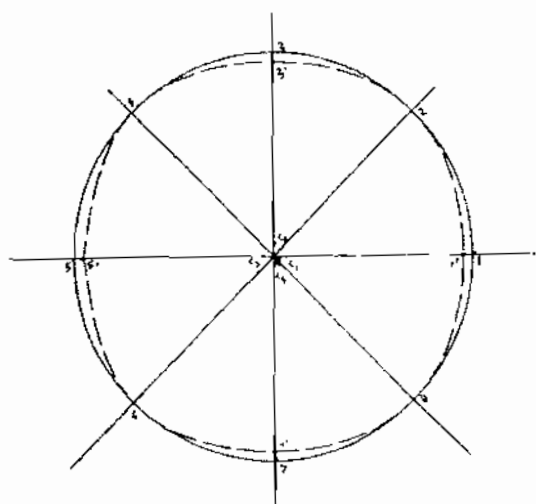
6) บัดนี้สี่เส้นโค้งจะถูกลากกับสี่จุดศูนย์กลางใหม่ C_1 , C_2 , C_3 และ C_4 (ดังแสดงในรูปที่ 2.11) แต่ละเส้นโค้งเชื่อมต่อสามจุด สองจุดซึ่งเป็นจุดตัดของเส้นลากที่ 45 องศา ไปในทิศทางการรีดและจุดที่สามเป็นจุดระบุใหม่บนแกน x หรือแกน y แล้วแต่กรณี สี่เส้นโค้งเหล่านี้คือ 2 1' 8, 8 7' 6, 6 5' 4 และ 4 3' 2

การทดลองกับรูปทรงของแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นที่ผ่านการปรับแก้

รูปทรงจากขั้นตอนแรกของการปรับแก้ถูกใช้ในการตัดแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นเพื่อที่จะดำเนินการทดลองหรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง การเกิดรอยตึงเกิดจากรูปทรงของแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นที่เหมาะสมจากการจำลองได้ถูกพิสูจน์จากการทดลอง ถ้างานนี้จะต้องทำโดยการทดลอง มันจะต้องมีจำนวนมากของการทดลองและกินเวลามากและใช้พลังงานมาก แผ่นชิ้นงานของรูปทรงที่เหมาะสมถูกตัดครั้งแรกที่ขนาดใกล้เคียงโดยเครื่องเฉือนและเสร็จสิ้นกับขนาดที่แน่นอนโดยการตะไบ เนื่องจากการปรับแก้ของรูปทรงของแผ่นชิ้นงานเริ่มต้น

พื้นที่หน้าตัดของแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นมีการเปลี่ยนแปลงและจึงเกิดขึ้นจริงของค่า DR ขั้นตอนในการคำนวณเส้นผ่าศูนย์กลางสมมุติ ระบุไว้ด้านล่าง

- 1) แผ่นชิ้นงานทรงกลมถูกสร้างขึ้นใน AutoCAD ตามขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ต้องการแผ่นชิ้นงานทรงกลมถูกปรับแก้โดยการวาดสี่เส้นโค้ง (แต่ละเส้นผ่านจุดสามจุดต่อเนื่อง) ตามที่อธิบายไว้ในภาพประกอบที่ 2.11
- 2) พื้นที่หน้าตัด (A_f) ของแผ่นชิ้นงานที่ผ่านการปรับแก้ได้มาทันทีโดยการใช้ AutoCAD
- 3) เส้นผ่าศูนย์กลางสมมุติคำนวณโดยการสมมติพื้นที่สุดท้ายคือเท่ากับพื้นที่ของวงกลม ($A_f = 3.14d_f^2$)
- 4) Effective DR คำนวณดังนี้ $Effective\ (DR) = \frac{d_f}{d_{cup}}$ (2.14)



ภาพประกอบ 2.11 วิธีการของการปรับแก้แผ่นชิ้นงาน ที่มา; (Kishor N. and Kumar D.R., 2002)

C: จุดศูนย์กลางเริ่มต้น

C_1 , C_2 , C_3 and C_4 : จุดศูนย์กลางใหม่บนแผ่นชิ้นงานที่ปรับแก้

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 : จุดบนแผ่นชิ้นงานวงกลม

1', 2', 3', 4', 5', 6', and 7' 8' : จุดบนแผ่นชิ้นงานที่ปรับแก้หลังจากขั้นตอนแรก

————— แผ่นชิ้นงานวงกลมเริ่มต้น

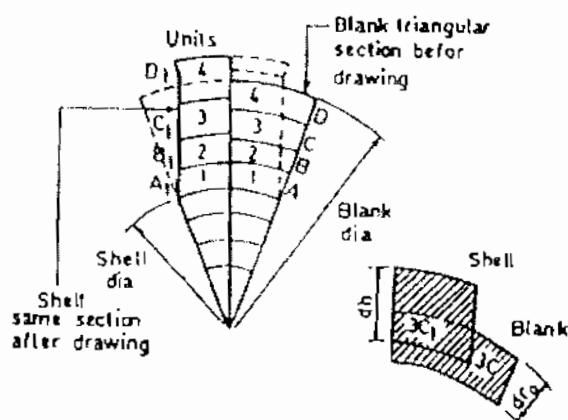
----- แผ่นชิ้นงานที่ปรับแก้หลังจากขั้นตอนแรก

ทฤษฎีของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie

ขณะที่ส่วนหนึ่งของแผ่นชิ้นงานด้านใต้ตัวจับยึดชิ้นงานถูกขึ้นรูปไปทางคอดาย ในขณะที่พื้นที่ที่ยับเข้าไปยังคาย เอลิเมนต์ในริมขอบอาจจะอยู่ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกันของความเค้นและความเครียด ตามสามแกนพิกัดมุมฉาก (t, r, ϕ) ความเครียดหลักคือ $\epsilon_r, \epsilon_\phi$ และ ϵ_θ การประเมินผลทางทฤษฎีของค่าแอนไอโซทรอปิกติภายในระนาบของแผ่นชิ้นงานที่สัมพันธ์กันกับทิศทางการรีด ถูกกำหนดโดย Hill

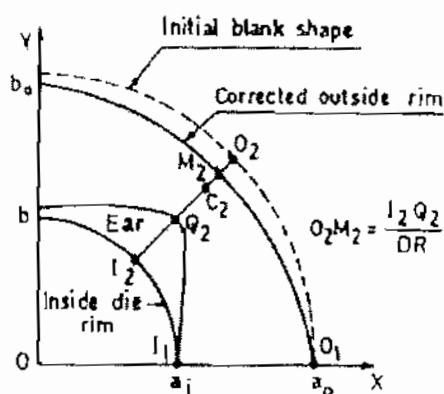
$$R(\phi) = \frac{H + (2N - F - 4H)\sin^2\phi\cos^2\phi}{F\sin^2\phi + G\cos^2\phi} \quad (2.15)$$

ขณะที่ ϕ แสดงให้เห็นถึงการวางแนวทิศทางการรีด และ H, G, F, N เป็นคุณลักษณะทางพารามิเตอร์ของสภาพปัจจุบันของค่าแอนไอโซทรอปิ



ภาพประกอบ 2.12 รูปร่างและตำแหน่งขององค์ประกอบก่อนและหลังการลดขนาดขอบ ที่มา: (A.M. Zaky, A.B. Nassr and M.G. El-Sebaie, 1997)

จากภาพประกอบ 2.12 แสดงแผ่นชิ้นงานซึ่งถูกทำเครื่องหมายที่มีเส้นรัศมีและวงกลมร่วม ศูนย์กลางหากเอลิเมนต์มีจำนวนตัวเลขเป็นกลุ่ม m และผิวถูกขึ้นรูปในลักษณะนี้และเอลิเมนต์บางอย่างถูกตรวจสอบหลังจากการดำเนินการ จากนั้น



ภาพประกอบ 2.13 การเปลี่ยนแปลงของขอบชิ้นงาน ที่มา: (A.M. Zaky, A.B. Nassr and M G. I (Sebare, 1997)

การกระจายตัวของความสูงของถ้วยสามารถคำนวณได้ที่ขนาดของแผ่นชิ้นงาน พันซ์และตายที่มี และค่าของแอนไอโซทรอปีปกติ R (D) เป็นที่ทราบว่ามีสมบรูณ์กว่าทั้งหมดของการวางตัวในทิศทาง จาก ภาพประกอบ 2.13 แสดงรูปร่างทรงกลมเริ่มต้นของแผ่นชิ้นงานที่มีรอยตัด ระยะห่างระหว่างช่องว่าง ระหว่างตายและขอบของแผ่นชิ้นงานจะถูกลดลงเพื่อให้ได้รูปร่างที่เหมาะสมของแผ่นชิ้นงาน ซึ่งรูปทรงแผ่น ชิ้นงานถูกกำหนดเป็นเรขาคณิตเช่นว่า จุดตามขอบแผ่นชิ้นงานไปถึงพร้อมกันที่ช่องว่างระหว่างตายที่จุด O_1 ถึงจุด I_1 บนปากตายและจุดโดนัล O_2 ย้ายไปยังตำแหน่งลูกศร Q_2 เราใช้จุดตัดของการขยายของเส้นตรง O_2Q_2 กับเส้นโค้งของปากตายเป็น I_2 จุดโดนัลใหม่ของขอบแผ่นชิ้นงานอาจจะได้มาเป็น M_2

$$O_2M_2 = \frac{I_2Q_2}{DR} \quad (2.16)$$

โดยที่	O_2	คือ รัศมีชิ้นงานจริง
	M_2	คือ รัศมีชิ้นงานที่ผ่านการปรับแก้
	I_1	คือ ระยะขอบภายในของตาย
	Q_2	คือ รอยคลิ่นที่ขอบบนสุด
	DR	คือ อัตราส่วนการสากขึ้นรูป

รัศมีของแผ่นขึ้นงานทรงกลมเป็น $r_b - \text{CO}_2$ ระยะรัศมีของรูปทรงที่เหมาะสมเป็น $r_{\text{opt}} = OM^2$
 ความสูงของรอยตึงเป็น $E(\theta) = I_2 Q_2$ แต่ $OM_2 = \text{CO}_2 - M_2 O_2$ จากนั้น

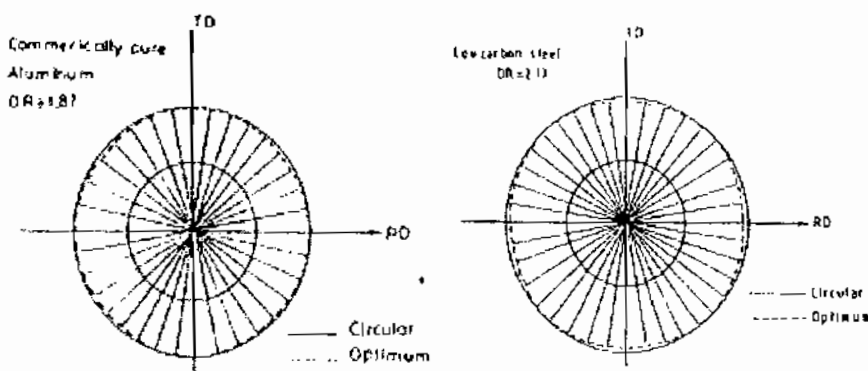
$$r_{\text{opt}} = r_b \frac{E(\theta)}{DR} \quad (2.17)$$

โดยที่ r_{opt} คือ ระยะรัศมีของแผ่นขึ้นงาน
 r_b คือ รัศมีแผ่นขึ้นงาน
 $E(\theta)$ คือ ความสูงครีป
 DR คือ อัตราส่วนการลากขึ้นรูป

จากการวิเคราะห์ข้างต้นค่าแอนไอโซโทรปิกเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการแยกจำแนกความแตกต่าง
 ระหว่างโลหะแผ่นที่แตกต่างกันในกระบวนการลากขึ้นรูปพิมพ์ลึก คำนี้อาจสามารถแนะนำเป็น

$$RRM = \frac{R(\theta)_{\text{max}}}{R(\theta)_{\text{min}}} \quad (2.18)$$

โดยที่ RRM คือ อัตราส่วนขั้นต่ำของแอนไอโซโทรปิกปกติ
 $R(\theta)_{\text{max}}$ คือ ค่าสูงสุดของแอนไอโซโทรปิก
 $R(\theta)_{\text{min}}$ คือ ค่าต่ำสุดของแอนไอโซโทรปิก



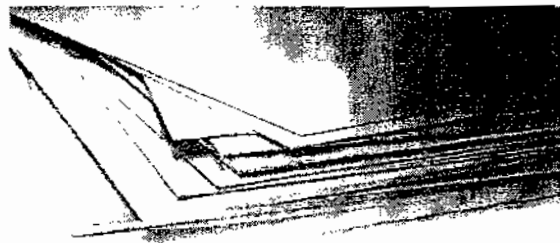
ภาพประกอบ 2.14 การปรับแก้ขึ้นงานแผ่นเปล่า ที่มา: (A.M. Zaky, A B. Nassr and M.G. ElSebaie, 1997)

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

การเตรียมอุปกรณ์และชิ้นงานในการทดลอง

3.1 เหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ใช้เพื่อเป็นวัสดุสร้างเครื่องจักรและอุปกรณ์แปรรูปอาหาร (food processing equipment) เนื่องจากมีความแข็งแรงทนทาน และทนต่อการกัดกร่อน พื้นผิวสัมผัสกับอาหารได้ (food contact surface) มีความปลอดภัยและถูกสุขลักษณะทำความสะอาดง่าย เป็นกลางไม่ทำปฏิกิริยากับอาหาร



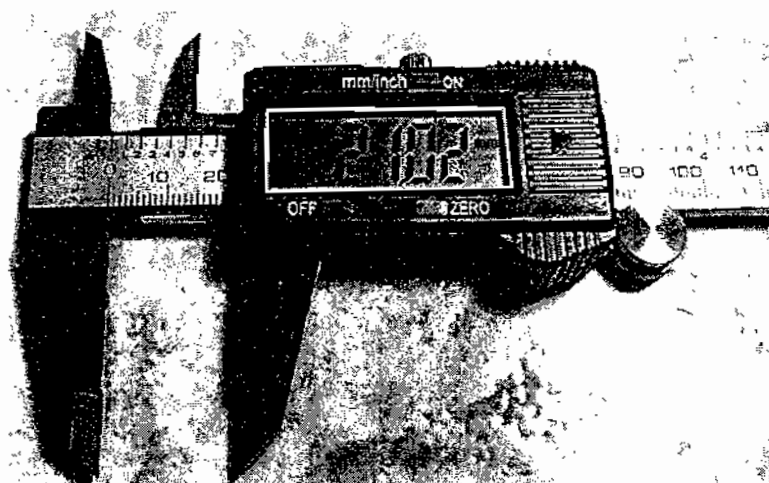
ภาพประกอบ 3.1 การเตรียมเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304)

3.2 ตะไบแบน ใช้ในการตะไบขอบของชิ้นงานที่จะทำการทดลอง เพื่อจะทำให้ผิวขอบชิ้นงานเรียบได้ขนาดและง่ายต่อการทดลองชิ้นงานในการลากชิ้นรูป



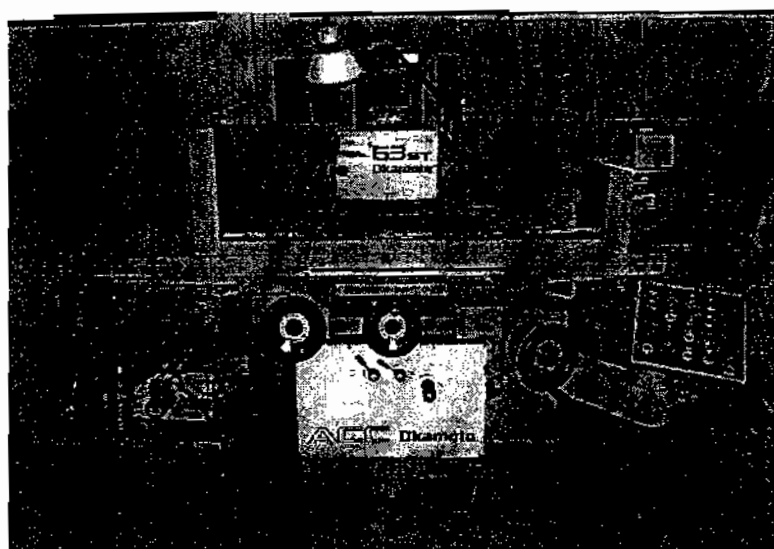
ภาพประกอบ 3.2 การเตรียมตะไบแบน

3.3 เวอร์เนียคาลิเปอร์แบบดิจิทรอน ยี่ห้อ mitutoyo ใช้ในการวัดชิ้นงานอะลูมิเนียม SUS304 ที่จะใช้ในการทดลอง ทั้งไดมิเตอร์และความหนาชิ้นงานใช้วัดค่าความละเอียดได้ 0.01 มิลลิเมตรเพื่อใช้ในการวัดชิ้นงานแบบหยาบ ๆ



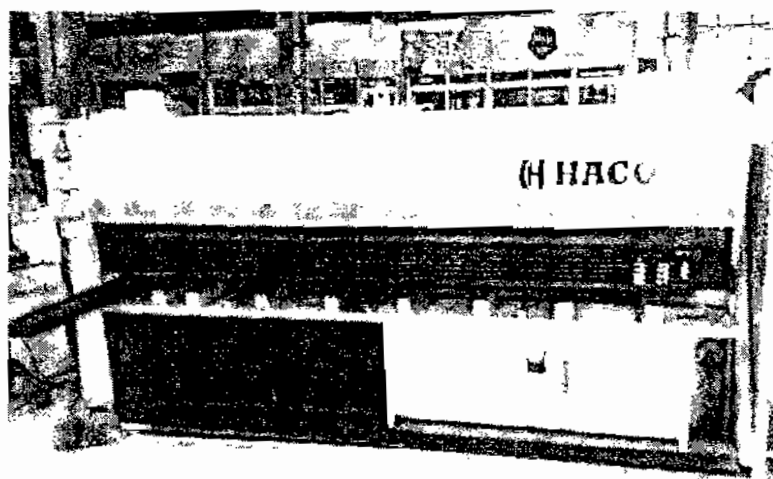
ภาพประกอบ 3.3 การเตรียมเวอร์เนียมิเตอร์คาลิเปอร์แบบดิจิทรอน

3.4 เครื่องเจียรในแนวราบ เพื่อขัดผิวแผ่นโลหะให้มีความเรียบ



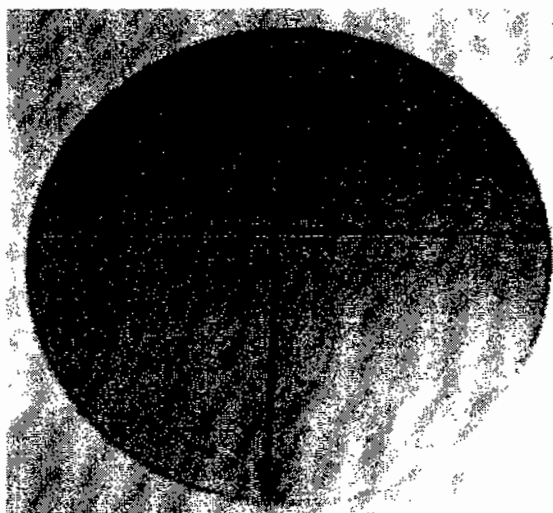
ภาพประกอบ 3.4 การเตรียมเครื่องเจียรใน

3.5 เครื่องตัดแผ่นโลหะ รุ่น HACO ใช้ในการตัดแผ่นสแตนเลส ให้ได้ขนาดชิ้นงานที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการลากขึ้นรูปแผ่นสแตนเลส



ภาพประกอบ 3.5 การเตรียมเครื่องตัดแผ่นโลหะ

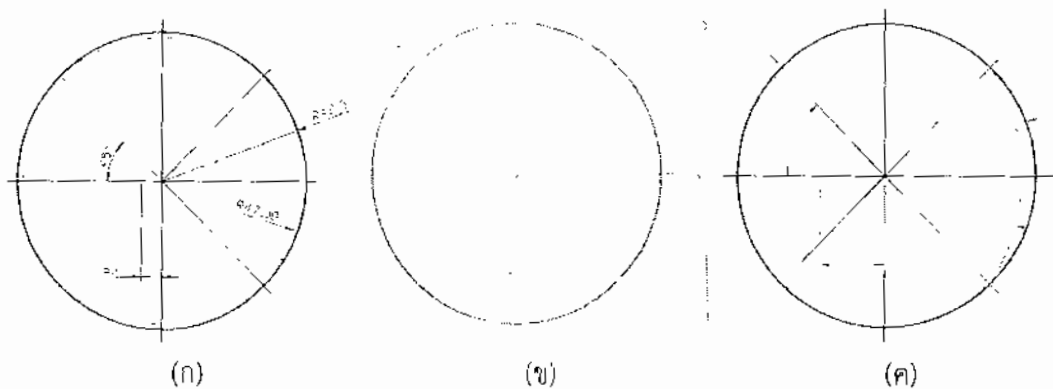
3.6 แผ่นชิ้นงานสแตนเลส ถูกตัดด้วยเครื่องตัดแผ่นโลหะ รุ่น HACO ความหนา 2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 3.7 การเตรียมชิ้นงานก่อนทำการตะไบลบมุม

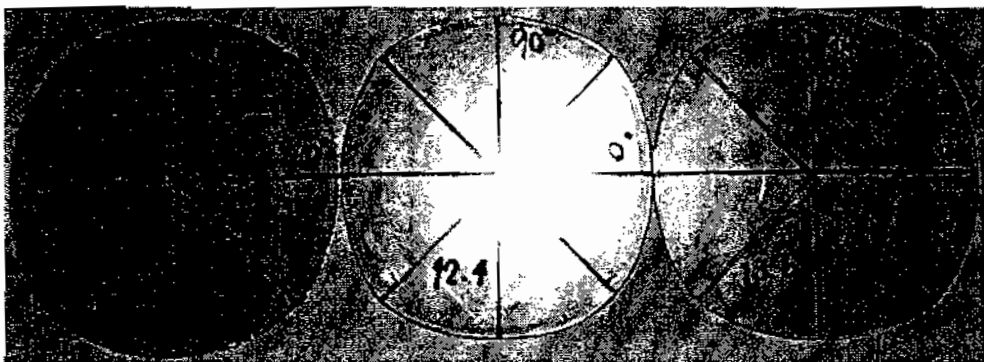
แผ่นชิ้นงานตามทฤษฎีและสมการของ Kishor N. และ Kumar D.R.

ทำการเขียนแบบด้วยโปรแกรม Auto Cad ให้มีขนาดเท่าชิ้นงานจริงคือเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร ตามภาพประกอบ 3.7 (ก) ย้ายจุดศูนย์กลางออกไป 6.2 มิลลิเมตร ตามทิศทางการรีด 0 องศา และ 90 องศา (ข) ย้ายจุดศูนย์กลางออกไป 12.4 มิลลิเมตร ตามทิศทางการรีด 0 องศาและ 90 องศา (ค) ย้ายจุดศูนย์กลางออกไป 18.6 มิลลิเมตร ตามทิศทางการรีด 0 องศาและ 90 องศา



ภาพประกอบ 3.7 แบบที่ทำการเขียนขึ้นมาจากโปรแกรม Auto Cad (Kishor N. และ Kumar D.R.)

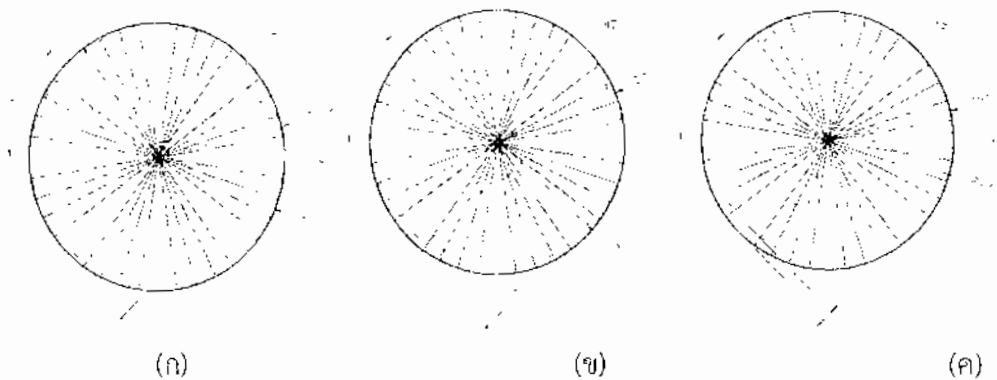
ติดแบบลงโปบนแผ่นชิ้นงาน แล้วทำการตะไบชิ้นงานออกจนไปถึงรอยเส้นประที่อยู่ในแบบ ทำให้ครบทั้ง 4 ด้าน ดังภาพประกอบที่ 3.8



ภาพประกอบ 3.8 ชิ้นงานที่ได้ผ่านการตะไบจนไปถึงรอยเส้นประแล้ว (Kishor N. และ Kumar D.R.)

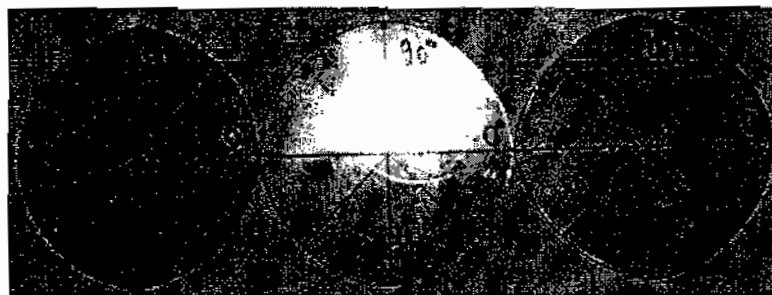
แผ่นชิ้นงานตามทฤษฎีและสมการของ A.M. Zaky, A.B. Nassr and M.G. El-Sebaie

ทำการเขียนแบบด้วยโปรแกรม Auto Cad ให้มีขนาดเท่าชิ้นงานจริงคือเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร ตามภาพประกอบที่ 3.9 (ก) ทำการลดขนาดชิ้นงานตามทิศทางการรีด 45 องศา ลงมา 1.2 มิลลิเมตรจากขอบชิ้นงาน (ข) ทำการลดขนาดชิ้นงานตามทิศทางการรีด 45 องศา ลงมา 2.4 มิลลิเมตรจากขอบชิ้นงาน (ค) ทำการลดขนาดชิ้นงานตามทิศทางการรีด 45 องศา ลงมา 3.6 มิลลิเมตรจากขอบชิ้นงาน



ภาพประกอบ 3.9 แบบที่ทำการเขียนขึ้นมาจากโปรแกรม Auto Cad (A.M. Zaky, A.B. Nassr and M.G. El-Sebaie)

ติดแบบลงโปบนแผ่นชิ้นงาน แล้วทำการตะไบชิ้นงานออกจนไปถึงรอยเส้นประที่อยู่ในแบบ ทำให้ครบทั้ง 4 ด้าน ดังภาพประกอบที่ 3.10



ภาพประกอบ 3.10 ชิ้นงานที่ได้ผ่านการตะไบจนไปถึงรอยเส้นประแล้ว (A.M. Zaky, A.B. Nassr and M.G. El-Sebaie)

วิธีการวิจัยและดำเนินการ

ทำการศึกษาปัญหาและแนวทางการวิจัย

ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

ทำการออกแบบชิ้นงานตามที่เรากำลังต้องการคือ

- 1) ชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร
- 2) ชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร การปรับเปลี่ยนรูปร่างชิ้นงานแผ่นเปล่าตามสมการของ Kishor N. และ Kumar D.R. โดยการย้ายจุดศูนย์กลาง 6.2 มิลลิเมตร ในทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา
- 3) ชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร การปรับเปลี่ยนรูปร่างชิ้นงานแผ่นเปล่าตามสมการของ Kishor N. และ Kumar D.R. โดยการย้ายจุดศูนย์กลาง 12.4 มิลลิเมตร ในทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา
- 4) ชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร การปรับเปลี่ยนรูปร่างชิ้นงานแผ่นเปล่าตามสมการของ Kishor N. และ Kumar D.R. โดยการย้ายจุดศูนย์กลาง 18.6 มิลลิเมตร ในทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา
- 5) การปรับเปลี่ยนรูปร่างชิ้นงานแผ่นเปล่าตามสมการของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie โดยการปรับลดขนาดจากขอบของชิ้นงาน 1.2 มิลลิเมตร ในทิศทางการรีด 45 องศา
- 6) การปรับเปลี่ยนรูปร่างชิ้นงานแผ่นเปล่าตามสมการของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie โดยการปรับลดขนาดจากขอบของชิ้นงาน 2.4 มิลลิเมตร ในทิศทางการรีด 45 องศา
- 7) การปรับเปลี่ยนรูปร่างชิ้นงานแผ่นเปล่าตามสมการของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie โดยการปรับลดขนาดจากขอบของชิ้นงาน 3.6 มิลลิเมตร ในทิศทางการรีด 45 องศา

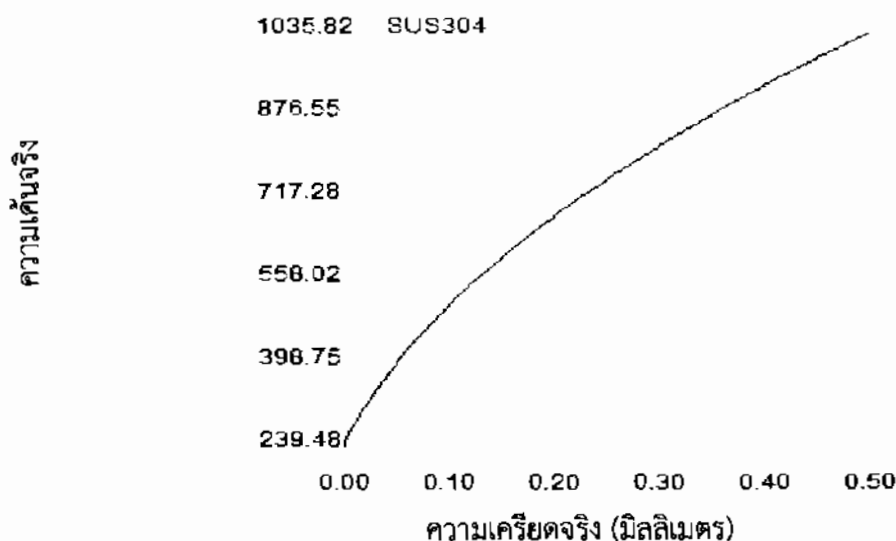
บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาเงื่อนไขและปัจจัย

การศึกษากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างชิ้นงานเริ่มต้น ที่มีผลต่อการเกิดรอยคลื่นที่น้อยที่สุดของถ้วยทรงกระบอกในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก ซึ่งจะเกิดความไม่สม่ำเสมอของขอบถ้วยเป็นหูชั้น 4 หู หรือที่เรียกว่าเอียร์ริง (Earing) เป็นส่วนที่ไม่ต้องการ เพราะต้องเพิ่มขั้นตอนในการตัดเอาส่วนนี้ออก ทำให้สิ้นเปลืองวัสดุ รวมถึงความหนาของผนังถ้วยจะทำให้ไม่เท่ากัน เอียร์ริงเกิดจากสมบัติทางด้านทิศทางของวัสดุ ความสูงของวัสดุจะเพิ่มขึ้นเมื่อโลหะแผ่นมีค่า Planer anisotropy สูง โลหะแผ่นซึ่งผ่านกระบวนการการรีดโลหะจะมีสมบัติเฉพาะทางด้านทิศทางคือความสามารถในการรับแรงและการยืดตัวจะไม่เท่ากันในแต่ละทิศทางค่าความสามารถในการยืดตัวหรือหดตัวในแต่ละทิศทางแสดงโดยค่า Plastic strain ratio (r) ดังนั้นในโครงการวิจัยชุดนี้จึงได้มุ่งเน้นที่จะศึกษาขนาดของแผ่นเปล่าที่เหมาะสม ก่อนการปรับเปลี่ยนรูปร่างเพื่อลดขั้นตอนในการตัดส่วนปลายขอบถ้วยทิ้งไป โดยการศึกษาด้วยโปรแกรมไฟไนเอลิเมนต์ ก่อนการทดลองจริง ซึ่งเป็นหนทางหนึ่งที่ทำให้ต้นทุนการผลิตของโรงงานสามารถลดลงได้

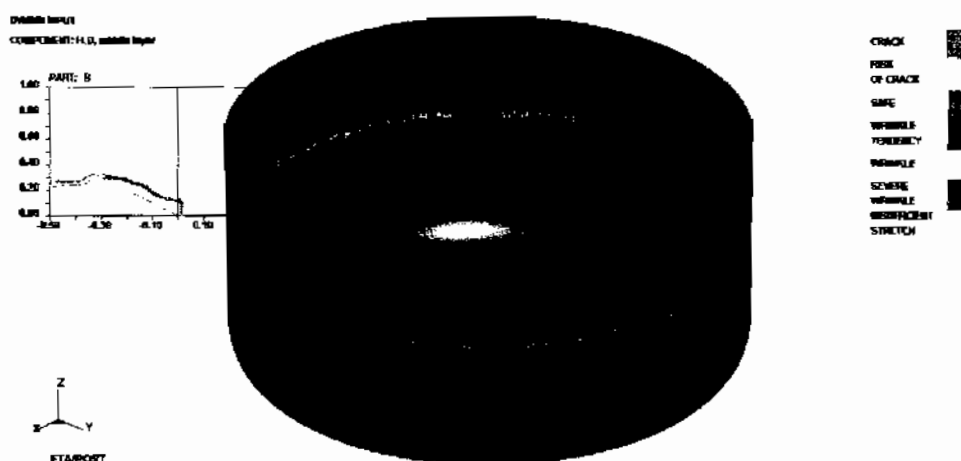
4.1 ความเค้นและความเครียดที่แท้จริง



ภาพประกอบ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริง

4.2 ซีดจำกัดการลากขึ้นรูปลึกที่มีผลต่อวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304

4.2.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 4.2 กราฟแสดงขีดจำกัดการลากขึ้นรูปแผ่นเปล่าเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร

4.2.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ทำการย้ายจุดศูนย์กลาง 6.2 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ Kishor N. และ Kumar D.R.)



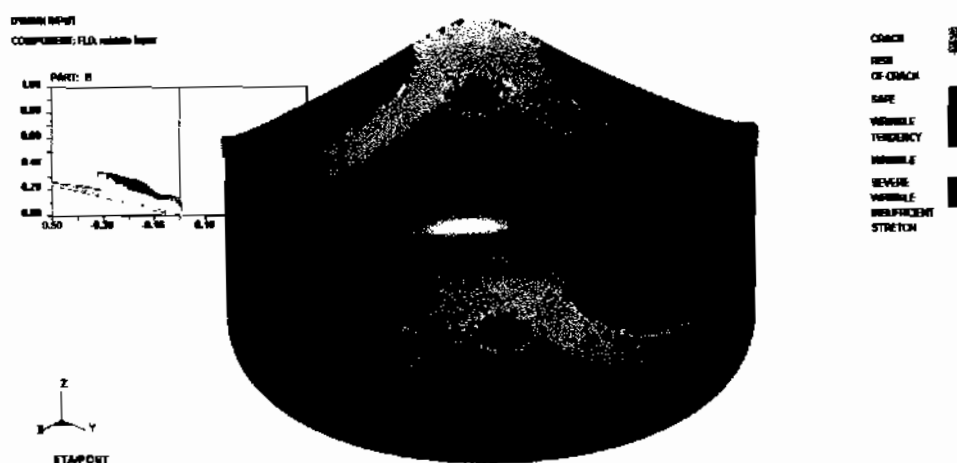
ภาพประกอบ 4.3 กราฟแสดงขีดจำกัดการลากขึ้นรูปแผ่นเปล่าเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ย้ายจุดศูนย์กลาง 6.2 มิลลิเมตร

4.2.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ทำการย้ายจุดศูนย์กลาง 12.4 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ Kishor N. และ Kumar D.R.)



ภาพประกอบ 4.4 กราฟแสดงขีดจำกัดการลากขึ้นรูปแผ่นเปล่าเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ย้ายจุดศูนย์กลาง 12.4 มิลลิเมตร

4.2.4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ทำการย้ายจุดศูนย์กลาง 18.6 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ Kishor N. และ Kumar D.R.)



ภาพประกอบ 4.5 กราฟแสดงขีดจำกัดการลากขึ้นรูปแผ่นเปล่าเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ย้ายจุดศูนย์กลาง 18.6 มิลลิเมตร

4.2.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 1.2 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie)



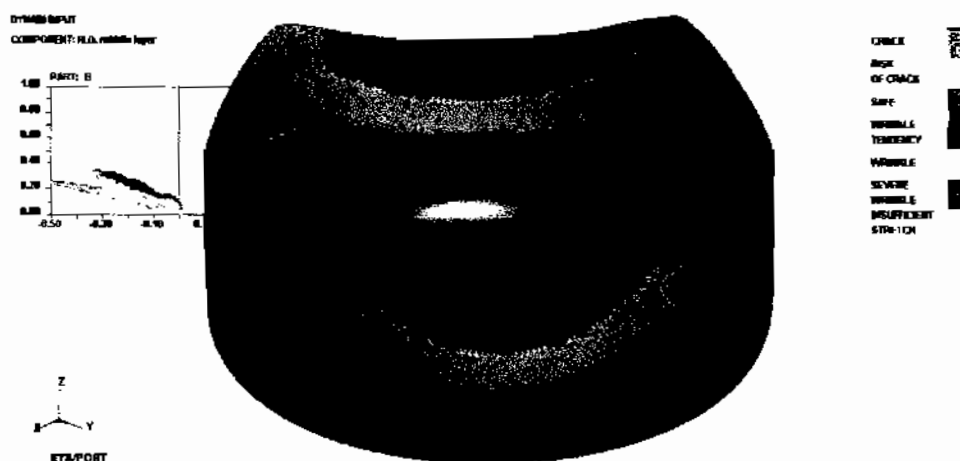
ภาพประกอบ 4.6 กราฟแสดงขีดจำกัดการลากขึ้นรูปแผ่นเปล่าเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 1.2 มิลลิเมตร

4.2.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 2.4 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie)



ภาพประกอบ 4.7 กราฟแสดงขีดจำกัดการลากขึ้นรูปแผ่นเปล่าเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 2.4 มิลลิเมตร

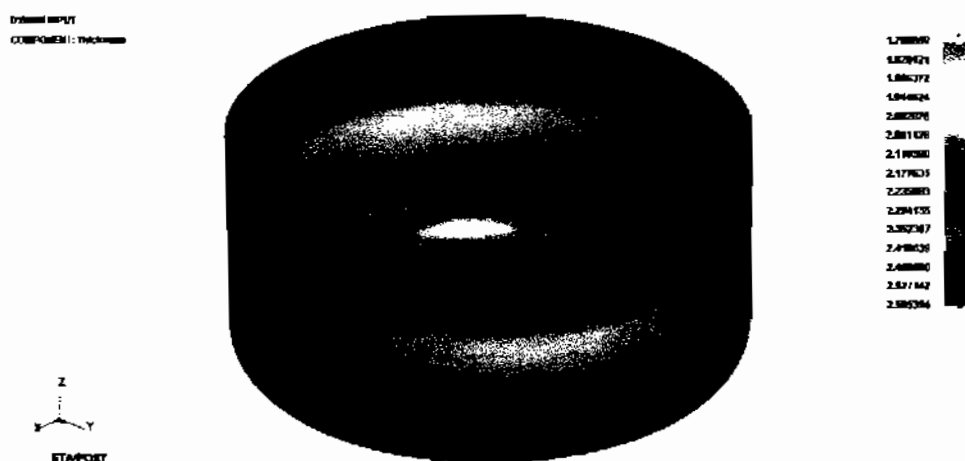
4.2.7 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 3.6 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie)



ภาพประกอบ 4.8 กราฟแสดงขีดจำกัดการลากขึ้นรูปแผ่นเปล่าเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 3.6 มิลลิเมตร

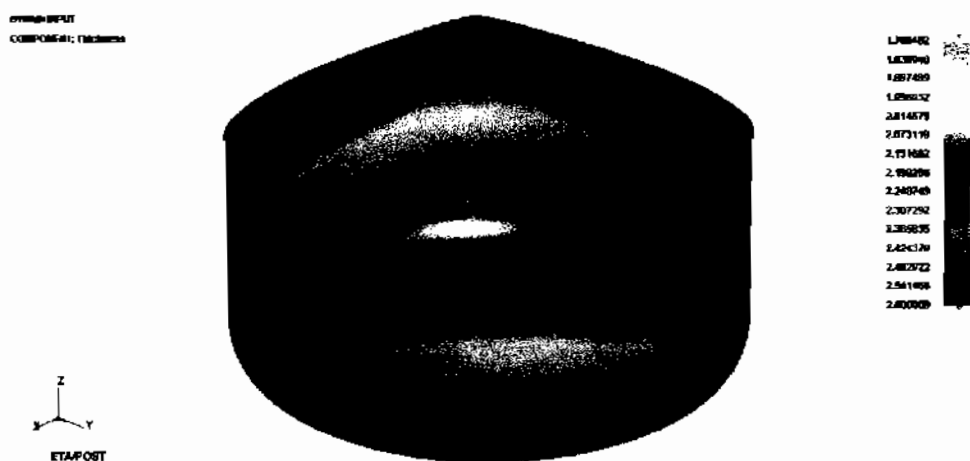
4.3 ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงาน

4.3.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร



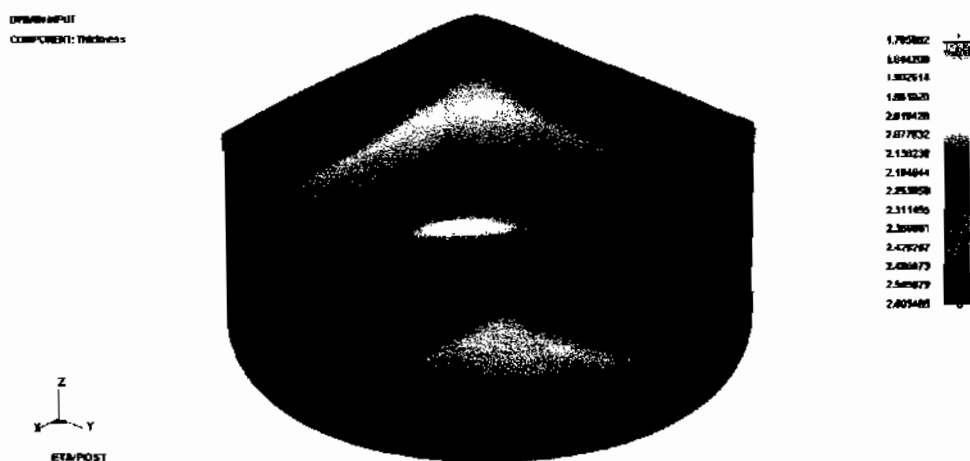
ภาพประกอบ 4.9 การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร

4.3.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา
ทำการย้ายจุดศูนย์กลาง 6.2 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ Kishor N. และ Kumar D.R.)



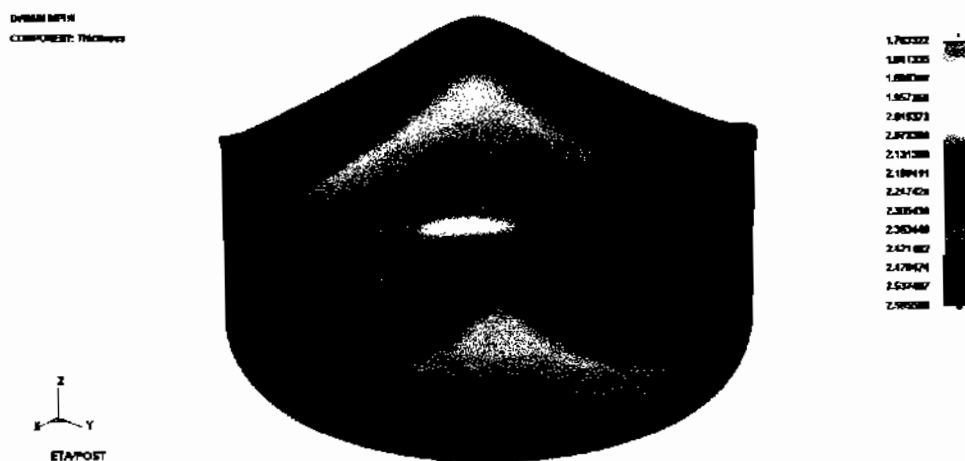
ภาพประกอบ 4.10 การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า
85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ย้ายจุดศูนย์กลาง 6.2
มิลลิเมตร

4.3.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา
ทำการย้ายจุดศูนย์กลาง 12.4 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ Kishor N. และ Kumar D.R.)



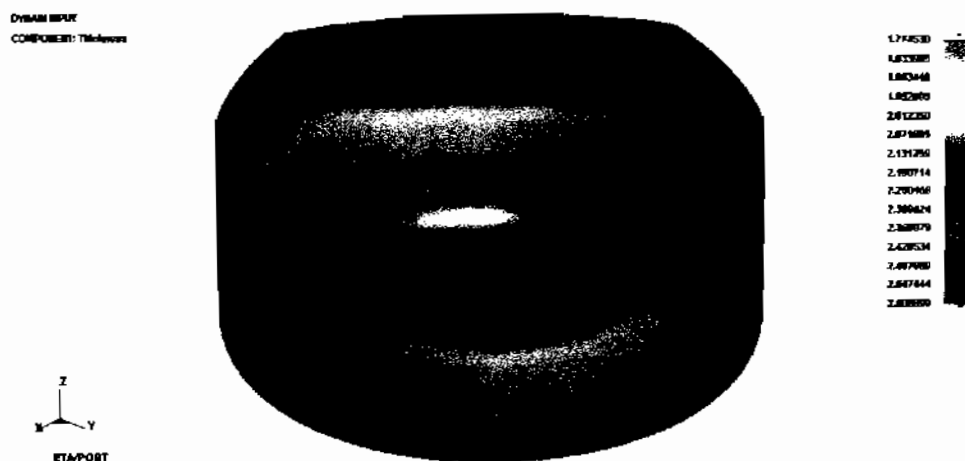
ภาพประกอบ 4.11 การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า
85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ย้ายจุดศูนย์กลาง 12.4
มิลลิเมตร

4.3.4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร สบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ทำการย้ายจุดศูนย์กลาง 18.6 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ Kishor N. และ Kumar D.R.)



ภาพประกอบ 4.12 การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร สบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ย้ายจุดศูนย์กลาง 18.6 มิลลิเมตร

4.3.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร สบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 1.2 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie)



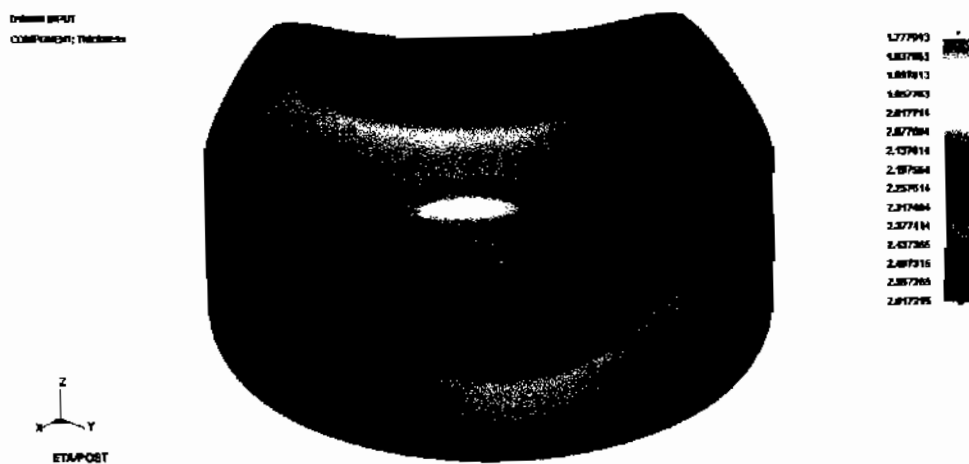
ภาพประกอบ 4.13 การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร สบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 1.2 มิลลิเมตร

4.3.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 2.4 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie)



ภาพประกอบ 4.14 การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 2.4 มิลลิเมตร

4.3.7 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 3.6 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie)



ภาพประกอบ 4.15 การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 3.6 มิลลิเมตร

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการศึกษา

จากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาการเกิดรอยคลิ่นที่ขอบปลายถ้วยทรงกระบอก ด้วยวิธีการปรับเปลี่ยนลักษณะรูปร่างแผ่นเปล้าให้มีความเหมาะสมของกระบวนการลากขึ้นรูปลึก ทั้งนี้เพื่อให้ได้ชิ้นงานสำเร็จที่มีคุณภาพและลดขั้นตอนการผลิต ซึ่งจะสามารถทำให้ลดต้นทุนการผลิตลงได้เกิดผลดีแก่สถานประกอบการ ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ทิศทางการรีดที่ 90 องศา มีผลกระทบมากกว่าทิศทางการรีดที่ 45 องศา
2. รูปร่างแผ่นเปล้าที่ถูกปรับเปลี่ยนจากวงกลมเป็นรูปร่างที่เหมาะสมต่อกระบวนการลากขึ้นรูป จะทำให้ความลึกของรอยคลิ่นตื้นขึ้น
3. การปรับเปลี่ยนรูปร่างแผ่นเปล้าที่เหมาะสมต่อกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยโดยสมการของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie จะทำให้รอยคลิ่นบนขอบปลายถ้วยมีความตื้นมากกว่าสมการของ Kishor N. และ Kumar D.R.
4. จากทั้งสองทฤษฎีที่นำมาเปรียบเทียบ เมื่อยังทำการปรับเปลี่ยนรูปร่างชิ้นงานให้ลดลงตามทิศทางการรีดก็ยิ่งทำให้เกิดริ้วรอย(Wrinkle)เพิ่มมากขึ้น แต่รอยแตก(Crack)ลดลง
5. จากสมการของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie ทิศทางการรีด 45 องศา เมื่อทำการลดขนาดมากกว่า 2.4 มิลลิเมตร จะทำให้ความหนาของผนังชิ้นงานลดลงเช่นเดียวกันกับสมการของ Kishor N. และ Kumar D.R. ทิศทางการรีด 0 องศา และ 90 องศา เมื่อทำการลดขนาดมากกว่า 12.4 มิลลิเมตร จะทำให้ความหนาของผนังชิ้นงานลดลง

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการทดลองในครั้งนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้โปรแกรมคำนวณทางคอมพิวเตอร์เพียงอย่างเดียว ทำให้ไม่ได้ผลของการเปรียบเทียบระหว่างการใช้โปรแกรมคำนวณทางคอมพิวเตอร์และการทดลองจริง จึงทำให้ไม่ได้ทราบถึงอุปสรรคและปัญหาที่เกิดขึ้นจริง

บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. โลหวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2556.
- วรวิทย์ พลบุพผา และคณะ. รูปร่างที่เหมาะสมของชิ้นงานในการออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปลึก
ปริญญาณีพนธ์ วศ.บ. ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2553.
- พิทักษ์ โสนิราช และวีระพงษ์ ปลื้มชัยภูมิ. อิทธิพลของรัศมีพื้นผิวและด้ายต่อคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการ
ลากขึ้นรูป. ปริญญาณีพนธ์ วศ.บ. มหาสารคาม : มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2555.
- Kishor N. and Kumar D.R. "Optimization of initial blank shape to minimize earing in
deepdrawingusing finite element method". Journal of Materials Processing
Technology 2002; 130-131: 20-30.
- Zaky A.M et al. "Optimum blank shape of cylindrical cups in deep drawing of anisotropic
sheet metals". Journal of Materials Processing Technology 1998, 76: 203-211.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
การคำนวณและแบบงานผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการศึกษา

การคำนวณ

1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร
2. หาขนาดอัตราส่วนการดึงขึ้นรูป

$$\begin{aligned} \text{Ratio (Drawing } \beta) &= \frac{d_0}{d_1} \\ &= \frac{85}{45} = 1.89 \end{aligned}$$

3. หาระยะห่างระหว่างช่องว่างแม่พิมพ์

$$\begin{aligned} CL &= T + 0.07 \sqrt{10T} \\ &= 2 + 0.07 \sqrt{10(2)} = 2.31 \text{ mm.} \end{aligned}$$

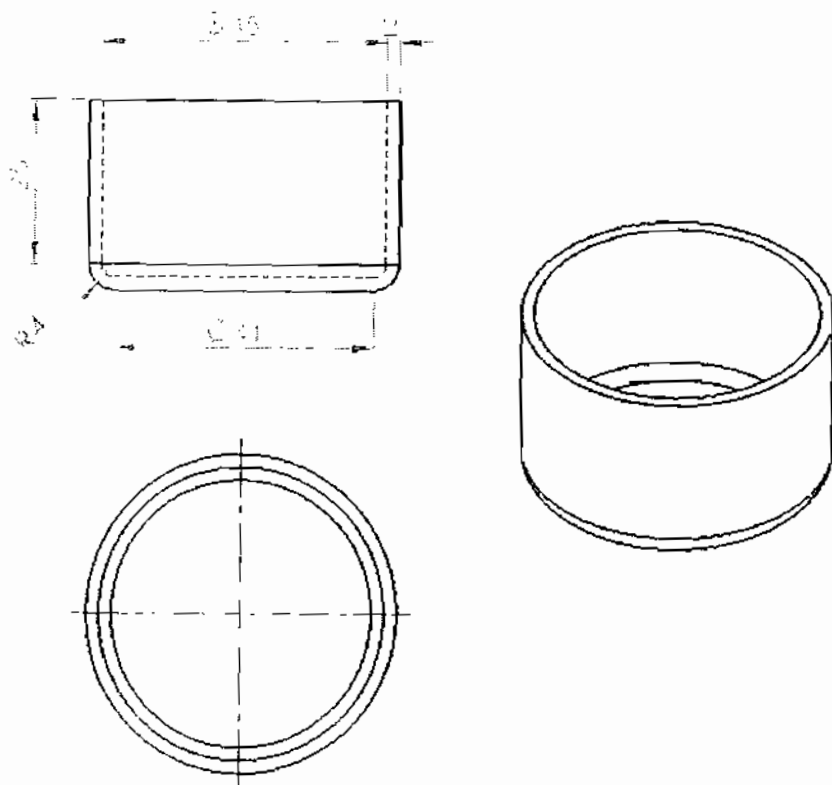
4. แรงในการจับยึดชิ้นงาน

$$\begin{aligned} P_{BH} &= 10^{-3} c [(\beta - 1)^3 + \frac{0.005d_0}{T} \sigma_u] \\ &= 10^{-3} \times 2.31 [(1.89 - 1)^3 + \frac{0.005 \times 85}{2} \times 515] \\ &= 1.09 \text{ N/mm}^2 \\ A_{BH} &= \frac{\pi d_0^2}{4} - \frac{\pi d_1^2}{4} \\ &= \frac{\pi(85)^2}{4} - \frac{\pi(45)^2}{4} = 4084.07 \text{ mm}^2 \\ F_{BH} &= P_{BH} \times A_{BH} \\ &= 1.09 \times 4084.07 = 4453.26 \text{ N} \end{aligned}$$

5. รัศมีพินซ์และรัศมีตาย

$$\begin{aligned} R_D &= 0.035 [50 + (d_0 - d_1)] \sqrt{T} \\ &= 0.035 [50 + (85 - 45)] \sqrt{2} \\ &= 4 \text{ mm} \end{aligned}$$

แบบงานผลิตภัณฑ์ที่ใช้ศึกษา

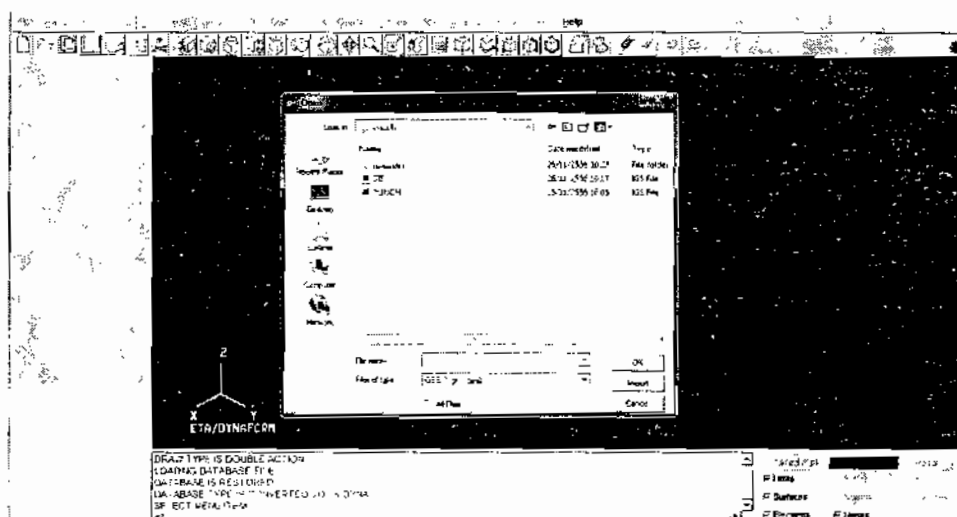


ภาคผนวก ข
การใช้งานโปรแกรมคำนวณทางคอมพิวเตอร์

วิธีการสร้างแบบจำลองสำหรับกระบวนการกลั่นขึ้นรูปโดยใช้โปรแกรมคำนวณทางคอมพิวเตอร์ ประกอบด้วยขั้นตอน ดังนี้

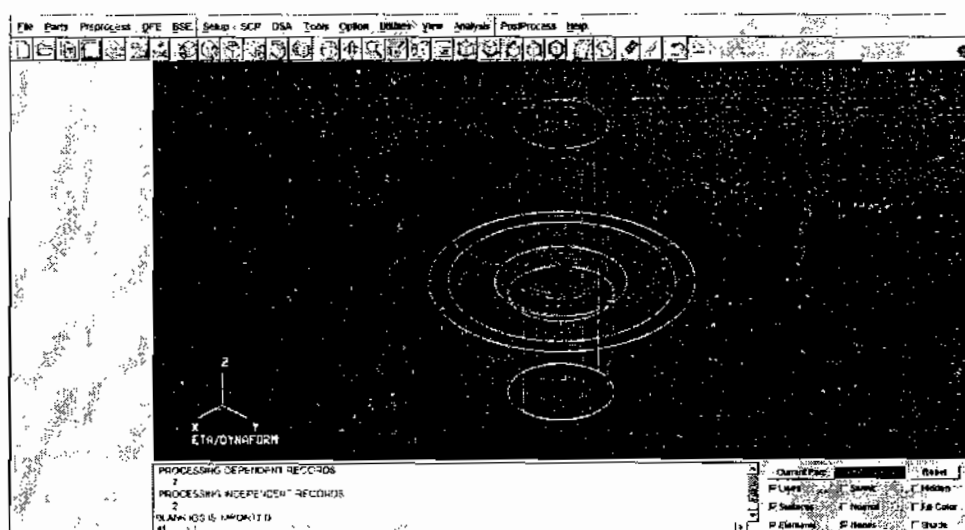
1. ทำการสร้างแบบจำลองที่ใช้เป็นแม่พิมพ์และชิ้นงาน

Run โปรแกรมที่คำว่า  Dynaform.exe เมื่อเปิดโปรแกรมเสร็จแล้ว ให้คลิก Import เพื่อที่จะเลือก Punch แล้วคลิก Import ส่วน Die และ Blank ทำเช่นเดียวกันตามลำดับ



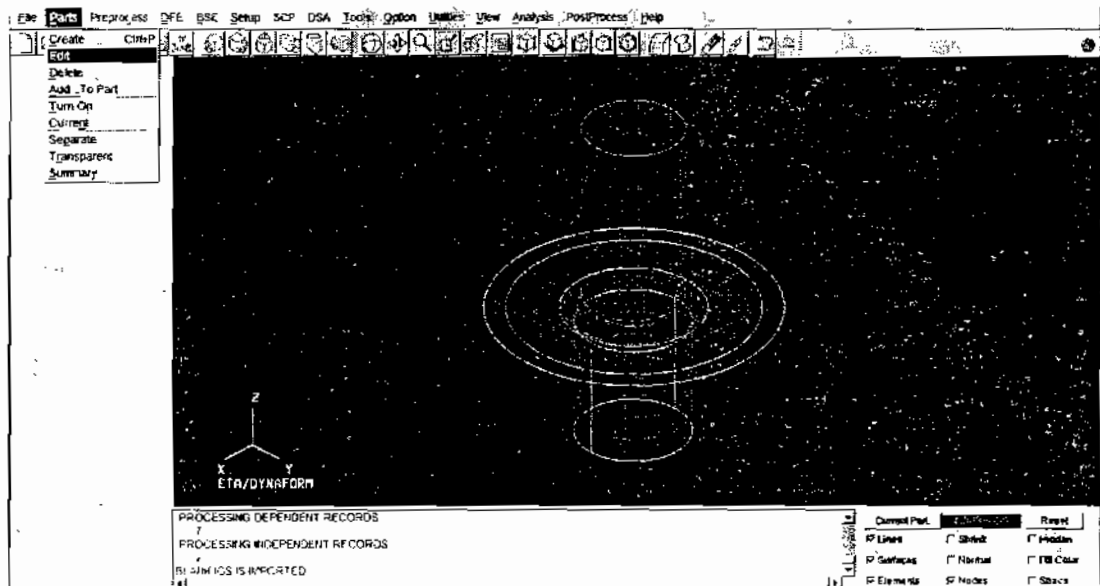
ภาพประกอบ ข.1 การ Import Punch Die และ Blank

เมื่อคลิกเลือกจนครบแล้วจะปรากฏดังภาพด้านล่าง



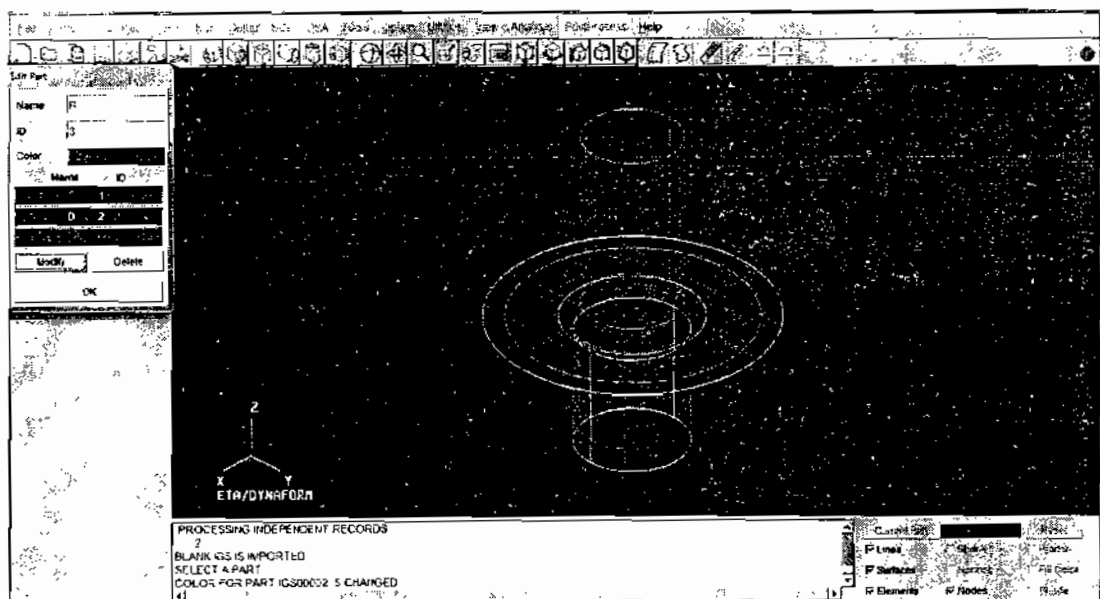
ภาพประกอบ ข.2 หลังการ Import เสร็จ

คลิก Part แล้วคลิก Edit เพื่อทำการลบเส้นที่ไม่จำเป็นออก โดยการลบเส้นให้คลิกที่ชื่อของเส้น แล้วคลิก Delete จะปรากฏเส้นที่ต้องการลบ ถ้าต้องการลบให้คลิก Yes แต่ถ้าไม่ต้องการลบให้คลิก No



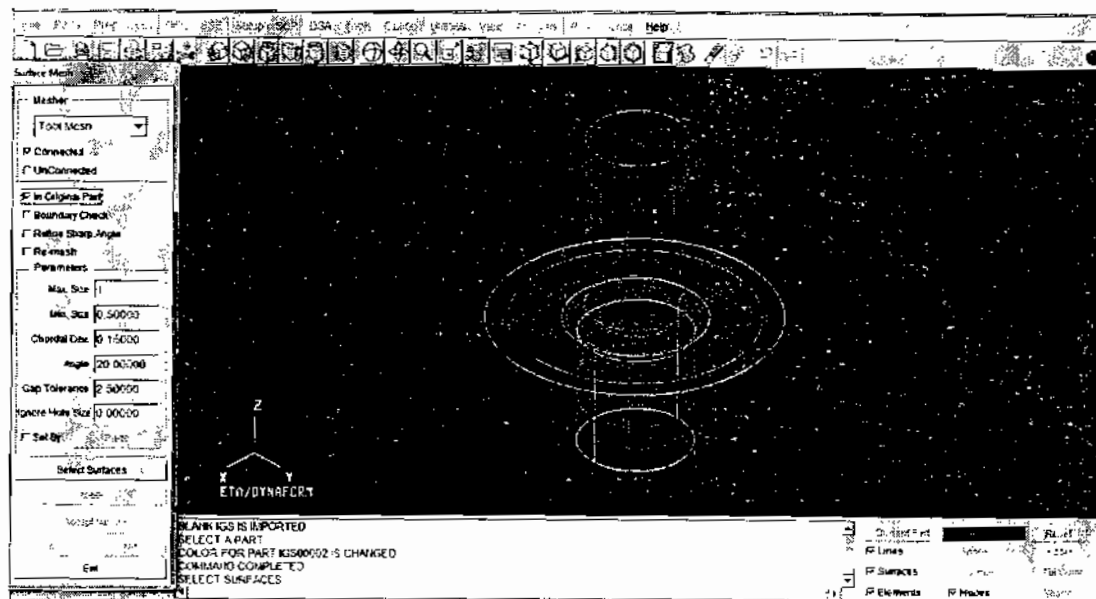
ภาพประกอบ ข.3 ขั้นตอนการลบเส้นส่วนเกิน

เมื่อลบเส้นที่ไม่จำเป็นออกแล้วให้ตั้งชื่อภาพชิ้นงาน โดยการคลิกที่ชื่อเดิมแล้วพิมพ์เปลี่ยนชื่อ เปลี่ยนเลข เปลี่ยนสีได้ตามต้องการ แล้วก็คลิก Modify ทำเช่นเดียวกันจนครบทุกชิ้นแล้วคลิก OK



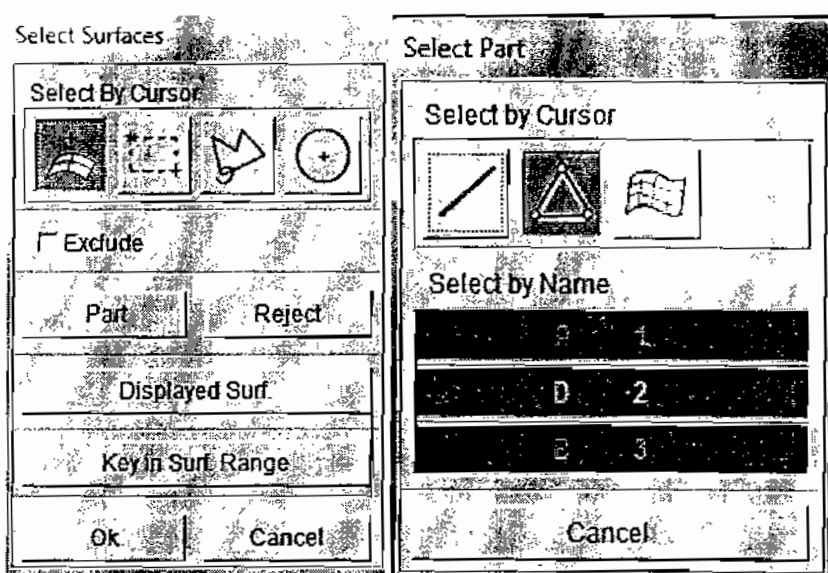
ภาพประกอบ ข.4 เมื่อลบเส้นส่วนเกินเสร็จ

คลิกเลือกคำสั่ง  Surface mesh แล้วคลิก In Original Part มองหาคำว่า Max. Size พิมพ์ลงในกรอบเป็น 1 แล้วคลิก Select Surfaces



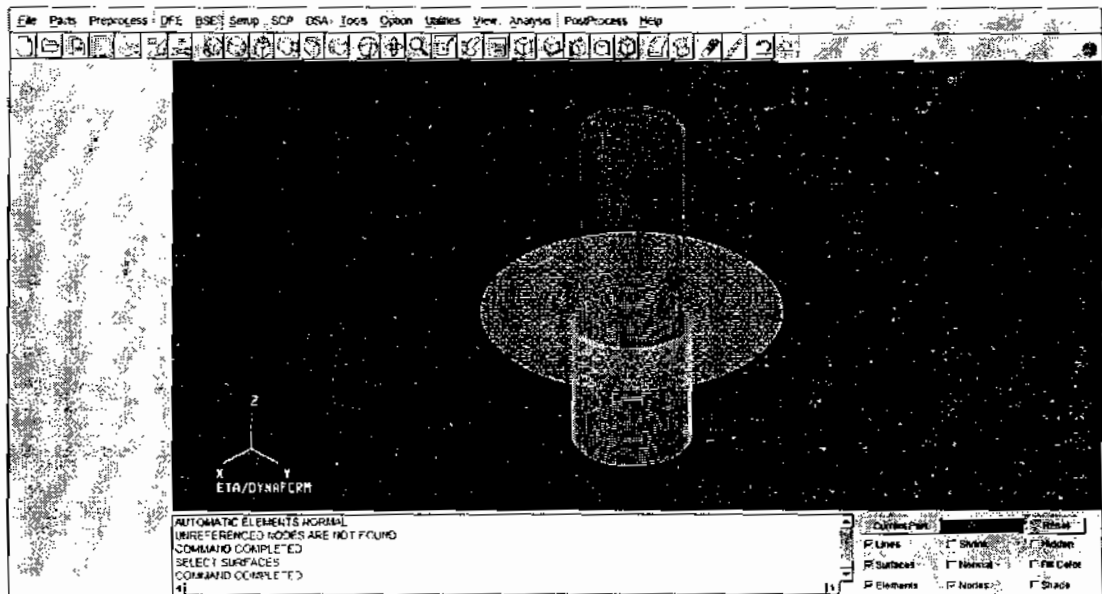
ภาพประกอบ ข.5 การทำ Surface mesh

จะปรากฏกรอบคำสั่ง Select Surface ขึ้นมา แล้วให้คลิกที่ Part จะปรากฏกรอบคำสั่ง Select Part ให้คลิกที่ P 1 จะกลับมาที่กรอบคำสั่ง Select Surface แล้วคลิก OK



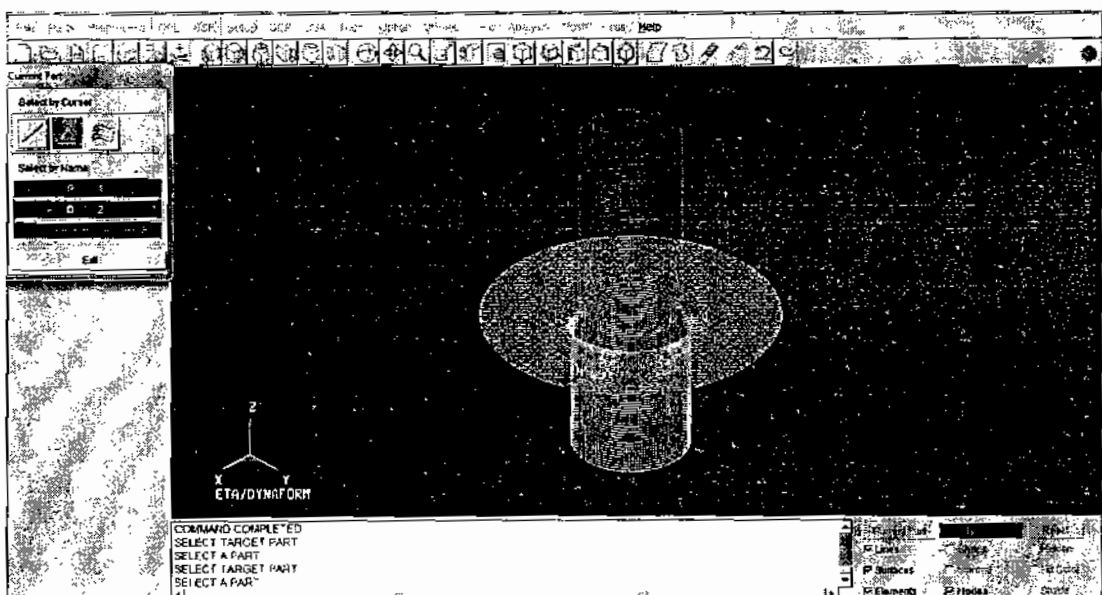
ภาพประกอบ ข.6 คำสั่งในการ Surface mesh

ให้คลิก Apply แล้วก็คลิก Yes ภาพชิ้นงานที่เลือกจะกลายเป็นเส้นตาข่ายปรากฏดังภาพด้านล่าง ส่วน DIE 2 ก็ทำเช่นเดียวกัน



ภาพประกอบ ข.7 เมื่อ Surface mesh เสร็จ

คลิกที่ Current Part จะปรากฏกรอบคำสั่งขึ้นมา ให้คลิกที่ B 3 แล้วคลิก Exit



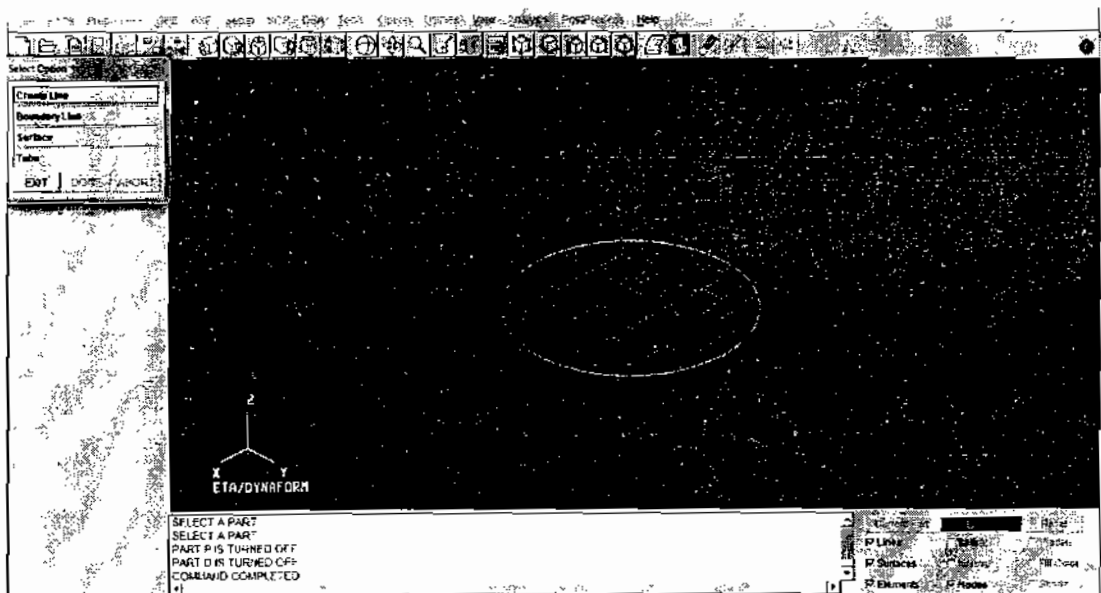
ภาพประกอบ ข.8 การทำ Select by Cursor โดยไม่มีชิ้นงาน

คลิกที่  Turn Part on/off จะปรากฏกรอบคำสั่งขึ้น ให้คลิกที่ Punch 1 และ Die 2 แล้วคลิก OK เพื่อปิด Punch และ Die



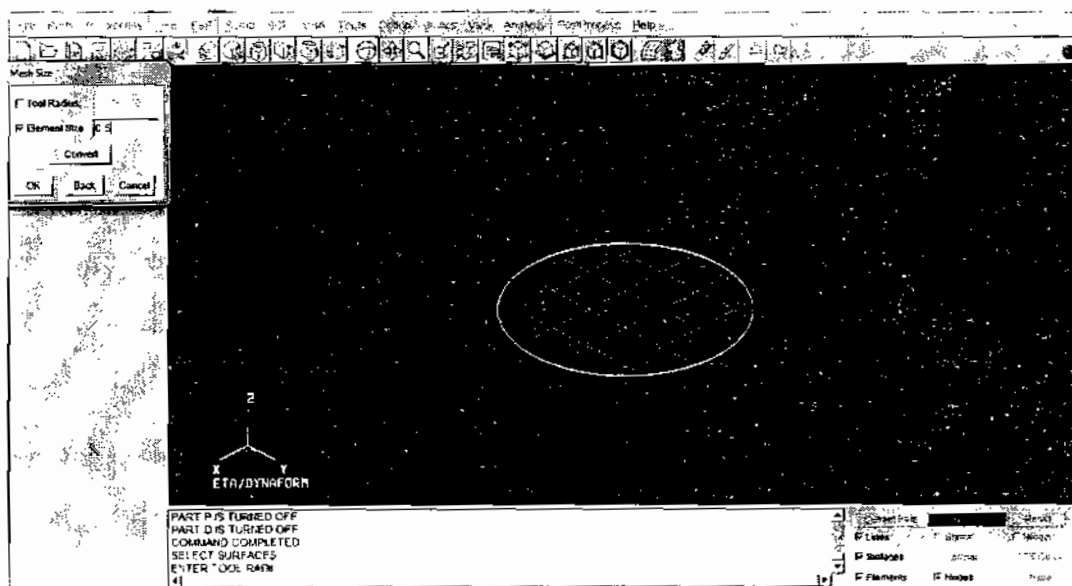
ภาพประกอบ ข.9 การทำ Turn Part on/off ให้ Punch 1 และ Die 2 หายไป

คลิกเลือกคำสั่ง  Blank generator จะปรากฏกรอบคำสั่ง Select Option คลิกที่ Surface



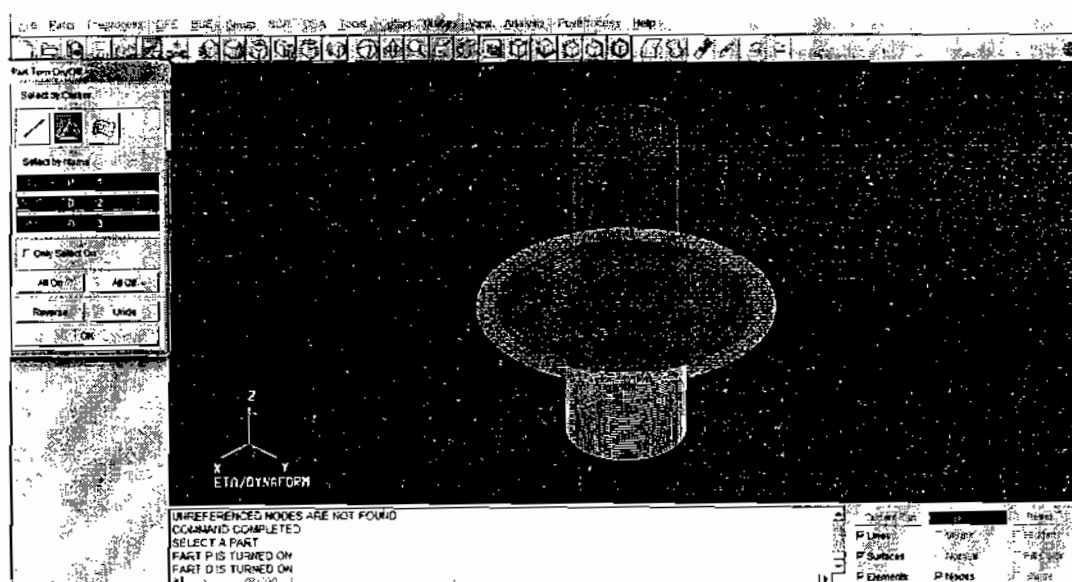
ภาพประกอบ ข.10 การทำ Blank generator

ให้ไปคลิกที่ขึ้นงานจะปรากฏกรอบคำสั่ง Mesh Size ทำเครื่องหมาย ✓ ที่ช่อง Element Size แล้วพิมพ์ลงไปในช่องว่าง 0.5 แล้วคลิก OK และ Yes ตามลำดับ



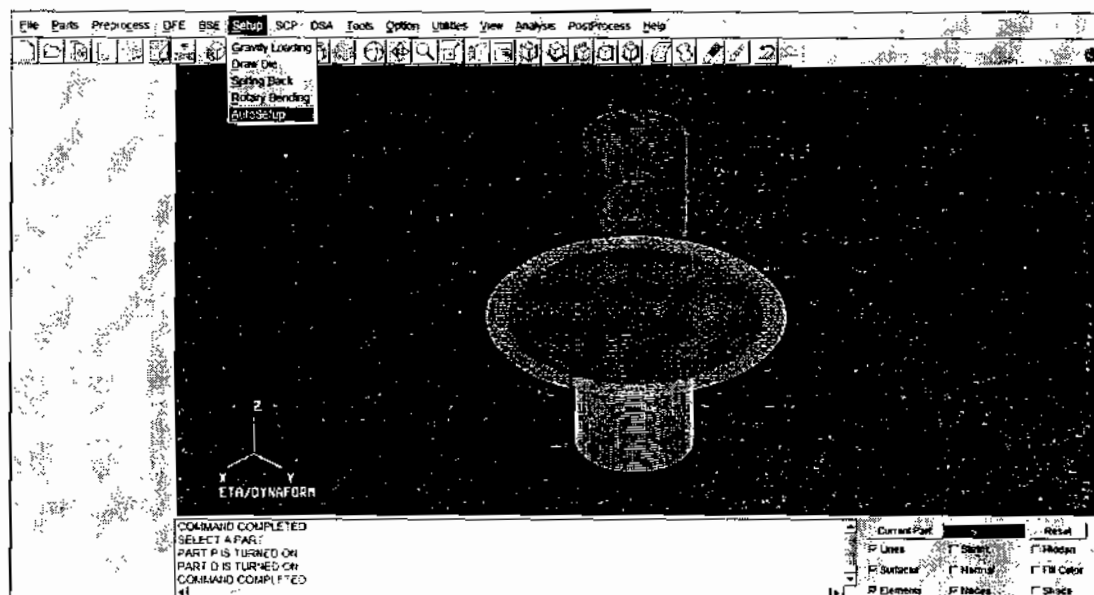
ภาพประกอบ ข.11 การปรับแก้ Element Size

คลิกที่  Turn Part on/off จะปรากฏกรอบคำสั่งขึ้น ให้คลิกที่ Punch 1 และ Die 2 เพื่อเปิด PUNCH และ DIE แล้วคลิก OK



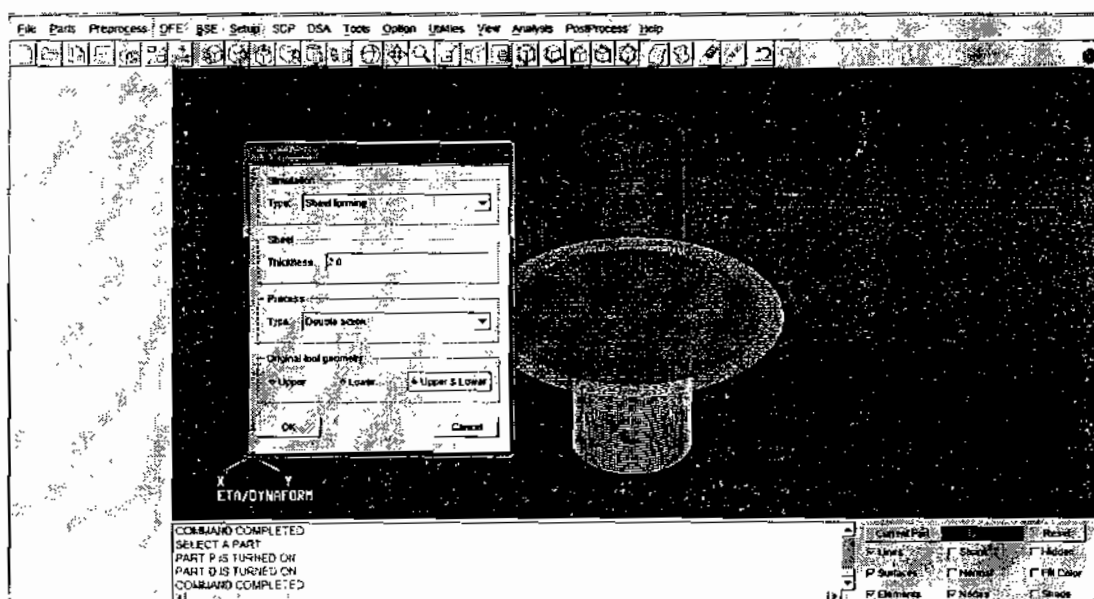
ภาพประกอบ ข.12 เปิด PUNCH และ DIE

คลิกเลือกที่คำสั่ง Setup แล้วคลิกที่ Auto Setup



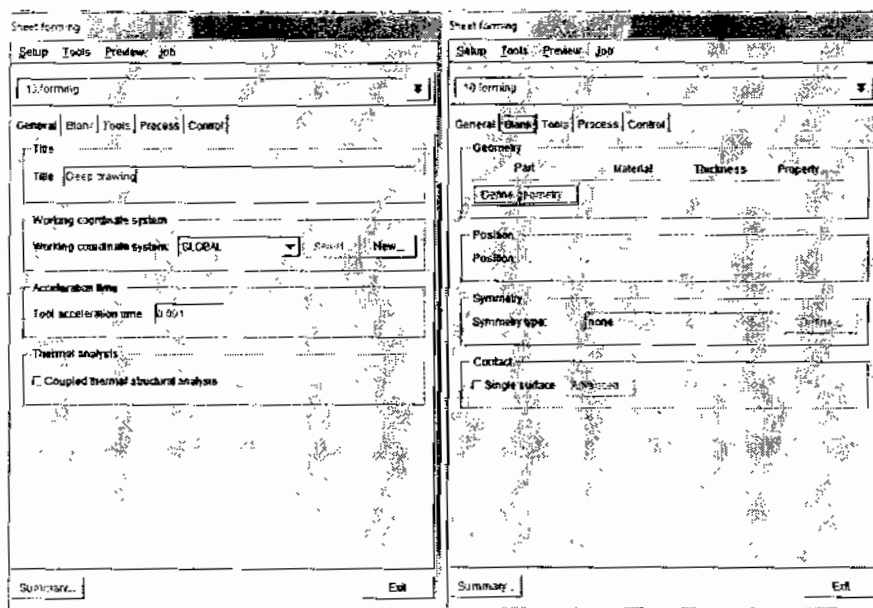
ภาพประกอบ ข.13 การทำ Auto Setup

จะปรากฏกรอบคำสั่ง New simulation เปลี่ยน Thickness (ความหนา) ให้เท่ากับชิ้นงาน ให้คลิกที่ Type เปลี่ยนเป็น Double action แล้วคลิกที่ Upper & Lower แล้วคลิก OK



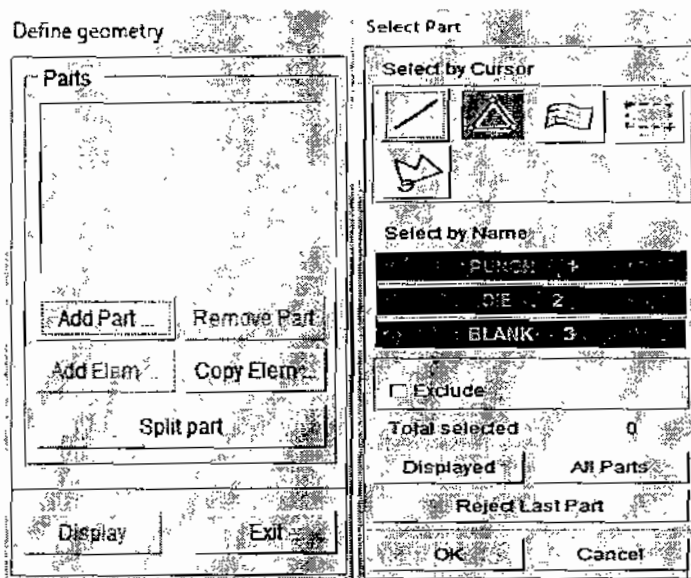
ภาพประกอบ ข.14 การทำ New simulation

จะปรากฏกรอบคำสั่ง Sheet forming คลิกที่ช่องว่าง Title เปลี่ยนชื่อเป็น Deep drawing ให้คลิกเลือก Blank แล้วคลิกที่ Define geometry



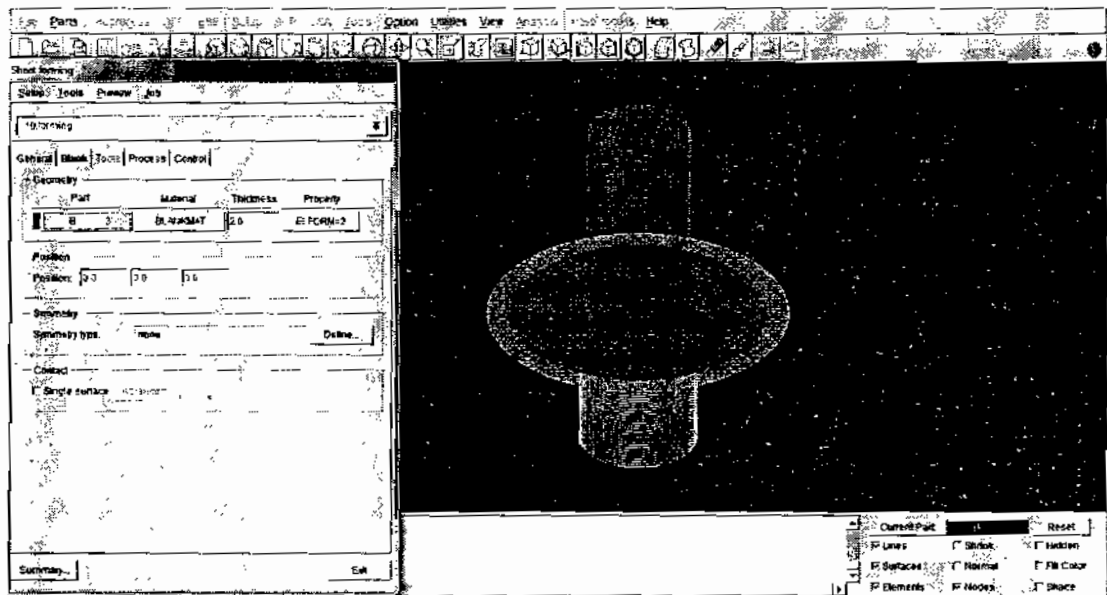
ภาพประกอบ ข.15 การทำ Sheet forming และ BLANK

จะปรากฏกรอบคำสั่ง Define geometry คลิกที่ Add Part... จะปรากฏกรอบคำสั่ง Select Part ให้คลิกที่ BLANK 3 แล้วคลิก OK จะกลับมาที่กรอบคำสั่ง Define geometry ให้คลิก Exit



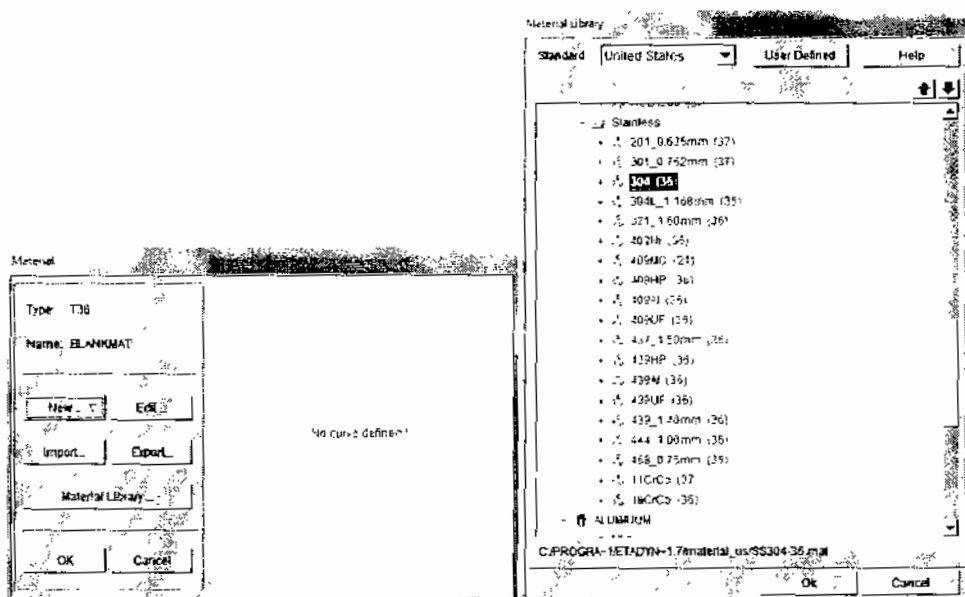
ภาพประกอบ ข.16 การทำ Define geometry เพื่อที่จะ Add Blank เข้า

จะปรากฏกรอบคำสั่ง Sheet forming ให้คลิกที่ BLANKMAT



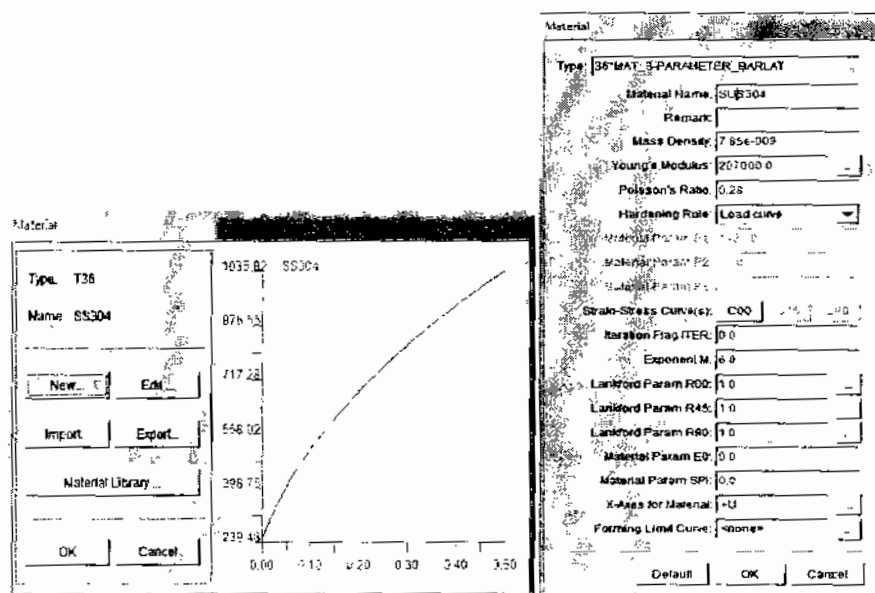
ภาพประกอบ ข.17 การทำ BLANKMAT

จะปรากฏกรอบคำสั่ง Material ให้คลิกที่ Material Library... จะปรากฏกรอบคำสั่ง Material Library ให้ไปเลือกคลิกที่วัสดุที่ต้องการ Stainless (SUS 304) แล้วคลิก OK



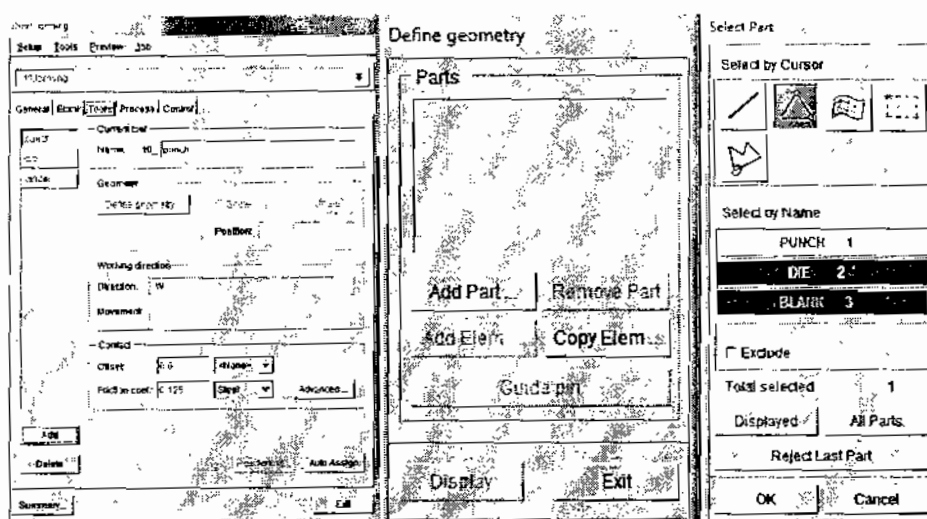
ภาพประกอบ ข.18 การเลือกวัสดุของชิ้นงาน

จะปรากฏกรอบคำสั่ง Material ที่มีกราฟ คลิกที่ Edit... จะปรากฏกรอบคำสั่ง Material ขึ้นมาอีกหนึ่งกรอบ ให้ตรวจสอบความถูกต้อง แล้วคลิก OK



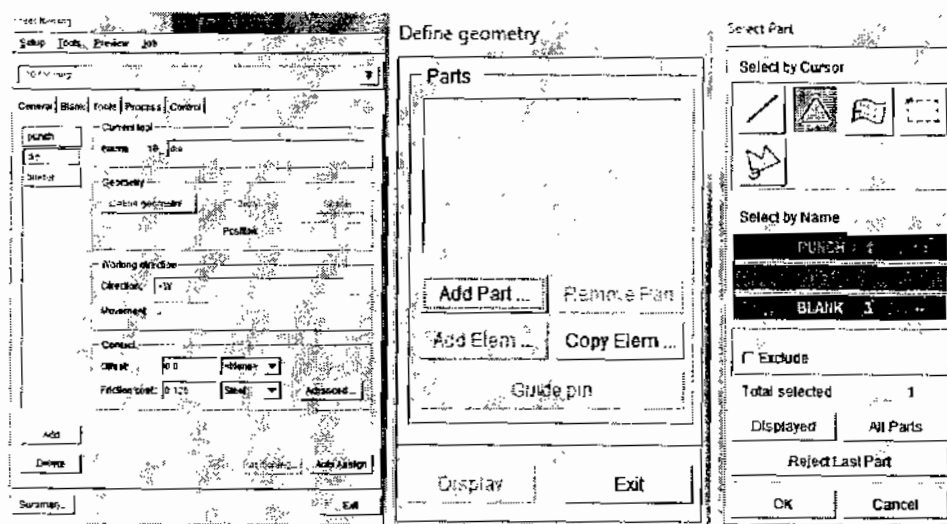
ภาพประกอบ ข.19 การตรวจสอบความถูกต้องคุณสมบัติของวัสดุ

คลิกเลือกที่ Tool แล้วคลิกที่ Define geometry จะปรากฏกรอบคำสั่ง Define geometry ให้คลิก Add Part... จะปรากฏกรอบคำสั่ง Select Part ให้คลิกเลือก PUNCH 1 แล้วคลิก OK จะกลับมาที่กรอบคำสั่ง Define geometry แล้วให้คลิก Exit



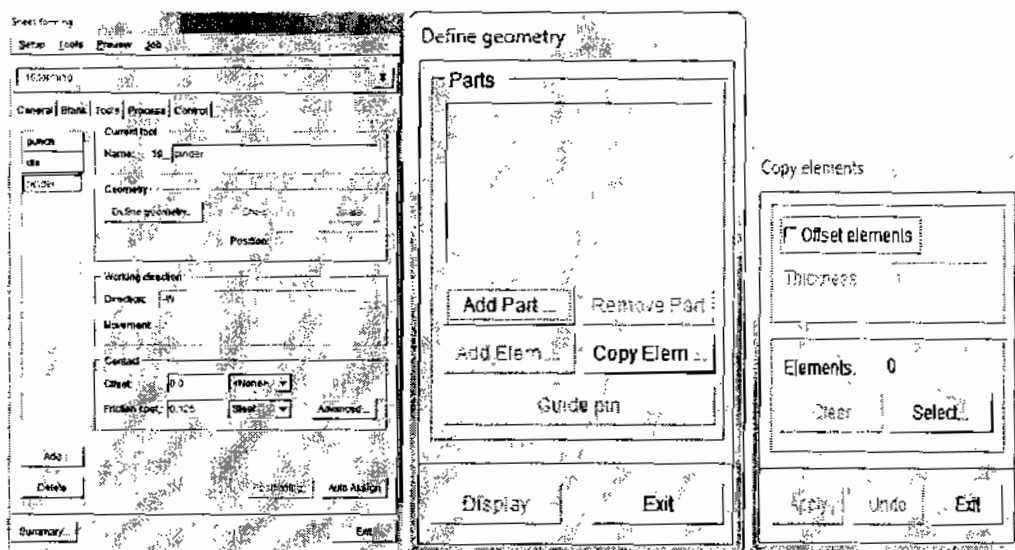
ภาพประกอบ ข.20 การ Add PUNCH

คลิกเลือก die แล้วคลิก Define geometry จะปรากฏกรอบคำสั่ง Define geometry ให้คลิก Add Part... จะปรากฏกรอบคำสั่ง Select Part ให้คลิกที่ DIE 2 แล้วคลิก OK จะกลับมาที่กรอบคำสั่ง Define geometry แล้วให้คลิก Exit



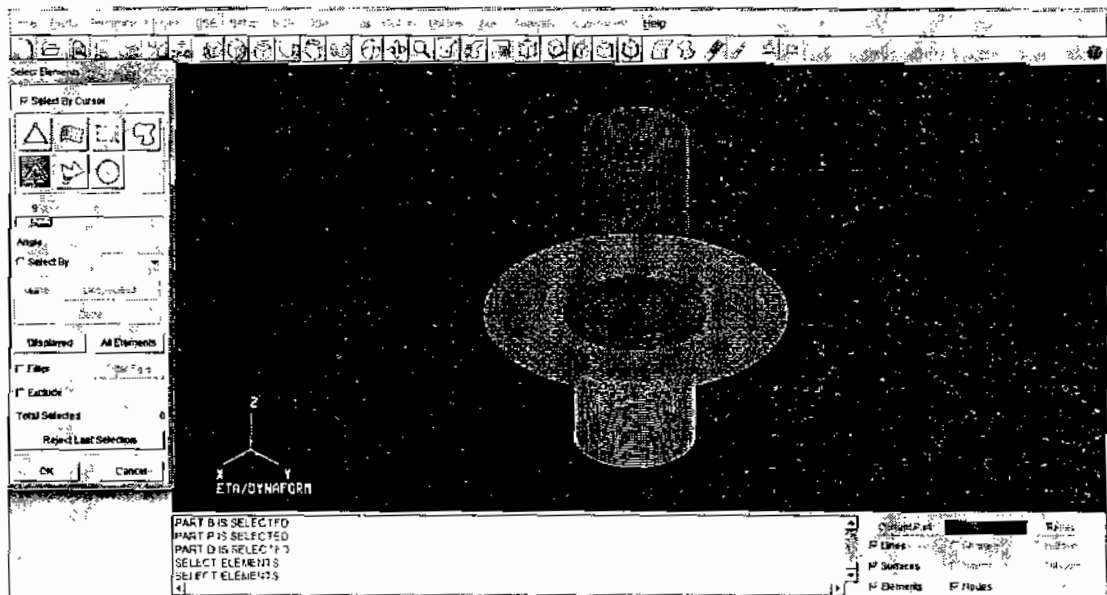
ภาพประกอบ ข.20 การ Add DIE

คลิกเลือก Binder แล้วคลิก Define geometry จะปรากฏกรอบคำสั่ง Define geometry ให้คลิก Copy Elem. . แล้วคลิกที่ Select...



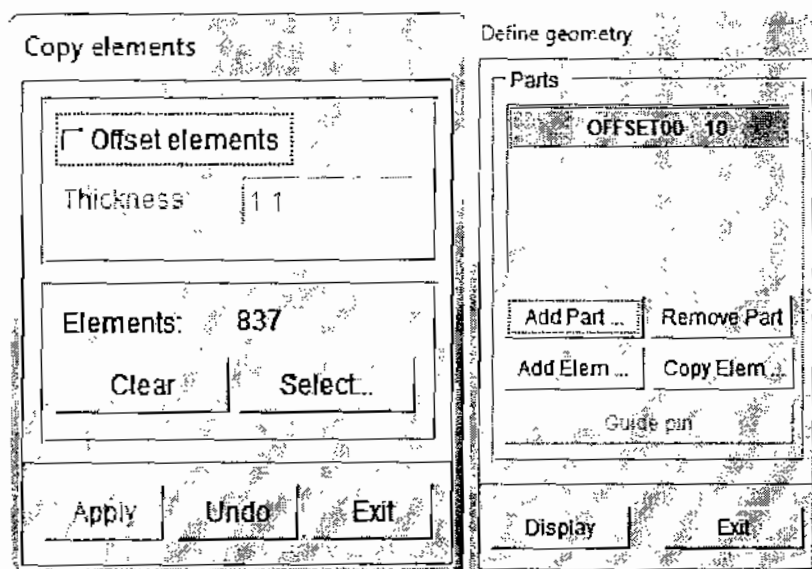
ภาพประกอบ ข.21 การทำ Copy Elements Binder

จะปรากฏกรอบคำสั่ง Select Elements ให้คลิกเลือกที่  Spread ปรับที่ Angle ให้ไม่เท่ากับ 0 แล้วไปคลิกที่บริเวณปากของ Die ให้เกิดเป็นสีขาวเฉพาะที่บริเวณปากตาย แล้วคลิก OK



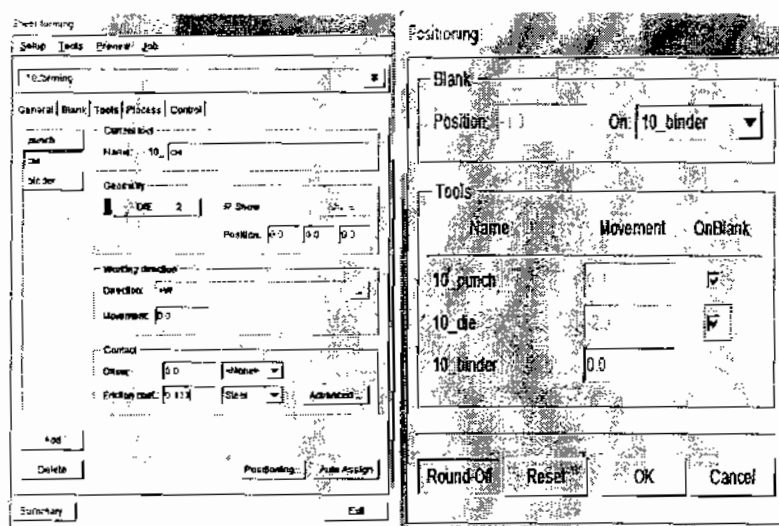
ภาพประกอบ ข.22 การทำ Copy Elements Binder (ต่อ)

จะปรากฏกรอบคำสั่ง Select Elements ให้คลิกที่ Apply แล้วคลิกที่ Exit จะกลับมาที่กรอบคำสั่ง Define geometry แล้วให้คลิก Exit



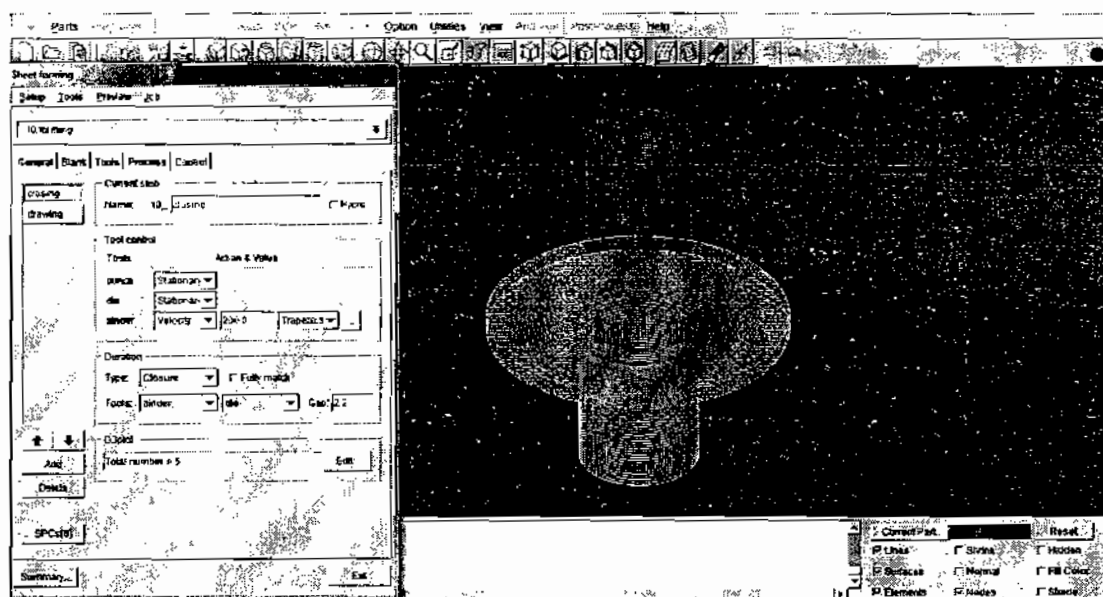
ภาพประกอบ ข.23 การทำ Copy Elements Binder (ต่อ)

จะปรากฏกรอบคำสั่ง แล้วคลิกที่ Positioning... จะปรากฏกรอบคำสั่ง Positioning ที่ช่อง On ให้เปลี่ยนเป็น 10_binder และให้ทำเครื่องหมาย ✓ ในช่องว่างใต้คำว่า OnBlank ทั้งสองช่อง แล้วคลิก OK



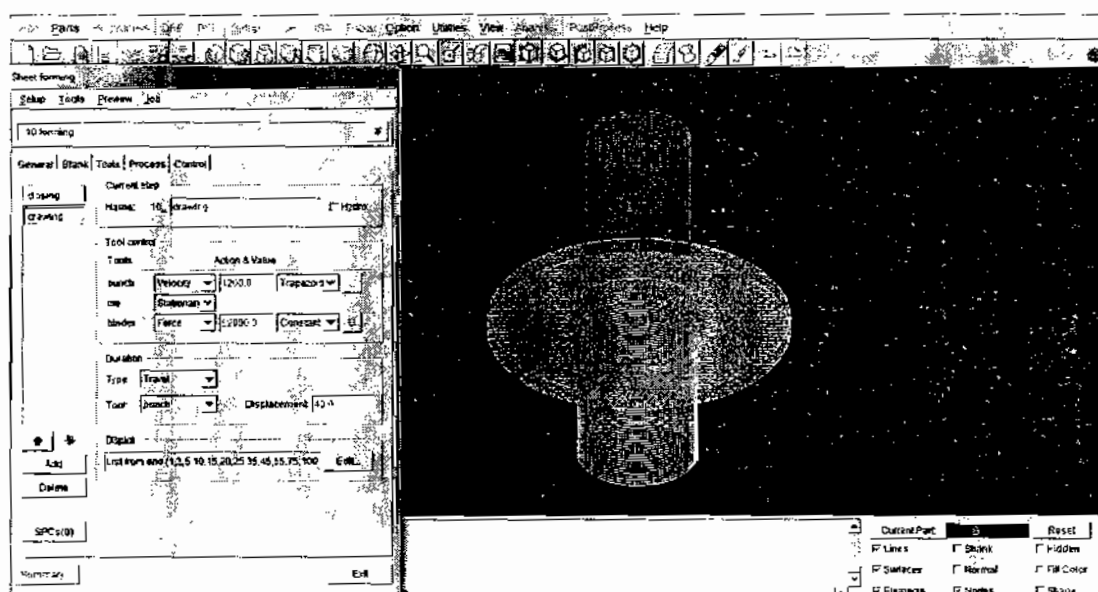
ภาพประกอบ ข.23 การทำ Positioning ให้ Punch Die และ Blank แยกออกจากกันอัตโนมัติ

จะกลับมาที่กรอบคำสั่ง Sheet forming ที่คำสั่ง Closing ให้เปลี่ยน Velocity ของ binder ตามที่ได้คำนวณ



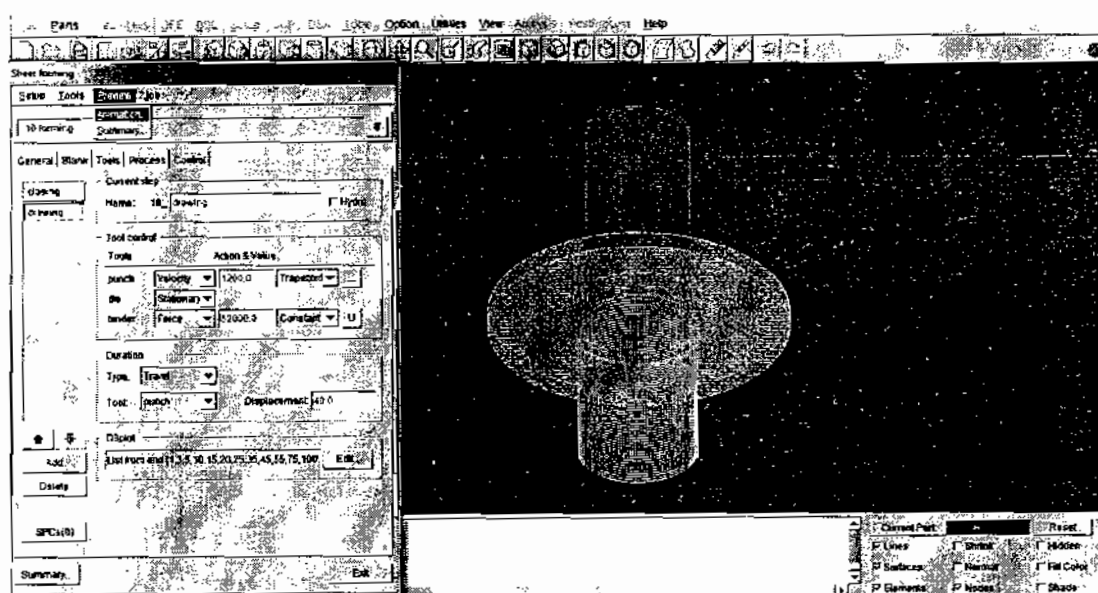
ภาพประกอบ ข.24 การเปลี่ยน Velocity ของ binder ในการ Closing

คลิกที่คำสั่ง drawing ให้เปลี่ยน Velocity ของ punch ตามที่ได้คำนวณ ที่ binder ให้เปลี่ยนเป็น Force แล้วใส่ตัวเลขตามที่ได้คำนวณ จากนั้นที่ Type ให้เปลี่ยนเป็น Travel แล้วเปลี่ยนตัวเลขที่ Displacement เป็น 40



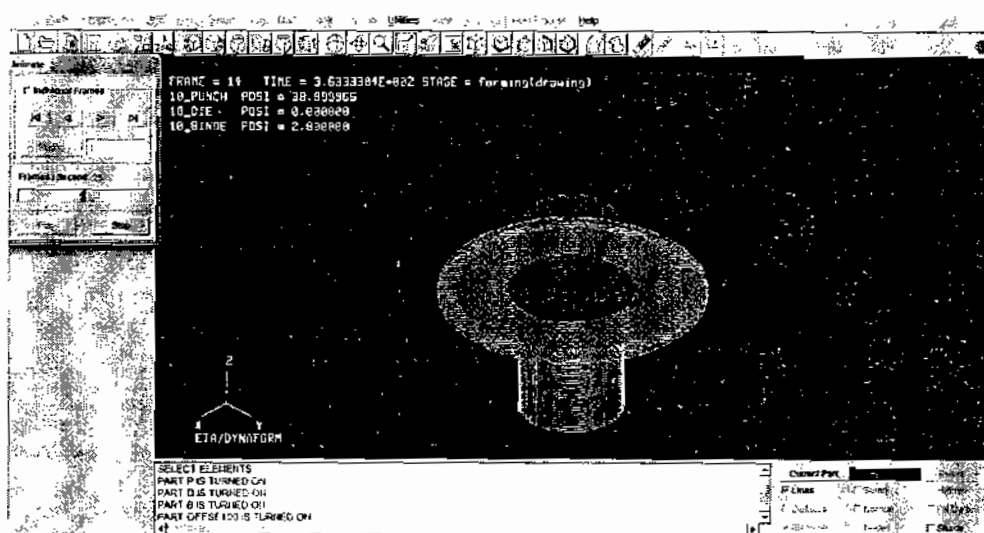
ภาพประกอบ ข.25 การทำ Process ในการ drawing

คลิกที่คำสั่ง Preview ไปคลิกที่ Animation จะปรากฏกรอบคำสั่ง Animation



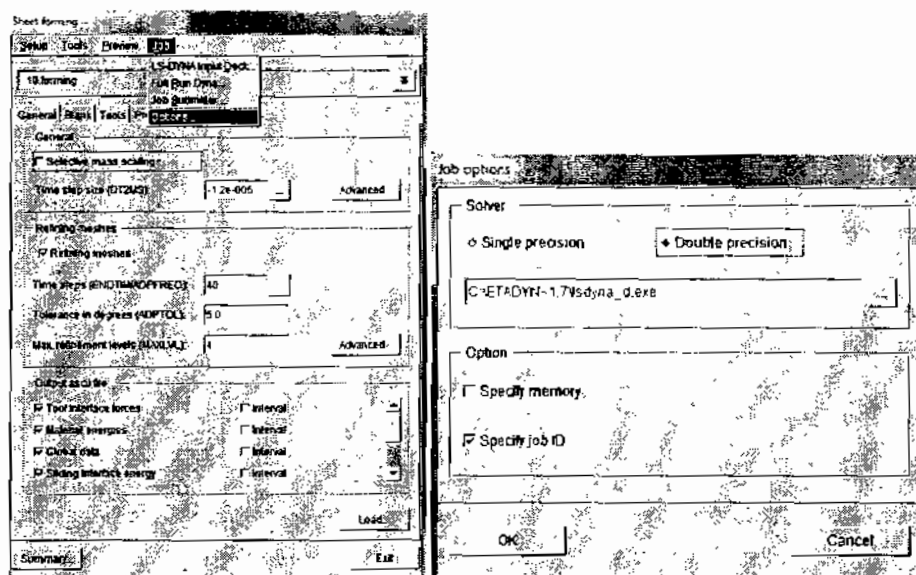
ภาพประกอบ ข.26 การทำ Animation

คลิกที่ Play จะเกิดเป็นภาพการเคลื่อนที่ของ Punch ในการลากขึ้นรูป และเมื่อตรวจสอบดูความถูกต้องเรียบร้อยแล้วให้คลิกที่ Stop



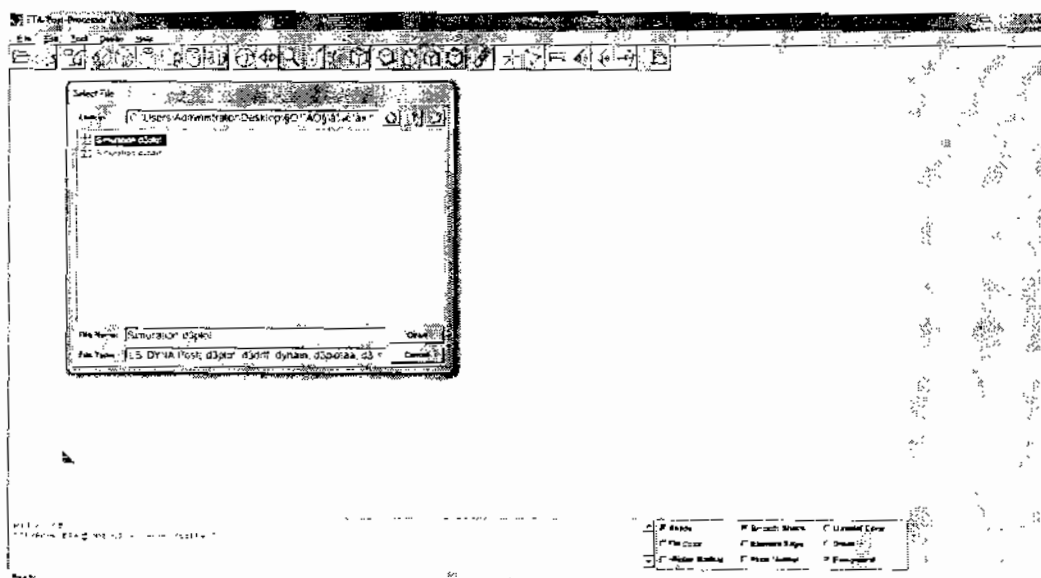
ภาพประกอบ ข.27 การทำ Animation (ต่อ)

จะกลับมาที่กรอบคำสั่ง Sheet forming เลือกคำสั่ง Job ไปคลิกที่ Option... จะปรากฏกรอบคำสั่ง Job Option ให้ไปคลิกที่ Double precision ตรวจสอบเส้นทางของข้อมูลที่จะทำการบันทึก แล้วคลิกที่ OK

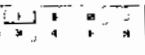


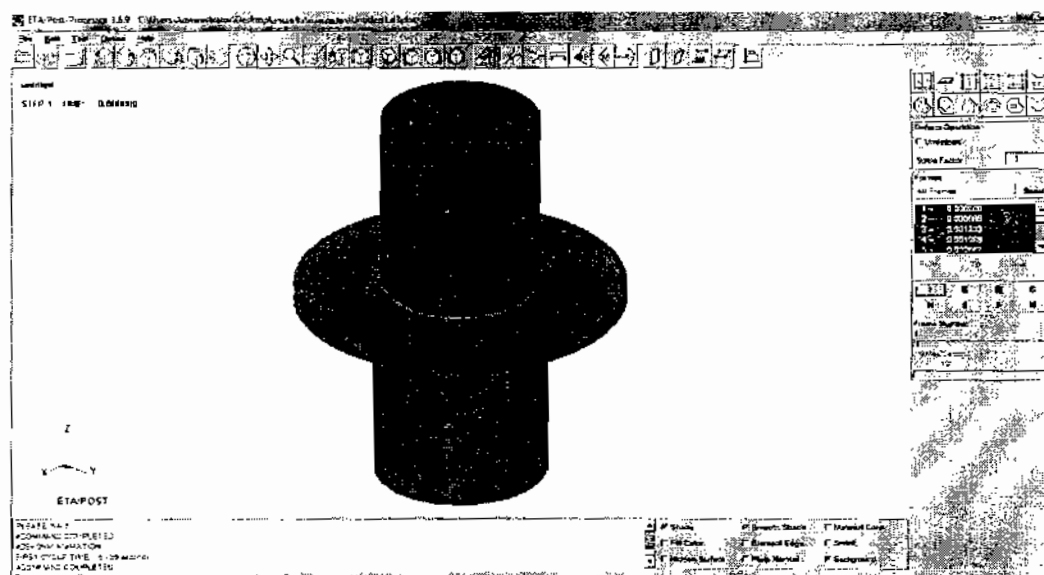
ภาพประกอบ ข.28 การทำ Job Option

คลิกที่ Post Process คลิก Yes จะปรากฏโปรแกรม ETA/Post-Processor 1.6.9 คลิก File คลิก Open คลิกเลือกไฟล์ที่นามสกุล .d3plot และคลิก Open



ภาพประกอบ ข.31 การทำ Post Process

จะปรากฏดังภาพด้านล่าง เมื่อต้องการที่จะดูภาพเคลื่อนไหวให้คลิกเลือกที่กรอบคำสั่ง  แต่ถ้าต้องการข้อมูลต่างๆให้คลิกเลือกที่กรอบคำสั่ง 



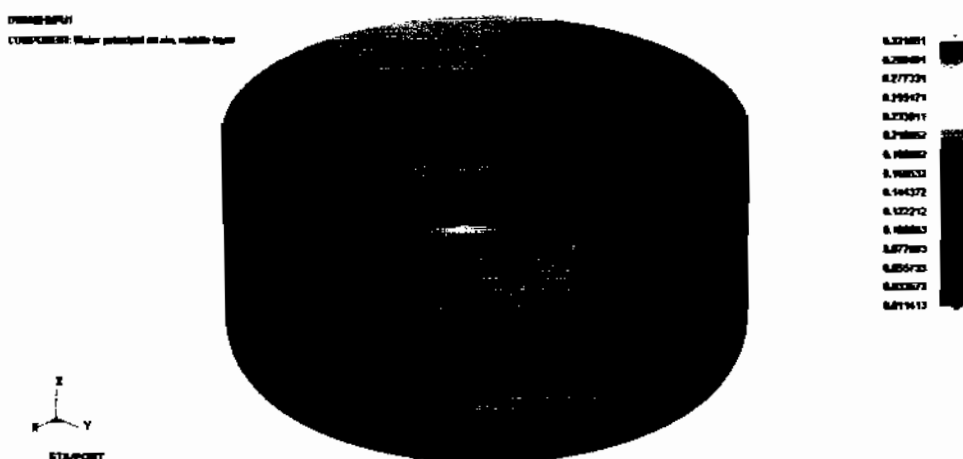
ภาพประกอบ ข.32 การทำ Post Process (ต่อ)

ภาคผนวก ค
ผลการวิเคราะห์และจำลองภาพการลากขึ้นรูป



ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง Major Strain

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร



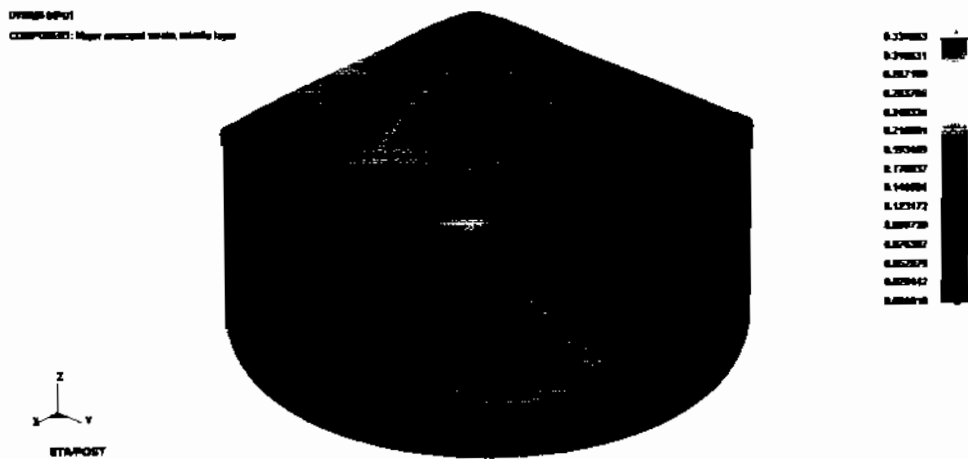
ภาพประกอบ ค.1 การเปลี่ยนแปลง Major Strain ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ทำการย้ายจุดศูนย์กลาง 6.2 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ Kishor N. และ Kumar D.R.)



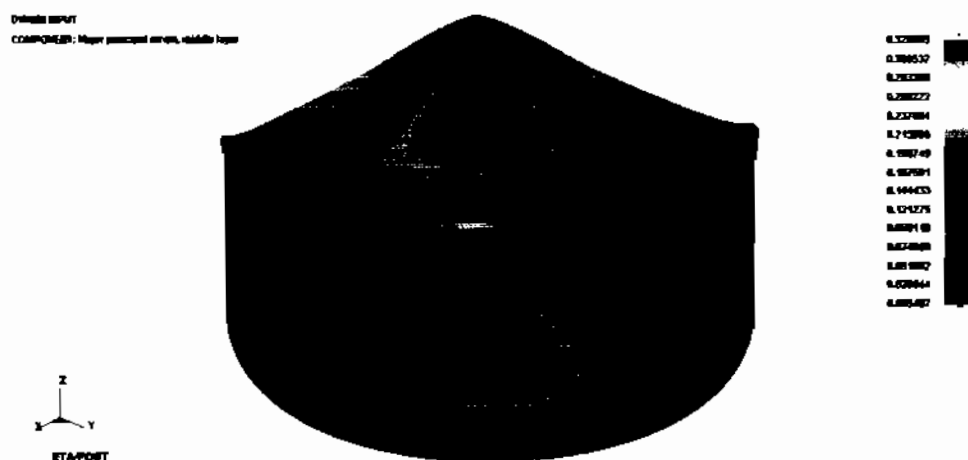
ภาพประกอบ ค.2 การเปลี่ยนแปลง Major Strain ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร
ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ย้ายจุดศูนย์กลาง 6.2 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ทำการย้ายจุดศูนย์กลาง 12.4 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ Kishor N. และ Kumar D.R.)



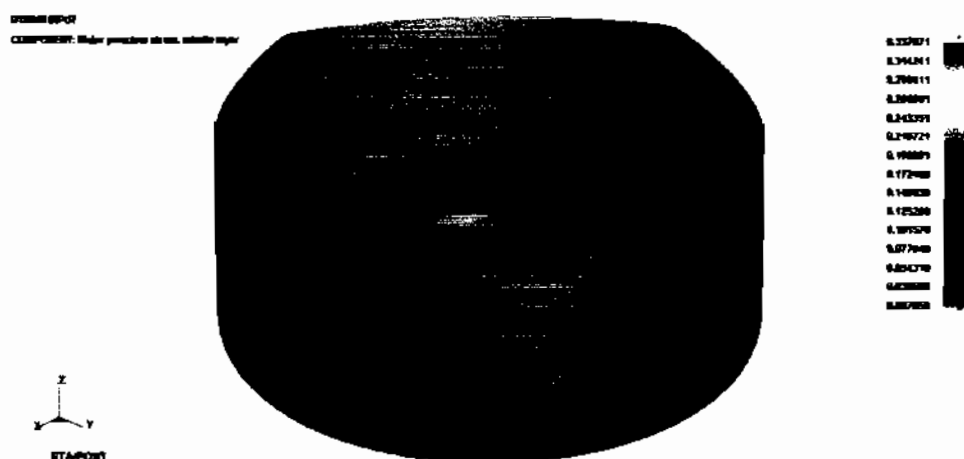
ภาพประกอบ ค.3 การเปลี่ยนแปลง Major Strain ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ย้ายจุดศูนย์กลาง 12.4 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ทำการย้ายจุดศูนย์กลาง 18.6 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ Kishor N. และ Kumar D.R.)



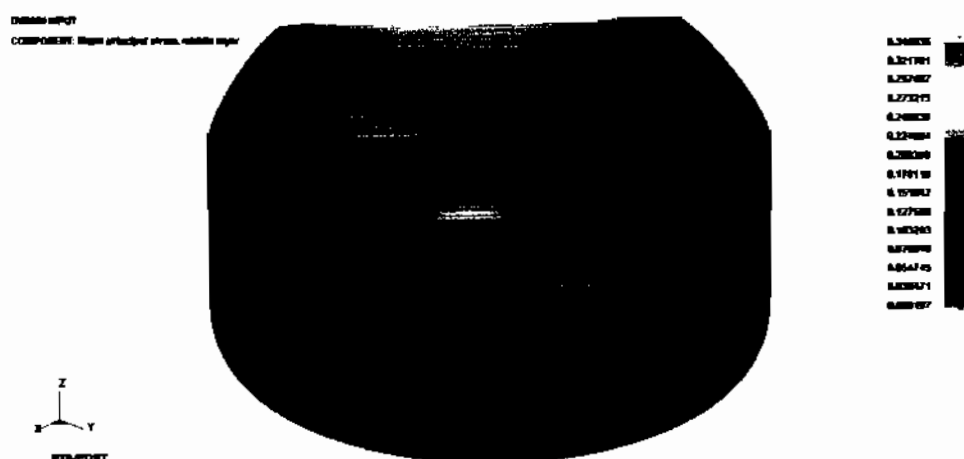
ภาพประกอบ ค.4 การเปลี่ยนแปลง Major Strain ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ย้ายจุดศูนย์กลาง 18.6 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 1.2 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie)



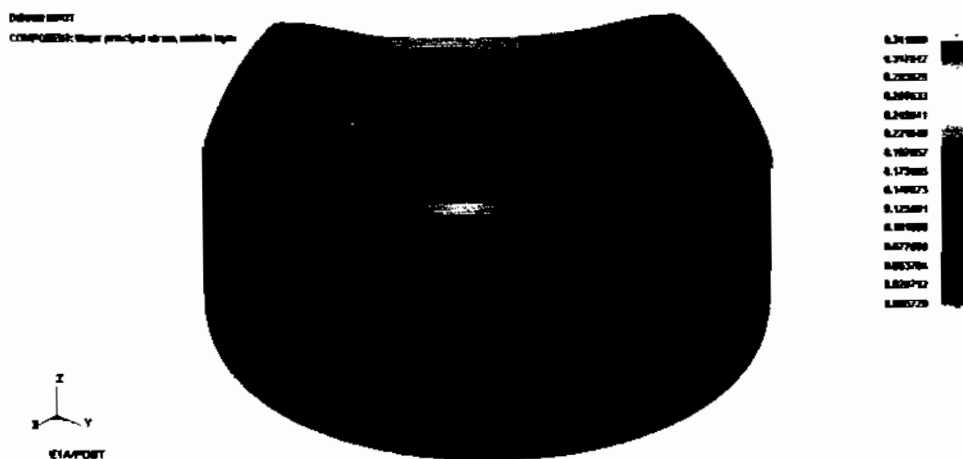
ภาพประกอบ ค.5 การเปลี่ยนแปลง Major Strain ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 1.2 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 2.4 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie)



ภาพประกอบ ค.6 การเปลี่ยนแปลง Major Strain ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 2.4 มิลลิเมตร

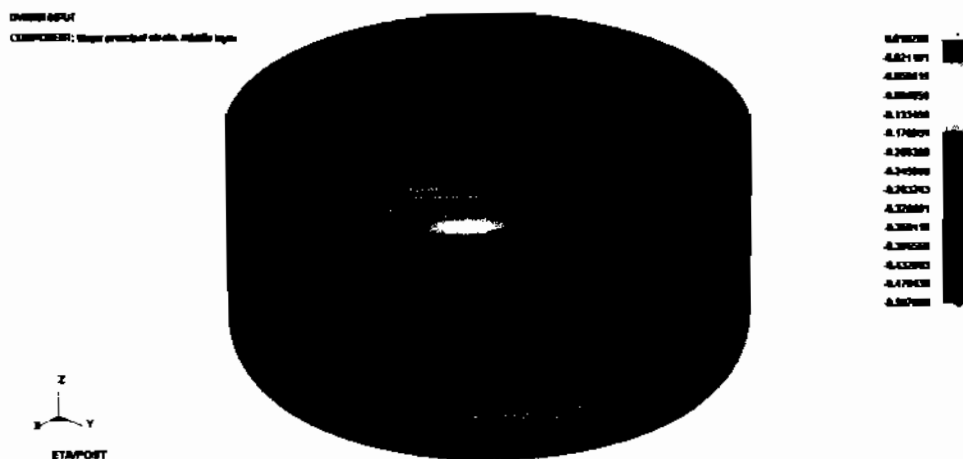
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 3.6 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie)



ภาพประกอบ ค.7 การเปลี่ยนแปลง Major Strain ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 3.6 มิลลิเมตร

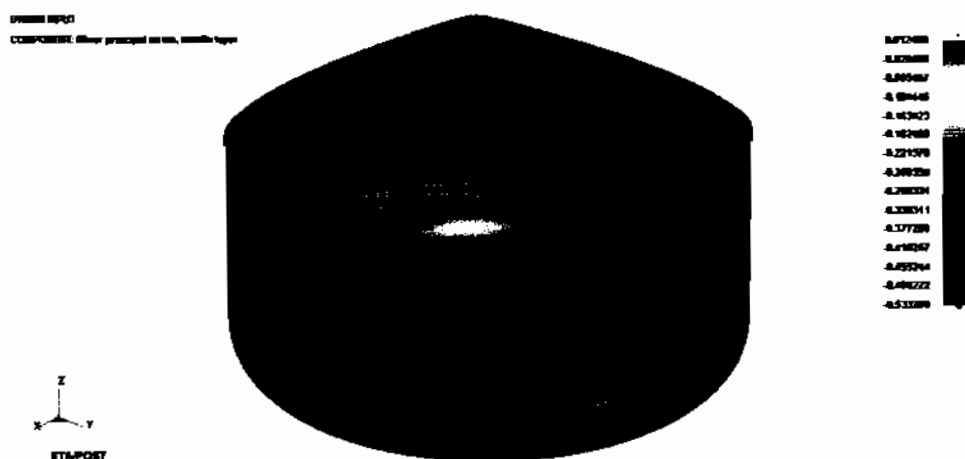
ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง Minor Strain

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร



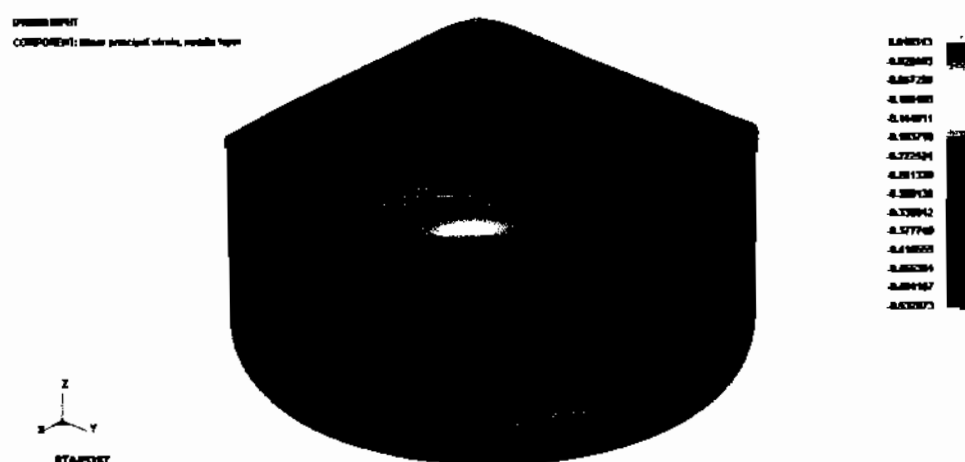
ภาพประกอบ ค.8 การเปลี่ยนแปลง Minor Strain ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ทำการย้ายจุดศูนย์กลาง 6.2 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ Kishor N. และ Kumar D.R.)



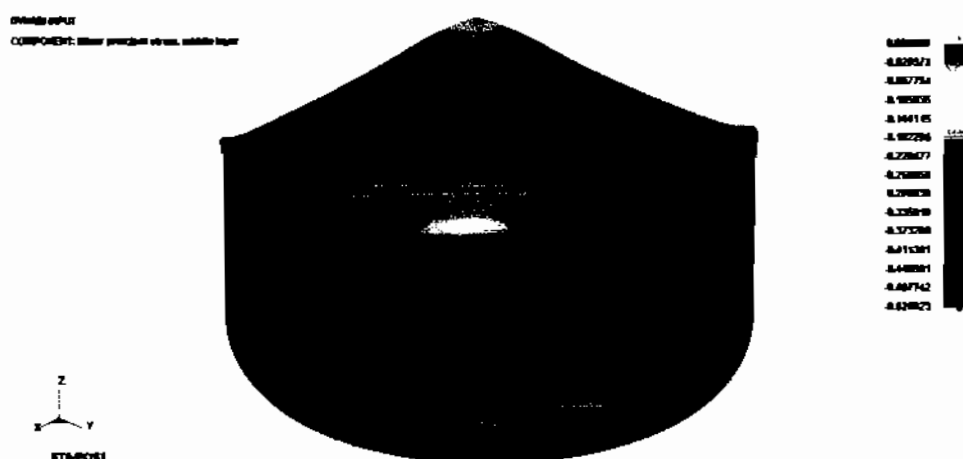
ภาพประกอบ ค.9 การเปลี่ยนแปลง Minor Strain ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ย้ายจุดศูนย์กลาง 6.2 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ทำการย้ายจุดศูนย์กลาง 12.4 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ Kishor N. และ Kumar D.R.)



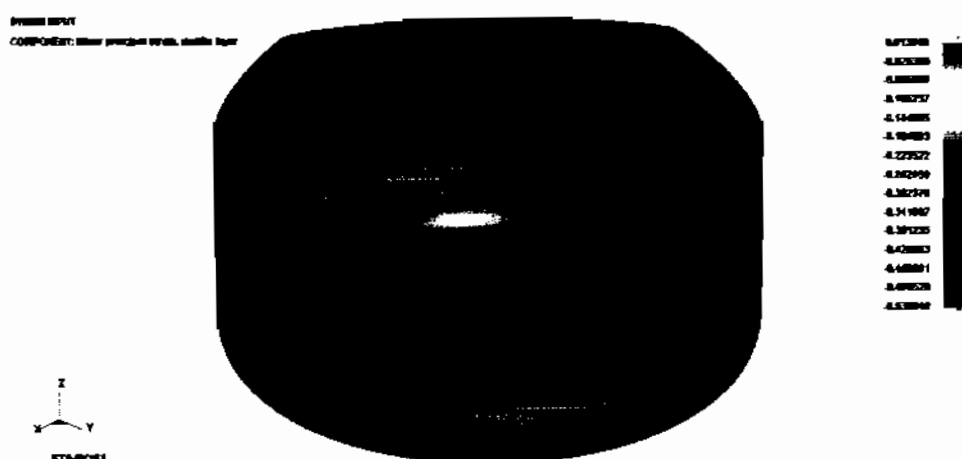
ภาพประกอบ ค.10 การเปลี่ยนแปลง Minor Strain ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ย้ายจุดศูนย์กลาง 12.4 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ทำการย้ายจุดศูนย์กลาง 18.6 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ Kishor N. และ Kumar D.R.)



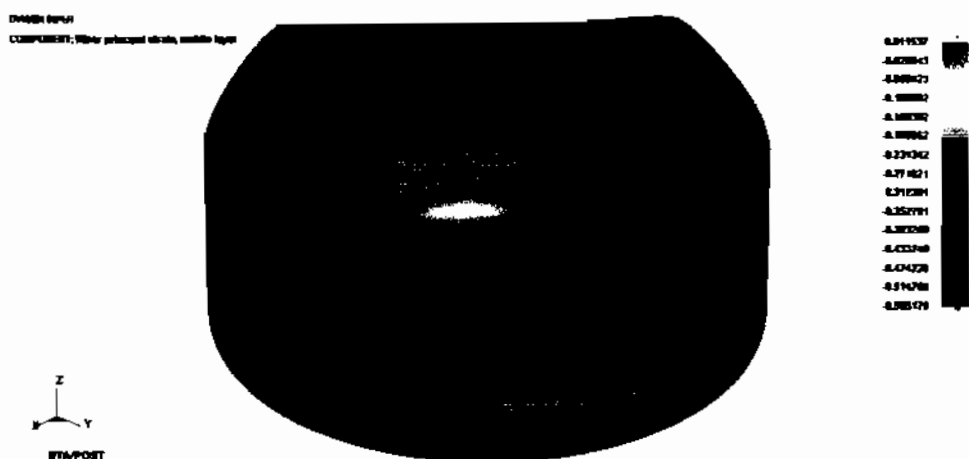
ภาพประกอบ ค.11 การเปลี่ยนแปลง Minor Strain ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 0 และ 90 องศา ย้ายจุดศูนย์กลาง 18.6 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 1.2 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie)



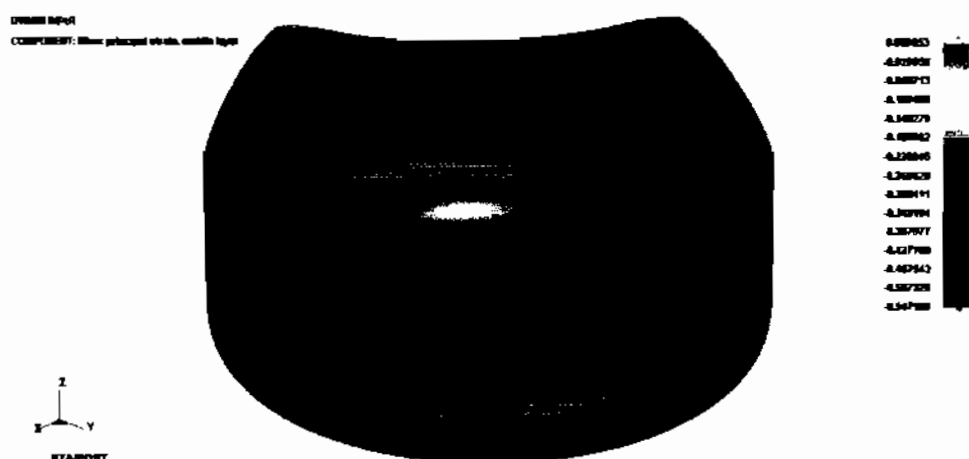
ภาพประกอบ ค.12 การเปลี่ยนแปลง Minor Strain ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 1.2 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 2.4 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie)



ภาพประกอบ ค.13 การเปลี่ยนแปลง Minor Strain ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 2.4 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 3.6 มิลลิเมตร (ทฤษฎีของ A.M. Zaky, A.B. Nassr และ M.G. El-Sebaie)



ภาพประกอบ ค.14 การเปลี่ยนแปลง Minor Strain ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่า 85 มิลลิเมตร ลบมุมที่ทิศทางการรีด 45 องศา จากจุดขอบของชิ้นงาน 3.6 มิลลิเมตร

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ	นายวรวิทย์ บุตรจันทร์
วันเกิด	วันที่ 21 เดือน กันยายน พ.ศ. 2532
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลศรีนครินทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 11 บ้านหนองน้ำเกลี้ยง หมู่ 3 ตำบลสำราญ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น รหัสไปรษณีย์ 40000

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2544	ชั้นประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลขอนแก่น ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น
พ.ศ. 2547	ชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนขามแก่นนคร ตำบลศิลา อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น
พ.ศ. 2550	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) วิทยาลัยเทคนิคขอนแก่น ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น
พ.ศ. 2552	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) วิทยาลัยเทคนิคขอนแก่น ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น
พ.ศ. 2556	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ	นายสุพัฒพงษ์ ทิพย์ภูมิ
วันเกิด	วันที่ 10 เดือน มกราคม พ.ศ. 2533
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลราชบุรี ตำบลราชบุรี อำเภอราชบุรี จังหวัดร้อยเอ็ด
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 50/12 หมู่ที่ 12 ตำบลบึงนคร อำเภอราชบุรี จังหวัดร้อยเอ็ด รหัสไปรษณีย์ 45170

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2544	ชั้นประถมศึกษา โรงเรียนบ้านสองพี่น้องวิทยาการ ตำบลบึงนคร อำเภอราชบุรี จังหวัดร้อยเอ็ด
พ.ศ. 2547	ชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนธงธานี ตำบลธงธานี อำเภอราชบุรี จังหวัดร้อยเอ็ด
พ.ศ. 2550	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) วิทยาลัยเทคนิคร้อยเอ็ด ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด
พ.ศ. 2552	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) วิทยาลัยเทคนิคร้อยเอ็ด ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด
พ.ศ. 2556	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

