

การศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการ WIPING-DIE ด้วยวิธีการ
จำลองเชิงตัวเลขและการออกแบบการทดลอง

PARAMETRIC STUDY OF WIPING-DIE PROCESS USING NUMERICAL
SIMULATION AND DESIGN OF EXPERIMENTS

ภูวเดช วีระนาวิน
วศิน งามกมลนัย
วิทยา นาคี

ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

การศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการ WIPING-DIE ด้วยวิธีการ
จำลองเชิงตัวเลขและการออกแบบการทดลอง

PARAMETRIC STUDY OF WIPING-DIE PROCESS USING NUMERICAL
SIMULATION AND DESIGN OF EXPERIMENTS

ภูเดช วีระนาวิน
วศิน งามกมลชัย
วิทยา นาดิ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555

PARAMETRIC STUDY OF WIPING-DIE PROCESS USING NUMERICAL
SIMULATION AND DESIGN OF EXPERIMENTS

PUWADECH VEERANAWIN
VASIN NGAMKAMOLCHAI
WITTAYA NADEE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2555

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการ WIPING-DIE ด้วยวิธีการจำลองเชิงตัวเลข
และการออกแบบการทดลอง

PARAMETRIC STUDY OF WIPING-DIE PROCESS USING NUMERICAL SIMULATION
AND DESIGN OF EXPERIMENTS

ผู้จัดทำ

1. นายภูวเดช วีระนาวิน รหัสนักศึกษา 52010930
2. นายวศิน งามกมลชัย รหัสนักศึกษา 52011076
3. นายวิทยา นาคี รหัสนักศึกษา 52011116



อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ภูดิท ชัยดิลภพัฒน์กุล)

การศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการ WIPING-DIE ด้วยวิธีการจำลองเชิงตัวเลข
และการออกแบบการทดลอง

นายภูเดช	วีระนาวิน	52010930
นายวศิน	งามกมลชัย	52011076
นายวิทยา	นาดี	52011116

อาจารย์ภูดิท ชัยดิลกพัฒนกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2555

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษา การออกแบบทางวิศวกรรม โดยใช้กระบวนการ Wiping-Die มาทำการศึกษาผลกระทบอันเนื่องมาจากตัวแปรต่างๆ โดยใช้สถิติวิศวกรรมมาวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรและหาตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อแรงที่ใช้ในกระบวนการ Wiping-Die ซึ่งทางคณะผู้จัดทำพิจารณาถึงองค์ประกอบในการลงมือปฏิบัติงานและความคุ้มค่าที่ได้รับ รวมทั้งผลกระทบต่อค่าใช้จ่าย โดยโปรแกรมอบาคัส (Abaqus) จะเป็นเครื่องมือสำหรับการจำลองเชิงตัวเลข และเหตุการณ์ต่างๆที่จะเกิดขึ้น และโปรแกรมมินิแท็บ(Minitab) จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล และวางแผนการทดลอง จากการทำการทดลองและวิเคราะห์ผล เราสามารถหาสมการที่ใช้คำนวณแรงในกระบวนการ Wiping-Die และเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับแรงในกระบวนการ Wiping-Die ที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลข

PARAMETRIC STUDY OF WIPING-DIE PROCESS USING NUMERICAL
SIMULATION AND DESIGN OF EXPERIMENTS

Puwadech	Veeranavin	52010930
Vasin	Ngamkamolchai	52011076
Wittaya	Nadee	52011116
Phudit	Chaidilokpattanakul	Advisor
Year 2012		

ABSTRACT

The purpose of this project is to research about engineering design by using sheet metal bending process as a case study on effect of parameters and use engineering statistics to analyze and find interaction and significant parameters. Abaqus is an FEM numerical simulation software. Minitab is used to analyze data and design of experiments. From the experiment and analyze we obtained the equation that is close to the bending force equation appeared in manufacturing processes textbooks.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีก็เพราะด้วยความเอาใจใส่แนะนำและช่วยเหลือในด้านต่างๆเสมอมาจากอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ภูติท ชัยดิolkพัฒนกุล ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในการดูแลเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณอาจารย์กรรมการที่ช่วยให้คำแนะนำ ชี้แจงข้อบกพร่องที่ควรแก้ไข ซึ่งทำให้ผลงานมีความสมบูรณ์มากขึ้น รวมถึงสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้สถานที่ในการทำโครงการนี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้คือบิดามารดาอันเป็นที่เคารพรักยิ่งซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดีพร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมาในทุกๆด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายภูเดช วีระนาวิน

นายวศิน งามกมลชัย

นายวิทยา นาดี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตการทำโครงการ.....	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและการคำนวณที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 กระบวนการตัดงอโลหะแผ่น.....	3
2.1.1 แผ่นอลูมิเนียม.....	3
2.1.2 ทฤษฎีการตัดงอ.....	5
2.1.3 การคำนวณหาแรงที่ใช้งอชิ้นงาน.....	8
2.2 การทดลองแพคทอเรียล.....	9
2.2.1 การทดลองแพคทอเรียลเต็มรูปสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 2 ระดับ.....	9
2.2.2 การทดลองแพคทอเรียลเต็มรูปสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 3 ระดับ.....	10
2.2.3 ผลกระทบร่วม.....	10
2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	11
2.3.1 องศาเสรี.....	12
2.3.2 ผลรวมกำลังสอง.....	13
2.3.3 ผลเฉลี่ยกำลังสอง.....	14
2.3.4 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น.....	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์อิลิเมนต์และการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางสถิติ.....	15
3.1 บทนำ.....	15
3.2 วิเคราะห์ความแข็งแรงโดยใช้ CAE.....	15
3.2.1 ขั้นตอนของการวิเคราะห์วิธีทางไฟไนต์อิลิเมนต์.....	15
3.2.2 ขั้นตอนการทำ CAE สำหรับการออกแบบตัวอย่างโครงสร้าง.....	16
3.3 การวิเคราะห์โดยใช้สถิติ.....	57
3.3.1 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป.....	57
3.3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	61
3.3.3 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น.....	63
บทที่ 4 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์ผล.....	66
4.1 การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 2 ระดับ.....	66
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 2 ระดับ.....	68
4.2.1 การวิเคราะห์ผลกระทบแต่ละตัวแปร.....	68
4.2.2 ผลกระทบร่วมระหว่างตัวแปร.....	69
4.3 การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 3 ระดับ.....	72
4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 3 ระดับ.....	74
4.4.1 การวิเคราะห์ผลกระทบแต่ละตัวแปร.....	74
4.4.2 ผลกระทบร่วมระหว่างตัวแปร.....	75
4.5 Regression Model	76
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน.....	79
5.1 สรุปผลและวิจารณ์ผลการดำเนินงาน.....	79
5.2 ปัญหาที่พบจากการดำเนินงาน.....	79
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	79
บรรณานุกรม.....	80

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ตารางแสดงผลจากการทดลองแพคทอเรียลเต็มรูปสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 2 ระดับ.....	66
4.2 ตารางแสดงผลกระทบต่อแรงดัดของแต่ละตัวแปร.....	68
4.3 ตารางแสดงผลจากการทดลองแพคทอเรียลเต็มรูปสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 3 ระดับ.....	72
4.4 ตารางแสดงผลกระทบต่อแรงดัดของแต่ละตัวแปร.....	74

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุแบบยืดหยุ่น- พลาสติกสมบูรณ์.....	4
2.2 แรงที่เกิดขึ้นระหว่างการงอขึ้นรูป.....	5
2.3 ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ของการงอ.....	6
2.4 ตำแหน่งของเส้นแกนกลาง.....	7
2.5 การไหลของโลหะและการบิดงอ.....	8
2.6 ความสัมพันธ์ที่มีผลกระทบร่วมระหว่างตัวแปร.....	11
2.7 ความสัมพันธ์ที่ไม่มีผลกระทบร่วมระหว่างตัวแปร.....	11
2.8 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	12
3.1 หน้าต่างการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม ABAQUS.....	16
3.2 การกำหนดลักษณะของชิ้นงาน.....	17
3.3 การกำหนดลักษณะของชิ้นงาน.....	18
3.4 การกำหนดมุมของชิ้นงาน (แม่แบบ)	18
3.5 ตัวอย่างชิ้นงาน (แม่แบบ)	19
3.6 ตัวอย่างชิ้นงาน (ตัวกด)	20
3.7 ตัวอย่างชิ้นงาน (ตัวยึดแผ่นโลหะ)	21
3.8 ตัวอย่างชิ้นงาน (แผ่นโลหะ)	22
3.9 หน้าต่างการใส่คุณสมบัติให้กับชิ้นงาน.....	22
3.10 ตัวอย่างการใส่คุณสมบัติของชิ้นงาน.....	23
3.11 หน้าต่างการกำหนดคุณสมบัติเพื่อนำไปใส่ในชิ้นงาน.....	25
3.12 ตัวอย่างการนำคุณสมบัติที่กำหนดไว้ไปใส่ในชิ้นงาน	26
3.13 ตัวอย่างหลังจากการใส่คุณสมบัติในชิ้นงานแล้ว.....	27
3.14 การประกอบชิ้นงานที่ออกแบบไว้	28
3.15 การกำหนด Surface ของชิ้นงาน	29
3.16 การเลือก Surface ของชิ้นงาน(แม่แบบ)	29
3.17 การเลื่อนตำแหน่งชิ้นงาน.....	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18 การประกอบชิ้นงาน.....	31
3.19 การกำหนด Step	32
3.20 การกำหนด Step.....	33
3.21 ตัวอย่างการกำหนด Boundary Condition... ..	34
3.22 การเลือกและ Edit Boundary Condition ของแม่แบบ	34
3.23 การเลือกและ Edit Boundary Condition ของตัวยึดแผ่นโลหะ.....	35
3.24 การเลือกและ Edit Boundary Condition ของตัวยึดแผ่นโลหะ.....	37
3.25 การเลือกและ Edit Boundary Condition ของตัวกด.....	38
3.26 การ Manage Step ของ Boundary Condition.....	39
3.27 การกำหนดคุณสมบัติผิวสัมผัสของชิ้นงาน.....	40
3.28 การกำหนดคุณสมบัติผิวสัมผัสของชิ้นงานเป็น Frictional.....	40
3.29 กำหนดชนิดของผิวสัมผัสเข้าไปชิ้นงานในโปรแกรม.....	41
3.30 การเลือก Surface ของชิ้นงาน.....	42
3.31 การกำหนด Interaction ของชิ้นงานระหว่างตัวยึดกับแผ่นโลหะ.....	43
3.32 การกำหนด Interaction ของชิ้นงานระหว่างตัวกดกับแผ่นโลหะ.....	44
3.33 การกำหนดค่าความละเอียดของ Mesh.....	45
3.34 ภาพชิ้นงานที่ทำการสร้าง Mesh เสร็จแล้ว.....	45
3.35 การ Set Surface ที่ตัวกด.....	46
3.36 เลือก Surface ของตัวกดที่ต้องการ.....	47
3.37 การสร้าง History Output.....	47
3.38 การ Set ค่าที่หัวกด.....	48
3.39 แสดงการกำหนดเงื่อนไขในการคำนวณ.....	49
3.40 ผลหลังจากโปรแกรมคำนวณเสร็จแล้ว.....	50
3.41 การพล็อตกราฟจาก History Output.....	50
3.42 แสดงการใส่ค่าที่จะนำมาพล็อตกราฟ.....	51
3.43 การเลือกค่า RF2 มาพล็อตกราฟ.....	52
3.44 การเลือกพล็อตกราฟเป็นค่า Sum.....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.45 กราฟระหว่างแรงเทียบกับเวลา.....	53
3.46 การให้โปรแกรมรวบรวมพล็อตกราฟ.....	54
3.47 การเลือก Operate XY Data.....	54
3.48 การกำหนดค่าในการพล็อตกราฟ.....	55
3.49 การกำหนดค่าในการพล็อตกราฟ.....	56
3.50 แสดงกราฟที่ได้	56
3.51 หน้าต่างโปรแกรม Minitab.....	57
3.52 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป.....	58
3.53 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป.....	58
3.54 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป.....	59
3.55 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป.....	60
3.56 ตารางการทดลอง (การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 2 ระดับ).....	60
3.57 ตารางการทดลองและข้อมูลจากการจำลองเชิงตัวเลข.....	61
3.58 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	62
3.59 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	62
3.60 ตาราง ANOVA.....	63
3.61 ตารางการทดลองและข้อมูลจากการจำลองเชิงตัวเลข.....	64
3.62 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น.....	65
3.63 สมการที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น.....	65
4.1 แสดงค่าแรงตัดจากการจำลองเชิงตัวเลขที่ Sheet Thickness 2mm.....	67
4.2 แสดงค่าแรงตัดจากที่การจำลองเชิงตัวเลขที่ Sheet Thickness 4mm.....	67
4.3 แสดงผลกระทบร่วมระหว่าง Die Edge Radius กับ Punch Edge Radius.....	69
4.4 แสดงผลกระทบร่วมระหว่าง Die Edge Radius กับ Punch Velocity.....	69
4.5 แสดงผลกระทบร่วมระหว่าง Die Edge Radius กับ Sheet Thickness.....	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงผลกระทบรวมระหว่าง Punch Edge Radius กับ Punch Velocity.....	70
4.7 แสดงผลกระทบรวมระหว่าง Punch Edge Radius กับ Sheet Thickness.....	71
4.8 แสดงผลกระทบรวมระหว่าง Punch Velocity กับ Sheet Thickness.....	71
4.9 แสดงค่าแรงตัดจากการจำลองเชิงตัวเลขที่ Sheet Thickness 2mm.....	73
4.10 แสดงค่าแรงตัดจากการจำลองเชิงตัวเลขที่ Sheet Thickness 3mm.....	73
4.11 แสดงค่าแรงตัดจากการจำลองเชิงตัวเลขที่ Sheet Thickness 4mm.....	74
4.12 แสดงผลกระทบรวมระหว่าง Die Edge Radius กับ Punch Edge Radius.....	75
4.13 แสดงผลกระทบรวมระหว่าง Punch Edge Radius กับ Sheet Thickness.....	75
4.14 แสดงผลกระทบรวมระหว่าง Die Edge Radius กับ Sheet Thickness.....	76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ในสภาพสังคมปัจจุบัน มีธุรกิจการค้าและอุตสาหกรรมต่างๆเกิดขึ้นอย่างมากมาย ทำให้บรรยากาศในการลงทุนและแข่งขันในเชิงธุรกิจนับวันจะยิ่งทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น การดำเนินการทางธุรกิจดังกล่าวจะต้องมีความระมัดระวังเป็นอย่างมาก จึงเกิดการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆขึ้นเพื่อช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นการตอบสนองความพึงพอใจของลูกค้า ดังนั้นการออกแบบทางวิศวกรรมในยุคสมัยใหม่จึงได้นำวิธีการทางสถิติมาเป็นแนวทางในการวิเคราะห์และทำนายผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นเพื่อเป็นการลดปัญหาความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นให้น้อยที่สุดและให้ได้ค่าที่ดีที่สุด แต่เมื่อมีตัวแปรหลายตัวที่มีความซับซ้อนและยุ่งยากมากขึ้นทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงในการวิเคราะห์และทำนายผลลัพธ์ของงานนั้นๆ จึงได้มีการนำคอมพิวเตอร์เข้ามามีบทบาทในการช่วยวิเคราะห์และคำนวณซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงานและช่วยให้ทำนายผลลัพธ์ได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อเป็นการศึกษาและหาตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อกระบวนการดัดโลหะด้วยวิธีการ Wiping-Die
2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการทดลองโดยยึดหลักการวิเคราะห์ทางสถิติ

1.3 ขอบเขตของการทำโครงการ

1. กำหนดให้วัสดุที่ใช้เป็น Aluminum 6061-T6 และมีพฤติกรรมแบบ Elastic perfectly-plastic
2. วิเคราะห์ผลในช่วงที่ยังไม่เกิดการ Springback
3. พฤติกรรมของวัสดุในช่วง elastic เป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's law)

4. ช่วงตัวแปรที่ศึกษา

- Die Edge Radius	2 – 10 มิลลิเมตร
- Punch Edge Radius	2 – 10 มิลลิเมตร
- Punch Velocity	4 – 10 มิลลิเมตร/วินาที
- Sheet Thickness	2 – 4 มิลลิเมตร

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. สืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
3. ศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ Wiping-Die แผ่นโลหะ
4. ออกแบบการทดลอง 2-Level Factorial Design เพื่อตัดตัวแปรที่ไม่มีนัยสำคัญทิ้ง
5. ออกแบบการทดลอง 3-Level Factorial Design เพื่อนำมาสร้าง Empirical Model
6. สรุปผลการดำเนินงาน

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. ทำให้ผู้วิจัยได้ศึกษาและสามารถทำการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อที่จะใช้ทดแทนการทดลองจริง ซึ่งจะสิ้นเปลืองงบประมาณ
2. สามารถออกแบบการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการตัดโลหะด้วยวิธีการ Wiping-Die
3. สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับกระบวนการ Wiping-Die ในช่วงตัวแปรที่ศึกษา

บทที่ 2

ทฤษฎีและการคำนวณที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการดัดงอโลหะแผ่น (Sheet Metal Bending Process)

โลหะแผ่น (Sheet Metal) หมายถึง โลหะแผ่นโดยทั่วไปที่มีความหนาไม่เกิน 3/16 นิ้วหรือ 4.8 มิลลิเมตร ถ้าหนามากกว่านี้ เรียกว่า เหล็กแผ่น ส่วนความกว้างและความยาวนั้นมีอยู่หลายขนาด ขนาดที่นิยมใช้กันมากในเมืองไทย คือ 36×96 นิ้ว และ 48×96 นิ้ว หรือ 3×8 ฟุต และ 4×8 ฟุต โลหะแผ่นโดยทั่วไปแบ่งตามประเภทของโลหะได้ 2 ชนิด ได้แก่ โลหะแผ่นที่เป็นเหล็ก (Ferrous Sheet Metals) และโลหะแผ่นที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-ferrous Sheet Metals) โลหะแผ่นที่ไม่ใช่เหล็กเป็นโลหะแผ่นที่ไม่มีเหล็กผสมอยู่ โลหะแผ่นประเภทนี้ไม่ต้องเคลือบผิวป้องกันสนิมแต่อย่างใด ที่นิยมใช้กันมากในงานโลหะแผ่น ได้แก่ แผ่นทองแดง แผ่นอลูมิเนียม แผ่นสังกะสี เป็นต้น

ในการศึกษาโครงการเรื่องนี้จะทำการศึกษาโดยการจำลองโลหะแผ่นเป็นประเภทโลหะแผ่นที่ไม่ใช่เหล็กโดยนำคุณสมบัติของอลูมิเนียม 6061 T6 เป็นวัสดุที่ใช้ในการจำลองในกระบวนการดัดงอโลหะแผ่นโดยมีคุณสมบัติ ดังนี้

1. วัสดุมีพฤติกรรมเป็นแบบยืดหยุ่น - พลาสติกอย่างสมบูรณ์ (Elastic-Perfectly Plastic)
2. ความหนาแน่นของวัสดุมีค่าเท่ากับ 2770 kg/m^3
3. ความเค้นจุดคราก (Yield strength) เท่ากับ 200 MPa
4. ความต้านแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength หรือ UTS) เท่ากับ 254 MPa

2.1.1 แผ่นอลูมิเนียม (Aluminum Sheet)

มีคุณสมบัติพิเศษ คือ มีน้ำหนักเบา ทนต่อการกัดกร่อนและมีผิวสีขาวเป็นมันน้ำหนักเบากว่าแผ่นเหล็กถึง 3 เท่า ดังนั้นจึงนิยมนำเอาแผ่นอลูมิเนียมมาใช้แทนแผ่นเหล็กอาบสังกะสี (Galvanized Sheet) กันมาก ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แผ่นอลูมิเนียมสามารถแบ่งตามความหนาได้ 2 ชนิด คือ อลูมิเนียมแผ่นหนา (Plate) กับอลูมิเนียมแผ่นบาง (Sheet) แผ่นอลูมิเนียมที่ใช้กันทั่วไปจะเป็นอลูมิเนียมผสมคือมีโลหะธาตุอื่นผสมลงไป เพื่อทำให้เกิดความแข็งแรงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โลหะธาตุที่นำมาผสม เช่น ทองแดง แมงกานีส โครเมียม และซิลิกอน เป็นต้น แผ่นอลูมิเนียมผสมโดยทั่วไปจะต้องมีอลูมิเนียมบริสุทธิ์ผสมอยู่อย่างน้อย 90% [3]

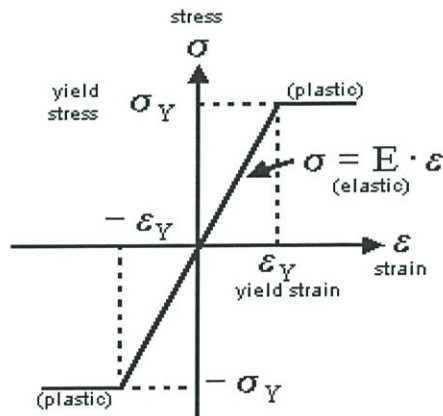
2.1.1.1 เกรดอลูมิเนียม (Aluminum Grades)

อลูมิเนียมอัลลอยด์ในประเภท 6xxx คือ (6061, 6063) ประกอบไปด้วยซิลิกอน และแมกนีเซียม ในปริมาณที่มากพอในการขึ้นรูป magnesium silicide (Mg_2Si) ทำให้สามารถทำ

กระบวนการอบร้อนได้ แต่มีความแข็งไม่เท่ากับประเภท 2xxx และ 7xxx โดยประเภท 6xxx นี้จะสามารถทำการขึ้นรูปได้ดี, เชื่อมง่าย, แปรรูปง่าย และต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ด้วยความแข็งแรงปานกลาง เกรดอลูมิเนียมในประเภทที่สามารถทำการ heat-treatable ได้นี้ อาจจะขึ้นรูปในแบบ T4 temper (แก้ปัญหาการอบร้อนได้ แต่ไม่สามารถเร่งการอบร้อนได้) และเพิ่มความแข็งหลังจากการขึ้นรูปแบบคุณสมบัติ T6 โดยการเร่งการอบร้อน[6]

2.1.1.2 พฤติกรรมของวัสดุโลหะแผ่น (Behavior of Material)

ในการศึกษาโครงการเรื่องนี้ การจำลองกระบวนการตัดงอโลหะแผ่นนั้นจะสมมติให้โลหะแผ่นมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น - พลาสติกอย่างสมบูรณ์ (Elastic-Perfectly Plastic) วัสดุประเภทนี้มีลักษณะการตอบสนองหลังการครากที่สำคัญคือจะไม่สามารถรับแรงกระทำได้เพิ่มขึ้น นั่นคือเราสามารถที่จะทำให้วัสดุนี้ยืดต่อไปได้โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มภาระกรรม ซึ่งลักษณะของวัสดุประเภทนี้จะมีความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุแบบยืดหยุ่น- พลาสติกสมบูรณ์

จากรูปที่ 2.1 เราสามารถแบ่งความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุประเภทนี้ออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงก่อนคราก เราจะได้ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในแนวแกนเดียวเป็น

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (2.1)$$

โดยที่

σ = ความเค้น (stress), MPa

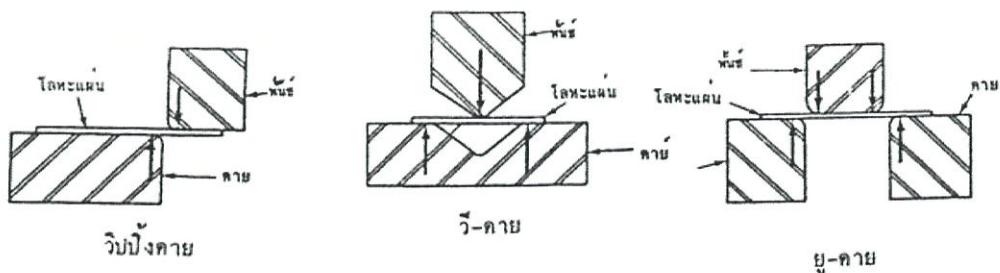
E = โมดูลัสของยัง (Young's modulus), MPa

\mathcal{E} = ความเครียด (strain)

เมื่อ E คือค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของยังมีค่าเท่ากับความชันของกราฟในช่วงนี้ ช่วงหลังคราก จะได้ว่าหลังจากช่วงนี้ค่าความเค้นจะคงที่ขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้น หรือความชันของกราฟเป็นศูนย์

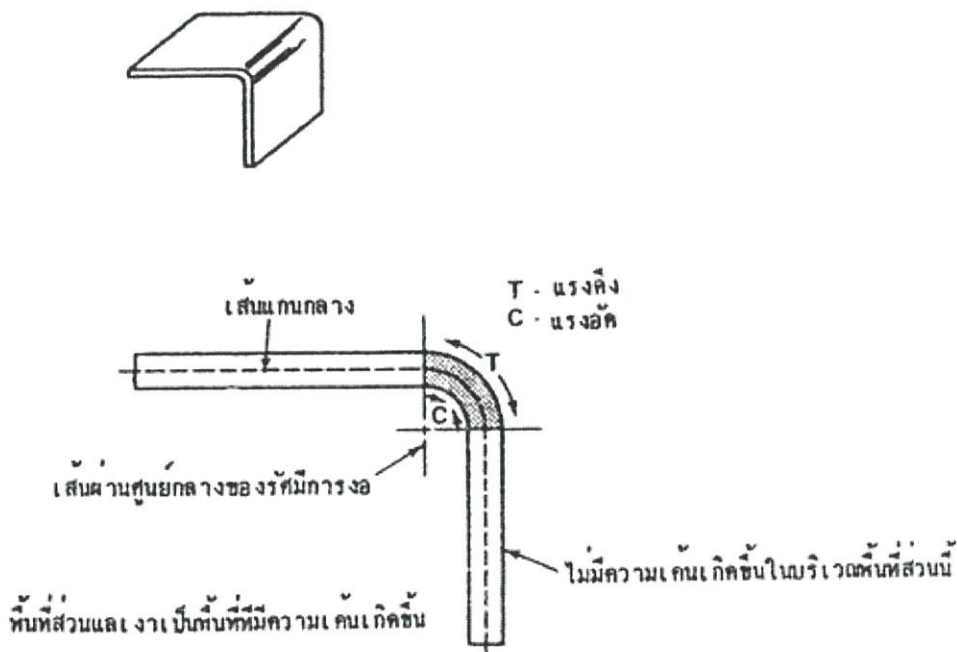
2.1.2 ทฤษฎีการดัดงอ (Bending Theory)

ขบวนการในการขึ้นรูปโลหะทั้งหมดนั้นนับว่าขบวนการงอขึ้นรูป (bending) เป็นขบวนการที่ง่ายที่สุดที่ใช้งานกับเครื่องปั๊มโลหะโดยขบวนการงอขึ้นรูปนี้อาจทดลองได้โดยใช้เครื่องมือง่ายๆภายในบ้านก็ทำได้ ขบวนการงอขึ้นรูปนั้นเป็นขบวนการอันหนึ่งในหลายๆขบวนการของขบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น ขบวนการขึ้นรูปโดยการดัดงอนั้นมีกรรมวิธีที่แตกต่างไปจากขบวนการตัดขึ้นรูป (cutting) และขบวนการลากขึ้นรูป (drawing) เป็นอย่างมาก ในการขึ้นรูปโลหะโดยการงอขึ้นรูปนั้น เราต้องให้แรงแก่ชิ้นงานทั้งนี้ เพื่อให้ชิ้นงานนั้นเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ซึ่งแรงที่ให้แก่ชิ้นงานนั้นจะต้องไม่ทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานมากกว่าความเค้นดึงสูงสุดของชิ้นงานนั้น และจะต้องไม่น้อยกว่าจุดยืดหยุ่นจำกัดของชิ้นงานนั้น เมื่อเราให้แรงแก่ชิ้นงานเพื่อทำการงอจะปรากฏว่าความเค้นของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจะเริ่มจากบางจุดที่ต่ำกว่าความแข็งแรงสูงสุดของโลหะนั้น และความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นจะแผ่กระจายไปยังส่วนต่างๆ ของชิ้นงาน ซึ่งขณะที่แผ่กระจายนั้น ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานก็จะค่อยๆ ลดลงด้วยจนถึงบริเวณที่ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานเป็นศูนย์ลักษณะการเกิดความเค้นบนชิ้นงานแบบนี้ จะทำให้เกิดการบิดงอของชิ้นงานมากกว่าจะเกิดการฉีกขาด สำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของโลหะนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานจะต้องผ่านจุดยืดหยุ่นจำกัดและจุดล้าตัวด้วย จากรูปที่ 2.2 นั้น เป็นการแสดงถึงการเกิดแรงที่ใช้ในการงอบนแม่แบบ (die) ชนิดต่างๆ กัน สำหรับวี-ดาย (V-die) นั้นเราจะพบว่ามีการแผ่กระจายของแรงเกิดขึ้นมากที่สุด ส่วน ยู-ดาย (u-die) และวิปิง-ดาย (Wiping-die) นั้นนิยมใช้ในการผลิตชิ้นงานมาก และยู-ดาย มักจะนิยมเรียกว่า ชาแนล ดาย (channel die)



รูปที่ 2.2 แรงที่เกิดขึ้นระหว่างการงอขึ้นรูป

การงอ (bending) นั้นมีลักษณะความแตกต่างของการเกิดความเค้นของโลหะเฉพาะที่เท่านั้น ความเค้นที่เกิดเฉพาะที่นี้จะเกิดขึ้นตรงรัศมีของการงอของชิ้นงานเท่านั้น ส่วนพื้นที่ของชิ้นงานส่วนที่เหลือนั้นจะไม่มี ความเค้นเกิดขึ้นเลย จากรูปที่ 2.3 นั้น เป็นการแสดงถึงพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ได้ผ่านขบวนการงอมาแล้ว ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานนั้นเราจะสังเกตได้ดังนี้ โลหะที่อยู่ด้านนอกของรัศมีการงอจะยืดออกแสดงให้ เห็นว่ามีความเค้นดึงเกิดขึ้น ส่วนโลหะที่อยู่ด้านในของรัศมีการงอจะหดตัวเข้า แสดงให้เห็นว่ามีความเค้นอัดเกิดขึ้น ดังนั้นถ้ามีการฉีกขาดปรากฏขึ้นระหว่างการงอมักจะเกิดขึ้นที่ส่วนนอกของการงอ แต่ถ้ามีรอยย่น (wrinkle) ปรากฏขึ้นมันจะเกิดขึ้นที่ด้านในของการงอ

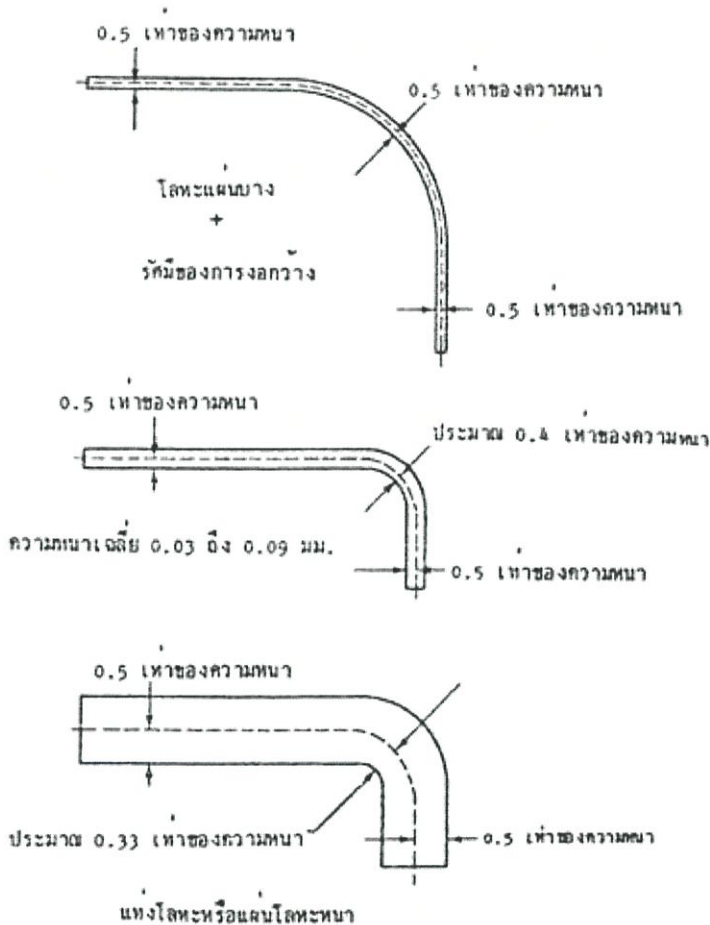


รูปที่ 2.3 ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ของการงอ

2.1.2.1 เส้นแกนกลาง (Neutral Axis)

ทั้งนี้เพราะว่าที่ชิ้นงานนั้นได้เกิดความเค้นดึงขึ้นที่ด้านหนึ่งและอีกด้านหนึ่งนั้นได้เกิดความเค้นอัดขึ้น การกลับตรงข้ามของความเค้นทั้งสองนี้จะต้องเกิดขึ้นตรงบริเวณใกล้ๆ เส้นแกนกลางของความหนาของชิ้นงาน ความเค้นดึงและความเค้นอัดจะเกิดขึ้นมากที่สุดตรงบริเวณด้านขอบนอกทั้งสองข้างของความหนาของชิ้นงาน และความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งสองนี้จะค่อยๆ ลดลงๆ เมื่อระยะห่างเข้ามาใกล้กับเส้นแกนกลางของความหนาของชิ้นงาน ซึ่งที่เส้นแกนกลางของความหนาหรือบริเวณใกล้ๆ เส้น

แกนกลางของความหนาจะมีความเค้นเป็นศูนย์คือไม่เกิดความเค้นขึ้นเลย เส้นที่ไม่มีความเค้นเกิดขึ้นเลยเราเรียกว่า “เส้นแกนกลาง” (neutral axis)



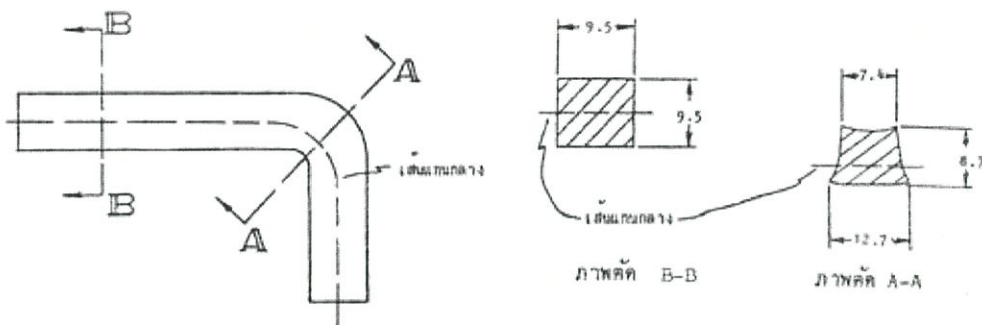
รูปที่ 2.4 ตำแหน่งของเส้นแกนกลาง

2.1.2.2 การไหลตัวของโลหะในการขึ้นรูป (Metal Flow)

เพราะว่าโลหะบริเวณที่เราถือนั้นได้มีความเค้นเกิดขึ้นซึ่งมันจะทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะ ความเค้นดึงที่ทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะจะไปทำให้ความหนาของชิ้นงานในบริเวณที่ถือนั้นลดลง ส่วนความเค้นอัดที่ทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะจะไปเพิ่มขนาดความกว้างของชิ้นงานให้เพิ่มขึ้น ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 จากรูปเป็นการแสดงถึงการบิดงอของแท่งโลหะเมื่อได้รับการอ ลักษณะของการไหลตัวของโลหะระหว่างการขึ้นรูปโดยการดัดงอ มีดังต่อไปนี้

1. ถ้าแท่งโลหะได้ถูกนำมางอจะทำให้เกิดการบิดงอทางพื้นที่หน้าตัดอย่างมากและจะมีการไหลตัวของโลหะทำให้ความหนาของแท่งโลหะลดลงเล็กน้อย แต่จะไปเพิ่มทางด้านกว้างมากขึ้น
2. ถ้าโลหะแผ่นได้ถูกนำมางอจะมีการบิดงอทางพื้นที่หน้าตัดเล็กน้อย แต่ความหนาจะลดลงอย่างมากและไม่มีการเพิ่มตัวขึ้นทางความกว้างเลย

เมื่อเรางอโลหะแผ่นโอกาสที่จะเกิดการฉีกขาดมีมาก ทั้งนี้เพราะการมีอัตราความกว้างมากต่อความหนาที่น้อย ส่วนรอยย่นจะปรากฏขึ้นเสมอเมื่อเรางอโลหะแผ่นหรือแท่งโลหะอย่างแรง ทั้งนี้เพราะว่าอัตราความกว้างน้อยต่อความหนามากจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเพิ่มทางด้านการอัดตัวมากขึ้น



รูปที่ 2.5 การไหลของโลหะและการบิดงอ

2.13 การคำนวณหาแรงที่ใช้งอชิ้นงาน (Bending Force Calculation)

ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยการดัดงอนั้น จำเป็นที่จะต้องคำนวณหาแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดถูกต้องตามที่ต้องการออกมา การงอโลหะแผ่น จะมีความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน คล้ายกับการเกิดความเค้นของคาน (Beam) นั่นเอง ดังนั้นในการคำนวณหาแรงที่ใช้ของชิ้นงาน สูตรที่ใช้ในการคำนวณจึงถูกดัดแปลงมาจากสูตรการหาความเค้นของคานนั่นเอง สูตรที่ใช้คำนวณหาแรงงอชิ้นงานบนวิปปีงดาวย

$$F = \frac{K(UTS)wt^2}{D} \quad (2.2)$$

โดยที่

t คือ ความหนาของโลหะแผ่น, มิลลิเมตร

K คือ ค่าคงที่ ในกรณีของ wiping-die เท่ากับ 0.33

w คือ ความกว้างของโลหะแผ่นที่ถูกงอ, มิลลิเมตร

D คือ รัศมีของพันธั้+รัศมีของตาย+ความหนาของโลหะแผ่น, มิลลิเมตร

UTS คือ ความต้านแรงดึงสูงสุด, MPa

F คือ แรงที่ใช้งอชิ้นงาน, นิวตัน

ในกรณีที่เป็นยู - ดาย ค่า 0.333 จะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าคือ 0.667 ทั้งนี้เพราะว่าการงอเกิดขึ้นสองข้างของชิ้นงานและมีช่วงการงอเท่ากัน หรืออาจจะใช้วิธีอีกอย่างหนึ่งสำหรับคำนวณแรงที่ใช้กับยูตายก็คือ จะให้ค่าความกว้างของชิ้นงานที่นำมางอ (w) เปลี่ยนเป็นสองเท่า ส่วนค่าคงที่ก็คงใช้ 0.333 เช่นเดิม ค่าคงที่สำหรับใช้ในการคำนวณหาแรงที่ใช้งอชิ้นงานที่วี - ดายนั้น จะแตกต่างออกไปอีก ค่าคงที่สำหรับวี - ดายจะเป็นสี่เท่าของ วิปปีง ดาย คือจะมีค่าเท่ากับ 1.33[7]

2.2 การทดลองแฟคทอเรียล

การทดลองแฟคทอเรียล คือ การทดลองที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการออกแบบแผนการทดลองเนื่องจากสามารถศึกษาตัวแปรได้หลายตัวแปรพร้อมกัน โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ ศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างตัวแปร หรือที่เรียกว่า “อันตรกิริยา” (Interaction)

2.2.1 การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 2 ระดับ

“การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 2 ระดับ” หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “การทดลองเพื่อคัดตัวแปร” เป็นขั้นตอนแรกๆของการออกแบบการทดลองเพื่อทำการคัดตัวแปรออกเนื่องจากมีตัวแปรที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเยอะ และการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 2 ระดับ เป็นการออกแบบการทดลองที่มีจำนวนครั้งการทดลองน้อยที่สุด โดยจะศึกษาที่ระดับต่ำและระดับสูงของตัวแปร จำนวนครั้งการทดลองสามารถหาได้จากสมการ

$$N = 2^k \quad (2.3)$$

โดยที่

N คือ จำนวนครั้งการทดลอง

k คือ จำนวนตัวแปรทั้งหมด

2.2.2 การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 3 ระดับ

การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 3 ระดับ จะเป็นการศึกษาเพื่อนำไปสร้างสมการที่มีความแม่นยำสำหรับกระบวนการนั้นๆ โดยจำนวนครั้งการทดลองสามารถหาได้จาก

$$N = 3^k \quad (2.4)$$

โดยที่

N คือ จำนวนครั้งการทดลอง

k คือ จำนวนตัวแปรทั้งหมด

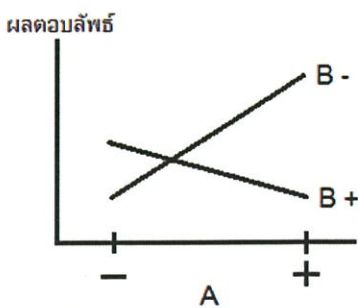
2.2.3 ผลกระทบร่วม

ผลกระทบร่วม คือ คือ การมีผลกระทบกันระหว่างตัวแปรหลัก เช่น การทดลองมีตัวแปร 2 ให้เป็น A และ B โดยแต่ละตัวแปร มี 2 ระดับ ให้เป็น + และ - และจากการทดลองได้ผลการทดลองเป็น

การเพิ่มขึ้นของ A ที่ตัวแปร B ที่ระดับ - ทำให้ ผลตอบกลับเพิ่มขึ้น

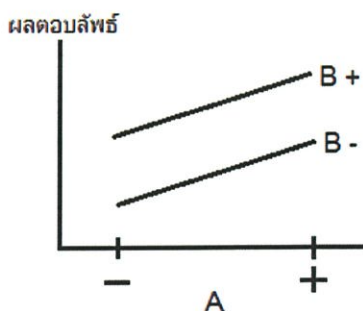
การเพิ่มขึ้นของ A ที่ตัวแปร B ที่ระดับ + ทำให้ ผลตอบกลับลดลง

นี่คือการมีผลกระทบระหว่างตัวแปร



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ที่มีผลกระทบร่วมระหว่างตัวแปร

แต่ถ้าหากว่าความต่างของ ผลตอบลัพธ์ ของตัวแปร A ที่ระดับ + และ - ไม่ต่างกันแม้จะมีการเปลี่ยนระดับตัวแปร B แสดงว่า ไม่มีผลกระทบร่วมระหว่างตัวแปร



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ที่ไม่มีผลกระทบร่วมระหว่างตัวแปร

ถ้าหากเราไม่ทราบถึงการมีผลกระทบร่วมระหว่างตัวแปร เราอาจจะนำไปสู่การสรุปผลที่ผิดพลาด

2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance ; ANOVA) เป็นวิธีการพื้นฐานทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองที่สนใจศึกษา โดยเราสามารถที่จะวิเคราะห์ถึงผลกระทบของแต่ละตัวแปร

ที่เราสนใจ และสามารถนำไปสร้างสมการการถดถอยเชิงเส้น โดยการใช้ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

Analysis of Variance for Bending Force, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Die Edge Radius	1	1943323	1943323	1943323	17.98	0.001
Punch Edge Radius	1	1348034	1348034	1348034	12.47	0.005
Punch Velocity	1	50119	50119	50119	0.46	0.510
Sheet Thickness	1	8666069	8666069	8666069	80.19	0.000
Error	11	1188790	1188790	108072		
Total	15	13196336				

รูปที่ 2.8 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

โดยที่

DF คือ องศาเสรี

SS คือ ผลรวมกำลังสอง

MS คือ ผลเฉลี่ยกำลังสอง

โดยค่าที่จะใช้สำหรับการดูผลกระทบของแต่ละตัวแปรคือค่า Mean Squares

2.3.1 องศาเสรี

จำนวนของข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าข้อมูล โดยสามารถหาได้จากสมการ

$$\text{Degrees of Freedom} = \text{Level of factor} - 1 \quad (2.5)$$

2.3.2 ผลรวมกำลังสอง

ผลรวมกำลังสอง หรือ Sum of Squares เป็นการเปรียบเทียบผลต่างกำลังสองของแต่ละกลุ่ม และทำให้เห็นความแตกต่างระหว่างกลุ่มว่ามีอย่างน้อยเพียงใด สามารถหาได้จาก Contrasts ของ การหาผลบวกกำลังสองต้องเริ่มจากการหา Contrast โดยสมการทั่วไป คือ

$$Contrast_{AB\dots K} = (a \pm 1)(b \pm 1) \cdots (k \pm 1) \quad (2.6)$$

และการหา Contrast ของ Main Effect และ Interaction จะสามารถหาได้ โดยในวงเล็บฝั่ง ขวามือของสมการจะใส่เป็นเครื่องหมายลบ เมื่อในวงเล็บนั้นมีตัวอักษรที่ห้อยอยู่หลัง Contrast เช่น เราต้องการหา Contrast ของ AB จะได้เป็น

$$Contrast_{AB} = (a - 1)(b - 1)(c + 1) \quad (2.7)$$

และทำการคูณกระจายได้เป็น

$$Contrast_{AB} = abc + ab + c + (1) - ac - bc - a - b \quad (2.8)$$

จากนั้นทำการหาผลบวกกำลังสองของ AB ได้จาก

$$SS_{AB} = \frac{1}{n2^k} (Contrast_{AB})^2 \quad (2.9)$$

โดยที่

n คือ จำนวนการทำซ้ำ

2.3.3 ผลเฉลี่ยกำลังสอง

เป็นค่าที่แสดงถึงผลกระทบต่อค่าตอบสนอง โดยถ้ามีค่ามากก็จะแสดงว่ามีผลกระทบมาก โดยสามารถหาได้จากสมการ

$$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{DF_{AB}} \quad (2.10)$$

2.3.4 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปร กับค่าตอบสนองว่ามีความสัมพันธ์กันในลักษณะใด เพื่อประโยชน์ในด้านการพยากรณ์ค่าตัวแปรตาม ซึ่งจะนำไปใช้เพื่อการวางแผนกระบวนการผลิต ปรับปรุงกระบวนการผลิต และกำหนดค่าตัวแปรเพื่อให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุด ซึ่งงานส่วนใหญ่จะอยู่ในส่วนของการออกแบบพารามิเตอร์

บทที่ 3

การจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์และการวิเคราะห์ด้วย โปรแกรมทางสถิติ

3.1 บทนำ

ระเบียบทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เข้ามามีอิทธิพลต่อการออกแบบงานทางวิศวกรรมเป็นอย่างมาก ในปัจจุบันวิศวกรในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ พึ่งพาการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์เพื่อป้องกันถึงปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการออกแบบได้โดยตรงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยไม่ต้องลองผิดลองถูกดังเช่นที่เคยทำกันมาในอดีต ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายทั้งทางด้านเวลาและปริมาณของวัสดุ หลีกเลี่ยงการทดลองที่ไม่จำเป็น และที่สำคัญที่สุดชิ้นงานที่ออกแบบขึ้นมาชิ้นนั้นจะมีความถูกต้อง ให้ประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิเช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ อาคารและโครงสร้าง ฯลฯ ล้วนนำไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์มาใช้ในการออกแบบ

3.2 วิเคราะห์ความแข็งแรงโดยใช้ CAE(Computer Aided Engineering)

การวิเคราะห์ชิ้นงานโดยใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์(Computer Aid Engineering: CAE) เราเลือกใช้โปรแกรม Abaqus มาออกแบบโดยคำนึงถึงความแข็งแรง (ใช้ CAE: ABAQUS 6.10) การออกแบบโดยคำนึงถึงความแข็งแรง อาศัยการวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุจากวิชา กลศาสตร์ วัสดุและการออกแบบเครื่องจักร เมื่อใช้การคำนวณทางทฤษฎีแล้วสามารถทดสอบความแข็งแรงโดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการจำลองการทดลอง เนื่องจากการทดลองของจริงนั้นต้องเสียค่าใช้จ่าย และเวลาในการทดลองมากกว่าการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการจำลองการทดลอง

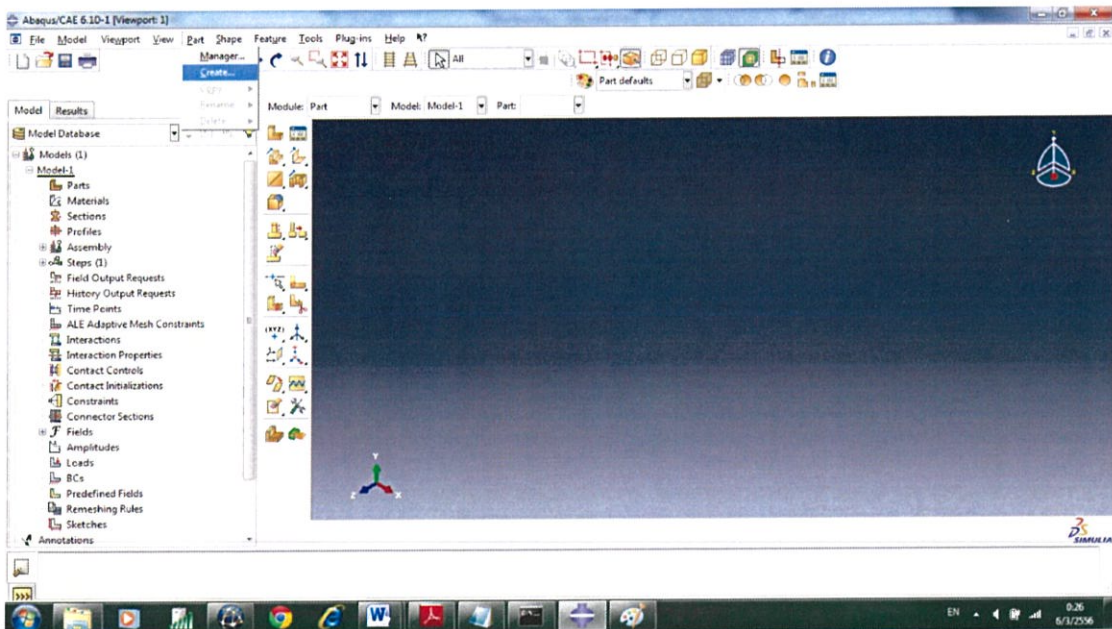
3.2.1 ขั้นตอนของการวิเคราะห์วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

1. การวิเคราะห์ของขอบเขตปัญหาข้างในไฟไนต์เอลิเมนต์
2. เลือกจุดที่เปลี่ยนแปลงและใส่เอลิเมนต์เข้าฟังก์ชัน
3. หาค่าของคุณสมบัติแต่ละเอลิเมนต์
4. รวบรวมของระบบสติฟเนสเมตริก (Stiffness Matrix)

5. สภาวะเงื่อนไขขอบเขต
6. แบบของชนิดแรงทิศทาง
7. การแก้สมการของสมการระบบเมตริกสำหรับจุดที่เปลี่ยนแปลง
8. การดำเนินเพิ่มเติมสำหรับค่าความเค้น

3.2.2 ขั้นตอนการทำ CAE สำหรับการออกแบบตัวอย่างโครงสร้าง

1. สร้างแบบจำลองในโปรแกรม ABAQUS โดยเลือก Part>Create



รูปที่ 3.1 หน้าต่างการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม ABAQUS

2. กำหนดลักษณะของชิ้นงาน (แม่แบบ)

Name: Die

Modeling space: 3D

Type: Deformable

Shape: Solid

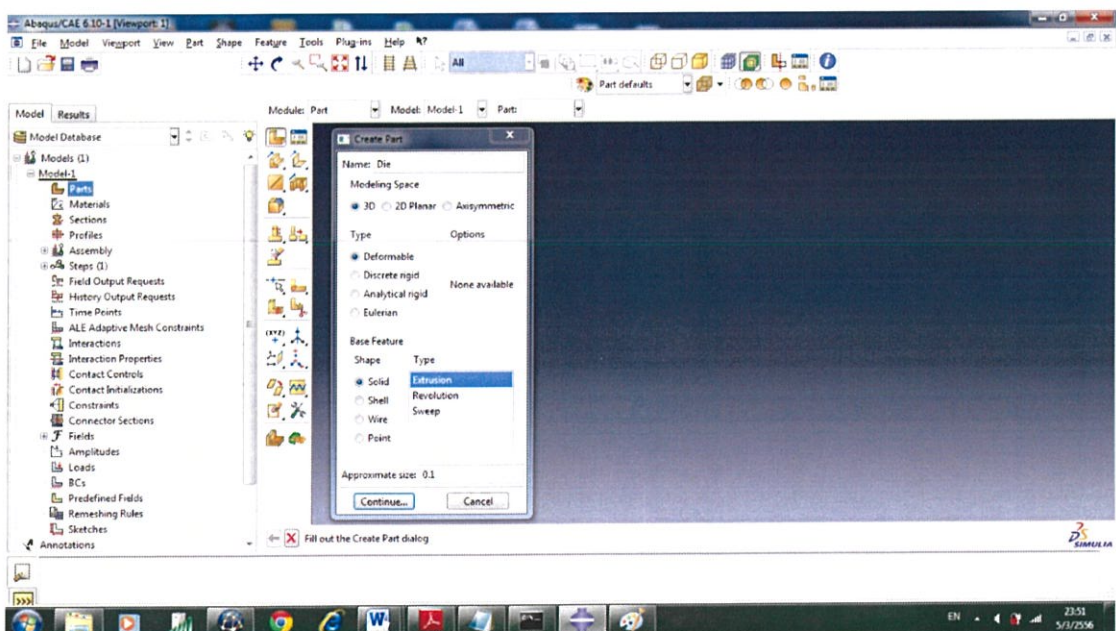
Type: Extrusion

Approximate size: 0.1

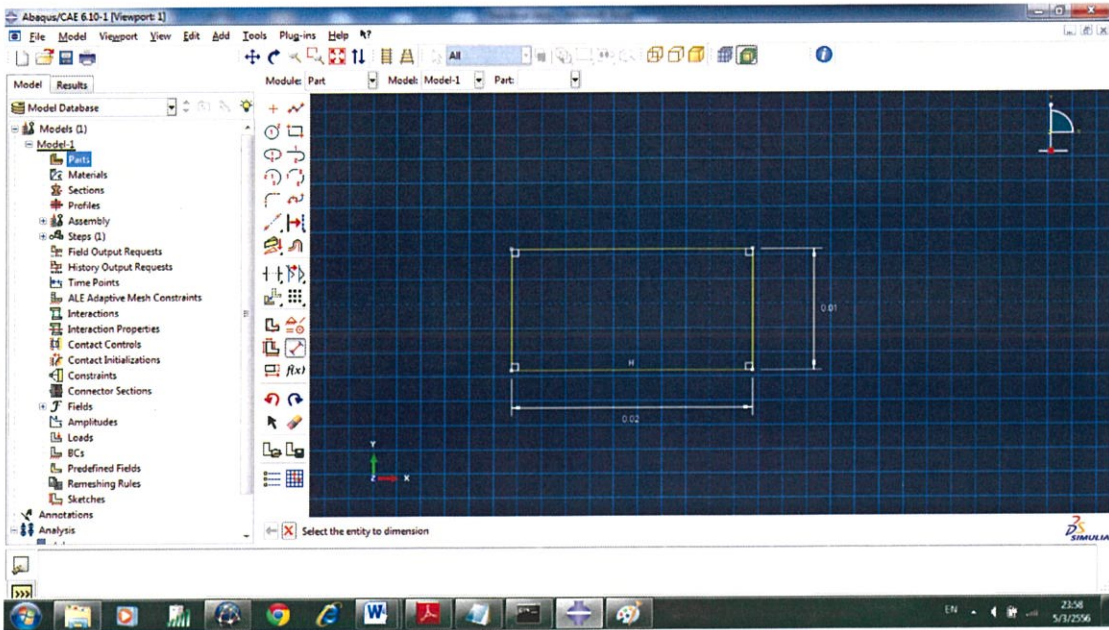
Dimension: 0.02 m x 0.01 m

Depth 0.04 m

Die radius: 0.002 m



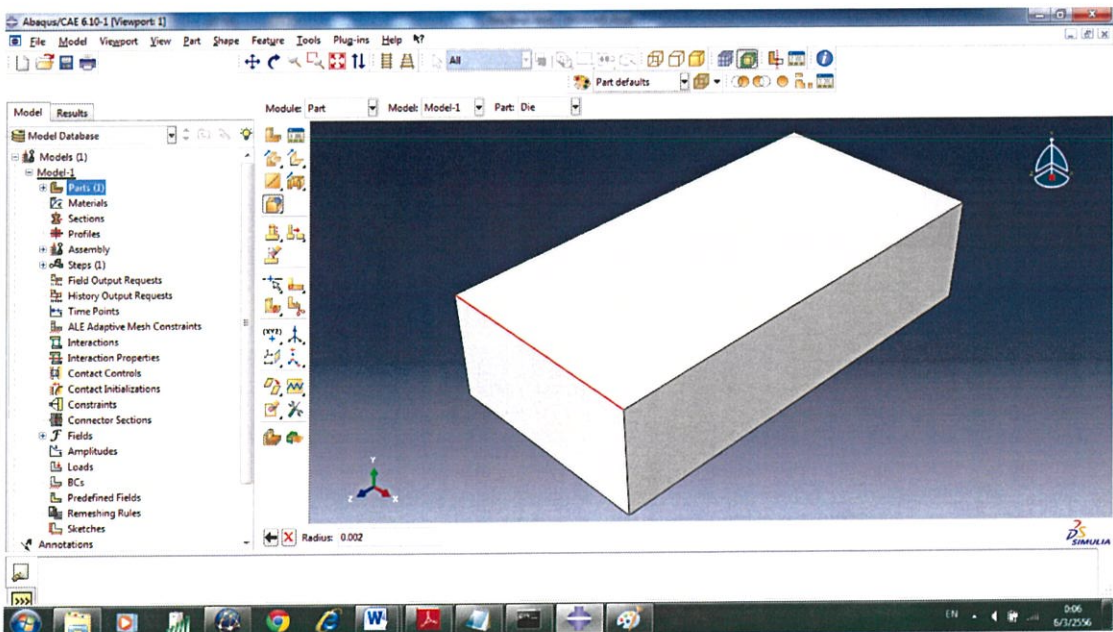
รูปที่ 3.2 การกำหนดลักษณะของชิ้นงาน



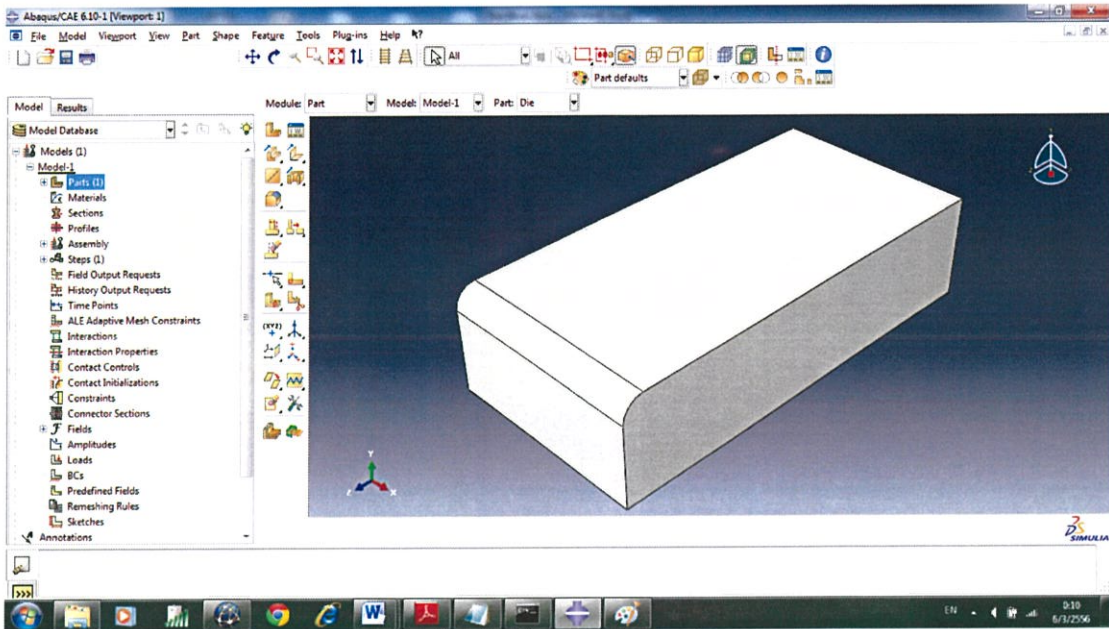
รูปที่ 3.3 การกำหนดลักษณะของชิ้นงาน

3. กำหนดมุมของชิ้นงาน (แม่แบบ)

Module>Part>Create Round or Fillet>เลือกขอบที่ต้องการสร้างมุม>Done>ใส่ค่ามุมที่ต้องการ



รูปที่ 3.4 การกำหนดมุมของชิ้นงาน (แม่แบบ)



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างชิ้นงาน (แม่แบบ)

4. กำหนดลักษณะของชิ้นงาน (ตัวกด)

Name: Punch

Modeling space: 3D

Type: Deformable

Shape: Solid

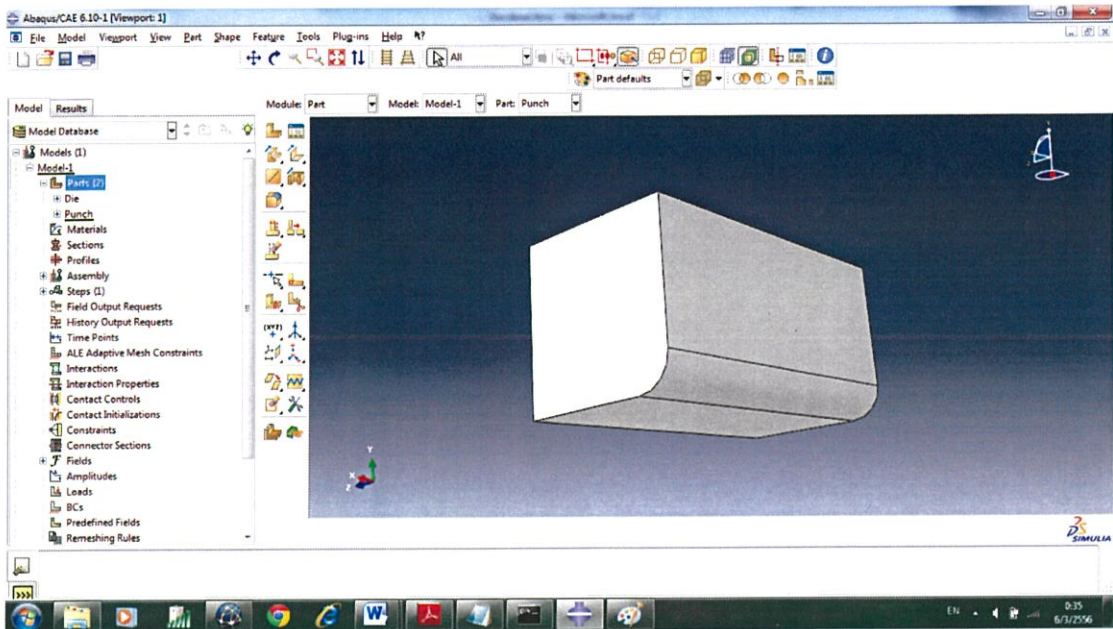
Type: Extrusion

Approximate size: 0.1

Dimension: 0.02 m x 0.01 m

Depth 0.01 m

Punch radius: 0.002 m



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างชิ้นงาน (ตัวกด)

5. กำหนดลักษณะของชิ้นงาน (ตัวยึดแผ่นโลหะ)

Name: Pad

Modeling space: 3D

Type: Deformable

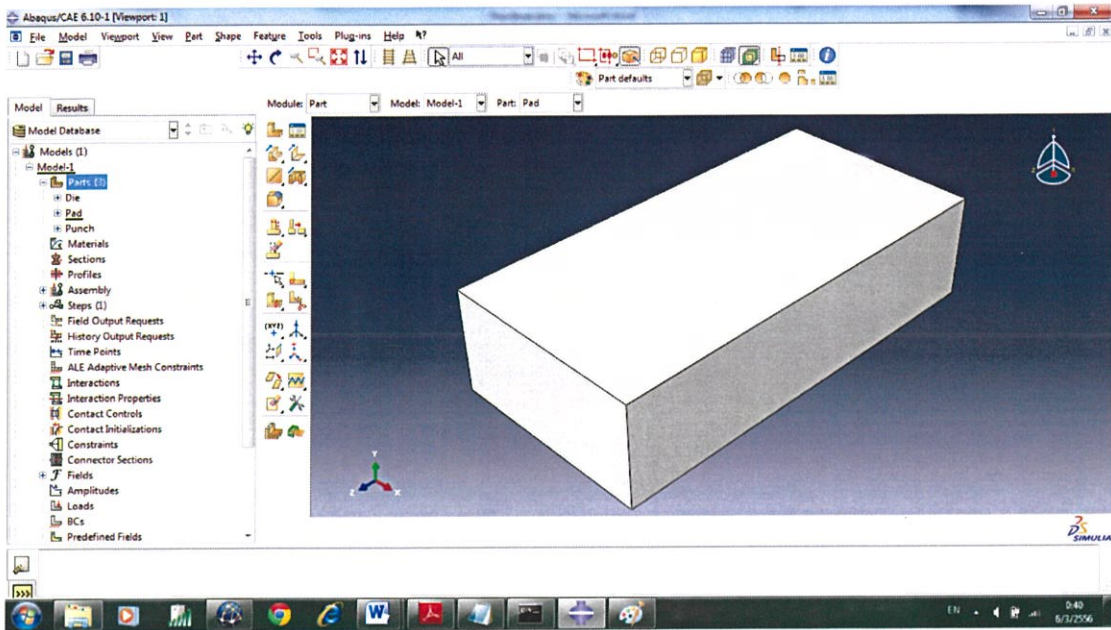
Shape: Solid

Type: Extrusion

Approximate size: 0.1

Dimension: 0.02 m x 0.01 m

Depth 0.04 m



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างชิ้นงาน (ตัวยึดแผ่นโลหะ)

6. กำหนดลักษณะของชิ้นงาน (แผ่นโลหะ)

Name: Sheet

Modeling space: 3D

Type: Deformable

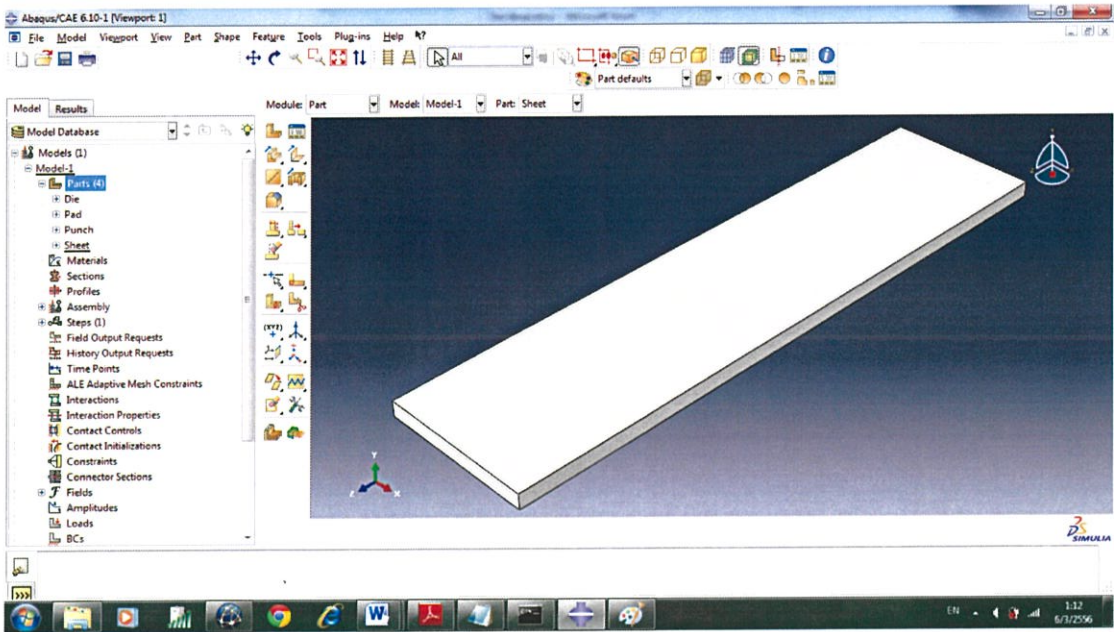
Shape: Solid

Type: Extrusion

Approximate size: 0.1

Dimension: 0.02 m x 0.002 m

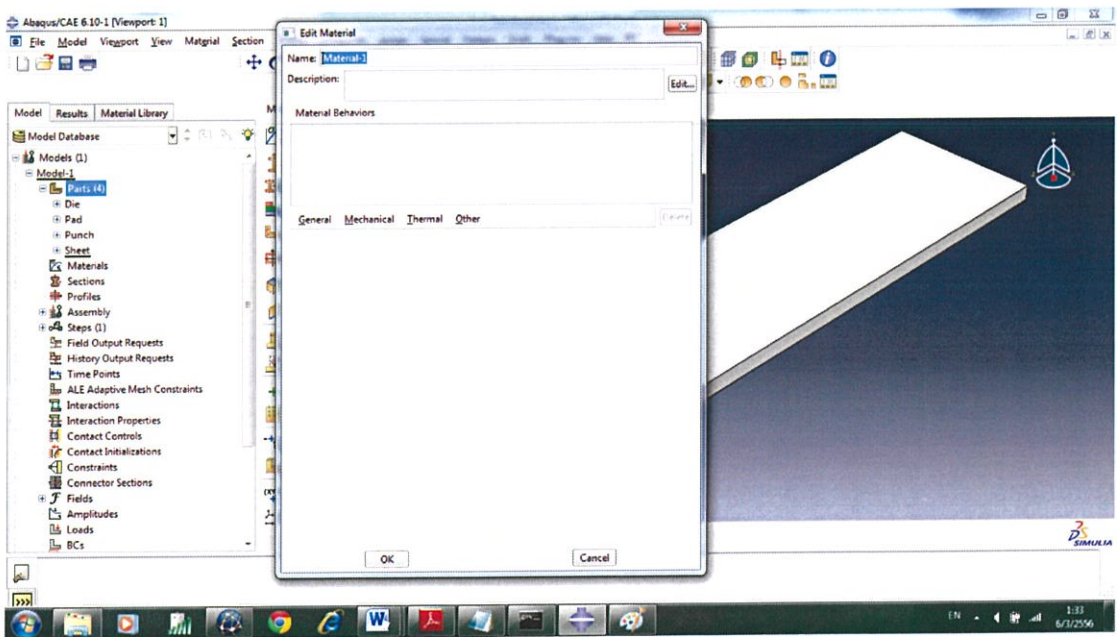
Depth 0.08 m



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างชิ้นงาน (แผ่นโลหะ)

7. กำหนดคุณสมบัติของชิ้นงาน

เปลี่ยน Module เป็น Properties เลือก Create Material



รูปที่ 3.9 หน้าต่างการใส่คุณสมบัติให้กับชิ้นงาน

การใส่คุณสมบัติของ แม่แบบ, ตัวกด, ตัวยึดแผ่นโลหะ

Name: Steel

เลือก General>>Density

จากนั้นใส่ค่า Mass Density = 7700

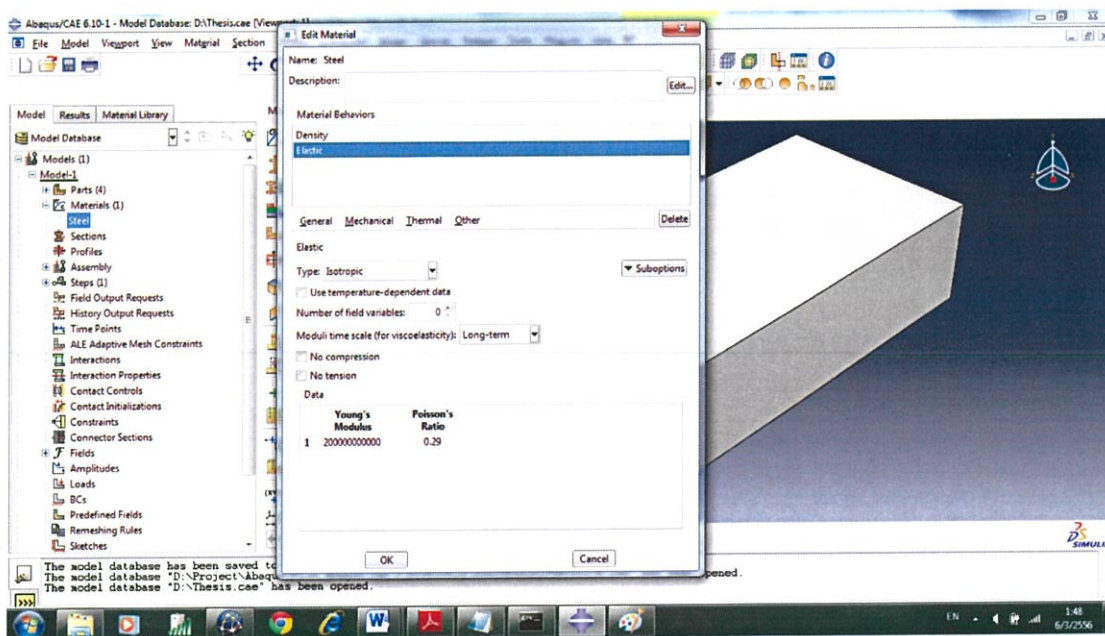
เลือก Mechanical>>Elasticity>>Elastic

จากนั้นใส่ค่าคุณสมบัติของชิ้นงานดังนี้

Young's Poisson's

Modulus Ratio

200E9 0.29



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการใส่คุณสมบัติของชิ้นงาน

การใส่คุณสมบัติของแผ่นโลหะ

Name: Aluminum

เลือก General>>Density

จากนั้นใส่ค่า Mass Density = 2770

เลือก Mechanical>>Elasticity>>Elastic

จากนั้นใส่ค่าคุณสมบัติของชิ้นงานดังนี้

Young's Poisson's

Modulus Ratio

73.1E9 0.33

เลือก Mechanical>>Plasticity>>Plastic

จากนั้นใส่ค่าคุณสมบัติของชิ้นงานดังนี้

Yield Plastic

Stress Strain

200E6 0

8. การกำหนด Section เพื่อนำคุณสมบัติไปใส่ในชิ้นงาน

เลือก Create Section

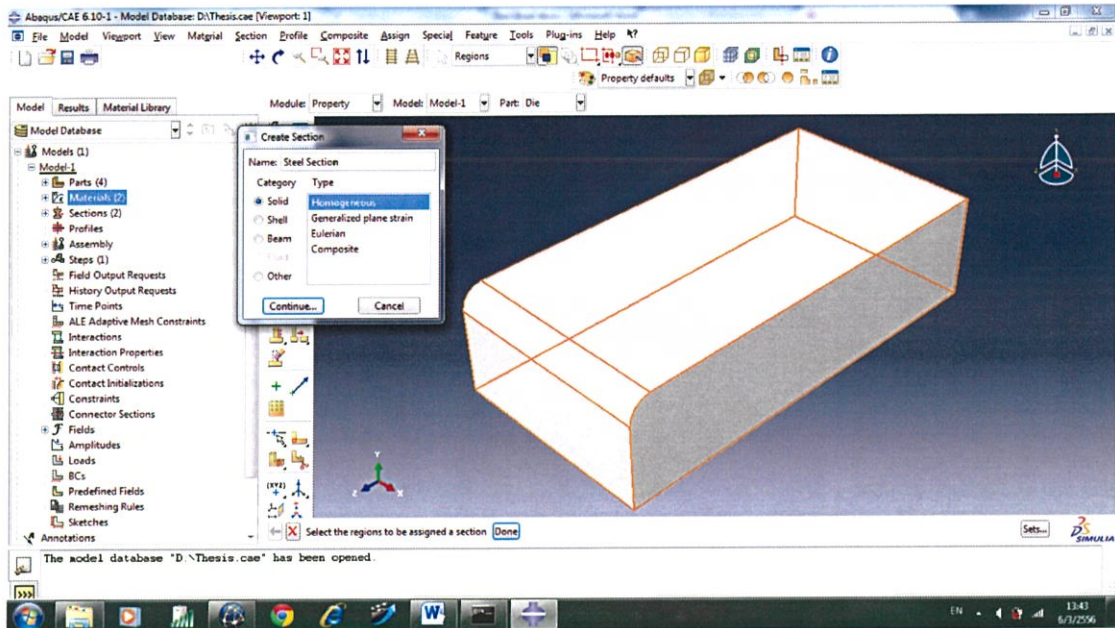
การกำหนดคุณสมบัติของชิ้นงานที่เป็น Steel

Name: Steel Section

Category: Solid

Type Homogenous

เลือก Continue>>Material>Steel แล้วกด OK



รูปที่ 3.11 หน้าต่างการกำหนดคุณสมบัติเพื่อนำไปใส่ในชิ้นงาน

การกำหนดคุณสมบัติของชิ้นงานที่เป็น Aluminum

Name: Aluminum Section

Category: Solid

Type Homogenous

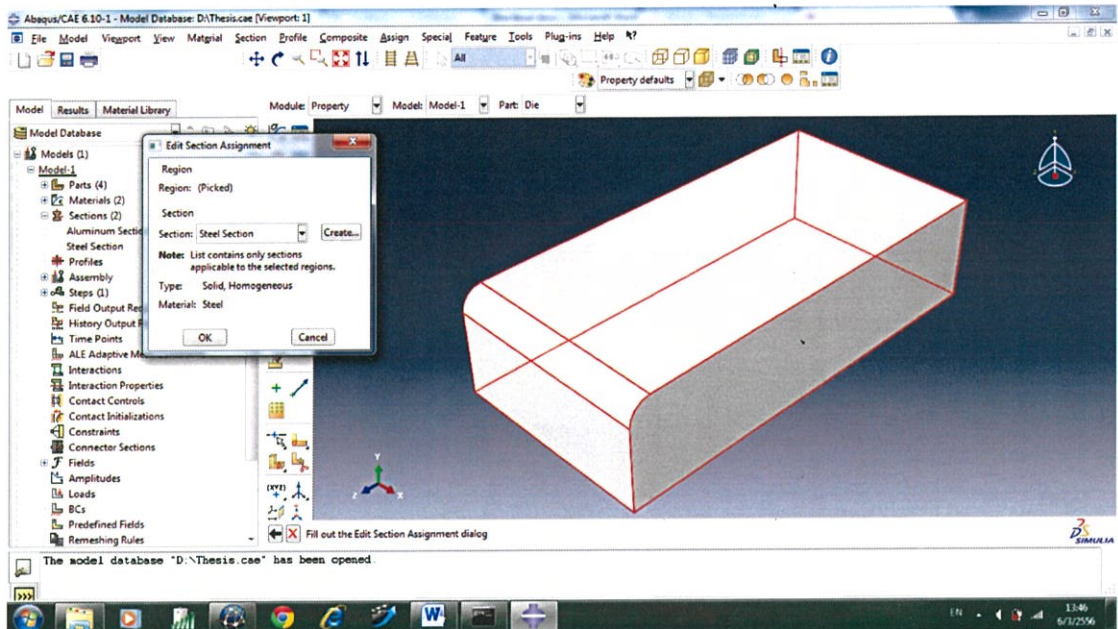
เลือก Continue>>Material>Aluminum แล้วกด OK

9. การนำคุณสมบัติที่กำหนดไว้ไปใส่ในชิ้นงาน

การใส่คุณสมบัติชิ้นงานที่เป็น Steel

เลือก Assign Section

เลือกชิ้นงานที่ต้องการใส่คุณสมบัติ>>Done>>Section>Steel Section แล้วกด OK

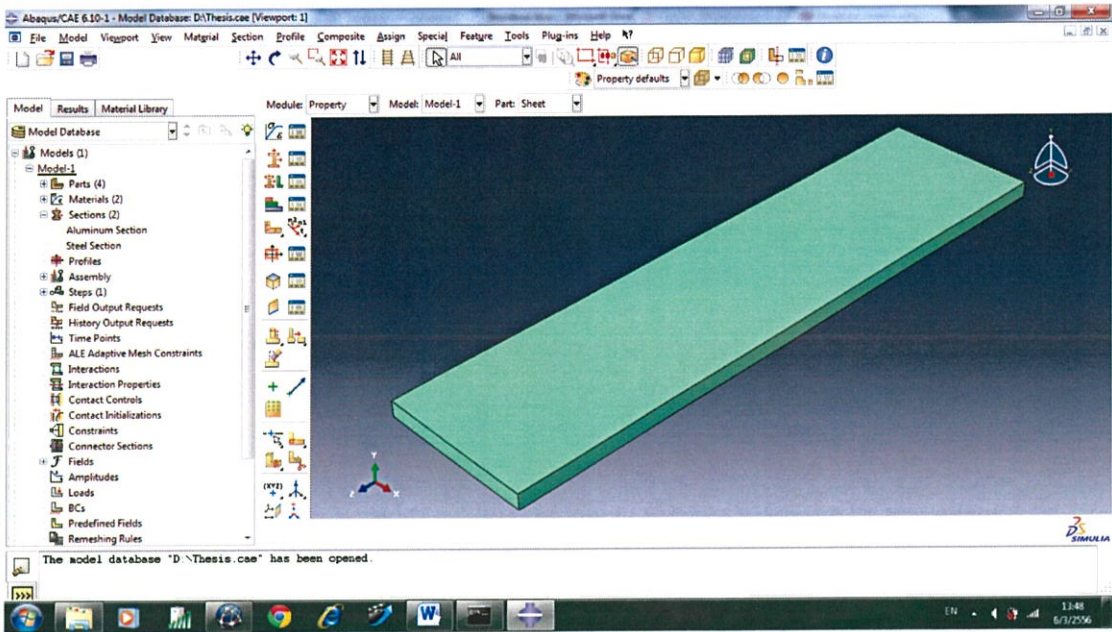


รูปที่ 3.12 ตัวอย่างการนำคุณสมบัติที่กำหนดไว้ไปใส่ในชิ้นงาน

การใส่คุณสมบัติชิ้นงานที่เป็น Aluminum

เลือก Assign Section

เลือกชิ้นงานที่ต้องการใส่คุณสมบัติ>>Done>>Section>Aluminum Section แล้วกด OK



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างหลังจากการใส่คุณสมบัติในชิ้นงานแล้ว

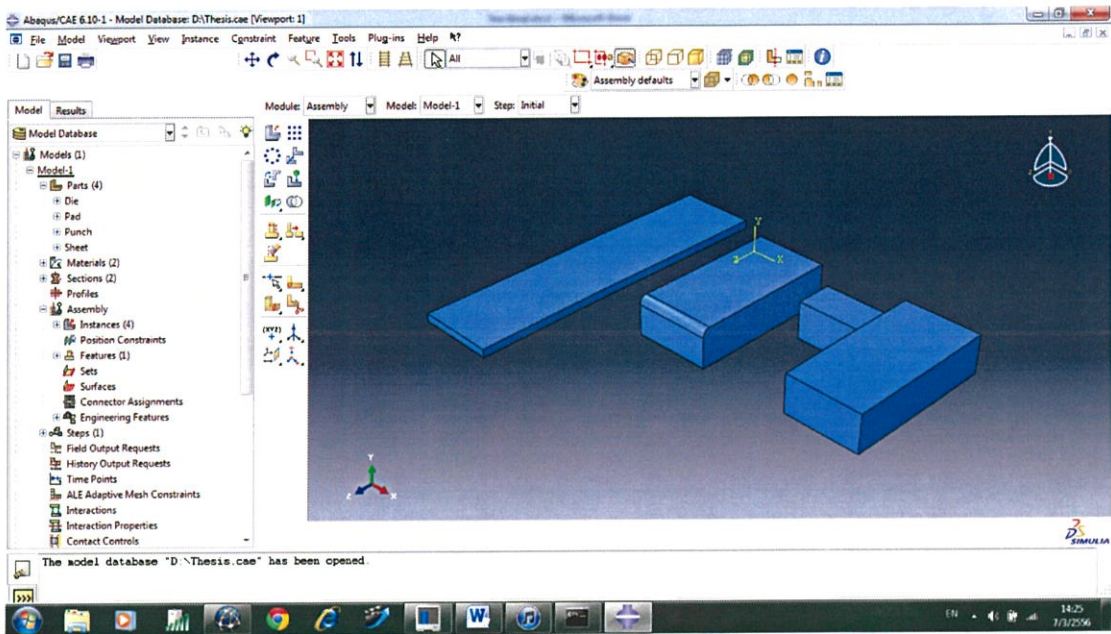
10. การประกอบชิ้นงานที่ออกแบบไว้

เปลี่ยน Module เป็น Assembly เลือก Instance Part

Type: Dependent (mesh on part)

เลือก Auto-offset from other instance

จากนั้นเลือกชิ้นงานที่ต้องการนำมาประกอบโดยการ Import part ชิ้นงานเข้ามา แล้วกด OK



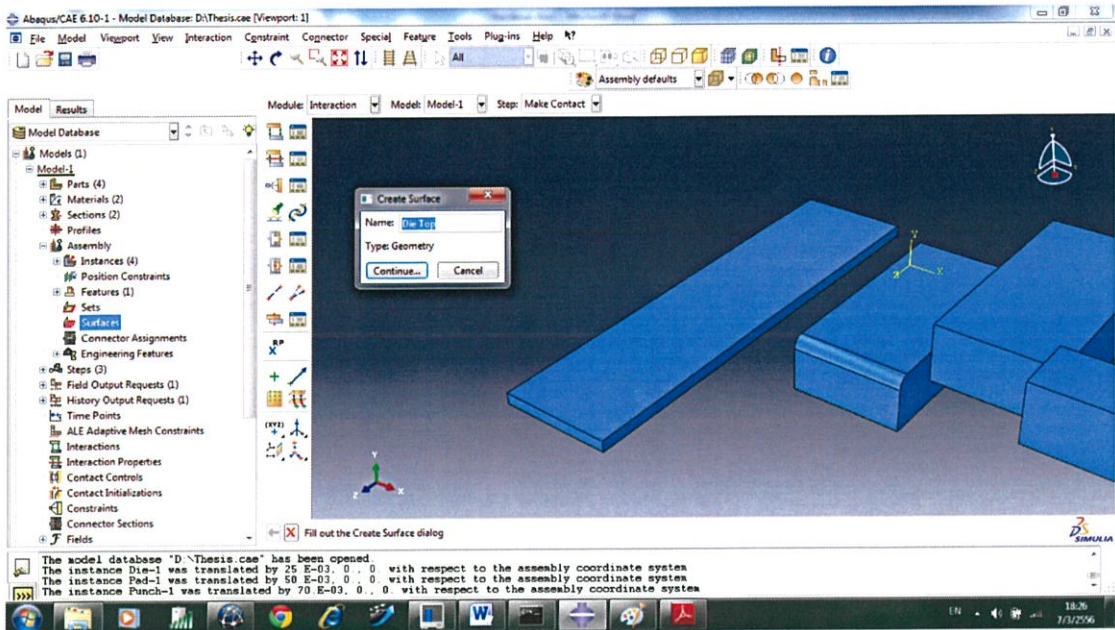
รูปที่ 3.14 การประกอบชิ้นงานที่ออกแบบไว้

ก่อนการประกอบชิ้นงานเข้าด้วยกัน เราต้องมากำหนด Surface ของชิ้นงานแต่ละชิ้น เพื่อให้ง่ายต่อการเรียกใช้งาน

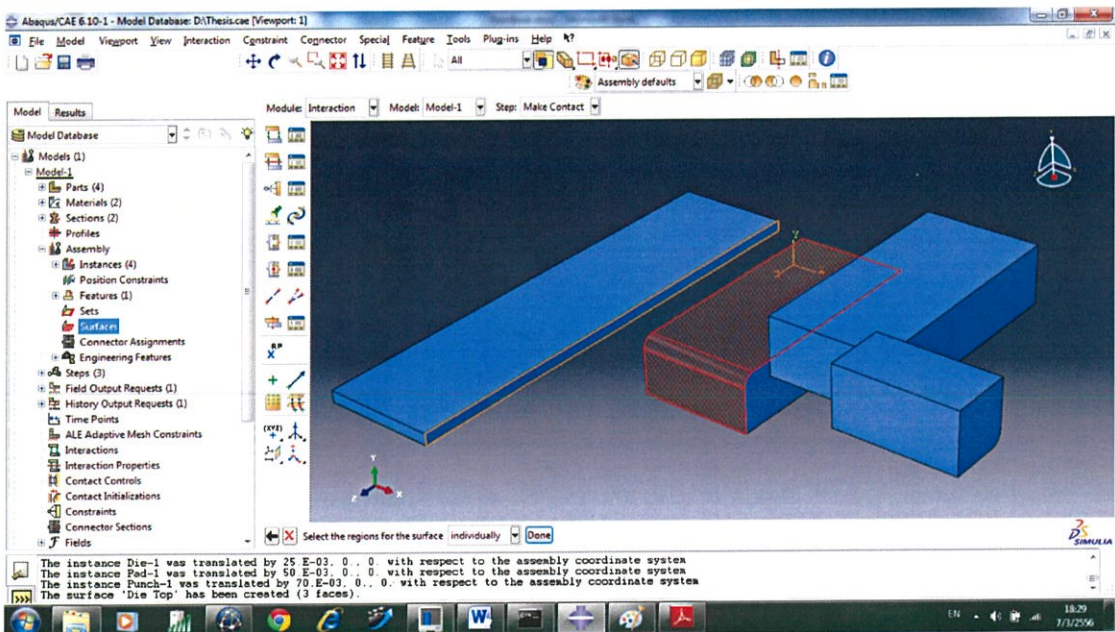
ไปที่ Model>Surface

การกำหนด Surface ของแม่แบบ

Name: Die Top>Continue>เลือกผิวของแม่แบบที่ต้องการ



รูปที่ 3.15 การกำหนด Surface ของชิ้นงาน



รูปที่ 3.16 การเลือก Surface ของชิ้นงาน (แม่แบบ)

หลังจากนั้นทำการกำหนด Surface ของชิ้นงานที่เหลือ ได้แก่

Pad Bottom

Sheet Top

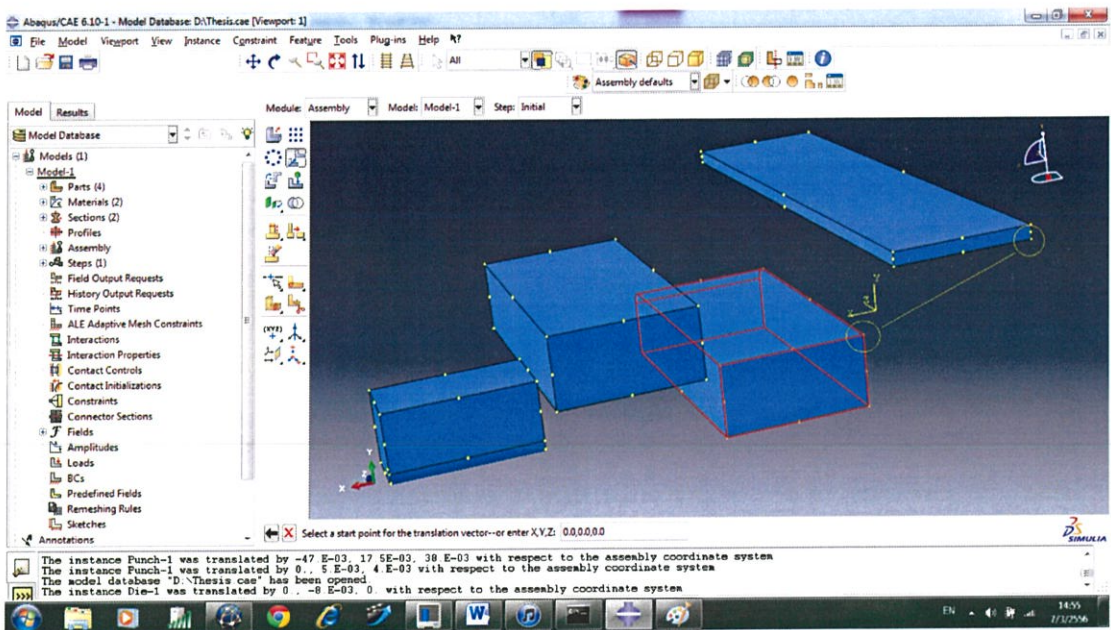
Sheet Bottom

Punch Bottom

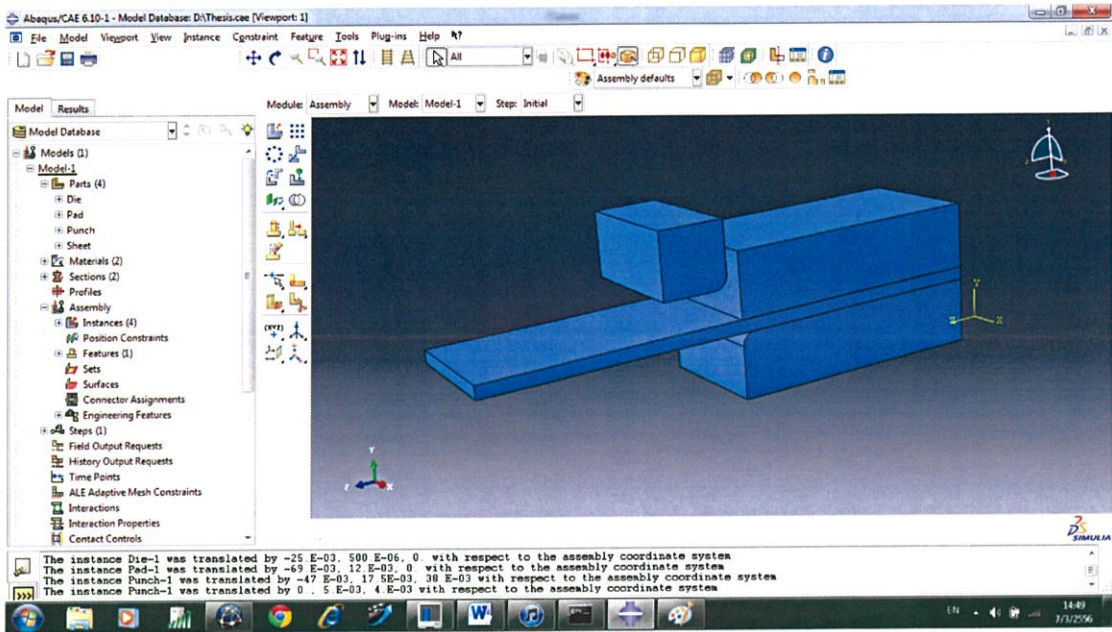
11. การเลื่อนตำแหน่งชิ้นงานเพื่อให้เหมือนกับการทดลองจริง

เลือก Translate Instance

เลือกชิ้นงานที่ต้องการย้ายตำแหน่ง จากนั้นเลือกจุดที่ต้องการย้าย และสุดท้าย เลือกจุดที่ต้องการนำชิ้นงานไปประกอบ



รูปที่ 3.17 การเลื่อนตำแหน่งชิ้นงาน



รูปที่ 3.18 การประกอบชิ้นงานเมื่อเสร็จสมบูรณ์แล้ว

12. การกำหนด Step สำหรับการประมวลผล

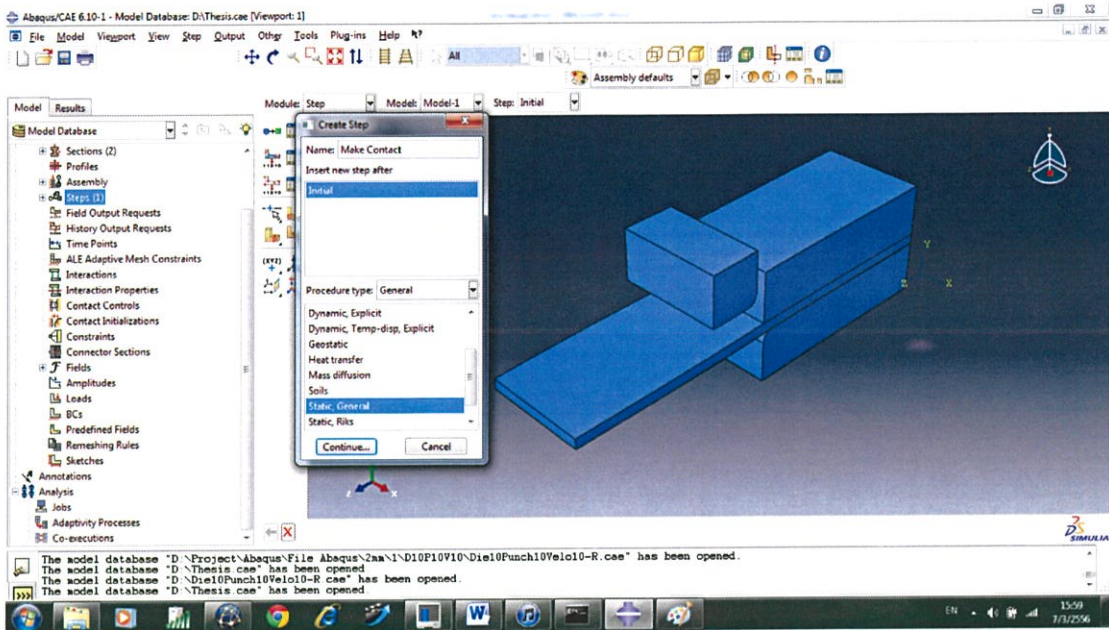
เปลี่ยน Module เป็น Step เลือก Create Step

การกำหนด Step1: Make contact

Name: Make contact

Procedure type: General

เลือก Static, General > Continue จากนั้นจะมีหน้าต่าง Edit Step ขึ้นมา เลือก Nlgeom เป็น On จากนั้นเลือก Incrementation เปลี่ยน Initial increment size เป็น 0.1 แล้วกด OK



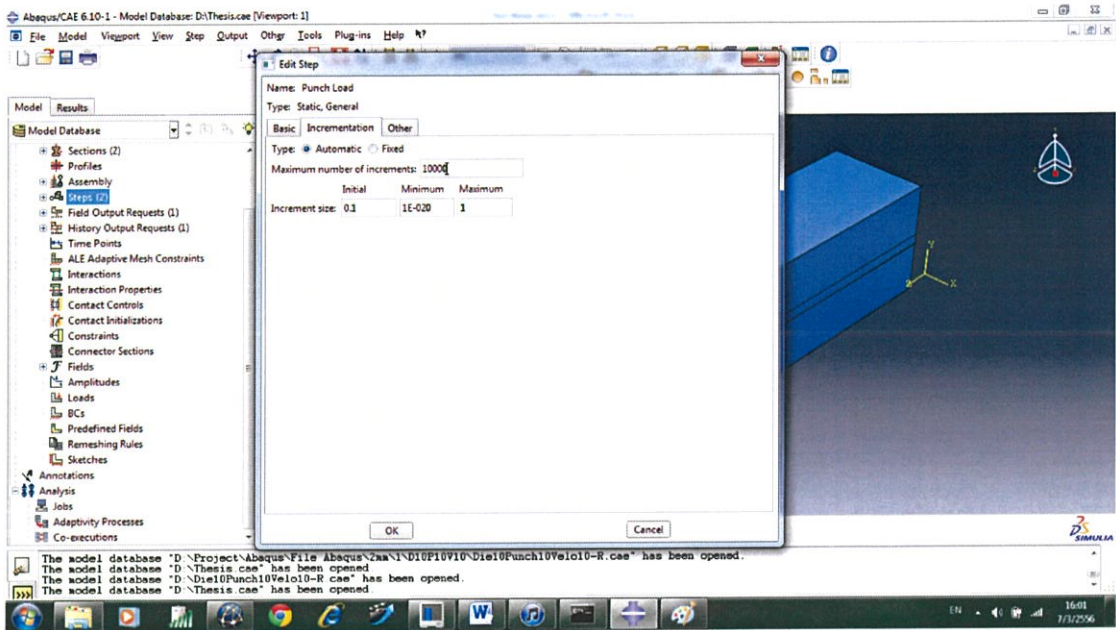
รูปที่ 3.19 การกำหนด Step

การกำหนด Step2: Punch Load

Name: Punch Load

Procedure type: General

เลือก Static, General > Continue จากนั้นจะมีหน้าต่างต่าง Edit Step ขึ้นมา เปลี่ยน Time period เป็น 0.8 จากนั้น คลิก Incrementation เปลี่ยน Maximum number of increments เป็น 10000 เปลี่ยน Initial, Minimum increment size เป็น 0.1, 1E-020 ตามลำดับ



รูปที่ 3.20 การกำหนด Step

13. การกำหนด Boundary Condition (BCs)

เปลี่ยน Module เป็น Load เลือก Create Boundary Condition

การกำหนด BCs ของแม่แบบ

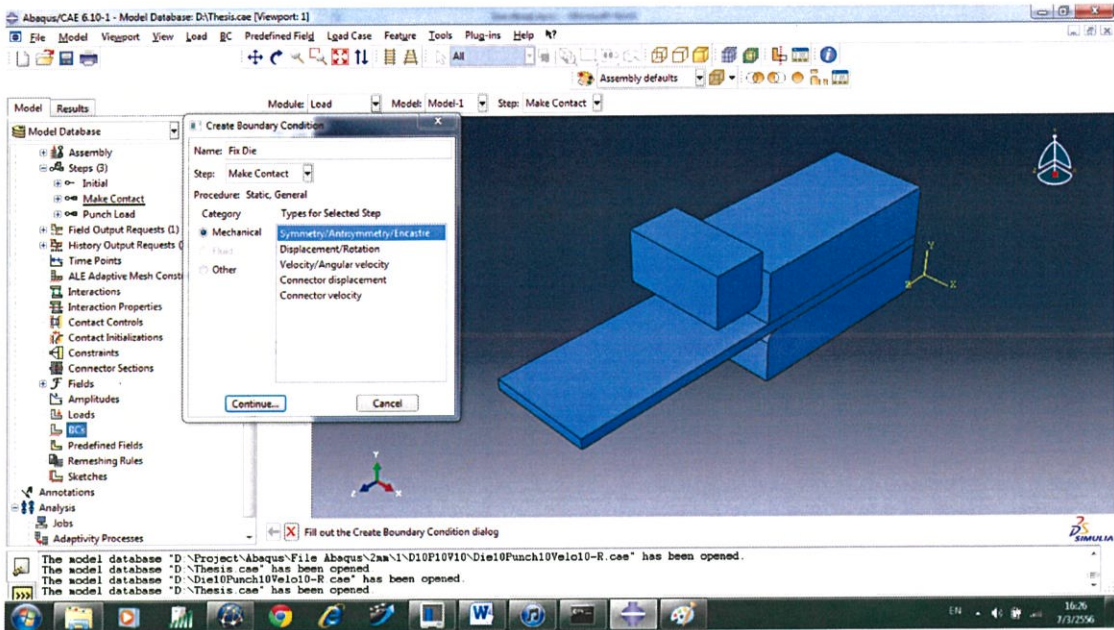
Name: Fix Die

Step: Make contact

Category: Mechanical

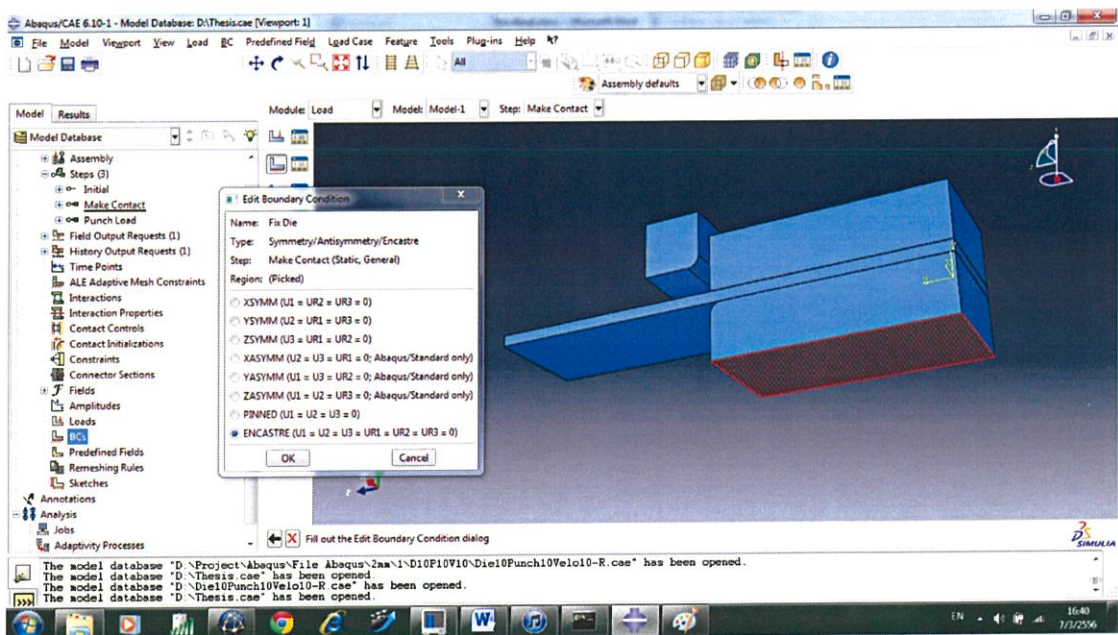
Types for Selected Step: Symmetry/Antisymmetry/Encastre

จากนั้น คลิก Continue แล้วเลือก Surface ด้านที่ต้องการ Fix แล้วคลิก Done



รูปที่ 3.21 ตัวอย่างการกำหนด Boundary Condition

จากนั้นจะมีหน้าต่าง Edit Boundary Condition ขึ้นมา คลิก เลือกที่ช่องและใส่ค่าดังนี้ ENCASTRE(U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0) แล้วกด OK



รูปที่ 3.22 การเลือกและ Edit Boundary Condition ของแม่แบบ

การกำหนด BCs ของตัวยึดแผ่นโลหะ

Name: Fix Pad

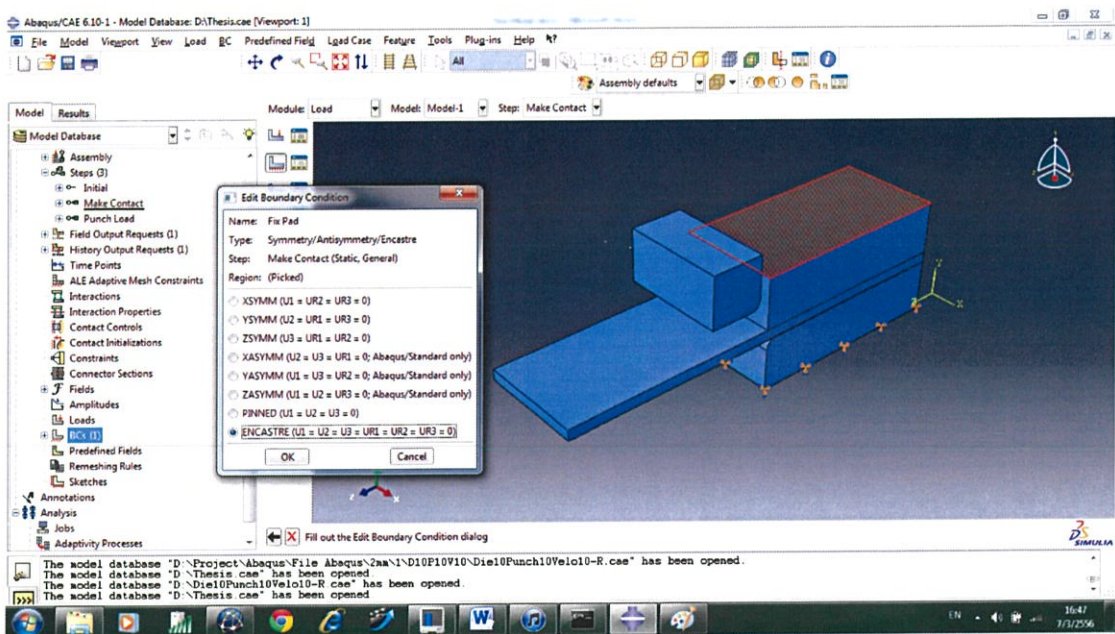
Step: Make contact

Category: Mechanical

Types for Selected Step: Symmetry/Antisymmetry/Encastre

จากนั้น คลิก Continue แล้วเลือก Surface ด้านที่ต้องการ Fix>>Done

จากนั้นจะมีหน้าต่าง Edit Boundary Condition ขึ้นมา คลิก เลือกที่ช่องและใส่ค่าดังนี้
 ENCASTRE(U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0) แล้วกด OK



รูปที่ 3.23 การเลือกและ Edit Boundary Condition ของตัวยึดแผ่นโลหะ

การกำหนด BCs ของตัวยึดแผ่นโลหะ

Name: Press Pad

Step: Make contact

Category: Mechanical

Types for Selected Step: Displacement/Rotation

จากนั้น คลิก Continue แล้วเลือก Surface ด้านที่ต้องการ Fix แล้วคลิก Done

จากนั้นจะมีหน้าต่าง Edit Boundary Condition ขึ้นมา คลิก เลือกที่ช่องและใส่ค่าดังนี้

U1: 0

U2: -1E-010

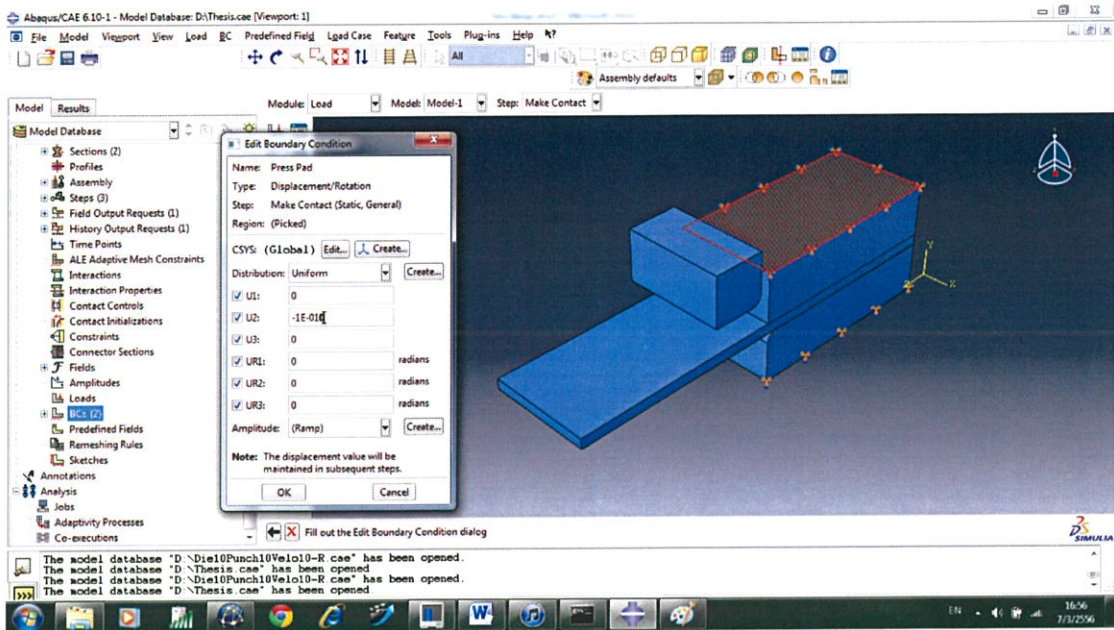
U3: 0

UR1: 0

UR2: 0

UR3: 0

แล้วกด OK



รูปที่ 3.24 การเลือกและ Edit Boundary Condition ของตัวยึดแผ่นโลหะ

การกำหนด BCs ของตัวกด

Name: Press Punch

Step: Make contact

Category: Mechanical

Types for Selected Step: Velocity/Angular Velocity

จากนั้น คลิก Continue แล้วเลือก Surface ด้านที่ต้องการ Fix คลิก Done

จากนั้นจะมีหน้าต่าง Edit Boundary Condition ขึ้นมา คลิก เลือกที่ช่องและใส่ค่าดังนี้

V1: 0

V2: -1E-010

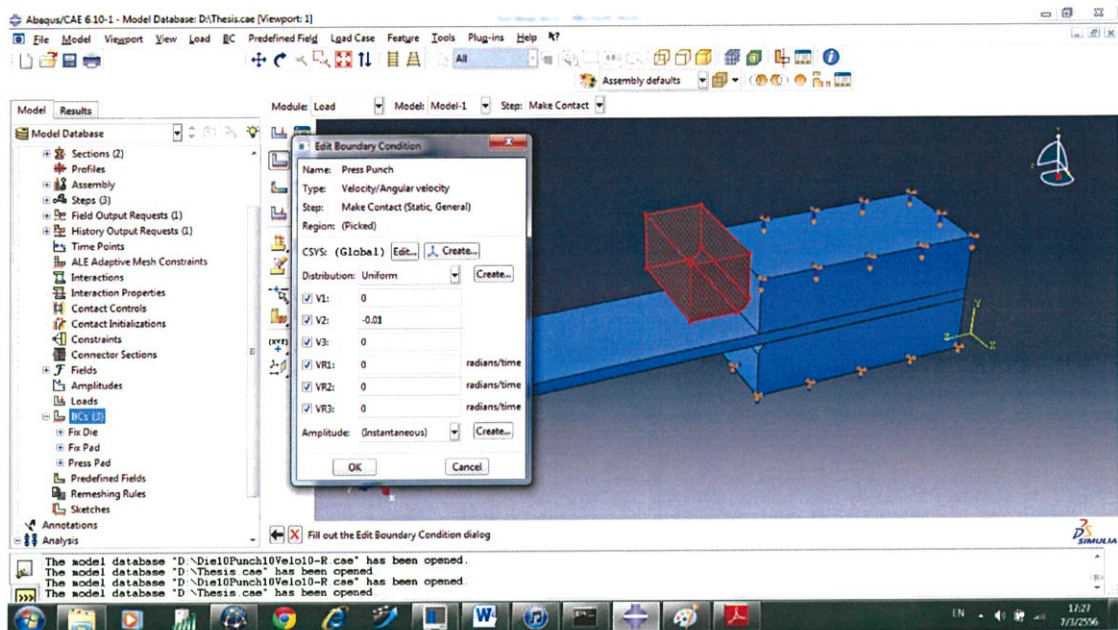
V3: 0

VR1: 0

VR2: 0

VR3: 0

แล้วกด OK



รูปที่ 3.25 การเลือกและ Edit Boundary Condition ของตัวกด

หลังจากกำหนด Boundary Condition ของชิ้นงานแต่ละชิ้นเสร็จแล้ว จากนั้นก็จะทำการ Manage Step ให้ตรงกับสิ่งที่เราต้องการซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

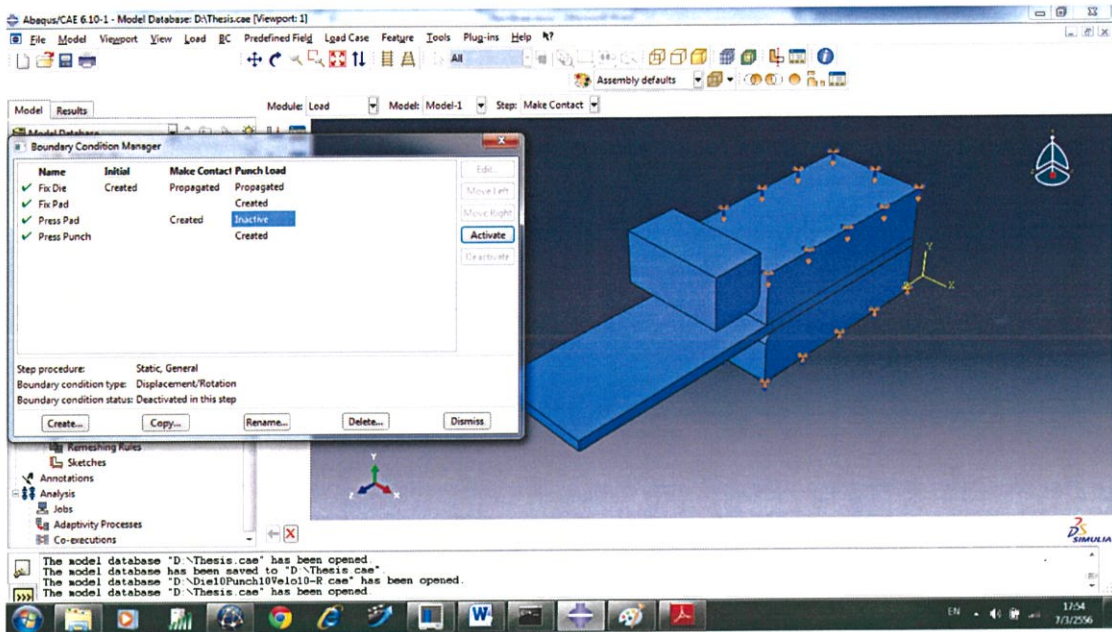
คลิกขวา BCs ที่ช่อง Model>>Manager จากนั้น ทำการ Manage ดังนี้

Fix Die: Move Left

Fix Pad: Move Right

Press Pad: Deactivate (Step: Punch Load)

Press Punch: Move Right



รูปที่ 3.26 การ Manage Step ของ Boundary Condition

หลังจากที่เรากำหนด Step เสร็จแล้ว เราต้องกำหนด Interaction ให้กับชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานของเราไม่ได้มีแค่ชิ้นเดียว

14. การกำหนดคุณสมบัติผิวสัมผัสของชิ้นงาน

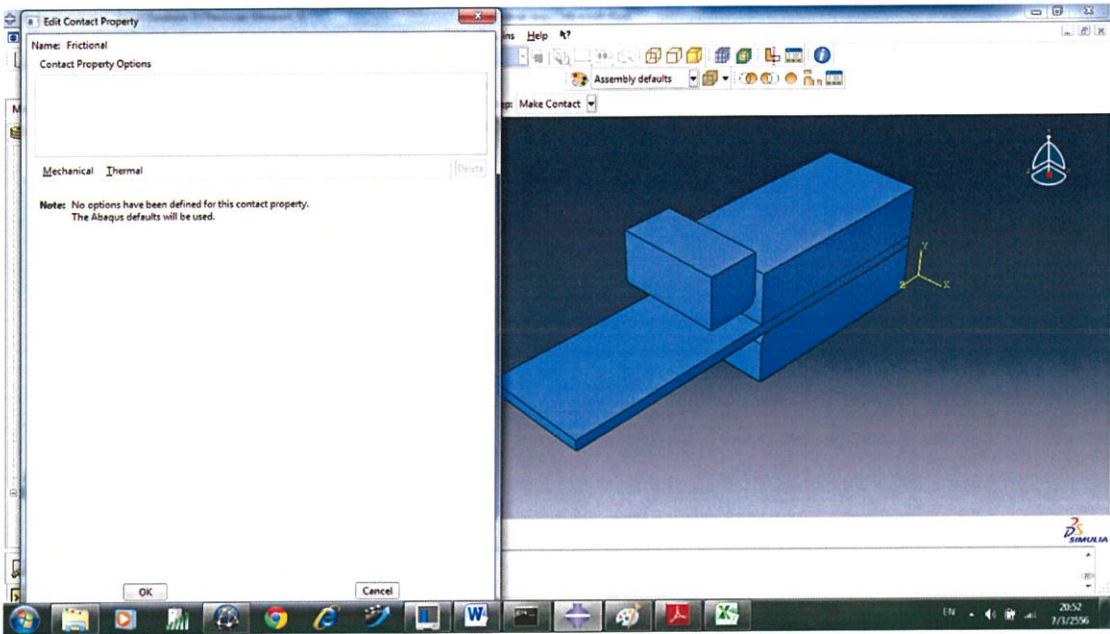
เปลี่ยน Module เป็น Interaction>>Create Interaction Properties

การกำหนดคุณสมบัติเป็น Frictionless

Name: Frictionless

Type: Contact

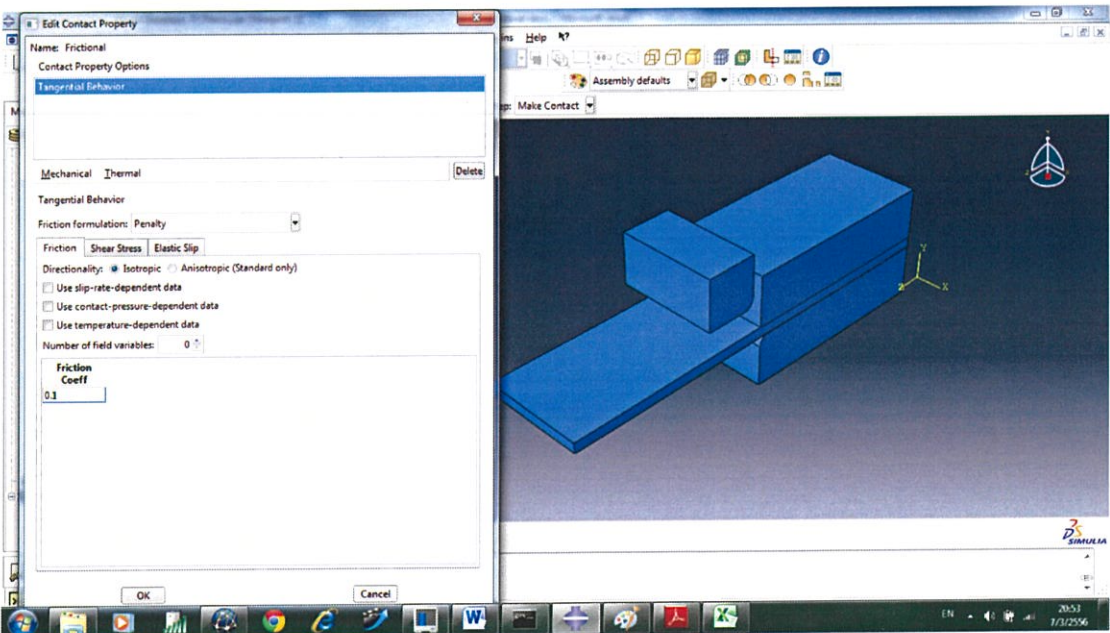
คลิก Continue>Mechanical>Tangential Behavior เลือก Frictionless แล้วกด OK



รูปที่ 3.27 การกำหนดคุณสมบัติผิวสัมผัสของชิ้นงาน

การกำหนดคุณสมบัติเป็น Frictional

Mechanical>Tangential Behavior เลือก Penalty แล้วใส่ค่า Friction Coeff เป็น 0.1



รูปที่ 3.28 การกำหนดคุณสมบัติผิวสัมผัสของชิ้นงานเป็น Frictional

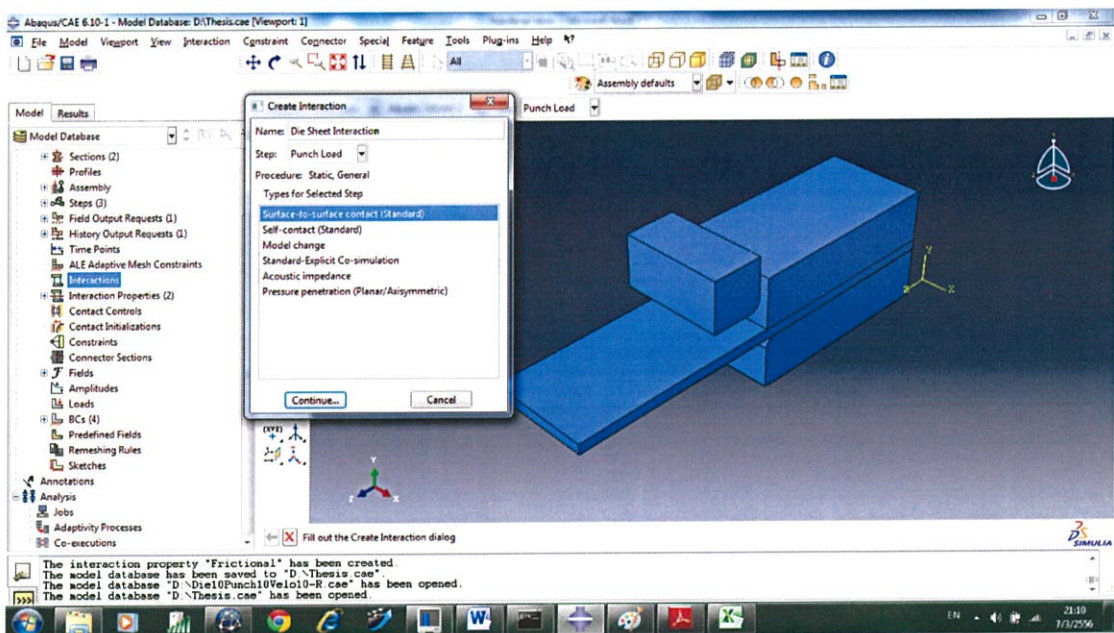
กำหนด Interaction ของชิ้นงาน โดย คลิก Create Interaction

กำหนด Interaction ของชิ้นงานระหว่าง แม่แบบกับแผ่นโลหะ

Name: Die Sheet Interaction

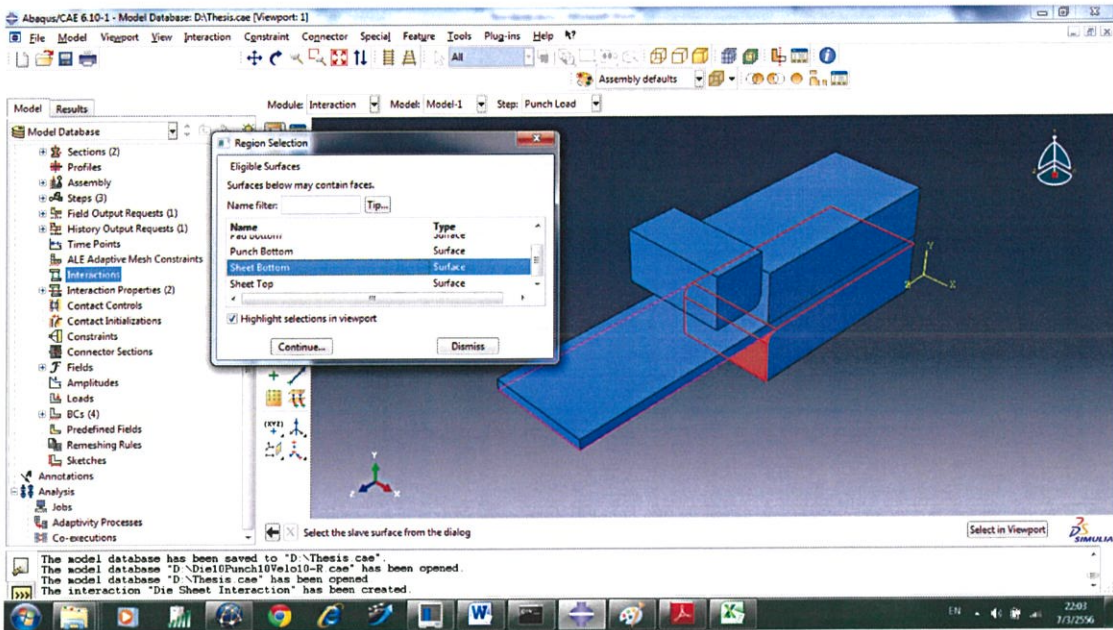
Step: Punch Load

Types for Selected Step: Surface to Surface contact (Standard) คลิก Continue



รูปที่ 3.29 กำหนดชนิดของผิวสัมผัสเข้าไปชิ้นงานในโปรแกรม

จากนั้นโปรแกรมจะให้เราเลือกผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงาน โดยเลือก Surface ที่ด้านล่างทางขวามือ เลือก Master Surface เป็น Die Top คลิก นะจากนั้นเลือก Slave Type เป็น Surface เสร็จแล้ว เลือก Slave Surface เป็น Sheet Bottom คลิก Continue จากนั้นเลือก Contact Interaction Property เป็น Frictional



รูปที่ 3.30 การเลือก Surface ของชิ้นงาน

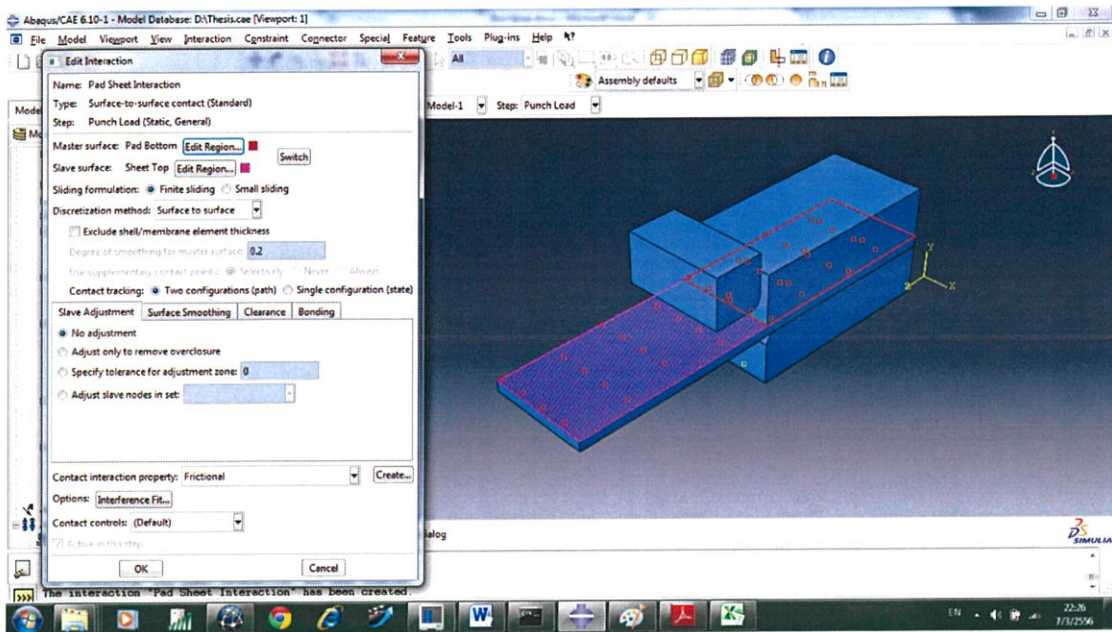
กำหนด Interaction ของชิ้นงานระหว่าง ตัวยัดแผ่นโลหะกับแผ่นโลหะ

Name: Pad Sheet Interaction

Step: Punch Load

Types for Selected Step: Surface to Surface contact (Standard) คลิก Continue

จากนั้นทำตามขั้นตอนของการกำหนด Interaction ของแม่แบบกับแผ่นโลหะ แต่เปลี่ยน Master Surface เป็น Pad Bottom และ เลือก Slave Surface เป็น Sheet Top เลือก Contact Interaction Property เป็น Frictional



รูปที่ 3.31 การกำหนด Interaction ของชิ้นงานระหว่างตัวยึดกับแผ่นโลหะ

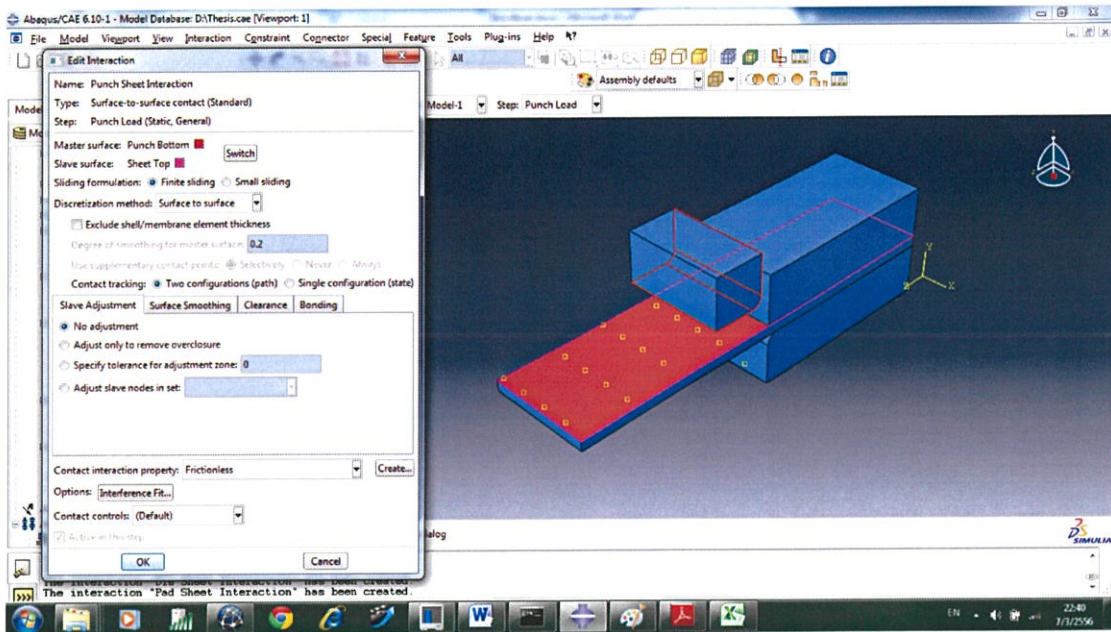
กำหนด Interaction ของชิ้นงานระหว่าง ตัวกดกับแผ่นโลหะ

Name: Punch Sheet Interaction

Step: Punch Load

Types for Selected Step: Surface to Surface contact (Standard) คลิก Continue

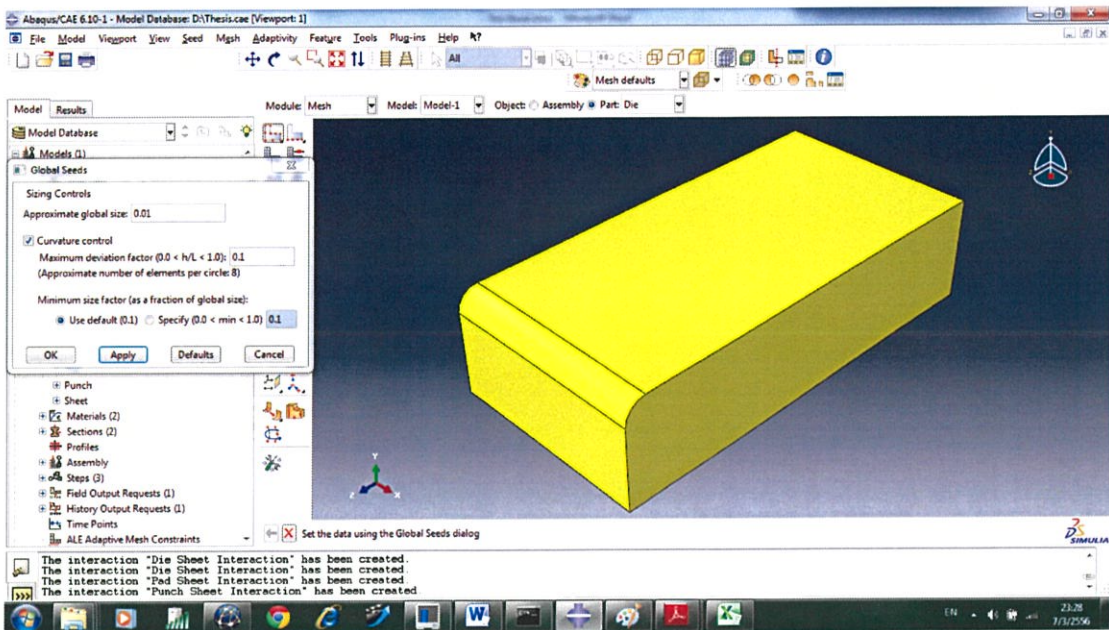
จากนั้นทำตามขั้นตอนของการกำหนด Interaction ของแม่แบบกับแผ่นโลหะ แต่เปลี่ยน Master Surface เป็น Punch Bottom, เลือก Slave Surface เป็น Sheet Top และเปลี่ยนเลือก Contact Interaction Property เป็น Frictional



รูปที่ 3.32 การกำหนด Interaction ของชิ้นงานระหว่างตัวกดกับแผ่นโลหะ

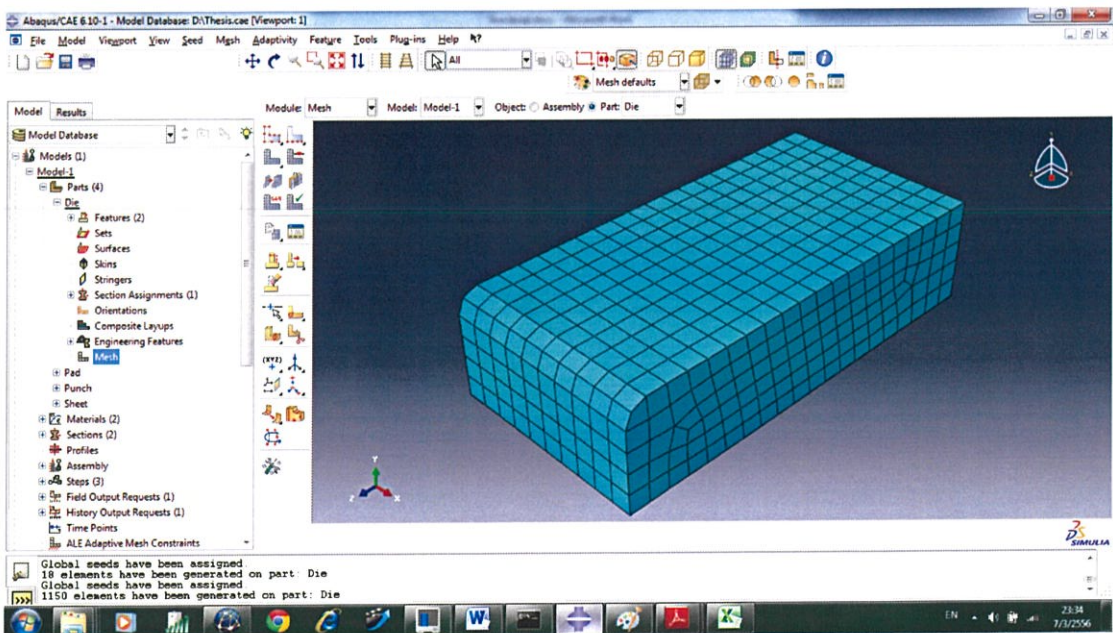
15. การกำหนดค่า Mesh ของชิ้นงาน

ไปที่ Model>Part>เลือกชิ้นงานที่ต้องการ คลิก Mesh เลือก Seed Part จากนั้น ใส่ค่า Approximate Global Size เป็น 0.002 แล้วกด OK



รูปที่ 3.33 การกำหนดค่าความละเอียดของ Mesh

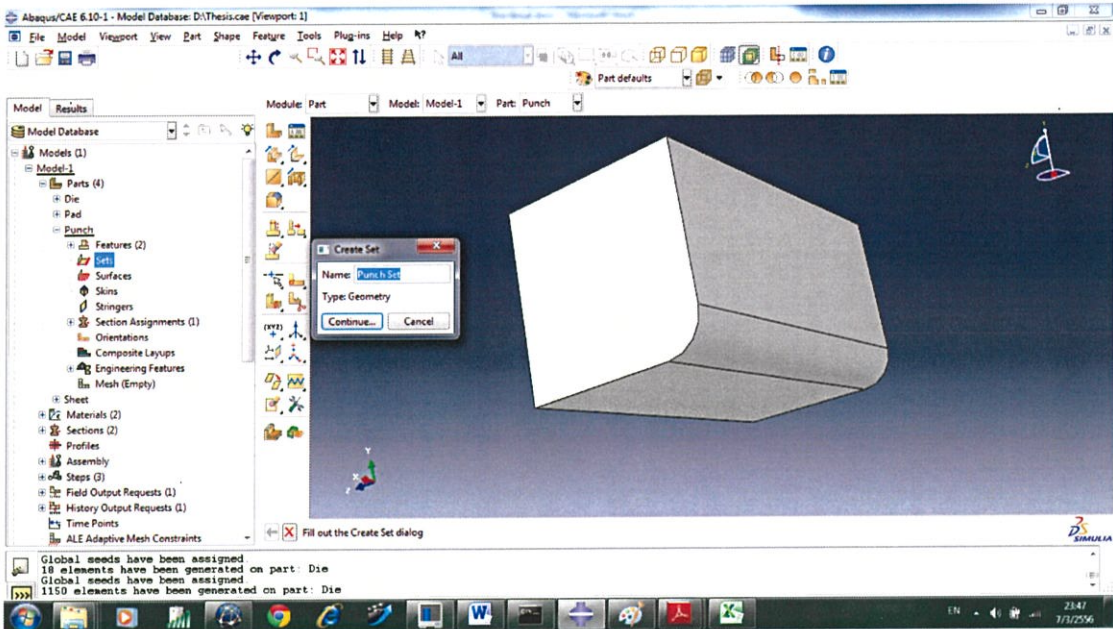
การ Mesh Part Instance ให้คลิกที่ Mesh Part แล้วคลิก Yes



รูปที่ 3.34 ภาพชิ้นงานที่ทำการสร้าง Mesh เสร็จแล้ว

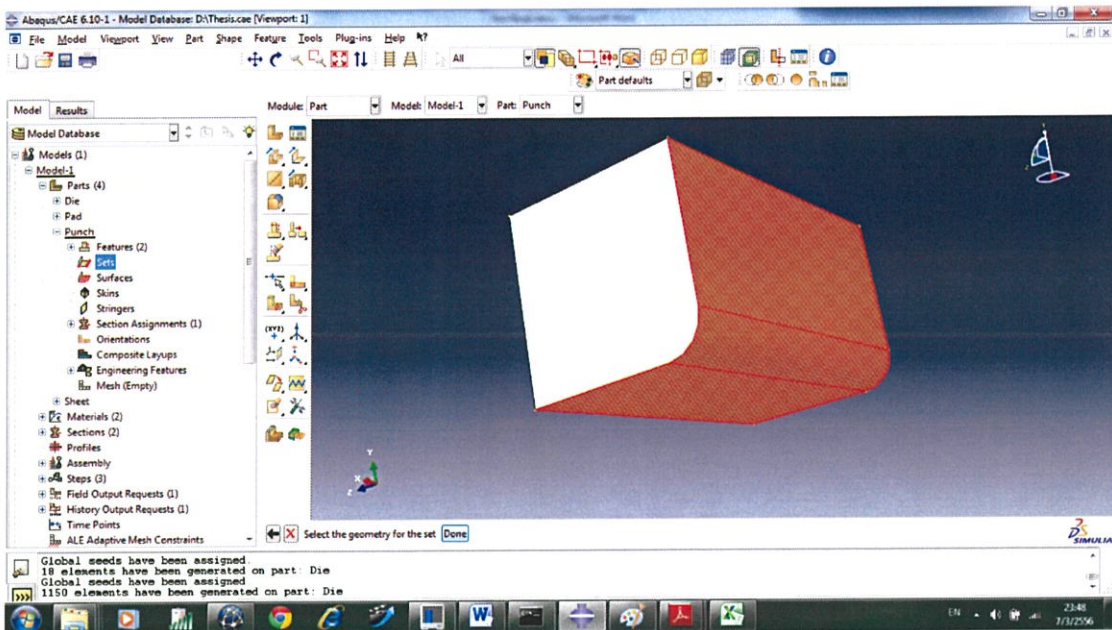
16. การสร้าง History Output เพื่อให้โปรแกรมสามารถอ่านค่าออกมาได้เหมือนกับ การทดลองจริง โดยเริ่มจากการ Set Surface ที่ตัวกดก่อน

ไปที่ Model>Part>เลือก Punch>Set จากนั้นเปลี่ยนชื่อเป็น Punch Set แล้วคลิก OK



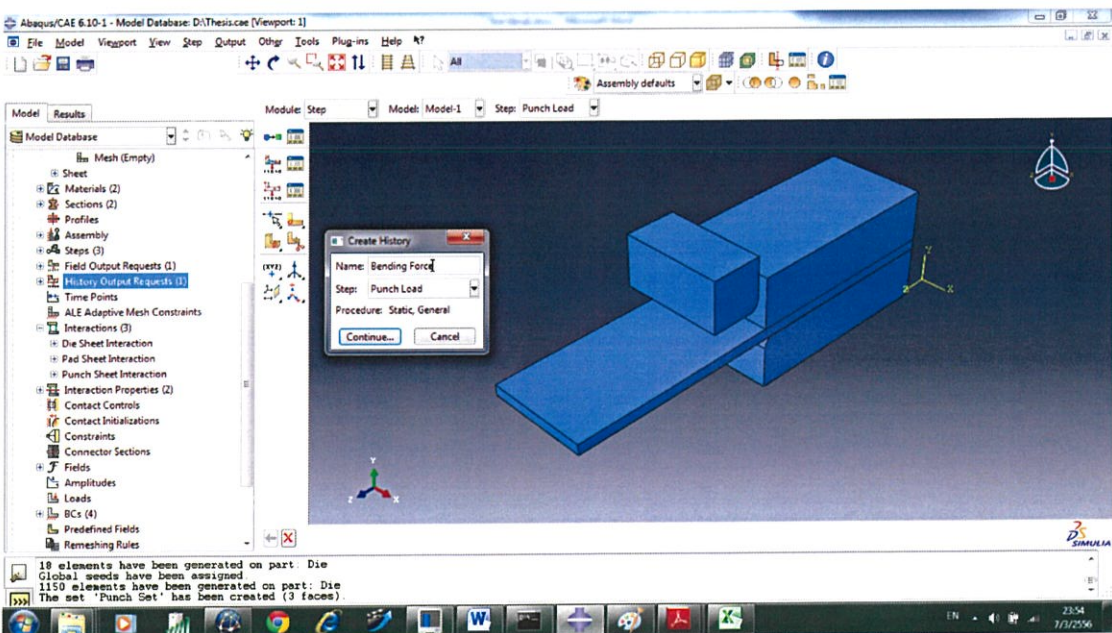
รูปที่ 3.35 การ Set Surface ที่ตัวกด

เลือก Surface ของตัวกดที่ต้องการ แล้วคลิก Done



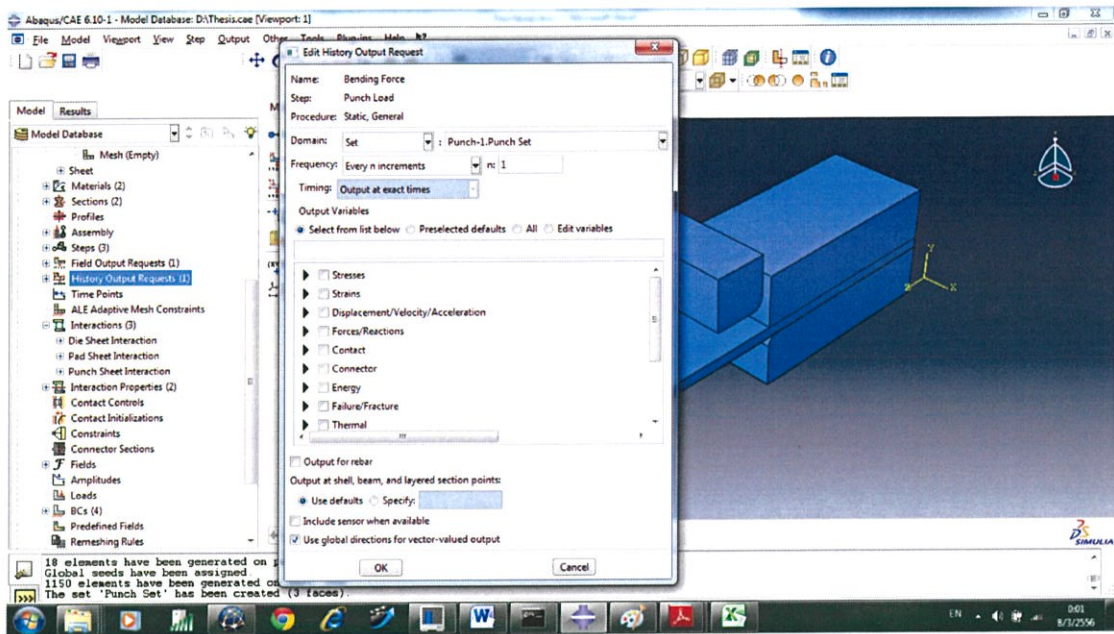
รูปที่ 3.36 เลือก Surface ของตัวกดที่ต้องการ

จากนั้นทำการสร้าง History Output โดย คลิก History Output Request และเปลี่ยนชื่อเป็น Bending Force แล้วคลิก Continue



รูปที่ 3.37 การสร้าง History Output

จากนั้นทำการ Set ค่าที่หัวกด เพื่อให้โปรแกรมสามารถอ่านค่าออกมาได้เหมือนกับการทดลองจริง เลือก Domain เป็น Set และเลือกช่องด้านขวาเป็น Punch Set และให้โปรแกรมอ่านค่า Force โดยเลือก Force>RF แล้วคลิก OK

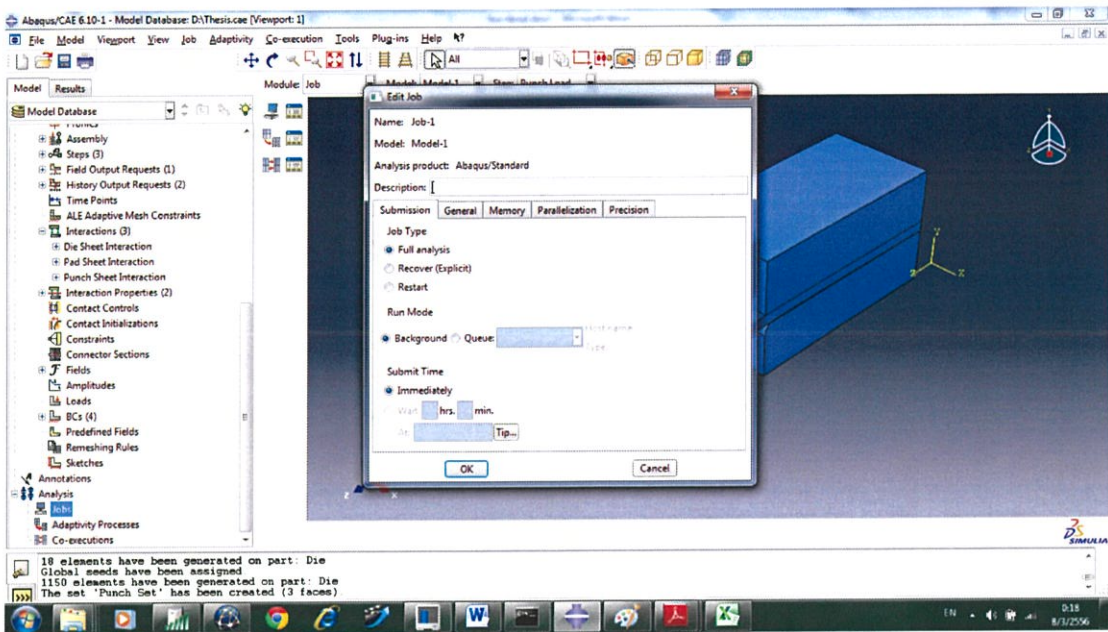


รูปที่ 3.38 การ Set ค่าที่หัวกด

การสร้าง Job คือการกำหนดค่าก่อนสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณและประมวลผล

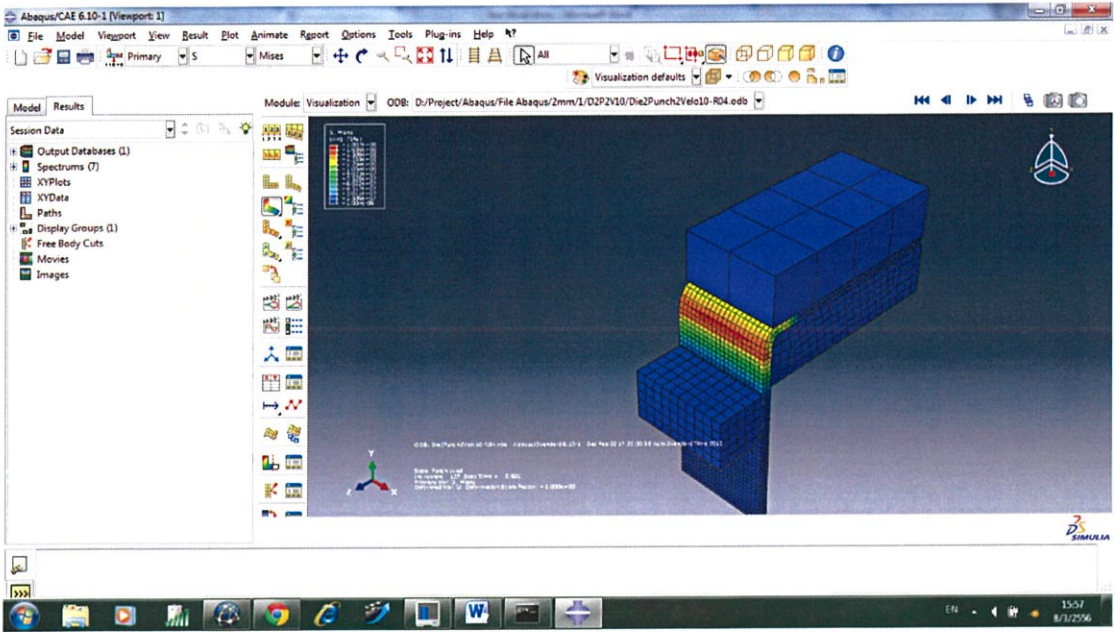
17. การกำหนดให้โปรแกรมประมวลผล

คลิกไอคอน Create Job แล้วใส่ชื่อที่ต้องการ แล้วคลิก Continue จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา แล้วกด OK



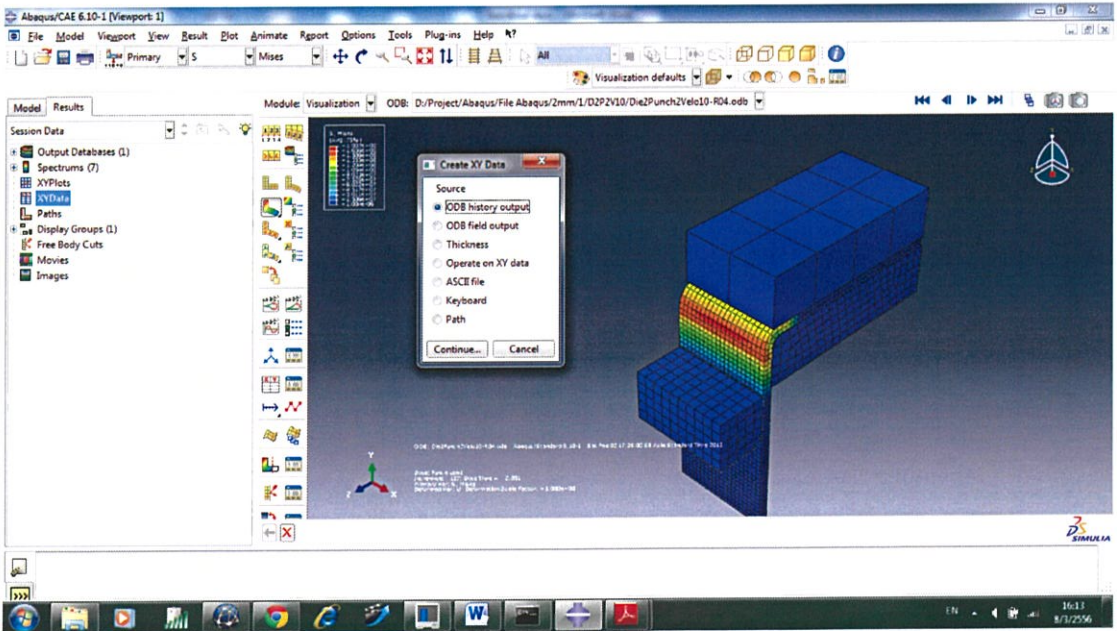
รูปที่ 3.39 แสดงการกำหนดเงื่อนไขในการคำนวณ

การใช้ Job Manager เพื่อสั่งการคำนวณ คลิกไอคอน Job Manager แล้วกด Submit โปรแกรมจะเริ่มทำการประมวลผล ถ้าหากว่าโปรแกรมคำนวณเสร็จแล้วตรง Status จะแสดงคำว่า Completed และเราสามารถคลิกดูผลการคำนวณโดยคลิก Result



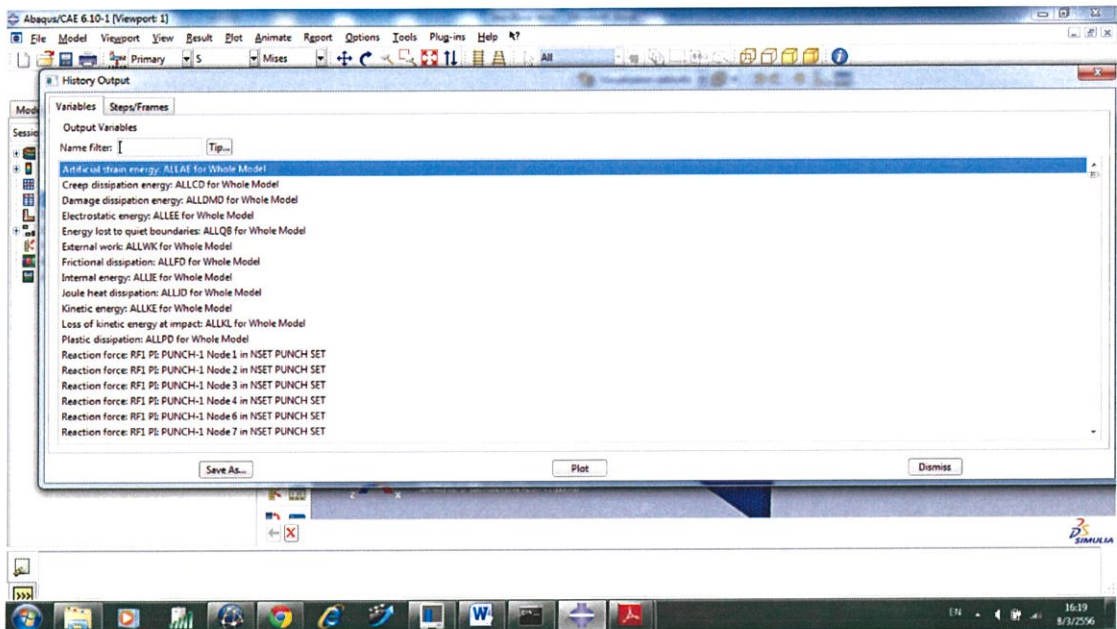
รูปที่ 3.40 ผลหลังจากที่โปรแกรมคำนวณเสร็จแล้ว

18. เนื่องจากกราฟที่เราต้องการนั้น เป็นการ Plot ระหว่างแรงเทียบกับเวลา ดังนั้น เราจะทำการกำหนดให้โปรแกรม Plot กราฟแรงเทียบกับเวลาออกมาเพื่อนำไปเปรียบเทียบกัน Double Click ที่ XY-DATA ตรง Tree Model



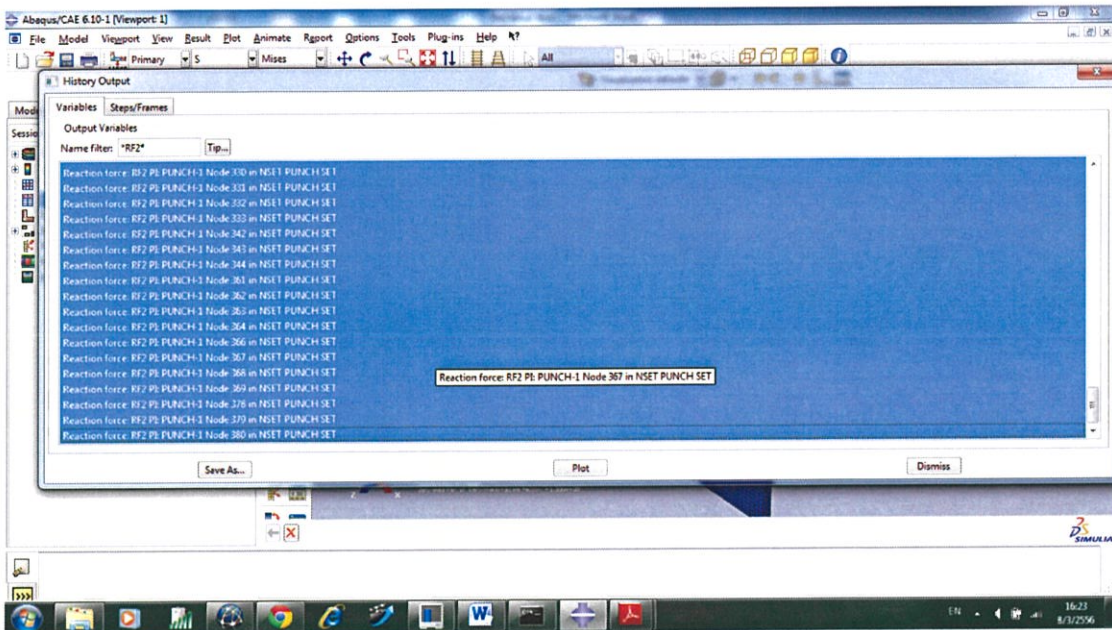
รูปที่ 3.41 การพล็อตกราฟจาก History Output

ตรง Source เลือกเป็น OBD History Output เสร็จแล้วคลิก Continue



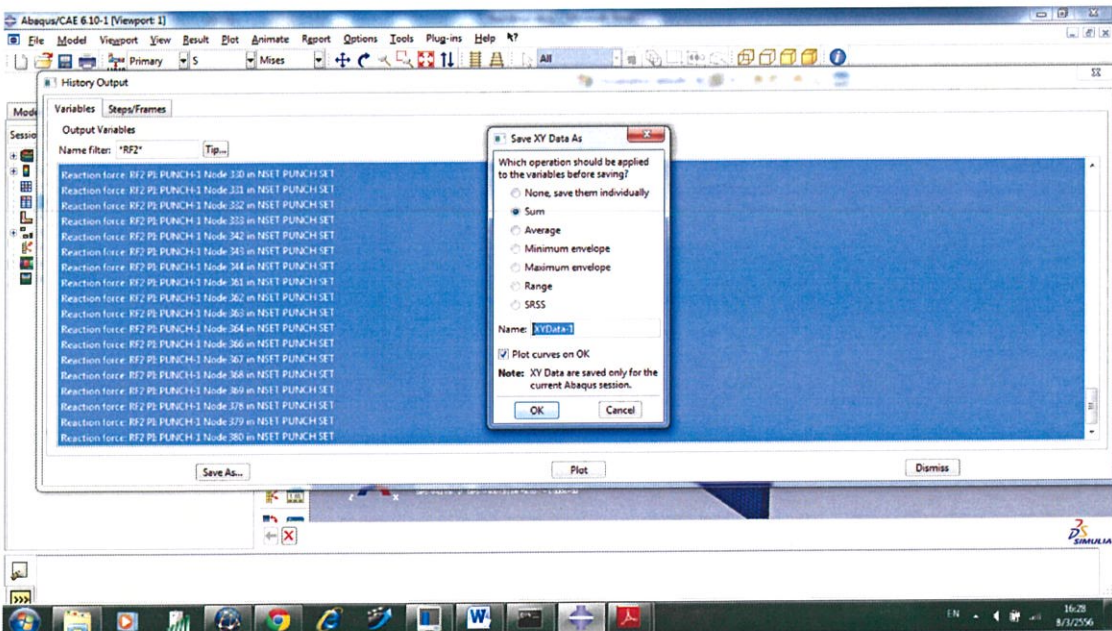
รูปที่ 3.42 แสดงการใส่ค่าที่จะนำมาพล็อตกราฟ

ในช่อง Name Filter ให้ใส่เป็น *RF2* จากนั้นกด Enter เมื่อเสร็จแล้วก็จะปรากฏชื่อที่ขึ้นต้นด้วย RF2 ให้เลือกคลุมดำทั้งหมด และกด Save as



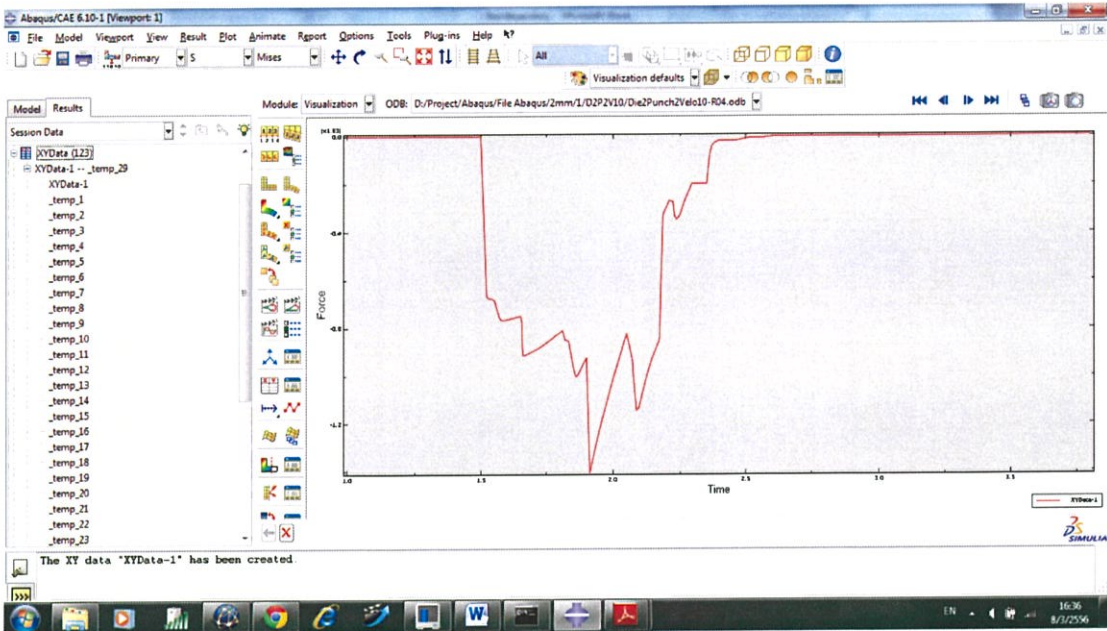
รูปที่ 3.43 การเลือกค่า RF2 มาพล็อตกราฟ

เมื่อกด Save as เสร็จแล้ว จะมีหน้าต่าง Save XY Data As ขึ้นมา ให้คลิกเลือก Sum แล้วกด OK



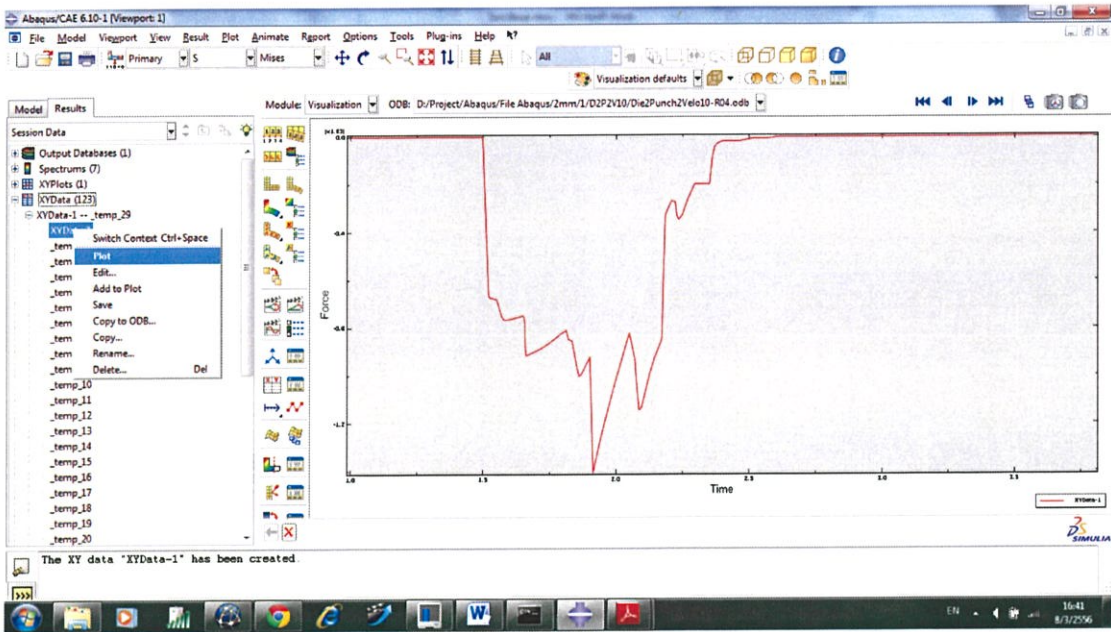
รูปที่ 3.44 การเลือกพล็อตกราฟเป็นค่า Sum

หลังจากทำการกำหนดค่าต่างๆในการพล็อตกราฟเสร็จแล้ว โปรแกรมก็จะทำการพล็อตกราฟระหว่างแรงเทียบกับเวลาออกมา



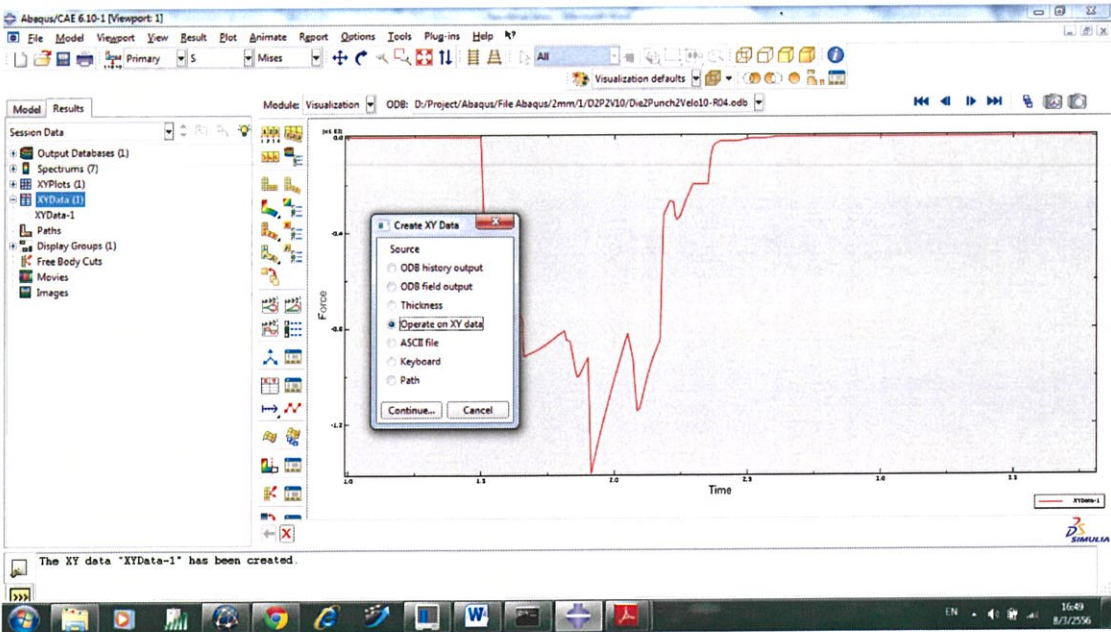
รูปที่ 3.45 กราฟระหว่างแรงเทียบกับเวลา

19. จะเห็นได้ว่ากราฟที่พล็อตออกมานั้น ค่าแรงค่อนข้างจะกระจายและไม่คงที่ เราจึงต้องทำการปรับกราฟให้ได้ค่าที่คงที่มากขึ้น โดยไปที่ XY Data (123)>XYData-1 จากนั้นให้คลิกขวาที่ XYData-1 แล้วเลือก Plot เพื่อให้โปรแกรมรบกวนกราฟให้เหลือเพียงกราฟเดียว



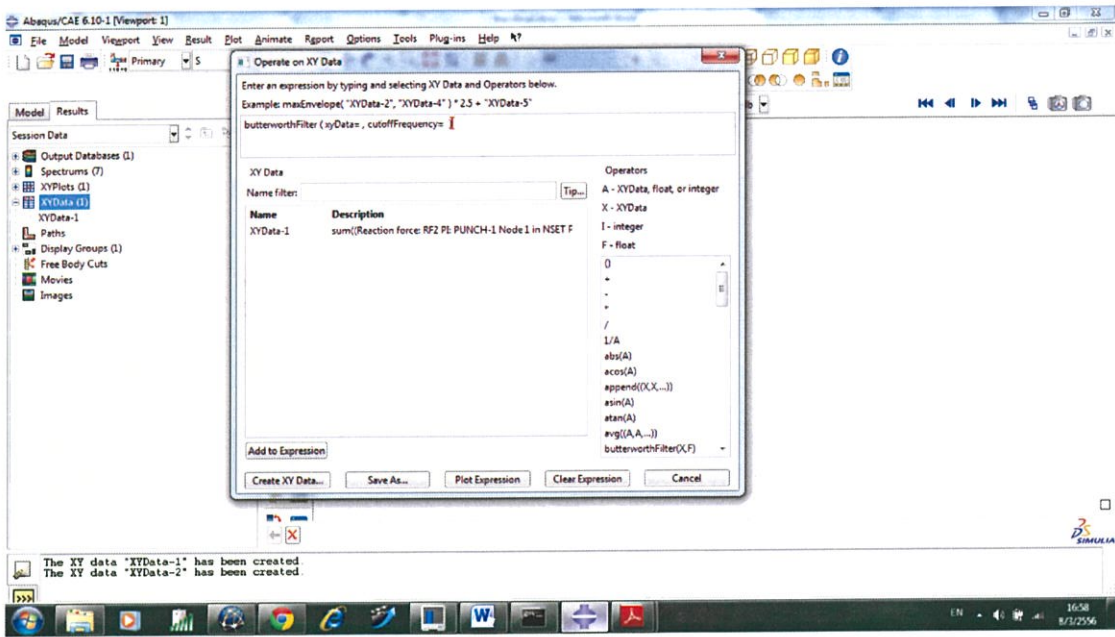
รูปที่ 3.46 การให้โปรแกรมรวบรวมพล็อตกราฟ

หลังจากนั้นให้ Double Click ที่ XY Data(1) แล้วเลือก Source เป็น Operate on XY Data แล้วคลิก Continue



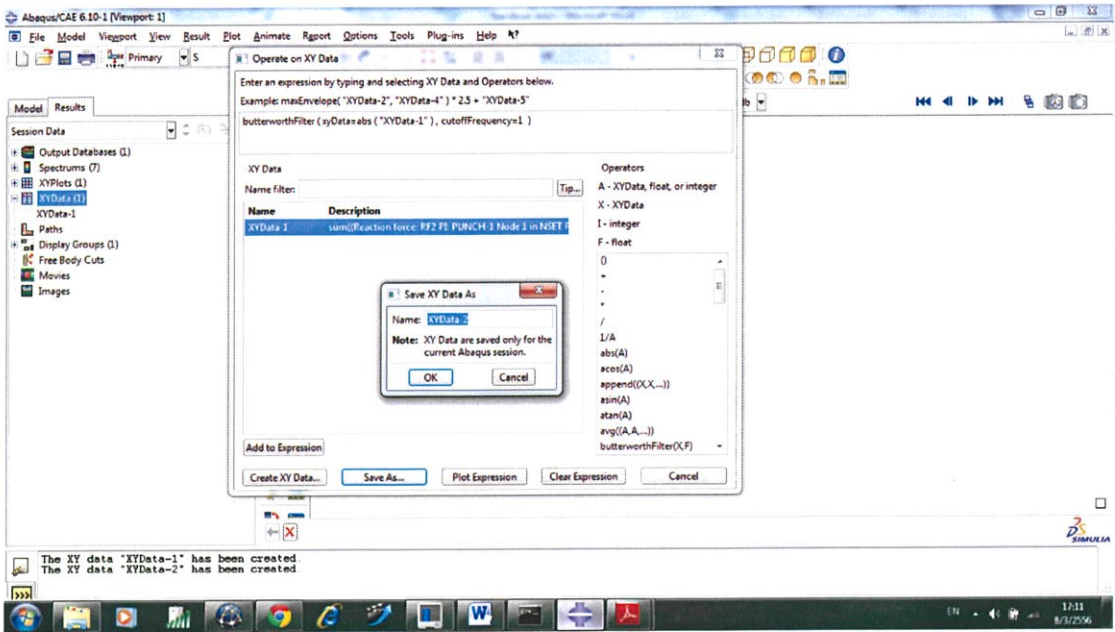
รูปที่ 3.47 การเลือก Operate XY Data

จากนั้นจะปรากฏหน้าต่าง Operate on XY Data ขึ้นมา ซึ่งเราจะทำการกำหนดให้โปรแกรมพล็อตกราฟที่มีความคงที่และกระจายน้อยในส่วนนี้ โดยคลิก `butterworthFilter(X,F)` จากนั้นจะปรากฏข้อความ `butterworthFilter (xyData= , cutoffFrequency=)`



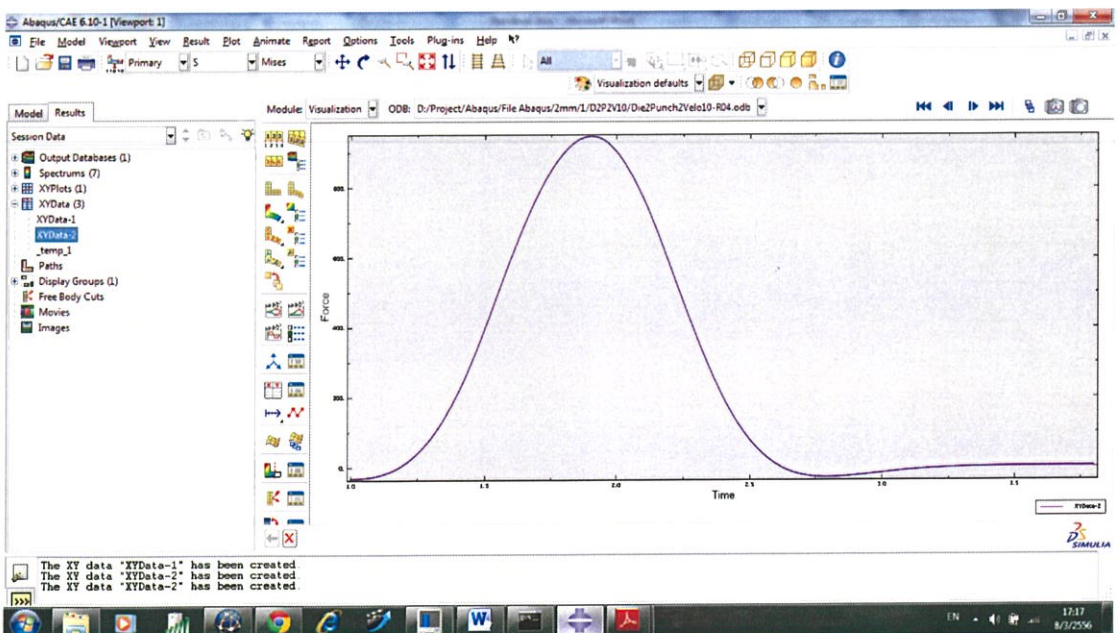
รูปที่ 3.48 การกำหนดค่าในการพล็อตกราฟ

ในช่อง “xyData=” ให้คลิกที่ `abs(A)` ในช่องทางขวามือ จากนั้นให้เลือก XY Data-1 ที่ช่อง Name และในช่อง “cutoffFrequency=” ให้ใส่ค่าเป็น 1 แล้วกด Save as และกด OK



รูปที่ 3.49 การกำหนดค่าในการพล็อตกราฟ

หลังจากนั้นโปรแกรมทำการพล็อตกราฟระหว่างแรงเทียบกับเวลาขึ้นมาใหม่ตามที่เรากำลังต้องการ และเราสามารถอ่านค่าแรง ณ เวลาต่างๆได้จากกราฟนี้

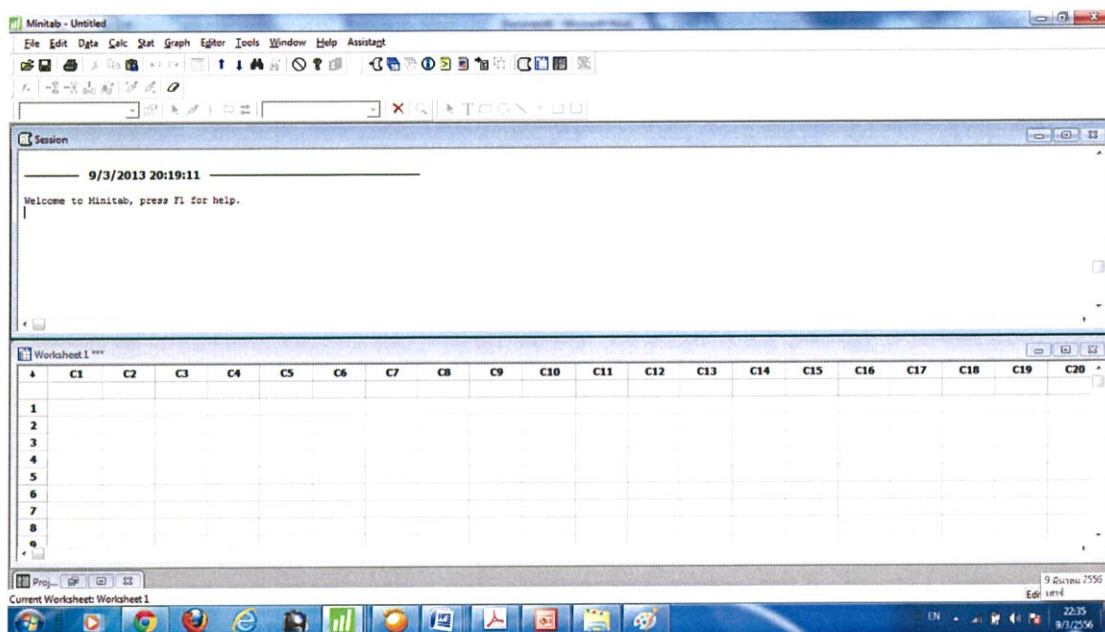


รูปที่ 3.50 แสดงกราฟที่ได้

3.3 การวิเคราะห์โดยใช้สถิติ

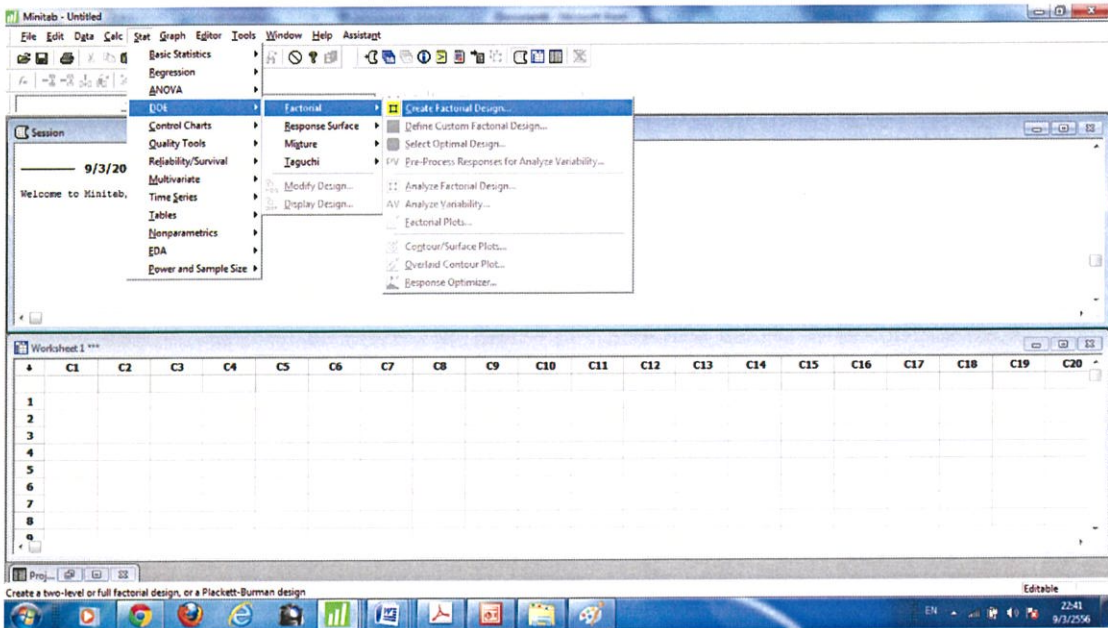
การวิเคราะห์โดยใช้สถิตินั้นเราเลือกใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ เนื่องจากในโปรแกรม Minitab นั้นสามารถออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นได้

3.3.1 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ



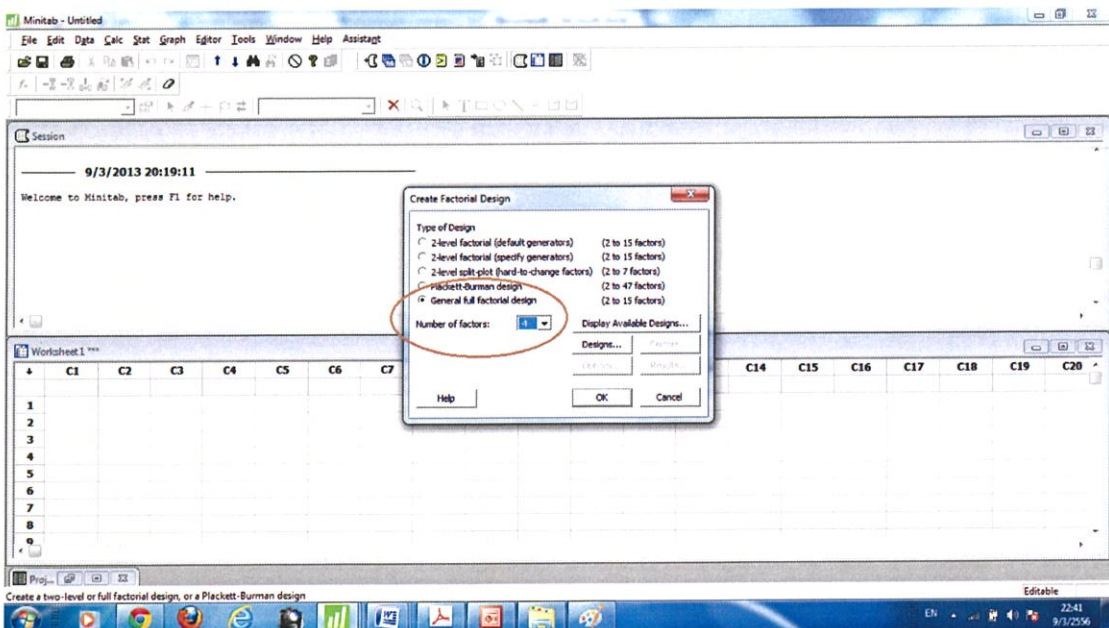
รูปที่ 3.51 หน้าต่างโปรแกรม Minitab

1. เลือก Stat>DOE>Factorial>Create Factorial Design...



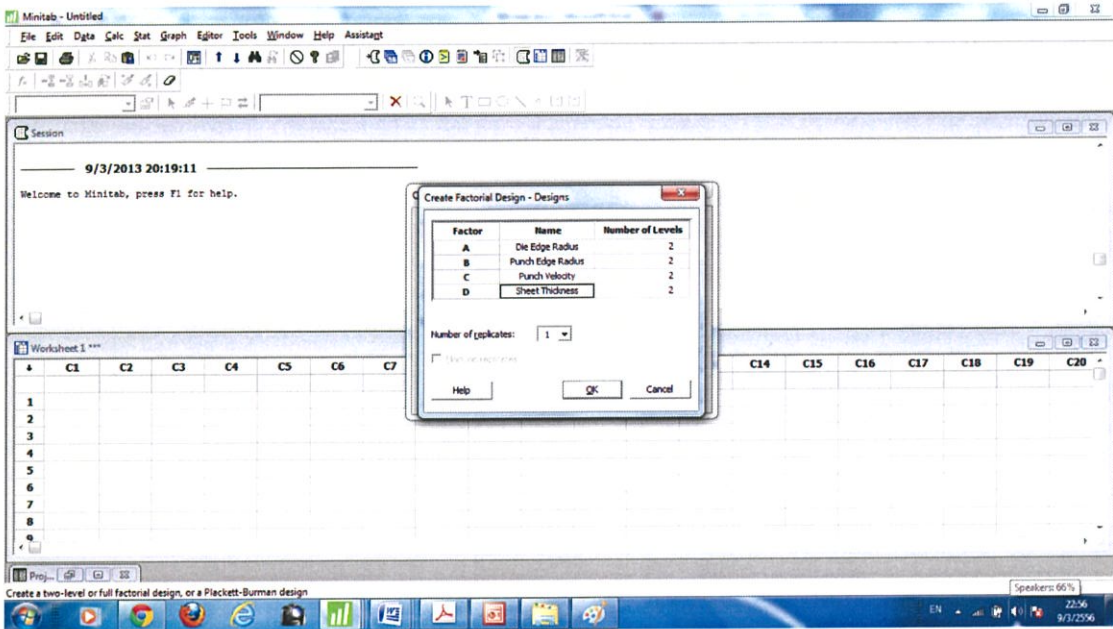
รูปที่ 3.52 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

2. ออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบโดยเลือก General full factorial design และใส่จำนวนตัวแปรที่ต้องการทดลองในช่อง Number of factors



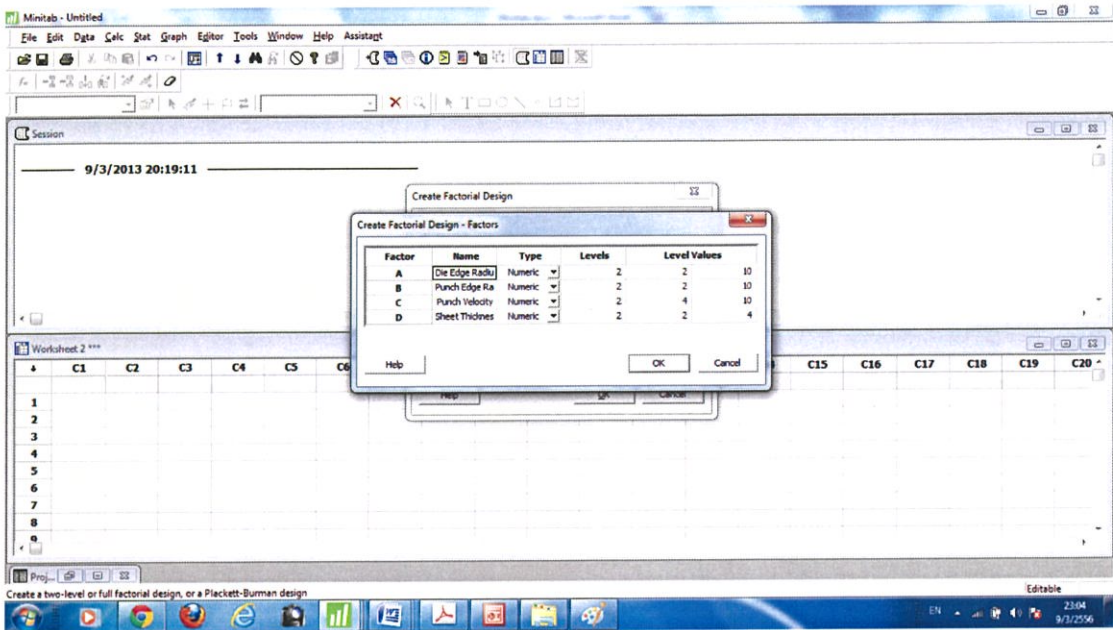
รูปที่ 3.53 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

3. กำหนดชื่อตัวแปรและระดับของตัวแปรโดยเลือก Designs... จากนั้นใส่ชื่อและระดับของตัวแปรลงไป จากนั้นคลิก OK



รูปที่ 3.54 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป

4. กำหนดค่าแต่ละระดับของตัวแปรโดยคลิก Factors... จากนั้นใส่ค่าระดับต่ำและระดับสูงของแต่ละตัวแปรไป จากนั้นคลิก OK



รูปที่ 3.55 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

5. จะได้ตารางการทดลองมาดังนี้ จากนั้นพิมพ์ Bending Force ลงใส่ช่อง C9 เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูล

Run	StdOrder	RunOrder	PType	Blocks	Die Edge Radius	Punch Edge Radius	Punch Velocity	Sheet Thickness	Bending Force
1	1	1	1	1	2	2	4	2	
2	2	2	1	1	2	2	4	4	
3	3	3	1	1	2	2	10	2	
4	4	4	1	1	2	2	10	4	
5	5	5	1	1	2	10	4	2	
6	6	6	1	1	2	10	4	4	
7	7	7	1	1	2	10	10	2	
8	8	8	1	1	2	10	10	4	
9	9	9	1	1	10	2	4	2	
10	10	10	1	1	10	2	4	4	
11	11	11	1	1	10	2	10	2	
12	12	12	1	1	10	2	10	4	
13	13	13	1	1	10	10	4	2	
14	14	14	1	1	10	10	4	4	
15	15	15	1	1	10	10	10	2	
16	16	16	1	1	10	10	10	4	

รูปที่ 3.56 ตารางการทดลอง (การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 2 ระดับ)

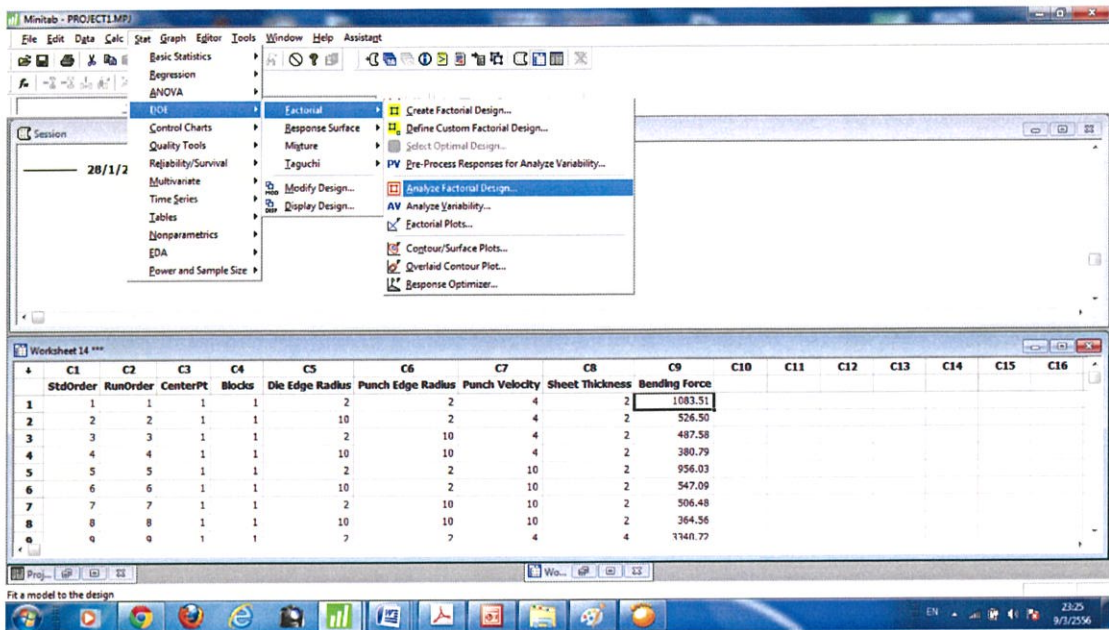
3.3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากการจำลองเชิงตัวเลขได้ข้อมูลมาใส่ตารางทดลองเราสามารถนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนได้โดย

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Die Edge Radius	Punch Edge Radius	Punch Velocity	Sheet Thickness	Bending Force							
1	1	1	1	1	2	2	4	2	1083.51							
2	2	2	1	1	10	2	4	2	526.50							
3	3	3	1	1	2	10	4	2	487.58							
4	4	4	1	1	10	10	4	2	380.79							
5	5	5	1	1	2	2	10	2	956.03							
6	6	6	1	1	10	2	10	2	547.09							
7	7	7	1	1	2	10	10	2	506.48							
8	8	8	1	1	10	10	10	2	364.56							
9	9	9	1	1	2	2	4	4	1140.72							

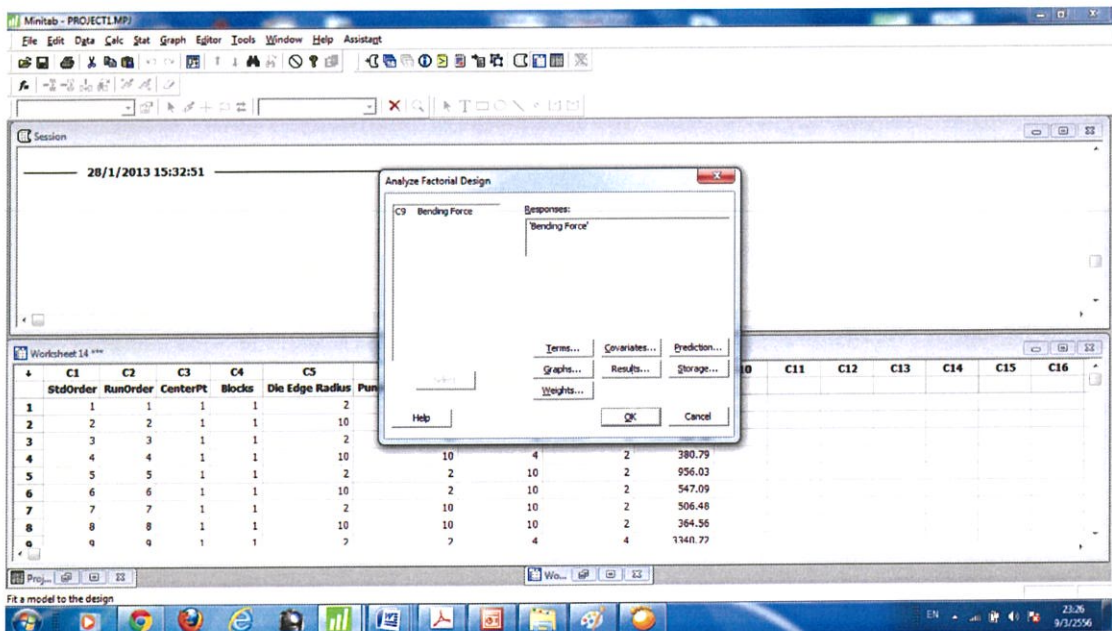
รูปที่ 3.57 ตารางการทดลองและข้อมูลจากการจำลองเชิงตัวเลข

1. เลือก Stat>DOE>Factorial>Analyze Factorial Design...



รูปที่ 3.58 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

2. คลิก OK



รูปที่ 3.59 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

3. ได้ตาราง ANOVA มาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์

Estimated Effects and Coefficients for Bending Force (coded units)

Term	Effect	Coef
Constant		1342.5
Die Edge Radius	-697.0	-348.5
Punch Edge Radius	-550.5	-280.3
Punch Velocity	-111.9	-56.0
Sheet Thickness	1471.9	736.0
Die Edge Radius*Punch Edge Radius	260.6	130.3
Die Edge Radius*Punch Velocity	12.4	6.2
Die Edge Radius*Sheet Thickness	-393.4	-196.7
Punch Edge Radius*Punch Velocity	49.2	24.6

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Die Edge Radius	Punch Edge Radius	Punch Velocity	Sheet Thickness	Bending Force							
1	1	1	1	1	2	2	4	2	1083.51							
2	2	2	1	1	10	2	4	2	526.50							
3	3	3	1	1	2	10	4	2	487.58							
4	4	4	1	1	10	10	4	2	380.79							
5	5	5	1	1	2	2	10	2	956.03							
6	6	6	1	1	10	2	10	2	547.09							
7	7	7	1	1	2	10	10	2	506.48							
8	8	8	1	1	10	10	10	2	364.56							
9	9	9	1	1	2	2	4	4	1340.72							

รูปที่ 3.60 ตาราง ANOVA

3.3.3 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น

1. เลือก Stat>Regression>General Regression...

The screenshot shows the Minitab software interface. The 'Regression' menu is open, displaying various options including General Regression, Stepwise, Best Subsets, Fitted Line Plot, Nonlinear Regression, Orthogonal Regression, Partial Least Squares, Binary Logistic Regression, Ordinal Logistic Regression, and Nominal Logistic Regression. Below the menu, a worksheet titled 'Worksheet 2 ***' is visible, containing the following data:

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17
	StdOrder	RunOrder	PLType	Blocks	Die Edge Radius	Punch Edge Radius	Sheet Thickness	Force									
1	1	1	1	1	2	2	2	947.27									
2	2	2	1	1	2	2	2	1758.76									
3	3	3	1	1	2	2	4	2916.70									
4	4	4	1	1	2	6	2	688.27									
5	5	5	1	1	2	6	3	1417.37									
6	6	6	1	1	2	6	4	2392.46									
7	7	7	1	1	2	10	2	505.46									
8	8	8	1	1	2	10	3	1270.85									
9	9	9	1	1	2	10	4	2062.22									

รูปที่ 3.61 ตารางการทดลองและข้อมูลจากการจำลองเชิงตัวเลข

2. ในช่อง Response เลือก Bending Force

ในช่อง Model เลือก Die Edge Radius, Punch Edge Radius, Sheet Thickness, 'Die Edge Radius'*'Punch Edge Radius', 'Die Edge Radius'*'Sheet Thickness', 'Punch Edge Radius'*'Sheet Thickness' จากนั้นคลิก OK

General Regression

Response: Bending Force

Model:

Die Edge Radius, Sheet Thickness, Die Edge Radius * Punch Edge Radius, Die Edge Radius * Sheet Thickness, Punch Edge Radius * Sheet Thickness

Categorical predictors (optional):

Options... Res-Cov... Prediction...
Graphs... Results... Storage...
Help OK Cancel

StdOrder	RunOrder	PTType	Blocks	Die Edge Radius	Punch Edge Radius	Sheet Thickness	Bending
1	1	1	1	1	2	2	947.27
2	2	2	1	1	2	2	1758.76
3	3	3	1	1	2	2	2916.70
4	4	4	1	1	2	6	688.27
5	5	5	1	1	2	6	1417.37
6	6	6	1	1	2	6	2392.46
7	7	7	1	1	2	10	505.46
8	8	8	1	1	2	10	1270.85
9	9	9	1	1	2	10	7067.77

รูปที่ 3.62 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น

3. จะได้สมการและค่า R-Square มา

General Regression Analysis: Bending Forc versus Die Edge Rad, Punch Edge R, ..

Regression Equation

$$\text{Bending Force} = -1236.04 + 27.4051 \text{ Die Edge Radius} + 2.09394 \text{ Punch Edge Radius} + 1106.77 \text{ Sheet Thickness} + 6.21977 \text{ Die Edge Radius} * \text{Punch Edge Radius} - 47.1316 \text{ Die Edge Radius} * \text{Sheet Thickness} - 35.8935 \text{ Punch Edge Radius} * \text{Sheet Thickness}$$

Coefficients

StdOrder	RunOrder	PTType	Blocks	Die Edge Radius	Punch Edge Radius	Sheet Thickness	Bending
1	1	1	1	1	2	2	947.27
2	2	2	1	1	2	2	1758.76
3	3	3	1	1	2	2	2916.70
4	4	4	1	1	2	6	688.27
5	5	5	1	1	2	6	1417.37
6	6	6	1	1	2	6	2392.46
7	7	7	1	1	2	10	505.46
8	8	8	1	1	2	10	1270.85
9	9	9	1	1	2	10	7067.77

รูปที่ 3.63 สมการที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น

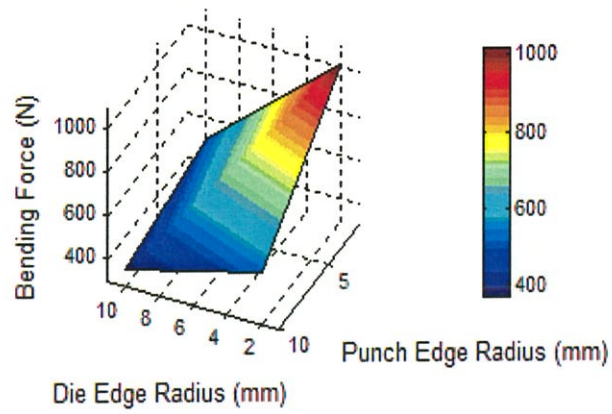
บทที่ 4

ผลการจำลองเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์ผล

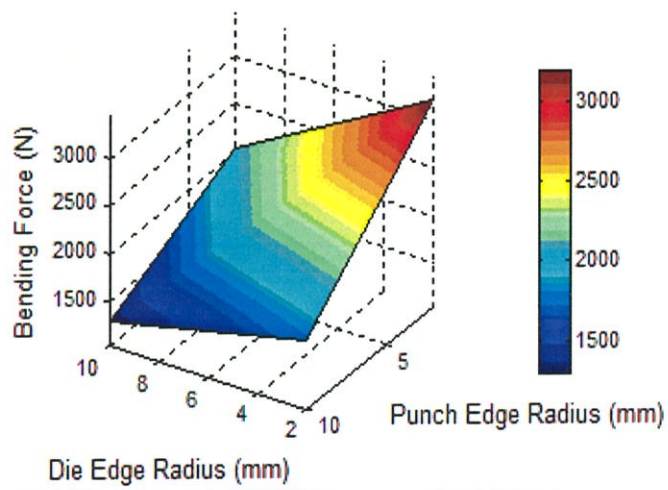
4.1 การทดลองแปดทอเรียลเต็มรูปสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 2 ระดับ

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลจากการทดลองแปดทอเรียลเต็มรูปสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 2 ระดับ

Die Edge Radius (mm)	Punch Edge Radius (mm)	Punch Velocity (mm/s)	Sheet Thickness (mm)	Force (N)
2	2	4	2	1083.51
10	2	4	2	526.50
2	10	4	2	487.58
10	10	4	2	380.79
2	2	10	2	956.03
10	2	10	2	537.09
2	10	10	2	506.48
10	10	10	2	364.56
2	2	4	4	3340.72
10	2	4	4	1902.74
2	10	4	4	2101.00
10	10	4	4	1365.08
2	2	10	4	3066.01
10	2	10	4	1639.66
2	10	10	4	1986.90
10	10	10	4	1225.68



รูปที่ 4.1 แสดงค่าแรงตัดจากการจำลองเชิงตัวเลขที่ Sheet Thickness 2mm



รูปที่ 4.2 แสดงค่าแรงตัดจากการจำลองเชิงตัวเลขที่ Sheet Thickness 4mm

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองแปดทอเรียลเต็มรูปแบบสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 2 ระดับ

4.2.1 การวิเคราะห์ผลกระทบแต่ละตัวแปร

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลกระทบต่อแรงดัดของแต่ละตัวแปร

Effect	MS	% Effect
Die Edge Radius	3900621	14.77
Punch Edge Radius	2684494	10.16
Punch Velocity	102492	0.39
Sheet Thickness	17361556	65.69
Die Edge Radius*Punch Edge Radius	548322	2.07
Die Edge Radius*Punch Velocity	996	<0.01
Die Edge Radius*Sheet Thickness	1229946	4.65
Punch Edge Radius*Punch Velocity	20387	0.08
Punch Edge Radius*Sheet Thickness	454464	1.72
Punch Velocity*Sheet Thickness	57303	0.22
Die Edge Radius*Punch Edge Radius*Punch Velocity	5519	0.02
Die Edge Radius*Punch Edge Radius*Sheet Thickness	51186	0.19
Die Edge Radius*Punch Velocity*Sheet Thickness	1700	<0.01
Punch Edge Radius*Punch Velocity*Sheet Thickness	3392	0.02
Die Edge Radius*Punch Edge Radius*Punch Velocity*Sheet Thickness	2321	<0.01
Total	26432066	100

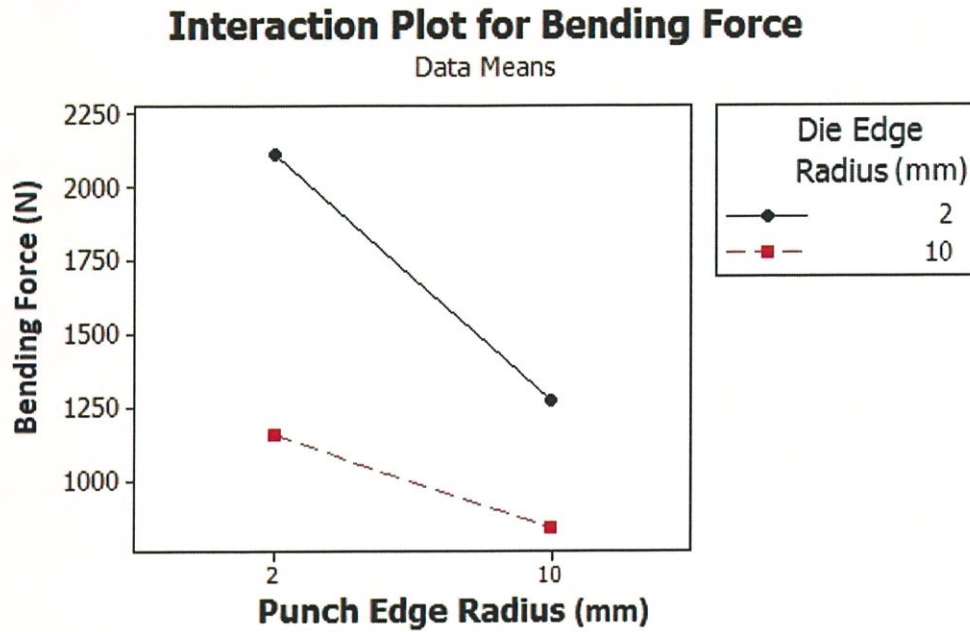
โดยที่

MS คือ Mean Square

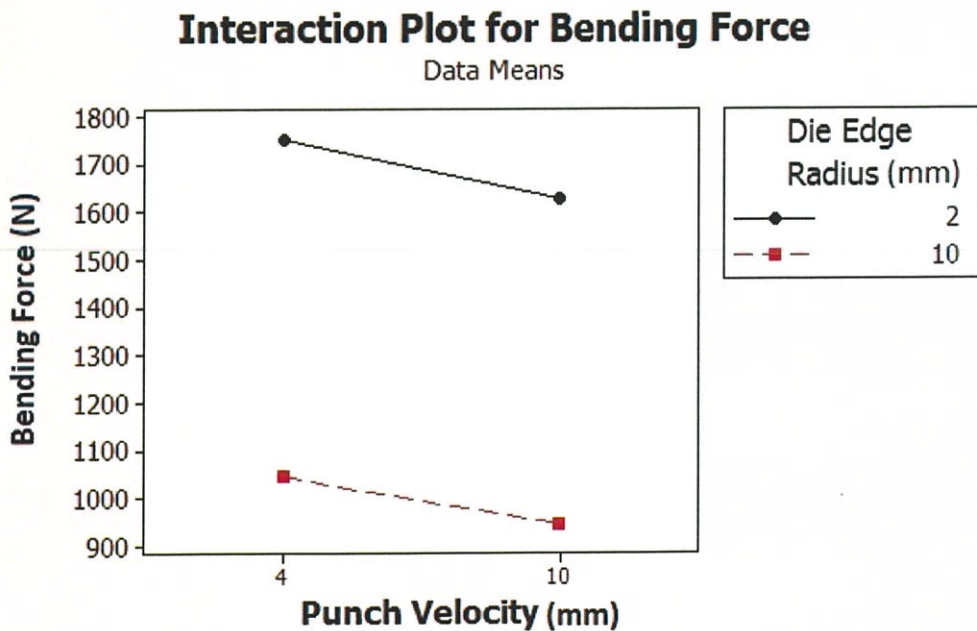
% Effect คือ ร้อยละของผลกระทบต่อแรงดัดของแต่ละตัวแปร

เนื่องจากการทดลองแปดทอเรียลเต็มรูปแบบสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 2 ระดับ เป็นการทดลองเพื่อตัดตัวแปร และจากตารางแสดงผลกระทบต่อแรงดัดของแต่ละตัวแปร จะเห็นได้ว่า Punch Velocity มีผลกระทบเพียง 0.39% ถือได้ว่าเป็นตัวแปรที่ไม่มีนัยสำคัญต่อ Bending Force และสามารถตัดตัวแปร Punch Velocity ออก เพื่อที่จะวิเคราะห์ตัวแปรที่เหลืออย่างละเอียดได้

4.2.2 ผลกระทบร่วมระหว่างตัวแปร

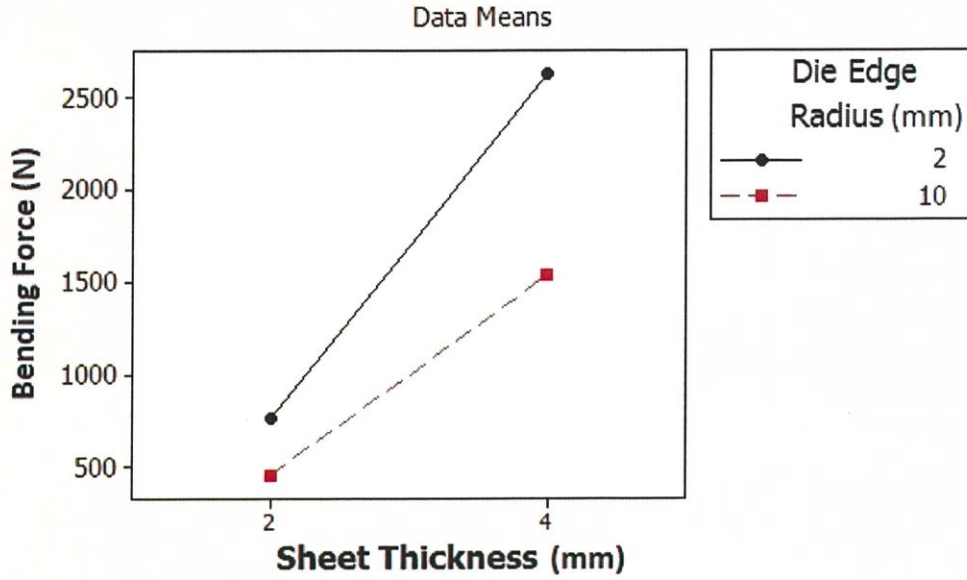


รูปที่ 4.3 แสดงผลกระทบร่วมระหว่าง Die Edge Radius กับ Punch Edge Radius



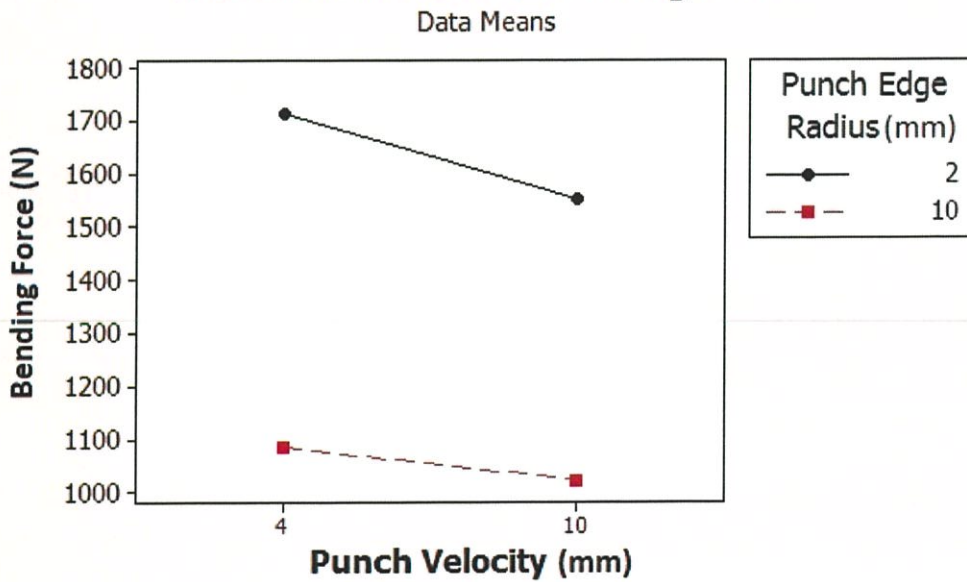
รูปที่ 4.4 แสดงผลกระทบร่วมระหว่าง Die Edge Radius กับ Punch Velocity

Interaction Plot for Bending Force



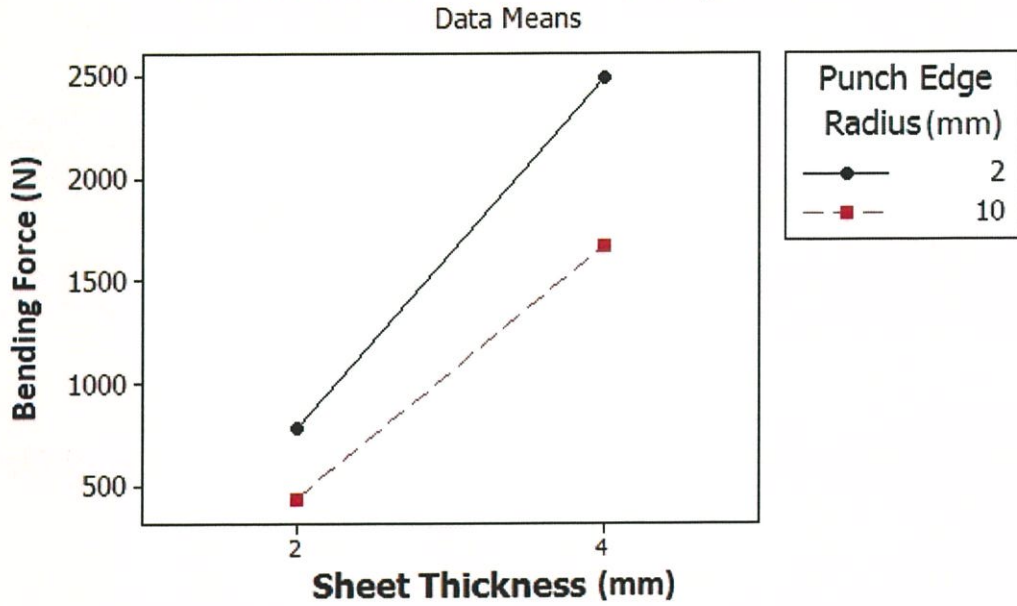
รูปที่ 4.5 แสดงผลกระทบริ่วมระหว่าง Die Edge Radius กับ Sheet Thickness

Interaction Plot for Bending Force



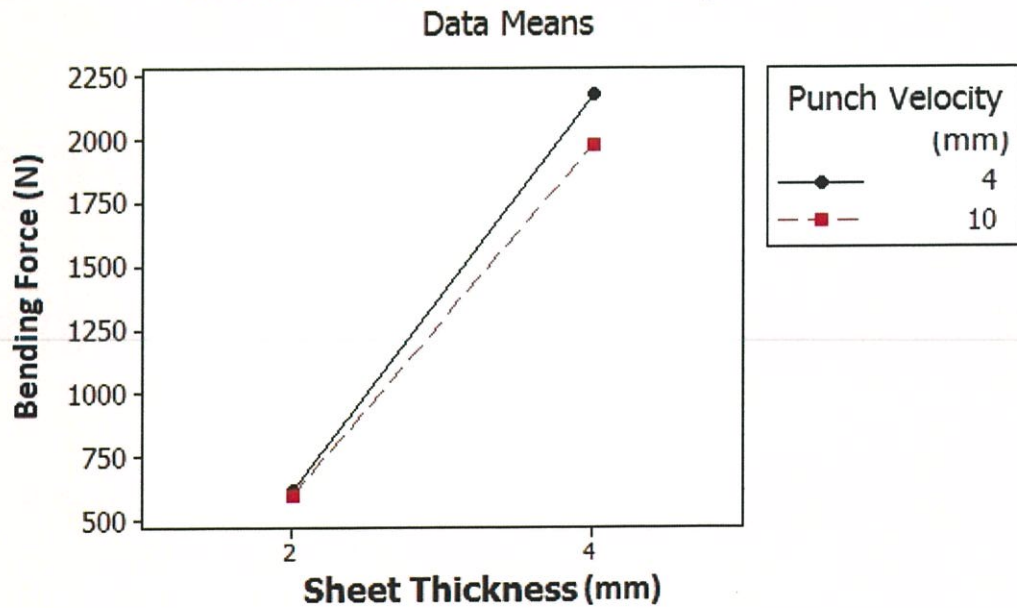
รูปที่ 4.6 แสดงผลกระทบริ่วมระหว่าง Punch Edge Radius กับ Punch Velocity

Interaction Plot for Bending Force



รูปที่ 4.7 แสดงผลกระทบร่วมระหว่าง Punch Edge Radius กับ Sheet Thickness

Interaction Plot for Bending Force



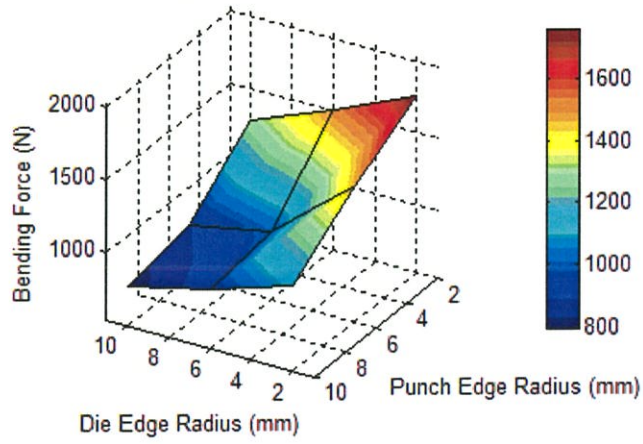
รูปที่ 4.8 แสดงผลกระทบร่วมระหว่าง Punch Velocity กับ Sheet Thickness

จากกราฟแสดงให้เห็นว่า ไม่มีผลกระทบร่วมระหว่าง Die Edge Radius กับ Punch Velocity และ Punch Edge Radius กับ Punch Velocity และผลกระทบร่วมระหว่าง Die Edge Radius กับ Sheet Thickness นั้นมีผลต่อแรงดัดมากที่สุด

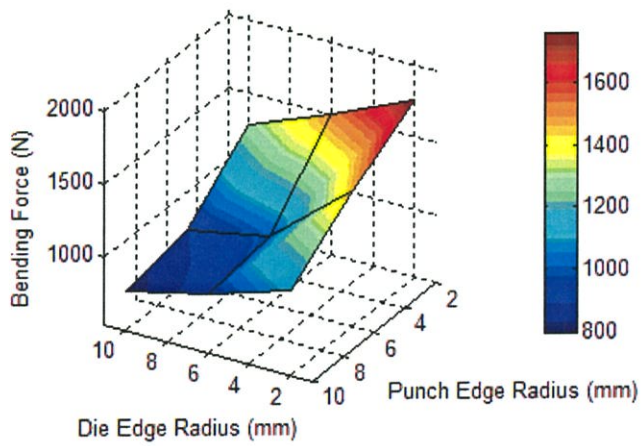
4.3 การทดลองแปดทอเรียลเต็มรูปสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 3 ระดับ

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลจากการทดลองแปดทอเรียลเต็มรูปสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 3 ระดับ

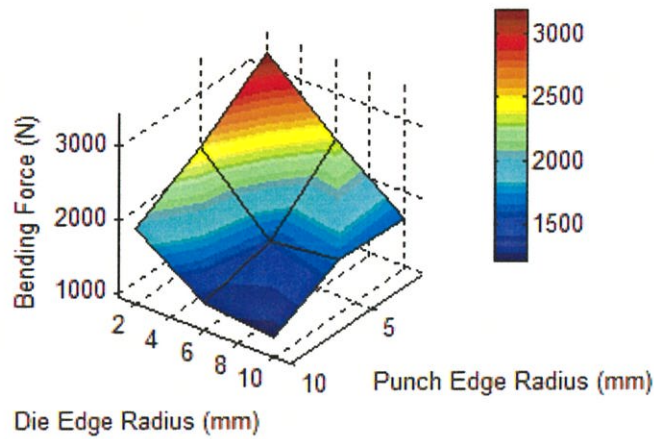
Die Edge Radius (mm)	Punch Edge Radius (mm)	Sheet Thickness (mm)	Force (N)
2	2	2	956.03
2	2	3	1761.09
2	2	4	3158.56
2	6	2	693.67
2	6	3	1409.84
2	6	4	2500.22
2	10	2	506.48
2	10	3	1276.74
2	10	4	1986.9
6	2	2	691.12
6	2	3	1470.78
6	2	4	2369.56
6	6	2	491.66
6	6	3	1002.36
6	6	4	1573.12
6	10	2	417.28
6	10	3	881.1
6	10	4	1336.88
10	2	2	537.09
10	2	3	1119.98
10	2	4	1639.66
10	6	2	423.99
10	6	3	935.65
10	6	4	1687.5
10	10	2	364.56
10	10	3	795.14
10	10	4	1225.68



รูปที่ 4.9 แสดงค่าแรงตัดจากการจำลองเชิงตัวเลขที่ Sheet Thickness 2mm



รูปที่ 4.10 แสดงค่าแรงตัดจากการจำลองเชิงตัวเลขที่ Sheet Thickness 3mm



รูปที่ 4.11 แสดงค่าแรงดัดจากการจำลองเชิงตัวเลขที่ Sheet Thickness 4mm

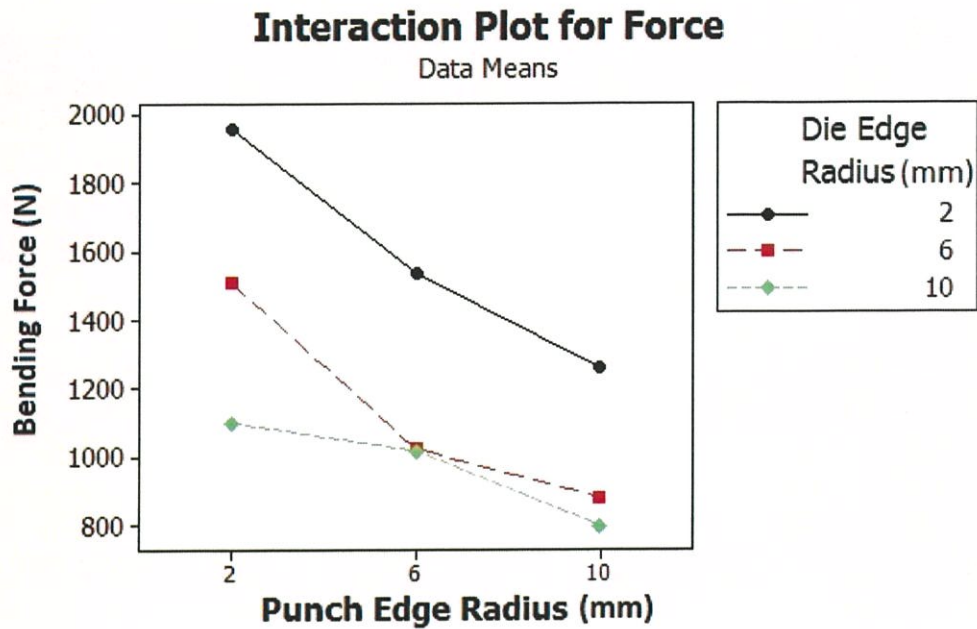
4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 3 ระดับ

4.4.1 การวิเคราะห์ผลกระทบแต่ละตัวแปร

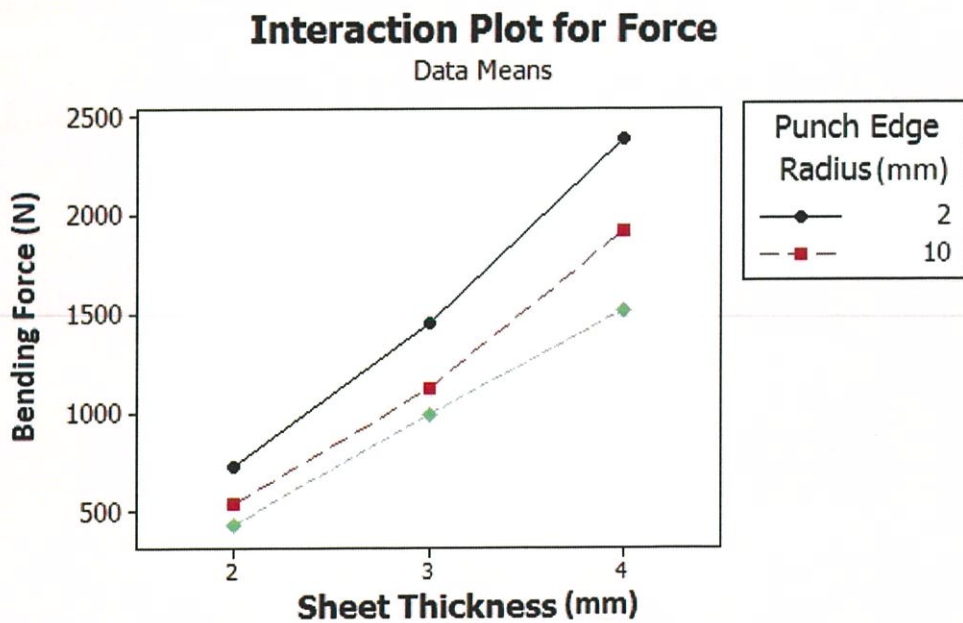
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงผลกระทบต่อแรงดัดของแต่ละตัวแปร

Effect	MS	% Effect
Die Edge Radius	1809760	14.79
Punch Edge Radius	1361795	11.17
Sheet Thickness	8566161	69.9
Die Edge Radius*Punch Edge Radius	97063	0.79
Die Edge Radius*Sheet Thickness	248790	2.03
Punch Edge Radius*Sheet Thickness	133526	1.09
Die Edge Radius*Punch Edge Radius*Sheet Thickness	27785	0.23
Total	12254480	100

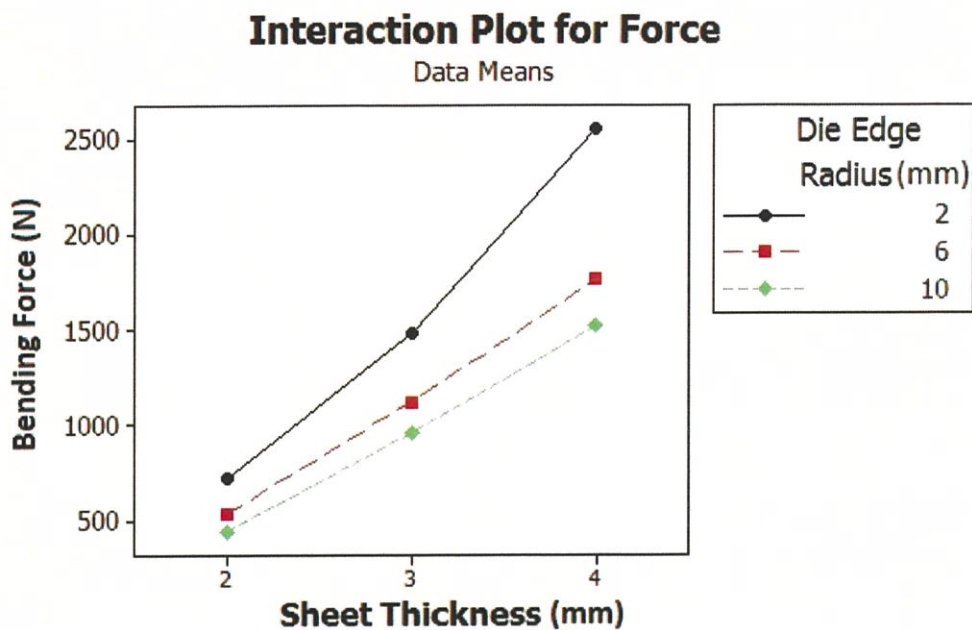
4.4.2 ผลกระทบร่วมระหว่างตัวแปร



รูปที่ 4.12 แสดงผลกระทบร่วมระหว่าง Die Edge Radius กับ Punch Edge Radius



รูปที่ 4.13 แสดงผลกระทบร่วมระหว่าง Punch Edge Radius กับ Sheet Thickness



รูปที่ 4.14 แสดงผลกระทบร่วมระหว่าง Die Edge Radius กับ Sheet Thickness

จากกราฟจะเห็นได้ว่า ผลกระทบร่วมระหว่าง Die Edge Radius กับ Sheet Thickness ซึ่งมีผลมากคือถ้าหาก Sheet Thickness มีค่าน้อย การเปลี่ยนแปลง Die Edge Radius จะมีผลทำให้แรงที่ใช้ในกระบวนการ Wiping-Die เปลี่ยนแปลงน้อย แต่ถ้าหาก Sheet Thickness มีค่ามาก การเปลี่ยนแปลง Die Edge Radius จะมีผลทำให้แรงที่ใช้ในกระบวนการ Wiping-Die เปลี่ยนแปลงมากขึ้น และผลกระทบร่วมระหว่าง Punch Edge Radius กับ Sheet Thickness ซึ่งมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันแต่มีผลกระทบน้อยกว่า

4.5 Regression Model

จากการนำผลจากการจำลองเชิงตัวเลขของการทดลองแพคทอเรียลเต็มรูปแบบสำหรับศึกษาตัวแปรที่ 3 ระดับ สามารถนำมาสร้างสมการได้เป็น

4.5.1 Empirical Model

4.5.1.1 Engineering Unit

$$\begin{aligned} \text{Bending Force} = & -1236.84 + 27.4D + 2.09P + 1186.77T + 6.22(D \times P) \\ & - 47.13 (D \times T) - 35.88(P \times T) \end{aligned} \quad (4.1)$$

โดยที่

D = Die Edge Radius (mm)

P = Punch Edge Radius (mm)

T = Sheet Thickness (mm)

4.5.1.2 Coded Variables

$$\text{Bending Force} = 1230.1 - 306.68D_c - 272.95P_c + 688.679T_c + 99.52(D_c \times P_c) - 188.53(D_c \times T_c) - 143.53(P_c \times T_c) \quad (4.2)$$

โดยที่

D_c = Die Edge Radius

P_c = Punch Edge Radius

T_c = Sheet Thickness

*ตัวแปรในสมการ Coded Variables จะใช้เป็นตัวแปรค่าระหว่าง -1 ถึง 1 และสามารถหา Coded ของแต่ละตัวแปรได้จาก

$$D_c = \frac{D - 6}{4} \quad (4.3)$$

$$P_c = \frac{P - 6}{4} \quad (4.4)$$

$$T_c = \frac{T - 3}{1} \quad (4.5)$$

โดยช่วงตัวแปรใช้ดังนี้

$$2 \leq D \leq 10$$

$$2 \leq P \leq 10$$

$$2 \leq T \leq 4$$

4.5.2 การหาค่า Factor K

เริ่มจากการทำให้เป็น Dimensionless เพื่อลดรูปสมการที่ยุ่งยาก โดยจัดรูปสมการให้เป็น

$$F = KZ \quad (4.6)$$

โดยที่

$$F = \frac{\text{Bending Force}}{\text{UTS} \times \text{Sheet Thickness} \times \text{Width of Sheet Metal}} \quad (4.7)$$

และ

$$Z = \frac{\text{Sheet Thickness}}{\text{Sheet Thickness} + \text{Punch Edge Radius} + \text{Die Edge Radius}} \quad (4.8)$$

โดยค่า Bending Force นั้นนำมาจากสมการ Coded Variables โดยสามารถหาค่าสมการได้เป็น

$$F = 0.352 \times Z \quad (4.9)$$

ได้ค่า $K = 0.352$

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลและวิจารณ์ผลการดำเนินงาน

จากการออกแบบการทดลอง 2-Level Factorial Design แล้ววิเคราะห์พบว่า Punch Velocity ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแรงที่ใช้ในกระบวนการ Wiping-Die ของแผ่นโลหะ และตัวแปรที่มีผลต่อแรงที่ใช้ในกระบวนการ Wiping-die แผ่นโลหะมากที่สุดคือ Sheet Thickness มีผลมากกว่า Die Edge Radius และ Punch Edge Radius ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ของตัวแปร(Interaction) ระหว่างDie Edge Radius กับ Sheet Thickness จะมีผลมาก กล่าวคือ ถ้าหาก Sheet Thickness มีค่าน้อย การเปลี่ยนแปลง Die Edge Radius จะมีผลทำให้แรงที่ใช้ในกระบวนการ Wiping-Die เปลี่ยนแปลงน้อย แต่ถ้าหาก Sheet Thickness มีค่ามาก การเปลี่ยนแปลง Die Edge Radius จะมีผลทำให้แรงที่ใช้ในกระบวนการ Wiping-Die เปลี่ยนแปลงมากขึ้น นอกจากนี้สมการที่ได้จากการออกแบบการทดลอง 3-Level Factorial Design ที่ใช้สำหรับกระบวนการ Wiping-die แผ่นโลหะที่เกิดจากความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ศึกษาและยังสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์สำหรับสมการมีค่าเท่ากับ 0.35 โดยมีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 0.33 และสามารถนำไปใช้กับกระบวนการที่มีค่าตัวแปรอยู่ในช่วงที่เราทำการศึกษา โดยมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย และนอกจากนี้ โครงงานนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการอื่นๆ ในทางอุตสาหกรรมนอกเหนือจากกระบวนการ Wiping-Die ที่มีตัวแปรเข้ามาเกี่ยวข้องหลายๆตัว และมีความซับซ้อนของตัวแปรมากๆ โดยจะช่วยให้เราสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ แล้วช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายได้อีกด้วย

5.2 ปัญหาที่พบจากการดำเนินงาน

ปัญหาที่พบระหว่างการดำเนินโครงการนี้คือ ต้องใช้เวลานานในการศึกษาโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลข เพราะเป็นโปรแกรมที่ผู้จัดทำโครงการไม่เคยศึกษามาก่อนและการตั้งค่าต่างๆในโปรแกรมสำหรับการประมวลผลค่อนข้างซับซ้อน นอกจากนี้ยังต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูง และใช้เวลานานในการประมวลผล

บรรณานุกรม

- [1] นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์. 2554. สถิติวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- [2] ประไพศรี สุทัศน์ และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง.
กรุงเทพฯ: ท้อป.
- [3] ผ่องพิสุทธิ์ ลาลูน. 2555. ความรู้เกี่ยวกับงานผลิตภัณฑ์โลหะแผ่น. สืบค้นจาก
www.weldingnews.techsakon.ac.th เมื่อวันที่ 5 มีนาคม 2556.
- [4] Bahloul, R., Mkaddem, A., Dal Santo, Ph. and Potiron, T. (2009). Sheet
metal bending optimisation using response surface method, numerical
simulation and design of experiments, Science Direct, 18, March 2006.
- [5] Douglas C. Montgomery. 2009. *Design and Analysis of Experiments*. 7th ED.
John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd.
- [6] Key to Metals AG. 2556. *เกรดอลูมิเนียม*. สืบค้นจาก www.keytometals.com
เมื่อวันที่ 5 มีนาคม 2556.
- [7] King Mongkut's University of Technology Thonburi. 2547. *Sheet Metal and die
design*. สืบค้นจาก eu.lib.kmutt.ac.th เมื่อวันที่ 5 มีนาคม 2556.
- [8] Mikell P. Groover. 2011. *Principles of Modern Manufacturing SI Version*. 4th ED.
John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd.