การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่อรอยตัดของการตัด แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L โดยกระบวนการตัดด้วยพลาสมา

A STUDY OF FACTOR TO CUTTING PATH OF AISI 316L BY PLASMA ARC CUTTING

มนัญญา สาคร
MANANYA SAKHON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-217-144

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่อรอยตัดของการตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L โดยกระบวนการตัดด้วยพลาสมา

A STUDY OF FACTOR TO CUTTING PATH OF AISI 316L BY PLASMA ARC CUTTING

T148801

มนัญญา สาคร
MANANYA SAKHON

เลขหมู่..........
เลขทะเบียน 148801
วัน.เดือน.ปี 23 พ.ย. 2560
b 00266959
i..........

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-217-144

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY OF FACTOR TO CUTTING PATH OF AISI 316L BY PLASMA ARC CUTTING

MANANYA SAKHON

A THESIS SUBMITTED IN PARTAIL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

KMITL-2017-EN-M-217-144

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่อรอยตัดของการตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L โดยกระบวนการตัดด้วยพลาสมา

Thesis Title A Study of Factor to Cutting Path of AISI 316L by Plasma Arc Cutting

นักศึกษา นางสาวมนัญญา สาคร

รหัสประจำตัว 55613403

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-217-144

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.บุญอ้อม	โฉมที	
รศ.ดร.ทศพล	เกียรติเจริญผล	
รศ.ดร.สกนธ์	คล่องบุญจิต	
ผศ.ดร.กิตติวัฒน์	สิริเกษมสุข	
รศ.ดร.กรรณชัย	กัลยาศิริ	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 24 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 24 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่อรอยตัดของการตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L โดยกระบวนการตัดด้วยพลาสมา
นักศึกษา	นางสาวมนัญญา สาคร
รหัสประจำตัว	55613403
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k ซึ่งมีตัวแปรและระดับที่ใช้ในการศึกษา คือ ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานที่ 0.96 และ 1.93 มิลลิเมตร ความเร็วที่ใช้ในการตัดที่ 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที และขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดที่ 40 และ 45 แอมแปร์ โดยมีผลตอบของการศึกษา คือ ความเรียบของพื้นผิวรอยตัด ความถูกต้องของขนาดที่ได้ และมุมเอียงของชิ้นงาน ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานมีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด ความเร็วที่ใช้ในการตัดมีผลต่อขนาดของชิ้นงานเป็นอิทธิพลหลัก และมีอิทธิพลร่วมของระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานกับความเร็วที่ใช้ในการตัด และขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดกับความเร็วที่ใช้ในการตัดมีผลต่อขนาดของชิ้นงานเช่นเดียวกัน และพบว่าขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดมีผลต่อมุมเอียงชิ้นงานซึ่งเป็นอิทธิพลหลัก และอิทธิพลร่วมของระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานกับความเร็วที่ใช้ในการตัดมีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงานเช่นเดียวกัน จากนั้นได้ใช้การออกแบบการทดลองด้วยการเพิ่มระดับปัจจัยในระดับกลางทั้งหมด 5 การทดลองโดยใช้ค่าตัวแปรในระดับกลางคือ ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานที่ 1.45 มิลลิเมตร ความเร็วที่ใช้ในการตัดที่ 45 มิลลิเมตรต่อวินาที และขนาดกระแสไฟฟ้าที่ 42.5 แอมแปร์ โดยผลตอบของการศึกษามีค่าที่อยู่ในระดับที่พึงพอใจ ดังนั้นจึงทำการศึกษาต่อ โดยออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ โดยการใช้ตัวแบบการทดลอง Box-Behnken design ซึ่งพบว่า ค่าของตัวแปรที่ใช้ในการตัดที่ให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ขนาดชิ้นงานมีความถูกต้องมากที่สุด และมุมเอียงของชิ้นงานมีมุมเอียงน้อยที่สุดคือ ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน เท่ากับ 45A ระยะระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน เท่ากับ 0.96 mm และความเร็วในการตัดชิ้นงาน เท่ากับ 45 mm/sec โดยมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของค่าความหยาบผิวอยู่ที่ 1.17, ของความถูกต้องของขนาดชิ้นงานอยู่ที่ 0.43 และของค่ามุมเอียงของชิ้นงานอยู่ที่ -16.39 ซึ่งค่าจริงที่ได้อยู่ในช่วงของ 95% ของช่วงความเชื่อมั่น และ 95% ของช่วงการทำนาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis title	A study of factor to cutting path of AISI 316L by plasma arc cutting
Student	Ms. Mananya Sakhon
Student ID.	55613403
Degree	Master of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

This work aims to study on cutting parameters of AISI 316L stainless steel. The experimental plan for this cutting process is full factorial design 2^k and experimental and level of factors used in this study are cutting height at 0.96 and 1.93 mm, cutting speed at 40 and 50 mm/sec and cutting current at 40 and 45 A. The response variables are surface roughness (Ra), dimensional accuracy and taper angle. From this investigation, it was determined that cutting height affects surface roughness and cutting speed affects dimensional accuracy as a main effect, (cutting height*cutting speed) and (cutting current*cutting speed) affect dimensional accuracy as interaction effects. Regarding taper angle, it was also determined that cutting current affects taper angle as a main effect and (cutting height*cutting speed) affects taper angle as an interaction effect. After that, the addition of 5 center points to 2^3 design was studied and experimental and level of factors are cutting height at 1.45 mm, cutting speed at 45 mm/sec and cutting current at 42.5 A which the response results were satisfied. Therefore, the response surface – Box Behnken was studied and was determined that cutting height at 0.96 mm, cutting speed at 45 mm/sec and cutting current at 45 A have provided the good result on response variables - surface roughness (Ra), dimensional accuracy and taper angle which the standard error of the fits are 1.17, 0.43 and -16.30, respectively and consequently the result was fall within the range at 95% confidence Interval and 95% prediction Interval.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำชี้แนะในการวิจัย การแก้ปัญหา ตลอดจนความรู้และประสบการณ์ที่ดี รวมถึงความเอาใจใส่สอบถามความก้าวหน้าอย่างสม่ำเสมอ

ขอขอบคุณ คุณอนุชิต เจริญสุข ผู้จัดการฝ่ายควบคุมคุณภาพ บริษัท ยันม่าร์ เอส พี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณวัฒนาภรณ์ พรสิริพงษ์ ผู้จัดการฝ่ายวิจัยและพัฒนา บริษัท เอส ซี ยอห์นสัน แอนด์ ซัน ของข้าพเจ้า ที่อนุญาตให้ข้าพเจ้ามาทำวิจัยในบางเวลาได้ และขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่ให้กำลังข้าพเจ้าเสมอมา

ขอขอบคุณพี่ เพื่อน น้อง และญาติๆ ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีและช่วยเหลือข้าพเจ้าตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

มนัญญา สาคร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ..... III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VI

สารบัญภาพ VIII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 1

1.3 สมมติฐานการศึกษา 2

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย 2

1.5 ขอบเขตงานวิจัย 2

1.6 ขั้นตอนการศึกษา 3

บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 8

2.2.1 การตัดด้วยพลาสมา 8

2.2.2 เหล็กกล้าไร้สนิม 16

2.2.3 ความหยาบผิว 25

2.2.4 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง 29

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย 53

3.1 การเตรียมชิ้นงานในการทดลอง 53

3.2 ขั้นตอนการทำวิจัย 54

3.3 การวัดความหยาบผิว 56

3.4 การวัดขนาดของชิ้นงาน 57

3.5 การวัดมุมเอียงของชิ้นงาน 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลอง 58

4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลของกระบวนการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 1 58

4.1.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองของความเรียบของพื้นผิวรอยตัด 58

4.1.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองของความถูกต้องของขนาดที่ได้ 60

4.1.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองของมุมเอียงของชิ้นงาน 63

4.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลของกระบวนการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 2 66

4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลของกระบวนการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 3 67

4.3.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองของความเรียบของพื้นผิวรอยตัด 68

4.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองของความถูกต้องของขนาดที่ได้ 74

4.3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองของมุมเอียงของชิ้นงาน 79

4.4 การหาค่าตัวแปรการตัดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองแบบ Response surface methodology 86

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 89

5.1 สรุปผลการทดลอง 89

5.1.1 สรุปผลการทดลองในกระบวนการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 1 89

5.1.2 สรุปผลการทดลองในกระบวนการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 2 89

5.1.3 สรุปผลการทดลองในกระบวนการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 3 90

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการศึกษาในอนาคต 90

เอกสารอ้างอิง........ 91

ภาคผนวก 95

ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ 96

ภาคผนวก ข. ปริมาณธาตุผสมของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L จาก บริษัทผู้ผลิต 106

ภาคผนวก ค. กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลข 108

ภาคผนวก ง. ภาพการวัดมุมเอียงของชิ้นงานด้วยโปรแกรม Autocad 2015 119

ประวัติผู้เขียน 125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ตารางแนะนำการเลือกใช้ก๊าซ 12
2.2 แสดงตัวอย่างส่วนประกอบโดยทั่วไปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 202, 304, 304L, 316 และ 316L 19
2.3 แสดงตัวอย่างส่วนประกอบโดยทั่วไปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 409L, 430, 439, 441 และ 444 20
2.4 แสดงตัวอย่างส่วนประกอบโดยทั่วไปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 410, 420 และ 440C 22
2.5 แสดงตัวอย่างส่วนประกอบโดยทั่วไปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 2205 และ AISI 329 23
2.6 แสดงตัวอย่างส่วนประกอบโดยทั่วไปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI A286 และ AISI 17-7PH 24
2.7 รูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย 34
2.8 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ตัวแปรแบบ Fixed Effects Model 38
2.9 เครื่องหมายทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณผลของการออกแบบ 2^3 42
2.10 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแบบสามตัวแปร 50
3.1 คุณลักษณะส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L ที่ผลิตโดย WALSIN LIHWA CORP. 53
3.2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองครั้งที่ 1 ด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k 54
3.3 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองด้วยการเพิ่มระดับปัจจัยในระดับกลางทั้งหมด 5 การทดลอง 55
3.4 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองครั้งที่ 3 ด้วยการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบโดยการใช้ตัวแบบการทดลอง Box-Behnken design 55
4.1 ผลการทดลองของความเรียบของพื้นผิวรอยตัดตามแนวความยาว (Roughness) ความถูกต้องของขนาดที่ได้ (Dimension) และมุมเอียงของชิ้นงาน (Taper) ของการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 1 58
4.2 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด 59
4.3 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อความถูกต้องของขนาดที่ได้ 61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.4 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน 64
4.5 ผลการทดลองของกระบวนการตัดพลาสมาครั้งที่ 2 ของระดับปัจจัยกลาง 66
4.6 ผลการทดลองของความเรียบของพื้นผิวรอยตัดตามแนวความยาว (Roughness) ความถูกต้องของขนาดที่ได้ (Dimension) และมุมเอียงของชิ้นงาน (Taper) ของการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 3 68
4.7 Estimated Regression Coefficients ของความเรียบของพื้นผิวรอยตัด 69
4.8 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด 69
4.9 Estimated Regression Coefficients หลังจากทำการตัดตัวแปรที่ไม่มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด 70
4.10 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรหลังจากทำการตัดตัวแปรที่ไม่มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด 70
4.11 Estimated Regression Coefficients ของความถูกต้องของขนาดที่ได้ 75
4.12 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อความถูกต้องของขนาดที่ได้ 75
4.13 Estimated Regression Coefficients ของมุมเอียงของชิ้นงาน 79
4.14 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน 80
4.15 Estimated Regression Coefficients หลังจากทำการตัดตัวแปรที่ไม่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน 81
4.16 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรหลังจากทำการตัดตัวแปรที่ไม่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน 81
4.17 ค่าของตัวแปรที่ให้ค่าความเรียบของพื้นผิวรอยตัดที่มีค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ขนาดของชิ้นงานมีความถูกต้องมากที่สุด และมุมเอียงของชิ้นงานมีน้อยที่สุด 85
4.18 การกำหนดค่าเป้าหมายของการตัด 86
4.19 ผลการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง 88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงการติดตั้งพื้นฐานของน้ำและสนามแม่เหล็ก	6
2.2 ค่าความหยาบผิวเทียบกับความเร็วที่ใช้ในการตัด	7
2.3 มุมเอียงของชิ้นงานเทียบกับความเร็วที่ใช้ในการตัด	7
2.4 การเปรียบเทียบกระบวนการตัดด้วยความร้อนเทียบกับความหนาและชนิดของโลหะ	9
2.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเร็วในการตัดสูงสุดของการตัดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	9
2.6 แสดงหลักการงานทำงานของการตัดด้วยพลาสมา	10
2.7 แสดงสถานะของสสารโดยพลาสมาอยู่ในสถานะที่ 4	11
2.8 รอยตัดด้วยพลาสมาของชิ้นงาน	13
2.9 ชิ้นงานที่มีมุมเอียงของรอยตัดที่มากเกินไป	14
2.10 ลักษณะของเศษโลหะที่เกิดขึ้นจากกระบวนการตัดด้วยพลาสมา (a) เกิดครีบแข็งเล็กน้อย (b) เกิดครีบลักษณะพองตัวมาก (Blister), (c) เกิดขี้เชื่อมบนพื้นผิว	15
2.11 ขอบของชิ้นงานที่ตัดมีลักษณะมนไม่เรียบตรง	15
2.12 แสดงเส้นรอยตัดรูปแบบต่างๆ	15
2.13 การสร้างฟิล์มโดยอัตโนมัติที่ผิวหน้าเหล็กกล้าไร้สนิมเมื่อสัมผัสบรรยากาศที่มีออกซิเจน	16
2.12 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของธาตุนิกเกิลและโครเมียมที่ผสมอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มต่างๆ	17
2.15 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ FCC หรือ Face-centered cubic (a) 1 ยูนิตเซลล์ของ BCC, (b) ภาพย่อของ 1 ยูนิตเซลล์ของ BCC และ (c) แสดงกลุ่มก้อนของอะตอม	18
2.16 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ BCC หรือ Body-centered cubic (a) 1 ยูนิตเซลล์ของ BCC, (b) ภาพย่อของ 1 ยูนิตเซลล์ของ BCC และ (c) แสดงกลุ่มก้อนของอะตอม	21
2.17 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ BCT หรือ Body-centered tetragonal 1 ยูนิตเซลล์ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาร์เทนซิติก	22
2.18 แสดงดอกไขควงและข้อต่อไขควงที่ทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 420	22
2.19 แสดงมีดพับที่ทำมาจากเหล็กกล้าไรสนิม AISI 410	22
2.20 แสดงความหยาบผิวและความเป็นคลื่น	25
2.21 รูปแบบพื้นผิวของชิ้นงานที่มีความซับซ้อน	26
2.22 ความหยาบผิวของพื้นผิว	26
2.23 ความเป็นคลื่น	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

2.24 แสดงการหาค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลขหรือ Ra 27

2.25 แสดงการหาความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสองหรือ Rq 27

2.26 แสดงการหาความหยาบผิวแบบสิบจุดหรือ Rz 28

2.27 แสดงการหาความหยาบผิวขนาดยอดสูงสุดหรือ Rp 28

2.28 แสดงการหาความหยาบผิวขนาดร่องลึกสุดหรือ Rv 29

2.29 แสดงการหาความหยาบผิวขนาดโดยรวมหรือ Ry 29

2.30 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย 30

2.31 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย (มีอันตรกิริยา) 31

2.32 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (ไม่มีอันตรกิริยา) 32

2.33 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (มีอันตรกิริยา) 32

2.34 การทดลองแบบทีละปัจจัย (One-factor-at-a-time Experiment) 33

2.35 ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ระหว่างการทดลองแบบแฟกทอเรียลต่อการทดลองแบบทีละปัจจัย 33

2.36 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 39

2.37 รูปเรขาคณิตของคอนแทรสต์ในการออกแบบ 2^3 40

2.38 การออกแบบ 2^2 ที่มีจุดศูนย์กลาง 44

2.39 พื้นผิวผลตอบแบบสามมิติ 46

2.40 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ 46

2.41 จุดหยุดนิ่งที่ถูกสร้างขึ้นจากพื้นผิวผลตอบกำลังสอง (a) ผลตอบมากที่สุด, (b)ผลตอบน้อยที่สุด, (c)จุดอานม้า 47

2.42 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนสำหรับสามตัวแปร 50

2.43 ฟังก์ชันความพึงพอใจเฉพาะสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในเวลาเดียวกัน (a) ค่าเป้าหมาย (Target) ที่ทำให้ค่า y มากที่สุด, (b) ค่าเป้าหมาย (Target) ที่ทำให้ค่า y น้อยที่สุด และ (c) ค่าเป้าหมาย (Target) ที่ทำให้ค่า y เข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่มากที่สุด 52

3.1 เครื่องตัดพลาสมา Hypertherm รุ่น Powermax 45 พร้อมหัวตัด T45m 54

3.2 แบบชิ้นงาน 54

3.3 เครื่องวัดความหยาบผิว TOKYO SEIMITSU รุ่น SURFCOM 480A 56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

3.4 เครื่องมือวัดขนาดของชิ้นงานแบบดิจิตอลของ Mitutoyo รุ่น ABSOLUTE DIGIMATIC 57

3.5 การวัดมุมเอียงของชิ้นงาน 57

4.1 ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของค่าความหยาบผิว 59

4.2 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปรที่ใช้ตัดที่มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด 60

4.3 ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของขนาดของชิ้นงาน 61

4.4 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปรที่ใช้ตัดที่มีผลต่อความถูกต้องของขนาดที่ได้ 62

4.5 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ใช้ตัดที่มีผลต่อของความถูกต้องของขนาดที่ได้ 62

4.6 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ใช้ตัดที่มีผลต่อของความถูกต้องของขนาดที่ได้ 63

4.7 ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของมุมเอียงของชิ้นงาน 64

4.8 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปรที่ใช้ตัดที่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน 65

4.9 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ใช้ตัดที่มีผลต่อของมุมเอียงของชิ้นงาน 65

4.10 ผลตอบของการศึกษาของปัจจัยระดับกลางของความความเรียบของพื้นผิวรอยตัด 66

4.11 ผลตอบของการศึกษาของปัจจัยระดับกลางของความถูกต้องของขนาดที่ได้ 67

4.12 ผลตอบของการศึกษาของปัจจัยระดับกลางของมุมเอียงของชิ้นงาน 67

4.13 ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของค่าความหยาบผิว 69

4.14 ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างหลังจากทำการตัดตัวแปรที่ไม่มีผลต่อ
ค่าความหยาบผิว 71

4.15 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ของระดับปัจจัยของค่าความหยาบผิว 72

4.16 พื้นผิวตอบสนอง (Surface plot) ของระดับปัจจัยของค่าความหยาบผิว 72

4.17 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ของระดับปัจจัยของค่าความหยาบผิว 73

4.18 พื้นผิวตอบสนอง (Surface plot) ของระดับปัจจัยของค่าความหยาบผิว 73

4.19 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ของระดับปัจจัยของค่าความหยาบผิว 74

4.20 พื้นผิวตอบสนอง (Surface plot) ของระดับปัจจัยของค่าความหยาบผิว 74

4.21 ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของขนาดของชิ้นงาน 75

4.22 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ของระดับปัจจัยของความถูกต้องของขนาดชิ้นงาน 76

4.23 พื้นผิวตอบสนอง (Surface plot) ของระดับปัจจัยของความถูกต้องของขนาดชิ้นงาน 77

4.24 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ของระดับปัจจัยของความถูกต้องของขนาดชิ้นงาน 77

4.25 พื้นผิวตอบสนอง (Surface plot) ของระดับปัจจัยของความถูกต้องของขนาดชิ้นงาน 78

4.26 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ของระดับปัจจัยของความถูกต้องของขนาดชิ้นงาน 78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.27 พื้นผิวตอบสนอง (Surface plot) ของระดับปัจจัยของความถูกต้องของขนาดชิ้นงาน 79

4.28 ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของมุมเอียงของชิ้นงาน 80

4.29 ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างหลังจากทำการตัดตัวแปรที่ไม่มีผลต่อ มุมเอียงของชิ้นงาน 81

4.30 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ของระดับปัจจัยของมุมเอียงของชิ้นงาน 82

4.31 พื้นผิวตอบสนอง (Surface plot) ของระดับปัจจัยของมุมเอียงของชิ้นงาน 83

4.32 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ของระดับปัจจัยของมุมเอียงของชิ้นงาน 83

4.33 พื้นผิวตอบสนอง (Surface plot) ของระดับปัจจัยมุมเอียงของชิ้นงาน 84

4.34 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ของระดับปัจจัยของมุมเอียงของชิ้นงาน 84

4.35 พื้นผิวตอบสนอง (Surface plot) ของระดับปัจจัยของมุมเอียงของชิ้นงาน 85

4.36 กราฟแสดงตัวแปรการตัดที่เหมาะสมที่สุด 87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การตัดโลหะด้วยความเร็วสูงเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในขั้นตอนแรกของการแปรรูปผลิตภัณฑ์ในวงการอุตสาหกรรม โดยการตัดด้วยพลาสมา (Plasma arc cutting) นั้นเข้ามามีบทบาทมากขึ้น เนื่องจากการตัดด้วยพลาสมาสามารถตัดได้เร็วกว่าการตัดโดยใช้เปลวไฟ (Oxy-fuel Cutting) และสามารถที่จะตัดโลหะที่มีขนาดหนากว่าได้ และยังมีราคาถูกกว่าแบบการตัดด้วยน้ำแรงดันสูง (Waterjet) และเลเซอร์ (Laser) [1] แต่อย่างไรก็ตาม หากมีสภาวะการตัดที่ไม่เหมาะสมของกระบวนการตัดด้วยพลาสมาอาจเกิดปัญหามุมเอียงของชิ้นงานที่รอยตัด เกิดครีบ รอยโลหะบนผิวหน้าชิ้นงาน ขอบของชิ้นงานมีลักษณะมนไม่เรียบตรง รอยตัดมีขนาดกว้างหรือแคบเกินไป ทำให้ขนาดของชิ้นงานมีขนาดเล็กหรือใหญ่เกินไป เกิดเส้นรอยตัดหรือ Dragline ทำให้ผิวรอยตัดขรุขระ ความหยาบผิวมาก ซึ่งข้อบกพร่องเหล่านี้สามารถส่งผลต่อคุณภาพและข้อกำหนดของชิ้นงานได้ [2-3] และวัสดุที่จะนำมาเลือกใช้ในการศึกษานี้คือ เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด AISI 316L เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดนี้มีความหลากหลายในการนำมาใช้งานเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ใช้เป็นถังผสมหรือชิ้นงานของเครื่องจักร เพราะทนต่อการกัดกร่อนและมีความแข็งแรง [4]

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L โดยใช้การออกแบบการทดลองเพื่อที่จะหาค่าตัวแปรการตัดที่เหมาะสมในการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมา โดยมีตัวแปรการตัด 3 ตัวแปร ได้แก่ ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current) ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height) และความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) เพื่อให้ผิวรอยตัดมีความหยาบน้อยที่สุด มีความถูกต้องของขนาดที่ได้ และมีมุมเอียงของชิ้นงานน้อยที่สุด

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาและหาค่าตัวแปรในการตัดที่ให้ค่าความหยาบผิวของพื้นผิวรอยตัดน้อยที่สุดในการตัดชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L โดยกระบวนการตัดด้วยพลาสมา

1.2.2 เพื่อศึกษาและหาค่าตัวแปรในการตัดที่ให้ขนาดของชิ้นงานที่ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากที่สุด ในการตัดชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L โดยกระบวนการตัดด้วยพลาสมา

1.2.3 เพื่อศึกษาและหาค่าตัวแปรในการตัดที่ให้มุมเอียงของชิ้นงานมีค่าน้อยที่สุด ในการตัดชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L โดยกระบวนการตัดด้วยพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลจากงานวิจัยต่างๆ สามารถตั้งสมมติฐานของการศึกษาได้ดังนี้

1. ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height) มีผลต่อค่าความหยาบผิวของพื้นผิวรอยตัด
2. ความเร็ว (Speed) และขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current) มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงานและความถูกต้องของขนาดที่ได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

สืบเนื่องมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L เป็นเหล็กกล้าที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางเพราะทนต่อการกัดกร่อนและมีความแข็งแรง จึงนำมาใช้เป็นถังผสมสารและชิ้นส่วนของเครื่องจักรต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตน้ำยาถูพื้นและอุตสาหกรรมนม หรือใช้เป็นชิ้นส่วนเครื่องจักร เช่น มีดตัดหรือ Die cut และอีกทั้งยังสามารถใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างด้วย เช่น ระบบท่อดับเพลิง ประตูหนีไฟ เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L มีความหลากหลายในการนำมาเลือกใช้งานเป็นอย่างมาก จึงนำมาเลือกใช้ในการศึกษาการตัดด้วยพลาสมา ซึ่งการตัดด้วยพลาสมาเข้ามามีบทบาทมากขึ้นในวงการอุตสาหกรรมเพราะเป็นกระบวนการตัดที่มีความเร็วสูง สามารถตัดชิ้นงานที่มีความหนาได้ โดยกระบวนการตัดด้วยพลาสมานั้นเกิดจากการแตกตัวของโมเลกุลของก๊าซที่อุณหภูมิสูงด้วยการชาร์จก๊าซด้วยไฟฟ้าแล้วฉีดออกมาด้วยความเร็วสูงเพื่อทำให้วัสดุเกิดการหลอมเป็นรอยตัด ซึ่งหากมีเงื่อนไขการตัดที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้ชิ้นงานกลายเป็นของเสียได้ เช่น ขนาดรอยตัดกว้างหรือแคบเกินไปทำให้ชิ้นงานมีขนาดไม่ได้ตามที่กำหนด มีมุมเอียงของรอยตัดมากกว่าที่ต้องการ เกิดครีบหรือเศษโลหะที่หลอมแล้วแข็งติดอยู่บนผิวหน้าชิ้นงาน หรือมีเส้นรอยตัดมากทำให้มีค่าความหยาบไม่ได้ตามที่ต้องการ ดังนั้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จึงได้นำทฤษฎีการออกแบบการทดลอง (Design and analysis of experiments) โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k และวิธีพื้นผิวผลตอบ (Response surface methodology: RSM) โดยการใช้ตัวแบบการทดลองของ Box-Behnken design มาใช้ในการวิเคราะห์และหาค่าที่เหมาะสมในการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมา

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 ใช้เครื่องตัดพลาสมา ผลิตโดย Hypertherm รุ่น Powermax 45 พร้อมหัวตัด T45m โดยทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมา มีค่าตัวแปรที่ใช้ในการตัดดังนี้

1. ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดคือ 40, 42.5 และ 45 แอมแปร์
2. ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานคือ 0.96, 1.45 และ 1.93 มิลลิเมตร
3. ความเร็วที่ใช้ในการตัดคือ 40, 45 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L หนา 3 มิลลิเมตร ผลิตโดย WALSIN LIHWA CORP. ประเทศไต้หวัน ทำการตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด (กว้างxยาว) 20x50 มิลลิเมตร

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1.6.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมา เช่น คู่มือการใช้เครื่องตัดพลาสมา รุ่น Powermax 45 ของ Hypertherm และเอกสารวิชาการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

1.6.2 ศึกษาวิธีการและขั้นตอนในการตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัดพลาสมาเพื่อใช้ในการออกแบบขั้นตอนการทดลองได้อย่างเหมาะสม

1.6.3 ออกแบบการทดลอง ทำการเตรียมชิ้นงานและอุปกรณ์ต่างๆ ตามที่ได้ทำการออกแบบไว้

1.6.4 ทำการทดลองตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ จากนั้นทำการวัดขนาดของชิ้นงาน มุมเอียงของชิ้นงาน และค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน แล้วทำการบันทึกค่า

1.6.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.6.6 สรุปผลการทดลอง พร้อมข้อเสนอแนะที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้เป็นข้อมูลและแนวทางการวิจัย โดยนำมาสรุปและนำเสนอเป็นลำดับดังนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ Salonitis และ Vatousianos ได้ศึกษาถึงปัจจัยของกระบวนการตัดที่มีผลต่อคุณภาพของการตัดเหล็กกล้าละมุน พบว่า ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานมีผลต่อมุมเอียงของผิวหน้าชิ้นงานและความเรียบของชิ้นงาน และขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดมีผลต่อบริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone) [5]

จากงานวิจัยของ Gullu และ Atici ได้ทำการศึกษาการตัดโลหะ AISI 304 and St 52 steels พบว่าความเร็วในการตัดและระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานมีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานในด้านความแข็ง (Hardness) [6]

จากงานวิจัยของ Bini ที่ทำการทดลองตัดเหล็กกล้าละมุนหนา 15 มิลลิเมตร พบว่าความเร็วที่ใช้ในการตัดและแรงเคลื่อนอาร์คมีผลต่อลักษณะผิวหน้าของชิ้นงาน เกิดผิวที่มีลักษณะเป็นคลื่น อีกทั้งยังส่งผลต่อความลาดเอียงของขอบที่ตัดอีกด้วย และอิทธิพลของระยะระหว่างหัวตัดกับชิ้นงานก็ส่งผลต่อรอยตัดอีกด้วย [7]

จากงานวิจัยของ Gariboldi ที่ทำการทดลองตัด ไทเทเนียมหนา 5 มิลลิเมตร พบว่า ถ้าทำการลดผลของอิทธิพลร่วมระหว่างลำแสงพลาสมากับการป้อนก๊าซออกซิเจนด้วยความเร็วสูงจะช่วยลดผลกระทบต่อชิ้นงานด้านรูปร่างเช่นความเป็นคลื่นบนผิวและขนาดของรอยตัดชิ้นงานให้มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้น [8]

จากงานวิจัยของ Barman และคณะ ได้ศึกษาการหาเงื่อนไขการตัดด้วยพลาสมาที่เหมาะสมของเหล็กเครื่องมือเกรด EN 31 ซึ่งมีอัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (material removal rate) และความหยาบผิวของชิ้นงาน (surface roughness) เป็นผลตอบสนอง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ (grey relational analysis) ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ ความดันก๊าซ, ขนาดของกระแสไฟฟ้า และระยะระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน พบว่า ความดันก๊าซมีผลต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงานและความหยาบผิวของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ โดยอัตราการตัดเนื้อชิ้นงานมีค่ามากขึ้นเมื่อความดันของก๊าซมากขึ้น และจะมีค่าต่ำสุดที่การใช้ขนาดกระแสไฟฟ้าระดับกลาง แต่การเพิ่มความสูงของระยะระหว่างหัวตัดกับชิ้นงานให้อัตราการตัดเนื้อชิ้นงานคงที่ และจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการตัดเนื้อชิ้นงานพบว่าค่าความหยาบผิวมีค่าลดลง โดยค่าความหยาบผิว (Ra) ลดลงเมื่อความดันก๊าซและความสูงของระยะระหว่างหัวตัดกับชิ้นงานที่ใช้เพิ่มมากขึ้น แต่ค่าความหยาบผิว (Ra) เพิ่มมากขึ้นเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

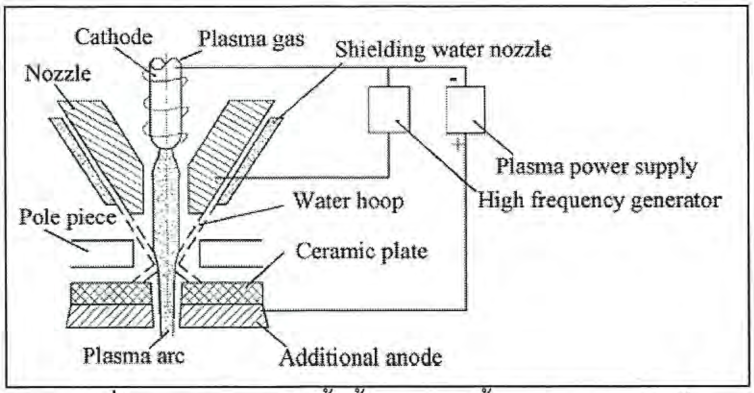
ขนาดของกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น การที่ใช้ความสูงของระยะระหว่างหัวตัดกับชิ้นงานที่ค่าต่ำจะมีผลทำให้เกิดการหลอมตรงบริเวณการตัดมากเกินไปและเกิดการแข็งตัวอีกรอบตรงบริเวณรอยตัด ซึ่งการแข็งตัวของส่วนหลอมหรือส่วนรอยตัดนี้จะเกิดเป็นริ้วลายขนานกันส่งผลให้ค่าความหยาบผิวมีค่าเพิ่มขึ้น [9]

จากงานวิจัยของ Chamarthi และคณะได้ศึกษาการหาเงื่อนไขการตัดวัสดุชนิด Hardox-400 ด้วยพลาสมาซึ่งมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือความเร็วในการตัด, อัตราการไหลของพลาสมา และแรงดันไฟฟ้า โดยมีผลตอบสนองคือความขรุขระของพื้นผิว (Unevenness surface) พบว่าความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของแผ่นชิ้นงาน และความเร็วในการตัดที่เหมาะสมจะไปลดการเกิดเศษของชิ้นงานที่หลอมบนผิวหน้าชิ้นงาน ดังนั้นความขรุขระของผิวสามารถลดลงได้โดยลดความเร็วในการตัดลง แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองพบว่า คุณภาพการตัดที่ดีต้องมาจากเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมจากทั้งสามตัวแปร และจากผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนพบว่าแรงดันไฟฟ้าเป็นตัวแปรหลักและมีผลกระทบต่อคุณภาพการตัดทุก ๆ ด้าน แต่ความเร็วในการตัดแสดงถึงผลกระทบที่สามารถสังเกตเห็นได้ชัด [10]

จากงานวิจัยของ Singh ได้ศึกษาการหาเงื่อนไขการตัดเหล็กกล้าไร้สนิท AISI 316L ด้วยพลาสมา โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ ความดันก๊าซ, อัตราการไหลของขนาดกระแสไฟฟ้า, ความเร็วในการตัด และระยะระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน โดยมีผลตอบทางการศึกษาคืออัตราการตัดเนื้อและความหยาบผิวของชิ้นงาน พบว่า ความเร็วในการตัดมีผลต่ออัตราการตัดเนื้อชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญและความดันก๊าซ, อัตราการไหลของขนาดกระแสไฟฟ้า, ความเร็วในการตัดมีผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยอัตราการตัดเนื้อชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของขนาดกระแสไฟฟ้า, ความเร็วในการตัด และระยะระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน และอัตราการตัดเนื้อชิ้นงานจะลดลงเมื่อเพิ่มความดันก๊าซขึ้น ส่วนความหยาบผิวจะมากขึ้นเมื่อความดันก๊าซและอัตราการไหลของขนาดกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ความหยาบผิวจะมีค่าน้อยลงเมื่อความเร็วในการตัดและระยะระหว่างหัวตัดกับชิ้นงานมีค่ามากขึ้น [11]

จากงานวิจัยของ Xu และคณะ ได้ศึกษาการตัดเซรามิกด้วยพลาสมาโดยการปรับปรุงหัวตัดด้วยการติดตั้งน้ำและสนามแม่เหล็กดังในภาพที่ 2.1 เพื่อลดความกว้างของรอยตัดและปรับปรุงคุณภาพของรอยตัด ซึ่งจะเรียกเครื่องพลาสมานี้ว่า เครื่องพลาสมาแบบใช้น้ำพลังงานแม่เหล็ก (Hydro-magnetic confined plasma arc) ซึ่งวิธีนี้ช่วยให้คุณภาพการตัดดีมากขึ้น รอยตัดแคบลงเกิดมุมเอียงของรอบตัดเล็กน้อยและสามารถเพิ่มความเร็วในการตัดให้สูงขึ้นได้ โดยผลพลอยได้ที่ได้จากการปรับปรุงหัวตัดสำหรับตัดเซรามิกคือแสงพลาสมามีความสม่ำเสมอ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



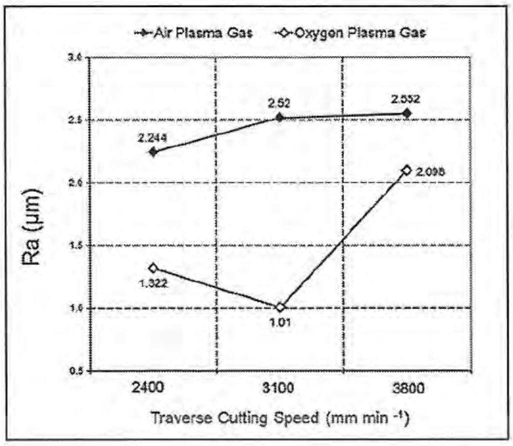
ภาพที่ 2.1 แสดงการติดตั้งพื้นฐานของน้ำและสนามแม่เหล็ก

จากงานวิจัยของ Simkulet และคณะได้ศึกษาค่าความแข็งของเหล็กเกรด EN S233J2G3 ตรงส่วนบริเวณผลกระทบร้อนของชิ้นงานหลังจากตัดด้วยพลาสมา พบว่า ความแข็งมีค่าลดลงโดยส่วนแรกที่โดนตัดจะเรียกว่า Leading cutting area จะมีค่าความแข็งมากที่สุด ส่วนกลางที่โดนตัดหรือ middle cutting area ก็จะมีค่าความแข็งลดลงมา และสุดท้ายส่วนสุดท้ายที่โดนตัดคือ ending cutting area มีค่าความแข็งที่มากที่สุดเพราะมีการสะสมความร้อนในการตัดน้อยที่สุด เนื่องจากแสงของพลาสมาจะกระทบกับบริเวณส่วนแรกและส่วนกลางมากที่สุด [13]

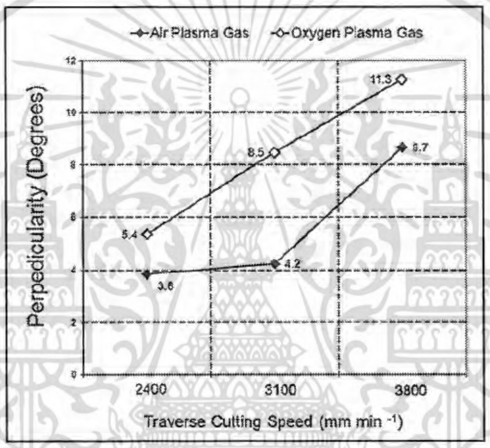
จากงานวิจัยของ Skoczylas และ Zaleski ได้ศึกษาผลกระทบของเหล็ก C45 จากการตัดด้วยพลาสมา พบว่า ความเร็วในการตัดและขนาดกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทำให้พื้นผิวมีค่าความหยาบมากขึ้น เกิดการสึกหรอได้เร็วขึ้น แต่ความดันก๊าซที่มากขึ้นจะช่วยให้คุณภาพของพื้นผิวดีขึ้น มีค่าความหยาบผิวน้อยลง [14]

จากงานวิจัยของ Thomas ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความเร็วในการตัดและชนิดของพลาสมาก๊าซที่มีต่อเหล็กเกรด S355 พบว่า ลักษณะพื้นผิวของรอยตัดที่ตัดด้วยพลาสมาชนิดใช้อากาศจะเกิดเส้นรอยตัดอย่างเด่นชัด และมีมากขึ้นเมื่อความเร็วที่ใช้ในการตัดมีมากขึ้น ซึ่งการตัดที่ใช้พลาสมาก๊าซออกซิเจนจะเกิดเส้นรอยตัดที่มีความละเอียดมากกว่า แต่ว่าเกิดเศษโลหะหรือ dross ที่ทั้งบนและล่างของขอบรอยตัด โดยเศษโลหะที่เกิดขึ้นมีมากกว่าเศษโลหะที่เกิดขึ้นจากความเร็วที่ใช้ในการตัดที่ต่ำ ความเร็วที่ใช้ในการตัดที่มากจะทำให้มุมเอียงของชิ้นงานและความหยาบผิวมีมากขึ้น ซึ่งจากภาพที่ 2.2 และ 2.3 พบว่าการตัดด้วยพลาสมาก๊าซออกซิเจนให้มุมเอียงของชิ้นงานมากกว่า แต่ให้ความหยาบผิวน้อยกว่าการตัดด้วยพลาสมาชนิดใช้อากาศเป็นพลาสมาก๊าซ ซึ่งแสดงว่าการตัดด้วยพลาสมาก๊าซออกซิเจนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างเหล็กกับออกซิเจน จนเกิดความกว้างของบริเวณผลกระทบร้อน ซึ่งขอบบนจะกว้างกว่าขอบล่าง โดยเป็นการสนับสนุนข้อสรุปที่ว่าความเร็วในการตัดที่มากขึ้นจะส่งผลให้มุมเอียงและความหยาบของชิ้นงานมากขึ้น [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.2 ค่าความหยาบผิวเทียบกับความเร็วที่ใช้ในการตัด



ภาพที่ 2.3 มุมเอียงของชิ้นงานเทียบกับความเร็วที่ใช้ในการตัด

จากงานวิจัยของ Seong-Il Kim และ Min-Ho Kim ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดกระแสไฟฟ้าและความเร็วที่ใช้ในการตัดด้วยพลาสมาที่มีผลต่อเหล็กกล้าละมุนหนา 30 มิลลิเมตร พบว่า การเพิ่มขนาดกระแสไฟฟ้าทำให้การตัดมีมุมเอียงน้อยลงแต่มีความกว้างของพื้นที่กระทบร้อนมากขึ้น ส่วนการเพิ่มความเร็วที่ใช้ในการตัดทำให้มีความหยาบผิวและมุมเอียงเพิ่มมากขึ้น [16]

จากการวิจัยของ Wang และคณะ ได้ทำการศึกษาการตัดเหล็กกล้าละมุนหนา 6 มิลลิเมตร ด้วยพลาสมา พบว่า ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ลดลงและความเร็วที่ใช้เพิ่มขึ้น ความกว้างของรอยตัดจะลดลง มุมเอียงของชิ้นงานมีค่ามากขึ้น และการลดปริมาณของก๊าซออกซิเจนที่ใช้ในการตัดลง ความกว้างของรอยตัดและเศษโลหะจะลดลง ในขณะที่มุมเอียงของชิ้นงานมีค่ามากขึ้น [17]

จากงานวิจัยของ Iosub และคณะ ได้ศึกษาการตัดวัสดุผสมหรือ Composite material ด้วยพลาสมา ซึ่งวัสดุผสมนี้ประกอบด้วยอะลูมิเนียมประกบกับวัสดุแกนกลางชนิดพอลิเอทิลีน ปัญหาสำคัญของการศึกษานี้คือวัสดุแกนกลางชนิดพอลิเอทิลีน มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำมาก ทำให้วัสดุนี้หลอมออกมาที่ขอบรอยตัด ความเร็วที่ใช้ในการตัดที่มากขึ้นจะช่วยให้ใช้เวลากับชิ้นงานน้อยลง และทำให้วัสดุแกนกลางชนิดพอลิเอทิลีนนี้ได้รับผลกระทบจากความร้อนน้อยลง อย่างไรก็ตามการศึกษาการตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุผสมชนิดนี้สามารถตัดอะลูมิเนียมได้ดี แต่คุณภาพการตัดวัสดุแกนกลางชนิดพอลิเอทิลีนนั้นค่อนข้างไม่ดี ซึ่งจะต้องพัฒนาคุณภาพการตัดโดยใช้เครื่องตัดพลาสมาที่มีประสิทธิภาพและความเร็วสูง [18]

จากงานวิจัยของ Adalarasan และคณะ ได้ทำการศึกษาการตัดเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L เพื่อหาค่าการตัดที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบแบบ เกรย์ ทากูชิหรือGrey Taguchi-based response surface methodology (GT-RSM) พบว่า วิธี GT-RSM มีประสิทธิภาพในการทำนายค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการตัดเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L โดยค่าทดสอบที่ออกมานั้นมีค่าที่สมเหตุสมผลกับค่าที่ทำนายออกมาของค่า R-square ของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ ซึ่งให้ค่าที่เหมาะสมมากกว่า และผู้วิจัยพบว่าขนาดกระแสไฟฟ้าที่สูงจะทำให้ค่าความหยาบผิวและความกว้างของรอยตัดมีค่ามากขึ้น และเช่นเดียวกันระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานที่มากขึ้นทำให้ค่าความหยาบผิวมากขึ้น [19]

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

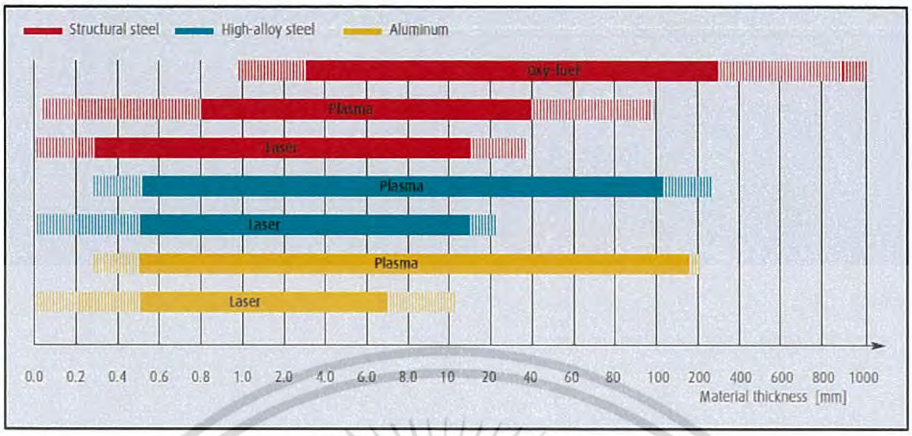
2.2.1 การตัดด้วยพลาสมา (Plasma arc cutting)

การตัดโลหะเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในวงการอุตสาหกรรม ไม่เฉพาะแต่งานอุตสาหกรรมหนักเท่านั้น งานอุตสาหกรรมขนาดย่อม หรืองานภายในครอบครัวก็มีความจำเป็นมากเช่นกัน การตัดโลหะที่มีประสิทธิภาพยังช่วยให้งานอื่นๆ เช่น การออกแบบ ทั้งที่เป็นชิ้นส่วนของเครื่องจักร เครื่องมือและโครงสร้างรูปแบบต่างๆ มีอิสระในการออกแบบมากยิ่งขึ้น นอกจากนั้นยังช่วยให้งานซ่อมแซม ดัดแปลงสำเร็จได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็วยิ่งขึ้น ปัจจุบันการตัดโลหะด้วยตัดพลาสมาเป็นที่นิยมมากขึ้นเนื่องจากมีความสะดวกรวดเร็วและเครื่องตัดพลาสมาสามารถตัดโลหะได้หลากหลายชนิด ทั้งอะลูมิเนียม คาร์บอน สเตนเลส ทองแดง ทองเหลือง บรอนซ์ นิกเกิล อัล-ลอย เซอร์โครเมียม เป็นต้น ซึ่งขบวนการตัดจะแตกต่างกันไปบ้าง ขึ้นอยู่กับความหนาของโลหะและการเลือกใช้ขนาดของหัวตัดให้เหมาะสมกับชิ้นงาน ทั้งนี้ก๊าซ (หรือลม) ตัวกลางที่นำมาเป็นส่วนของก๊าซพลาสมาก็ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับเนื้องานที่นำมาใช้ด้วย เพื่อให้การตัดชิ้นงานมีประสิทธิภาพและมีความเรียบร้อย อย่างไรก็ตามคุณภาพของชิ้นงานที่ตัดก็ขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ใช้เป็นส่วนสำคัญ โดยการตัดพลาสมานั้นใช้เวลาในการตัดได้เร็วกว่าแบบ Oxy-fuel Cutting และสามารถที่จะตัดโลหะที่มีขนาดหนากว่าได้ และยังมีราคาถูกกว่าแบบ Waterjet และเลเซอร์ [1-2],[20]

การตัดด้วยพลาสมาได้พัฒนาขึ้นมาในปี 1950 สำหรับการตัดเหล็กกล้าประสมสูงหรือ High-alloy steels และอะลูมิเนียม ซึ่งการตัดด้วยพลาสมานี้ได้ถูกออกแบบมาเพื่อตัดโลหะทั้งหลายเนื่องจากส่วนประกอบทางเคมีของโลหะบางตัวไม่สามารถใช้การตัดด้วยก๊าซหรือ Oxy-fuel cutting ได้ โดยการตัดด้วยพลาสมาสามารถใช้ตัดวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ เช่น เหล็กโครงสร้างรูปพรรณ เหล็กกล้าประสมสูง กลุ่มโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก เช่น อะลูมิเนียม, คอปเปอร์ และแผ่นหุ้มโลหะ (Clad metal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

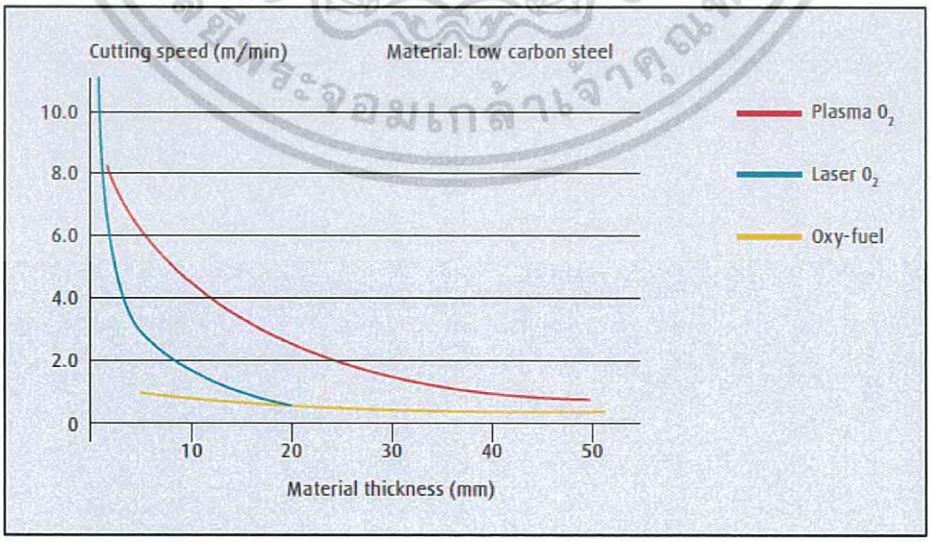
plates) เป็นต้น ซึ่งสามารถตัดวัสดุได้ที่ความหนา 0.5 มิลลิเมตร ถึง 180 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การเปรียบเทียบกระบวนการตัดด้วยความร้อนเทียบกับความหนาและชนิดของโลหะ

การตัดด้วยพลาสมาเป็นกระบวนการที่เด่นในเรื่องของการตัดเหล็กกล้าประสมสูงและอะลูมิเนียมที่มีความหนาปานกลางไปจนถึงหนามาก และยังสามารถตัดเหล็กโครงสร้างรูปพรรณทั่วไปที่มีความหนาได้ถึง 40 มิลลิเมตรโดยมีการเสียรูปเพียงเล็กน้อย อีกทั้งการตัดด้วยพลาสมายังเหมาะสำหรับการตัดเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีความละเอียดของผลึกและความแข็งแรงสูง (High-strength fine-grained structural steel) ได้ดีอีกด้วย

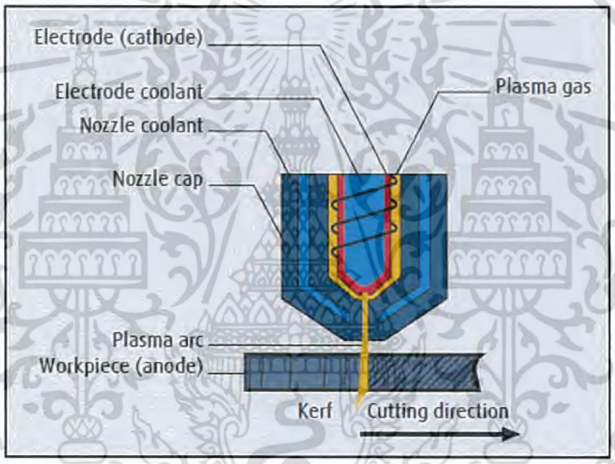
และการตัดโลหะด้วยความเร็วสูงเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในขั้นตอนแรกของการแปรรูปผลิตภัณฑ์ในวงการอุตสาหกรรม เมื่อเปรียบเทียบกับการตัดด้วยก๊าซหรือ Oxy-fuel cutting การตัดด้วยพลาสมาจะมีความเร็วมากกว่า 5 ถึง 6 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเร็วในการตัดสูงสุดของการตัดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

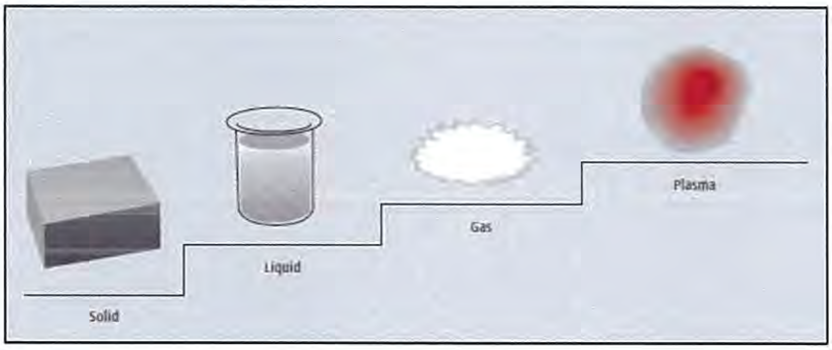
หลักการทำงานของหัวตัดพลาสมาจะเริ่มจากการอัดอากาศ (78% N2 , 21% O_2 and 1% other) หรือก๊าซอื่นๆ เช่น อาร์กอนหรือไนโตรเจนหรือก๊าซผสมสำหรับเป็นพลาสมาก๊าซก็ได้ เข้าไปในระหว่างการอาร์ค อากาศหรือก๊าซถูกบีบให้ผ่านช่องรูเล็กๆ ทางด้านข้าง ทำให้อากาศหรือก๊าซเคลื่อนที่หมุนผ่านเป็นเกลียวไปยัง Electrode ในขณะที่หัว Electrode มีไฟฟ้ากระแสตรงหลักรออยู่ และเมื่อได้รับการกระตุ้นการเริ่มอาร์คไฟฟ้าจากชุดแรงดันสูงความถี่สูง ก็จะทำให้อากาศหรือก๊าซรอบๆ หัว Electrode เกิดการแตกตัวของโมเลกุลของก๊าซที่อุณหภูมิสูงพร้อมกับการอาร์คหลักจะเริ่มทำงานและเกิดเป็นอาร์คพลาสมาขึ้นมา หลังจากนั้นอาร์คพลาสมาดังกล่าวจะวิ่งผ่านรูเล็กๆ ที่อยู่ตรงกลางของหัว Nozzle Tip ซึ่งทำหน้าที่บีบอัดอาร์คพลาสมาที่เกิดขึ้นให้เกิดบังคับผ่านช่องแคบของหัวตัดหรือ Nozzle ด้วยความเร็วและความร้อนสูงมีอุณหภูมิประมาณ 30,000 องศาเซลเซียส เป็นลำอาร์คพลาสมาที่สมบูรณ์แล้ววิ่งออกไปสู่ชิ้นงาน (Anode) ต่อไปเพื่อทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอมเป็นรอยตัด (Kerf) ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 แสดงหลักการงานทำงานของการตัดด้วยพลาสมา

โดยพลาสมาคือก๊าซที่มีสภาพการนำไฟฟ้า มีอุณหภูมิที่สูง ประกอบไปด้วยอนุภาคประจุบวกและประจุลบรวมถึงอะตอมและโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นและเป็นกลาง ในสัดส่วนที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ การอยู่รวมกันของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบประหนึ่งเป็นกลาง ในทางฟิสิกส์พลาสมานั้นคือสถานะที่ 4 ของสสารหลังจากของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ดังแสดงในภาพที่ 2.7 เกิดได้โดยการให้สนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่ก๊าซที่เป็นกลาง เมื่อพลังงานส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอิสระมากพอ จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอม และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม กระบวนการนี้เรียกว่า **กระบวนการแตกตัวเป็นไอออน** (ionization) ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้เพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมากซึ่งจะทำให้ก๊าซแตกตัวและกลายเป็นพลาสมาในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.7 แสดงสถานะของสสารโดยพลาสมาอยู่ในสถานะที่ 4

ในกระบวนการตัดด้วยพลาสมา ระบบก๊าซเป็นระบบที่สำคัญอย่างหนึ่ง เพราะการตัดด้วยพลาสมานั้นเกิดจากการแตกตัวของโมเลกุลของก๊าซที่อุณหภูมิสูงด้วยการชาร์จก๊าซด้วยไฟฟ้าแล้วฉีดออกมาด้วยความเร็วสูงเพื่อทำให้วัสดุเกิดการหลอมเป็นรอยตัด ดังนั้นการเลือกใช้ก๊าซนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและความหนาของวัสดุเพื่อให้ได้คุณภาพการตัดที่ดี มีความสามารถในการผลิตที่ดี รวมไปถึงต้นทุนราคาที่สมดุลกัน โดยซึ่งชนิดของก๊าซที่ใช้ในการตัดด้วยพลาสมาสำหรับเหล็กกล้าละมุน เหล็กกล้าไร้สนิม และอะลูมิเนียม มีดังต่อไปนี้

(1) อากาศ เป็นพลาสมาก๊าซที่มีประโยชน์หลากหลายมากที่สุด เพราะให้คุณภาพการตัดที่ดี เกิดเศษโลหะน้อย ให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ยาวนาน และมีความเร็วสูงในการตัดเหล็กกล้าละมุน เหล็กกล้าไร้สนิม และอะลูมิเนียม อีกทั้งมีต้นทุนที่ต่ำเพราะไม่จำเป็นต้องซื้ออากาศมาใช้ อย่างไรก็ตาม อากาศที่ใช้ต้องสะอาดและไม่มีการปนเปื้อนของเศษฝุ่น น้ำมัน ความชื้น ดังนั้นจึงต้องมีระบบกรองอากาศเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน อย่างไรก็ตามการตัดพลาสมาด้วยระบบอากาศจะทำให้ผิวของรอยตัดเกิดโลหะไนไตรด์ (Nitriding) และเกิดออกซิเดชัน ซึ่งจะทำให้รอยเชื่อมเกิดรูพรุนได้ อย่างไรก็ตามปัญหานี้สามารถแก้ได้โดยใช้ลวดเชื่อมที่มีคุณภาพดีที่มีสารป้องกันการเกิดโลหะไนไตรด์และออกซิเดชัน (Denitrider และ deoxidizer) สำหรับก๊าซปกคลุมหรือ Shield gas ตัวเลือกที่ดีที่สุดคือใช้อากาศเป็นก๊าซปกคลุมเช่นกัน

(2) ออกซิเจน เป็นก๊าซที่ใช้ตัดเหล็กกล้าละมุนในวงการอุตสาหกรรมเพราะว่าให้คุณภาพการตัดที่ดีและตัดได้เร็ว ซึ่งการตัดเหล็กกล้าไร้สนิมและอะลูมิเนียมด้วยพลาสมาก๊าซออกซิเจนนั้นไม่แนะนำให้ใช้ เพราะพลาสมาก๊าซออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับเหล็กคาร์บอนทำให้เกิดละอองเล็กๆ ของโลหะที่หลอม แต่มีความตึงผิวที่ต่ำทำให้หลุดออกจากรอยตัดได้ง่าย ข้อเสียของพลาสมาก๊าซออกซิเจนคือ มีราคาต้นทุน อีกทั้งทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง อย่างไรก็ตาม กระบวนการอาร์คถ้าใช้ก๊าซตั้งต้นคือก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน ร่วมกับก๊าซออกซิเจนจะทำให้ยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์มากขึ้น ถึงแม้ว่าจะต้องมีต้นทุนในเรื่องของก๊าซทั้งสองชนิด แต่ว่าจะช่วยลดต้นทุนของขั้นตอนถัดไปคือการเอาเศษโลหะออกหรือการทำให้ชิ้นงานที่เอียงกลับมาตรง สำหรับก๊าซปกคลุมที่เหมาะสำหรับพลาสมาก๊าซออกซิเจนคือ อากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) ไนโตรเจน เป็นก๊าซที่ใช้มากที่สุดสำหรับตัดอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความหนาน้อยกว่า 0.5 นิ้วหรือ 12.7 มิลลิเมตร ซึ่งให้คุณภาพการตัดที่ดี ให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ดีมาก ปกติอากาศจะใช้เป็นก๊าซปกคลุมที่ดีที่สุด แต่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะช่วยปรับปรุงผิวสำเร็จ ความเร็วในการตัด และให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ที่ยาวและดีกว่าอากาศ แต่มีราคาที่แพงกว่าอากาศ อีกทั้งต้องติดตั้งราวบรรจุท่อก๊าซหรือมีระบบก๊าซที่สามารถส่งก๊าซได้อย่างเพียงพอ อีกระบบหนึ่งที่นิยมใช้คู่กับพลาสมาก๊าซไนโตรเจนคือน้ำ น้ำทำให้ผิวรอยตัดเรียบและเงา โดยต้องติดตั้งระบบโต๊ะน้ำขึ้นมา

(3) อาร์กอน-ไฮโดรเจน ใช้สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมและอะลูมิเนียมที่มีความหนามากกว่า 0.5 นิ้วหรือ 12.7 มิลลิเมตร โดยจะมีส่วนผสมอาร์กอน 65% และไฮโดรเจน 35% ซึ่งก๊าซผสมนี้จะให้พลาสมาก๊าซที่ร้อนที่สุดและให้กำลังการตัดที่มากที่สุด โดยตัดเหล็กกล้าไร้สนิมได้ได้เรียบตรง และให้ผิวเกือบเงา อาจเกิดเศษโลหะที่ขอบล่างของรอยตัด สำหรับก๊าซปกคลุมที่ใช้คือ ก๊าซไนโตรเจน ซึ่งข้อเสียของกระบวนการนี้คือมีราคาที่แพง

ตารางที่ 2.1 ตารางแนะนำการเลือกใช้ก๊าซ

พลาสมาก๊าซ/ก๊าซปกคลุม	เหล็กกล้าละมุน	เหล็กกล้าไร้สนิม	อะลูมิเนียม
อากาศ/อากาศ	มีคุณภาพการตัดดีและเร็ว ประหยัด	มีคุณภาพการตัดดีและเร็ว ประหยัด	มีคุณภาพการตัดดีและเร็ว ประหยัด
ออกซิเจน/อากาศ	มีคุณภาพการตัดดีมาก และเร็วมาก มีเศษโลหะน้อย	ไม่แนะนำให้ใช้	ไม่แนะนำให้ใช้
ไนโตรเจน/คาร์บอนไดออกไซด์	คุณภาพการตัดค่อนข้างดี มีเศษโลหะ อายุของอุปกรณ์ยาวนานดีมาก	มีคุณภาพการตัดดี อายุของอุปกรณ์ยาวนานดีมาก	มีคุณภาพการตัดดีมาก อายุของอุปกรณ์ยาวนานดีมาก
ไนโตรเจน/อากาศ	คุณภาพการตัดค่อนข้างดี มีเศษโลหะ อายุของอุปกรณ์ยาวนานดีมาก	มีคุณภาพการตัดดี อายุของอุปกรณ์ยาวนานดีมาก	มีคุณภาพการตัดดี อายุของอุปกรณ์ยาวนานดีมาก
ไนโตรเจน/น้ำ	คุณภาพการตัดค่อนข้างดี มีเศษโลหะ อายุของอุปกรณ์ยาวนานดีมาก	มีคุณภาพการตัดดีมาก อายุของอุปกรณ์ยาวนานดีมาก	มีคุณภาพการตัดดีมาก อายุของอุปกรณ์ยาวนานดีมาก
อาร์กอน-ไฮโดรเจน/ไนโตรเจน	ไม่แนะนำให้ใช้	มีคุณภาพการตัดดีมาก สำหรับวัสดุหนามากกว่า 0.5 นิ้วหรือ 12.7 มม.	มีคุณภาพการตัดดีมาก สำหรับวัสดุที่หนามากกว่า 0.5 นิ้วหรือ 12.7 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.1 หลักการเลือกก๊าซที่ดีต้องขึ้นอยู่กับหลักเกณฑ์สามอย่างคือ คุณภาพการตัด ผลิตภาพ และความประหยัด ดังนั้นสามารถเลือกพลาสมาก๊าซได้ดังต่อไปนี้

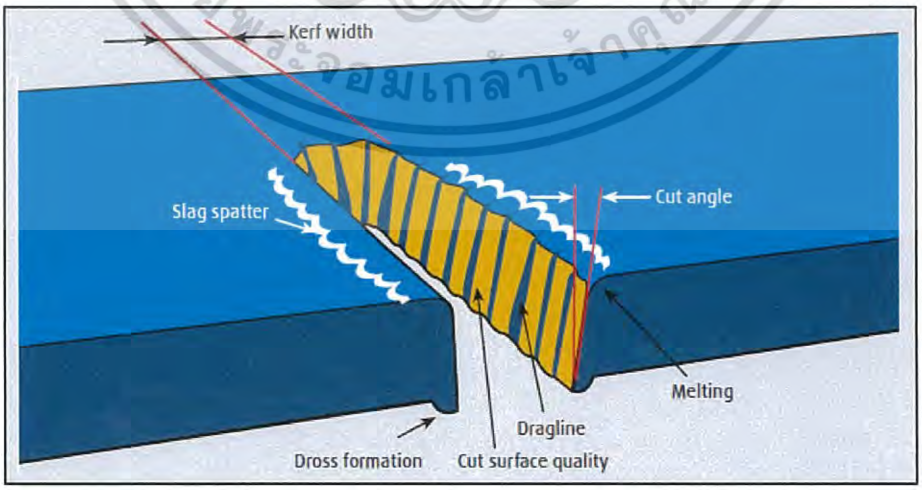
สำหรับการตัดเหล็กกล้าละมุน ควรใช้พลาสมาก๊าซออกซิเจนโดยมีก๊าซปกคลุมคืออากาศจะให้คุณภาพการตัดที่ดีที่สุด เกิดเศษโลหะน้อย การทำงานซ้ำต่ำ ความสามารถในการเชื่อมดีมาก ความเร็วสูงในการตัด และผลิตภาพสูง

สำหรับการตัดเหล็กกล้าไร้สนิมและอะลูมิเนียมที่มีความหนาน้อยกว่า 0.5 นิ้วหรือ 12.7 มิลลิเมตร ควรใช้พลาสมาก๊าซไนโตรเจนและอากาศเป็นก๊าซปกคลุมเพื่อให้ได้คุณภาพการตัดที่ดีที่สุด หรือใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซปกคลุมเพื่อให้ได้คุณภาพการตัดและความเร็วที่ดีมากขึ้นเล็กน้อย หรือใช้น้ำเป็นน้ำปกคลุมก็จะให้คุณภาพการตัดที่ดีมาก มีขอบที่เรียบ

สำหรับการตัดเหล็กกล้าไร้สนิมและอะลูมิเนียมที่มีความหนามากกว่า 0.5 นิ้วหรือ 12.7 มิลลิเมตร ควรใช้พลาสมาก๊าซอาร์กอน-ไฮโดรเจนและไนเตรเจนเป็นก๊าซปกคลุม แต่ระบบนี้ต้องมีระบบรักษาความปลอดภัยเนื่องจากการใช้ก๊าซอาร์กอน-ไฮโดรเจน

สำหรับวิธีที่ประหยัดต้นทุนที่สุดคือการใช้อากาศเป็นพลาสมาก๊าซสำหรับการตัดเหล็กกล้าละมุน เหล็กกล้าไร้สนิม และอะลูมิเนียม

ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัดด้วยพลาสมาหากมีสภาวะเงื่อนไขในการตัดที่ไม่เหมาะสม อาจมีปัญหามุมเอียงของชิ้นงานที่รอยตัด เกิดครีบ รอยโลหะบนผิวหน้าชิ้นงาน ขอบของชิ้นงานมีลักษณะมนไม่เรียบตรง รอยตัดมีขนาดกว้างหรือแคบเกินไปทำให้ขนาดของชิ้นงานมีขนาดเล็กหรือใหญ่เกินไป เกิดเส้นรอยตัดหรือ dragline ทำให้ผิวรอยตัดขรุขระ ความหยาบผิวมาก โดยลักษณะของรอยตัดด้วยพลาสมาของชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 2.8 ซึ่งปัญหาทางด้านคุณภาพการตัดนั้นเกิดได้ทั้งจากเครื่องจักรเอง อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่ได้รับการซ่อมบำรุงที่ดีหรือกระบวนการพลาสมาของมันเองก็ได้



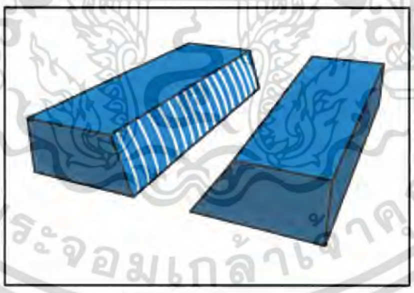
ภาพที่ 2.8 รอยตัดด้วยพลาสมาของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 2.8 สามารถอธิบายลักษณะของปัญหาทางด้านคุณภาพการตัดได้ดังนี้

(1) Kerf width หรือความกว้างของรอยตัดโดยมีข้อกำหนดสำหรับการตัดด้วยพลาสมาว่าจะต้องมีความกว้างไม่เกิน 0.5 ถึง 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวตัด ซึ่งความกว้างของรอยตัดนั้นได้รับอิทธิพลมาจากความเร็วในการตัด ถ้าความเร็วในการตัดน้อย ความกว้างของรอยตัดก็จะกว้างมากขึ้น ซึ่งปัญหาของรอยตัดที่กว้างหรือแคบเกินไป ไม่เพียงแต่ได้รับอิทธิพลจากความเร็วในการตัดเท่านั้น ยังได้รับอิทธิพลจากหลายๆ ปัจจัย เช่น หัวตัดที่ชำรุด ระยะระหว่างชิ้นงานและหัวตัด ขนาดกระแสไฟฟ้า อัตราการไหลของก๊าซ หรือปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดลำอาร์คของพลาสมา ซึ่งการที่รอยตัดกว้างเกินไปทำให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดเล็กกว่าที่ต้องการ และเช่นเดียวกันหากรอยตัดแคบเกินไป จะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่กว่าที่ต้องการ

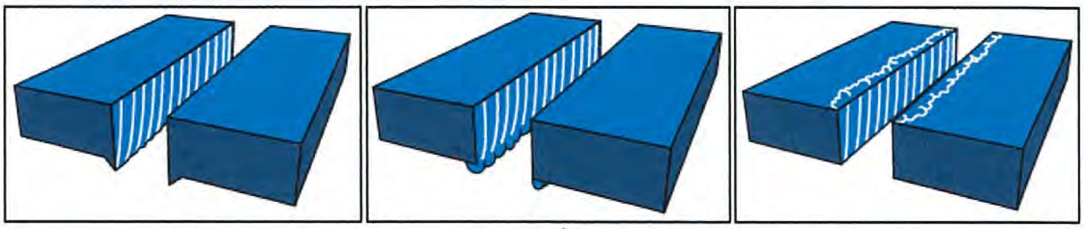
(2) Cut angle หรือมุมการตัด โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของการตัดจะมีมุมเอียงเล็กน้อยเนื่องจากอุณหภูมิของลำพลาสมาที่แผ่ออกมาตามลักษณะของเปลวไฟ ดังนั้นพลังงานการตัดที่มากที่สุดจะเกิดบนสุดของรอยตัดมากกว่าด้านล่างซึ่งถ้าใช้พลังงานการอาร์คน้อยก็จะส่งผลให้มุมเอียงมีค่าน้อยเช่นกัน อีกทั้งระยะระหว่างหัวตัดกับชิ้นงานและความเร็วในการตัดก็มีผลมุมเอียงของชิ้นงานอีกด้วย ค่ามุมเอียงของชิ้นงานของเครื่องตัดพลาสมาที่เป็นรุ่นธรรมดาหรือ conventional plasma cutting ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีค่ามุมเอียงของชิ้นงานหรือ Taper คือ 1 – 3 degrees โดยยังเป็นคุณลักษณะของชิ้นงานที่อยู่ในเกณฑ์ดี แต่ถ้ามีค่ามุมเอียงของชิ้นงานที่ 3 - 8 degree แสดงว่าคุณลักษณะของชิ้นงานนั้นอยู่ในเกณฑ์ไม่ดี ภาพที่ 2.9 แสดงตัวอย่างชิ้นงานที่มีมุมเอียงของรอยตัดที่มากเกินไป



ภาพที่ 2.9 ชิ้นงานที่มีมุมเอียงของรอยตัดที่มากเกินไป

(3) Dross formation หรือเศษของโลหะ ซึ่งจะเกิดขึ้น 2 ลักษณะคือเกิดเป็นครีบ (Burr) ที่ข้างล่างผิวของรอบตัด และเกิดเป็นขี้เชื่อมกระจายอยู่บนพื้นผิวรอยตัด โดยครีบเกิดจากการแข็งตัวอีกรอบของส่วนที่หลอมและเกิดจากออกไซด์ของโลหะ ซึ่งอาจเกิดได้จากหลายตัวแปร เช่น ความเร็วในการตัด ระยะระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน ขนาดของกระแสฟ้า แรงดันไฟฟ้า ชนิดของก๊าซพลาสมา และเทคโนโลยีของเครื่องตัด อีกทั้งยังเกิดจากด้วยตัวของวัสดุเอง เช่น ความหนา ลักษณะของพื้นผิว และความร้อนสะสมในวัสดุ ภาพที่ 2.10 แสดงตัวอย่างลักษณะของเศษโลหะที่เกิดขึ้นจากกระบวนการตัดด้วยพลาสมา

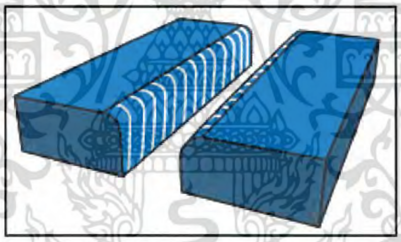
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b) (c)

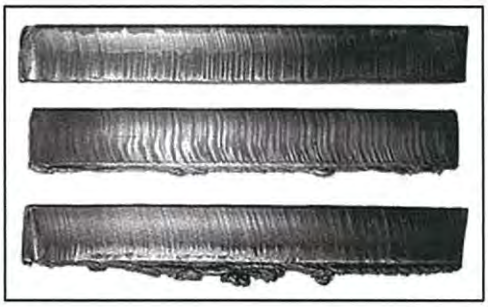
ภาพที่ 2.10 ลักษณะของเศษโลหะที่เกิดขึ้นจากกระบวนการตัดด้วยพลาสมา
(a) เกิดครีบแข็งเล็กน้อย (b) เกิดครีบลักษณะพองตัวมาก (Blister),
(c) เกิดขี้เชื่อมบนพื้นผิว

(4) Rounded top edge หรือขอบของชิ้นงานมีลักษณะมนไม่เรียบตรง โดยอาจเกิดได้จากหลายตัวแปร เช่น ความเร็วในการตัด ระยะระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน ขนาดของกระแสฟ้า แรงดัน-ไฟฟ้า ชนิดของก๊าซพลาสมา และเทคโนโลยีของเครื่องตัด เป็นต้น ภาพที่ 2.11 แสดงตัวอย่างของขอบของชิ้นงานที่ตัดมีลักษณะมนไม่เรียบตรง



ภาพที่ 2.11 ขอบของชิ้นงานที่ตัดมีลักษณะมนไม่เรียบตรง

(5) Dragline หรือเส้นรอยตัดซึ่งเกิดจากลำพลาสมาในระหว่างการตัด โดยอาจเกิดได้จากหลายตัวแปร เช่น ความเร็วในการตัด ระยะระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน ขนาดของกระแสฟ้า แรงดัน-ไฟฟ้า ชนิดของก๊าซพลาสมา และเทคโนโลยีของเครื่องตัด เป็นต้น ภาพที่ 2.12 แสดงเส้นรอยตัดรูปแบบต่างๆ



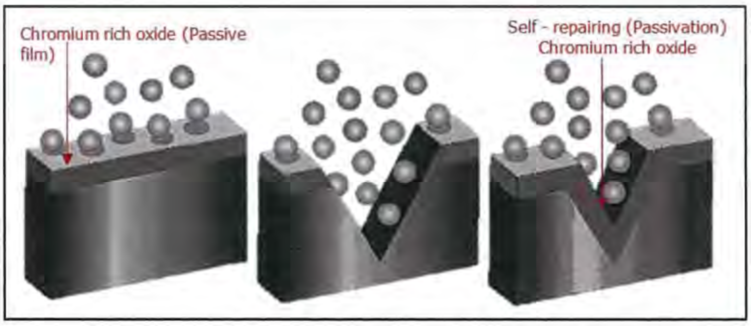
ภาพที่ 2.12 แสดงเส้นรอยตัดรูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 เหล็กกล้าไร้สนิม

ปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิมได้ถูกใช้ในรูปของผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายและแตกต่างกันออกไปตามการประยุกต์การใช้งานเพราะมีคุณสมบัติที่ไม่เหมือนใคร เช่น ยากต่อการขึ้นสนิมเมื่อเทียบกับโลหะหรือวัสดุชนิดอื่นๆ ค่าบำรุงรักษาต่ำ ง่ายต่อการเชื่อมและการขึ้นรูป ระยะเวลาการใช้งานคุ้มค่ากับราคา จึงทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นโลหะที่ทรงคุณค่าและมีประโยชน์ใช้สอยที่ไร้ขีดจำกัด นับตั้งแต่การใช้งานพื้นฐาน เช่น เครื่องครัว สิ่งของตกแต่งทั้งภายนอกและภายในบ้านอาคาร ไปจนถึงการใช้งานระดับสูง เช่น ชิ้นส่วนอากาศยาน หรือในงานก่อสร้างเช่น งานก่อสร้างอุโมงค์และอุปกรณ์ใช้งานภายในเพราะเหล็กกล้าไร้สนิมมีคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายด้าน ไม่ว่าจะเป็นความหลากหลายของเกรดที่สามารถนำไปเลือกใช้ตามสภาพการใช้งานต่างๆ อายุการใช้งานทนทานยาวนานโดยไม่จำเป็นต้องทำความสะอาดหรือเพียงทำความสะอาดเล็กน้อย นอกจากนี้เหล็กกล้าไร้สนิมยังมีคุณสมบัติทนไฟและมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงดังนั้นจึงมั่นใจได้ถึงความปลอดภัยในกรณีที่เกิดอัคคีภัยขึ้น อีกทั้งยังนำเอาเหล็กกล้าไร้สนิมมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารซึ่งเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่ให้ความสำคัญต่อความสะอาดและความปลอดภัยสูงสุด เนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถทนการกัดกร่อนได้ดี ไม่ทำปฏิกิริยากับอาหาร ง่ายต่อการทำความสะอาด และสามารถใช้งานได้อย่างหลากหลาย อย่างไรก็ตามการเลือกใช้เกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมให้สอดคล้องกับลักษณะการใช้งานก็มีความสำคัญเป็นอย่างมากเนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละกลุ่ม มีความเหมาะสมต่อการใช้งานที่แตกต่างกัน [21-26]

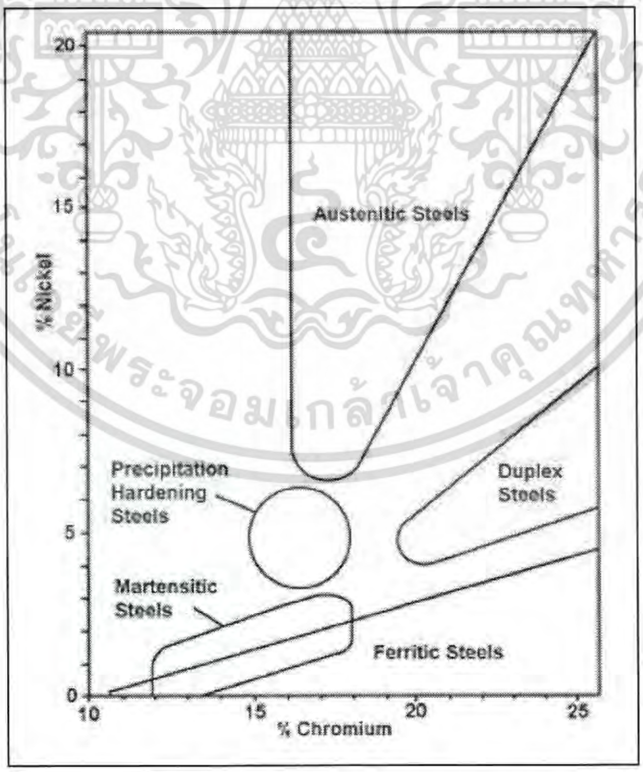
เหล็กกล้าไร้สนิมคือวัสดุที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักและโดยทั่วไปจะมีธาตุคาร์บอนไม่เกิน 2.0% โดยน้ำหนัก และมีโครเมียมมากกว่าร้อยละ 10.5 โดยน้ำหนัก การเติมโครเมียมที่เป็นส่วนผสมหลักของเหล็กกล้าไร้สนิม ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีความต้านทานการเกิดสนิมได้ โครเมียมที่เติมลงไปนั้นจะทำให้เกิดการสร้างชั้นฟิล์มออกไซด์ของโครเมียม (chromium oxide film : CrO2) หรือ Passive film ที่มองไม่เห็นเกาะติดแน่นอยู่ที่บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งฟิล์มนี้สามารถป้องกันการเกิดสนิมและยังสร้างขึ้นใหม่ได้เมื่อชั้นฟิล์มถูกทำลาย ซึ่งถ้าฟิล์มที่ผิวหน้านั้น ถูกทำลายไม่ว่าจากแรงกลหรือสารเคมีออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศ แม้จำนวนน้อยนิดจะเข้าทำปฏิกิริยากับโครเมียม สร้างฟิล์มโครเมียมออกไซด์ทดแทนขึ้น ใหม่ด้วยตัวมันเองดังแสดงในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 การสร้างฟิล์มโดยอัตโนมัติที่ผิวหน้าเหล็กกล้าไร้สนิมเมื่อสัมผัสบรรยากาศที่มีออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมทุกประเภท จะมีสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับโครเมียมเป็นหลัก แต่ก็ยังมีการเติมธาตุผสมอื่นๆ ลงไป เพื่อปรับปรุงและเพิ่มสมบัติพิเศษเฉพาะด้าน เช่น นิกเกิล, โมลิบดินัม, ไทเทเนียม ทองแดง อะลูมิเนียม ซิลิคอน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และเซลีเนียม หรือ ไนโอเบียม เป็นต้น ซึ่งการที่เหล็กกล้าไร้สนิมมีธาตุผสมในสัดส่วนที่แตกต่างกันนั้น ได้นำมาสู่การแบ่งเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นประเภทต่างๆที่อยู่บนพื้นฐานของลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) หรือโครงสร้างผลึก (Crystallographic Structure) ของวัสดุ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยายสูงจากชิ้นงานที่ผ่านการขัดละเอียดและกัดกรด (Polishing & Etching) เป็นที่ทราบกันดีว่า ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ต่างกัน จะทำให้ได้โครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกันไปด้วย โดยอาจเกิดเป็นเฟสที่เสถียร คือ ออสเตนไนต์และเฟอร์ไรต์ ส่วนดูเพล็กซ์ (Duplex) จะมีทั้งสองเฟสร่วมกันในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่เฟสมาร์เทนไซต์ (Martensite) เป็นโครงสร้างที่ไม่เสถียรเกิดกับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนมากกว่า 0.3% หลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน (ชุบแข็ง) หรือผ่านการขึ้นรูปเย็นที่รุนแรง และโครงสร้างที่เพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอน (Precipitation Hardening) ของสารประกอบที่มีขนาดเล็ก ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของธาตุนิกเกิลและโครเมียมที่ผสมอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถใช้ในการแบ่งกลุ่มต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.12



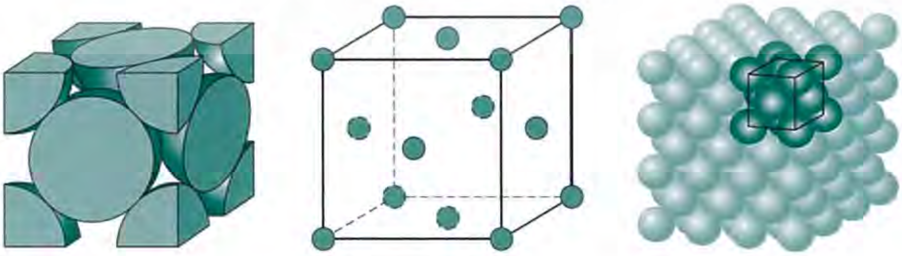
ภาพที่ 2.12 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของธาตุนิกเกิลและโครเมียมที่ผสมอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และให้อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
148801

โดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่มหลักๆ โดย 4 กลุ่มแรกจะแบ่งตามลักษณะเฉพาะของโครงสร้างจุลภาคหรือโครงสร้างผลึกของโลหะผสม ได้แก่ กลุ่มออสเตนนิติก (Austenitic), กลุ่มเฟอริติก (Ferritic), กลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic) และกลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex) ส่วนกลุ่มที่ 5 เป็นโลหะผสมที่เพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอน (Precipitation Hardening) ด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment)

1. เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเตนนิติก

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเตนนิติกมีจุลโครงสร้างแบบออสเตนไนต์และมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC หรือ Face-centered cubic ดังแสดงในภาพที่ 2.15 โดยมีส่วนผสมของคาร์บอนน้อยกว่า 0.08% โครเมียมประมาณ 16% -18% และมีนิกเกิลผสมอยู่ ประมาณ 8% - 13% ซึ่งทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีคุณสมบัติเฉพาะคือแม่เหล็กดูดไม่ติด สามารถทนการเกิดออกซิไดซ์ได้ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งสามารถนำเอามาใช้งานเป็นส่วนประกอบของเตาหลอม ท่อนำความร้อน และแผ่นกันความร้อนในเครื่องยนต์ โดยอาจจะเรียกว่า เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ว่า เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดทนความร้อน (Heat Resisting Steel) โดยสามารถนำมาใช้งานเฉพาะประเภทโครงสร้างที่ใช้งานในสภาพแวดล้อมที่กัดกร่อนรุนแรง เช่น ระบบท่อ ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน โรงงานผลิตสารเคมี โรงงานผลิตปุ๋ยเคมี โรงงานบำบัดน้ำเสีย ฯ เนื่องจากมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้าดีเยี่ยม มีคุณสมบัติทางกลเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงที่ดี ขึ้นรูปได้ง่าย รวมทั้งมีความสามารถในการเชื่อมที่ดี เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ยังเหมาะต่อสภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิติดลบ เนื่องจากอิทธิพลของธาตุนิกเกิล ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเตนนิติกสามารถป้องกันปัญหาการแตกหักแบบเปราะที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งปัญหาดังกล่าวมักจะเกิดกับเหล็กกล้าประเภทอื่นๆ แต่มักมีความไวต่อการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ เช่น การกัดกร่อนแบบรูเข็ม การกัดกร่อนใต้รอยซ้อน การกัดกร่อนตามขอบเกรน และการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน ดังนั้นการประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ จึงควรพิจารณาเลือกใช้ด้วยความระมัดระวัง ซึ่งจะเห็นได้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเตนนิติกนับว่าเป็นกลุ่มที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างกว้างขวางมากที่สุดในบรรดาเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกัน ตัวอย่างเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่มนี้ ได้แสดงดังในตารางที่ 2.2



ภาพที่ 2.15 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ FCC หรือ Face-centered cubic (a) 1 ยูนิตเซลล์ของ BCC, (b) ภาพย่อของ 1 ยูนิตเซลล์ของ BCC และ (c) แสดงกลุ่มก้อนของอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างส่วนประกอบโดยทั่วไปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 202, 304, 304L, 316 และ 316L

GRADE	C	Cr	Ni	Mn	Mo
AISI 202	0.053	15.30	4.08	7.12	-
AISI 304	0.050	18.32	8.10	1.17	-
AISI 304L	0.021	18.32	8.11	1.06	-
AISI 316	0.042	17.12	10.04	1.45	2.13
AISI 316L	0.024	17.12	10.08	1.41	2.12

ตัวอย่างการเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเตนนิติกสำหรับอุตสาหกรรมแต่ละประเภท ซึ่งล้วนมีสภาวะการใช้งานที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนหรือความเสียหายที่แตกต่างกันตามกระบวนการผลิต ดังนี้

อุตสาหกรรมอาหารทะเล เป็นสภาวะที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูง และมีการใช้น้ำยาฆ่าเชื้อที่มีคลอไรด์เป็นส่วนประกอบ ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ซึ่งมีการเติมโมลิบดินัมจึงถูกเลือกใช้ในอุตสาหกรรมนี้

อุตสาหกรรมเบียร์ ไวน์ น้ำผลไม้ และซอสมีสภาวะกัดกร่อนจากกรดอะซิติก 20 เปอร์เซนต์ที่อุณหภูมิสูง หรือกรดซิตริก 5% ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 และ 316L จึงเป็นเกรดที่เหมาะสมสำหรับถังและระบบท่อ ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม

สำหรับอุตสาหกรรมนมวัสดุที่ใช้ต้องทนการกัดกร่อนได้ดีเนื่องจากในนมกว่า 13 เปอร์เซนต์ประกอบด้วยกรดไขมัน สารประกอบอนินทรีย์ วิตามิน และเอนไซม์ นอกจากนี้ผิวของวัสดุต้องสามารถทำความสะอาดได้ง่ายเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของแบคทีเรีย เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 และ 316L จึงถูกเลือกใช้เป็นหลักในอุตสาหกรรมนม

อุตสาหกรรมน้ำตาล วัสดุต้องสัมผัสกับความชื้น ความร้อน ความเป็นกรด การเสียดสีจากอนุภาค และการกัดกร่อน เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 จึงถูกเลือกใช้มานานกว่า 40 ปี

ในอุตสาหกรรมข้าว อุปกรณ์มักเกิดความเสียหายเนื่องจากการเสียดสีจากเมล็ดข้าว วัสดุที่ใช้จึงต้องมีความแข็งสูง รวมถึงต้องสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ดังนั้นจึงใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 สำหรับเครื่องอบเมล็ดข้าวเปลือก

อุโมงค์เคฮู (Kehu) ในประเทศฟินแลนด์ได้ติดตั้งระบบดับเพลิงขึ้นทั้งหมด 5 จุด โดยได้เลือกใช้ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L เป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร พร้อมหัวฉีด ในกรณีที่เกิดไฟไหม้ในอุโมงค์จะเกิดความดันสูงระบบจะพ่นละอองน้ำเพื่อที่จะช่วยดับไฟในอุโมงค์เพื่อลดความเสียหาย เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ทนต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกัดกร่อน ทนต่อไฟไหม้และไม่ก่อให้เกิดควันพิษเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น นอกจากนั้นยังพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ถูกนำไปใช้ทำประตูหนีไฟในอุโมงค์ลิโอรัน (Lioran) ประเทศฝรั่งเศสโดยสามารถคงสมบัติเชิงกลที่ดีไว้ได้หากต้องรับความร้อนสูง และเพื่อลดผลกระทบความรุนแรงจากเหตุไฟไหม้

จะเห็นได้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกถูกใช้งานเป็นหลักในอุตสาหกรรมต่าง โดยเฉพาะ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 และ 316L ซึ่งการเลือกประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิมนั้นต้องพิจารณาทั้งสมบัติเชิงกล และความต้านทานการกัดกร่อน ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมจะสามารถใช้งานได้ดีเฉพาะในสภาวะที่เหมาะสำหรับเกรดหรือชนิดนั้นๆ เท่านั้น แต่เมื่อสภาวะแวดล้อมเปลี่ยนไป ก็สามารถเหนี่ยวนำให้เหล็กกล้าไร้สนิมเกิดการเสื่อมสภาพได้

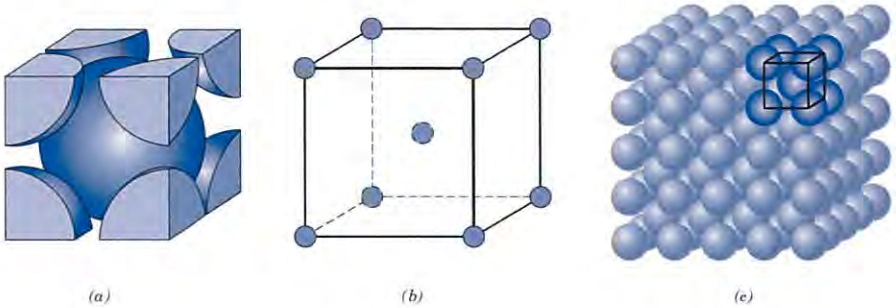
2. เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติกมีจุลโครงสร้างแบบเฟอร์ไรต์และมีโครงสร้างผลึกแบบ BCC หรือ Body-centered cubic ดังแสดงในภาพที่ 2.16 มีคุณสมบัติแม่เหล็กดูดติด แปรรูปได้ง่าย นำความร้อนได้ดีเยี่ยม โดยมีส่วนผสมของคาร์บอนต่ำ และมีโครเมียมเป็นส่วนผสมหลัก คือประมาณ 10.5% - 29% ซึ่งการต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มตามปริมาณโครเมียม ไม่มีส่วนผสมของนิเกิล แต่มีการเพิ่มความสามารถในการเชื่อมด้วยการเพิ่มไทเทเนียมไนโอเบียม หรือ โมลิบดินัม เป็นต้น เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ จึงเป็นกลุ่มที่ราคาไม่แพงเหมาะสำหรับทำเครื่องครัว มีด ภาชนะหลุม โต๊ะ ตู้ผนัง ถังน้ำต่าง ๆ (Tank) เครื่องใช้ภายในบ้าน ทำเฟอร์นิเจอร์ ฯลฯ ตัวอย่างเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่มนี้ ได้แสดงดังในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงตัวอย่างส่วนประกอบโดยทั่วไปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 409L, 430, 439, 441 และ 444

GRADE	C	Cr	Mn	Mo	Ti	Nb
AISI 409L	0.005	11.05	-	-	0.29	-
AISI 430	0.042	16.36	0.33	-	-	-
AISI 439	0.020	17.50	-	-	0.50	-
AISI 441	0.020	17.78	-	-	0.22	0.50
AISI 444	0.020	17.70	0.40	2.10	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.16 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ BCC หรือ Body-centered cubic (a) 1 ยูนิตเซลล์ของ BCC, (b) ภาพย่อของ 1 ยูนิตเซลล์ของ BCC และ (c) แสดงกลุ่มก้อนของอะตอม

เนื่องจากราคาที่ไม่แพงทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติกถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมแทนเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเตนนิติกมากขึ้น เช่น จากอุตสาหกรรมน้ำตาล วัสดุต้องสัมผัสกับความชื้น ความร้อน ความเป็นกรด การเสียดสีจากอนุภาค และการกัดกร่อน เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 จึงถูกเลือกใช้ แต่อย่างไรก็ตามเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก (AISI 410, AISI 439 และ AISI 444) เริ่มถูกใช้งานในอุตสาหกรรมนี้เพิ่มมากขึ้นเพื่อลดต้นทุนการผลิต หรือในอุตสาหกรรมข้าว อุปกรณ์มักเกิดความเสียหายเนื่องจากการเสียดสีจากเมล็ดข้าว วัสดุที่ใช้จึงต้องมีความแข็งสูง รวมถึงต้องสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 จึงเหมาะสำหรับเครื่องอบเมล็ดข้าวเปลือก ในขณะที่ถังและผนังนิยมใช้ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 430

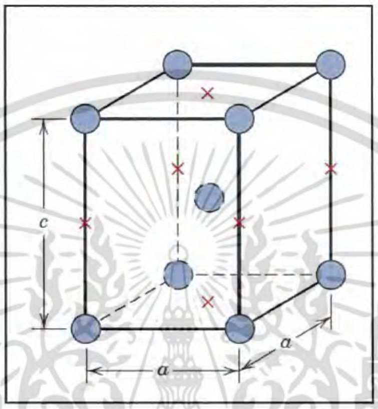
3. เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติกมีจุลโครงสร้างแบบมาร์เทนไซต์ และมีโครงสร้างผลึกแบบ BCT หรือ Body-centered tetragonal ดังแสดงในภาพที่ 2.17 โดยทั่วไปจะมีโครเมียมผสมอยู่ประมาณ 10.5% – 17.0% และมีส่วนผสมของคาร์บอนในระดับปานกลาง มีคุณสมบัติแม่เหล็กดูดติด โดยส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีความใกล้เคียงกับกลุ่มเฟอร์ริติกแต่จะมีคาร์บอนสูงกว่า จึงทำให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไซท์ที่มีความแข็งแรงและความแข็งสูงกว่ากลุ่มอื่นๆ ทำให้มีค่าความจำนวนความแข็งแรง (Yield Strength : YS) และค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strenght : UTS) สูงมากในสภาพที่ผ่านกระบวนการอบชุบ แต่จะมีค่าการยืดตัว (Elongation : EL %) ต่ำ ซึ่งเหมาะใช้ทำเครื่องตัด เหล็กเครื่องมือต่างๆ มีดคุณภาพสูง ใบมีดโกน เครื่องมือแพทย์และเครื่องมือวิศวกรอื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.18 และ 2.19 ซึ่งต้องการคุณสมบัติเด่นในด้าน การต้านทานการสึกกร่อน และ ความแข็งแรงทนทาน ตัวอย่างเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่มนี้ ได้แสดงดังในตารางที่ 2.4

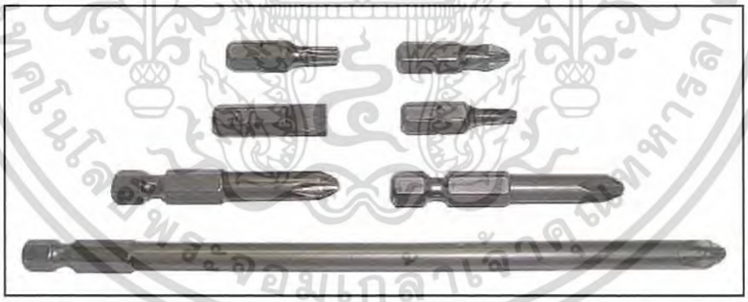
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 แสดงตัวอย่างส่วนประกอบโดยทั่วไปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 410, 420 และ 440C

GRADE	C	Cr	Mn	Other
AISI 410	< 0.15	11.5 – 13.0	< 1.00	-
AISI 420	< 0.15	12.0 – 14.0	< 1.00	-
AISI 440C	0.95 – 1.20	16.0 – 18.0	< 1.00	Mo < 0.75



ภาพที่ 2.17 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ BCT หรือ Body-centered tetragonal 1 ยูนิตเซลล์ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาร์เทนซิติก



ภาพที่ 2.18 แสดงดอกไขควงและข้อต่อไขควงที่ทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 420

ภาพที่ 2.19 แสดงมีดพับที่ทำมาจากเหล็กกล้าไรสนิม AISI 410

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์มีโครเมียมผสมอยู่ประมาณ 20% - 25% และนิกเกิลประมาณ 4% - 7 % ไม่มีส่วนผสมของคาร์บอน โดยมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคผสมระหว่างเฟอร์ไรต์และออสเตนไนต์ในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน สามารถดูดติดแม่เหล็กได้ โครงสร้างแบบผสมดังกล่าวทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์มีความแข็งแรงทางกลสูงและมีความต้านทานการกัดกร่อนในสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงได้ดี มีค่าความจำนนความแข็งแรงและค่าความยืดตัวสูงจึงเรียกได้ว่า เหล็กชนิดนี้มีทั้งความแข็งแรงและความเหนียวที่สูงเป็นเลิศ มีราคาแพง จึงมักถูกนำไปใช้งานในสภาวะการกัดกร่อนที่รุนแรงหรือมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูง โดยถ้ามีปริมาณโครเมียมและโมลิบดีนัมสูงจะเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนตามขอบเกรนและแบบรูเข็มได้ดียิ่งขึ้นตามลำดับ และช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนที่เป็นรอยร้าวอันเนื่องมาจากแรงกดดัน เช่น การทำฐานขุดเจาะน้ำมัน ฯลฯ ตัวอย่างเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่มนี้ ได้แสดงดังในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงตัวอย่างส่วนประกอบโดยทั่วไปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 2205 และ AISI 329

GRADE	C	Cr	Ni	Mo
AISI 2205	< 0.03	21.0 – 23.0	4.5 – 6.5	2.5 – 3.5
AISI 329	< 0.02	23.0 – 28.0	2.5 – 5.0	1.0 – 2.0

เกรดแรกเริ่มของโลหะผสมกลุ่มนี้คือ AISI 329 ซึ่งจัดเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ชนิดเฟอริติก (มีเฟอร์ไรต์มากกว่าออสเตนไนต์) จากนั้นได้มีการพัฒนาโดยการเติมไนโตรเจน เช่น เกรด UNS 32950 และ เกรด AISI 2205 (UNS 31803) เพื่อให้ได้โครงสร้างออสเตนไนต์ในสัดส่วนใกล้เคียง 50% นอกจากนี้ยังเพิ่มสมบัติต้านทานการกัดกร่อนในสภาวะหลังการเชื่อม ต้านทานการกัดกร่อนจากคลอไรด์ ในขณะที่การปรับปรุงสมบัติด้านความแกร่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณออสเตนไนต์และยังเพิ่มความเป็นไปได้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ในรูปของแผ่น(Plate) และแท่ง (Bar) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้ทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีทั้งอุตสาหกรรมเคมีและอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่างๆ ที่ใช้ในน้ำทะเล โดยควบคุมปริมาณส่วนผสมทางเคมีทั้งคาร์บอนโครเมียม นิกเกิล และโมลิบดินัม เพื่อให้เกิดโครงสร้างจุลภาคระหว่างงออสเตนไนต์กับเฟอร์ไรต์ในอัตราสัดส่วน 50 : 50 เห็นได้จากชิ้นส่วนของเรือดำน้ำทะเล เช่น ใบพัดเรือ หรือ หางเสือ หรือใช้ในอุตสาหกรรมอาหารทะเลที่มีสภาวะที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงและมีการใช้น้ำยาฆ่าเชื้อที่มีคลอไรด์เป็นส่วนประกอบ ดังนั้นเกรด AISI 2205 (ดูเพล็กซ์) จึงเป็นกลุ่มที่เหมาะสมต่อการใช้งานในอุตสาหกรรมนี้เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มพรีซิพิเตชั่นฮาร์เดนนิ่ง

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มพรีซิพิเตชั่นฮาร์เดนนิ่ง(Precipitation Hardening Steel) หรือ เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนกลุ่มนี้เกิดจากกระบวนการทางโลหะวิทยาการที่อาศัยความสามารถในการละลายที่น้อยลงของธาตุผสม เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะผสมด้วยวิธีการที่เรียกว่า การแข็งขึ้นโดยการตกตะกอน (Precipitation Hardening) เป็นอีกหนึ่งวิธีการที่ใช้ในการพัฒนาโลหะผสมที่มีความแข็งแรงสูงพิเศษ(Ultrahigh-strength Alloys) โดยวิธีทางความร้อนเป็นเหล็กกล้าชุบแข็งแบบตกผลึก มีโครเมียมผสมอยู่ ประมาณ17 % และมีนิเกิลผสมอยู่ประมาณ 4% อีกทั้งยังมีทองแดง และไนโอเบียมผสมอยู่ด้วย

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอน ได้มีการพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่พิเศษหลายด้าน คุณสมบัติที่สำคัญมากที่สุดอย่างหนึ่งของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ คือ แปรรูปได้ง่าย มีความแข็งแรงสูง มีความเหนียวค่อนข้างดี มีความต้านทานการกัดกร่อนดีเยี่ยม มีอัตราการบิดเบี้ยวต่ำ และมีความสามารถในการเชื่อมดีเยี่ยม ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีร่วมกันระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติกและออสเตนนิติก กล่าวคือ สามารถทำให้แข็งขึ้นได้ด้วยกระบวนการทางความร้อนคล้ายกับเหล็กกล้าไร้กลุ่มสนิมมาร์เทนซิติก ในขณะเดียวกันก็มีสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีคล้ายกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก จากคุณสมบัติที่สามารถแปรรูปได้ง่าย จึงสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างหลากหลาย เช่น แท่ง เส้นลวด แผ่น ชิ้นส่วนตีขึ้นรูป ผลิตภัณฑ์หล่อ ผลิตภัณฑ์โลหะผง และผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ เป็นต้น อีกทั้งสามารถชุบแข็งได้ในคราวเดียวจึงเหมาะสำหรับ ทำแกนปั๊ม หัววาล์ว และส่วนประกอบของยานอวกาศ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฯลฯ ตัวอย่างเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่มนี้ ได้แสดงดังในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงตัวอย่างส่วนประกอบโดยทั่วไปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI A286 และ AISI 17-7PH

GRADE	C	Cr	Ni	Mo	Other
AISI A286	< 0.08	13.5 – 16.0	24.0 – 27.0	1.0 – 1.5	Al 0.35/ B 0.001 – 0.01/ Ti 1.9 – 2.35/ V 0.1 – 0.5
AISI 17-7PH	< 0.20	16.0 – 18.0	6.5 – 7.75	-	Al 0.75 – 1.50

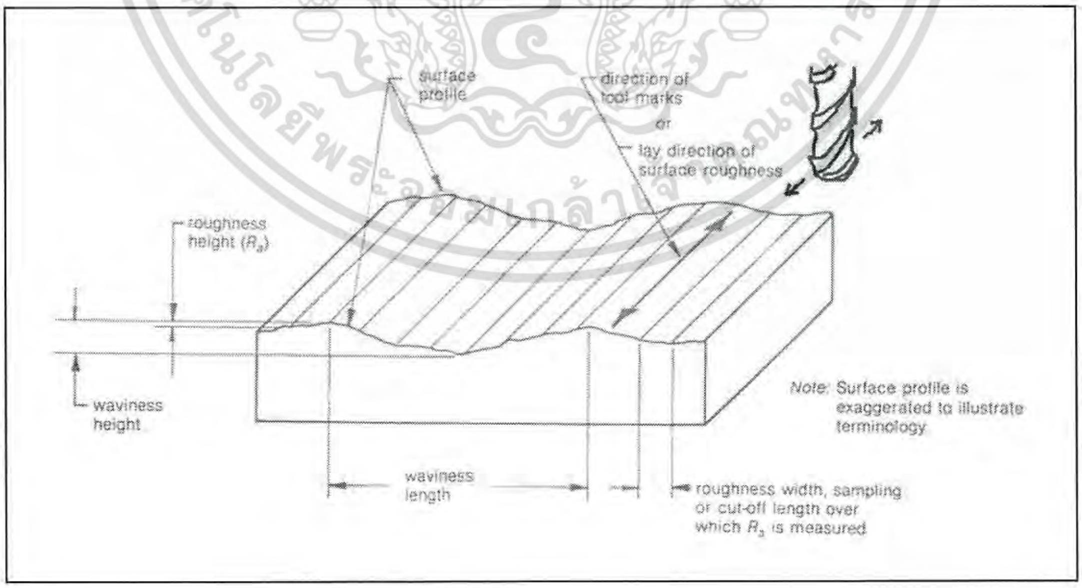
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ความหยาบผิว

ในปัจจุบันลักษณะของพื้นผิวของชิ้นงานมีความสำคัญต่อการใช้งานเป็นอย่างยิ่ง นอกจากแสดงให้เห็นถึงความสวยงามแล้ว ยังแสดงให้เห็นถึงรูปลักษณ์เฉพาะ และมีผลเชิงเทคนิคต่อการใช้งาน ความหยาบผิว (Surface Roughness) อาจจะสัมผัสและแยกแยะด้วยมือหรือสายตาได้ แต่ความหยาบผิวเป็นคุณลักษณะที่สำคัญอย่างยิ่งของผิวชิ้นงานที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการใช้งานหลายประการเช่น ความง่ายต่อการทำความสะอาด การสะท้อนแสงของผิว ความสามารถทนต่อการกัดกร่อน ความง่ายต่อการขึ้นรูป และความง่ายต่อการเคลือบผิว ยิ่งในงานที่ต้องการความละเอียดเที่ยงตรงสูง การวัดความหยาบผิวจึงสำคัญมากเพราะปัจจุบันถ้าชิ้นงานมีความละเอียด และขนาดเที่ยงตรงและแม่นยำจะทำให้งานที่ผลิตหรือแม้แต่กระทั่งการทำงาน จะทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดด้วย จึงนิยมนำความหยาบผิวมาใช้ในการกำหนดขนาด หรือนำมาใช้ควบคุมการผลิตชิ้นงานให้มีคุณภาพ [37]

ความหยาบผิว (Surface Roughness) คือความไม่สม่ำเสมอของผิวของชิ้นงาน ซึ่งส่วนใหญ่รูปแบบของรอยที่เกิดจากอัตราการป้อนของเครื่องมือตัด ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการวัดขนาดความขรุขระของผิว หากมีความขรุขระมากแสดงว่ามีความหยาบมาก หากมีความขรุขระน้อยก็แสดงว่ามีความหยาบน้อย

ความเป็นคลื่น (Waviness) คือลักษณะความเป็นคลื่นของพื้นผิวชิ้นงานมักจะเห็นได้ง่ายและใหญ่กว่า อาจเกิดจากการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตความสั่นสะเทือนเหล่านี้จะปรากฏแฝงอยู่ในลักษณะของผิวงาน



ภาพที่ 2.20 แสดงความหยาบผิวและความเป็นคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 2.20 จะเห็นว่า หากจะกล่าวถึงความหยาบผิวของชิ้นงานใดๆ จะต้องพิจารณาถึงผิวชิ้นงานนั้น ที่มีค่าความสูงผิวหยาบ (Roughness height) และระยะห่างระหว่างยอดความสูงผิวความหยาบ (Roughness width) ในช่วงแคบๆ ถ้าพิจารณาในช่วงกว้างเกินไป ยอดความสูงที่วัดได้จะกลายเป็นความสูงของลูกคลื่น (Waviness height) แทน ดังนั้นในการวัดจะต้องจำกัดระยะในการวัดลักษณะความเป็นคลื่นให้ต่ำ ระยะนี้เรียกว่า cut-off length

ความหยาบหรือความขรุขระของพื้นผิวส่วนใหญ่จะมีรูปแบบที่ซับซ้อนดังในภาพที่ 2.21 ซึ่งประกอบไปด้วยความหยาบผิวของพื้นผิวดังในภาพที่ 2.22 และประกอบไปด้วยความเป็นคลื่นดังในภาพที่ 2.23 ซึ่งความหยาบผิวและความเป็นคลื่นนี้ทับซ้อนกันอยู่ ดังนั้นการเลือกค่า Cut-off length ที่เหมาะสม จะให้ค่าความหยาบผิวที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด โดยค่า Cut-off length มีค่ามาตรฐานที่ใช้กันมากคือ 0.08 mm, 0.25 mm, 0.8 mm, 2.5 mm, และ 8.0 mm โดยจะให้ค่าความหยาบผิวที่แตกต่างกัน การเลือกค่า Cut-off length ที่น้อยจะวิเคราะห์พื้นผิวแค่บางส่วนของแถบคลื่น ทำให้ค่าที่ออกมามีความหยาบผิวน้อยลง แต่ถ้าหากเลือกค่า Cut-off length ที่มากเกินจะเป็นการเพิ่มระยะการวัดที่สูงขึ้นและเพิ่มค่าผิดพลาดที่พบบนพื้นผิวอีกทั้งอาจรวมค่า Waviness เข้าไปด้วย

ภาพที่ 2.21 รูปแบบพื้นผิวของชิ้นงานที่มีความซับซ้อน

ภาพที่ 2.22 ความหยาบผิวของพื้นผิว

ภาพที่ 2.23 ความเป็นคลื่น

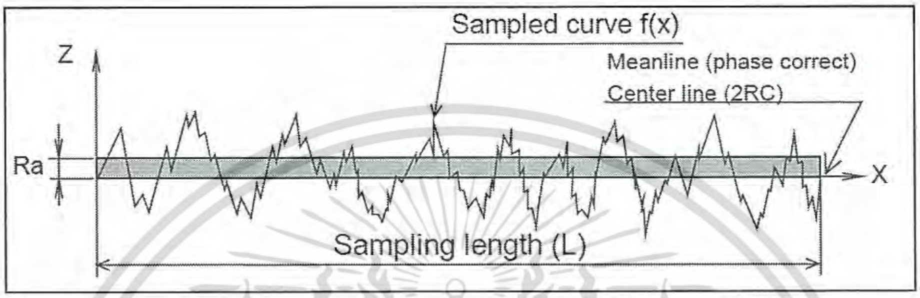
ค่าความหยาบผิว (Roughness Parameter) จัดเป็นสมบัติของโลหะวิทยา ดังนั้นค่าความหยาบผิวมีหลายประเภทด้วยกัน ดังต่อไปนี้

1. ค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลข (Arithmetic mean roughness: Ra) เป็นค่าความหยาบผิวที่นิยมใช้กันมากที่สุด และหลายมาตรฐานมักอ้างอิงค่านี้ในการกำหนดมาตรฐานความหยาบผิว โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลขได้มาจากค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของค่าความแตกต่างของความสูงของพื้นผิวของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลางกับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลางหารด้วยความยาวเฉลี่ยดังแสดงในภาพที่ 2.24 โดยที่ค่า Ra มีหน่วยวัดเป็น μm คำนวณได้จากสมการที่ 2.1 ดังต่อไปนี้

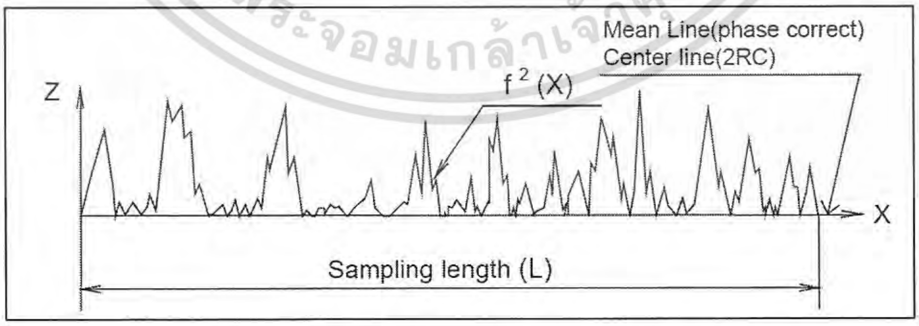
$$Ra = \frac{1}{L}\int_0^L |f(x)|dx \qquad (2.1)$$



ภาพที่ 2.24 แสดงการหาค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลขหรือ Ra

2. ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (Roughness root mean square : Rq) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวด้วยรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของผิวที่วัดโดยคำนวณได้จากสมการที่ 2.2 เมื่อวัดตามความยาวที่สุ่มวัดจากทิศทางของเส้นกึ่งกลางตามแนวแกน x และวัดจากทิศทางความยาวตามแนวแกน z โดยที่ค่า Rq มีหน่วยวัดเป็น μm ซึ่งให้ Z=f(x) ดังแสดงในภาพที่ 2.25

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L}\int_0^L f^2(x)dx} \qquad (2.2)$$



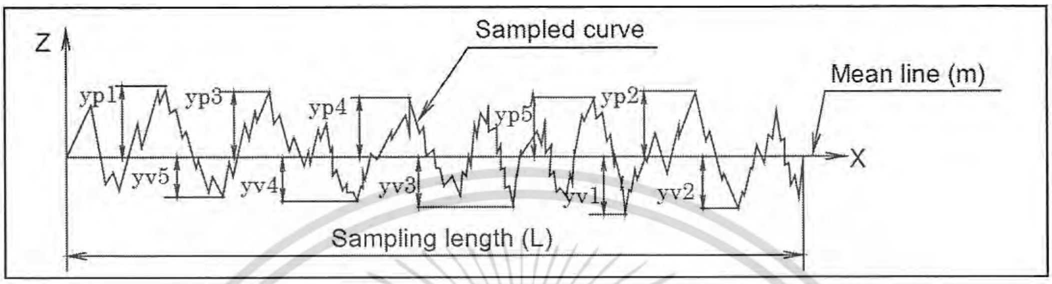
ภาพที่ 2.25 แสดงการหาความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสองหรือ Rq

3. ความหยาบผิวแบบสิบจุด (Ten-point Height: Rz) เป็นการวัดโดยให้แต่ละช่วงมีจุดยอดผิวหยาบ 5 จุดและร่องผิวหยาบ 5 จุดซึ่งรวมกันทั้งหมดเป็น 10 จุด โดยสามารถคำนวณได้จากสม-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่ 2.3 โดยวัดตามทิศทางแนวตั้งของเส้นกึ่งกลางได้ดังแสดงในภาพที่ 2.26 โดยที่ค่า Rz มีหน่วยวัดเป็น μm

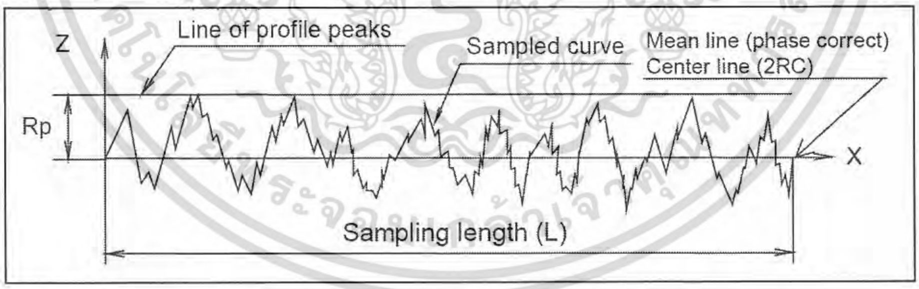
$$Rz = \frac{1}{5}\left(\sum_{i=1}^{5}|ypi| + \sum_{i=1}^{5}|yvi|\right) \quad (2.3)$$



ภาพที่ 2.26 แสดงการหาความหยาบผิวแบบสิบจุดหรือ Rz

4. ความหยาบผิวขนาดยอดสูงสุด (Maximum Profile Peak Height: Rp) เป็นการแสดงความหยาบผิวโดยวัดขนาดความสูงของยอดที่มีขนาดความสูงที่สุด โดยมีสมการดังสมการที่ 2.4 และดังแสดงในภาพที่ 2.27 โดยที่ค่า Rp มีหน่วยวัดเป็น μm

$$Rp = \max(f(x)) \quad (2.4)$$

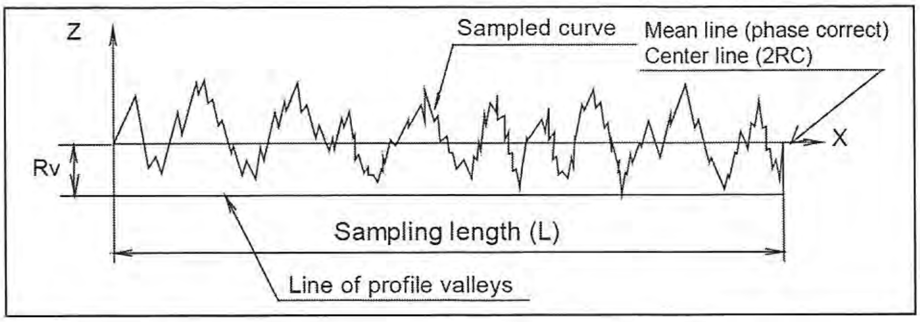


ภาพที่ 2.27 แสดงการหาความหยาบผิวขนาดยอดสูงสุดหรือ Rp

5. ความหยาบผิวขนาดร่องลึกสุด (Maximum Profile Valley Depth: Rv) เป็นการแสดงความหยาบผิวโดยวัดขนาดร่องความลึกของหลุมที่ลึกที่สุด โดยมีสมการดังสมการที่ 2.5 และดังแสดงในภาพที่ 2.28 โดยที่ค่า Rv มีหน่วยวัดเป็น μm

$$Rv = \min(f(x)) \quad (2.5)$$

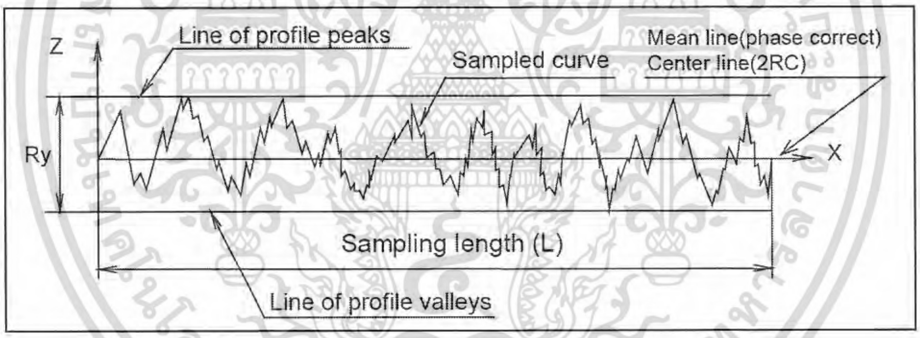
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.28 แสดงการหาความหยาบผิวขนาดร่องลึกสุดหรือ Rv

6. ความหยาบผิวขนาดโดยรวม (Maximum Height: Ry) เป็นการแสดงความหยาบผิวโดยวัดขนาดความห่างระหว่างยอดสูงสุดกับร่องลึกที่สุดของผิว โดยมีสมการดังสมการที่ 2.6 และดังแสดงในภาพที่ 2.29 โดยที่ค่า Ry มีหน่วยวัดเป็น μm

$$Ry = \max(f(x)) + \min(f(x)) \tag{2.6}$$



ภาพที่ 2.29 แสดงการหาความหยาบผิวขนาดโดยรวมหรือ Ry

2.2.4 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง

การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องการการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ในกรณีเช่นนี้ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 เรพลิเคต (replicate) จะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล จะกล่าวได้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน [28-30]

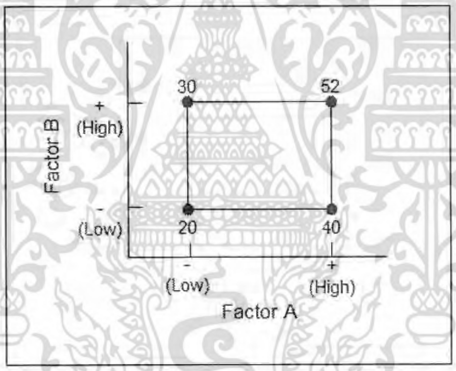
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก (Main Effect) เนื่องจากว่าเกี่ยวข้องกับปัจจัยเบื้องต้นของการทดลอง ตัวอย่างเช่น ในการทดลองตามภาพที่ 2.30 ซึ่งเป็นการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย โดยที่แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ คือ ระดับ "ต่ำ" และ "สูง" ซึ่งจะแทนระดับทั้งสองด้วยเครื่องหมาย "-" และ "+" ตามลำดับ ผลหลักของปัจจัย A ในการทดลองนี้คือผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลตอบที่ระดับต่ำและระดับสูงของปัจจัย A ซึ่งเขียนเป็นตัวเลขได้ว่า

$$A = (40+52)/2 - (20+30)/2 = 21$$

หมายความว่า การเพิ่มขึ้นของปัจจัย A จากระดับต่ำไปสู่ระดับสูงจะทำให้ผลตอบเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 21 หน่วย ในทำนองเดียวกัน จะสามารถคำนวณหาค่าผลหลักของปัจจัย B ได้คือ

$$B = (30+52)/2 - (20+40)/2 = 11$$



ภาพที่ 2.30 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย

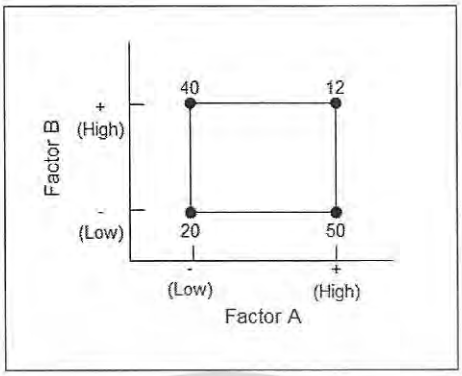
ในการทดลองบางอย่าง อาจจะพบว่าความแตกต่างของผลตอบที่เกิดขึ้นบนระดับต่างๆ ของปัจจัยหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่นๆ ทั้งหมดของปัจจัยอื่น ซึ่งหมายถึงว่า ผลตอบของปัจจัยหนึ่งจะขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่นๆ นั่นเอง และเรียกเหตุการณ์นี้ว่า การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างเช่น พิจารณาการทดลองเชิงแฟกทอเรียลของปัจจัย 2 ชนิด ดังแสดงในภาพที่ 2.31 ผลของปัจจัย A ที่ปัจจัย B อยู่ที่ระดับต่ำ (B^-) มีค่าเป็น

$$A = 50 - 20 = 30$$

และผลของปัจจัย A ที่ปัจจัย B อยู่ที่ระดับสูง (B^+) มีค่าเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = 12 - 40 = -28$$



ภาพที่ 2.31 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย (มีอันตรกิริยา)

เนื่องจากผลของปัจจัย A ขึ้นกับระดับของปัจจัย B ที่ถูกเลือก ดังนั้นกล่าวได้ว่า ปัจจัย A และ B มีอันตรกิริยาต่อกัน ขนาดของอันตรกิริยาจะเท่ากับค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของผลปัจจัย A ที่ระดับต่างๆ ของปัจจัย B ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$AB = (-28 - 30)/2 = -29$$

ซึ่งเห็นได้ว่า ค่าอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และ B ในที่นี้มีค่าสูง

แนวคิดดังกล่าวสามารถแสดงได้ด้วยกราฟในภาพที่ 2.32 เป็นกราฟระหว่างผลตอบของปัจจัย A ที่ระดับทั้งสองของปัจจัย B จะเห็นว่าเส้นของ B^- และ B^+ จะประมาณได้ว่าขนานกัน ซึ่งลักษณะของกราฟเช่นนี้จะบ่งถึงการไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกันของปัจจัยทั้งสอง ในทำนองเดียวกัน ภาพที่ 2.33 เป็นการพล็อตข้อมูลของภาพที่ 2.31 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้น B^- และ B^+ ไม่ขนานกัน และสามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยทั้งสองทีอันตรกิริยาต่อกัน บ่อยครั้งที่กราฟลักษณะนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อแสดงถึงการมีนัยสำคัญ (Significant) ของอันตรกิริยา แต่อย่างไรก็ตาม กราฟเช่นนี้ไม่ควรนำมาใช้แทนเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลในทางสถิติ เพราะว่าการตีความจากกราฟค่อนข้างที่จะขึ้นกับความคิดเห็นส่วนบุคคล ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความเข้าใจผิดหรือวิเคราะห์ผิดพลาดได้

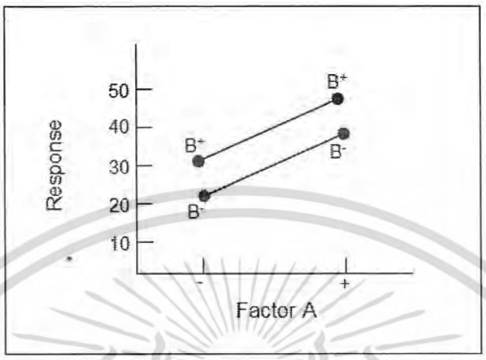
ตามปกติแล้ว เมื่ออันตรกิริยามีค่าสูง ผลหลักจะมีความหมายน้อยมากในทางปฏิบัติ จากตัวอย่างในภาพที่ 2.31 จะเห็นว่าผลหลักของปัจจัย A มีค่าเท่ากับ

$$A = (50 + 12)/2 - (20 + 40)/2 = -1$$

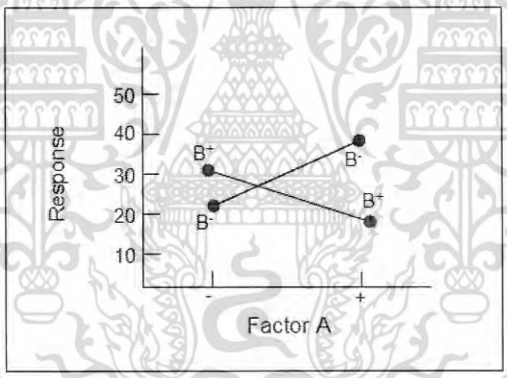
ซึ่งมีค่าต่ำมาก และโน้มน้าวให้สรุปว่า ผลจากปัจจัย A นั้นไม่มีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงผลของปัจจัย A ที่ระดับต่างๆ ของปัจจัย B แล้วจะพบว่า ในความเป็นจริงแล้วปัจจัย A มี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลอย่างมีนัยสำคัญ แต่ผลของปัจจัย A นั้นจะขึ้นกับระดับของปัจจัย B ดังนั้น ความรู้เกี่ยวกับอันตรกิริยาของ AB จะมีประโยชน์มากกว่าความรู้เกี่ยวกับผลหลัก และในกรณีที่อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยมีนัยสำคัญ ผู้ทำการทดลองควรจะต้องพิจารณาผลตอบที่เกิดขึ้นที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยหนึ่ง (เช่น A) โดยให้ระดับของปัจจัยอื่นคงตัว เพื่อที่หาข้อสรุปเกี่ยวกับผลที่เกิดจากปัจจัย A



ภาพที่ 2.32 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (ไม่มีอันตรกิริยา)

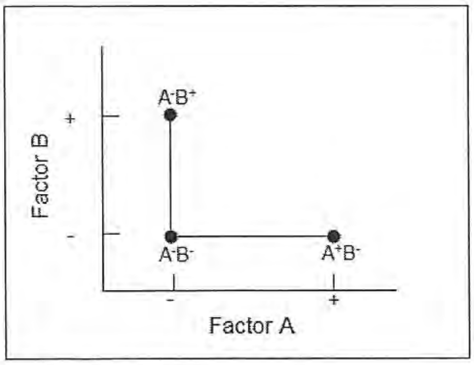


ภาพที่ 2.33 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (มีอันตรกิริยา)

ประโยชน์ของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล

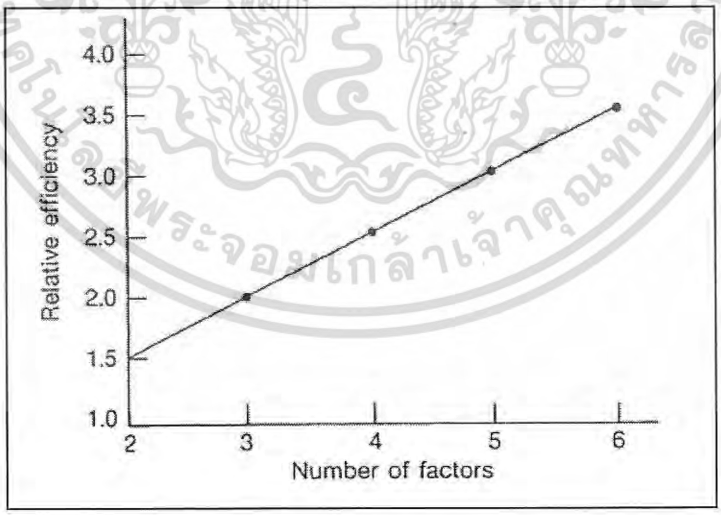
ประโยชน์ของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลสามารถแสดงได้ดังนี้ สมมติมี 2 ปัจจัย (A และ B) ที่ต้องการศึกษา แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ซึ่งจะแทนปัจจัยแต่ละระดับด้วย A^-, A^+, B^- และ B^+ ตามลำดับ ข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยทั้งสองสามารถหาได้จากการเปลี่ยนระดับของปัจจัยทีละปัจจัยดังแสดงในภาพที่ 2.34 ผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัย A จากน้อยไปมากมีค่าเป็น A^+B^- - A^-B^- และผลของการเปลี่ยนแปลงปัจจัย B จากน้อยไปมากคือ A^-B^+ - A^-B^- เนื่องจากในการทดลองอาจจะมีความผิดพลาด (Error) ขึ้น ดังนั้น ควรจะทำการทดลองอย่างน้อย 2 ครั้ง สำหรับการทดลองร่วมปัจจัย (Treatment Combination) แต่ละจุด และนำผลตอบที่ได้มาเฉลี่ยเพื่อประมาณถึงผลที่เกิดขึ้น ดังนั้นจะต้องทดลองทั้งสิ้น 6 ครั้ง (2 ครั้งจาก A^+B^-, 2 ครั้งจาก A^-B^-, และ 2 ครั้งจาก A^-B^+)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.34 การทดลองแบบทีละปัจจัย (One-factor-at-a-time Experiment)

ถ้าทำการทดลองเชิงแฟกทอเรียล จะต้องทำการทดลองร่วมปัจจัย A^+B^+ เพิ่มขึ้นอีกหนึ่งการทดลอง ในตอนนี้สามารถใช้เพียงแค่ 4 การทดลองเท่านั้นเพื่อหาผลที่เกิดจากปัจจัย A นั่นคือ A^+B^- - A^-B^- และ A^+B^+ - A^-B^+ และผลที่เกิดจากปัจจัย A หาได้จากการนำค่าประมาณที่ได้ทั้งสองค่ามาเฉลี่ยและหาผลต่างของมัน ซึ่งก็คือ $(A^+B^- - A^-B^-)/2 – (A^+B^+ - A^-B^+)/2$ นั่นเอง และค่าผลที่เกิดจากปัจจัย A ที่ได้ควรจะมีค่าความถูกต้องใกล้เคียงกับการทดลองแบบทีละปัจจัย ในทำนองเดียวกัน จากการทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 4 ที่กล่าวมานี้ ก็สามารถหาผลที่เกิดจากปัจจัย B ได้เช่นกัน ดังนั้น ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลต่อการทดลองทีละปัจจัยมีค่าเป็น 6/4 = 1.5 ซึ่งตามปกติแล้ว ค่าประสิทธิภาพสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนของปัจจัยเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.35



ภาพที่ 2.35 ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ระหว่างการทดลองแบบแฟกทอเรียลต่อการทดลองแบบทีละปัจจัย

สมมติว่าในการทดลองนี้มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยเกิดขึ้น ถ้าการทดลองแบบทีละปัจจัยได้ผลออกมาว่า ผลตอบของ A^-B^+ และ A^+B^- ดีกว่า A^-B^- แล้ว ข้อสรุปก็ควรจะเป็นว่า ผลตอบของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$A^{+}B^{+}$ ควรจะดียิ่งกว่านั้นอีก แต่จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วว่า เมื่อใดก็ตามที่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยเกิดขึ้น ข้อสรุปเช่นนี้อาจจะนำไปสู่ความผิดพลาดอย่างใหญ่หลวงได้

สรุปก็คือ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ และเป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองแบบทีละปัจจัย ยิ่งกว่านั้นแล้วการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลยังเป็นสิ่งที่จำเป็นเมื่อมีอันตรกิริยาเกิดขึ้น ซึ่งกรณีเช่นนี้ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ นอกจากนั้นแล้วการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลทำให้สามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยอื่นได้ ทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลชนิดที่ง่ายที่สุดจะเกี่ยวข้องกับปัจจัย 2 ปัจจัย คือ A และ B ปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในรูปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล นั่นคือ ในแต่ละเรพลิเคตของการทดลองจะประกอบด้วยการทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด ab การทดลอง และโดยปกติจะมีจำนวนเรพลิเคตทั้งหมด n ครั้ง

โดยกำหนดให้ y_{ijk} คือผลตอบที่สังเกตได้เมื่อปัจจัย A อยู่ที่ระดับ i (i = 1,2, ., a) และปัจจัย B อยู่ที่ระดับ j (j = 1, 2, ..., b) สำหรับเรพลิเคตที่ k (k = 1, 2, ..., n) รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.7 เนื่องจากลำดับของการสังเกตทั้ง abn ครั้งถูกเลือกมาอย่างสุ่ม ดังนั้น การออกแบบเช่นนี้เรียกว่า การออกแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely Randomized Design)

ตารางที่ 2.7 รูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย

		Factor B			
		1	2	...	b
Factor A	1	$y_{111}, y_{112}, ..., y_{11n}$	$y_{121}, y_{122}, ..., y_{12n}$		$y_{1b1}, y_{1b2}, ..., y_{1bn}$
	2	$y_{211}, y_{212}, ..., y_{21n}$	$y_{221}, y_{222}, ..., y_{22n}$		$y_{2b1}, y_{2b2}, ..., y_{2bn}$
	. . .				
	a	$y_{a11}, y_{a12}, ..., y_{a1n}$	$y_{a21}, y_{a22}, ..., y_{a2n}$		$y_{ab1}, y_{ab2}, ..., y_{abn}$

ข้อมูลจากการทดลองอาจจะเขียนในรูปของแบบจำลองสถิติเชิงเส้น (Linear Statistical Model) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \ldots, a \\ j = 1, 2, \ldots, b \\ k = 1, 2, \ldots, n \end{cases} \tag{2.7}$$

โดยที่ μ หมายถึง ผลเฉลี่ยทั้งหมด: τ_i หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ i ของแถว (Row) ของปัจจัย A; β_j หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ j ของคอลัมน์ (Column) ของปัจจัย B; $(\tau\beta)_{ij}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ β_j และ ε_{ijk} หมายถึง องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม สมมติว่าปัจจัยทั้งคู่มีค่าตายตัว (Fixed) และผลจากการทดลอง (Treatment Effect) หมายถึง ส่วนที่เบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยทั้งหมด ดังนั้น $\sum_{i=1}^{a}\tau_i = 0$ และ $\sum_{j=1}^{b}\beta_j = 0$ ในทำนองเดียวกันสมมติว่าผลที่เกิดจากอันตรกิริยามีค่าตายตัว และกำหนดว่า $\sum_{i=1}^{a}(\tau\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^{b}(\tau\beta)_{ij} = 0$ เนื่องจากในการทดลองครั้งนี้มีจำนวนเรพลิเคต n ครั้ง ดังนั้น จำนวนข้อมูลที่ได้จากการสังเกตทั้งหมดเท่ากับ abn

ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย ทั้งปัจจัยที่เกิดจาก A (แถว) และ B (คอลัมน์) มีความสำคัญเท่ากัน ดังนั้นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความเท่ากันของผลที่เกิดจากปัจจัย A คือ

$$\begin{aligned} &H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \ldots = \tau_a = 0 \\ &H_1 : \text{at least one } \tau_i \neq 0 \end{aligned} \tag{2.8}$$

และความเท่ากันของผลที่เกิดจากปัจจัย B

$$\begin{aligned} &H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \ldots = \beta_b = 0 \\ &H_1 : \text{at least one } \beta_j \neq 0 \end{aligned} \tag{2.9}$$

นอกจากนั้นแล้ว ต้องพิจารณาถึงอันตรกิริยาที่เกิดระหว่างปัจจัย A และ B มีนัยสำคัญหรือไม่ หรือกล่าวได้ว่า

$$\begin{aligned} &H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \\ &H_1 : \text{ at least one } (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \end{aligned} \qquad \text{for all i, j} \tag{2.10}$$

การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับ Fixed Effects Model

กำหนดให้ $y_{i..}$ เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้ระดับที่ i ของปัจจัย A; $y_{.j.}$ เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้ระดับที่ j ของปัจจัย B; $y_{ji.}$ เป็นค่าผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้เซลล์ตำแหน่งที่ ij; และ $y_{...}$ เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดที่ได้ กำหนดให้ $\bar{y}_{i..}, \bar{y}_{.j.}, \bar{y}_{ij.}$, และ $\bar{y}_{...}$ เป็นค่าเฉลี่ยของแถว คอลัมน์ เซลล์ และผลรวมทั้งหมด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y_{i..}=\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n}y_{ijk} \qquad \bar{y}_{i..}=\frac{y_{i..}}{bn} \qquad i=1,2,...,a$$
$$y_{.j.}=\sum_{i=1}^{a}\sum_{k=1}^{n}y_{ijk} \qquad \bar{y}_{.j.}=\frac{y_{.j.}}{an} \qquad j=1,2,...,b \tag{2.11}$$
$$y_{ij.}=\sum_{k=1}^{n}y_{ijk} \qquad \bar{y}_{i..}=\frac{y_{i..}}{bn} \qquad i=1,2,...,a$$
$$y_{...}=\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n}y_{ijk} \qquad \bar{y}_{...}=\frac{y_{...}}{abn} \qquad j=1,2,...,b$$

ค่าของผลรวมแก้ไขแล้วทั้งหมดของกำลังสองสามารถเขียนได้เป็น

$$\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n}\left(y_{ijk}-\bar{y}_{...}\right)^2=\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n}\left[\left(\bar{y}_{i..}-\bar{y}_{...}\right)+\left(\bar{y}_{.j.}-\bar{y}_{...}\right)+\left(\bar{y}_{ij.}-\bar{y}_{i..}-\bar{y}_{.j.}+\bar{y}_{...}\right)+\left(y_{ijk}-\bar{y}_{ij.}\right)\right]^2$$
$$=bn\sum_{i=1}^{a}\left(\bar{y}_{i..}-\bar{y}_{...}\right)^2+an\sum_{j=1}^{b}\left(\bar{y}_{.j.}-\bar{y}_{...}\right)^2+n\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\left(\bar{y}_{ij.}-\bar{y}_{i..}-\bar{y}_{.j.}+\bar{y}_{...}\right)^2$$
$$+\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n}\left(y_{ijk}-\bar{y}_{ij.}\right)^2 \tag{2.12}$$

สังเกตได้ว่า ค่าผลรวมทั้งหมดของกำลังสองจะถูกแบ่งออกเป็นผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากแถว (ปัจจัย A); ผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากคอลัมน์ (ปัจจัย B); ผลรวมของกำลังสองที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่าง A และ B (SS_{AB}); และผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาด (SS_E) และจากพจน์สุดท้ายของสมการ 2.12 จะเห็นว่า จะต้องมีอย่างน้อย 2 เรพลิเคตเพื่อที่จะทำให้สามารถคำนวณ หาค่าผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาดได้ ดังนั้นสามารถเขียนสมการ 2.12 ได้ใหม่เป็น

$$SS_T=SS_A+SS_B+SS_{AB}+SS_E \tag{2.13}$$

จำนวนของระดับขั้นความเสรีสำหรับผลรวมของกำลังสองแต่ละค่าคือ

Effect	Degrees of Freedom
A	a – 1
B	b – 1
AB interaction	(a – 1)(b – 1)
Error	ab(n – 1)
Total	abn – 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าของผลรวมของกำลังสองมาหารด้วยระดับขั้นความเสรีก็จะได้ค่าของค่ากำลังสองเฉลี่ย โดยที่ค่าคาดหมาย (Expected Value) ของค่ากำลังสองเฉลี่ยคือ

$$E(MS_A) = E\left(\frac{SS_A}{a-1}\right) = \sigma^2 + \frac{bn\sum_{i=1}^{a}\tau_i^2}{a-1}$$

$$E(MS_B) = E\left(\frac{SS_B}{b-1}\right) = \sigma^2 + \frac{an\sum_{j=1}^{b}\beta_j^2}{b-1} \qquad (2.14)$$

$$E(MS_{AB}) = E\left(\frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}\right) = \sigma^2 + \frac{n\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}(\tau\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)}$$

$$E(MS_E) = E\left(\frac{SS_E}{ab(n-1)}\right) = \sigma^2$$

สังเกตว่า ถ้าสมมติฐานว่าง (Null Hypothesis) ที่ว่าไม่มีผลเนื่องจากปัจจัยของแถวคอลัมน์และอันตรกิริยามีค่าเป็นจริง ดังนั้น MS_A, MS_B, MS_{AB}, และ MS_E จะมีค่าประมาณเท่ากับ σ^2 อย่างไรก็ตาม ถ้ามีความแตกต่างเนื่องจากปัจจัยของแถว จะได้ว่า MS_A จะมีค่ามากกว่า MS_E เหตุการณ์ทำนองเดียวกันจะเกิดขึ้นกับ MS_B และ MS_{AB} เช่นกัน ดังนั้น ในการทดสอบความมีนัยสำคัญของผลหลักและอันตรกิริยา สามารถหาโดยหารค่ากำลังสองเฉลี่ยที่เกี่ยวข้องด้วยค่า MS_E และถ้าอัตราส่วนนี้มีค่ามาก หมายความว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองไม่สนับสนุนสมมติฐานว่าง (ปฏิเสธสมมติฐานว่าง)

ถ้าสมมติว่าแบบจำลองตามสมการที่ 2.7 เป็นแบบจำลองที่เหมาะสม และพจน์ของความผิดพลาด ε_{ijk} มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระ โดยมีค่าความแปรปรวนคงตัวเท่ากับ σ^2 ดังนั้นอัตราส่วนของค่ากำลังสองเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจาก MS_A/MS_E, MS_B/MS_E, และ MS_{AB}/MS_E จะมีการกระจายแบบ F ซึ่งมีระดับขั้นความเสรีของตัวตั้งเป็น a-1, b-1, และ (a-1)(b-1) และมีระดับขั้นความเสรีของตัวหารคือ ab(n-1) ค่าบริเวณวิกฤติ (Critical Region) คือปลายหางด้านบนของการกระจายแบบ F วิธีการทดสอบจะทำโดยอาศัยตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ตัวแปรแบบ Fixed Effects Model

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F_0
A treatments	SS_A	a-1	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B treatments	SS_B	b-1	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
Interaction	SS_{AB}	(a-1)(b-1)	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E	ab(n-1)	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$	
Total	SS_T	abn-1		

เพื่อให้คำนวณได้ง่าย สามารถหาค่าของ SST, SSA, และ SSE ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n} y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \tag{2.15}$$

$$SS_A = \frac{1}{bn}\sum_{i=1}^{a} y_{i..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \tag{2.16}$$

$$SS_B = \frac{1}{an}\sum_{j=1}^{b} y_{.j.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \tag{2.17}$$

$$SS_{Subtotals} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} y_{ij.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \tag{2.18}$$

$$SS_{AB} = SS_{Subtotals} - SS_A - SS_B \tag{2.19}$$

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B \tag{2.20}$$

หรือ

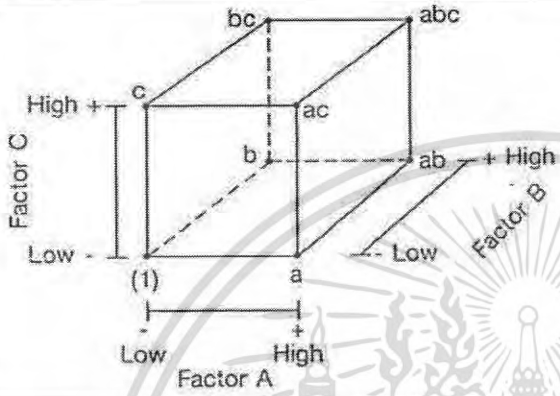
$$SS_E = SS_T - SS_{Subtotals} \tag{2.21}$$

การออกแบบ 2^3

ในตอนนี้สมมติว่ามีปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ การออกแบบเช่นนี้เรียกว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 ซึ่งการทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 8 จะมีลักษณะทางเรขาคณิตเป็นรูปลูกบาศก์ ดังแสดงในภาพที่ 2.36a ในที่นี้ยังคงใช้เครื่องหมาย + และ − แทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับสูงและต่ำของปัจจัยเช่นเดิม รายการทั้ง 8 ของการทดลองร่วมปัจจัยที่เกิดจากการออกแบบ 2^3 สามารถเขียนได้ดังภาพที่ 2.36b ซึ่งจะเรียกว่า เมทริกซ์การออกแบบ (Design Matrix) ซึ่งสามารถเขียนลำดับมาตรฐานของการทดลองร่วมปัจจัยที่จะเกิดขึ้นทั้งหมดได้เป็น (1), a, b, ab, c, ac, bc, และ abc โดยสัญลักษณ์เหล่านี้แทนผลรวมทั้งหมดของ n ข้อมูลที่เกิดขึ้นที่การทดลองร่วมปัจจัยแต่ละตัว



	Factor		
Run	A	B	C
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

(a) (b)

ภาพที่ 2.36 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3

จำนวนของระดับขั้นความเสรีสำหรับการทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 8 ของการออกแบบ 2^3 เท่ากับ 7 ซึ่งประกอบด้วย 3 ระดับขั้นความเสรีสำหรับผลหลัก A, B, และ C และ 4 ระดับขั้นความเสรีสำหรับอันตรกิริยาที่เกิดจาก AB, AC, BC, และ ABC

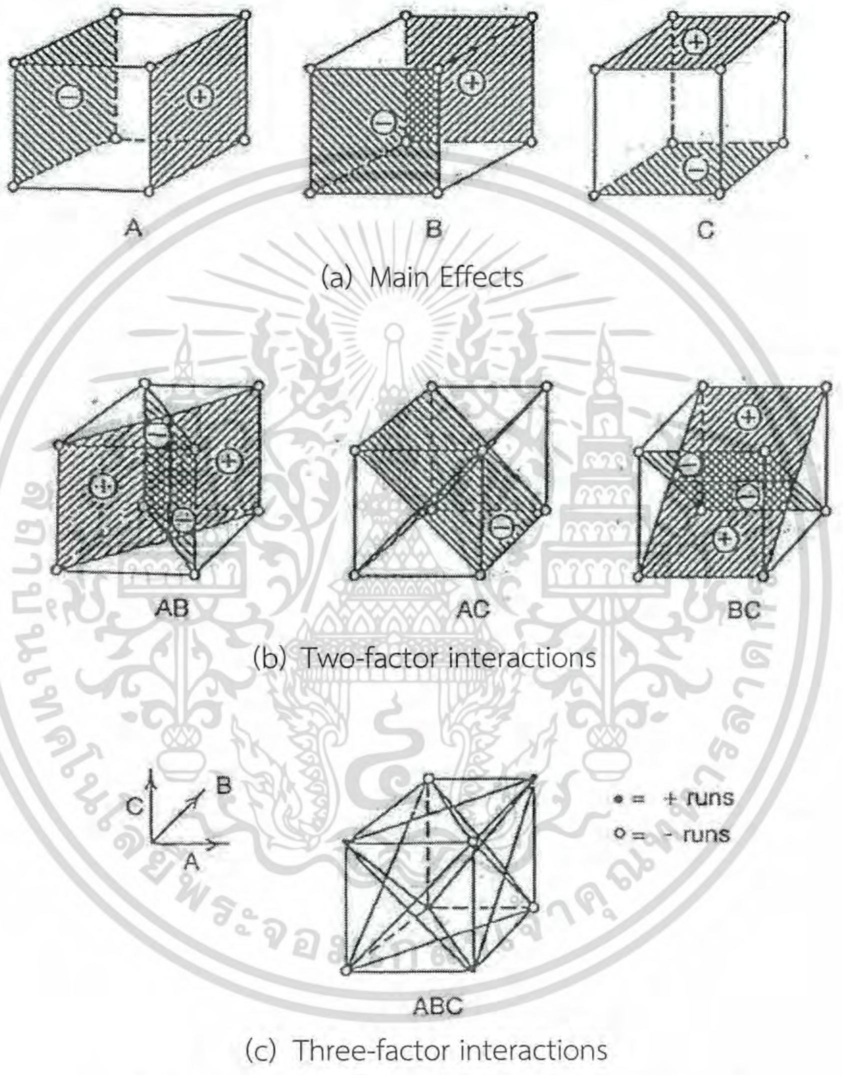
พิจารณาการประมาณผลหลัก อย่างแรก พิจารณาการประมาณผลหลักที่เกิดจาก A ผลของ A เมื่อ B และ C อยู่ที่ระดับต่ำคือ [a – (1)]/n ในทำนองเดียวกัน ผลของ A เมื่อ B อยู่ที่ระดับสูง และ C อยู่ที่ระดับต่ำคือ [ab – b]/n ผลของ A เมื่อ B อยู่ที่ระดับต่ำ และ C อยู่ที่ระดับสูงคือ [ac – c]/n สุดท้าย ผลของ A เมื่อทั้ง B และ C อยู่ที่ระดับสูงคือ [abc – bc]/n ดังนั้นค่าเฉลี่ยของผล A ก็คือค่าเฉลี่ยของผลย่อยทั้ง 4 นี้ หรือ

$$A = \frac{1}{4n}\left[a - (1) + ab - b + ac - c + abc - bc\right] \qquad (2.22)$$

สมการนี้สามารถเขียนในรูปของคอนแทรสต์ของการทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 4 ที่อยู่ทางด้านขวาของรูปลูกบาศก์ในภาพที่ 2.37a (A อยู่ที่ระดับสูง) และที่เหลืออีก 4 ที่อยู่ด้านซ้ายของรูปลูกบาศก์ (A อยู่ที่ระดับต่ำ) ดังนั้น ผลของ A ก็คือ ค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 4 ที่ A อยู่ที่ระดับสูง (หรือ $\bar{y}_{A^+}$) ลบด้วย ค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 4 ที่ A อยู่ที่ระดับต่ำ (หรือ $\bar{y}_{A^-}$) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} A &= \bar{y}_{A^+} - \bar{y}_{A^-} \\ &= \frac{a + ab + ac + abc}{4n} - \frac{(1) + b + c + bc}{4n} \\ &= \frac{1}{4n}\left[a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc\right] \end{aligned} \tag{2.23}$$



ภาพที่ 2.37 รูปเรขาคณิตของคอนแทรสต์ในการออกแบบ 2^3

ในทำนองเดียวกัน ผลของ B หาได้จากผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 4 ที่อยู่ทางด้านหน้าของรูปลูกบาศก์ กับการทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 4 ที่อยู่ทางด้านหลังของรูปลูกบาศก์ ซึ่งเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} B &= \bar{y}_{B^+} - \bar{y}_{B^-} \\ &= \frac{1}{4n}\left[b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac\right] \end{aligned} \tag{2.24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของ C หาได้จาก ผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 4 ที่อยู่ส่วนบนของรูปลูกบาศก์กับการทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 4 ที่อยู่ทางด้านล่างของรูปลูกบาศก์ ซึ่งเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} C &= \bar{y}_{c^+} - \bar{y}_{c^-} \\ &= \frac{1}{4n}\left[c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab\right] \end{aligned} \quad (2.25)$$

ผลของอันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัยสามารถคำนวณได้ไม่ยากนัก เช่น อันตรกิริยาระหว่าง A และ B จะหาได้จากผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลของ A ที่ระดับทั้งสองของ B และครึ่งหนึ่งของผลต่างนี้จะเป็นอันตรกิริยา AB ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

B	Average A Effect
High (+)	$\dfrac{\left[(abc - bc) + (ab - b)\right]}{2n}$
Low (-)	$\dfrac{\{(ac - c) + \left[a - (1)\right]\}}{2n}$
Difference	$\dfrac{\left[abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)\right]}{2n}$

เนื่องจากอันตรกิริยา AB คือ ครึ่งหนึ่งของผลต่างนี้

$$AB = \frac{\left[abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)\right]}{4n} \quad (2.26)$$

โดยสามารถเขียนสมการ 2.26 ได้ดังนี้

$$AB = \frac{abc + ab + c + (1)}{4n} - \frac{bc + b + ac + a}{4n} \quad (2.27)$$

ในสมการรูปแบบเช่นนี้ พบว่าอันตรกิริยา AB จะเป็นผลต่างของค่าเฉลี่ยของระนาบในแนวเส้นทแยงมุมทั้งสองในรูปลูกบาศก์ (ภาพที่ 2.37b) ใช้แนวคิดทำนองเดียวกับที่ได้กล่าวมาของ AB ซึ่งจะสามารถหาอันตรกิริยาของ AC และ BC ได้ดังนี้

$$AC = \frac{1}{4n}\left[(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc\right] \quad (2.28)$$

$$BC = \frac{1}{4n}\left[(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc\right] \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันตรกิริยา ABC คือ ค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างอันตรกิริยา AB ที่ระดับทั้งสองของ C ซึ่งก็คือ

$$
\begin{aligned}
ABC &= \frac{1}{4n}\left\{[abc-bc]-[ac-c]-[ab-b]+[a-(1)]\right\} \\
&= \frac{1}{4n}\left[abc-bc-ac+c-ab+b+a-(1)\right]
\end{aligned}
\qquad (2.30)
$$

เหมือนเช่นเดิม สามารถพิจารณาถึงอันตรกิริยา ABC ว่าเป็นผลต่างของค่าเฉลี่ยของสองจำนวน ซึ่งจำนวนทั้งสองนี้คือจุดยอดของรูปทรงสี่หน้าทั้งสองที่อยู่ในรูปลูกบาศก์นั้น (ภาพที่ 2.37c)

ในสมการ 2.22 ถึง 2.30 จำนวนที่อยู่ในวงเล็บคือคอนแทรสต์สำหรับการทดลองร่วมปัจจัยนั่นเอง ตารางเครื่องหมายบวกและลบสามารถสร้างได้จากคอนแทรสต์ดังแสดงในตารางที่ 2.9 เครื่องหมายของผลหลักหาได้จากค่าบวกและลบที่กำหนดขึ้นเหล่านี้ เมื่อเครื่องหมายของผลหลักได้ถูกกำหนดขึ้นแล้วเครื่องหมายสำหรับคอลัมน์ที่เหลือจะหาได้จากการนำเอาคอลัมน์ที่เกี่ยวข้องมาคูณกันทีละแถวตัวต่อตัว ตัวอย่างเช่น เครื่องหมายของคอลัมน์ AB คือผลคูณของเครื่องหมายของคอลัมน์ A และ B ในแต่ละแถวและคอนแทรสต์จะสามารถหาได้โดยง่ายจากตารางที่กล่าวมานี้

ตารางที่ 2.9 เครื่องหมายทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณผลของการออกแบบ 2^3

Treatment Combination	Factorial Effect							
	I	A	B	AB	C	AC	BC	ABC
(1)	+	-	-	+	-	+	+	-
a	+	+	-	-	-	-	+	+
b	+	-	+	-	-	+	-	+
ab	+	+	+	+	-	-	-	-
c	+	-	-	+	+	-	-	+
ac	+	+	-	-	+	+	-	-
bc	+	-	+	-	+	-	+	-
abc	+	+	+	+	+	+	+	+

ตารางที่ 2.8 มีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายประการ คือ (1) ยกเว้นคอลัมน์ I ทุกๆ คอลัมน์จะมีจำนวนของเครื่องหมายบวกและลบเท่ากัน; (2) ผลบวกของผลคูณของเครื่องหมายที่เกิดจากสองคอลัมน์ใดๆ จะมีค่าเท่ากับ 0; (3) เมื่อเอาคอลัมน์ I ไปคูณกับคอลัมน์ใดๆ ก็ตาม เครื่องหมายของคอลัมน์ที่นำมาคูณนั้นจะไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ I คือ ชิ้นประกอบของเอกลักษณ์ (Identity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Element); (4) ผลคูณของสองคอลัมน์ใดๆ จะให้ค่าเหมือนกับคอลัมน์หนึ่งในตาราง ตัวอย่างเช่น A x B = AB และ AB x B = AB^2 = A จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติที่กล่าวมาทั้งหมดได้ถูกกล่าวอย่างเป็นนัยมาแล้วจากลักษณะเชิงตั้งฉากของคอนแทรสต์ที่ใช้ในการประมาณผลที่เกิดขึ้น

ค่าผลรวมของกำลังสองของผลต่างๆ สามารถคำนวณได้โดยง่าย เพราะว่าผลแต่ละตัวจะมีระดับขั้นความเสรีของคอนแทรสต์เท่ากับ 1 ในการออกแบบ 2^3 ที่มี n เรพลิเคต ค่าผลรวมของกำลังสองสำหรับผลแต่ละตัวคือ

$$SS = \frac{(\text{Contrast})^2}{8n} \tag{2.31}$$

การเพิ่มจุดศูนย์กลางให้แก่การออกแบบ 2^k

ประการสำคัญในการใช้งานการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับคือ สมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของผลที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่าง ๆ แน่นอนว่าความเป็นเชิงเส้นอย่างบริบูรณ์แบบไม่ได้เป็นสิ่งจำเป็นมากมายนัก และระบบ 2^k ยังคงทำงานได้ค่อนข้างดีแม้ในกรณีที่สมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นเชิงเส้นจะเป็นได้เพียงโดยประมาณเท่านั้น ในความเป็นจริงแล้วสามารถสังเกตเห็นว่า ถ้าพจน์ของอันตรกิริยาถูกเติมเข้าไปในผลหลักหรือแบบจำลองขั้นแรก (First-Order Model) นั่นคือ

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^{k} \beta_j x_j + \sum\sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \tag{2.32}$$

ดังนั้น แบบจำลองนี้สามารถแสดงส่วนโค้งบางประการในฟังก์ชันของผลตอบ ส่วนโค้งนี้เกิดจากการบิดเบี้ยวของระนาบ (Plane) ที่ถูกทำให้เกิดขึ้นจากผลของอันตรกิริยา $\beta_{ij} x_i x_j$ นั่นเอง

มีบางกรณีเช่นกันที่ส่วนโค้งในฟังก์ชันผลตอบไม่เพียงพอที่จะสร้างสมการของแบบจำลองตามแบบข้างบนนี้ได้ ในกรณีเช่นนี้แบบจำลองที่เหมาะสมกว่าก็คือ

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^{k} \beta_j x_j + \sum\sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^{k} \beta_{jj} x_j^2 + \varepsilon \tag{2.33}$$

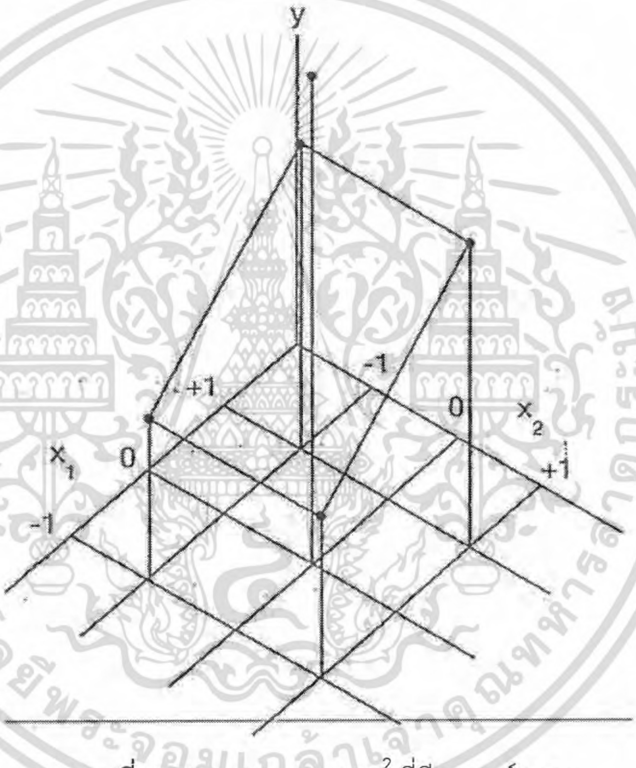
โดยที่ β_{jj} จะแสดงถึงผลขั้นที่สอง (Second-Order Effect) หรือผลแบบควอดราติก (Quadratic Effect) และสมการที่ 2.33 นี้เรียกว่า แบบจำลองพื้นผิวของผลตอบขั้นที่สอง (Second-Order Response Surface Model)

ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ สามารถใช้สมการของแบบจำลองขั้นแรกได้ แต่บางครั้งพบว่าแบบจำลองขั้นที่สองดูเหมาะสมกว่า ในกรณีเช่นนี้มีวิธีการเรพลิเคตการทดลองบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดในแฟกทอเรียล 2^k ที่จะให้การป้องกันส่วนโค้งที่เกิดจากผลขั้นที่สองนี้และนอกจากนั้นยังทำให้สามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดได้อย่างอิสระอีกด้วย วิธีการเช่นนี้เกิดจากการเติมจุดศูนย์กลางให้แก่การออกแบบ 2^k และจะทำการทดลองจำนวน n เรพลิเคตที่จุด $x_i = 0$ (i=1,2,...,k) เหตุผลของการเติมการทดลองเช่นนี้เข้าไปก็คือ จุดศูนย์กลางที่เติมเข้าไปนี้ไม่ได้ส่งผลต่อการประมาณค่าผลปกติของการออกแบบ 2^k แต่ประการใด เมื่อเติมจุดศูนย์กลางเข้าไปเช่นนี้ จะสามารถสมมติให้ปัจจัยทั้ง k ตัวนี้เป็นข้อมูลเชิงปริมาณ

เพื่อแสดงวิธีการดังกล่าว พิจารณาการออกแบบ 2^2 ที่มีข้อมูล 1 ตัวที่แต่ละจุดของแฟกทอเรียล (-,-), (+,-),(-,+) และ (+,+) และมีข้อมูลที่จุดศูนย์กลาง (0,0) อยู่ n_c ตัว ภาพที่ 2.38 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบเช่นนี้



ภาพที่ 2.38 การออกแบบ 2^2 ที่มีจุดศูนย์กลาง

กำหนดให้ $\bar{y}_F$ เป็นค่าเฉลี่ยของการทดลอง 4 ค่าที่จุดทั้ง 4 ของแฟกทอเรียล และกำหนดให้ $\bar{y}_C$ เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูล n_c ที่จุดกึ่งกลาง ถ้าผลต่างระหว่าง $\bar{y}_F - \bar{y}_C$ มีค่าน้อย จุดศูนย์กลางนี้จะอยู่บนหรือใกล้กับระนาบที่ผ่านจุดของแฟกทอเรียล และจะไม่มีส่วนโค้งแบบควอดราติก ค่าผลรวมของกำลังสองสำหรับส่วนโค้งแบบควอดราติกบริสุทธิ์ (Pure Quadratic Curvature) ซึ่งมีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ 1 หาได้จาก

$$SS_{\text{Pure quadratic}} = \frac{n_F n_C \left(\bar{y}_F - \bar{y}_C\right)^2}{n_F + n_C} \qquad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ n_F คือจำนวนของจุดในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล ค่านี้อาจจะถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบกับค่าผิดพลาดของกำลังสองเฉลี่ยเพื่อที่จะทดสอบความเป็นส่วนโค้งแบบบริสุทธิ์ ยิ่งกว่านั้นเมื่อเติมจุดเข้าไปที่จุดศูนย์กลางของการออกแบบ 2^k การทดสอบส่วนโค้งดังสมการที่ 2.34 ก็คือการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับ

$$H_0 : \sum_{j=1}^{k} \beta_{jj} = 0$$

$$H_1 : \sum_{j=1}^{k} \beta_{jj} \neq 0$$

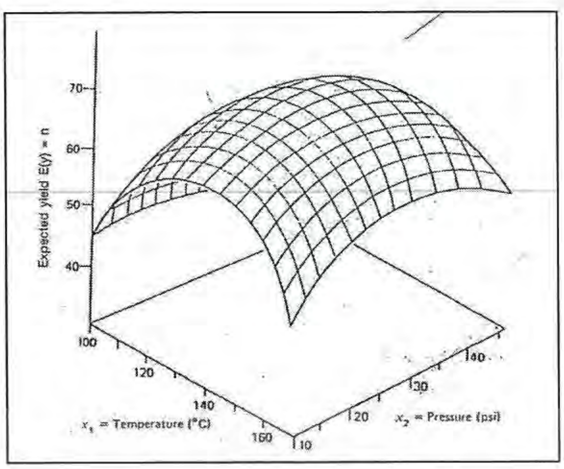
ยิ่งกว่านั้นถ้าจุดของแฟกทอเรียลในการออกแบบเป็นแบบไม่มีเรพลิเคต สามารถใช้จุดศูนย์กลาง n_c นี้ในการสร้างตัวประมาณของความผิดพลาดซึ่งมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $n_c - 1$ ขึ้นได้อีกด้วย

พื้นผิวผลตอบ

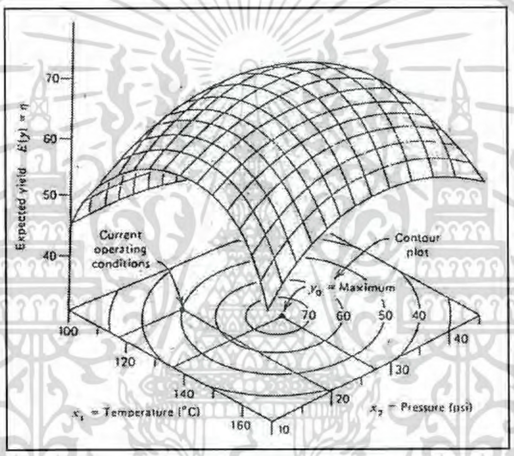
วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร อีกทั้งมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้ ตัวอย่างเช่น สมมติว่าวิศวกรเคมีคนหนึ่งต้องการที่จะหาระดับของอุณหภูมิ (x_1) และความดัน (x_2) ที่จะทำให้ผลผลิตของกระบวนการมีค่ามากที่สุด ซึ่งผลผลิตของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับของอุณหภูมิและความดัน กล่าวคือ $y = f(x_1, x_2) + \varepsilon$ โดยที่ ε คือค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดว่า $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้น จะสามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ $\eta = f(x_1, x_2)$ ซึ่งเรียกว่า “พื้นผิวผลตอบ (Response Surface)”

โดยมากแล้วพื้นผิวผลตอบจะแสดงในรูปแบบของกราฟิกดังตัวอย่างในภาพที่ 2.39 โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น แต่โดยส่วนใหญ่จะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบดังแสดงในภาพที่ 2.40 ในการสร้างเส้นโครงร่างเช่นนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ x_1 และ x_2 เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.39 พื้นผิวผลตอบแบบสามมิติ



ภาพที่ 2.40 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบส่วนมาก จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ ดังนั้น ขั้นตอนแรกก็คือ จะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซ็ตของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำ ๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ก็คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \ldots + \beta_k x_k + \varepsilon \qquad (2.35)$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y=\beta_0+\sum_{i=1}^{k}\beta_i x_i+\sum_{i=1}^{k}\beta_{ii}x_i^2+\sum\sum_{i<j}\beta_{ij}x_i x_j+\varepsilon \qquad (2.36)$$

การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบกำลังสอง

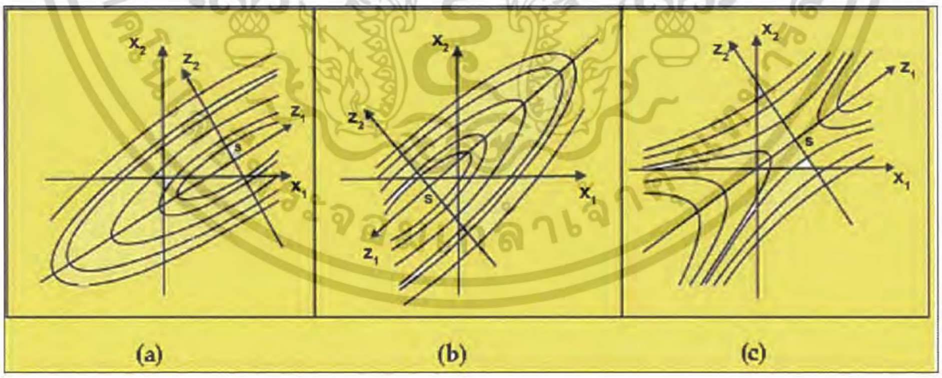
เมื่อผู้ทำการทดลองอยู่ที่จุดใกล้เคียงกับจุดที่ดีที่สุด แบบจำลองที่สามารถแสดงส่วนโค้งได้จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าของผลตอบ ส่วนมากแบบจำลองกำลังสองจะมีรูปแบบดังนี้

$$y=\beta_0+\sum_{i=1}^{k}\beta_i x_i+\sum_{i=1}^{k}\beta_{ii}x_i^2+\sum\sum_{i<j}b_{ij}x_i x_j+\varepsilon \qquad (2.37)$$

ซึ่งแบบจำลองนี้จะมีความพอเพียง ในส่วนต่อไปนี้จะแสดงให้เห็นถึงการสร้างแบบจำลองกำลังสอง เพื่อที่จะนำไปสู่การหาเซ็ตของเงื่อนไขในการทำงานที่ดีที่สุดต่อไป

ตำแหน่งของจุดหยุดนิ่ง

สมมติว่าต้องการที่จะหาระดับของ x_1 , x_2 ..., x_k ที่จะทำให้ผลตอบแทนมีค่าดีที่สุด จุดนี้ถ้ามีอยู่จริงจะหมายถึงเซ็ตของจุด x_1 , x_2 ..., x_k ที่มีค่าของอนุพันธ์แบบบางส่วน (Partial Derivative) $\partial\hat{y}/\partial X_1=\partial\hat{y}/\partial X_2=\ldots=\partial\hat{y}/\partial X_k=0$) และจะเรียกจุดเหล่านี้ $x_{1.S}$, $x_{2.S}$ ..., $x_{k.S}$ ว่า จุดหยุดนิ่ง (Stationary Point) จุดหยุดนิ่งสามารถใช้ในการแทน (1) จุดที่มีค่าผลตอบแทนสูงสุด, (2) จุดที่มีค่าผลตอบต่ำสุด, หรือ (3) จุดอานม้า (Saddle Point) ซึ่งทั้งสามทางที่เป็นไปได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.41



ภาพที่ 2.41 จุดหยุดนิ่งที่ถูกสร้างขึ้นจากพื้นผิวผลตอบกำลังสอง (a) ผลตอบมากที่สุด, (b)ผลตอบน้อยที่สุด, (c)จุดอานม้า

กราฟโครงร่าง (Contour Plot) มีความสำคัญมากในการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ การใช้ซอฟต์แวร์สำหรับสร้างกราฟโครงร่างของพื้นผิวผลตอบขึ้นมาจะทำให้ทราบถึงรูปร่างของพื้นผิวและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งของจุดที่ดีที่สุดได้ค่อนข้างแม่นยำ ซึ่งอาจจะหาคำตอบทั่วไปทางคณิตศาสตร์สำหรับตำแหน่งของจุดหยุดนิ่ง (Stationary Point) ได้โดยการเขียนแบบจำลองกำลังสองในรูปแบบเมทริกซ์ได้คือ

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + x'b + x'Bx \tag{2.38}$$

โดยที่

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} \quad \text{and } B = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_{11} & \hat{\beta}_{12}/2 & \dots & \hat{\beta}_{1k}/2 \\ & \hat{\beta}_{22} & \dots & \hat{\beta}_{2k}/2 \\ & & \ddots & \\ & \text{sym.} & & \hat{\beta}_{kk} \end{bmatrix}$$

ลักษณะสมบัติของพื้นผิวผลตอบ

เมื่อหาจุดหยุดนิ่งได้แล้ว การหาลักษณะสมบัติของพื้นผิวผลตอบในบริเวณใกล้เคียงกับจุดนี้มีความสำคัญอย่างยิ่ง นั่นคือ ต้องหาว่าจุดหยุดนิ่งนี้เป็นจุดสูงสุดหรือต่ำสุดหรือเป็นจุดอานม้า (Saddle Point) นอกจากนั้นยังต้องการศึกษาถึงความไวของผลตอบกับตัวแปร x_1 , x_2 ..., x_k

เหมือนกับที่ได้กล่าวก่อนหน้านี้ วิธีการแบบตรงไปตรงมาที่จะหาจุดเหล่านี้ก็คือการดูจากกราฟโครงร่างของแบบจำลอง ถ้ามีในการทดลองนั้นมีตัวแปรของกระบวนการเพียงแค่ 2 หรือ 3 ตัว การสร้างและการตีความหมายของกราฟโครงร่างนี้จะค่อนข้างง่าย อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าจะมีตัวแปรเพียงแค่ 2 หรือ 3 ตัวก็ตาม การวิเคราะห์อย่างเป็นทางการที่เรียกว่า การวิเคราะห์แบบบัญญัติ (Canonical Analysis) ก็สามารถนำมาใช้ได้เช่นกัน

จะเป็นการช่วยการวิเคราะห์เป็นอย่างมากถ้ามีการแปลงรูปของแบบจำลองไปสู่ระบบพิกัดที่มีจุดเริ่มต้นอยู่ที่จุดหยุดนิ่ง x_S และหลังจากนั้นก็หมุนแกนของระบบนี้จนกระทั่งมันขนานกับแกนหลัก (Principle Axis) ของพื้นผิวผลตอบที่สร้างขึ้นมาซึ่งสามารถแสดงได้ว่าผลของการแปลงรูปนี้จะทำให้ได้แบบจำลองคือ

$$\hat{y} = \hat{y}_s + \lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2 \tag{2.39}$$

โดยที่ $\{w_i\}$ คือตัวแปรอิสระที่ถูกแปลงรูป และ $\{\lambda_i\}$ คือค่าคงตัว สมการ 2.39 เรียกว่ารูปแบบแบบบัญญัติของแบบจำลอง ยิ่งกว่านั้น $\{\lambda_i\}$ จะหมายถึงค่าเฉพาะ หรือ รากลักษณะ (Characteristic Roots) ของเมทริกซ์ B

ธรรมชาติของพื้นผิวผลตอบสามารถที่จะหาได้จากจุดหยุดนิ่งและเครื่องหมายและขนาดของ $\{\lambda_i\}$ ประการแรกสมมติว่าจุดหยุดนิ่งอยู่ภายใต้บริเวณของการสำรวจเพื่อที่จะสร้างแบบจำลองกำลังสอง ถ้า $\{\lambda_i\}$ ทั้งหมดมีค่าเป็นบวก ดังนั้น X_S จะเป็นจุดที่มีผลตอบมากที่สุด แต่ถ้า $\{\lambda_i\}$ ทั้งหมดมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเป็นลบ ดังนั้น X_S จะเป็นจุดที่มีผลตอบแทนน้อยสุด และถ้า $\{\lambda_i\}$ ต่าง ๆ มีเครื่องหมายต่างกัน ดังนั้น X_S จะเป็นจุดอานม้า ยิ่งกว่านั้นพื้นผิวจะมีความชันสูงสุดในทิศทางของ w_i ซึ่งทำให้ $|\lambda_i|$ มีค่าสูงสุด

การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

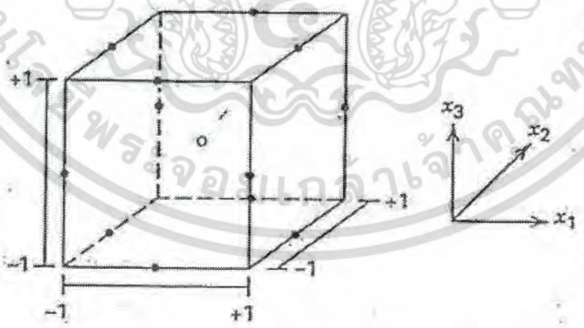
การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับฟิตพื้นผิวผลตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.10 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนที่มีตัวแปร 3 ตัว รูปทางเรขาคณิตของการออกแบบแสดงให้เห็นในภาพที่ 2.42 สังเกตว่า การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลม ที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี $\sqrt{2}$ นอกจากนั้น การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนไม่ได้รวมเอาจุดใด ๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ การกระทำเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือ การรวมของปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปไม่ได้ที่จะทำการทดลอง เนื่องจากข้อจำกัดในด้านกายภาพของกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.10 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแบบสามตัวแปร

Run	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0



ภาพที่ 2.42 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนสำหรับสามตัวแปร

ฟังก์ชันความพึงพอใจ

ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability function) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของผลตอบหลายตัวโดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในเวลาเดียวกัน ซึ่งทำให้เป็นที่นิยมโดย Derringer และ Suich ในปี 1980 แนวทางการศึกษาคือแปลงค่าผลตอบ y_i แต่ละตัวให้เป็นฟังก์ชันความพึงพอใจเฉพาะ (Individual desirability functions) หรือ d_i ซึ่งมีการผันแปรในขอบเขต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$0 \le d_i \le 1$ โดยถ้าค่าผลตอบ y_i อยู่ที่ค่าเป้าหมาย ค่า d_i จะมีค่าเท่ากับ 1 และถ้าค่าผลตอบอยู่นอกขอบเขตที่ยอมรับได้ ค่า d_i จะมีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นตัวแปรการออกแบบจะถูกเลือกเพื่อให้มีความพึงพอใจโดยรวม (Overall desirability) สูงที่สุด ดังสมการที่ 2.40 [28]

$$D = (d_1 \cdot d_2 \cdot \ldots \cdot d_m)^{1/m} \tag{2.40}$$

โดยมีจำนวนผลตอบเท่ากับ m ผลตอบ ถ้ามีค่าผลตอบเพียงหนึ่งตัวที่ไม่เป็นที่พอใจ ก็จะทำให้ความพึงพอใจโดยรวมมีค่าเท่ากับ 0

รูปแบบของฟังก์ชันความพึงพอใจเฉพาะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.43 ถ้าค่าเป้าหมายสำหรับผลตอบ y คือค่าที่มากที่สุด จะได้ค่า d ดังสมการที่ 2.41

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\dfrac{y-L}{T-L}\right)^r & L \le y \le T \\ 1 & y > T \end{cases} \tag{2.41}$$

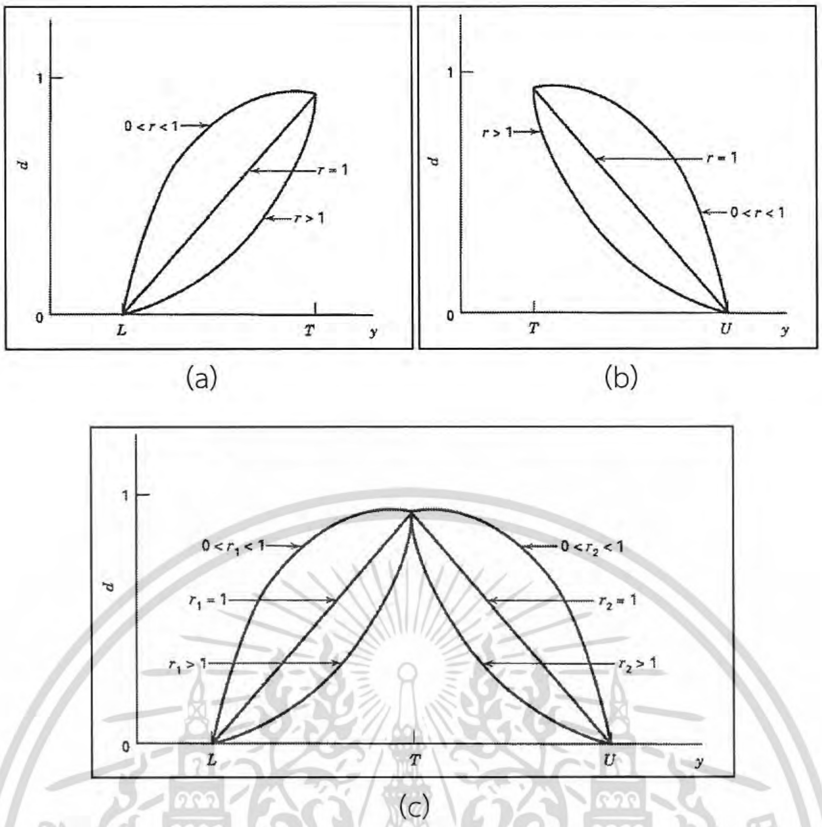
เมื่อค่าน้ำหนัก (Weight) $r = 1$ จะทำให้ฟังก์ชันความพึงพอใจเป็นแบบเชิงเส้น ถ้าเลือก $r > 1$ เป็นการเน้นย้ำว่าค่าเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย และการเลือก $0 < r < 1$ แสดงว่ามีความสำคัญน้อย ถ้าค่าเป้าหมายของผลตอบคือค่าที่น้อยที่สุด จะได้ค่า d ดังสมการที่ 2.42

$$d = \begin{cases} 1 & y < T \\ \left(\dfrac{U-y}{U-T}\right)^r & T \le y \le U \\ 0 & y > U \end{cases} \tag{2.42}$$

และฟังก์ชันความพึงพอใจแบบสองด้านจากภาพที่ 2.43 (c) สามารถสันนิษฐานได้ว่า ค่าเป้าหมายจะอยู่ระหว่างค่าต่ำสุด และค่าสูงสุด ซึ่งเขียนได้ดังสมการที่ 2.43

$$d = \begin{cases} 0 & y < T \\ \left(\dfrac{y-L}{T-L}\right)^{r_1} & L \le y \le T \\ \left(\dfrac{U-y}{U-T}\right)^{r_2} & T \le y \le U \\ 0 & y > U \end{cases} \tag{2.43}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.43 ฟังก์ชันความพึงพอใจเฉพาะสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในเวลาเดียวกัน (a) ค่าเป้าหมาย (Target) ที่ทำให้ค่า y มากที่สุด, (b) ค่าเป้าหมาย (Target) ที่ทำให้ค่า y น้อยที่สุด และ (c) ค่าเป้าหมาย (Target) ที่ทำให้ค่า y เข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L โดยใช้การออกแบบการทดลองเพื่อที่จะหาค่าตัวแปรการตัดที่เหมาะสมในการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมา โดยมีตัวแปรการตัด 3 ตัวแปร ได้แก่ ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current) ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height) และความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) เพื่อให้ได้ค่าความเรียบของพื้นผิวรอยตัดมีความหยาบผิวน้อยที่สุด ความถูกต้องของขนาดที่ได้ และมุมเอียงของชิ้นงานน้อยที่สุด โดยมีวิธีการและขั้นตอนดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 การเตรียมชิ้นงานในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L หนา 3 มิลลิเมตร ผลิตโดย WALSIN LIHWA CORP. ประเทศไต้หวัน โดยมีคุณลักษณะส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L ดังแสดงในตารางที่ 3.1

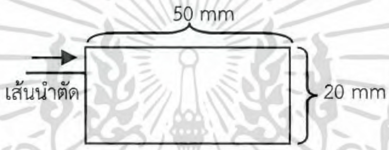
ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L ที่ผลิตโดย WALSIN LIHWA CORP.

Specification	Chemical Composition (Wt%)										
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	Others (Cu)	Fe
Min	0	0	0	0	0	10	16	2	0	N/A	Remains
Max	0.030	1	2	0.045	0.030	14	18	3	0.100	N/A	

จากนั้นทำการตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัดพลาสมา Hypertherm รุ่น Powermax 45 พร้อมหัวตัด T45m โดยระบบพลาสมาก๊าซและก๊าซปกคลุมที่ใช้คือ อากาศ/อากาศ ดังแสดงในภาพที่ 3.1 ทำการตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด (กว้างxยาว) 20x50 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3.1 เครื่องตัดพลาสมา Hypertherm รุ่น Powermax 45 พร้อมหัวตัด T45m



ภาพที่ 3.2 แบบชิ้นงาน

3.2 ขั้นตอนการทำวิจัย

3.2.1 การทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานของการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 1

ในการศึกษานี้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k เมื่อ k คือ จำนวนตัวแปรป้อนเข้าหรือตัวแปรที่ใช้ในการตัด ซึ่งในการทดลองนี้มีตัวแปรการตัดอยู่ 3 ตัวแปรด้วยกัน ได้แก่ ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current) ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height) และความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) ค่าหรือระดับของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยมีจำนวนการทดลองซ้ำ 3 ครั้งของแต่ละเงื่อนไข ดังนั้นมีจำนวนการทดลองทั้งสิ้น 24 การทดลอง

ตารางที่ 3.2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองครั้งที่ 1 ด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k

ปัจจัย	ระดับ/รหัส	
	1/-1	2/+1
1. Current (A)	40	45
2. Height (mm)	0.96	1.93
3. Speed (mm/sec)	40	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานของการตัดด้วยการเพิ่มระดับปัจจัยในระดับกลางทั้งหมด 5 การทดลองของการตัดพลาสมาครั้งที่ 2

จากนั้นจึงทำการทดลองอีกครั้งโดยเพิ่มระดับปัจจัยในระดับกลางทั้งหมด 5 การทดลอง (full factorial design 5 center point) ดังแสดงในตารางที่ 3.3 เพื่อเป็นการยืนยันว่าระดับปัจจัยในระดับกลางทำให้ค่าตอบสนองหรือผลของการศึกษาให้ค่าที่ดีขึ้น

ตารางที่ 3.3 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองด้วยการเพิ่มระดับปัจจัยในระดับกลางทั้งหมด 5 การทดลอง

ปัจจัย	ระดับ/รหัส
	1/0
1. Current (A)	42.5
2. Height (mm)	1.45
3. Speed (mm/sec)	45

3.2.3 การทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานของการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 3

หลังจากทำการเพิ่มระดับปัจจัยในระดับกลางจำนวน 5 การทดลอง และผลที่ออกมายืนยันได้ว่าทำให้ค่าตอบสนองมีค่าที่ดีขึ้น จากนั้นจึงทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ (Response surface methodology: RSM) โดยการใช้ตัวแบบการทดลอง Box-Behnken design ซึ่งในการทดลองนี้มีตัวแปรการตัดอยู่ 3 ตัวแปรด้วยกัน ได้แก่

ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current) ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height) และความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) ซึ่งตัวแปรป้อนเข้าและระดับของตัวแปรป้อนเข้าที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองครั้งที่ 3 ด้วยการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบโดยการใช้ตัวแบบการทดลอง Box-Behnken design

ปัจจัย	ระดับ/รหัส		
	1/-1	2/0	3/+1
1. Current (A)	40	42.5	45
2. Height (mm)	0.96	1.45	1.93
3. Speed (mm/sec)	40	45	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 ค่าตอบสนองที่เลือกใช้

ค่าตอบสนองที่เลือกใช้มีดังนี้

1. ความเรียบของพื้นผิวรอยตัดตามแนวความยาว 50 มิลลิเมตรจะต้องมีความหยาบผิวน้อยที่สุด เนื่องจากความหยาบผิวเป็นคุณลักษณะที่สำคัญอย่างยิ่งของผิวชิ้นงานที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการใช้งานหลายประการเช่น ความง่ายต่อการทำความสะอาด การสะท้อนแสงของผิว ความสามารถทนต่อการกัดกร่อน ความง่ายต่อการขึ้นรูป และความง่ายต่อการเคลือบผิว ยิ่งในงานที่ต้องการความละเอียดเที่ยงตรงสูง การวัดความหยาบผิวจึงสำคัญมากโดยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดผลตอบทางการศึกษานี้คือ เครื่องวัดความหยาบผิว

2. ความถูกต้องของขนาดที่ได้ต้องการให้ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากที่สุดซึ่งวัดด้านยาว 20 มิลลิเมตร เนื่องจากขนาดของชิ้นงานเป็นคุณลักษณะพื้นฐานที่สำคัญ เช่น การตัดโลหะเพื่อนำไปประกอบเป็นอุปกรณ์ใช้งาน ดังนั้นถ้าขนาดที่ไม่ถูกต้องก็จะมีผลต่อการใช้งาน โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดผลตอบทางการศึกษานี้คือ เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ มีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร

3. มุมเอียงของชิ้นงานก็ต้องมีมุมเอียงที่น้อยที่สุด เนื่องจากผิวรอยตัดที่ตรงเป็นมุมฉากก็มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เช่น การประกอบอุปกรณ์ใช้งาน ถ้าชิ้นงานมีรอยตัดที่เอียง ทำให้ประกอบชิ้นงานไม่แนบกัน ทำให้การใช้งานไม่ได้ประสิทธิภาพหรืออาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งานได้ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดผลตอบทางการศึกษานี้คือ ภาพถ่ายและโปรแกรม Autocad 2015

3.3 การวัดความหยาบผิว (Surface roughness: Ra)

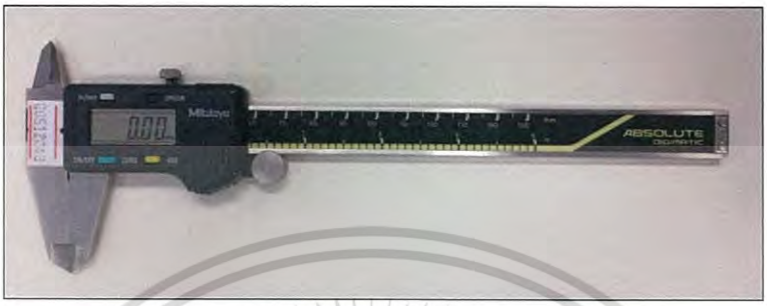
เมื่อตัดชิ้นงานตามเงื่อนไขทั้งหมดแล้ว จึงนำชิ้นงานที่ได้ไปวัดค่าความหยาบผิว (Ra) ตามแนวรอยตัดด้านยาว 50 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องวัดความหยาบผิว TOKYO SEIMITSU รุ่น SURFCOM 480A ดังแสดงในภาพที่ 3.3 เพื่อทำการวัดค่าความหยาบผิว (Ra) ที่ตำแหน่งผิวของชิ้นงานตามแนวรอยตัด ใช้ช่วงในการวัด (Stroke) เท่ากับ 2.5 mm ความเร็วในการวัดเท่ากับ 0.3 mm/s และ Cut-off Length เท่ากับ 0.25 mm ค่าความหยาบผิวที่ศึกษาในการทดลองนี้ คือ ค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลข (Arithmetic mean roughness: Ra) ซึ่งมีหน่วยเป็น μm

ภาพที่ 3.3 เครื่องวัดความหยาบผิว TOKYO SEIMITSU รุ่น SURFCOM 480A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวัดขนาดของชิ้นงาน

ขนาดชิ้นงาน (Dimension) สามารถวัดโดยใช้ Vernier Calipers แบบดิจิตอลของ Mitutoyo รุ่น ABSOLUTE DIGIMATIC ดังแสดงในภาพที่ 3.4 มีหน่วยการวัดเป็นมิลลิเมตร จุดทศนิยม 2 ตำแหน่งโดยมีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร วัดด้านกว้าง 20 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3.4 เครื่องมือวัดขนาดของชิ้นงานแบบดิจิตอลของ Mitutoyo รุ่น ABSOLUTE DIGIMATIC

3.5 การวัดมุมเอียงของชิ้นงาน

การวัดมุมเอียงของชิ้นงานตามแนวรอยตัด ได้ใช้การถ่ายภาพแล้วนำภาพถ่ายมาวัดมุมเอียงชิ้นงานด้วยโปรแกรม AutoCad 2015 ดังแสดงในภาพที่ 3.5

ภาพที่ 3.5 การวัดมุมเอียงของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลของกระบวนการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 1

ผลการทดลองของความเรียบของพื้นผิวรอยตัดตามแนวความยาว (Roughness) ความถูกต้องของขนาดที่ได้ (Dimension) และมุมเอียงของชิ้นงาน (Taper) ของกระบวนการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 1 ได้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k เมื่อ k คือ จำนวนตัวแปรป้อนเข้าหรือตัวแปรที่ใช้ในการตัด ซึ่งในการทดลองนี้มีตัวแปรการตัดอยู่ 3 ตัวแปรด้วยกัน ได้แก่ ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current) ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height) และความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) ซึ่งผลการทดลองได้แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของความเรียบของพื้นผิวรอยตัดตามแนวความยาว (Roughness) ความถูกต้องของขนาดที่ได้ (Dimension) และมุมเอียงของชิ้นงาน (Taper) ของการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 1

ตัวแปรที่ใช้ในการตัด			ผลการทดลอง								
Current (A)	Height (mm)	Speed (mm/s)	Roughness (μm)			Dimension (mm)			Taper (°)		
			Replicate			Replicate			Replicate		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
40	0.96	40	4.002	2.550	2.673	21.17	21.31	21.55	10.939	2.806	6.338
40	0.96	50	2.933	2.176	3.641	20.87	21.15	21.05	2.334	4.447	1.204
40	1.93	40	3.049	4.931	3.538	21.11	20.93	21.14	0.959	1.161	2.989
40	1.93	50	2.716	3.940	2.164	21.06	21.42	21.49	3.380	5.913	10.220
45	0.96	40	2.401	4.408	3.720	20.97	21.01	20.98	5.375	8.414	7.332
45	0.96	50	3.759	2.574	2.455	21.07	21.26	21.31	10.727	7.594	10.058
45	1.93	40	2.985	4.510	3.671	20.62	20.77	21.15	5.858	8.779	10.578
45	1.93	50	3.516	6.848	6.343	21.28	21.4	21.41	10.723	14.334	12.204

4.1.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองของความเรียบของพื้นผิวรอยตัด (Roughness)

จากผลทดลองสามารถนำค่าที่ได้นำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ดังตารางที่ 4.2 พบว่า ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height) มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัดที่ระดับนัยสำคัญ α = 0.05 หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากตัวแปรมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 โดยตัวแปรนี้มีอิทธิพลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัดของชิ้นงานมากที่สุดเนื่องจากมีค่า F-ratio สูงสุด ซึ่งผลที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

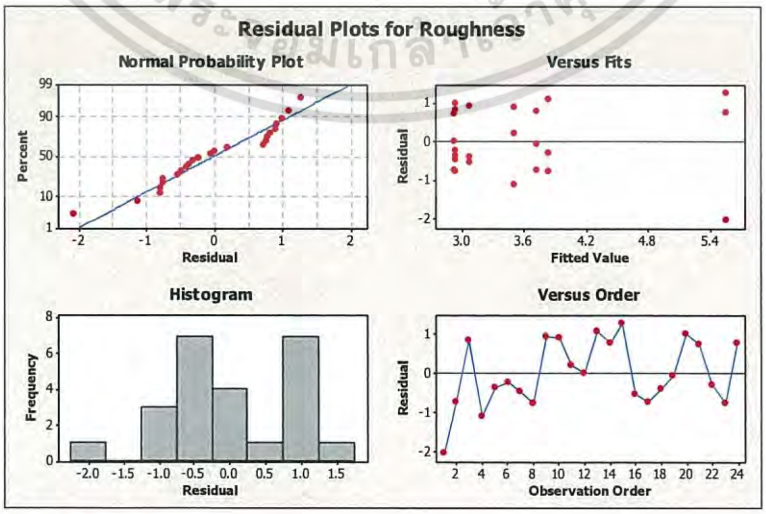
ออกมานั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Salonitis และ Vatousianos ที่ว่าระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานมีผลต่อความเรียบของชิ้นงาน [5]

เมื่อพิจารณาค่า R-Squared โดยมีค่าเท่ากับ 50.08% และ R-Sq(adj) = 28.25% ค่า R-Sq เป็นค่าที่นำมาใช้วัดว่าตัวแบบสมการเชิงเส้นที่ได้มานั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ แต่อย่างไรก็ตาม การพิจารณาเฉพาะค่า R-Squared อย่างเดียวอาจไม่สามารถตอบได้ว่าตัวแบบสมการนั้นเหมาะสมหรือไม่ แต่ต้องมีการพิจารณาค่า R-Squared ร่วมกับการวิเคราะห์ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างและตัวสถิติอื่นๆ [27] ซึ่งจากการพิจารณารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) จากภาพที่ 4.1 พบว่ามีการกระจายตัวแบบแจกแจงปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีค่าเสถียรในระดับที่น่าพอใจ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการทดลองนี้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้ แต่จะต้องมีการใช้ตัวแบบสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพราะว่าข้อมูลไม่สมกับตัวแบบเชิงเส้น [27] โดยผลจากการทดลองนี้จะต้องทำการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์เพิ่มเติมในเทอมของสมการควอดราติกต่อไป

ตารางที่ 4.2 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด

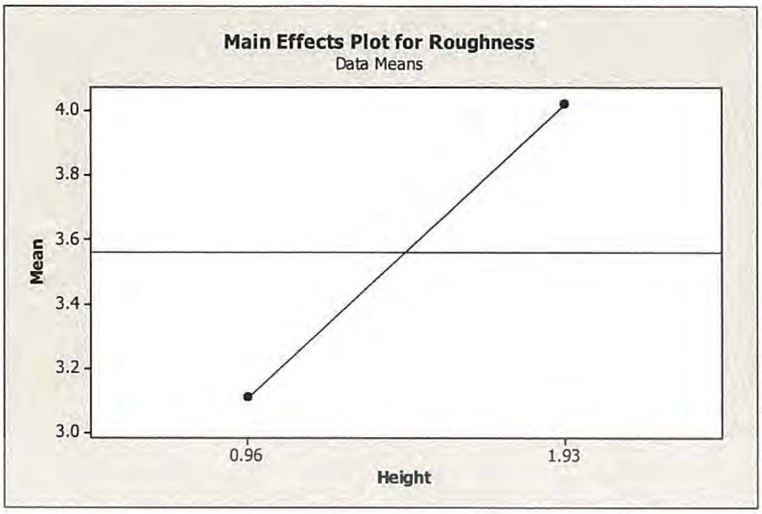
Analysis of Variance for Roughness (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	8.2675	8.2675	2.75582	2.65	0.084
Current	1	3.2834	3.2834	3.28338	3.15	0.095
Height	1	4.9677	4.9677	4.96769	4.77	0.044
Speed	1	0.0164	0.0164	0.01638	0.02	0.902
2-Way Interactions	3	4.6904	4.6904	1.56346	1.50	0.252
Current*Height	1	1.5981	1.5981	1.59805	1.53	0.233
Current*Speed	1	2.0259	2.0259	2.02595	1.94	0.182
Height*Speed	1	1.0664	1.0664	1.06640	1.02	0.327
3-Way Interactions	1	3.7644	3.7644	3.76438	3.61	0.075
Current*Height*Speed	1	3.7644	3.7644	3.76438	3.61	0.075
Residual Error	16	16.6660	16.6660	1.04163		
Pure Error	16	16.6660	16.6660	1.04163		
Total	23	33.3882				



ภาพที่ 4.1 ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของค่าความหยาบผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปรที่ใช้ตัดที่มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด

และเมื่อพิจารณากราฟของอิทธิพลหลักของตัวแปรที่ใช้ตัดคือระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height) ที่มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด ดังแสดงในภาพที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานมีอิทธิพลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด โดยระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานที่ 0.96 mm จะให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด

การที่ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานมีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัดนั้น เนื่องลักษณะลำแสงของพลาสมานั้นไม่ใช่ทรงกระบอกตรงแต่คล้ายเปลวไฟของเทียนไข ดังนั้นเมื่อลำแสงที่ออกมาตัดชิ้นงานมีระยะที่ไม่เหมาะสมก็จะทำให้เกิดรอยตัดที่เป็นลักษณะริ้วหรือ dragline ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความหยาบผิว [2]

4.1.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองของความถูกต้องของขนาดที่ได้ (Dimension)

จากตารางที่ 4.3 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อความถูกต้องของขนาดที่ได้ พบว่า ความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) และ interaction ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current)*ความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) และระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height)*ความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) มีผลต่อชิ้นงานที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากตัวแปรมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 โดยตัวแปรนี้มีอิทธิพลต่อความถูกต้องของขนาดที่ได้ของชิ้นงานมากที่สุดเนื่องจากมีค่า F-ratio สูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bini ที่ว่าความเร็วที่ใช้ในการตัดและแรงเคลื่อนอาร์คมีผลต่อความลาดเอียงของขอบที่ตัดอีกทั้งระยะระหว่างหัวตัดกับชิ้นงานก็มีผลอีกด้วย [7] ซึ่งเมื่อรอยตัดของชิ้นงานมีความลาดเอียง ความถูกต้องของขนาดที่ได้ก็จะมีผลกระทบเช่นกัน เมื่อพิจารณาค่า R-Squared โดยมีค่า R-Sq เท่ากับ 63.95% และ R-Sq (adj) = 48.17% ร่วมกับการพิจารณารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) จากภาพที่ 4.3 พบว่ามีการกระจายตัวแบบแจกแจงปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีค่าเสถียรในระดับที่น่าพอใจ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการทดลองนี้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้ แต่จะต้องมีการใช้ตัวแบบสมการ

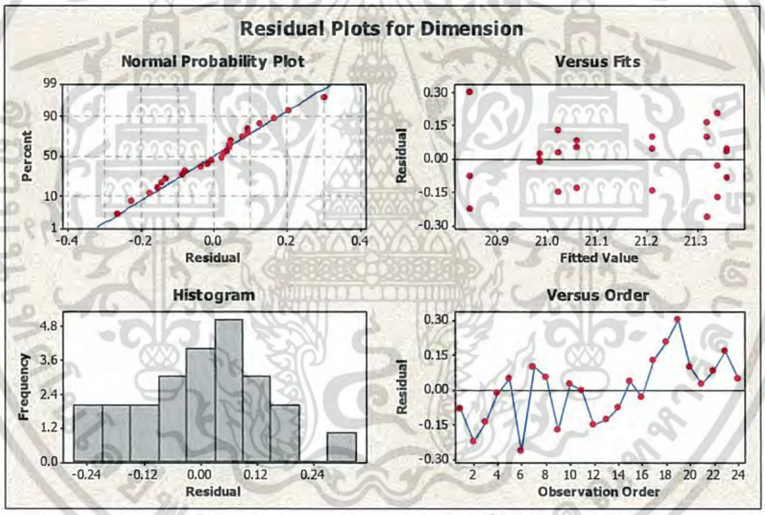
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพราะว่าข้อมูลไม่สมกับตัวแบบเชิงเส้น [27] โดยผลจากการทดลองนี้จะต้องทำการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์เพิ่มเติมในเทอมของสมการควอดราติกต่อไป

ตารางที่ 4.3 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อความถูกต้องของขนาดที่ได้

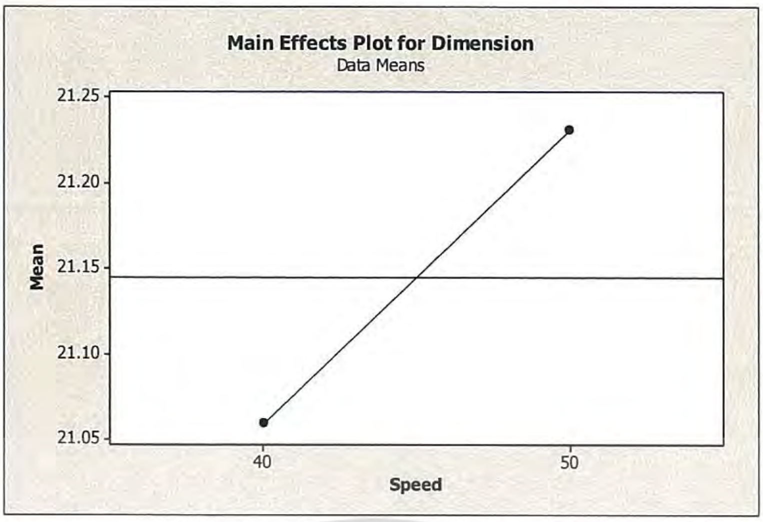
Analysis of Variance for Dimension (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	0.22043	0.220433	0.073478	2.68	0.082
Current	1	0.04335	0.043350	0.043350	1.58	0.227
Height	1	0.00027	0.000267	0.000267	0.01	0.923
Speed	1	0.17682	0.176817	0.176817	6.44	0.022
2-Way Interactions	3	0.52603	0.526033	0.175344	6.39	0.005
Current*Height	1	0.00002	0.000017	0.000017	0.00	0.981
Current*Speed	1	0.24000	0.240000	0.240000	8.75	0.009
Height*Speed	1	0.28602	0.286017	0.286017	10.42	0.005
3-Way Interactions	1	0.03227	0.032267	0.032267	1.18	0.294
Current*Height*Speed	1	0.03227	0.032267	0.032267	1.18	0.294
Residual Error	16	0.43907	0.439067	0.027442		
Pure Error	16	0.43907	0.439067	0.027442		
Total	23	1.21780				



ภาพที่ 4.3 ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของขนาดของชิ้นงาน

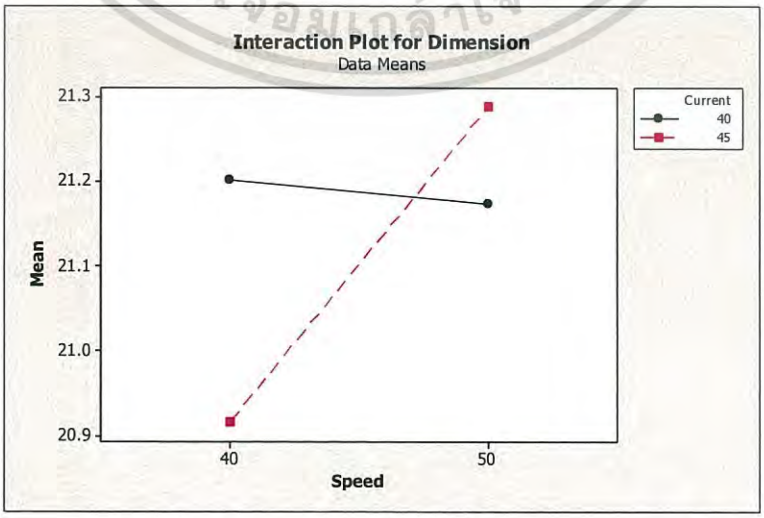
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปรที่ใช้ตัดที่มีผลต่อความถูกต้องของขนาดที่ได้

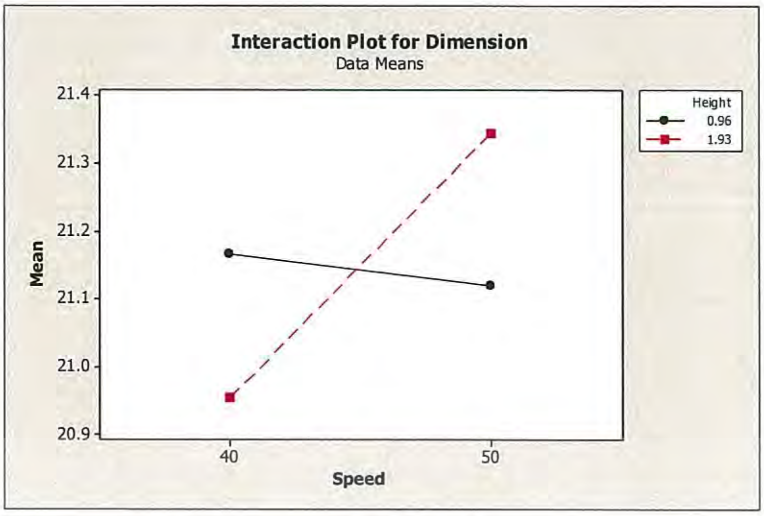
และเมื่อพิจารณากราฟของอิทธิพลหลักของตัวแปรที่ใช้ตัดคือความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) ที่มีผลต่อความถูกต้องของขนาดที่ได้ (Dimension) ดังแสดงในภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ใช้ในการตัดมีอิทธิพลต่อความถูกต้องของขนาดที่ได้ โดยความเร็วที่ใช้ในการตัดที่ 40 mm/sec จะทำให้ชิ้นงานมีขนาดที่ถูกต้องที่สุด

แต่จากตารางที่ 4.3 พบว่าอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current)*ความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) และระหว่างระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height)*ความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อขนาดของชิ้นงานเช่นกัน ดังนั้นการเลือกเงื่อนไขในการตัดที่เหมาะสมจึงต้องพิจารณาจากกราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ใช้ตัดด้วย ดังแสดงในภาพที่ 4.5 และ 4.6 ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่า ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดชิ้นงานที่ 45A ความเร็วที่ใช้ในการตัด 40 mm/sec และระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานที่ 1.93 mm จะให้ชิ้นงานมีขนาดที่ถูกต้องที่สุด



ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ใช้ตัดที่มีผลต่อของความถูกต้องของขนาดที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ใช้ตัดที่มีผลต่อของความถูกต้องของขนาดที่ได้

การที่ความเร็วที่ใช้ในการตัดเป็นอิทธิพลหลักที่มีผลต่อความถูกต้องของขนาดที่ได้นั้น เนื่องจากความเร็วในการตัดที่ไม่เหมาะสมที่มากหรือน้อยเกินไป ทำให้ลำแสงพลาสมาที่ออกมาตัดนั้นไม่เสถียร การตัดยังไม่มีการเกิดขึ้นอย่างเต็มที่ก็มีการเคลื่อนที่ของหัวตัดไปตำแหน่งอื่นแล้วหรือการตัดที่เคลื่อนที่ช้าเกินไปก็ทำให้เกิดปัญหาต่างๆ ของชิ้นงาน เช่น ความลาดเอียงของขอบชิ้นงาน เศษเสี้ยนหรือครีบ (Burr) อีกทั้งอิทธิพลร่วมของขนาดกระแสไฟฟ้า*ความเร็ว และระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน*ความเร็วที่ใช้ในการตัดมากหรือน้อยเกินไป ยิ่งส่งผลต่อความเสถียรของลำแสงพลาสมาเกิดการตัดชิ้นงานได้ขนาดที่ไม่ถูกต้อง เพราะเงื่อนไขของการตัดยังไม่สัมพันธ์กันดี [2-3]

4.1.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองของมุมเอียงของชิ้นงาน (Taper)

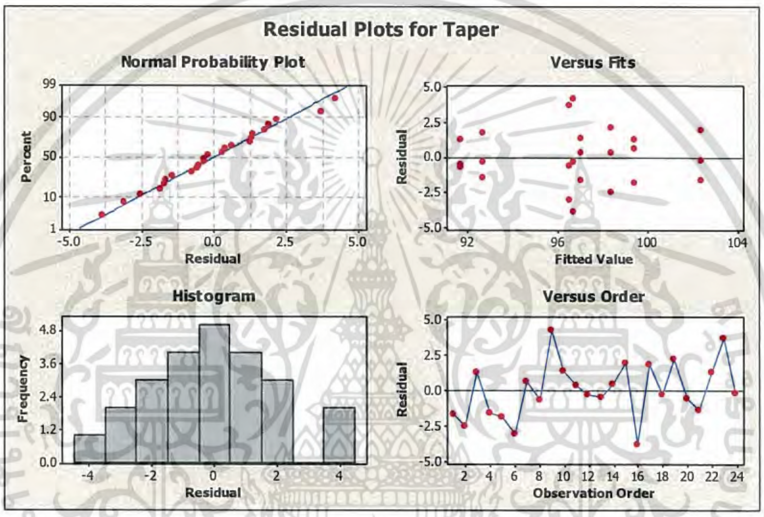
จากตารางที่ 4.4 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current) และ Interaction ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height)* ความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) มีผลต่อชิ้นงานที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากตัวแปรมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 โดยตัวแปรนี้มีอิทธิพลต่อมุมเอียงของชิ้นงานมากที่สุดเนื่องจากมีค่า F-ratio สูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bini ที่ว่าความเร็วที่ใช้ในการตัดและแรงเคลื่อนอาร์คมีผลต่อความลาดเอียงของขอบที่ตัดอีกทั้งระยะระหว่างหัวตัดกับชิ้นงานก็มีผลอีกด้วย [7] โดยมีค่า R-Sq เท่ากับ 73.10% และ R-Sq (adj) = 61.34% ร่วมกับการพิจารณารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ภาพที่ 4.7 พบว่ามีการกระจายตัวแบบแจกแจงปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีค่าเสถียรในระดับที่น่าพอใจ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการทดลองนี้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้ แต่จะต้องมีการใช้ตัวแบบสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพราะว่าข้อมูลไม่สมกับตัวแบบเชิงเส้น [27] โดยผลจากการทดลองนี้จะต้องทำการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์เพิ่มเติมในเทอมของสมการควอดราติกต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน

Analysis of Variance for Taper (coded units)

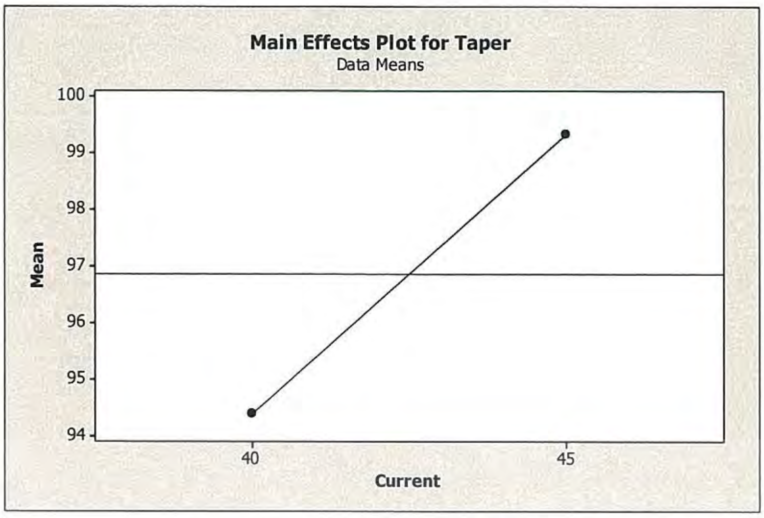
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	169.693	169.693	56.564	9.71	0.001
Current	1	146.451	146.451	146.451	25.13	0.000
Height	1	3.784	3.784	3.784	0.65	0.432
Speed	1	19.458	19.458	19.458	3.34	0.086
2-Way Interactions	3	64.070	64.070	21.357	3.67	0.035
Current*Height	1	11.237	11.237	11.237	1.93	0.184
Current*Speed	1	12.039	12.039	12.039	2.07	0.170
Height*Speed	1	40.794	40.794	40.794	7.00	0.018
3-Way Interactions	1	19.646	19.646	19.646	3.37	0.085
Current*Height*Speed	1	19.646	19.646	19.646	3.37	0.085
Residual Error	16	93.230	93.230	5.827		
Pure Error	16	93.230	93.230	5.827		
Total	23	346.639				



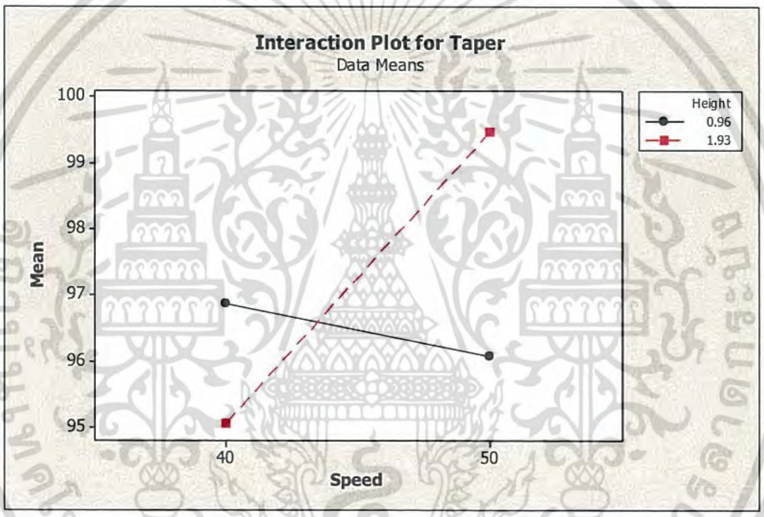
ภาพที่ 4.7 ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของมุมเอียงของชิ้นงาน

และเมื่อพิจารณากราฟของอิทธิพลหลักของตัวแปรที่ใช้ตัดคือขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current) ที่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน (Taper) ดังแสดงในภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดมีอิทธิพลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน แต่จากตารางที่ 4.4 พบว่าอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height) และความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อมุมเอียงของชิ้นงาน ดังนั้นการเลือกเงื่อนไขในการตัดที่เหมาะสมจึงต้องพิจารณาจากกราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ใช้ตัดคือระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน(Height)และความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) ที่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 4.9 ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่า ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานที่ 1.93 mm และความเร็วที่ใช้ในการตัดที่ 40 mm/sec จะให้ชิ้นงานมีมุมเอียงของชิ้นงานน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปรที่ใช้ตัดที่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน



ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ใช้ตัดที่มีผลต่อของมุมเอียงของชิ้นงาน

การที่ขนาดกระแสไฟฟ้าเป็นอิทธิพลหลักที่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงานนั้น เนื่องจากการตัดด้วยพลาสมานั้นเกิดจากการแตกตัวของโมเลกุลของก๊าซที่อุณหภูมิสูงด้วยการชาร์จก๊าซด้วยไฟฟ้าแล้วฉีดออกมาด้วยความเร็วสูงเพื่อทำให้วัสดุเกิดการหลอมเป็นรอยตัด อีกทั้งถ้าระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานและความเร็วที่ใช้ในการตัดมากหรือน้อยเกินไปมาเป็นอิทธิพลร่วมด้วยจะทำให้ลำแสงพลาสมายิ่งไม่เสถียรมากขึ้น อาจเกิดรอยตัดที่กว้างหรือแคบเกินไปจนส่งผลต่อมุมเอียงของชิ้นงานโดยตรง [2-3]

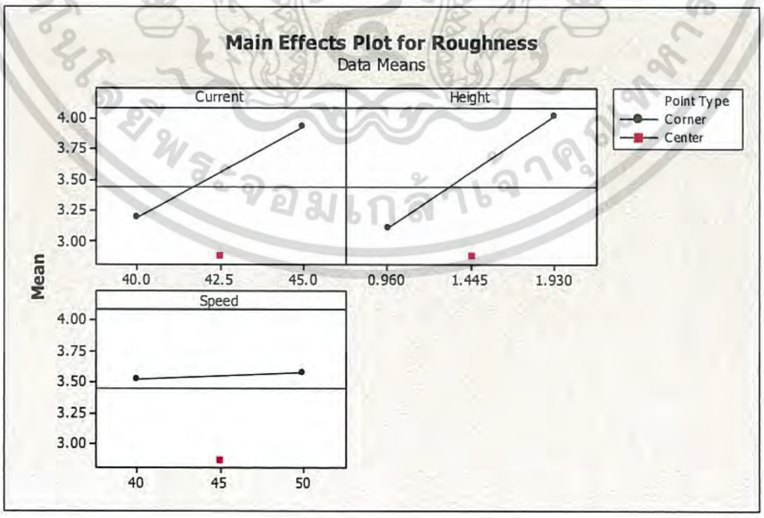
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลของกระบวนการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 2

ผลการทดลองของความเรียบของพื้นผิวรอยตัดตามแนวความยาว (Roughness) ความถูกต้องของขนาดที่ได้ (Dimension) และมุมเอียงของชิ้นงาน (Taper) ของกระบวนการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 2 ได้ใช้การออกแบบการทดลองด้วยการเพิ่มระดับปัจจัยในระดับกลางทั้งหมด 5 การทดลอง ซึ่งมีตัวแปรการตัดอยู่ 3 ตัวแปรด้วยกัน ได้แก่ ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current) ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height) และความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) ซึ่งผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.10, 4.11 และ 4.12

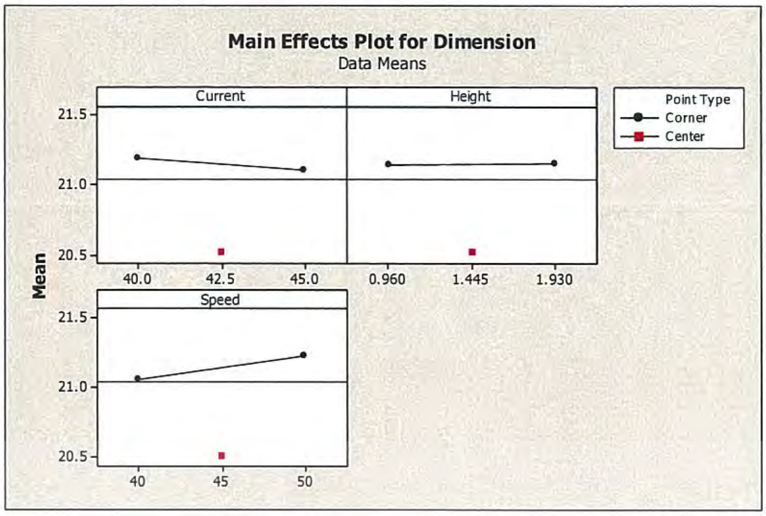
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองของกระบวนการตัดพลาสมาครั้งที่ 2 ของระดับปัจจัยกลาง

ตัวแปรที่ใช้ในการตัด			ผลการทดลอง		
Current	Height	Speed	Roughness	Dimension	Taper
(A)	(mm)	(mm/s)	(µm)	(mm)	(°)
42.5	1.445	45	4.632	20.53	0.924
			1.599	20.50	1.026
			2.671	20.54	7.439
			3.315	20.64	9.080
			2.196	20.35	4.109

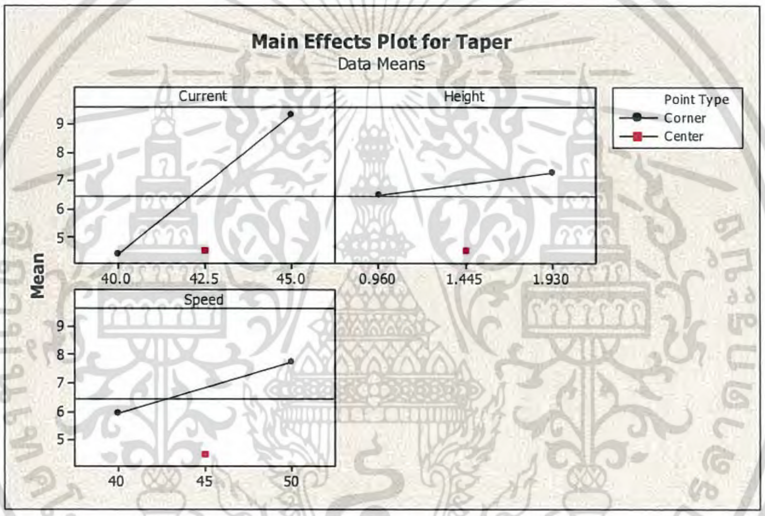


ภาพที่ 4.10 ผลตอบของการศึกษาของปัจจัยระดับกลางของความความเรียบของพื้นผิวรอยตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.11 ผลตอบของการศึกษาของปัจจัยระดับกลางของความถูกต้องของขนาดที่ได้



ภาพที่ 4.12 ผลตอบของการศึกษาของปัจจัยระดับกลางของมุมเอียงของชิ้นงาน

จากภาพที่ 4.10, 4.11 และ 4.12 ผลตอบของการศึกษาของปัจจัยระดับกลางมีค่าที่อยู่ในระดับที่พึงพอใจ ดังนั้นจึงสามารถใช้ระดับปัจจัยดังกล่าวไปทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ (Response surface methodology: RSM) โดยการใช้ตัวแบบการทดลอง Box-Behnken design ต่อไป

4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลของกระบวนการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 3

ผลการทดลองของความเรียบของพื้นผิวรอยตัดตามแนวความยาว (Roughness) ความถูกต้องของขนาดที่ได้ (Dimension) และมุมเอียงของชิ้นงาน (Taper) ของกระบวนการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 3 ได้ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ (Response surface methodology: RSM) โดยการใช้ตัวแบบการทดลอง Box-Behnken design ซึ่งในการทดลองนี้มีตัวแปรการตัดอยู่ 3 ตัวแปรด้วยกัน ได้แก่ ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current) ระยะระหว่างหัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัดและชิ้นงาน (Height) และความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) ซึ่งผลการทดลองได้แสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองของความเรียบของพื้นผิวรอยตัดตามแนวความยาว (Roughness) ความถูกต้องของขนาดที่ได้ (Dimension) และมุมเอียงของชิ้นงาน (Taper) ของการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 3

ตัวแปรที่ใช้ในการตัด			**ผลการทดลอง**		
Current	Height	Speed	Roughness	Dimension	Taper
(A)	(mm)	(mm/s)	(μm)	(mm)	(°)
40	0.96	45	1.338	20.60	6.842
45	0.96	45	1.840	20.65	0.830
40	1.93	45	5.038	20.80	6.083
45	1.93	45	6.627	20.51	3.510
40	1.45	40	5.333	20.68	1.209
45	1.45	40	1.531	20.55	7.681
40	1.45	50	2.554	20.94	4.533
45	1.45	50	4.803	20.95	5.439
42.5	0.96	40	2.608	20.50	9.033
42.5	1.93	40	7.640	20.46	12.976
42.5	0.96	50	1.189	20.51	10.624
42.5	1.93	50	1.042	21.29	15.136
42.5	1.45	45	2.113	20.58	12.119
42.5	1.45	45	3.086	20.66	13.773
42.5	1.45	45	3.070	20.57	14.747

4.3.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองของความเรียบของพื้นผิวรอยตัด (Roughness)

จากผลทดลองสามารถนำค่าที่ได้นำไปวิเคราะห์ Estimated Regression Coefficients และความแปรปรวนได้ดังตารางที่ 4.7 และ 4.8 พบว่า ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height) มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัดที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากตัวแปรมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 โดยตัวแปรนี้มีอิทธิพลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัดของชิ้นงานมากที่สุดเนื่องจากมีค่า F-ratio สูงสุด โดยมีค่า R- Squared = 78.59% และ R-Sq (adj) = 40.06% ซึ่งจากการพิจารณารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) จากภาพที่ 4.13 พบว่ามี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายตัวแบบแจกแจงปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีค่าเสถียรในระดับที่น่าพอใจ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการทดลองนี้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้

ตารางที่ 4.7 Estimated Regression Coefficients ของความเรียบของพื้นผิวรอยตัด

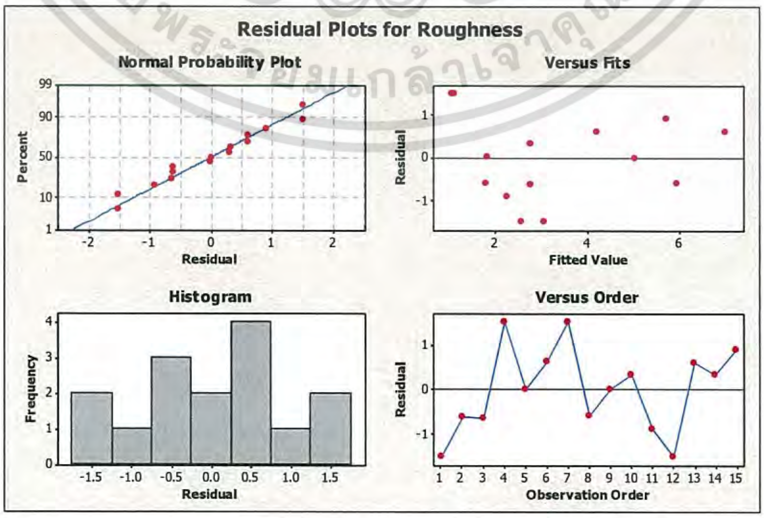
Estimated Regression Coefficients for Roughness

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2.75633	0.9293	2.966	0.031
Current	0.06725	0.5691	0.118	0.911
Height	1.67150	0.5691	2.937	0.032
Speed	-0.94050	0.5691	-1.653	0.159
Current*Current	0.69496	0.8377	0.830	0.445
Height*Height	0.25946	0.8377	0.310	0.769
Speed*Speed	0.10396	0.8377	0.124	0.906
Current*Height	0.27175	0.8048	0.338	0.749
Current*Speed	1.51275	0.8048	1.880	0.119
Height*Speed	-1.29475	0.8048	-1.609	0.169

ตารางที่ 4.8 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด

Analysis of Variance for Roughness

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	47.5640	47.5640	5.2849	2.04	0.224
Linear	3	29.4638	29.4638	9.8213	3.79	0.093
Current	1	0.0362	0.0362	0.0362	0.01	0.911
Height	1	22.3513	22.3513	22.3513	8.63	0.032
Speed	1	7.0763	7.0763	7.0763	2.73	0.159
Square	3	1.9457	1.9457	0.6486	0.25	0.858
Current*Current	1	1.6709	1.7833	1.7833	0.69	0.445
Height*Height	1	0.2349	0.2486	0.2486	0.10	0.769
Speed*Speed	1	0.0399	0.0399	0.0399	0.02	0.906
Interaction	3	16.1546	16.1546	5.3849	2.08	0.222
Current*Height	1	0.2954	0.2954	0.2954	0.11	0.749
Current*Speed	1	9.1537	9.1537	9.1537	3.53	0.119
Height*Speed	1	6.7055	6.7055	6.7055	2.59	0.169
Residual Error	5	12.9551	12.9551	2.5910		
Lack-of-Fit	3	12.3342	12.3342	4.1114	13.24	0.071
Pure Error	2	0.6209	0.6209	0.3105		
Total	14	60.5191				



ภาพที่ 4.13 ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของค่าความหยาบผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ที่จะนำมาใช้ในการพยากรณ์หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของความเรียบของพื้นผิวรอยตัด ได้ทำการเลือกวิเคราะห์เฉพาะตัวแปรที่มีผลที่สุดที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.7 และ 4.8 จึงได้ทำการคัดเลือกตัวแปรได้ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และ 4.10 ซึ่งพบว่าค่า R- Squared = 74.89% และ R-Sq (adj) = 60.94% โดยมีค่าเพิ่มขึ้น และค่า Lack-of-fit มีค่ามากกว่า α และจากการพิจารณารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) จากภาพที่ 4.14 พบว่ามีการกระจายตัวแบบแจกแจงปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีค่าเสถียรในระดับที่น่าพอใจ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ารูปแบบของสมการที่ได้จากการวิเคราะห์นี้มีความเหมาะสม โดยแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมได้แสดงดังสมการที่ 4.1 (Coded units) และสมการที่ 4.2 (Uncoded units)

ตารางที่ 4.9 Estimated Regression Coefficients หลังจากทำการตัดตัวแปรที่ไม่มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด

Estimated Regression Coefficients for Roughness

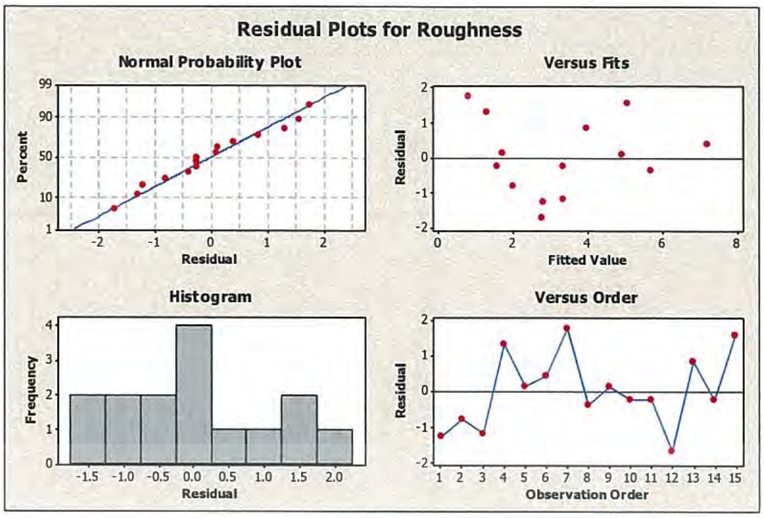
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3.32080	0.3355	9.898	0.000
Current	0.06725	0.4594	0.146	0.887
Height	1.67150	0.4594	3.638	0.005
Speed	-0.94050	0.4594	-2.047	0.071
Current*Speed	1.51275	0.6497	2.328	0.045
Height*Speed	-1.29475	0.6497	-1.993	0.077

ตารางที่ 4.10 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรหลังจากทำการตัดตัวแปรที่ไม่มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด

Analysis of Variance for Roughness

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	45.3230	45.3230	9.0646	5.37	0.015
Linear	3	29.4638	29.4638	9.8213	5.82	0.017
Current	1	0.0362	0.0362	0.0362	0.02	0.887
Height	1	22.3513	22.3513	22.3513	13.24	0.005
Speed	1	7.0763	7.0763	7.0763	4.19	0.071
Interaction	2	15.8592	15.8592	7.9296	4.70	0.040
Current*Speed	1	9.1537	9.1537	9.1537	5.42	0.045
Height*Speed	1	6.7055	6.7055	6.7055	3.97	0.077
Residual Error	9	15.1962	15.1962	1.6885		
Lack-of-Fit	7	14.5752	14.5752	2.0822	6.71	0.136
Pure Error	2	0.6209	0.6209	0.3105		
Total	14	60.5191				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.14 ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างหลังจากทำการตัดตัวแปรที่ไม่มีผลต่อค่าความหยาบผิว

$$\text{Roughness} = 3.32080 + 0.06725(C) + 1.6715(H) - 0.9405(S) + 1.51275(C*S) - 1.29475(H*S) \quad (4.1)$$

$$\text{Roughness} = 202.395 - 5.419(C) + 27.4727(H) - 4.55994(S) + 0.121020(C*S) - 0.533918(H*S) \quad (4.2)$$

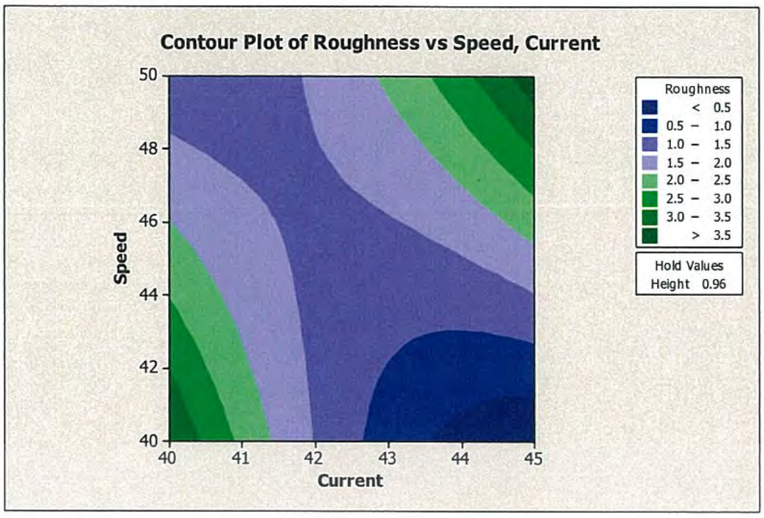
โดย C คือ ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current)

H คือ ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height)

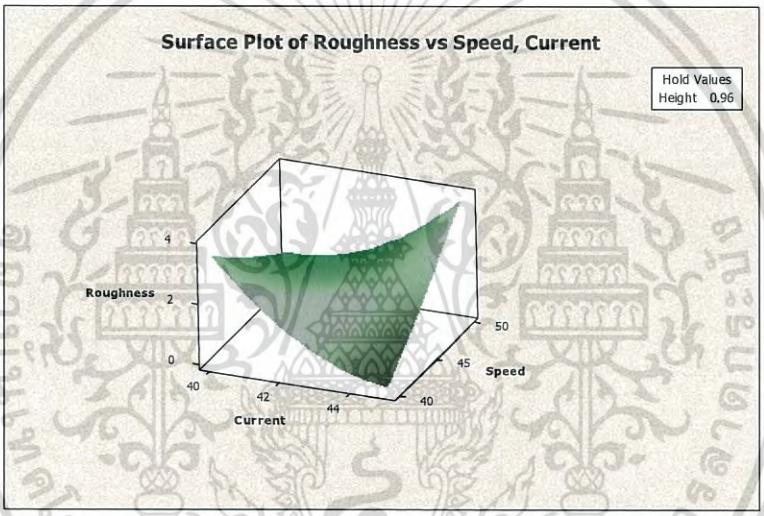
และ S คือ ความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed)

จากการวิเคราะห์ Estimated Regression Coefficients และความแปรปรวนเพื่อใช้ในการทำนายค่าของตัวแปรที่มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด ดังนั้น ในขั้นตอนต่อไปเป็นการสร้างพื้นผิวผลตอบของความเรียบของพื้นผิวรอยตัดที่ต้องการให้มีค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ซึ่งเป็นกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองที่แสดงค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด จากภาพที่ 4.15 และ 4.16 แสดงกราฟโครงร่างและและพื้นผิวตอบสนองของระดับปัจจัยของค่าความหยาบผิว โดยคงค่าระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานไว้ที่ 0.96 mm ซึ่งเป็นตัวแปรการตัดที่เหมาะสมที่สุด จะเห็นได้ว่า ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดที่ 45 A และ ความเร็วที่ใช้ในการตัดที่ 40 mm/sec ให้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



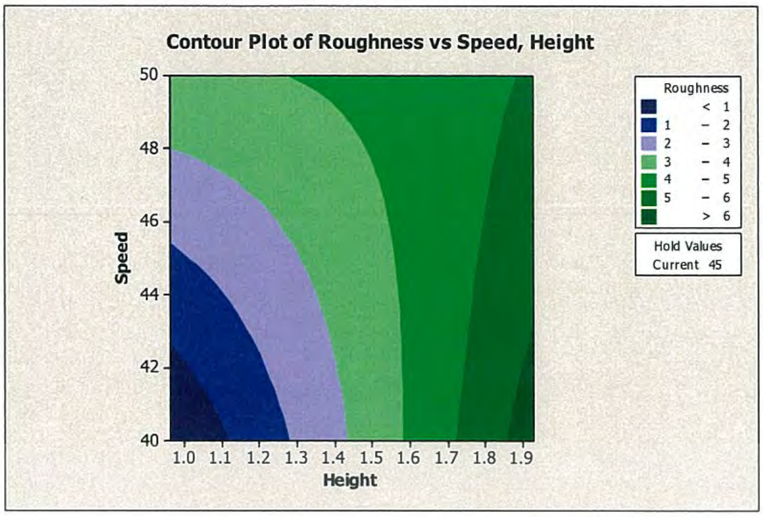
ภาพที่ 4.15 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ของระดับปัจจัยของค่าความหยาบผิว



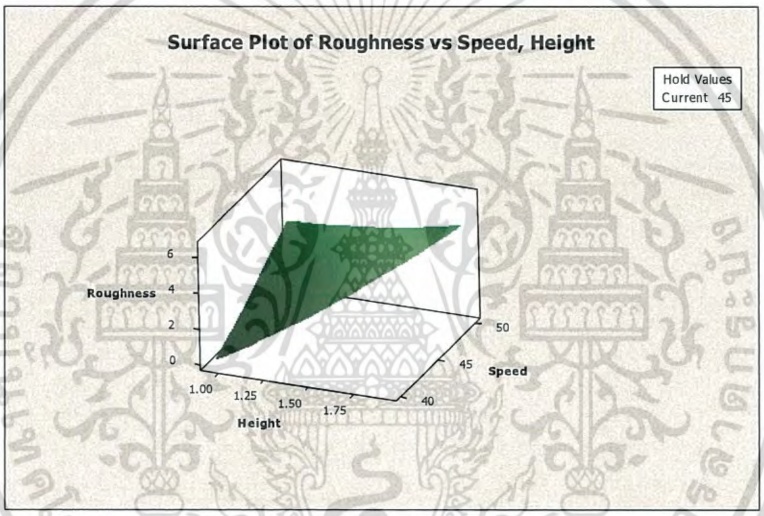
ภาพที่ 4.16 พื้นผิวตอบสนอง (Surface plot) ของระดับปัจจัยของค่าความหยาบผิว

จากภาพที่ 4.17 และ 4.18 แสดงกราฟโครงร่างและและพื้นผิวตอบสนองของระดับปัจจัยของค่าความหยาบผิว โดยคงขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดไว้ที่ 45 A ซึ่งเป็นตัวแปรการตัดที่เหมาะสมที่สุด จะเห็นได้ว่า ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานที่ 0.96 mm และ ความเร็วที่ใช้ในการตัดที่ 40 mm/sec ให้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



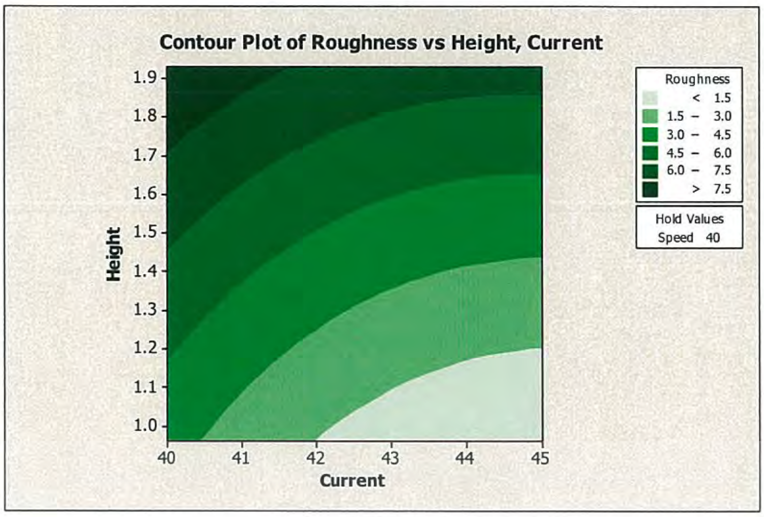
ภาพที่ 4.17 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ของระดับปัจจัยของค่าความหยาบผิว



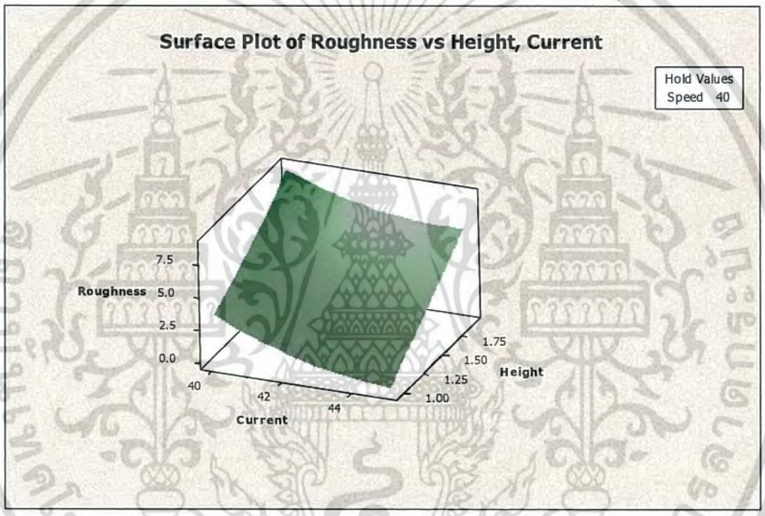
ภาพที่ 4.18 พื้นผิวตอบสนอง (Surface plot) ของระดับปัจจัยของค่าความหยาบผิว

และจากภาพที่ 4.19 และ 4.20 แสดงกราฟโครงร่างและและพื้นผิวตอบสนองของระดับปัจจัยของค่าความหยาบผิว โดยคงความเร็วที่ใช้ในการตัดไว้ที่ 40 mm/sec ซึ่งเป็นตัวแปรการตัดที่เหมาะสมที่สุด จะเห็นได้ว่า ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดที่ 45 A และระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานที่ 0.96 mm ให้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.19 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ของระดับปัจจัยของค่าความหยาบผิว



ภาพที่ 4.20 พื้นผิวตอบสนอง (Surface plot) ของระดับปัจจัยของค่าความหยาบผิว

4.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองของความถูกต้องของขนาดที่ได้ (Dimension)

จากผลทดลองสามารถนำค่าที่ได้นำไปวิเคราะห์ Estimated Regression Coefficients และความแปรปรวนได้ดังตารางที่ 4.11 และ 4.12 พบว่า ความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) และ Interaction ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height)*ความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) มีผลต่อความถูกต้องของขนาดที่ได้ ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากตัวแปรมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 โดยตัวแปรนี้มีอิทธิพลต่อความถูกต้องของขนาดที่ได้มากที่สุด เนื่องจากมีค่า F-ratio สูงสุด โดยมีค่า R- Squared = 90.38% และ R-Sq (adj) = 73.06% และค่า Lack-of-fit มีค่ามากกว่า α ซึ่งจากการพิจารณารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) จากภาพที่ 4.21 พบว่ามีการกระจายตัวแบบแจกแจงปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีค่าเสถียรในระดับที่น่าพอใจ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการทดลองนี้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้ โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ที่จะนำมาใช้ในการพยากรณ์หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของความถูกต้องของขนาดที่ได้นี้มีความเหมาะสม ดังสมการที่ 4.3 (Coded units) และสมการที่ 4.4 (Uncoded units)

ตารางที่ 4.11 Estimated Regression Coefficients ของความถูกต้องของขนาดที่ได้

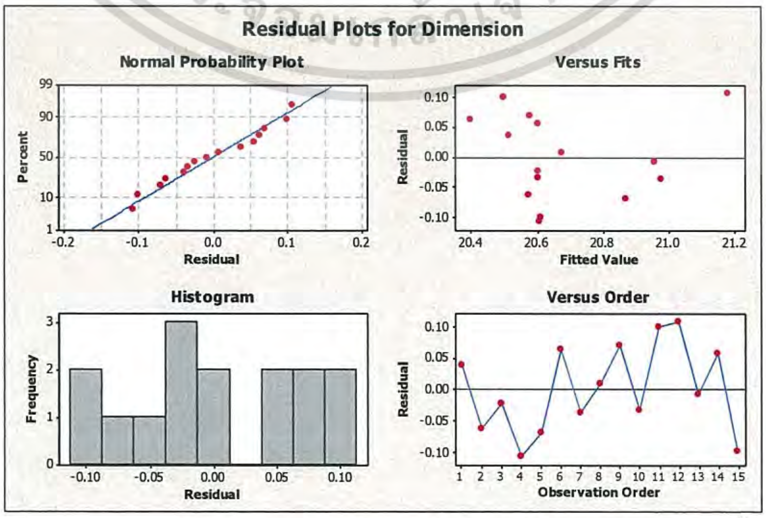
Estimated Regression Coefficients for Dimension

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	20.6033	0.06759	304.849	0.000
Current	-0.0450	0.04139	-1.087	0.327
Height	0.1000	0.04139	2.416	0.060
Speed	0.1875	0.04139	4.530	0.006
Current*Current	0.0633	0.06092	1.040	0.346
Height*Height	-0.0267	0.06092	-0.438	0.680
Speed*Speed	0.1133	0.06092	1.860	0.122
Current*Height	-0.0850	0.05853	-1.452	0.206
Current*Speed	0.0350	0.05853	0.598	0.576
Height*Speed	0.2050	0.05853	3.502	0.017

ตารางที่ 4.12 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อความถูกต้องของขนาดที่ได้

Analysis of Variance for Dimension

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.643617	0.643617	0.071513	5.22	0.042
Linear	3	0.377450	0.377450	0.125817	9.18	0.018
Current	1	0.016200	0.016200	0.016200	1.18	0.327
Height	1	0.080000	0.080000	0.080000	5.84	0.060
Speed	1	0.281250	0.281250	0.281250	20.52	0.006
Square	3	0.064267	0.064267	0.021422	1.56	0.308
Current*Current	1	0.012190	0.014810	0.014810	1.08	0.346
Height*Height	1	0.004651	0.002626	0.002626	0.19	0.680
Speed*Speed	1	0.047426	0.047426	0.047426	3.46	0.122
Interaction	3	0.201900	0.201900	0.067300	4.91	0.060
Current*Height	1	0.028900	0.028900	0.028900	2.11	0.206
Current*Speed	1	0.004900	0.004900	0.004900	0.36	0.576
Height*Speed	1	0.168100	0.168100	0.168100	12.27	0.017
Residual Error	5	0.068517	0.068517	0.013703		
Lack-of-Fit	3	0.063650	0.063650	0.021217	8.72	0.105
Pure Error	2	0.004867	0.004867	0.002433		
Total	14	0.712133				



ภาพที่ 4.21 ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของขนาดของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Dimension} = 20.6033 - 0.0450(C) + 0.1000(H) + 0.1875(S) + 0.0633(C^2) -0.0267(H^2) + 0.1133(S^2) - 0.0850(C*H) +0.0350(C*S) +0.2050(H*S) \quad (4.3)$$

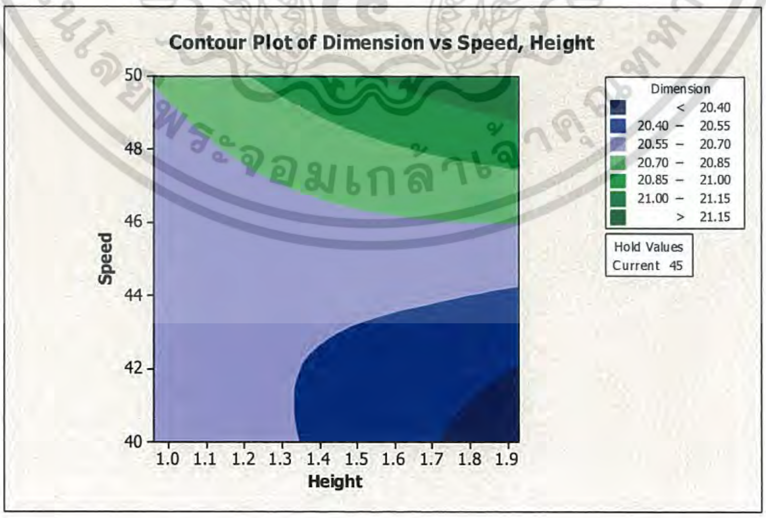
$$\text{Dimension} = 53.1763 - 0.904034(C) - 0.290927(H) - 0.611655(S)+0.0101333(C^2) - 0.113367(H^2) +0.00453333(S^2) - 0.0701031(C*H) +0.002800(C*S) + 0.0845361(H*S) \quad (4.4)$$

โดย C คือ ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current)

H คือ ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height)

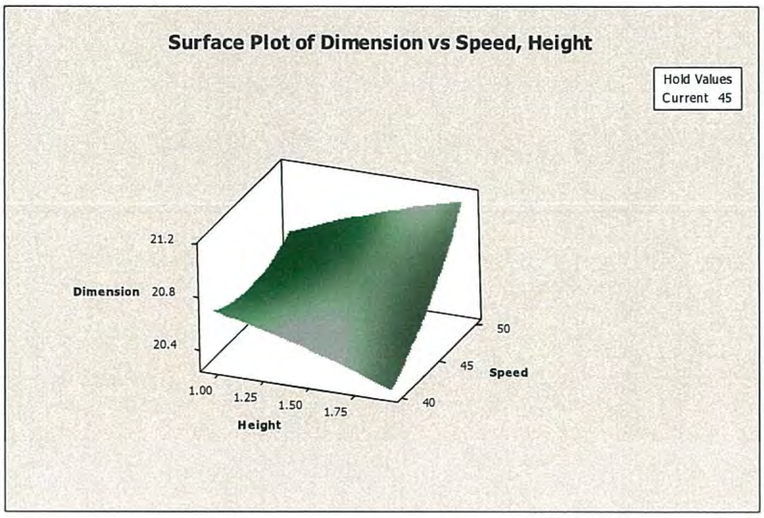
และ S คือ ความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed)

จากการวิเคราะห์ Estimated Regression Coefficients และความแปรปรวนเพื่อใช้ในการทำนายค่าของตัวแปรที่มีผลต่อความถูกต้องต่อขนาดชิ้นงานที่ได้ ดังนั้น ในขั้นตอนต่อไปเป็นการสร้างพื้นผิวผลตอบของความเรียบของพื้นผิวรอยตัดที่ต้องการให้มีความถูกต้องของขนาดชิ้นงานมากที่สุด ซึ่งเป็นกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองที่แสดงค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อความถูกต้องของขนาดชิ้นงาน จากภาพที่ 4.22 และ 4.23 แสดงกราฟโครงร่างและและพื้นผิวตอบสนองของระดับปัจจัยของความถูกต้องของขนาดชิ้นงาน โดยคงขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดไว้ที่ 45 A ซึ่งเป็นตัวแปรการตัดที่เหมาะสมที่สุด จะเห็นได้ว่า ค่าระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานที่ 1.93 mm และความเร็วที่ใช้ในการตัดที่ 40 mm/sec จะมีความถูกต้องของขนาดชิ้นงานมากที่สุด



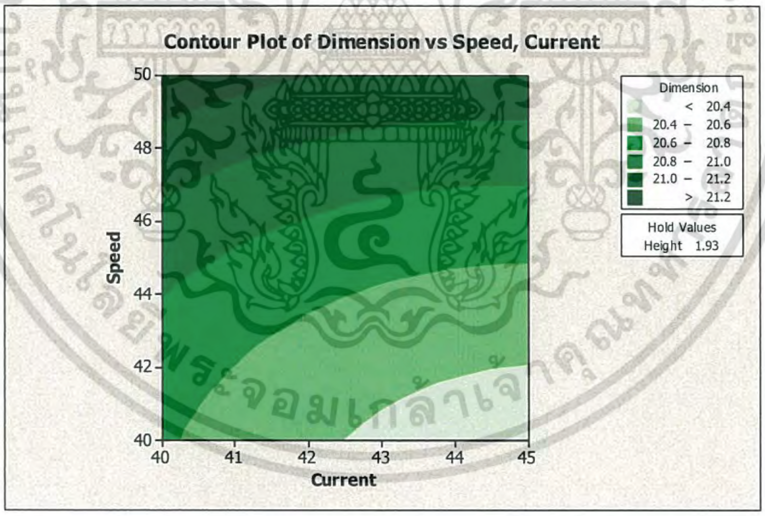
ภาพที่ 4.22 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ของระดับปัจจัยของความถูกต้องของขนาดชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



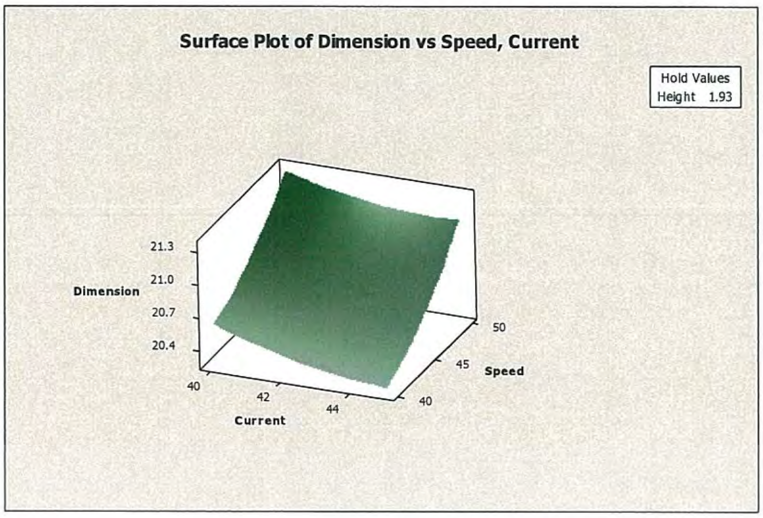
ภาพที่ 4.23 พื้นผิวตอบสนอง (Surface plot) ของระดับปัจจัยของความถูกต้องของขนาดชิ้นงาน

จากภาพที่ 4.24 และ 4.25 แสดงกราฟโครงร่างและและพื้นผิวตอบสนองของระดับปัจจัยของความถูกต้องของขนาดชิ้นงาน โดยคงระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานไว้ที่ 1.93 mm ซึ่งเป็นตัวแปรการตัดที่เหมาะสมที่สุด จะเห็นได้ว่า ความเร็วที่ใช้ในการตัดประมาณที่ 40 mm/sec และขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดที่ 45 A จะมีความถูกต้องของขนาดชิ้นงานมากที่สุด



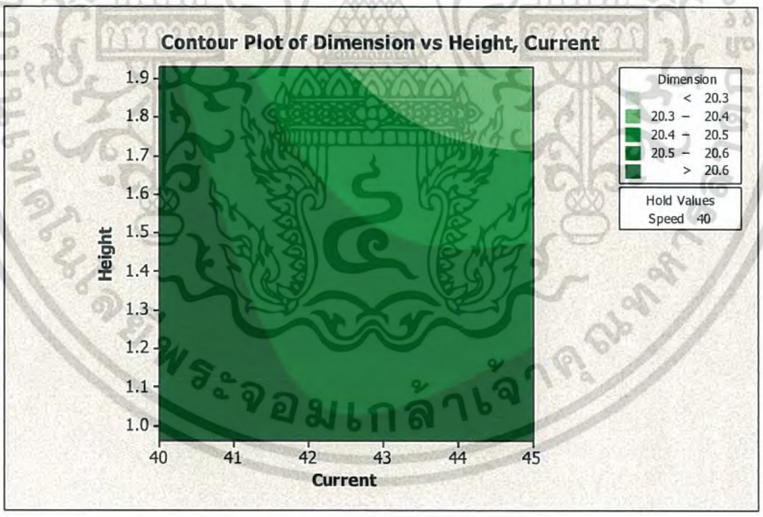
ภาพที่ 4.24 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ของระดับปัจจัยของความถูกต้องของขนาดชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



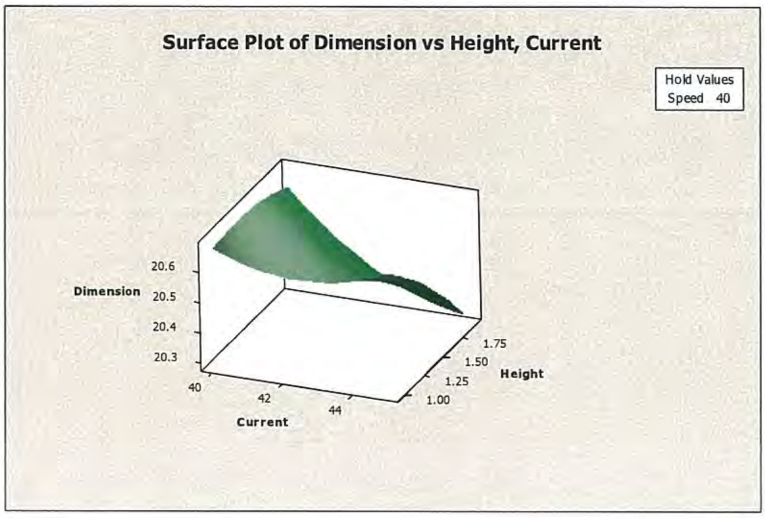
ภาพที่ 4.25 พื้นผิวตอบสนอง (Surface plot) ของระดับปัจจัยของความถูกต้องของขนาดชิ้นงาน

และจากภาพที่ 4.26 และ 4.27 แสดงกราฟโครงร่างและและพื้นผิวตอบสนองของระดับปัจจัยของความถูกต้องของขนาดชิ้นงาน โดยคงความเร็วที่ใช้ในการตัดประมาณไว้ที่ 40 mm/sec ซึ่งเป็นตัวแปรการตัดที่เหมาะสมที่สุด จะเห็นได้ว่า ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดที่ 45 A และ ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานไว้ที่ 1.93 mm จะมีความถูกต้องของขนาดชิ้นงานมากที่สุด



ภาพที่ 4.26 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ของระดับปัจจัยของความถูกต้องของขนาดชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.27 พื้นผิวตอบสนอง (Surface plot) ของระดับปัจจัยของความถูกต้องของขนาดชิ้นงาน

4.3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองของมุมเอียงของชิ้นงาน (Taper)

จากผลทดลองสามารถนำค่าที่ได้นำไปวิเคราะห์ Estimated Regression Coefficients และความแปรปรวนได้ดังตารางที่ 4.13 และ 4.14 พบว่า Interaction ของขนาดกระแสไฟฟ้า*ขนาดกระแสไฟฟ้า มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงานที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากตัวแปรมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 โดยตัวแปรนี้มีอิทธิพลต่อมุมเอียงของชิ้นงานมากที่สุด เนื่องจากมีค่า F-ratio สูงสุด โดยมีค่า R- Squared = 86.98% และ R-Sq (adj) = 63.53% ซึ่งจากการพิจารณารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) จากภาพที่ 4.28 พบว่ามีการกระจายตัวแบบแจกแจงปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีค่าเสถียรในระดับที่น่าพอใจ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการทดลองนี้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้

ตารางที่ 4.13 Estimated Regression Coefficients ของมุมเอียงของชิ้นงาน

Estimated Regression Coefficients for Taper

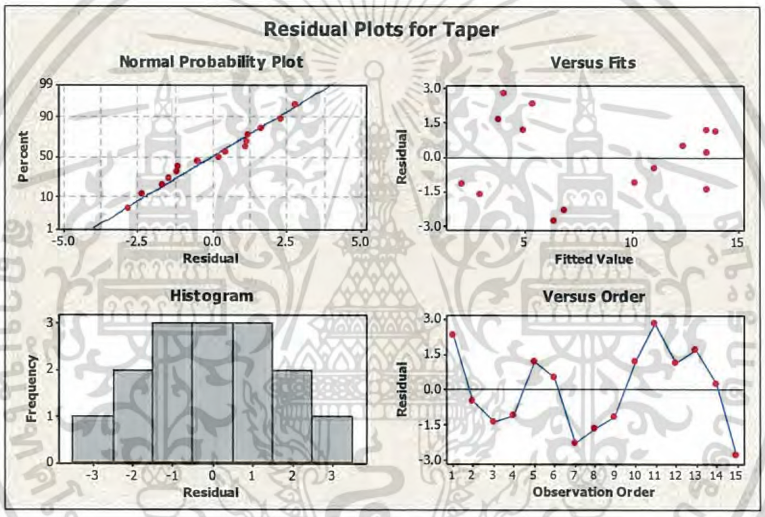
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	13.5463	1.666	8.133	0.000
Current	-0.1509	1.020	-0.148	0.888
Height	1.2970	1.020	1.272	0.259
Speed	0.6041	1.020	0.592	0.579
Current*Current	-8.2284	1.501	-5.481	0.003
Height*Height	-1.0017	1.501	-0.667	0.534
Speed*Speed	-0.6024	1.501	-0.401	0.705
Current*Height	0.8598	1.442	0.596	0.577
Current*Speed	-1.3915	1.442	-0.965	0.379
Height*Speed	0.1423	1.442	0.099	0.925

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน

Analysis of Variance for Taper

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	277.854	277.854	30.873	3.71	0.081
Linear	3	16.560	16.560	5.520	0.66	0.609
Current	1	0.182	0.182	0.182	0.02	0.888
Height	1	13.458	13.458	13.458	1.62	0.259
Speed	1	2.920	2.920	2.920	0.35	0.579
Square	3	250.512	250.512	83.504	10.03	0.015
Current*Current	1	245.782	249.994	249.994	30.04	0.003
Height*Height	1	3.390	3.705	3.705	0.45	0.534
Speed*Speed	1	1.340	1.340	1.340	0.16	0.705
Interaction	3	10.783	10.783	3.594	0.43	0.739
Current*Height	1	2.957	2.957	2.957	0.36	0.577
Current*Speed	1	7.745	7.745	7.745	0.93	0.379
Height*Speed	1	0.081	0.081	0.081	0.01	0.925
Residual Error	5	41.610	41.610	8.322		
Lack-of-Fit	3	38.079	38.079	12.693	7.19	0.125
Pure Error	2	3.530	3.530	1.765		
Total	14	319.463				



ภาพที่ 4.28 ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของมุมเอียงของชิ้นงาน

ดังนั้นแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ที่จะนำมาใช้ในการพยากรณ์หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของมุมเอียงของชิ้นงาน ได้ทำการเลือกวิเคราะห์เฉพาะตัวแปรที่มีผลที่สุดที่ระดับนัยสำคัญ α = 0.05 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.13 และ 4.14 จึงได้ทำการคัดเลือกตัวแปรได้ดังแสดงในตารางที่ 4.15 และ 4.16 ซึ่งพบว่าค่า R- Squared = 85.47% และ R-Sq (adj) = 74.57% โดยมีค่าเพิ่มขึ้น และค่า Lack-of-fit มีค่ามากกว่า α และจากการพิจารณารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) จากภาพที่ 4.29 พบว่ามีการกระจายตัวแบบแจกแจงปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีค่าเสถียรในระดับที่น่าพอใจ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ารูปแบบของสมการที่ได้จากการวิเคราะห์นี้มีความเหมาะสม โดยแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมได้แสดงดังสมการที่ 4.5 (Coded units) และสมการที่ 4.6 (Uncoded units)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 Estimated Regression Coefficients หลังจากทำการตัดตัวแปรที่ไม่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน

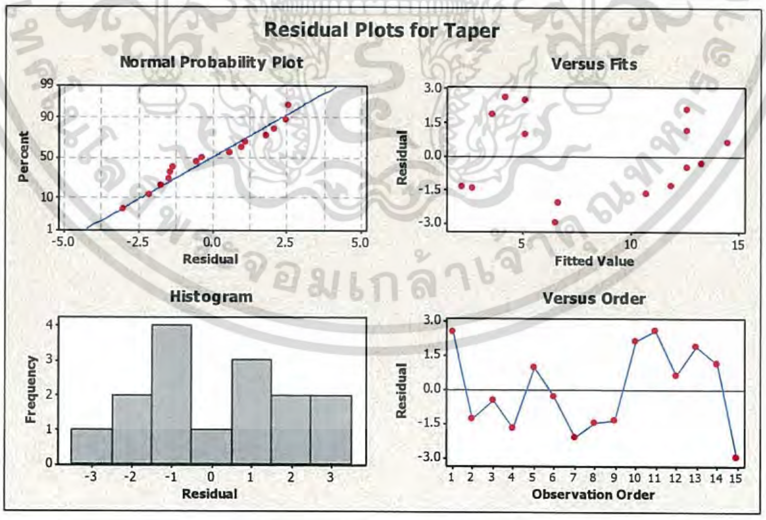
Estimated Regression Coefficients for Taper

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	12.6297	0.9105	13.872	0.000
Current	-0.1509	0.8517	-0.177	0.864
Height	1.2970	0.8517	1.523	0.166
Speed	0.6041	0.8517	0.709	0.498
Current*Current	-8.1138	1.2467	-6.508	0.000
Current*Height	0.8598	1.2044	0.714	0.496
Current*Speed	-1.3915	1.2044	-1.155	0.281

ตารางที่ 4.16 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรหลังจากทำการตัดตัวแปรที่ไม่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน

Analysis of Variance for Taper

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	273.043	273.043	45.507	7.84	0.005
Linear	3	16.560	16.560	5.520	0.95	0.461
Current	1	0.182	0.182	0.182	0.03	0.864
Height	1	13.458	13.458	13.458	2.32	0.166
Speed	1	2.920	2.920	2.920	0.50	0.498
Square	1	245.782	245.782	245.782	42.36	0.000
Current*Current	1	245.782	245.782	245.782	42.36	0.000
Interaction	2	10.702	10.702	5.351	0.92	0.436
Current*Height	1	2.957	2.957	2.957	0.51	0.496
Current*Speed	1	7.745	7.745	7.745	1.33	0.281
Residual Error	8	46.420	46.420	5.803		
Lack-of-Fit	6	42.890	42.890	7.148	4.05	0.211
Pure Error	2	3.530	3.530	1.765		
Total	14	319.463				



ภาพที่ 4.29 ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างหลังจากทำการตัดตัวแปรที่ไม่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน

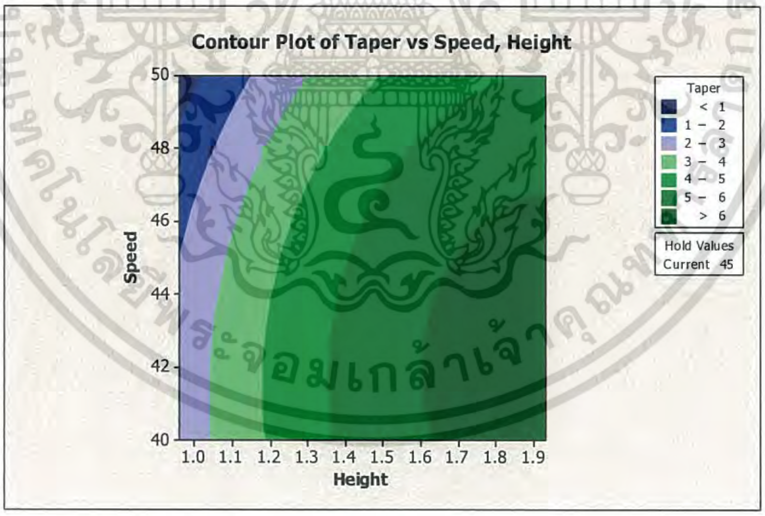
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Taper = 12.6297 – 0.1509(C) + 1.2970(H) + 0.6041(S) – 8.1138(C*C) (4.5)
+ 0.8598(C*H) – 1.3915(C*S)

Taper = – 2508.36 + 114.273(C) – 27.4613(H) + 4.85193(S) – 1.29821(C*C) (4.6)
+ 0.709072(C*H) – 0.11132(C*S)

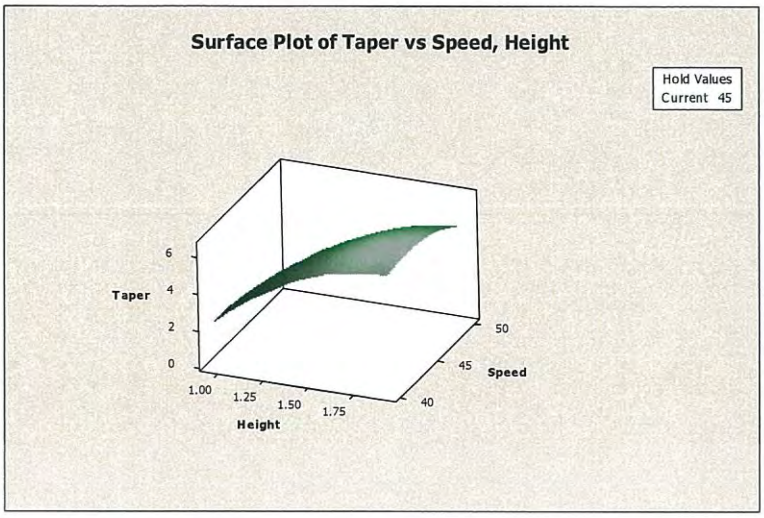
โดย C คือ ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current)
H คือ ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height)
และ S คือ ความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed)

จากการวิเคราะห์ Estimated Regression Coefficients และความแปรปรวนเพื่อใช้ในการทำนายค่าของตัวแปรที่มีผลต่อความถูกต้องต่อมุมเอียงของชิ้นงาน ดังนั้น ในขั้นตอนต่อไปเป็นการสร้างพื้นผิวผลตอบของมุมเอียงของชิ้นงานที่ต้องการให้มีมุมเอียงของชิ้นงานน้อยที่สุด ซึ่งเป็นกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองที่แสดงค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อมุมเอียงของชิ้นงาน จากภาพที่ 4.31 และ 4.32 แสดงกราฟโครงร่างและและพื้นผิวตอบสนองของระดับปัจจัยของมุมเอียงของชิ้นงานโดยคงขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดไว้ที่ 45 A ซึ่งเป็นตัวแปรการตัดที่เหมาะสมที่สุด จะเห็นได้ว่าระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานที่ 0.96 mm และ ความเร็วที่ใช้ในการตัดที่ 50 mm/sec จะมีมุมเอียงของชิ้นงานน้อยที่สุด



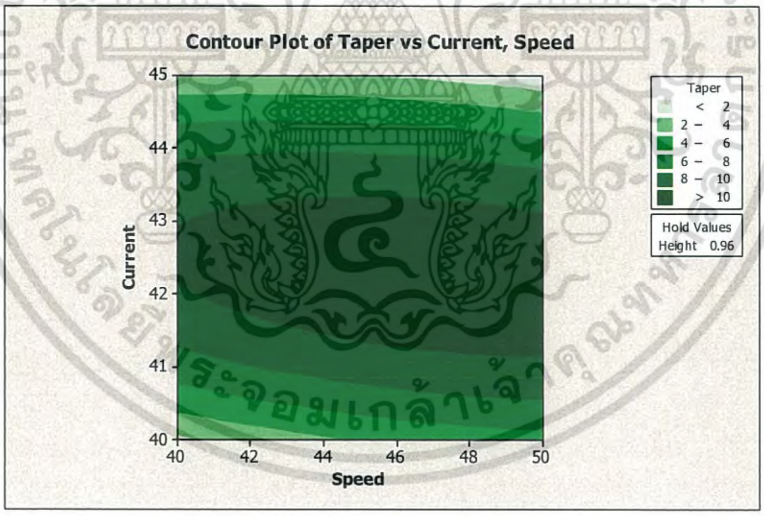
ภาพที่ 4.30 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ของระดับปัจจัยของมุมเอียงของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



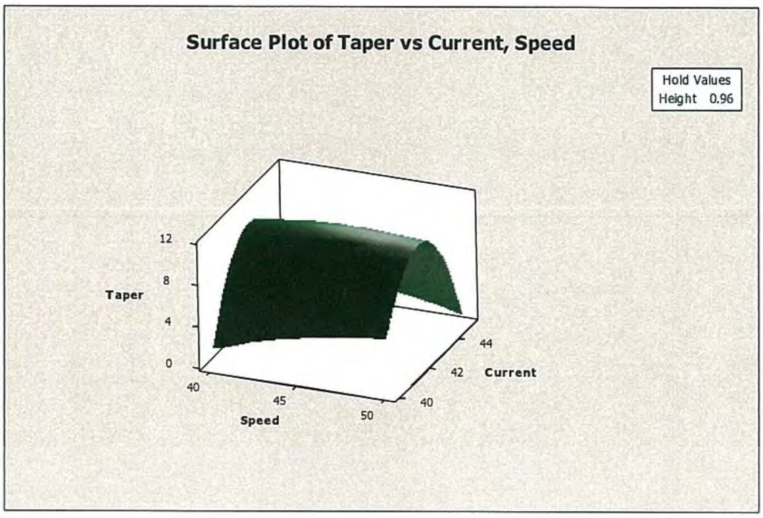
ภาพที่ 4.31 พื้นผิวตอบสนอง (Surface plot) ของระดับปัจจัยของมุมเอียงของชิ้นงาน

จากภาพที่ 4.32 และ 4.33 แสดงกราฟโครงร่างและและพื้นผิวตอบสนองของระดับปัจจัยของมุมเอียงของชิ้นงาน โดยคงระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานไว้ที่ 0.96 mm ซึ่งเป็นตัวแปรการตัดที่เหมาะสมที่สุด จะเห็นได้ว่า ความเร็วที่ใช้ในการตัดที่ 50 mm/sec และขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดที่ 45 A จะมีมุมเอียงของชิ้นงานน้อยที่สุด



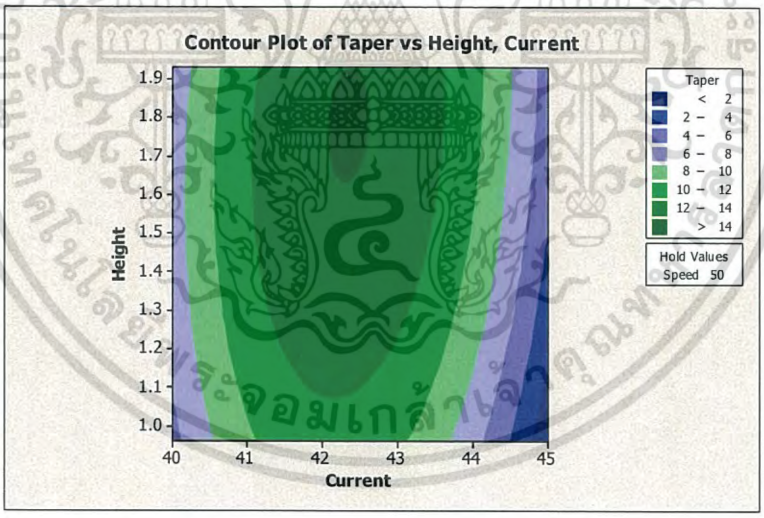
ภาพที่ 4.32 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ของระดับปัจจัยของมุมเอียงของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



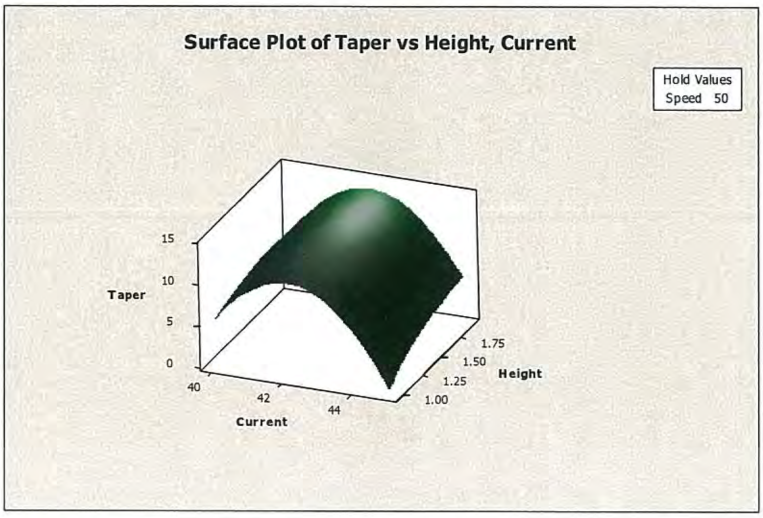
ภาพที่ 4.33 พื้นผิวตอบสนอง (Surface plot) ของระดับปัจจัยมุมเอียงของชิ้นงาน

และจากภาพที่ 4.34 และ 4.35 แสดงกราฟโครงร่างและและพื้นผิวตอบสนองของระดับปัจจัยของมุมเอียงของชิ้นงาน โดยคงความเร็วที่ใช้ในการตัดไว้ที่ 50 mm/sec ซึ่งเป็นตัวแปรการตัดที่เหมาะสมที่สุด จะเห็นได้ว่า ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดที่ 45 A และระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานที่ 0.96 mm จะมีมุมเอียงของชิ้นงานน้อยที่สุด



ภาพที่ 4.34 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ของระดับปัจจัยของมุมเอียงของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.35 พื้นผิวตอบสนอง (Surface plot) ของระดับปัจจัยของมุมเอียงของชิ้นงาน

จากผลการสร้างพื้นผิวผลตอบ สามารถแสดงค่าของตัวแปรที่ให้ค่าความเรียบของพื้นผิวรอยตัดที่มีค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ขนาดของชิ้นงานมีความถูกต้องมากที่สุด และมุมเอียงของชิ้นงานมีน้อยที่สุด ได้ดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ค่าของตัวแปรที่ให้ค่าความเรียบของพื้นผิวรอยตัดที่มีค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ขนาดของชิ้นงานมีความถูกต้องมากที่สุด และมุมเอียงของชิ้นงานมีน้อยที่สุด

Response	Input		
	Current	Height	Speed
	A	mm	mm/sec
Roughness (μm)	45	0.96	40
Dimension (mm)	45	1.93	40
Taper (°)	45	0.96	50

จากตารางที่ 4.17 ค่าตัวแปรที่ได้ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าใช้ที่เงื่อนไขอะไรเพื่อให้ได้ผลตอบทางการศึกษาที่ต้องการ ดังนั้นจึงทำการหาค่าตัวแปรการตัดที่เหมาะสมด้วย Desirability function ดังขั้นตอนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การหาค่าตัวแปรการตัดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองแบบ Response surface methodology

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขของการตัดที่เหมาะสมที่ให้ค่าความเรียบของพื้นผิวรอยตัดมีความหยาบผิวน้อยที่สุด ความถูกต้องของขนาดที่ได้ และมุมเอียงของชิ้นงานมีน้อยที่สุดของกระบวนการตัดพลาสมาครั้งที่ 3 โดยกำหนดค่าเป้าหมายดังแสดงในตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 การกำหนดค่าเป้าหมายของการตัด

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import.
Roughness	Minimum	-	2	4	1	1
Dimension	Target	19.24	20	20.76	1	1
Taper	Target	-3	0	3	1	1

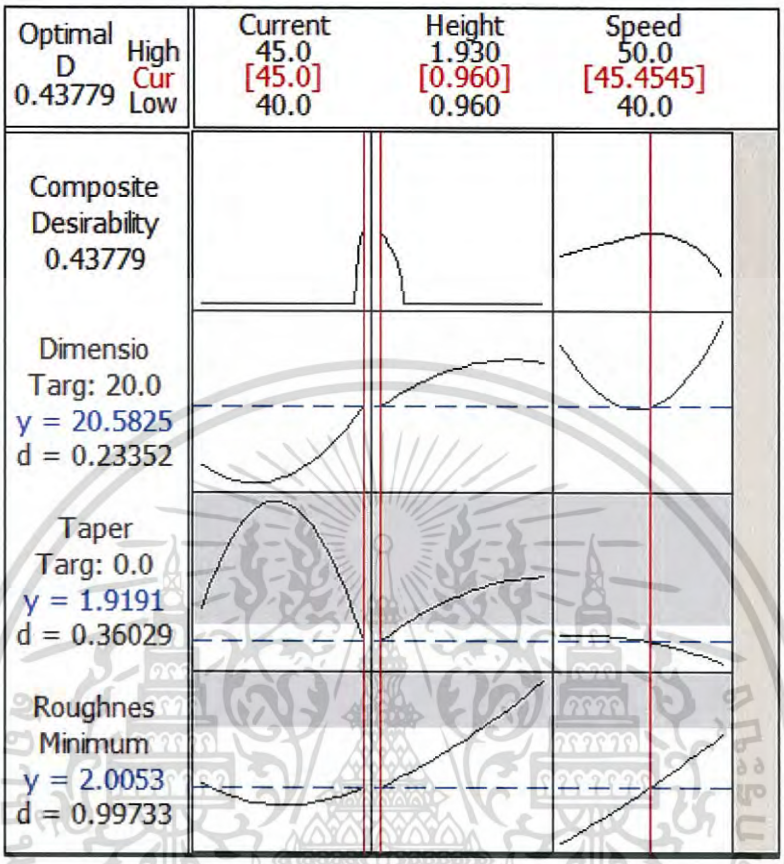
ค่าเป้าหมายของความหยาบผิวที่กำหนดนั้น อ้างอิงมาจากบริษัท Outokumpu จากประเทศฟินแลนด์และบริษัท SK Škrlj d.o.o. จากประเทศสโลวีเนีย ซึ่งเป็นบริษัทด้านการผลิตวัสดุและผลิตภัณฑ์เหล็กกล้าไร้สนิม ทางบริษัทได้ใช้เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์ถังเก็บสารเคมีหรือถังผสมสาร โดยมีความหยาบผิวประมาณ 2 ถึง 6 ไมโครเมตร อีกทั้งบริษัท OSTP ซึ่งเป็นบริษัทใหญ่ระดับโลกจากประเทศสวีเดน เป็นบริษัทที่ผลิตท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างๆ กำหนดว่าถ้าท่อมีความหนา 2 ถึง 6 มิลลิเมตร จะใช้เหล็กที่มีความหยาบผิว 2 ถึง 5 ไมโครเมตร แต่เนื่องจากเมื่อกำหนดค่า Upper ที่ 5 หรือ 6 ทำให้ค่า Composite Desirability มีค่าที่ต่ำ และค่าที่คำนวณออกมามีค่าความหยาบผิวมากกว่า 3 ไมโครเมตร จึงกำหนดค่าเป้าหมายให้ได้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุด และมีค่า Target ที่ 2 ไมโครเมตร และ Upper ที่ 4 ไมโครเมตร [32-34]

ค่าเป้าหมายของขนาดของชิ้นงานที่กำหนดนั้น เนื่องมาจากเครื่องตัดพลาสมาเป็นรุ่นธรรมดาหรือ Conventional plasma cutting ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะสามารถตัดได้แม่นยำภายในขอบเขต 0.76 มิลลิเมตร ซึ่งข้อมูลนี้มาจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องพลาสมา Hypertherm เพราะฉะนั้นจึงกำหนดค่าเป้าหมายให้ได้ค่าขนาดที่ถูกต้องที่สุด มีค่า Lower ที่ 19.24 มิลลิเมตร และ Target ที่ 20 มิลลิเมตร และ Upper ที่ 20.76 มิลลิเมตร [35]

ค่าเป้าหมายของมุมเอียงของชิ้นงานที่กำหนดนั้น เนื่องมาจากเครื่องตัดพลาสมาเป็นรุ่นธรรมดาหรือ Conventional plasma cutting ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีค่ามุมเอียงของชิ้นงานหรือ Taper คือ 1 – 3 degrees โดยยังเป็นคุณลักษณะของชิ้นงานที่อยู่ในเกณฑ์ดี แต่ถ้ามีค่ามุมเอียงของชิ้นงานที่ 3 - 8 degree แสดงว่าคุณลักษณะของชิ้นงานนั้นอยู่ในเกณฑ์ไม่ดี ซึ่งข้อมูลนี้มาจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องพลาสมา Hypertherm เพราะฉะนั้นจึงกำหนดค่าเป้าหมายค่ามุมเอียงของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นแบบ Target โดยมีค่า Lower ที่ -3 degree, ค่า Target ที่ 0 degree และ Upper ที่ 3 degree [3]



ภาพที่ 4.36 กราฟแสดงตัวแปรการตัดที่เหมาะสมที่สุด

และภาพที่ 4.36 แสดงค่าตัวแปรการตัดที่เหมาะสม โดยมีค่า Composite Desirability ที่ 0.43779 ดังนี้

ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน เท่ากับ 45A

ระยะระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน เท่ากับ 0.96 mm

ความเร็วในการตัดชิ้นงาน เท่ากับ 45.4545 mm/sec แต่ค่าที่จะใช้ในการตัดคือ 45 mm/sec เพราะว่าไม่สามารถตั้งค่าความเร็วเป็นเลขที่มีทศนิยมได้

จากนั้นจึงนำค่าเงื่อนไขที่ได้นี้ไปทำการตัดทดสอบเพื่อยืนยันผลการศึกษา พบว่า

ค่าความหยาบของพื้นผิวรอยตัดได้ค่าจริงที่สอดคล้องกับค่ากำหนดเป้าหมายและอยู่ในช่วง (-1.59, 5.60) ที่ 95% Confidence Interval และอยู่ในช่วง (-3.47, 7.48) ที่ 95% Prediction Interval โดยมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดเท่ากับ 1.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถูกต้องของขนาดชิ้นงานได้ค่าจริงที่สอดคล้องกับค่ากำหนดเป้าหมายและอยู่ในช่วง (20.321, 20.844) ที่ 95% Confidence Interval และอยู่ในช่วง (20.184, 20.981) ที่ 95% Prediction Interval โดยมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดเท่ากับ 0.43

และมุมเอียงของชิ้นงานได้ค่าจริงที่สอดคล้องกับค่ากำหนดเป้าหมายและอยู่ในช่วง (-4.52, 8.35) ที่ 95% Confidence Interval และอยู่ในช่วง (-7.90, 11.74) ที่ 95% Prediction Interval โดยมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดเท่ากับ -16.30

โดยผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.19 ดังนี้

ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

ผลตอบ	ค่าทำนาย	ค่าจริง					%Avg. Error	95% CI	95% PI
		1	2	3	4	5			
Roughness	2.0053	2.208	2.560	1.500	1.982	1.894	1.17	-1.59, 5.60	-3.47, 7.48
Dimension	20.5825	20.69	20.73	20.60	20.69	20.64	0.43	20.321, 20.844	20.184, 20.981
Taper	1.9191	1.469	2.033	2.990	1.153	0.386	-16.30	-4.52, 8.35	-7.90, 11.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สรุปผลการทดลองในกระบวนการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 1

การวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการตัดในการตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L โดยกระบวนการตัดด้วยพลาสมาโดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน ความเร็วที่ใช้ในการตัด และขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว ความถูกต้องของขนาดที่ได้ และมุมเอียงของชิ้นงาน โดยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

(1) ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานมีผลต่อค่าความหยาบผิวเป็นอิทธิพลหลัก

(2) ความเร็วที่ใช้ในการตัดมีผลต่อขนาดของชิ้นงานซึ่งเป็นอิทธิพลหลัก และมีอิทธิพลร่วมของระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานกับความเร็วที่ใช้ในการตัด และขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดกับความเร็วที่ใช้ในการตัดมีผลต่อขนาดของชิ้นงานเช่นเดียวกัน

(3) ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดมีผลต่อมุมเอียงชิ้นงานซึ่งเป็นอิทธิพลหลัก และอิทธิพลร่วมของระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานกับความเร็วที่ใช้ในการตัดมีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงานเช่นเดียวกัน

(4) การศึกษานี้สามารถใช้ผลการทดลองนำไปศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดในการตัดชิ้นงานให้มีค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุด ความถูกต้องของขนาดที่ได้ และมุมเอียงของชิ้นงานน้อยที่สุด

5.1.2 สรุปผลการทดลองในกระบวนการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 2

ในขั้นตอนนี้ได้ใช้การออกแบบการทดลองด้วยการเพิ่มระดับปัจจัยในระดับกลางทั้งหมด 5 การทดลอง ซึ่งมีตัวแปรการตัดอยู่ 3 ตัวแปรด้วยกัน ได้แก่ ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current) ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height) และความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) โดยมีผลตอบทางการศึกษาคือ ความเรียบของพื้นผิวรอยตัดตามแนวความยาว (Roughness) ความถูกต้องของขนาดที่ได้ (Dimension) และมุมเอียงของชิ้นงาน (Taper) ซึ่งผลตอบของการศึกษาของปัจจัยระดับกลางมีค่าที่อยู่ในระดับที่พึงพอใจ ดังนั้นจึงสามารถใช้ระดับปัจจัยนี้ไปทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ (Response surface methodology: RSM) โดยการใช้ตัวแบบการทดลอง Box-Behnken design ต่อไปในกระบวนการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 สรุปผลการทดลองในกระบวนการตัดด้วยพลาสมาครั้งที่ 3

ในขั้นตอนนี้ได้ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ (Response surface methodology: RSM) โดยการใช้ตัวแบบการทดลอง Box-Behnken design ซึ่งในการทดลองนี้มีตัวแปรการตัดอยู่ 3 ตัวแปรด้วยกัน ได้แก่ ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current) ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height) และความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) โดยมีผลตอบทางการศึกษาคือ ความเรียบของพื้นผิวรอยตัดตามแนวความยาวต้องมีค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ขนาดชิ้นงานมีความถูกต้องมากที่สุด และมุมเอียงของชิ้นงานมีมุมเอียงน้อยที่สุด ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

(1) ค่าของตัวแปรที่ใช้ในการตัดที่ให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ขนาดชิ้นงานมีความถูกต้องมากที่สุด และมุมเอียงของชิ้นงานมีมุมเอียงน้อยที่สุดคือ ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดชิ้นงานเท่ากับ 45A ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน เท่ากับ 0.96 mm และความเร็วในการตัดชิ้นงานเท่ากับ 45 mm/sec

(2) นำค่าที่ได้จากการหาตัวแปรการตัดจากข้อที่ (1) ไปใช้ในการตัดชิ้นงานเพื่อยืนยันผลการศึกษา พบว่าค่าความหยาบผิว ความถูกต้องของขนาดที่ได้ และมุมเอียงของชิ้นงาน มีค่าจริงที่สอดคล้องกับค่ากำหนดเป้าหมายและอยู่ในช่วงของ 95% Confidence Interval และ 95% Prediction Interval โดยมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของค่าความหยาบผิวอยู่ที่ 1.17, ของความถูกต้องของขนาดชิ้นงานอยู่ที่ 0.43 และของค่ามุมเอียงของชิ้นงานอยู่ที่ -16.39

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการศึกษาในอนาคต

ในการศึกษานี้ใช้กระบวนการตัดด้วยพลาสมาระบบก๊าซและก๊าซปกคลุมคือ อากาศ/อากาศ ตัดเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L หนา 3 มิลลิเมตร ดังนั้นการศึกษาในอนาคตควรศึกษากระบวนการตัดด้วยพลาสมาระบบพลาสมาก๊าซไนโตรเจนและอากาศเป็นก๊าซปกคลุมเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพการตัดว่าดีขึ้นหรือไม่ ซึ่งข้อมูลจากบริษัท Hypertherm ผู้ผลิตเครื่องตัดด้วยพลาสมา แนะนำว่าการตัดเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยระบบพลาสมาก๊าซไนโตรเจนนั้นจะให้คุณภาพการตัดที่ดีกว่า ชิ้นงานจะมีความเรียบ และเป็นเงา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2017. **เลเซอร์และพลาสมาอาร์ค.** [Online]. Available : http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/Industrial(PDF)/Bay%2016%20Laser%20and%20Plasma%20Arc.pdf

[2] BOC Limited. 2017. **Facts about plasma technology and plasma cutting**. [Online]. Available : http://www.boc-gas.co.nz/internet.lg.lg.nzl/en/images/BOC%20Facts%20about%20plasma%20technology435_68107.pdf?v=1

[3] Hypertherm. 2017. **Cut Quality**. [Online]. Available : https://www.hypertherm.com/en-US/customer-support/getting-the-most-from-your-products/cut-quality/

[4] Outokumpu. 2017. **High Performance Stainless Type 316, Type 316L UNS S31600, UNS S31603.** [Online]. Available : http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Datasheet-316-316L-imperial-hpsa- outokumpu-en-americas.pdf.

[5] K. Salonitis and S. Vatousianos. 2012. "Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process." **Procedia CIRP 3.** 45(3) : 287 – 292.

[6] Abdulkadir Gullu and Umut Atici. 2006. "Investigation of the effects of plasma arc parameters on the structure variation of AISI 304 and St 52 steels." **Materials and Design.** 27 : 1157–1162.

[7] R. Bini, B.M. Colosimo, A.E. Kutlu, and M. Monno. 2008. "Experimental study of the features of the kerf generated by a 200A high tolerance plasma arc cutting system." **Journal of materials processing technology**. 196 : 345–355.

[8] E. Gariboldi and B. Previtali. 2005. "High tolerance plasma arc cutting of commercially pure titanium." **Journal of Materials Processing Technology**. 160 : 77–89.

[9] Milan Kumar Das, Kaushik Kumar, Tapan Kr. Barman and Prasanta Sahoo. 2014. "Optimization of Process Parameters in Plasma Arc Cutting of EN 31 Steel Based on MRR and Multiple Roughness Characteristics Using Grey Relational Analysis." **Procedia Materials Science.** 5 : 1550-1559.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[10] Subbarao Chamarthi, N.Sinivasa Reddy, Manoj Kumar Elipey and D.V. Ramana Reddy. 2013. "Investigation Analysis of Plasma arc cutting Parameters on the Unevenness surface of Hardox-400 material." **Procedia Engineering.** 64 : 854 – 861.

[11] VIVEK SINGH. 2011. ANALYSIS OF PROCESS PARAMETERS OF PLASMA ARC CUTTING USING DESIGN OF EXPERIMENT. A master thesis of Mechanical Engineer, Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology Rourkela. India.

[12] W.J. Xu, J.C. Fang, Y.S. Lu. 2002. "Study on ceramic cutting by plasma arc." **Journal of Materials Processing Technology.** 129 : 152-156.

[13] SIMKULET, V et al. 2011. "MICROHARDNESS EVALUATION OF STEEL EN S233J2G3 IN HEAT AFFECTED ZONE AFTER PLASMA ARC CUTTING." **Annals & Proceedings of DAAAM International.** 22(1) : 1726-9679.

[14] Agnieszka Skoczylas and Kazimierz Zaleski. 2015. "EFFECT OF PLASMA CUTTING PARAMETERS UPON SHAPES OF BEARING CURVE OF C45 STEEL SURFACE." **Advances in Science and Technology Research Journal.** 9(27) : 78–82.

[15] Daniel J. Thomas. 2011. "Optimising Plasma Cut-edge Properties for Improving the Durability of Bridge Structures." **International Journal of Steel Structures.** 11(4) : 481-493.

[16] Seong-Il Kim and Min-Ho Kim. 2013. "Evaluation of Cutting Characterization in Plasma Cutting of Thick Steel Ship Plates." **INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING.** 14(9) : 1571-1575.

[17] Jiayou Wang and Zhengyu Zhu and Conghui He and Feng Yang. 2010. "Effect of dual swirling plasma arc cutting parameters on kerf characteristics." **Int J Mater Form.** 4 : 39–43.

[18] A. Iosub, Gh. Nagit, F. Negoescu. 2008. "Plasma Cutting of Composite Materials." **Int J Mater Form.** 1 : 1347 –1350.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[19] R. Adalarasan and M. Santhanakumar and M. Rajmohan. 2015. "Application of Grey Taguchi-based response surface methodology (GT-RSM) for optimizing the plasma arc cutting parameters of 304L stainless steel." **Int J Adv Manuf Technol.** 78 : 1161–1170.

[20] Hypertherm. 2017. **How to choose the best gases for your multi-gas plasma torch** [Online]. Available : https://www.hypertherm.com/en-US/learn/articles/illustrated-guide-to-plasma-gas-selection/

[21] William D. Callister, Jr. 2007. **Materials science and engineering: an introduction.** Seventh Edition. United States of America: John Wiley & Son.

[22] William D. Callister, Jr. 2011. **Fundamentals of Materials Science and Engineering: an interactive.** Fifth Edition. United States of America: John Wiley & Son.

[23] W. G. Moffatt, G.W. Pearsall, and J.Wulff. 1964. **The Structure and Properties of Materials, Vol. I, Structure**. United States of America: John Wiley & Son.

[24] ธีรพงษ์ หาญวิโรจน์กุล. 2011. เหล็กกล้า (ไร้สนิม) สำหรับงานทนความร้อน. **Metals world. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ**. 70 – 73.

[25] บมจ.โพสโค-ไทยน๊อคซ์. 2014. เหล็กกล้าไร้สนิมในอุตสาหกรรมอาหาร. **วารสาร TSSDA forward สมาคมพัฒนาสเตนเลสไทย.** 13(10) : 8-9.

[26] ตรีนุช เจริญรัตน์ (2016). สเตนเลสในงานก่อสร้างอุโมงค์. **วารสาร TSSDA forward สมาคมพัฒนาสเตนเลสไทย**. 15(5) : 8-9.

[27] Jim Frost. 2017. **Regression Analysis: How Do I Interpret R-squared and Assess the Goodness-of-Fit?.** [Online]. Available : http://blog.minitab.com/blog/adventures-in-statistics-2/regression-analysis-how-do-i-interpret-r-squared-and-assess-the-goodness-of-fit.

[28] Douglas C. Montgomery. 2013. **Design and Analysis of Experiments (International Student version)**. Eight Edition. Singapore : John Wiley & Son.

[29] ปารเมศ ชุติมา. 2545. **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[30] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. **การออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท้อป.

[31] ประจักร จัตกุล. 2012. “การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการตัดเหล็กเครื่องมือ K460 โดยกระบวนการตัดด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[32] Outokumpu. 2017. **Surface Finishes.** [Online]. Available : http://www.outokumpu.com/sitecollectiondocuments/outokumpu-surface-finishes-brochure.pdf

[33] SK Škrlj d.o.o. 2012. **Equipment for food industry**. [Online]. Available : http://sk-skrlj.com/assets/files/industrija/zivilska/Zivilska_katalog_2012-03%20(EN)_mail.PDF

[34] OSTP. 2014. **OSTP Product Catalogue**. [Online]. Available : http://www.ostp.biz/sites/313/content/docs/OSTP%20Product%20Catalogue%202014%20Rev0818.pdf

[35] Hypertherm. 2017. **Hole quality**. [Online]. Available : https://www.hypertherm.com/en-US/customer-support/getting-the-most-from-your-products/cut-quality/hole-quality/

[36] Hypertherm. 2013. **Hypertherm Powermax 45 Plasma arc cutting system Operator Manual.** Revision 2. USA : Hypertherm

[37] TOKYO SEIMITSU. 2017. **APPLICATION GUIDE MANUAL FOR SURFCOM SERIES SURFACE ROUGHNESS & WAVINESS PARAMETERS.** [Online]. Available : http://www.gaugeshop.com/_images/roughness/applications_ guide_surface_finish.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 27 ประจำปี 2560

และการประชุมวิชาการระดับชาติด้านบริหารธุรกิจและเศรษฐศาสตร์ ครั้งที่ 3

ประเทศไทย 4.0 "วิจัยขับเคลื่อนสังคม"

Thailand 4.0 "Research to Mobilize Society"

ขอมอบเกียรติบัตรนี้เพื่อแสดงว่า

มนัญญา สาคร

ได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัยภาคบรรยาย

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L โดยกระบวนการตัดด้วยพลาสมา ที่มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด ความถูกต้องของขนาดและมุมเอียงของชิ้นงาน

ณ โรงแรมบีพี สมิหลา บีช อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา

ให้ไว้ ณ วันที่ 4 พฤษภาคม 2560

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย ชำนิ)

อธิการบดีมหาวิทยาลัยทักษิณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

O17

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L โดยกระบวนการตัดด้วยพลาสมา ที่มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด ความถูกต้องของขนาดและมุมเอียงของชิ้นงาน

นางสาวมนัญญา สาคร[1*] และ รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3 ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน ความเร็วที่ใช้ในการตัดและขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด ค่าตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาสำหรับระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานคือ 0.96 และ 1.93 มิลลิเมตร ค่าตัวแปรสำหรับความเร็วที่ใช้ในการตัดคือ 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที และค่าตัวแปรสำหรับขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดคือ 40 และ 45 แอมแปร์ โดยมีผลตอบของการศึกษา คือ ความเรียบของพื้นผิวรอยตัด ความถูกต้องของขนาดที่ได้ และมุมเอียงของชิ้นงาน ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานมีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด ความเร็วที่ใช้ในการตัดมีผลต่อขนาดของชิ้นงานเป็นอิทธิพลหลัก และมีอิทธิพลร่วมของระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานกับความเร็วที่ใช้ในการตัด และขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดกับความเร็วที่ใช้ในการตัดมีผลต่อขนาดของชิ้นงานเช่นเดียวกัน และพบว่าขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดมีผลต่อมุมเอียงชิ้นงานซึ่งเป็นอิทธิพลหลัก และอิทธิพลร่วมของระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานกับความเร็วที่ใช้ในการตัดมีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงานเช่นเดียวกัน

คำสำคัญ : เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L, การตัดด้วยพลาสมา

[1] นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520

[2] อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520

* Corresponding author: Tel.: 0956458665. E-mail address: mananyasakhon@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทนำ

การตัดโลหะด้วยความเร็วสูงเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในขั้นตอนแรกของการแปรรูปผลิตภัณฑ์ในวงการอุตสาหกรรม โดยการตัดด้วยพลาสมานั้นเข้ามามีบทบาทมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการตัดด้วยพลาสมาอาจเกิดปัญหามุมเอียงของผิวหน้าชิ้นงานที่ตัดเกิดครีบ รอยโลหะบนผิวหน้าชิ้นงาน หรือขอบของชิ้นงานมีลักษณะมนไม่เรียบตรง หากมีสภาวะการตัดที่ไม่เหมาะสม ซึ่งข้อบกพร่องเหล่านี้สามารถส่งผลต่อคุณภาพและข้อกำหนดของชิ้นงานได้ [1] จากงานวิจัยของ Salonitis และ Vatousianos ได้ศึกษาถึงปัจจัยของกระบวนการตัดที่มีผลต่อคุณภาพของการตัดเหล็กกล้าละมุน พบว่า ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานมีผลต่อมุมเอียงของผิวหน้าชิ้นงานและความเรียบของชิ้นงาน และขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดมีผลต่อบริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone) [2] และจากงานวิจัยของ Gullu และ Atici ได้ทำการศึกษาการตัดโลหะ AISI 304 and St 52 steels พบว่าความเร็วในการตัดและระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานมีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานในด้านความแข็ง (Hardness) [3] และจากการวิจัยของ Bini ที่ทำการทดลองตัดเหล็กกล้าละมุนหนา 15 มิลลิเมตร พบว่าความเร็วที่ใช้ในการตัดและแรงเคลื่อนอาร์คมีผลต่อลักษณะผิวหน้าของชิ้นงาน เกิดผิวที่มีลักษณะเป็นคลื่น อีกทั้งยังส่งผลต่อความลาดเอียงของขอบที่ตัดอีกด้วย และอิทธิพลของระยะระหว่างหัวตัดกับชิ้นงานก็ส่งผลต่อรอยตัดอีกด้วย [4] และจากงานวิจัยของ Gariboldi ที่ทำการทดลองตัด ไทเทเนียมหนา 5 มิลลิเมตร พบว่า ถ้าทำการลดผลของอิทธิพลร่วมระหว่างลำแสงพลาสมากับการป้อนก๊าซออกซิเจนด้วยความเร็วสูงจะช่วยลดผลกระทบต่อชิ้นงานด้านรูปร่างเช่นความเป็นคลื่นบนผิวและขนาดของรอยตัดชิ้นงานให้มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้น [5]

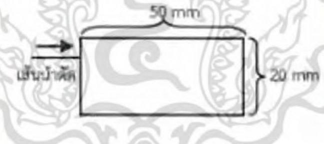
บทความนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k โดยมีตัวแปรการตัด 3 ตัวแปร ได้แก่ ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current) ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height) และความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) ค่าตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาสำหรับระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานคือ 0.96 และ 1.93 มิลลิเมตร ค่าตัวแปรสำหรับความเร็วที่ใช้ในการตัดคือ 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที และค่าตัวแปรสำหรับขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดคือ 40 และ 45 แอมแปร์ โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งของแต่ละเงื่อนไข เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรเหล่านี้ที่มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด ความถูกต้องของขนาดที่ได้ และมุมเอียงของชิ้นงาน

วิธีการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L หนา 3 มิลลิเมตร ผลิตโดย WALSIN LIHWA CORP. ประเทศไต้หวัน ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L เป็นเหล็กกล้าที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางเพราะทนต่อการกัดกร่อน จึงนำมาใช้เป็นถังผสมสารและชิ้นส่วนของเครื่องจักร [6] คุณลักษณะส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L คือ 0.030 wt% C, 1 wt% Si, 2 wt% Mn, 0.045 wt% P, 0.030 wt% S, 10-14 wt% Ni, 16-18 wt% Cr, 2-3 wt% Mo, 0.100 wt% N และส่วนผสมที่เหลือเป็น Fe

การทดลองนี้ทำการตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัดพลาสมา Hypertherm รุ่น Powermax 45 พร้อมหัวตัด T45m ดังแสดงในภาพที่ 1 ทำการตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด (กว้างxยาว) 20x50 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2

ภาพที่ 1 เครื่องตัดพลาสมา



ภาพที่ 2 แบบชิ้นงาน

ภาพที่ 3 การวัดมุมเอียงของชิ้นงาน

เมื่อตัดชิ้นงานตามเงื่อนไขทั้งหมดแล้ว จึงนำชิ้นงานที่ได้ไปวัดค่าความหยาบผิว (Ra) ตามแนวรอยตัดด้านยาว 50 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องวัดความหยาบผิว TOKYO SEIMITSU รุ่น SURFCOM 480A เพื่อทำการวัดค่าความหยาบผิว (Ra) ที่ตำแหน่งผิวของชิ้นงานตามแนวรอยตัด ใช้ช่วงในการวัด (Stroke) เท่ากับ 2.5 mm ความเร็วในการวัดเท่ากับ 0.3 mm/s และ Cut-off Length เท่ากับ 0.25 mm ค่าความหยาบผิวที่ศึกษาในการทดลองนี้ คือ ค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลข (Arithmetic mean roughness: Ra) ซึ่งมีหน่วยเป็น μm

ส่วนขนาดชิ้นงาน (Dimension) สามารถวัดโดยใช้ Vernier Calipers แบบดิจิตอลของ Mitutoyo รุ่น ABSOLUTE DIGIMATIC มีหน่วยการวัดเป็นมิลลิเมตร 2 ตำแหน่ง วัดด้านกว้าง 20 มิลลิเมตรเพราะการตัดด้วยพลาสมาจะมีผลต่อด้านกว้างนี้ และการวัดมุมเอียงของชิ้นงานตามแนวรอยตัด ได้ใช้การถ่ายภาพแล้วนำภาพถ่ายมาวัดมุมเอียงชิ้นงานด้วยโปรแกรม AutoCad 2015 ดังแสดงในภาพที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการทดลองของความเรียบของพื้นผิวรอยตัดตามแนวความยาว (Roughness) ความถูกต้องของขนาดที่ได้ (Dimension) และมุมเอียงของชิ้นงาน (Taper) ของกระบวนการตัดด้วยพลาสมา ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดลองของความเรียบของพื้นผิวรอยตัดตามแนวความยาว (Roughness) ความถูกต้องของขนาดที่ได้ (Dimension) และมุมเอียงของชิ้นงาน (Taper)

ตัวแปรที่ใช้ในการตัด			ผลการทดลอง								
Current (A)	Height (mm)	Speed (mm/s)	Roughness (µm)			Dimension (mm)			Taper (°)		
			Replicate			Replicate			Replicate		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
40	0.96	40	4.002	2.550	2.673	21.17	21.31	21.55	10.939	2.806	6.338
40	0.96	50	2.933	2.176	3.641	20.87	21.15	21.05	2.334	4.447	1.204
40	1.93	40	3.049	4.931	3.538	21.11	20.93	21.14	0.959	1.161	2.989
40	1.93	50	2.716	3.940	2.164	21.06	21.62	21.49	3.380	5.913	10.220
45	0.96	40	2.401	4.408	3.720	20.97	21.01	20.98	5.375	8.414	7.332
45	0.96	50	3.759	2.574	2.455	21.07	21.26	21.31	10.727	7.594	10.058
45	1.93	40	2.985	4.510	3.671	20.62	20.77	21.15	5.858	8.779	10.578
45	1.93	50	3.516	6.848	6.343	21.28	21.4	21.41	10.723	14.334	12.204

การวิเคราะห์ผลการทดลองของความเรียบของพื้นผิวรอยตัด (Roughness)

จากผลทดลองสามารถนำค่าที่ได้นำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ดังตารางที่ 2 พบว่า ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height) มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัดที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากตัวแปรมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 โดยตัวแปรนี้มีอิทธิพลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัดของชิ้นงานมากที่สุดเนื่องจากมีค่า F-ratio สูงสุด ซึ่งผลที่ออกมานั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Salonitis และ Vatousianos ที่ว่าระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานมีผลต่อความเรียบของชิ้นงาน [2]

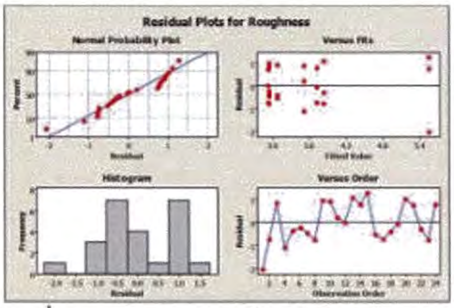
เมื่อพิจารณาค่า R-Squared โดยมีค่าเท่ากับ 50.08% และ R-Sq (adj) = 28.25% ค่า R-Sq เป็นค่าที่นำมาใช้วัดว่าตัวแบบสมการเชิงเส้นที่ได้มานั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ แต่อย่างไรก็ตาม การพิจารณาเฉพาะค่า R-Squared อย่างเดียวอาจไม่สามารถตอบได้ว่าตัวแบบสมการนั้นเหมาะสมหรือไม่ แต่ต้องมีการพิจารณาค่า R-Squared ร่วมกับการวิเคราะห์ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างและตัวสถิติอื่นๆ [7] ซึ่งจากการพิจารณารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) จากภาพที่ 4 พบว่ามีการกระจายตัวแบบแจกแจงปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีค่าเสถียรในระดับที่น่าพอใจ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการทดลองนี้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้ แต่จะต้องมีการใช้ตัวแบบสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพราะว่าข้อมูลไม่สมกับตัวแบบเชิงเส้น [7] โดยผลจากการทดลองนี้จะต้องทำการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์เพิ่มเติมในเทอมของสมการควอดราติกต่อไป

ตารางที่ 2 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด

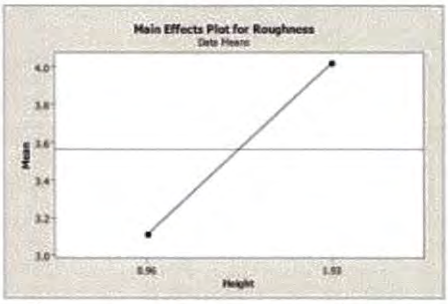
```
Analysis of Variance for Roughness (coded units)
Source      DF Seq SS Adj SS Adj MS  F  P
Main Effects    3 8.2675 8.2675 2.75582 2.65 0.084
 Current     1 3.2834 3.2834 3.28338 3.15 0.095
 Height      1 4.9677 4.9677 4.96769 4.77 0.044
 Speed     1 0.0164 0.0164 0.01638 0.02 0.902
2-Way Interactions  3 4.6904 4.6904 1.56346 1.50 0.252

 Current*Height   1 1.5981 1.5981 1.59805 1.53 0.233
 Current*Speed   1 2.0259 2.0259 2.02595 1.94 0.182
 Height*Speed   1 1.0664 1.0664 1.06640 1.02 0.327
3-Way Interactions  1 3.7644 3.7644 3.76438 3.61 0.075
 Current*Height*Speed 1 3.7644 3.7644 3.76438 3.61 0.075
Residual Error   16 16.6660 16.6660 1.04163
 Pure Error   16 16.6660 16.6660 1.04163
Total      23 33.3882
```


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4 ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของค่าความหยาบผิว



ภาพที่ 5 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปรที่ใช้ตัดที่มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด

และเมื่อพิจารณากราฟของอิทธิพลหลักของตัวแปรที่ใช้ตัดคือระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height) ที่มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด ดังแสดงในภาพที่ 5 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานมีอิทธิพลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด โดยระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานที่ 0.96 mm จะให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด

การที่ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานมีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัดนั้น เนื่องลักษณะลำแสงของพลาสมานั้นไม่ใช่ทรงกระบอกตรงแต่คล้ายเปลวไฟของเทียนไข ดังนั้นเมื่อลำแสงที่ออกมาตัดชิ้นงานมีระยะที่ไม่เหมาะสมก็จะทำให้เกิดรอยตัดที่เป็นลักษณะริ้วหรือ dragline ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความหยาบผิว [1]

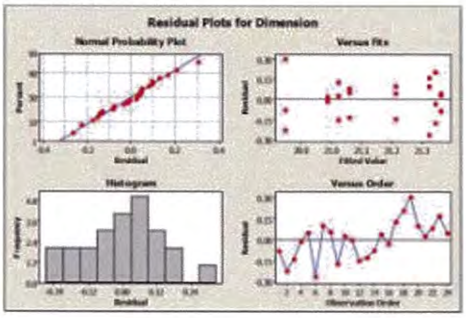
การวิเคราะห์ผลการทดลองของความถูกต้องของขนาดที่ได้ (Dimension)

จากตารางที่ 3 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อความถูกต้องของขนาดที่ได้ พบว่า ความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) และ interaction ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current)*ความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) และระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height)*ความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) มีผลต่อชิ้นงานที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากตัวแปรมีค่า p value น้อยกว่า 0.05 โดยตัวแปรนี้มีอิทธิพลต่อความถูกต้องของขนาดที่ได้ของชิ้นงานมากที่สุดเนื่องจากมีค่า F-ratio สูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bini ที่ว่าความเร็วที่ใช้ในการตัดและแรงเคลื่อนอาร์คมีผลต่อความลาดเอียงของขอบที่ตัดอีกทั้งระยะระหว่างหัวตัดกับชิ้นงานก็มีผลอีกด้วย [4] ซึ่งเมื่อรอยตัดของชิ้นงานมีความลาดเอียง ความถูกต้องของขนาดที่ได้ก็จะมีผลกระทบเช่นกัน เมื่อพิจารณาค่า R-Squared โดยมีค่า R-Sq เท่ากับ 63.95% และ R-Sq (adj) = 48.17% ร่วมกับการพิจารณารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) จากภาพที่ 6 พบว่ามีการกระจายตัวแบบแจกแจงปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีค่าเสถียรในระดับที่น่าพอใจ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการทดลองนี้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้ แต่จะต้องมีการใช้ตัวแบบสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพราะว่าข้อมูลไม่สมกับตัวแบบเชิงเส้น [7] โดยผลจากการทดลองนี้จะต้องทำการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์เพิ่มเติมในเทอมของสมการควอดราติกต่อไป

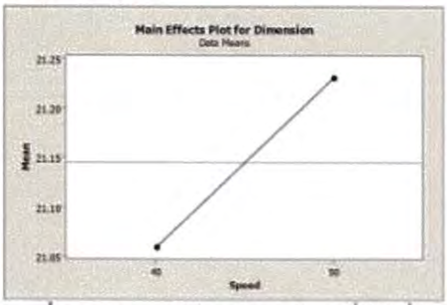
ตารางที่ 3 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อความถูกต้องของขนาดที่ได้

```
Analysis of Variance for Dimension (coded units)
Source          DF Seq SS  Adj SS  Adj MS   F  P
Main Effects      3 0.22043 0.220433 0.073478 2.68 0.082
 Current        1 0.04335 0.043350 0.043350 1.58 0.227
 Height         1 0.00027 0.000267 0.000267 0.01 0.923
 Speed         1 0.17682 0.176817 0.176817 6.44 0.022
2-Way Interactions  3 0.52603 0.526033 0.175344 6.39 0.005
 Current*Height     1 0.00002 0.000017 0.000017 0.00 0.981
 Current*Speed     1 0.24000 0.240000 0.240000 8.75 0.009
 Height*Speed     1 0.28602 0.286017 0.286017 10.42 0.005
3-Way Interactions  1 0.03227 0.032267 0.032267 1.18 0.294
 Current*Height*Speed 1 0.03227 0.032267 0.032267 1.18 0.294
Residual Error    16 0.43907 0.439067 0.027442
 Pure Error     16 0.43907 0.439067 0.027442
Total        23 1.21780
```


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

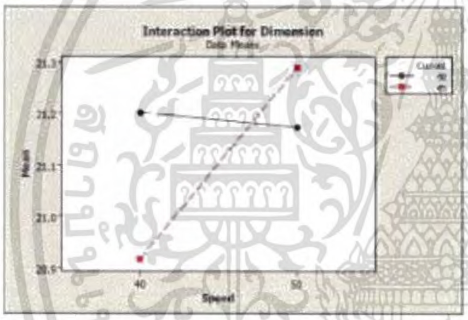


ภาพที่ 6 ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของขนาดของชิ้นงาน

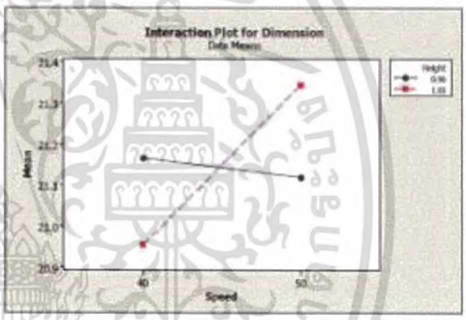


ภาพที่ 7 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปรที่ใช้ตัดที่มีผลต่อความถูกต้องของขนาดที่ได้

และเมื่อพิจารณากราฟของอิทธิพลหลักของตัวแปรที่ใช้ตัดคือความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) ที่มีผลต่อความถูกต้องของขนาดที่ได้ (Dimension) ดังแสดงในภาพที่ 7 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ใช้ในการตัดมีอิทธิพลต่อความถูกต้องของขนาดที่ได้ โดยความเร็วที่ใช้ในการตัดที่ 40 mm/sec จะทำให้ชิ้นงานมีขนาดที่ถูกต้องที่สุด แต่จากตารางที่ 3 พบว่าอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current)*ความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) และระหว่างระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height) *ความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อขนาดของชิ้นงานเช่นกัน ดังนั้นการเลือกเงื่อนไขในการตัดที่เหมาะสมจึงต้องพิจารณาจากกราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ใช้ตัดด้วย ดังแสดงในภาพที่ 8.1 และ 8.2 ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่า ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดชิ้นงานที่ 45A ความเร็วที่ใช้ในการตัด 40 mm/sec และระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานที่ 1.93 mm จะให้ชิ้นงานมีขนาดที่ถูกต้องที่สุด



ภาพที่ 8.1 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ใช้ตัดที่มีผลต่อของความถูกต้องของขนาดที่ได้



ภาพที่ 8.2 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ใช้ตัดที่มีผลต่อของความถูกต้องของขนาดที่ได้

การที่ความเร็วที่ใช้ในการตัดเป็นอิทธิพลหลักที่มีผลต่อความถูกต้องของขนาดที่ได้นั้น เนื่องจากความเร็วในการตัดที่ไม่เหมาะสมที่มากหรือน้อยเกินไป ทำให้ลำแสงพลาสมาที่ออกมาตัดนั้นไม่เสถียร การตัดยังไม่มีการเกิดขึ้นอย่างเต็มที่ก็มีการเคลื่อนที่ของหัวตัดไปตำแหน่งอื่นแล้วหรือการตัดที่เคลื่อนที่ช้าเกินไปก็ทำให้เกิดปัญหาต่างๆ ของชิ้นงาน เช่น ความลาดเอียงของขอบชิ้นงาน เศษเสี้ยนหรือครีบ (burr) อีกทั้งอิทธิพลร่วมของขนาดกระแสไฟฟ้า*ความเร็ว และระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน*ความเร็วที่ใช้ในการตัดมากหรือน้อยเกินไป ยิ่งส่งผลต่อความเสถียรของลำแสงพลาสมา เกิดการตัดชิ้นงานได้ขนาดที่ไม่ถูกต้อง เพราะเงื่อนไขของการตัดยังไม่สัมพันธ์กันดี [1]

การวิเคราะห์ผลการทดลองของมุมเอียงของชิ้นงาน (Taper)

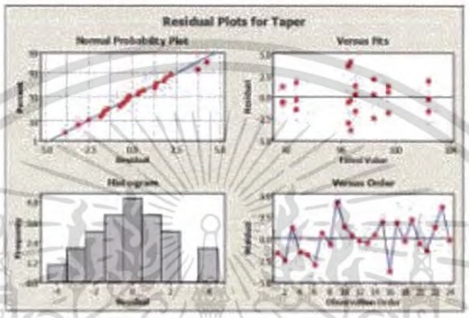
จากตารางที่ 4 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current) และ interaction ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height)*ความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) มีผลต่อชิ้นงานที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากตัวแปรมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 โดยตัวแปรนี้มีอิทธิพลต่อมุมเอียงของชิ้นงานมากที่สุด เนื่องจากมีค่า F-ratio สูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bini ที่ว่าความเร็วที่ใช้ในการตัดและแรงเคลื่อนอาร์คมีผลต่อความลาดเอียงของขอบที่ตัดอีกทั้งระยะระหว่างหัวตัดกับชิ้นงานก็มีผลอีกด้วย [4] โดยมีค่า R-Sq เท่ากับ 73.10% และ R-Sq (adj) = 61.34% ร่วมกับการพิจารณารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ภาพที่ 9 พบว่ามีการกระจายตัวแบบแจกแจงปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีค่าเสถียรในระดับที่น่าพอใจ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการทดลองนี้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้ แต่จะต้องมีการใช้ตัวแบบสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพราะว่าข้อมูลไม่สมกับตัวแบบเชิงเส้น [7] โดยผลจากการทดลองนี้จะต้องทำการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์เพิ่มเติมในเทอมของสมการควอดราติกต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน

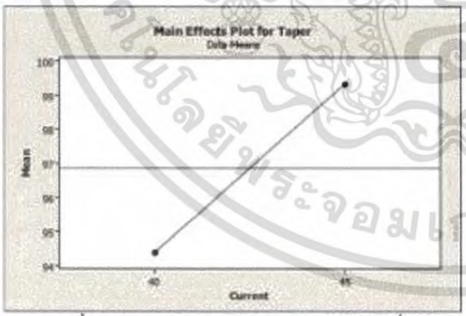
Analysis of Variance for Taper (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	169.693	169.693	56.564	9.71	0.001
Current	1	146.451	146.451	146.451	25.13	0.000
Height	1	3.784	3.784	3.784	0.65	0.432
Speed	1	19.458	19.458	19.458	3.34	0.086
2-Way Interactions	3	64.070	64.070	21.357	3.67	0.035
Current*Height	1	11.237	11.237	11.237	1.93	0.184
Current*Speed	1	12.039	12.039	12.039	2.07	0.170
Height*Speed	1	40.794	40.794	40.794	7.00	0.018
3-Way Interactions	1	19.646	19.646	19.646	3.37	0.085
Current*Height*Speed	1	19.646	19.646	19.646	3.37	0.085
Residual Error	16	93.230	93.230	5.827		
Pure Error	16	93.230	93.230	5.827		
Total	23	346.639				

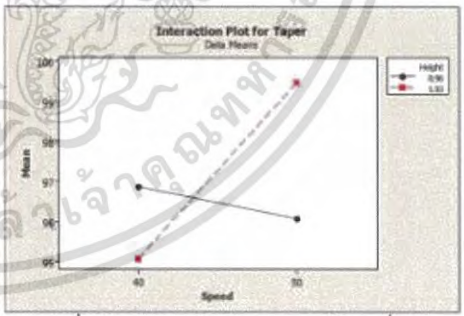


ภาพที่ 9 ภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของมุมเอียงของชิ้นงาน

และเมื่อพิจารณากราฟของอิทธิพลหลักของตัวแปรที่ใช้ตัดคือขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Current) ที่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน (Taper) ดังแสดงในภาพที่ 10 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดมีอิทธิพลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน แต่จากตารางที่ 4 พบว่าอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height)และความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อมุมเอียงของชิ้นงาน ดังนั้นการเลือกเงื่อนไขในการตัดที่เหมาะสมจึงต้องพิจารณาจากกราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ใช้ตัดคือระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน (Height) และความเร็วที่ใช้ในการตัด (Speed) ที่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 11 ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่า ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานที่ 1.93mm และความเร็วที่ใช้ในการตัดที่ 40 mm/sec จะให้ชิ้นงานมีมุมเอียงของชิ้นงานน้อยที่สุด



ภาพที่ 10 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปรที่ใช้ตัดที่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงาน



ภาพที่ 11 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปรที่ใช้ตัดที่มีผลต่อของมุมเอียงของชิ้นงาน

การที่ขนาดกระแสไฟฟ้าเป็นอิทธิพลหลักที่มีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงานนั้น เนื่องจากการตัดด้วยพลาสมานั้นเกิดจากการแตกตัวของโมเลกุลของก๊าซที่อุณหภูมิสูงด้วยการชาร์จก๊าซด้วยไฟฟ้าแล้วฉีดออกมาด้วยความเร็วสูงเพื่อทำให้วัสดุเกิดการหลอมเป็นรอยตัด อีกทั้งถ้าระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานและความเร็วที่ใช้ในการตัดมากหรือน้อยเกินไปมาเป็นอิทธิพลร่วมด้วยจะทำให้ลำแสงพลาสมายิ่งไม่เสถียรมากขึ้น อาจเกิดรอยตัดที่กว้างหรือแคบเกินไปจนส่งผลต่อมุมเอียงของชิ้นงานโดยตรง [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัย

บทความนี้นำเสนอการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการตัดในการตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L โดยกระบวนการตัดด้วยพลาสมา โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน ความเร็วที่ใช้ในการตัด และขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว ความถูกต้องของขนาดที่ได้ และมุมเอียงของชิ้นงาน โดยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

(1) ระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานมีผลต่อค่าความหยาบผิวเป็นอิทธิพลหลัก

(2) ความเร็วที่ใช้ในการตัดมีผลต่อขนาดของชิ้นงานซึ่งเป็นอิทธิพลหลัก และมีอิทธิพลร่วมของระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานกับความเร็วที่ใช้ในการตัด และขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดกับความเร็วที่ใช้ในการตัดมีผลต่อขนาดของชิ้นงานเช่นเดียวกัน

(3) ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดมีผลต่อมุมเอียงชิ้นงานซึ่งเป็นอิทธิพลหลัก และอิทธิพลร่วมของระยะระหว่างหัวตัดและชิ้นงานกับความเร็วที่ใช้ในการตัดมีผลต่อมุมเอียงของชิ้นงานเช่นเดียวกัน

(4) การศึกษานี้สามารถใช้ผลการทดลองนำไปศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดในการตัดชิ้นงานให้มีค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุด ความถูกต้องของขนาดที่ได้ และมุมเอียงของชิ้นงานน้อยที่สุด

เอกสารอ้างอิง

[1] BOC Limited. **Facts about plasma technology and plasma cutting**. Auckland, New Zealand.Retrieved Jan 29, 2017 from http://www.boc gas.co.nz/internet.lg.lg.nzl/en/images/BOC%20Facts%20about%20plasma%20 technology435_68107.pdf?v=1.0

[2]K. Salonitis and S. Vatousianos (2012). **Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process.** Procedia CIRP 3, 287 – 292.

[3] Abdulkadir Gullu and Umut Atici. (2006). **Investigation of the effects of plasma arc parameters on the structure variation of AISI 304 and St 52 steels.** Materials and Design 27. 1157-1162.

[4] R. Bini, B.M. Colosimo, A.E. Kutlu, and M. Monno. (2008). **Experimental study of the features of the kerf generated by a 200A high tolerance plasma arc cutting system.** journal of materials processing technology 196. 345-355.

[5] E. Gariboldi and B. Previtali (2005). **High tolerance plasma arc cutting of commercially pure titanium.** Journal of Materials Processing Technology 160. 77-89.

[6] Outokumpu High Performance Stainless. **Type 316, Type 316L UNS S31600, UNS S31603.** IL. USA. Retrieved Mar 26, 2017 from http://www.outokumpu.com/SiteCollection Documents/Datasheet 316 316L imperial hpsa outokumpu en americas.pdf.

[7] Jim Frost. **Regression Analysis: How Do I Interpret R-squared and Assess the Goodness-of-Fit?.** The Minitab Blog. Retrieved Mar 26, 2017 from http://blog.minitab.com/blog/adventures-in-statistics-2/regression-analysis-how-do-i-interpret-r-squared-and-assess-the-goodness-of-fit.

[8] Douglas C. Montgomery. (2013). **Design and Analysis of Experiments(International Student version).** Eight Edition. Singapore:John Wiley & Son.

[9] ประจักร จัตกุล. (2012). **การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการตัดเหล็กเครื่องมือ K460 โดยกระบวนการตัดด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด A STUDY ON WIRE-EDM PARAMETERS IN MACHINING OF K460 TOOL STEEL.** วิทยานิพนธ์. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. กรุงเทพ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

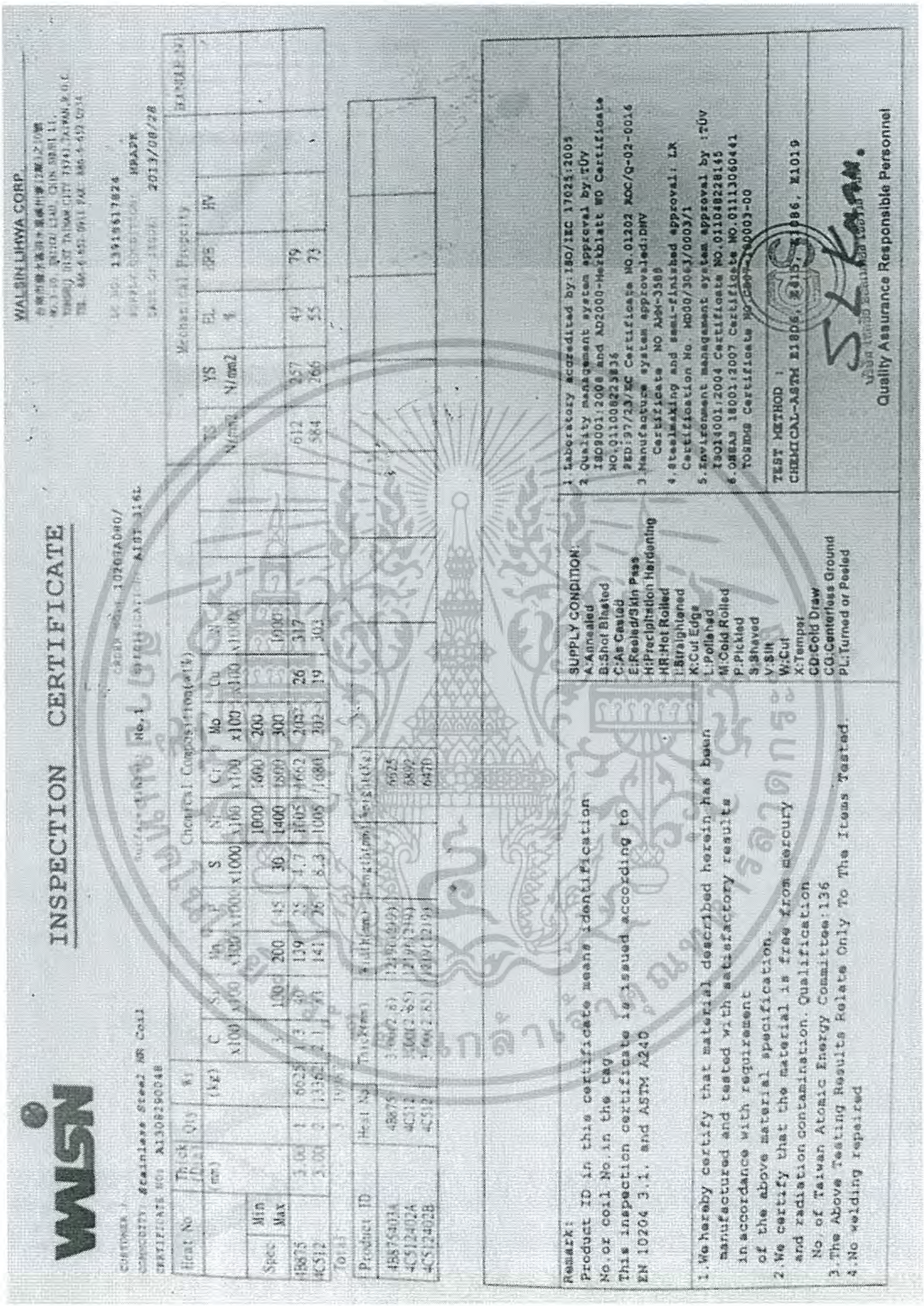
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ปริมาณธาตุผสมของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L

จาก บริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



WALSIN LIHWA CORP.

INSPECTION CERTIFICATE

CUSTOMER :
COMMODITY: Stainless Steel HR Coil
CERTIFICATE NO: A130829004B
Surface Finish: No.1
ORDER NO.: 10207A080/
SPECIFICATION: AISI 316L
LC NO: 13919617824
SUPPLY CONDITION: HRAPK
DATE OF ISSUE: 2013/08/28

Heat No		Thick (mm)	Qty	Wt (kg)	C x100	Si x100	Mn x100	P x1000	S x1000	Ni x100	Cr x100	Mo x100	Cu x100	N x1000	TS N/mm2	YS N/mm2	EL %	HRB	HV
Spec	Min									1000	1600	200							
Spec	Max				3	100	200	45	30	1400	1800	300		1000					
4B875		3.00	1	6625	1.3	30	139	25	4.7	1005	1662	203	26	317	612	257	49	79	
4C512		3.00	2	13362	2.1	43	141	26	8.3	1005	1680	202	19	303	584	266	55	73	
Total			3	[illegible]															

Product ID	Heat No	Thick(mm)	Width(mm)	Length(mm)	Weight(Kg)
4B875403A	4B875	3.00(2.8)	1219(1219)		6625
4C512402A	4C512	3.00(2.65)	1219(1219)		6892
4C512402B	4C512	3.00(2.85)	1219(1219)		6470

Remark:
Product ID in this certificate means identification No.or coil No.in the tag.
This inspection certificate is issued according to EN 10204 3.1. and ASTM A240

1. We hereby certify that material described herein has been manufactured and tested with satisfactory results in accordance with requirement of the above material specification.
2. We certify that the material is free from mercury and radiation contamination. Qualification No. of Taiwan Atomic Energy Committee:136
3. The Above Testing Results Relate Only To The Items Tested.
4. No welding repaired

SUPPLY CONDITION:
A:Annealed
B:Shot Blasted
C:As Casted
E:Reeled/Skin Pass
H:Precipitation Hardening
HR:Hot Rolled
I:Straightened
K:Cut Edge
L:Polished
M:Cold Rolled
P:Pickled
S:Shaved
V:Slit
W:Cut
X:Temper
CD:Cold Draw
CG:Centerless Ground
PL:Turned or Peeled

1. Laboratory accredited by:ISO/IEC 17025:2005
2. Quality management system approval by:TÜV ISO9001:2008 and AD2000-Merkblatt W0 Certificate NO.011008225836 PED:97/23/EC Certificate NO.01202 ROC/Q-02-0016
3. Manufacture system approvaled:DNV Certificate NO AMM-3588
4. Steelmaking and semi-finished approval: LR Certification No. MD00/3063/0003/1
5. Environment management system approval by :TÜV ISO14001:2004 Certificate NO.011048228145
6. OHSAS 18001:2007 Certificate NO.01113060441 TOSHMS Certificate NO.[illegible]0003-00

TEST METHOD :
CHEMICAL-ASTM E1806, E415, E1086, E1019

Quality Assurance Responsible Personnel

ภาพที่ ข.1 ปริมาณธาตุผสมของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L จาก บริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

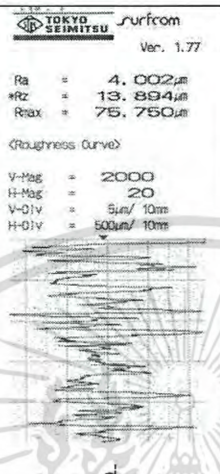
ภาคผนวก ค.

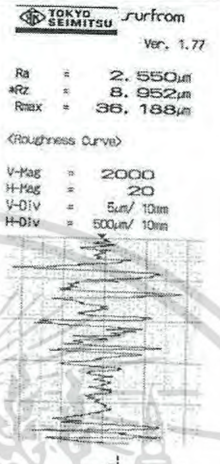
กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลข

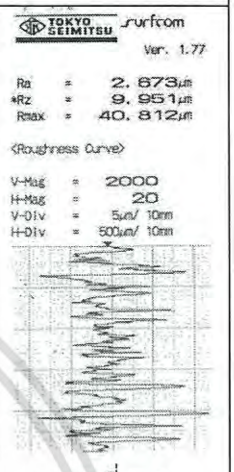
(Arithmetic mean roughness: Ra)

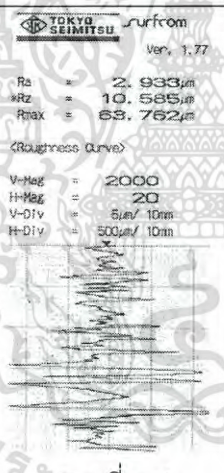
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

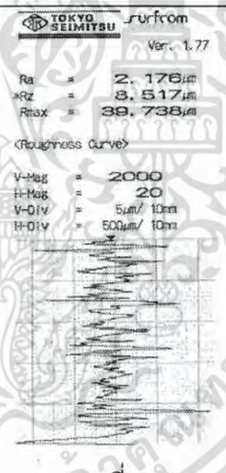
ตารางที่ ค.1 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลขของการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมาครั้งที่ 1

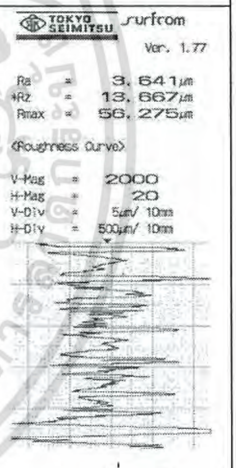
<table>
<tr><th colspan="3">ตัวแปรที่ใช้ในการตัด</th><th colspan="3" rowspan="2">กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลข: Ra (μm)</th></tr>
<tr><th rowspan="2">Current (A)</th><th rowspan="2">Height (mm)</th><th rowspan="2">Speed (mm/s)</th></tr>
<tr><th>Replicate 1</th><th>Replicate 2</th><th>Replicate 3</th></tr>
<tr><td>40</td><td>0.96</td><td>40</td>
<td>

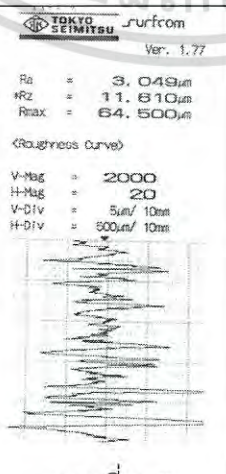
ภาพที่ ค.1</td>
<td>

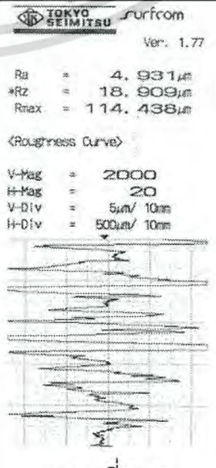
ภาพที่ ค.2</td>
<td>

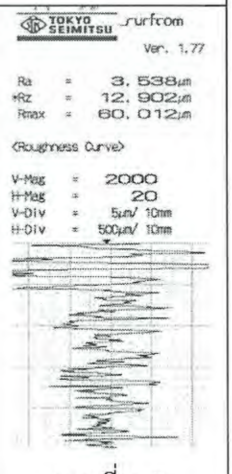
ภาพที่ ค.3</td></tr>
<tr><td>40</td><td>0.96</td><td>50</td>
<td>

ภาพที่ ค.4</td>
<td>

ภาพที่ ค.5</td>
<td>

ภาพที่ ค.6</td></tr>
<tr><td>40</td><td>1.93</td><td>40</td>
<td>

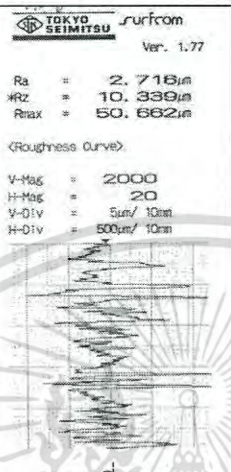
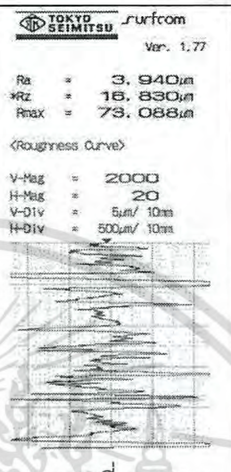
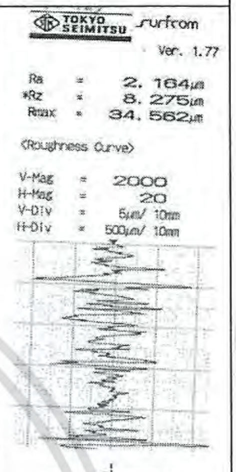
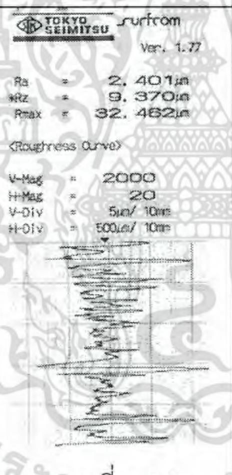
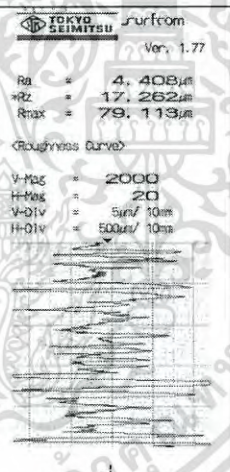
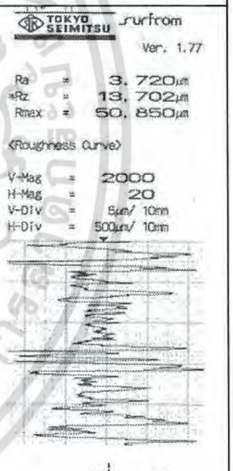
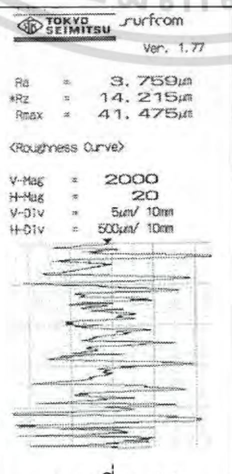
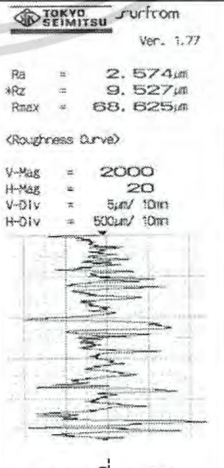
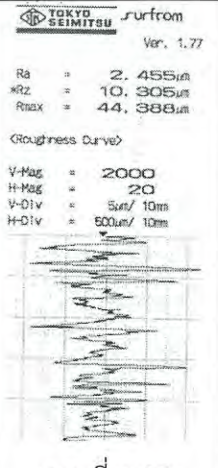
ภาพที่ ค.7</td>
<td>

ภาพที่ ค.8</td>
<td>

ภาพที่ ค.9</td></tr>
</table>

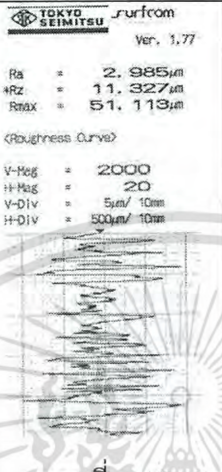
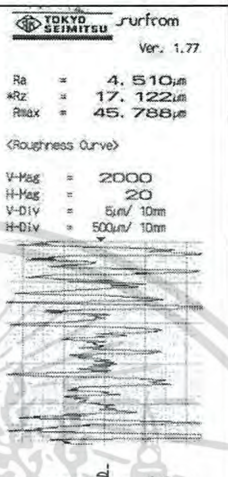
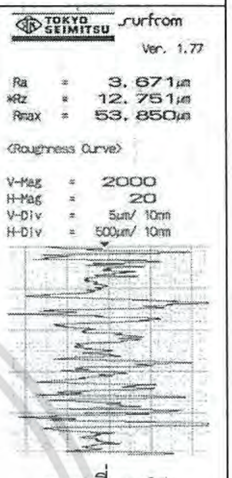
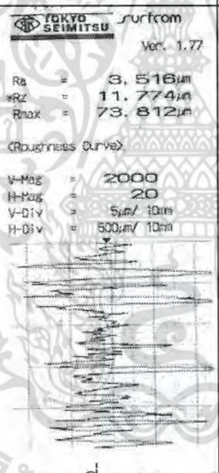
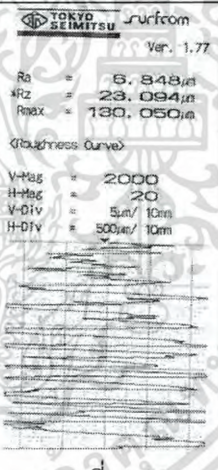
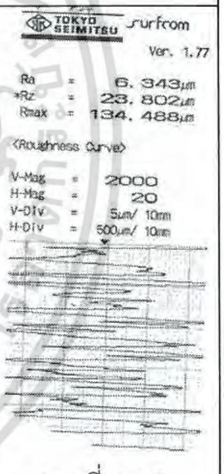
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลขของการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมาครั้งที่ 1 (ต่อ)

ตัวแปรที่ใช้ในการตัด			กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลข: Ra (μm)		
Current (A)	Height (mm)	Speed (mm/s)	Replicate 1	Replicate 2	Replicate 3
40	1.93	50	 ภาพที่ ค.10	 ภาพที่ ค.11	 ภาพที่ ค.12
45	0.96	40	 ภาพที่ ค.13	 ภาพที่ ค.14	 ภาพที่ ค.15
45	0.96	50	 ภาพที่ ค.16	 ภาพที่ ค.17	 ภาพที่ ค.18

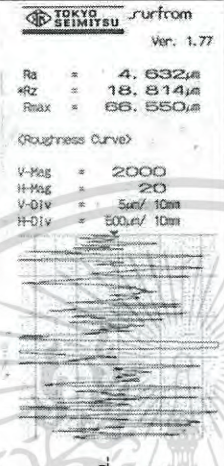
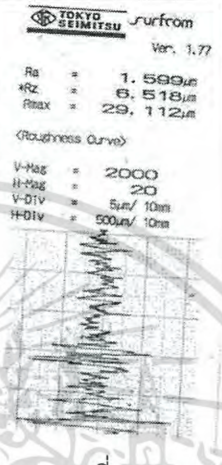
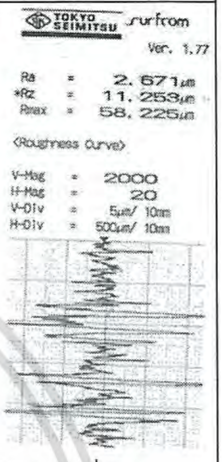
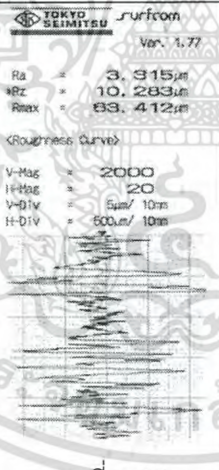
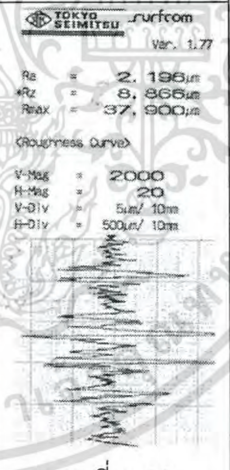
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลขของการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมาครั้งที่ 1 (ต่อ)

ตัวแปรที่ใช้ในการตัด			กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลข: Ra (μm)		
Current (A)	Height (mm)	Speed (mm/s)	Replicate 1	Replicate 2	Replicate 3
45	1.93	40	 ภาพที่ ค.19	 ภาพที่ ค.20	 ภาพที่ ค.21
45	1.93	50	 ภาพที่ ค.22	 ภาพที่ ค.23	 ภาพที่ ค.24

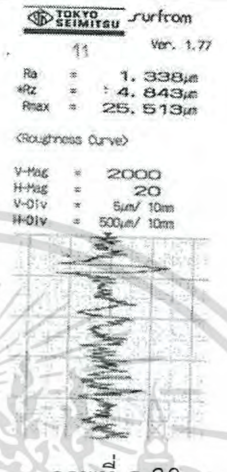
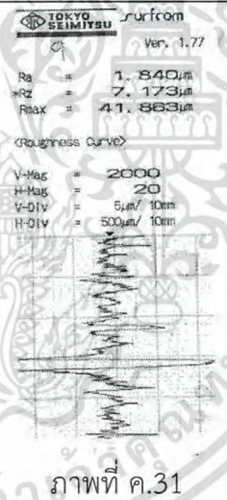
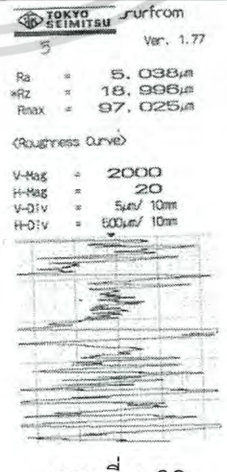
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลขของการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมาครั้งที่ 2

ตัวแปรที่ใช้ในการตัด			กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลข: Ra (μm)		
Current (A)	Height (mm)	Speed (mm/s)			
42.5	1.45	45	Center 1	Center 2	Center 3
			 ภาพที่ ค.25	 ภาพที่ ค.26	 ภาพที่ ค.27
			Center 4	Center 5	
			 ภาพที่ ค.28	 ภาพที่ ค.29	

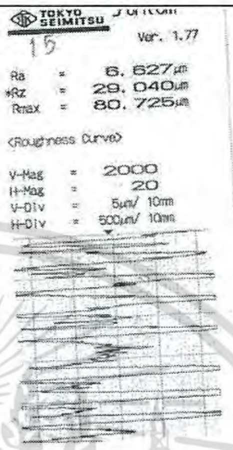
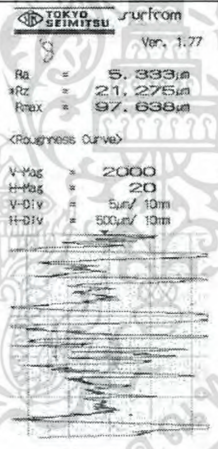
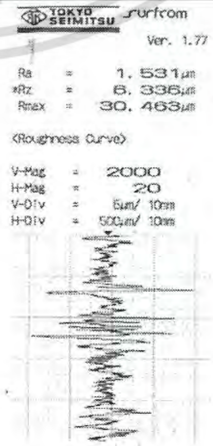
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลขของการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมาครั้งที่ 3

ตัวแปรที่ใช้ในการตัด			กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลข: Ra (μm)
Current (A)	Height (mm)	Speed (mm/s)	
40	0.96	45	 ภาพที่ ค.30
45	0.96	45	 ภาพที่ ค.31
40	1.93	45	 ภาพที่ ค.32

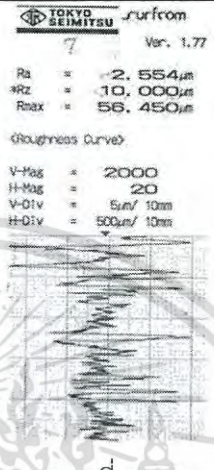
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

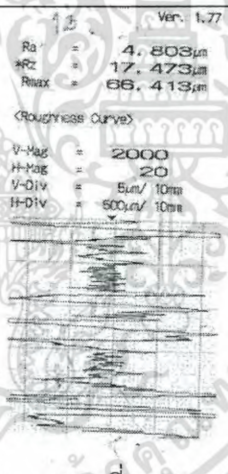
ตารางที่ ค.3 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลขของการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมาครั้งที่ 3 (ต่อ)

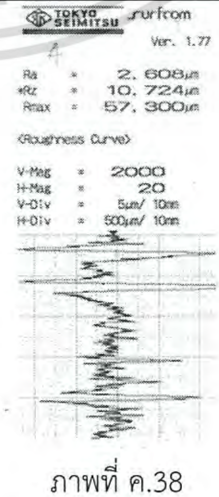
ตัวแปรที่ใช้ในการตัด			กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลข: Ra (µm)
Current (A)	Height (mm)	Speed (mm/s)	
45	1.93	45	 ภาพที่ ค.33
40	1.445	40	 ภาพที่ ค.34
45	1.445	40	 ภาพที่ ค.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลขของการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมาครั้งที่ 3 (ต่อ)

<table>
<tr><th colspan="3">ตัวแปรที่ใช้ในการตัด</th><th rowspan="2">กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลข: Ra (μm)</th></tr>
<tr><th>Current (A)</th><th>Height (mm)</th><th>Speed (mm/s)</th></tr>
<tr><td>40</td><td>1.445</td><td>50</td><td>

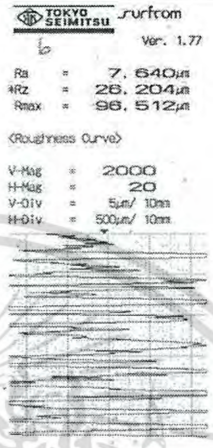
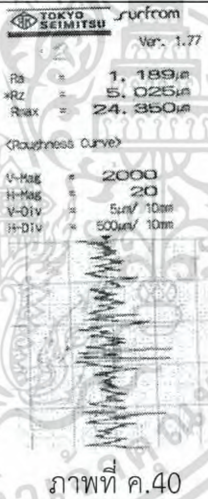
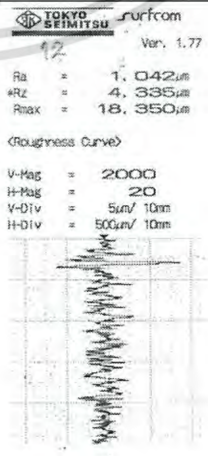
ภาพที่ ค.36</td></tr>
<tr><td>45</td><td>1.445</td><td>50</td><td>

ภาพที่ ค.37</td></tr>
<tr><td>42.5</td><td>0.96</td><td>40</td><td>

ภาพที่ ค.38</td></tr>
</table>

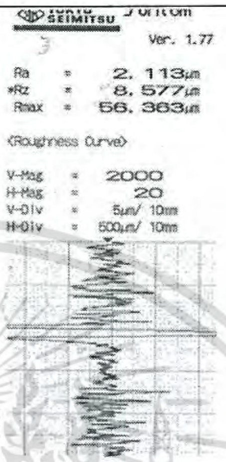
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

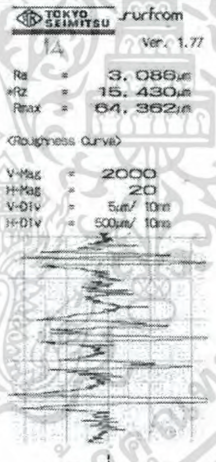
ตารางที่ ค.3 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลขของการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมาครั้งที่ 3 (ต่อ)

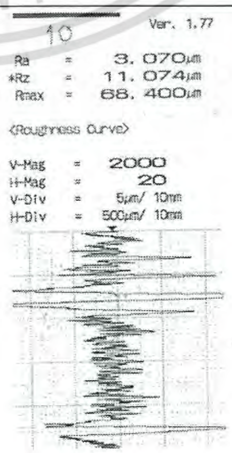
ตัวแปรที่ใช้ในการตัด			กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลข: Ra (μm)
Current (A)	Height (mm)	Speed (mm/s)	
42.5	1.93	40	 ภาพที่ ค.39
42.5	0.96	50	 ภาพที่ ค.40
42.5	1.93	50	 ภาพที่ ค.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลขของการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมาครั้งที่ 3 (ต่อ)

<table>
<tr><th colspan="3">ตัวแปรที่ใช้ในการตัด</th><th rowspan="2">กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลข: Ra (μm)</th></tr>
<tr><th>Current (A)</th><th>Height (mm)</th><th>Speed (mm/s)</th></tr>
<tr><td>42.5</td><td>1.445</td><td>45</td><td>

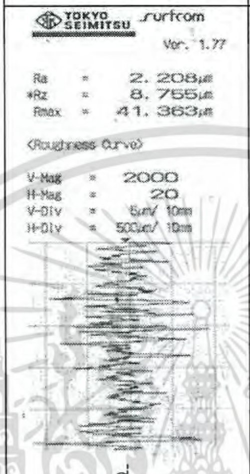
ภาพที่ ค.42</td></tr>
<tr><td>42.5</td><td>1.445</td><td>45</td><td>

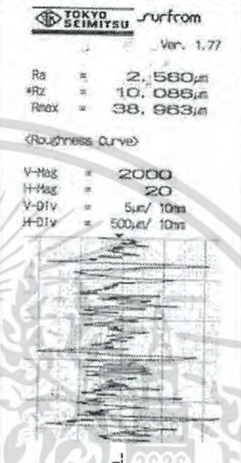
ภาพที่ ค.43</td></tr>
<tr><td>42.5</td><td>1.445</td><td>45</td><td>

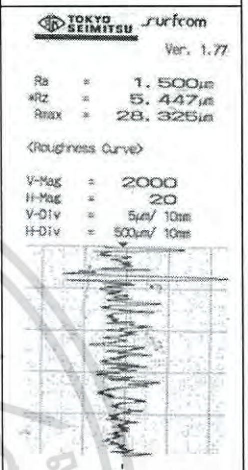
ภาพที่ ค.44</td></tr>
</table>

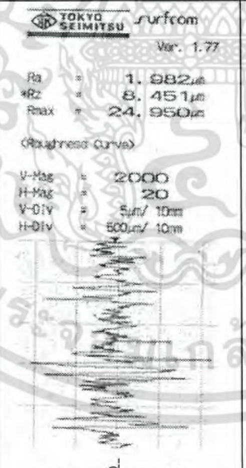
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

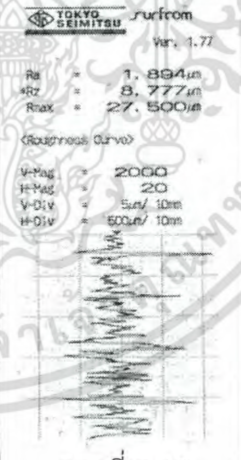
ตารางที่ ค.4 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลขของการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมาเพื่อยืนยันผลการทดลอง

<table>
<tr><th colspan="3">ตัวแปรที่ใช้ในการตัด</th><th colspan="3" rowspan="2">กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเชิงตัวเลข: Ra (µm)</th></tr>
<tr><th>Current (A)</th><th>Height (mm)</th><th>Speed (mm/s)</th></tr>
<tr><td rowspan="4">45</td><td rowspan="4">0.96</td><td rowspan="4">45</td><td>#1</td><td>#2</td><td>#3</td></tr>
<tr><td>

ภาพที่ ค.45</td><td>

ภาพที่ ค.46</td><td>

ภาพที่ ค.47</td></tr>
<tr><td>#4</td><td>#5</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>

ภาพที่ ค.48</td><td>

ภาพที่ ค.49</td></tr>
</table>

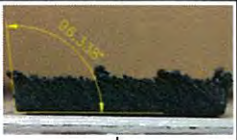
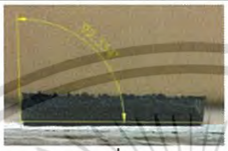
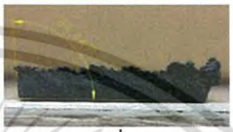
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

ภาพการวัดมุมเอียงของชิ้นงานด้วยโปรแกรม Autocad 2015

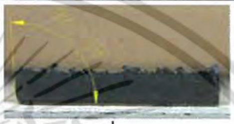
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 ภาพการวัดมุมเอียงของชิ้นงานของการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมาครั้งที่ 1

ตัวแปรที่ใช้ในการตัด			ภาพการวัดมุมเอียงของชิ้นงาน (°)		
Current (A)	Height (mm)	Speed (mm/s)	Replicate 1	Replicate 2	Replicate 3
40	0.96	40	รูปที่ ง.1	รูปที่ ง.2	 รูปที่ ง.3
40	0.96	50	 รูปที่ ง.4	 รูปที่ ง.5	รูปที่ ง.6
40	1.93	40	รูปที่ ง.7	รูปที่ ง.8	รูปที่ ง.9
40	1.93	50	รูปที่ ง.10	รูปที่ ง.11	รูปที่ ง.12
45	0.96	40	รูปที่ ง.13	รูปที่ ง.14	รูปที่ ง.15
45	0.96	50	รูปที่ ง.16	รูปที่ ง.17	รูปที่ ง.18
45	1.93	40	รูปที่ ง.19	รูปที่ ง.20	รูปที่ ง.21
45	1.93	50	รูปที่ ง.22	รูปที่ ง.23	รูปที่ ง.24

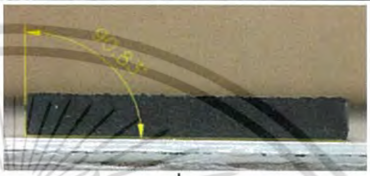
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 ภาพการวัดมุมเอียงของชิ้นงานของการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมาครั้งที่ 2

ตัวแปรที่ใช้ในการตัด			ภาพการวัดมุมเอียงของชิ้นงาน (°)		
Current (A)	Height (mm)	Speed (mm/s)			
42.5	1.45	45	Center 1	Center 2	Center 3
			รูปที่ ง.25	รูปที่ ง.26	รูปที่ ง.27
			Center 4	Center 5	
			รูปที่ ง.28	 รูปที่ ง.29	

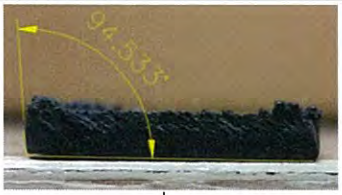
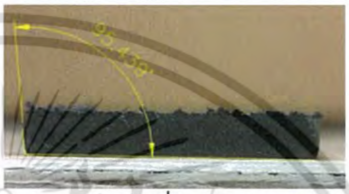
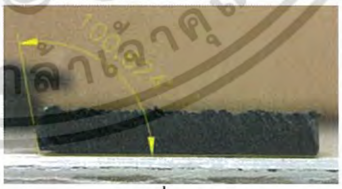
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 ภาพการวัดมุมเอียงของชิ้นงานของการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมาครั้งที่ 3

ตัวแปรที่ใช้ในการตัด			ภาพการวัดมุมเอียงของชิ้นงาน (°)
Current (A)	Height (mm)	Speed (mm/s)	
40	0.96	45	รูปที่ ง.30
45	0.96	45	 รูปที่ ง.31
40	1.93	45	รูปที่ ง.32
45	1.93	45	รูปที่ ง.33
40	1.445	40	รูปที่ ง.34
45	1.445	40	รูปที่ ง.35

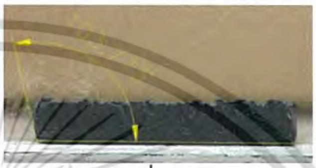
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 ภาพการวัดมุมเอียงของชิ้นงานของการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมาครั้งที่ 3 (ต่อ)

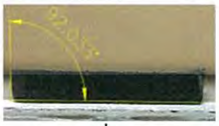
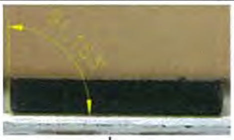
ตัวแปรที่ใช้ในการตัด			ภาพการวัดมุมเอียงของชิ้นงาน (°)
Current (A)	Height (mm)	Speed (mm/s)	
40	1.445	50	 รูปที่ ง.36
45	1.445	50	 รูปที่ ง.37
42.5	0.96	40	 รูปที่ ง.38
42.5	1.93	40	 รูปที่ ง.39
42.5	0.96	50	 รูปที่ ง.40
42.5	1.93	50	 รูปที่ ง.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 ภาพการวัดมุมเอียงของชิ้นงานของการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมาครั้งที่ 3 (ต่อ)

ตัวแปรที่ใช้ในการตัด			ภาพการวัดมุมเอียงของชิ้นงาน (°)
Current (A)	Height (mm)	Speed (mm/s)	
42.5	1.445	45	รูปที่ ง.42
42.5	1.445	45	 รูปที่ ง.43
42.5	1.445	45	รูปที่ ง.44

ตารางที่ ง.4 ภาพการวัดมุมเอียงของชิ้นงานของการตัดชิ้นงานด้วยพลาสมาเพื่อยืนยันผลการทดลอง

ตัวแปรที่ใช้ในการตัด			ภาพการวัดมุมเอียงของชิ้นงาน (°)		
Current (A)	Height (mm)	Speed (mm/s)			
			#1	#2	#3
45	0.96	45	รูปที่ ง.45	 รูปที่ ง.46	รูปที่ ง.47
			#4	#5	
			 รูปที่ ง.48	รูปที่ ง.49	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวมนัญญา สาคร
วัน เดือน ปีเกิด	5 ธันวาคม 2529 ที่จังหวัดราชบุรี
ที่อยู่	239/14 หมู่ 3 ตำบลโคกหม้อ อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี 70000
ประวัติการศึกษา	2551 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประสบการณ์การทำงาน	2553 – 2556 ตำแหน่ง SMP Scientist ที่บริษัทจอห์นสัน แอนด์ จอห์นสัน (ประเทศไทย) จำกัด 2556 – 2560 ตำแหน่ง Senior Associate development, Engineering process ที่บริษัท เอส ซี ยอห์นสัน แอนด์ ซัน (ประเทศไทย) จำกัด
ผลงานทางวิชาการ	มนัญญา สาคร กรรณชัย กัลยาศิริ. 2560 “การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L โดยกระบวนการตัดด้วยพลาสมาที่มีผลต่อความเรียบของพื้นผิวรอยตัด ความถูกต้องของขนาดและมุมเอียงของชิ้นงาน” ใน การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 27 ประจำปี 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้