



RMUTSV



SK074865

67719

รายงานการวิจัย

การศึกษาอิทธิพลของสภาวะการกลึงเหล็กทำแม่พิมพ์

ด้วยใบมีดคาร์บิด

(The Influences of Cutting Conditions for Die Mold Steel Turning

by Carbide Cutting Tool)

จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล Julaluk Rodjananugoon 671.33

สุรศิทธิ์ rawangwong Surasit Rawangwong A 492

จักรนรินทร์ ฉัตรทอง Jaknarin Chudtong 2553

สาขาวิชกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

งบประมาณเงินรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2553

การศึกษาอิทธิพลของสภาวะการกลึงเหล็กทำแม่พิมพ์ด้วยใบมีดคาร์บอน

จุฬาลักษณ์ الرحمنนูกุล¹ สุรศิทธิ์ ราชวงศ์² จักรนันทร์ พัตรทอง¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลตัวแปรหลักที่มีผลต่อความขรุขระผิวในการกลึงเหล็กเครื่องมือ SKD 11 ด้วยเครื่องกัดความคุณด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแม่พิมพ์ โดยใช้มีดกลึงมีดคาร์บอนบีด ยี่ห้อ Kennametal แบบ CNMG432MN เกรด KC9125 ปัจจัยที่ใช้ศึกษาทดลองคือ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด โดยกำหนดให้มีความเร็วตัด 135-225 เมตร/นาที อัตราป้อน 0.2-0.6 มิลลิเมตร/รอบ และความลึก 0.5-2.5 มิลลิเมตร จากการทดลองพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความขรุขระผิว คือ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความเร็วตัด มีแนวโน้มว่าค่าความขรุขระผิวจะลดลงเมื่อใช้อัตราป้อนต่ำลง และใช้ความลึกในการตัดต่ำลง และสามารถกำหนดสภาวะการกลึง ด้วยสมการ $R_a = -0.416 + 0.000797 \text{ Cutting Speed} + 8.14 \text{ Feed} + 0.272 \text{ Depth of Cut}$ การนำสมการนี้ไปใช้ควรอยู่ในขอบเขต ความเร็วตัด 135-225 เมตร/นาที อัตราป้อน 0.2-0.6 มิลลิเมตร/รอบ และความลึก 0.5-2.5 มิลลิเมตร จากการทดลองเพื่อการยืนยันผลพบว่าค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดจริงเท่ากับ 4.33 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อความยาวชิ้นงานที่สามารถกลึงได้สูงสุดโดยไม่ใช้ยันศูนย์ท้ายแท่น คือ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความเร็วตัด โดยมีแนวโน้มว่าการใช้อัตราป้อนต่ำลงและความลึกในการตัด มีผลทำให้สามารถกลึงได้ความยาวเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : การออกแบบการทดลอง ความขรุขระผิว เหล็ก SKD 11

¹ สาขาวิชาวาระนอมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลวิเชียร

The Influences of Cutting Condition for Die Mold Steel Turning By Carbide Cutting Tool

Julaluk Rodjananugoon¹ Surasit Rawangwong¹ Jaknarin Chudtong¹

Abstract

The purpose of this research is to investigate the effect of main factors on the surface roughness (R_a) in die mold steel (SKD11) turning process by computer numerical controlled (CNC) turning machine and using carbide cutting tools. The main factors, namely, cutting speed, feed rate and depth of cut were investigated for optimum surface roughness. In the experiment, the main factors were used at 135-225 m/min in cutting speed, 0.2-0.6 mm/rev in feed rate and 0.5-2.5 mm. in depth of cut. It was found from the experiment that the factor affecting surface roughness was cutting speed, feed rate and depth of cut with tendency for reduction of roughness value at lower feed rate and lower depth of cut. Therefore, in the cutting of tuning die mold steel it was possible determine a cutting condition by means of the equation $R_a = -0.416 + 0.000797 \text{ Cutting Speed} + 8.14 \text{ Feed} + 0.272 \text{ Depth of Cut}$. The result from the experiment of mean absolute percentage error (MEPE) of the equation of surface roughness is 4.33% which is less than the margin of error, and is acceptable.

Keywords: design of experiment, computer numerical controlled turning machine,

Die mold steel, surface roughness

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากบประมาณเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ 2553 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และขอขอบคุณสาขาวิชากรร摩อุตสาหกรรม ศูนย์เครื่องจักรกลอัตโนมัติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการเครื่องจักรกลอัตโนมัติ สำหรับการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล และขอบคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิชากรร摩อุตสาหกรรม และคณะผู้บริหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ ทุกท่านที่ให้กำลังใจในการวิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ฯพ.ล.ก.ญ. ใจนานุกูล
สุรัสิทธิ์ ระหว่างวงศ์
จักรนรินทร์ ฉัตรทอง

20 สิงหาคม 2554



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	๑
Abstract	๑
กิตติกรรมประกาศ	๑
สารบัญ	๑
สารบัญตาราง	๙
สารบัญรูปภาพ	๙
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของ โครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของ โครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เหล็กเครื่อง	4
2.2 หลักการพื้นฐานงานกลึง	6
2.3 หลักการพื้นฐานของการตัดโดยใช้ใบมีด	11
2.4 ความชรุยะผิว	17
2.5 การออกแบบการทดลอง	22
2.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง	39
บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน	42
3.1 วัสดุชิ้นงานและใบมีดตัด	42
3.2 เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	43
3.3 การออกแบบวิธีการวัด (Design of Measurement Method)	45
3.4 วิธีการทดลอง	45

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์	54
4.1 ผลการทดลองที่ 1 การทดลองเพื่อหาขนาดสิ่งตัวอย่าง	54
4.2 ผลและการวิเคราะห์การทดลองที่ 2 การทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาปัจจัย ที่คาดว่าจะมีผลต่อความชรุของผิวเหล็ก SKD 11	54
4.3 การทดลองเพื่อยืนยันผล	65
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	67
5.1 สรุปผลการทดลอง	67
5.2 ข้อเสนอแนะ	68
บรรณานุกรม	69
ภาคผนวก ก	
ตารางบันทึกผลการทดลอง	70
ภาคผนวก ข	
ข้อมูลเครื่องจักรและอุปกรณ์ในการทดลอง	77
ภาคผนวก ค	
ตารางการวิเคราะห์ผลทางสถิติ	85

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ตัวอย่างเปรียบเทียบเหล็กกล้าระหว่างมาตรฐาน DIN JIS และ AISI พร้อมส่วนผสมทางเคมีและ อุณหภูมิชูบแข็ง (* อุณหภูมิสำหรับการเติมคาร์บอน)	5
2.2 ข้อมูลสำหรับการทดลองปัจจัยเดียว	26
2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ Fix Effect Model ตัวแปรเดียว	28
2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำลอง 3 ปัจจัยแบบจำกัดปัจจัย (Fix Effect)	30
2.5 เมตริกซ์การออกแบบ (Design Metrix)	32
2.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบ 2^k	34
3.1 การทดลองในการหาขนาดสิ่งตัวอย่าง	46
3.2 การหาขนาดสิ่งตัวอย่าง	47
3.3 การกำหนดตัวแปรสำหรับการทดลองเบื้องต้น	48
3.4 แผนการทดลองตอนที่ 2	48
3.5 แสดงการทดลองเพื่อการยืนยันผล	53
4.1 การกำหนดค่าตัวแปรสำหรับการทดลอง	55
4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของค่าความชรุยะพิว	59
4.3 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความชรุยะพิวกับ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึก	63
4.4 การวิเคราะห์ค่าความความยาวชิ้นงานโดยการถึงแบบไม่ใช้ยันศูนย์ท้ายแท่นกับความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึก	64
4.5 การเปรียบเทียบค่าความชรุยะพิวที่คำนวณจากสมการและค่าความชรุยะพิวที่วัดได้จริง	65

สารบัญรูปภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการของการกลึงปอก	7
2.2 ปัจจัยที่สำคัญทั้งหมดที่ใช้ในงานกลึงปอกคือymีคุณลักษณะอินเสิร์ท	7
2.3 ลักษณะทางราชการนิตของใบมีดกลึงตัด	12
2.4 ลักษณะมุมคายเศษ	12
2.5 อิทธิพลของมุมคายเศษ	13
2.6 ลักษณะของมุมคายเศษข้าง	13
2.7 องค์ประกอบของพื้นผิว	18
2.8 การแบ่งเส้นขอบของพื้นผิวเป็นอิลิเมนท์อย่างๆ	20
2.9 ค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องค่าสูด R_{max}	21
2.10 ค่าระหว่างยอดสูงสุดกับค่าต่ำสุดห้าค่าแรก R_z	21
2.11 การออกแบบเชิงแฟกทอร์เรียล 2 ปัจจัย	29
2.12 การออกแบบเชิงแฟกทอร์เรียล	29
2.13 โครงสร้างของเส้นถูกถอดเชิงเส้นตรงอย่างง่าย	36
3.1 ชิ้นงานเหล็ก SKD 11	42
3.2 ใบมีดตัดเย็บห้อ เย็บห้อ Kennametal แบบ CNMG432MN เกรด KC9125	43
3.3 เครื่องกลึง CNC เย็บห้อ Haas	43
3.4 เครื่องวัดความขรุขระพิว	44
3.5 เวอร์เนียร์ค่าลิป์เออร์	44
3.6 วิธีการวัดค่าความขรุขระพิว	45
3.7 ขนาดตัวอย่าง	47
4.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลของความขรุขระพิว	55
4.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระพิว	56
4.3 การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลความขรุขระพิว	57
4.4 การทดสอบความเสถียรภาพของข้อมูลความขรุขระพิว	58
4.5 ปฏิสัมพันธ์ของความขรุขระพิว	61
4.6 การเปลี่ยนแปลงของความขรุขระพิว จากการเปลี่ยนระดับของปัจจัยหลัก	62
4.7 ปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีต่อความยาวในการกลึงแบบไม่ใช้ยันศูนย์ท้ายแท่น	64

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.8	การเปลี่ยนแปลงของความชำรุดชั้นงานจากการเปลี่ยนระดับของปัจจัยหลัก	65



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

เทคโนโลยีการผลิตในปัจจุบันนั้นมีการเติบโตไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะเห็นได้จากการพัฒนารูปแบบผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะที่หลากหลายและมีความซับซ้อนค่อนข้างมาก นอกจากนั้นผลิตภัณฑ์หลายๆ ประเภท จำเป็นต้องมีการระบุคุณลักษณะที่สำคัญเพื่อให้การนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ซึ่งคุณลักษณะที่สำคัญตัวหนึ่งก็คือค่าความบรุษของผิวสำเร็จ เช่น แบบพิมพ์สำหรับงานหล่อโลหะหรือแม่พิมพ์พลาสติก รวมทั้งเครื่องมือทางไฟฟ้าหรือทางพลังงานบางชนิดที่ต้องการผิวสัมผัสที่ดี เป็นต้น เครื่องจักรอุปกรณ์ที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ผลิตชิ้นงานที่ต้องการคุณลักษณะเฉพาะเหล่านี้ ก็คือพวากเครื่องจักรที่ควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ หรือเครื่องจักรซีเอ็นซี ซึ่งเป็นเครื่องจักรกลที่มีความแม่นยำสูงและนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการกัดวัสดุ หลากหลายประเภทได้ ปัจจุบันในการเลือกค่าตัวแปรในการผลิตชิ้นงานด้วยการกำหนดน้ำหนัก เช่นนี้จะอาศัยค่าที่อ้างอิงจากค่ามาตรฐานซึ่งเป็นการระบุโดยประมาณของตัวแปรที่สำคัญในการผลิตอยู่ในช่วงกว้างๆ ทั้ง ความเร็วในการตัด หรือการป้อน อย่างไรก็ตามผู้วิจัยเห็นว่าควรจะมีการศึกษาที่เจาะจงไปอีก รวมทั้งการประเมินความสัมพันธ์ของตัวแปรการผลิตที่หลากหลายกับข้อจำกัดของชิ้นงานในลักษณะของผิวสำเร็จด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เพื่อสร้างองค์ความรู้และเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในงานทางอุตสาหกรรม หรือการสร้างต้นแบบนวัตกรรมใหม่ๆ ที่ลักษณะคงกล่าวมีผลต่อระบบการทำงานของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อวงการอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท

ปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนในประเทศไทยได้มีการพัฒนางานด้านระบบการผลิตมากขึ้น ทั้งนี้เพื่อต้องพัฒนาชิ้นส่วนหรือสินค้าให้มีคุณภาพสูงขึ้น และให้มีต้นทุนในการผลิตต่ำ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมทางด้านการผลิตแม่พิมพ์จากเหล็กเครื่องมือ (Die Mold Steel) ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่น เช่น ความต้านทานต่อการกัดกร่อนนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่น เช่น ความต้านทานต่อการกัดกร่อนสามารถทนต่ออุณหภูมิได้สูงความสามารถในการตัดแต่งด้วยเครื่องจักร ความสามารถในการเชื่อมและมีคุณสมบัติทางกลที่ดี [1] ซึ่งการนำไปใช้งานไม่ใช่จะเป็นอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วน เครื่องจักรกลทางการเกษตร หรืออุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมในด้านอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์พลาสติก แม่พิมพ์โลหะ ที่ต้องผ่านกระบวนการแปรรูปชิ้นงาน โดยการตัดเนื่องที่เทคโนโลยีที่มีความเที่ยงตรงสูง เช่น เทคโนโลยีเครื่องจักรกลอัตโนมัติ เพื่อสามารถที่จะผลิตงานขึ้นได้โดยมีคุณภาพและมาตรฐาน เดียวกัน

กระบวนการแปรรูปชิ้นงานโดยการตัดเฉือน ได้มีการคิดค้นวิจัยและศึกษาสภาวะการตัดต่างๆ เช่น ความเร็วในการตัด (Cutting Speed) อัตราการป้อน (Feed Rate) ความลึกในการตัด (Depth of Cut) รวมไปถึงชนิดของใบมีดตัด เพื่อให้มีความเหมาะสมกับวัสดุแต่ละประเภท เพื่อเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการผลิต ยืดอายุการใช้งานของมีดตัด ลดต้นทุนในการผลิต และเพื่อเพิ่มผลผลิตให้สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโรงงานผู้ผลิตแม่พิมพ์และชิ้นส่วนต่างๆ จากเหล็กเครื่องมือ ในประเทศไทยไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับการทำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกลึงเหล็กเครื่องมือ เกรด SKD 11 โดยใช้เครื่องจักรกลซีเอ็นซี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการตัดเฉือน เช่น ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด ซึ่งปัจจุบันเงื่อนไขเหล่านี้ต้องอาศัยจากประสบการณ์และความชำนาญของผู้ปฏิบัติงานเป็นหลัก เนื่องจากยังไม่มีการศึกษาค้นคว้าตามหลักวิชาการ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาเพื่อให้ได้มาซึ่งผลงานวิจัยที่มีประโยชน์ทางวิชาการและสามารถนำไปใช้ได้ในเชิงปฏิบัติต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาสภาวะในการกลึงเหล็กเครื่องมือ เกรด SKD 11 ที่มีผลต่อการลอกหอของเม็ดมีดกลึงและความขรุขระพื้นผิว โดยใช้เม็ดมีดกลึงซีเมนต์คาร์บไบด์เคลือบด้วยไทเทเนียมในไตรด์
- 2) เพื่อนำผลสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตแม่พิมพ์และอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) วัสดุทดลองเป็นเหล็กเครื่องมือ เกรด SKD 11 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ทำการกลึงปอกผิวขาว 130 มิลลิเมตร
- 2) เครื่องจักรที่ใช้ในการทดลอง เป็นเครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC Turning) ยี่ห้อ Haas
- 3) เม็ดมีดกลึงซีเมนต์คาร์บไบด์เคลือบด้วยไทเทเนียมในไตรด์ (TiN) รหัสเม็ดมีดกลึง CNMG120408MN

- 4) สภาวะการตัดที่จะทำการทดลอง ประกอบด้วยความเร็วตัด (Speed of Cut) ความลึกในการตัด (Depth of Cut) และ อัตราการป้อนมีด (Feed) ผลตอบสนองเป็นค่าความขรุขระผิว (Ra)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้สภาวะการตัดที่เหมาะสมในการกลึงเหล็กทำแม่พิมพ์ด้วยใบมีดcarbide ไบค์ด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติเพื่อสามารถเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานแม่พิมพ์ และเป็นผลให้ลดต้นทุนในการผลิต

- 2) นำผลสรุปที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตแม่พิมพ์และชิ้นส่วน และอุตสาหกรรมการผลิตอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง
- 3) สามารถเพิ่มคุณภาพของชิ้นส่วนแม่พิมพ์ได้



บทที่ 2

งานวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงเหล็ก SKD11 ที่ได้ก่อตัวในโครงการวิจัยนี้เพื่อให้ได้ผิวงานที่มีความชุบระผิวที่เหมาะสม โดยใช้มีดมีดกลึงซีเมนต์คาร์ไบด์เคลือบด้วยไทเทเนียมในไตรค์ และศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อการสึกหรอของมีดมีดกลึงและการวัดค่าความชุบระผิวพิว จึงได้มีการวิเคราะห์และการออกแบบทดลอง (Design and Analysis of Experiment) โดยในการทำสภาวะการกลึงเหล็ก SKD11 ด้วยเครื่องกลึงที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ โดยผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังนี้

2.1 เหล็กเครื่องมือ

2.1.1 การแบ่งชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool Steels)

เหล็กกล้าเครื่องมือที่ใช้ผลิตชิ้นส่วนที่เป็นเครื่องมือสำหรับการตัดเนื้อน (Cutting Tools) แบ่งพิมพ์ขึ้นรูป ชิ้นส่วนที่ต้องทนต่อการเสียดสี ทนต่อการสึกหรอ ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง ก่อนใช้งานต้องมีการชุบแข็ง ซึ่งสามารถแบ่งเหล็กกล้าเครื่องมือเป็นกลุ่มดังนี้

- 1) เหล็กกล้าคาร์บอนเครื่องมือ (Carbon Tool Steels) ไม่มีสารเจือ มีคาร์บอน 0.7 – 1.35% ราคาถูก อายุการใช้งานต่ำ การเสียรูปจากการชุบแข็งสูง

2) เหล็กกล้าความเร็วสูง (High Speed Steels) เป็นเหล็กกล้าเจือสูง (High Alloy Steels) และมีคาร์บอนสูง สารเจือที่ผสม เช่น โครเมียม (Cr) โมลิกินั่ม (Mo) วานาเดียม (V) โคบล็อก (Co) ทังสเตน (W) มีคาร์บอนผสมประมาณ 0.7–1.4 % สารเจือที่ผสมจะไปรวมตัวกับคาร์บอนอยู่ในรูปของสารประกอบคาร์ไบด์ชนิดต่างๆ เช่น ทังสเตนคาร์ไบด์และวานาเดียมคาร์ไบด์ เป็นต้น ซึ่งการ์ไบด์เหล่านี้มีความแข็งและทนอุณหภูมิสูง แต่มีความประทุมสูง เหมาะที่จะใช้เป็นเครื่องมือตัดเนื้อน (Cutting Tools) เช่นมีดกลึง ใบเลื่อย ใบกัด (Cutter) ดอกกัด (End Mill) ดอกสว่าน สเตมปี๊กาย และอื่นๆ ฯลฯ ซึ่งสามารถชุบแข็งได้ความแข็งสูงประมาณ 64 – 67 HRC

3) เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น (Cold Work Tool Steels) มี helyaloy ชนิด มีความหลากหลายในส่วนผสมมาก มีคาร์บอนตั้งแต่ปานกลาง 0.4% จนถึงกว่า 2% สารเจือหลักคือ โครเมียมตั้งแต่ไม่ถึง 1% จนถึง 12% โครเมียมทำหน้าที่ช่วยเพิ่มสมบัติด้านชุบแข็ง และรวมกับการรับอนเป็นคาร์ไบด์ สารเจืออื่นๆ ได้แก่ โมลิกินั่ม (Mo) นิกเกล (Ni) วานาเดียม (V) และทังสเตน (W) เป็นต้น เหล็กกล้าชนิดนี้เหมาะสมสำหรับทำเป็นแม่พิมพ์ขึ้นรูป แม่พิมพ์ตัด แต่ไม่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง ในการอบชุบมีการเสียรูปจากการชุบแข็งต่ำ เนื่องจากมีความสามารถชุบ

แข็ง (Hardenability) สูง และไม่จำเป็นต้องเย็นตัวเร็วมากขณะชุบแข็ง ความแข็งที่ใช้งานส่วนใหญ่อยู่ในช่วงประมาณ 58 – 61 HRC

4) เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน (Hot Work Tool Steels) มีคาร์บอนปานกลาง 0.3 – 0.6% สารจือหลัก ได้แก่ โครเมียม (Cr) โมลิเดียม (Mo) นิกเกล (Ni) โคบัลท์ (Co) วานาเดียม (V) และทังสเตน (W) ซึ่งสารเจือเป็นกลุ่มเดียวกับเหล็กกล้าร้อนสูง แต่ปริมาณโดยเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดอีกอย่างหนึ่ง คือ ปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า เพราะว่าจุดประสงค์หลักของการนำไปใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือชนิดนี้คือ ใช้ทำแม่พิมพ์ขึ้นรูป หรือ Forging Die แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป (Extrusion Die) ซึ่งหมายความว่าเหล็กกล้าหรืออุปกรณ์ที่ถูกขึ้นรูปมีอุณหภูมิสูงและมีความแข็งไม่นัก ดังนั้นแม่พิมพ์จะไม่มีความจำเป็นต้องมีคาร์บอนมากนัก แต่ปัญหาอยู่ที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นสารเจือที่ผสมจึงเป็นสารเจือที่ช่วยให้เหล็กทนที่อุณหภูมิสูง ขณะเดียวกันปริมาณคาร์บอนที่ต่ำทำให้เหล็กทนต่อการรับแรงกระแทกได้ดี นอกจากนี้การเสียรูปจากการชุบแข็งต่ำ เนื่องจากเหล็กมีความสามารถในการดูบแข็งสูง จึงไม่จำเป็นต้องให้มีการเย็นตัวเร็วมากนักขณะทำการชุบแข็ง ความแข็งที่ใช้งานอยู่ในช่วงประมาณ 45 – 50 HRC

2.1.2 ลักษณะการประยุกต์ใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือ

ตารางที่ 2.1 แสดงกลุ่มเหล็กกล้าที่นิยมใช้งานโดยทั่วไป และมักมีการชุบแข็งก่อนนำไปใช้งาน โดยเปรียบเทียบกันระหว่างมาตรฐาน DIN (เยอรมัน) JIS (ญี่ปุ่น) และ AISI (สหรัฐอเมริกา) พร้อมปริมาณและชนิดของสารเจือ รวมถึงช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการชุบแข็ง

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างเปรียบเทียบเหล็กกล้าระหัวงมาตรฐาน DIN JIS และ AISI พร้อมส่วนผสมทางเคมีและ อุณหภูมิชุบแข็ง (* อุณหภูมิสำหรับการเติมคาร์บอน)

ประเภทเหล็กกล้า	มาตรฐาน			ส่วนผสมทางเคมี (%)										อุณหภูมิชุบแข็ง (°C)
	DIN	JIS	AISI	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Co		
เหล็กกล้าร้อนสูง (High Speed Steels)	1.3207	SKH 57	-	1.3	≤ 0.4	≤ 0.4	4.0	3.5	-	3.2	9.5	10		1190-1250
	1.3243	SKH 55	M 35	0.9	≤ 0.4	≤ 0.4	4.0	5	-	1.8	6.5	4.8		1190-1240
	1.3247	SKH 59	M 42	1.1	≤ 0.4	≤ 0.4	4.0	9.5	-	1.2	1.5	8.0		1170-1210
	1.3343	SKH51	M 2	0.9	≤ 0.4	≤ 0.4	4.0	5.0	-	1.8	6.4	-		1180-1240
เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็บ (Cold Work Tool Steels)	1.2067	SUJ 2	L 3	1.0	0.25	0.35	1.5	-	-	-	-	-		830-860
	1.2080	SKD 1	D 3	2.10	0.25	0.30	12	-	-	-	-	-		950-970
	1.2363	SKD12	A 2	1.0	0.30	0.55	5.0	1.0	-	0.2	-	-		930-970
	1.2379	SKD 11	D 2	1.55	0.25	0.30	12	0.7	-	1.0	-	-		1000-1080
	1.2436	-	D 6	2.10	0.25	0.30	12	-	-	-	0.7	-		950-980
	1.2510	SKS 3	O 1	1.0	0.25	1.1	0.6	-	-	0.1	0.6	-		780-820
	1.2550	SKS 41	S 1	0.6	0.60	0.30	1.0	-	-	0.15	2	-		870-900
	1.2842	-	02	0.9	0.25	2.00	0.4	-	-	0.1	-	-		790-820

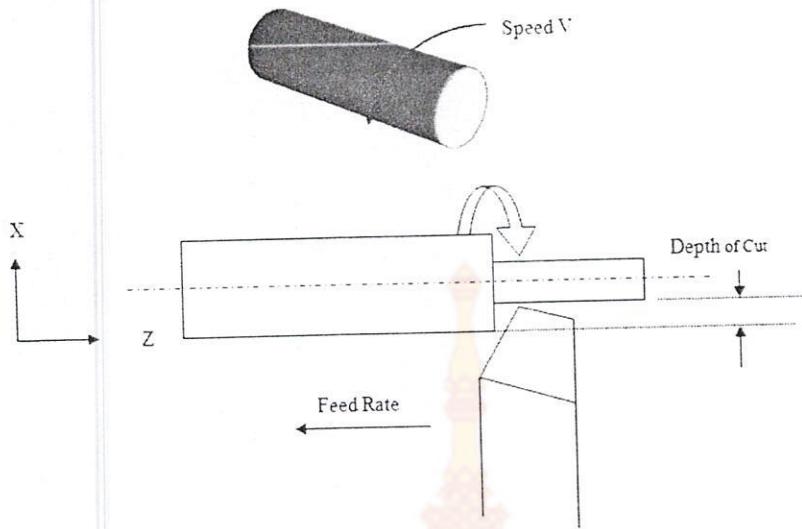
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างเปรียบเทียบเหล็กกล้าร่างกายระหว่างมาตรฐาน DIN JIS และ AISI พร้อมส่วนผสมทางเคมีและ อุณหภูมิชุนแข็ง (* อุณหภูมิสำหรับการเคลือบอน) (ต่อ)

ประเภทเหล็กกล้า	มาตรฐาน			ส่วนผสมทางเคมี (%)									อุณหภูมิชุนแข็ง (°C)
	DIN	JIS	AISI	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Co	
เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน (Hot Work Tool Steels)	1.2343	SKD 6	H 11	0.4	1.05	0.40	5.0	1.2	-	0.4	-	-	1000-1060
	1.2344	SKD 61	H 13	0.4	1.05	0.40	5.0	1.3	-	1.0	-	-	1000-1060
	1.2365	SKD 7	H 10	0.3	0.25	0.30	3.0	2.8	-	0.5	-	-	1020-1050
	1.2581	SKD 5	H 21	0.3	0.20	0.30	2.6	-	-	0.3	8.5	-	1100-1150
	1.2714	SKT 4	L 6	0.55	0.25	0.80	1.1	0.5	1.6	0.1	-	-	830-900
เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steels)	1.4028	SUS 420J2	422	0.30	≤1.0	≤1.0	13	-	-	-	-	-	1020-1050
	1.4112	SUS 440B	440 B	0.9	≤1.0	≤1.0	18	1.1	-	0.1	-	-	1000-1050
	1.4125	SUS 440C	440 C	1.05	≤1.0	≤1.0	17	0.6	-	-	-	-	1000-1050
	1.4021	SUS420J1	420	0.2	≤1.0	≤1.0	13	-	-	-	-	-	1010-1060
เหล็กกล้าอุตสาหกรรม (Machinery Steels)	1.1191	S 45 C	1045	0.45	≤0.4	0.65	-	-	-	-	-	-	820-860
	1.6582	SNCM 439	4340	0.34	≤0.4	0.65	1.5	0.2	1.5	-	-	-	830-860
	1.7225	SCM 440	4140	0.42	≤0.4	0.75	1.0	0.25	-	-	-	-	820-860
เหล็กกล้าชุบพิวเพ็ง แบบcarburizing (Case hardening steels)	1.1141	S 15 C	1015	0.15	≤0.4	0.45	-	-	-	-	-	-	900-950*)
	1.5920	SNC 415 H	3115	0.18	0.3	0.50	2.0	-	2.0	-	-	-	900-950*)
	1.7131	SCM 415	5115	0.15	≤0.4	1.15	1.2	0.25	-	-	-	-	900-950*)
เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steels)	1.1625	SK 5	-	0.80	0.20	0.20	-	-	-	-	-	-	760-820
	1.1645	SK 3	W 1	1.05	0.20	0.20	-	-	-	-	-	-	760-820
เหล็กกล้าคาร์บอนไนโตรเจน (Carbonitriding Steels)	JIS:SS400 (SS41) , SGD , SPHC , SPHD , SPCC , SPCD, STKM , etc												

2.2 หลักการพื้นฐานของงานกลึง

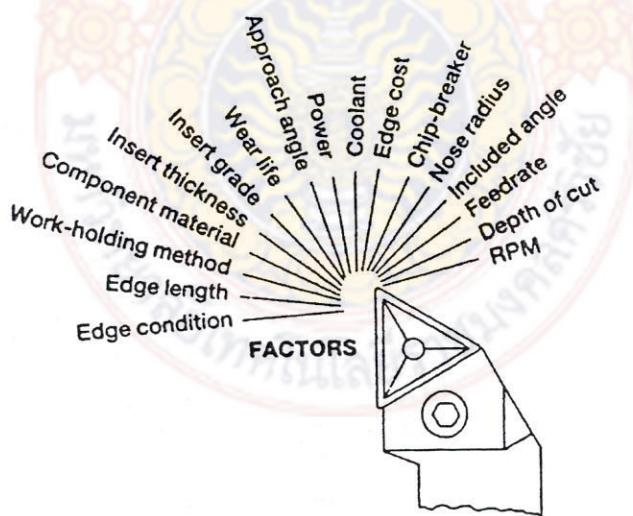
2.2.1 การกลึง (Turning) คือ การตัดโลหะโดยให้ชิ้นงานหมุนรอบตัวเอง โดยมีดกลึงเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงาน การกลึงมี 2 ลักษณะใหญ่ คือ การกลึงปิดหน้า หมายถึง การตัดโลหะโดยให้มีดตัดชิ้นงานไปตามแนวขวาง (Across the Work) และการกลึงปอก หมายถึง การตัดโลหะโดยให้มีดตัดเคลื่อนที่ตัดชิ้นงานไปตามแนวนานกับแนวแกนของชิ้นงาน

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการของการกลึงปอก คือ ความเร็วตัด (Cutting Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) ระยะป้อนลึก (Depth of Cut) มีดกลึง (Cutting Tool) และชิ้นงานที่ต้องการทำการตัดเนื้อ (Work Piece) และเมื่อมีกระบวนการในการกลึงปอกเกิดขึ้น ผลที่จะเกิดขึ้นตามมา ก็คือ ขนาดของชิ้นงาน (Work Piece Dimension) ความละเอียดของผิวชิ้นงาน (Surface Roughness) เศษกลึง (Chip) การสึกหรอของมีดกลึง (Tool Wear)



ภาพที่ 2.1 ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการของการกลึงปอก

ปัจจัยที่สำคัญของงานกลึงปอกด้วยมีดกลึงอินเสิร์ท ตามที่กล่าวไว้แล้วว่าปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการของการกลึงปอก คือ อัตราป้อน ความเร็วตัด ระยะป้อนลีก มีดกลึง และชิ้นงานที่ต้องการทำการตัดเนื่อง ในการกลึงปอกด้วยมีดกลึงมีดกลึงอินเสิร์ทที่จะต้องประกอบด้วยปัจจัยหลัก 5 ปัจจัยนี้ เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 2.2 ปัจจัยที่สำคัญทั้งหมดที่ใช้ในงานกลึงปอกด้วยมีดกลึงอินเสิร์ท (ที่มา : Grahamt. Smith)

นอกจากนี้แล้วในการกลึงปอกด้วยมีคอกลึงอินเสิร์ทยังมีปัจจัยอื่นๆ อีกที่สำคัญซึ่งควรนำมาพิจารณา ปัจจัยที่สำคัญทั้งหมดที่ใช้ในงานกลึงปอกด้วยมีคอกลึงอินเสิร์ท แสดงในภาพที่ 2.2 มีดังต่อไปนี้

- 1) เงื่อนไขของคมตัด (Edge Condition)
- 2) ความยาวของคมตัด (Edge Length)
- 3) วิธีการจับยึดชิ้นงาน (Work Holding Method)
- 4) ส่วนประกอบของวัสดุ (Component Material)
- 5) ความหนาของเม็ดมีด (Insert Thickness)
- 6) เกรดของเม็ดมีด (Insert Grade)
- 7) อายุของการสึกหรอ (Wear Lift)
- 8) มุมตัด (Approach Angle)
- 9) กำลัง (Power)
- 10) น้ำหล่อลื่น (Coolant)
- 11) ต้นทุนของคมตัด (Edge Cost)
- 12) การหักเศษ (Chip Breaker)
- 13) รัศมีปลายมีด (Nose Radius)
- 14) มุมประกอบของใบมีคอกลึง (Included Angle)
- 15) อัตราป้อน (Feed Rate)
- 16) ระยะป้อนลึก (Depth of Cut)
- 17) ความเร็วรอบ (RPM)

2.2.1.1 ความเร็wtัด คือ ความเร็วที่คมมีคอกลึงตัด หรือป่าคิวโลหะออก เมื่อโลหะหมุนครบ 1 รอบคมมีคอกลึงก็จะตัดโลหะเป็นแนวตัดยาวเท่าเส้นรอบวงพอดี ความเร็wtัดมีหน่วยเป็น เมตร/นาที หลักเกณฑ์การเลือกใช้ความเร็wtัดมีดังนี้ คือ

- 1) วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัดที่ทำมาจากเหล็ก robinสูง (High Speed Steel) สามารถใช้ความเร็wtัดเป็น 2 เท่า ของความเร็wtัดของมีดที่ทำมาจากวัสดุเหล็กคาร์บอน ส่วนวัสดุคมตัดที่มีส่วนผสมพิเศษออกไประสามารถใช้ความเร็wtัดได้กว่าเหล็ก robinสูง
- 2) ชนิดของวัสดุที่จะนำมาทำการตัดเนื่อง โดยทั่วไปวัสดุงานที่แข็งมากจะใช้ความเร็wtัดช้ากว่าวัสดุที่อ่อนกว่า
- 3) รูปร่างของคมตัดมีผลต่อการทำงานมาก เช่น มีดตัดงานขาดจะใช้ความเร็wรอบต่ำกว่ามีคอกลึงปอกผิว

4) ความลึกในการตัดถ้าป้อนค่าตัดจะใช้ความเร็วรอบน้อยกว่าป้อนตัด

ตื้น

5) อัตราป้อน ในการป้อนตัดงานหยา เช่น อัตราป้อน 3 มิลลิเมตร ความเร็วที่ใช้ในการตัดจะต่ำกว่าการป้อนตัดขั้นสุดท้าย เช่น อัตราป้อนตัด 0.13 มิลลิเมตร เป็นต้น จะใช้ความเร็วรอบได้สูง

6) การระบายน้ำร้อน ความเร็wtัดของวัสดุบางชนิดอาจเพิ่มให้สูงขึ้น ได้เมื่อมีการระบายน้ำร้อนที่ถูกต้อง ซึ่งสารระบายน้ำร้อนนี้ จะช่วยรักษาอุณหภูมิของคอมตัด ไม่ให้ร้อนสูงเกินไปขณะทำงาน

7) การจับงานให้มั่นคงแข็งแรงในกรณีงานที่ถูกจับด้วยหัวจับโดยอุกมาส์สันๆจะใช้ความเร็วได้สูงกว่างานที่ถูกจับโดยอุกมาส์ๆ

8) ความสามารถของสภาพเครื่อง เครื่องที่แข็งแรงมีกำลังสูง สามารถใช้ ความเร็wtัดได้สูง อย่างไรก็ตามอย่าใช้สูงจนคอมตัดไหม้

ผลผลกระทบของความเร็wtัดที่มีต่ออายุการใช้งานมีคลึง (Effect of Cutting Speed) ในการตัด เนื่องจากงาน ถ้าใช้ความเร็wtัดที่ไม่เหมาะสมกับสภาพเงื่อนไขของงานซึ่งได้แก่ วัสดุงาน วัสดุมีค่า ขนาดของชิ้นงาน ฯลฯ ก็จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการทำงานเพิ่มขึ้นได้ เช่นถ้าใช้ความเร็wtัดสูงเกินไป ก็จะทำให้มีคลึงสึกหรอได้เร็วกว่าปกติ นั่นก็คืออายุการใช้งานของมีคลึงสั้นลง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ จะต้องลับมีคลึงบ่อยๆ ทำให้เสียเวลาในการทำงาน คือเสียเวลาในการลับมีคลึง และเสียเวลาในการติดตั้ง มีคลึงใหม่อีกด้วย ซึ่งเป็นการลดความสามรถ และจำนวนผลิตชิ้นงาน เป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการ ทำงานโดยใช้เหตุ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็wtัดและอายุการใช้งานของมีคลึงนี้ สามารถอธิบายได้ดังนี้ ขณะที่ใช้ความเร็wtัดต่ำๆ การสึกหรอของมีคลึงจะเป็นไปอย่างช้าๆ ทั้งนี้ เพราะอุณหภูมิจากการ เสียดสี ระหว่างมีคลึงกับชิ้นงานจะมีค่าต่ำ แต่ถ้าใช้ความเร็wtัดสูงขึ้นความร้อนระหว่างผิวมีคลึง กับชิ้นงาน และเศษตัดจะเกิดมากขึ้น ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการสึกหรอที่บริเวณผิวของมีคลึงกับ ชิ้นงานที่เสียดสีกัน ซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานของมีคลึงสั้น โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็wtัด และอายุการใช้งานของมีคลึงได้โดยสมการของ Taylor

ความเร็wtัดในงานกลึง คือความยาวหรือระยะทางของเศษโลหะที่ถูกมีคลึงตัดเฉือนออกมา ในขณะกลึง ว่ามีความยาวกี่เมตร ในเวลา 1 นาที ความเร็wtัดจึงมีหน่วยเป็น เมตร/นาที ซึ่งในการ คำนวณก็ใช้หลักการ การหาเส้นรอบวงของชิ้นงานกลึง คูณค่าวิกาหารเร็วรอบของชิ้นงาน จึงมีสูตร การคำนวณดังนี้

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad \text{เมตร/นาที} \quad (2-1)$$

เมื่อกำหนดให้

V = ความเร็วตัดงานกลึง (เมตร/นาที)

n = ความเร็วรอบชิ้นงานกลึง (รอบ/นาที)

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานของงานกลึง (มิลลิเมตร)

หมายเหตุ : ในสูตรที่หารด้วย 1000 เพราะต้องการเปลี่ยนหน่วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจาก มิลลิเมตร เป็น เมตร

2.2.1.2 อัตราป้อน หมายถึง ระยะทางการเดินป้อนของมีดไปตามความยาวของชิ้นงาน ในแต่ละรอบของการหมุนของเพลาของเครื่องหรือการป้อนตัด อาจพิจารณาจากความหนาของเศษตัด (Chips) การป้อนตัด 0.5 มิลลิเมตร หมายถึง มีดตัดเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 0.5 มิลลิเมตร ตามความยาวของชิ้นงานขณะที่ชิ้นงานหมุน 1 รอบ

การกลึงหยาน ใช้อัตราป้อนที่สูง มีดตัดชิ้นงานได้ปริมาณมากผิวงานออกมากไม่เรียบ

การกลึงละเอียด อัตราป้อนที่น้อย ทำให้ผิวงานเรียบ สำรวจจะใช้กลึงในขั้นสุดท้ายจะได้ผิวเรียบและขนาดถูกต้องในทางปฏิบัติที่ดีที่สุด

การเลือกใช้ความลึกในการตัดปานกลางขณะทำการป้อนตัดหนักๆ และใช้ความเร็wtตัดให้ถูกต้อง เมื่อกลึงหยาน ถ้าต้องการให้กลึงงานผิวเรียบในขั้นสุดท้ายให้เพิ่มความเร็wtตัดมากขึ้น การป้อนกินลึกน้อยลง พร้อมกับให้อัตราการป้อนตัดละเอียดให้สัมพันธ์กัน ในการนีที่ใช้ความลึกในการตัดมาก และอัตราการป้อนตัดน้อยจะดีกว่าการใช้ความลึกในการตัดเท่ากับอัตราป้อนตัด ถึงแม้ว่าอัตราการให้ลดของเศษโลหะจะเท่ากัน

กฎทั่วไปในการใช้ความเร็wtตัด และอัตราป้อน

- 1) ถ้าอัตราป้อนเพิ่ม ความเร็w ต้องลดลงเมื่อความลึกของการตัดคงที่
- 2) ถ้าความเร็w เพิ่ม อัตราป้อนต้องลดลง เมื่อความลึกของการตัดคงที่
- 3) ความลึกในการตัดเพิ่มขึ้นความเร็wtต้องลดลงเมื่ออัตราป้อนคงที่

2.2.1.3 ความลึกในการตัด (Depth of Cut) ความลึกในการตัดทำให้เศษส่วนไอลอกมา ทุกรั้งที่ทำการกลึงหยานในการตั้งความลึกในการตัด และอัตราการป้อนตัด จะต้องคำนึงถึงความสามารถในการรับได้ของมีดตัด และเครื่องที่จะทนได้หลักเกณฑ์การพิจารณาเลือกใช้ความลึกในการตัดสำหรับงานปกติทั่วไปควรพิจารณาดังนี้

- 1) ขนาดความโดยของชิ้นงานก่อนทำการตัดเฉือน โดยกว่างานดังนี้

สำเร็จ ควรจะโดยกว่าประมาณ 3.18 มิลลิเมตร

2) ถ้าคำนวณความเร็วรอบอยู่ในช่วงกลางของค่าสองค่า ให้เลือกใช้ความเร็วรอบในขั้นต่ำ ถ้าหากสภาพของเครื่อง มีคลึง และชิ้นงานเหมาะสม อาจจะเลือกใช้ความเร็วรอบในขั้นสูงได้ แต่ถ้าความเร็วรอบที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับค่าในช่วงสูง ให้เลือกความเร็วรอบในช่วงสูงได้

3) ความลึกในการกลึงหมายความป้อนลึกและหมายมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เหลือไว้ประมาณ 0.76 มิลลิเมตร สำหรับขนาดความต้องชิ้นงาน ก่อนจะกลึงผิวสุดท้าย

4) ในการกลึงเหล็กหล่อ หรือโลหะอื่นๆซึ่งผิวรอบๆชิ้นงานจะเป็นสะเก็ตความลึกในการกลึงครึ่งแรก การป้อนมีค่านิลจึงต้องให้มัตต์ของมีคลึงตัดให้ลึกพอ ที่จะให้ส่วนผิวเปลือกแข็งหลุดออกไปให้หมด เพราะผิวเปลือกแข็งนี้จะทำให้มีศักดิ์หรือเร็ว

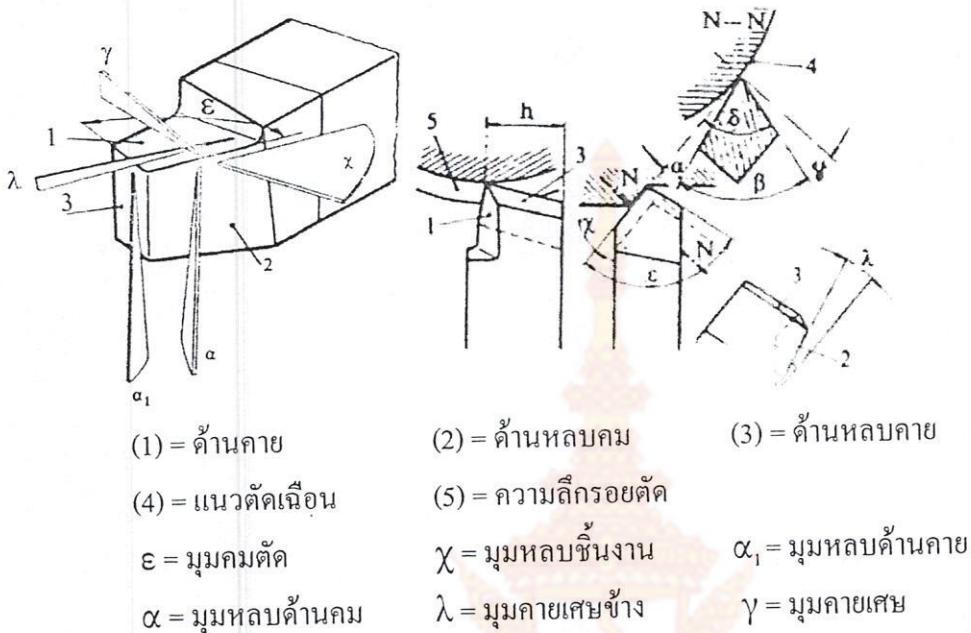
ผลกระทบของอัตราป้อนและความลึกในการตัด อัตราป้อนตัดและความลึกในการตัดมีผลต่อแรงตัดเฉือนและอุณหภูมิในการทำงาน โดยจะเกิดแรงกระทำกับมีคลึงและเกิดอุณหภูมิในการตัดเนื่องสูงถ้าใช้อัตราป้อนตัดและความลึกในการตัดสูงๆ นอกจากนี้ยังส่งผลให้มีคลึงเกิดการสึกหรอย่างรวดเร็ว ซึ่งถ้าต้องการให้อายุการใช้งานของมีคลึงสูงขึ้น ก็จะต้องเลือกใช้ความเร็wtตัดต่ำๆ การเพิ่มอัตราการป้อนจะส่งผลให้ต้องลดค่าความเร็wtตัด มากกว่าการเพิ่มความลึกในการตัดเพื่ออายุการใช้งานของมีคลึงที่นั่นคือการเพิ่มอัตราการป้อนจะทำให้มีคลึงสึกหรอยได้มากกว่า การเพิ่มความลึกในการตัด ซึ่งในการพิจารณาจะต้องพิจารณาถึงแรงที่กระทำบนมีคลึง ต่อความยาวสันคมตัด สำหรับในกรณีนี้เมื่อเพิ่มอัตราป้อนตัด ความยาวสันคมตัดที่รับแรงกระทำก็ยังคงเท่าเดิม แต่ความหนาของเศษตัดจะเพิ่มขึ้น

2.3 หลักการพื้นฐานของการตัดโดยใบมีด

ในการตัดโลหะแบบธรรมชาติทั่วไปนั้น อาศัยหลักการขั้นพื้นฐานที่ว่า (ศุภโฉก, 2543) ใช้ใบมีดตัดที่มีความแข็งสูงคงทนชิ้นงานที่มีความแข็งน้อยกว่า เนื้อชิ้นงานจะเกิดสนาม ความเห็น เมื่อโลกลมมีดผ่านเนื้อชิ้นงาน ความเห็นในระบบหนึ่งบนเนื้อชิ้นงานจะสูงเท่ากันหรือมากกว่า ความต้านการเฉือน ของเนื้อวัสดุชิ้นงาน เป็นผลให้เกิดการเฉือนของเนื้อโลหะชิ้นงานจึงแยกออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือชิ้นส่วนที่จะนำไปใช้ ส่วนที่สองคือส่วนซึ่งแยกออกมา มีลักษณะเป็นเส้นยวๆ หรือเป็นท่อนสันๆ เรียกว่าฟอย และสิ่งที่ควรศึกษาทำความเข้าใจกับใบมีดตัดมีดังนี้

2.3.1 ลักษณะทางเรขาคณิตของใบมีด (Cutting Tool Geometry) หมายถึง บุมมีดตัดและลักษณะต่างๆ เเรขาคณิตของใบมีดเนื่องจากกรรมวิธีการผลิตมีมากมาย มีตัวแปรเชิงเรขาคณิตหลายต่อหลายด้านมาเกี่ยวข้อง ใบมีดตัดมีหลายชนิด เช่น ใบมีคลึง ใบมีดไส ใบมีดกัดกอกสว่าน ซึ่งแต่

ลักษณะของบานพับที่ต้องการใช้งานต่อไปนี้ ลักษณะทางเรขาคณิตจึงมีหลายรูปแบบ เช่น เรขาคณิตไม่มีคลึง



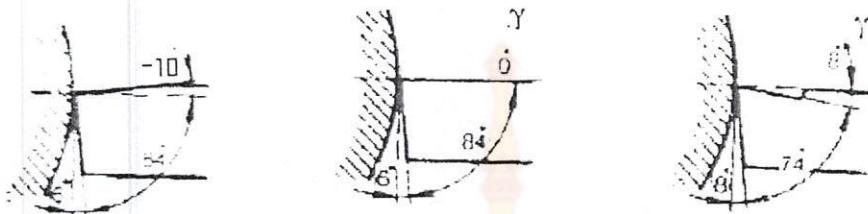
ภาพที่ 2.3 ลักษณะทางเรขาคณิตของใบไม้มีคลึงตัด

2.3.1.2 มุมภายในเศษจริงขณะคลึง δ มุมภายในเศษจริงขณะคลึงมีอธิผลต่อผิวงาน ถูงมาก ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของเศษคลึงอีกด้วย ถ้าให้ $\delta = \text{มุมภายในเศษจริงขณะคลึง}$ ซึ่งวัดระหว่างเส้นในแนวตั้งกับผิวด้านภายในเศษ



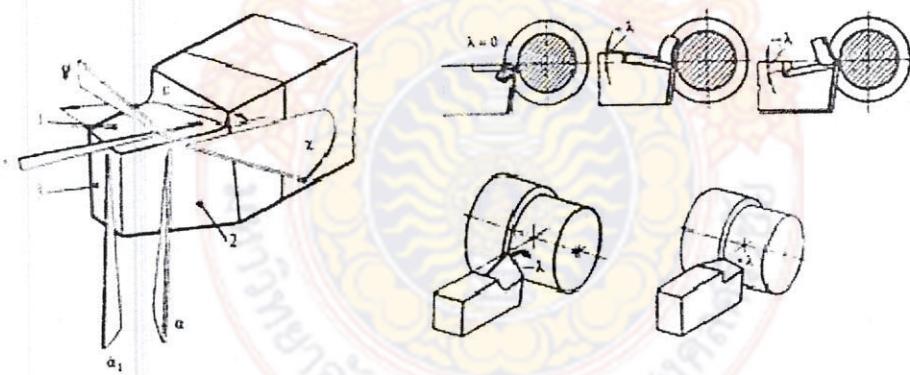
ภาพที่ 2.4 ลักษณะมุมภายในเศษ δ (ที่มา: วัสดุ กฏฯ, 2539)

2.3.1.3 อิทธิพลของมุมกายเศษ γ วัสดุชิ้นงานแข็ง จะใช้มุมกายเศษเป็นลบ หรือบวกน้อยๆ ซึ่งจะทำให้มีมุมตัดเฉือน β ที่มาก นั่นคือมีค่าลิตจึงต้องมีความแข็งแรง และป้องกันการแตกหัก



ภาพที่ 2.5 ลักษณะอิทธิพลของมุมกายเศษ γ (ที่มา: วัลลภ ภูพานา, 2539)

2.3.1.4 อิทธิพลของมุมกายเศษข้าง λ เป็นอิกมุมหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการบังคับทิศทางในการกายเศษตัดเฉือนให้ม้วนตัวอยู่ในรูปแบบต่างๆ กัน ซึ่งจะทำหน้าที่ดันเศษตัดทิ้งออกไป ไม่ให้ม้วนตัวพันกันกับคมตัด



ภาพที่ 2.6 ลักษณะของมุมกายเศษข้าง λ (ที่มา: วัลลภ ภูพานา, 2539)

2.3.2 วัสดุทำเครื่องมือตัด (Cutting Tool Material)

การดำเนินการผลิตในปัจจุบันนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีเครื่องมือกลเข้าช่วยในกระบวนการต่างๆ เพื่อให้การผลิตดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาในด้านของเครื่องมือและวัสดุในการผลิตเครื่องมือขึ้นมาเป็นลำดับ โดยวัสดุที่ดีที่สุดสำหรับการผลิตคือวัสดุที่ใช้ในการตัดปาดชิ้นงาน ได้ผลลัพธ์ดีในราคาน้ำดี คือวัสดุที่ทำเป็น

สำหรับวัสดุเครื่องมือกลใดๆ ได้แก่ ความสามารถในการต้านทานการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง ความมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ความต้านทานต่อการขัดศีรษะและความหนึบแน่นซึ่งเพียงพอที่จะต้านทานต่อการแตกร้าวได้ ชุดเครื่องมือตัดใดๆ อาจทำขึ้นได้จากวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดสำหรับวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันไป เช่น การกลึงขนาดเล็กผ่านศูนย์กลาง 2 ขนาด จำต้องใช้อุปกรณ์ตัดของเครื่องมือแตกต่างกันไปตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต้องการ ซึ่งไม่จำเป็นที่เครื่องมือตัดต้องทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน อันอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อทั้งชิ้นงานและตัวเครื่องมือตัดเอง

2.3.3 คุณสมบัติของวัสดุในมีด

หลักการขึ้นพื้นฐานของการตัดวัสดุโดยใช้ใบมีดตัด วัสดุที่แข็งกว่าย่อมช่วยให้วัสดุที่อ่อนกว่าให้เป็นรอยได้ ดังนั้นใบมีดตัดจะต้องทำการวัดที่ความแข็งสูงกว่าชิ้นงานเสมอ วัสดุที่เหมาะสมในการนำมาทำใบมีดตัด ควรจะมีคุณสมบัติดังนี้

2.3.3.1 มีความแข็งสูง (High Hardness) คือ ในอุณหภูมิห้องปกติความแข็งของสารชิ้นงานต้องมีความแข็งของสารชิ้นงานมากกว่า จึงจะสามารถผ่านเนื้อสารชิ้นงานออกเป็นสองส่วนได้ โดยทั่วไปการวัดค่าความแข็งของใบมีดตัดและชิ้นงานในการตัดโลหะ นิยมระบุเป็นค่าความแข็งในระบบบรอยเดล์ สเกลนี และสเกลซี

2.3.3.2 คงความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง (Hot Hardness) คือ ขณะที่ใบมีดกำลังทำหน้าที่ตัดชิ้นงานอยู่นั้น ทั้งชิ้นงานและใบมีดตัดจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยทั่วไปสารทุกๆ ชนิดจะอ่อนตัวลงคือความแข็งลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ถ้าความแข็งของสารใบมีดตัดลดลงจนมีกำลังกว่าสารชิ้นงานเพียงเล็กน้อย ใบมีดก็จะสึกหรอย่างรวดเร็ว หรือไม่ก็แตกง่ายไปเลย

2.3.3.3 ต้านทานการสึกหรอยได้ดี (High Wear Resistance) ที่ผู้หนานมีดจะมีการเสียดศีรษะห่วงใบมีดตัดกับเนื้อฟอย และผิวหลังมีดใกล้บริเวณตัดจะมีการเสียดศีรษะห่วงมีดกับเนื้อชิ้นงานที่พึงถูกตัดจะทำให้สารใบมีดเกิดการสึกหรอเร็ว

2.3.3.4 มีความแข็งแรงสูง (High Strength) ควรจะมีการต้านแรงดึงดูดสูงและมีความต้านการกดสูงด้วย เพื่อให้ทนทานไม่แตกหักง่าย

2.3.3.5 ไม่เปราะ แตกหัก หรือร้าวง่ายเมื่อถูกผลกระทบกระแทกทั้งนี้ เพราะสารที่มีความแข็งสูงมากจะเปราะ

2.3.3.6 ไม่ไวต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้มีการสึกหรอยอย่างรวดเร็ว ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับอากาศจนเป็นสนิมได้ง่าย ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารหล่อเย็นอย่างรวดเร็วจนอาจทำให้เกิดการสึกกร่อนอย่างรวดเร็ว



2.3.3.7 ราคากู้เพื่อให้สามารถนำพาผลเป็นใบมีด และจำหน่ายให้ได้รับความนิยมในตลาด

2.3.3.8 หาซื้อได้ง่าย เพื่อความสะดวกในการจัดซื้อมาใช้ ไม่มีการขาดแคลนการรู้จักเลือกใช้ใบมีดให้เหมาะสมกับงาน และสภาวะการตัด จะช่วยในการประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาได้มาก

2.3.4 ชนิดของวัสดุใบมีด

วัสดุที่รู้จักกันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่หลายชนิด ดังนี้

1) เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel) ใช้ในช่วงที่ยังไม่มีการกั่นพน เหล็กกล้าความเร็วสูง โดยวัสดุนี้จะมีปริมาณคาร์บอน 0.8 % - 1.20 % จึงสามารถทำการชุบแข็งได้ดี และด้วยกรรมวิธีทางความร้อนที่เหมาะสมอาจเพิ่มความแข็งของมันจนมีค่าไอลีเคียงกับเหล็กกล้าความเร็วสูงค่าต่างๆ หรืออาจทำให้มีความหนึบแย่นั่นได้ตามต้องการ อย่างไรก็ตามเหล็กกล้านี้มีความสามารถในการชุบแข็งหรือความลึกในการชุบแข็งต่ำและจะสูญเสียความแข็งที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศา ดังนั้นจึงถูกจำกัดใช้เฉพาะเครื่องมือตัดขนาดเล็ก และไม่เหมาะสมในการตัดด้วยความเร็วสูงหรือใช้ในงานหนัก แต่จะใช้ในการปฏิบัติภารกิจวัสดุอ่อน

2) เหล็กกล้าความเร็วสูง (High Speed Steel : HSS) เหล็กกล้าความเร็วสูงหรือเหล็กรอนสูงจะมีส่วนประกอบของโลหะผสมสูง มีความสามารถในการชุบแข็งได้เป็นพิเศษ และสามารถรักษาสภาพของคมตัดที่ดีไว้ได้จนถึงอุณหภูมิประมาณ 650 องศาเซลเซียส ซึ่งสภาพนี้เป็นคุณสมบัติในด้านความต้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง อันเป็นคุณสมบัติที่ต้องการมากที่สุด ในเครื่องมือตัดค่าต่างๆ โดยเหล็กกล้าทำเครื่องมือตัดชนิดแรกที่มีคุณสมบัติคงทนกว่าเดิมโดย Frederick W. Taylor และ M. White ในปี ค.ศ. 1900 ซึ่งทำโดยการเติมทังสเทน (Tungsten) 18 % และโตรเมียม 5.5 % ลงเป็นชาตุพสมอยู่ในเหล็กกล้า ส่วนผสมนี้สืบทอดมาจนถึงปัจจุบัน โดยมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากชาตุพสมข้างต้นแล้ว ชาตุอื่นที่ใช้กันได้แก่ วนาเดียม โนลิบินนั่มหรือพลวง และคาร์บอน

3) โลหะผสมหล่อออกกลุ่มเหล็ก (Cast Nonferrous Alloy) โลหะผสมออกกลุ่มเหล็ก จำนวนมากประกอบด้วยส่วนผสมหลัก โตรเมียม โคงอลต์ และทังสเทนกับชาตุพสมในปริมาณน้อยกว่าตั้งแต่หนึ่งชนิดขึ้นไปที่มีการสร้างรูปแบบการ์ไบด์ เช่น แทนทาลัม (Tantalum) พลวงหรือโบรอน (Boron)

4) เพชร (Diamond) เพชรใช้เป็นเครื่องมือตัดคมเดี่ยวสำหรับการตัดขนาดที่อัตราเร็วสูง ซึ่งต้องมีการรองรับอย่างมั่นคงแข็งแรงเนื่องจากวัสดุเพชรมีความแข็งและเปราะสูงมากเป็นพิเศษ รูปแบบการใช้งานคือ ใช้ในการตัดปาดวัสดุที่มีความแข็งมากต่อการปฏิบัติการ

ด้วยเครื่องมืออื่น ๆ ทั้งยังต้องการความแม่นยำและผิวสำเร็จที่ดีเยี่ยมหรือใช้ในการตัดขนาดเบาที่ความเร็วสูงสำหรับวัสดุอ่อนกว่า เช่น การตัดปาดพลาสติก ยางแข็ง คาร์บอนอัลลอยด์และอลูминัมที่อัตราเร็วตัด 5-25 เมตร/วินาที รวมทั้งสามารถใช้ในการตัดแต่งล้อหินเจียรนัย แม่แบบดึงลวดขนาดเล็ก การเจียรนัยและการขัดถูจำเพาะอย่าง

5) เซรามิกส์ (Ceramic) เป็นส่วนผสมของผงอลูминัมออกไซด์และสารตัวเดิม จำพวก ไททาเนียม แมกนีเซียม หรือโครเมียมออกไซด์ (Chromium Oxide) รวมตัวประสานผ่านเข้า กระบวนการทำมีดเล็บ (Cutting Tool Insert) ตัวมีดเล็บที่ได้อาจยืดเข้ากันฐานมีดได้ทั้งโดยการใช้ ตัวบีบจับ (Clamp) หรือใช้อี้พอกซีเรzin (Epoxy Resin)

6) คาร์ไบด์ (Carbide) มีคุณสมบัติที่ดีกว่าวัสดุที่ได้นำมาทำการทดลองในครั้ง นี้ ทำขึ้นได้โดยกระบวนการทางโลหะพงเท่านั้น โดยผงโลหะของทั้งสเตนคาร์ไบด์ และ โคงอลต์จะถูกอัดให้มีรูปร่างตามต้องการแล้วนำเข้าสู่กระบวนการกึ่งยึดเหนี่ยวในเตามีบรรยากาศ ของไฮโคลรเจนที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงทำผิวสำเร็จโดยการเจียรนัย เครื่องมือคาร์ไบด์นี้มีส่วนผสมของทั้งสเตนคาร์ไบด์ประมาณ 94 % และ โคงอลต์ 6 % หมายความกับการตัดปาด เหล็กหล่อและวัสดุอื่นๆ จำนวนมากยกเว้นเหล็กกล้า เนื่องจากเศษตัดจะยึดติดหรือเชื่อมตัวเข้ากับ ผิวหน้าคาร์ไบด์และผังตัวลงในเครื่องมือตัดอย่างเร็ว อย่างไรก็ตามข้อมูลนี้อาจแก้ไขได้โดย การเติมไททาเนียมและแทนทาลัมคาร์ไบด์ เข้าผสมพร่องกันกับเพิ่มปริมาณของโคงอลต์ ซึ่งใน เครื่องมือตัดของการไบด์ที่เหมาะสมแก่การปูน้ำสำหรับเหล็กกล้าจะประกอบไปด้วย ทั้งสเตนคาร์ไบด์ 82 % ไททาเนียมคาร์ไบด์ 10 % และ โคงอลต์ 8 % ส่วนผสมนี้จะมีสมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ เป็นผลให้มีแนวโน้มการสึกหรอที่ด้านบนหรือความเป็นแองค์คันนอยด์ เนื่องจากการแปรเปลี่ยน ส่วนประกอบจะทำให้คาร์ไบด์มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไป โดยคาร์ไบด์ระดับคุณภาพต่างๆ สามารถหาซื้อให้เหมาะสมกับการปฏิบัติการทั่วไป

คาร์ไบด์จะสามารถคงตัวไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1200 องศาเซลเซียส ดังนั้นความแข็งของ ร้อนแรงของวัสดุนี้จึงมีเห็นอ่วร์วัสดุโดยทั่วไป นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุจากการสังเคราะห์ที่แข็งที่สุด เท่าที่ผลิตขึ้นได้และยังมีความแข็งแรงทางด้านแรงอัดสูงเป็นอย่างยิ่ง อย่างไรก็ตามมันมีข้อเสียใน ด้านที่มีความประาะสูง มีความต้านทานต่อการกระแทกแตกตัวและต้องการฐานรองรับอย่าง มั่นคงแข็งแรงเพื่อป้องกันการแตกร้าว ทั้งยังทำการเจียรนัยลำบากเฉพาะกับล้อขัคชิลิกอนคาร์ไบด์ หรือเพชรเท่านั้น โดยจะต้องรักษามุมห่าง (Clearance Angle) ไว้ให้ต่ำที่สุดเครื่องมือตัดคาร์ไบด์จะ สามารถทำการตัดด้วยอัตราเร็ว 2-3 เท่า ของเครื่องมือตัดจากโลหะพงหล่อแต่ในอัตราการป้อนที่ น้อยกว่ามาก ในแต่ละรอบก็จะได้จังหวะที่ดีกว่า จึงควรนำเครื่องมือตัดคาร์ไบด์มาใช้ให้มากที่สุดโดยเครื่องจักร

สำหรับเครื่องมือตัดควร์ไบค์จะต้องมีความมั่นคงแข็งแรง มีกำลังพอเพียงและมีช่วงของการป้อน และอัตราเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับวัสดุต่างๆ

2.4 ความขรุขระผิว (Surface Roughness)

2.4.1 ประเภทของการตัดจำแนกตามความขรุขระผิวสำเร็จการตัดวัสดุถ้าหากมองในแจ่ของความประณีต ความละเอียดแม่นยำ หรือความขรุขระผิวสำเร็จ (Surface Finish) นั้นคือพื้นผิวที่ได้จากการรวมวิธีการผลิต แบ่งออกเป็น 3 ประเภท

2.4.1.1 การตัดหยาบ (Rough Cutting) หมายถึง การตัดงานที่ต้องการให้งานเสร็จอย่างรวดเร็ว แต่ไม่เน้นเรื่องการทำให้ค่าความขรุขระค่อนข้างสูง ไม่เน้นความแม่นยำหรือความละเอียดของพื้นผิวสำเร็จของชิ้นงาน งานส่วนมากในการตัดโดยใช้มีดตัดมักจะเป็นการตัดหยาบ ใช้วิธีการเริ่วในการตัดค่อนข้างสูง อัตราป้อนสูง และความลึกในการตัดสูง เป็นผลให้เร่งตัดสูง ใช้กำลังในการตัดสูง และอาจจะต้องมีน้ำยาหล่อเย็นที่มีสมบัติของการหล่อลินหรือการลดแรงตัดได้ดีทั้งนี้ เพราะต้องการให้งานเสร็จเร็ว หลังจากงานตัดหยาบแล้วอาจจะต้องมีการตัดละเอียด หรือการเย็บรัดในอีกรอบหนึ่ง

2.4.1.2 การตัดปานกลาง (Medium Cutting) เป็นการตัดที่ประเมินประเมินระหว่างการตัดหยาบและการตัดละเอียด คือ ต้องการให้งานเสร็จเร็ว โดยที่ต้องการให้ค่าความขรุขระผิวน้อยด้วย ซึ่งอาจจะทำได้ในบางกรณี โดยการเลือกค่าความเร็วในการตัด อัตราป้อน และความลึกของการตัดที่เหมาะสม

2.4.1.3 การตัดละเอียด (Fine Cutting) หมายถึงการตัดที่ต้องการให้ค่าความขรุขระที่ต่ำเน้นความแม่นยำหรือความละเอียดของพื้นผิวสำเร็จของชิ้นงาน ไม่เน้นให้งานเสร็จอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าเสร็จรวดเร็วคือการตัดงานในลักษณะนี้เกิดขึ้นเป็นงานในขั้นตอนต่อเนื่องจากการตัดหยาบ หรือเป็นการตัดครั้งสุดท้าย ใช้ความเร็วในการตัดสูงหรือต่ำที่ได้แล้วแต่ความเหมาะสม อัตราป้อนต่ำและความลึกในการตัด

2.4.1.4 การตัดละเอียดยิ่ง (Ultra - Fine Machining) ใน การตัดชิ้นงานบางอย่าง เช่น การกลึงเลนส์ การกลึงอะลูมิเนียมให้พื้นผิวสำเร็จเป็นมั่นวาวคล้ายกระจก ค่าความขรุขระจะน้อยมากเป็นพิเศษ การจำแนกประเภทของการตัดอาจจะจำแนกโดยค่าความขรุขระของพื้นผิวสำเร็จดังนี้

การตัดหยาบ R_a ตั้งแต่ 10 μm . หรือ 0.010 มิลลิเมตร ขึ้นไป

การตัดปานกลาง R_a ระหว่าง 1–10 μm . หรือ 0.001–0.010 มิลลิเมตร

การตัดละเอียด R_a ระหว่าง 0.1–1 μm . หรือ 0.0001–0.001 มิลลิเมตร

การตัดละเอียดยิ่ง R_a ตั้งแต่ 0.1 μm . หรือ 0.0001 มิลลิเมตร ลงไป

รูปแบบโดยทั่วไปของผิวตามที่ได้มีการกล่าวถึงทั่วๆ ไป มีคำศัพท์ทางเทคนิคหลายคำ เกี่ยวกับพื้นผิวที่ควรจะรู้จัก (สุก โซค วิริยะกุล, 2543) ดังภาพที่ 2.7 ดังนี้

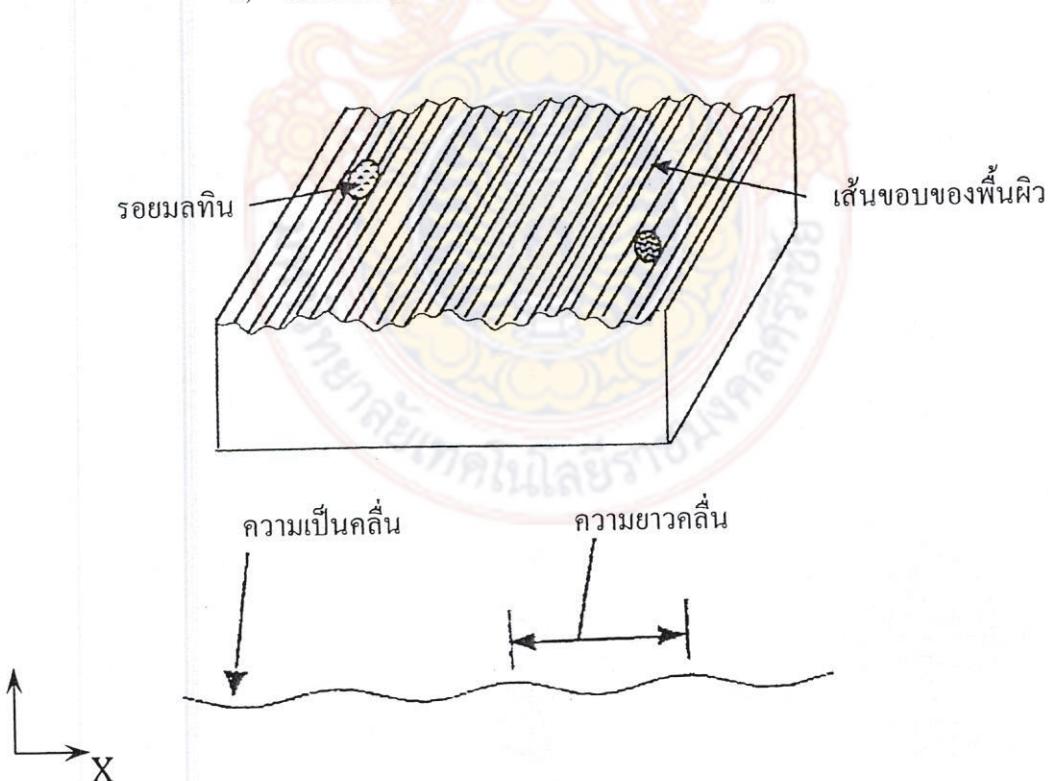
1) พื้นผิว (Surface) หมายถึง ส่วนนอกสุดของเทหัวตุ (Body) ที่จะต้อง สัมผัสกับอากาศ (Space) หรือ สัมผัสเกี่ยวข้องกับเทหัวตุอื่น พื้นผิวของวัสดุส่วนมากจะมีลักษณะ เป็นเหมือนเกลียวคลื่นที่มีความยาวคลื่นยาว ผสมกับละลอกคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้น

2) พื้นผิวสำเร็จ (Finish Surface) หมายถึง พื้นผิวที่เกิดจากการรีบบีกิ้ง ผลิต เช่นพื้นผิวชิ้นงานหรือ ชิ้นส่วนที่ได้จากการกลึง ไส กัด เจาะ หรือแม้กระทั่งจากการรีบบีกิ้งที่ไม่ใช่การตัด เช่น การหล่อ การรีด การอัดหลอม เป็นต้น

3) ความเป็นคลื่น (Waviness) หมายถึง การเกิดคลื่นที่มีช่วงความยาว คลื่นส่วนมากจะมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ (Sine Wave) ซึ่งอาจจะแสดงได้โดยขนาด (Amplitude) ของคลื่น และโดยค่าความยาวคลื่นความชรุขยะถึง ละลอกคลื่นสั้น ความชรุขยะอาจจะแสดง ได้โดยขนาดของคลื่นและโดยความยาวคลื่นของเส้น เป็นเส้นแสดงพื้นผิวเมื่อถูกตัดตามขวาง

4) ความชรุขยะ (Roughness) หมายถึง ละลอกคลื่นมีช่วงคลื่นสั้น ความชรุขยะอาจจะแสดงได้โดยขนาดของคลื่น และโดยค่าความยาวคลื่น

5) เส้นขอบ (Profile) เป็นเส้นแสดงพื้นผิวเมื่อถูกตัดตามขวาง



ภาพที่ 2.7 องค์ประกอบของพื้นผิว (ที่มา: สุก โซค วิริยะกุล, 2543)



2.4.2 การวัดค่าความชุกระพิว

โดยปกติแล้วจะใช้เครื่องมือที่มีลักษณะคล้ายเข็ม ลากอย่างช้าๆ ผ่านไปบนแกนนอน (แกน X) ของพื้นผิวที่จะทำการวัดค่าความชุกระ การเคลื่อนที่ของปลายเข็มในแนวตั้งคือ ตามแกน Y จะเป็นไปตามลักษณะเส้นขอบของพื้นผิว ดังที่แสดงในภาพที่ 2.8 จากนั้นจะมีระบบบันทึกค่า X และ Y_w ไว้ในหน่วยความจำ และระบบคำนวณค่าอิทธิพลของความเป็นคลื่นที่มีขนาด Y_w ในแนวตั้ง จากนั้นจะคำนวณค่าของอิทธิพลของความเป็นคลื่นของก็จะเหลือเฉพาะในแนวตั้งอันเนื่องมาจากความชุกระ (y) ซึ่งจะนำไปคำนวณค่าความชุกระต่อไป ค่าความชุกระแสดงได้ด้วยตัวแปรต่างๆ หลายตัวแปร ซึ่งจะได้นำมาพิจารณาดังต่อไปนี้

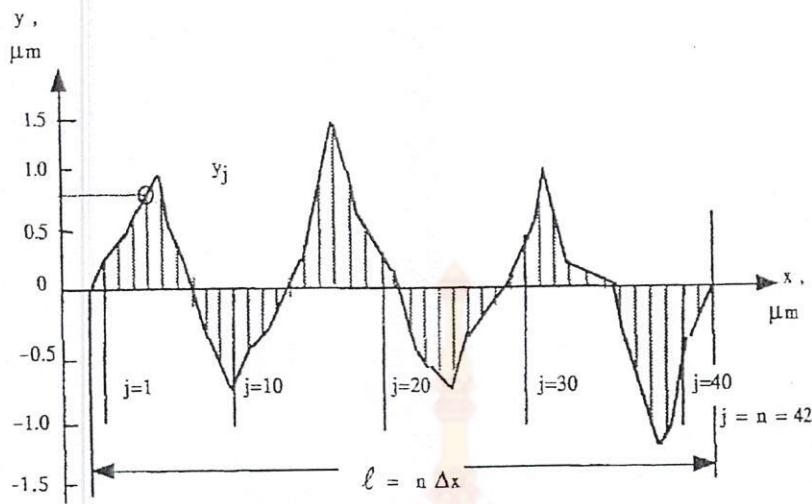
2.4.2.1 ค่าเฉลี่ยทางเลขคณิต (Arithmetic Average, R_a) ถ้าลากเส้นในแนวโนนผ่านกึ่งกลางของเส้นขอบรูป ที่ตัดค่าความเป็นคลื่นของจนเหลือแต่ความชุกระ ดังแสดงในภาพที่ 2-3 เส้นนี้เรียกว่าเส้นกึ่งกลาง โดยแบ่งพื้นที่ระหว่างเส้นขอบรูปกับเส้นกึ่งกลางเป็นสองส่วนเท่าๆ กัน ค่าในแกนตั้งวัดจากเส้นกึ่งกลางจะเรียกว่าค่า y และค่าความสูงเฉลี่ยทางเลขคณิต (R_a) จะนำมาใช้เป็นค่าความชุกระ นั้นคือ $R_a = \text{ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของพื้นที่ได้เส้นขอบรูปต่อ ระยะทางในการวัดตามแนวโนนหรือ}$

$$R_a = \frac{1}{n} \int_0^i |y| dx \quad (2-2)$$

หรือ ถ้าแบ่งระยะทาง ออกเป็น n ส่วน โดยที่ n มีค่าสูงพอ จะพบว่า

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_j| \quad (2-3)$$

ค่าเฉลี่ยทางเลขคณิต (R_a) เป็นค่าที่นิยมใช้ระบุความชุกระพิวmaแต่ด้วยเดิมก่อนค่าอื่นๆ ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีและใช้กันมากจนกระทั่งปัจจุบัน แต่ต่อมามีการนำเอาตัวแปรอื่นๆ มาใช้ระบุค่าความชุกระเพิ่มเติมอีก เพื่อให้การพิจารณาค่าความชุกระมีหลายมุมมองยิ่งขึ้น



ภาพที่ 2.8 การแบ่งเส้นขอบของพื้นผิวเป็นอีลิเมนท์ย่อยๆ (ที่มา: ศุภโชค วิริยโกศล, 2543)

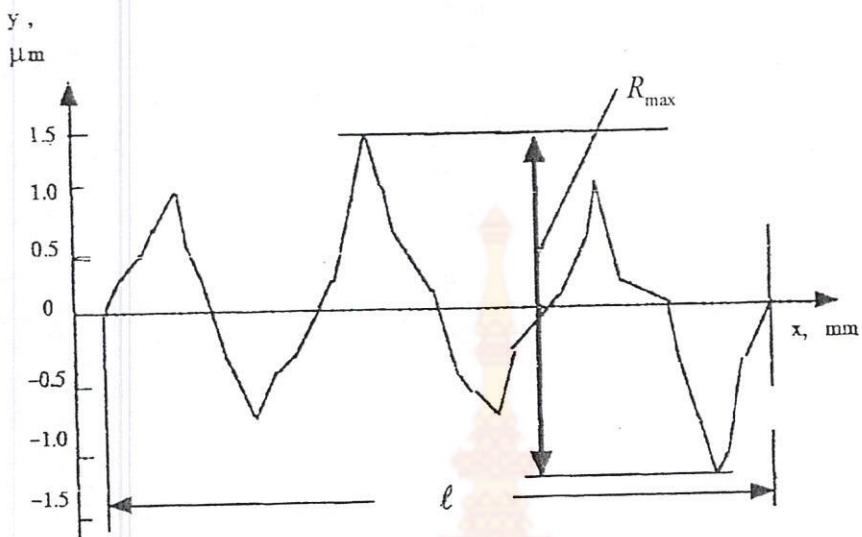
2.4.2.2 ค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด (Maximum Distance Between Peak to Valley, R_{\max})

ค่า R_{\max} หรือ ค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด เท่าที่วัดได้จากความยาว ℓ ที่วัดจากพื้นผิว ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 2.9 และค่า R_{\max} หาได้ดังนี้

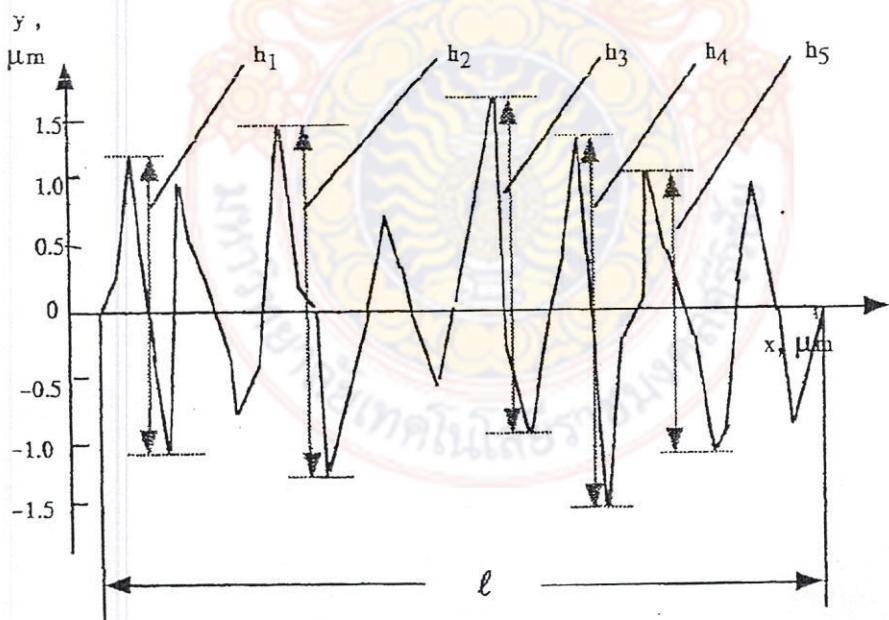
$$R_{\max} = 1.5 + 1.2 = 2.7 \mu\text{m} \quad (2-4)$$

ค่า R_{\max} มีความหมายในการปฏิบัติงานคือ เป็นค่าที่จะบอกได้ว่า ในการจะขัดเนื้อผิวตัวอย่างนี้ จะต้องขัดเนื้อผิวออกเป็นความลึกไม่น้อยกว่าค่าของ R_{\max} จึงจะทำลายผิวนิ่มได้หมด แต่เนื่องจากค่า R_{\max} วัดได้ไม่แน่นอน เพราะเป็นค่าสูงสุดค่าเดียวซึ่งจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของพื้นผิวที่วัด จึงนิยมวัดค่าเฉลี่ย R_z แทนค่า R_{\max} โดยให้ R_z เป็นค่าเฉลี่ยของค่าความสูงระหว่างยอดสูงสุด กับก้นร่องต่ำสุด จากค่าสูงสุดที่วัดได้ 5 ค่าแรก ถ้าค่า h_1, h_2, h_3, h_4 และ h_5 เป็นค่าความสูงระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด โดยเป็นค่าสูงสุด 5 ค่าแรก เท่าที่วัดได้จากความยาว ℓ ที่วัดจากพื้นผิว ดังได้แสดงไว้โดยภาพที่ 2.10 ดังนั้นค่า R_z คำนวณได้จาก

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 h_j = \frac{1}{5} [h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5] \quad (2-5)$$



ภาพที่ 2.9 ค่าระหว่างยอดสูงสุดกับกันร่องค่าสูด R_{\max} (ที่มา: ศุภโชค วิริยโภศล, 2543)



ภาพที่ 2.10 ค่าระหว่างยอดสูงสุดกับค่าต่ำสุดห้าค่าแรก R_z (ที่มา: ศุภโชค วิริยโภศล, 2543)

2.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experimental)

เซอร์ โรนอล เอ. ฟิชเจอร์ (Sir Ronald A. Fisher) เป็นผู้คิดกับการใช้วิธีการทางสถิติสำหรับการออกแบบการทดลองขึ้น เนื่องจากการที่ได้เข้าไปมีส่วนร่วมกับการรับผิดชอบทางสถิติและการวิเคราะห์ข้อมูลที่สถานที่ทดลองทางการเกษตรตั้งแต่ 6 ปี หลังจากนั้น ประมาณ 10 ปี ฟิชเจอร์ เป็นทั้งผู้พัฒนาและเป็นบุคคลแรกที่นำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) มาใช้เป็นวิธีการเบื้องต้นในการวิเคราะห์ทางสถิติที่เกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง ในปี ค.ศ. 1933 ฟิชเจอร์ ก็ได้รับตำแหน่งศาสตราจารย์ของมหาวิทยาลัยลอนดอน

การนำออกแบบการทดลองไปใช้ในยุคแรก ส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์ทางการเกษตร และชีวภาพ ซึ่งทำให้คำศัพท์และคำนิยามส่วนมากที่ใช้กันอยู่ทางด้านนี้มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับสาขาวิชาทางการเกษตรและชีวภาพ อย่างไรก็ตามการนำการออกแบบการทดลองมาใช้งานในทางอุตสาหกรรมครั้งแรกปรากฏประมาณช่วงปี ค.ศ. 1930 ซึ่งอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง คืออุตสาหกรรมสิ่งทอ หลังสหกรณ์โลกครั้งที่ 2 บุตติงวิธีการออกแบบการทดลองก็เริ่มได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเคมี และกระบวนการผลิตในสหรัฐอเมริกาและยุโรปตะวันตก กลุ่มอุตสาหกรรมเหล่านี้ได้รับประโยชน์อย่างมากมายในการใช้การออกแบบการทดลอง สำหรับงานพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิต นอกเหนือไปจากอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำและอิเล็กทรอนิกส์ยังไฉนี กระบวนการผลิต นอกจากนี้แล้วอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำและอิเล็กทรอนิกส์ยังไฉนี การนำเอาวิธีการทดลองนี้ไปใช้งานและประสบความสำเร็จอย่างมากเช่นกัน หลายปีที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนาความสนใจเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองขึ้นในสหรัฐอเมริกา เพราะอุตสาหกรรมในอเมริกาจำนวนมากพบว่าคู่แข่งทางการค้าอยู่ในทวีปอื่นๆ ซึ่งได้ใช้การออกแบบการทดลองมาเป็นเวลานานแล้ว และวิธีการออกแบบการทดลองนี้เป็นปัจจัยสำคัญ ต่อความสำเร็จทางด้านการแข่งขัน

2.5.1 หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองจะให้ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์สูงสุด จะต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experimental) คือ กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อที่จะให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้สามารถสรุปข้อมูลที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น ถ้าต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่เรามีอยู่ และถ้าปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเดียวที่นำมาในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการ สำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลองก็คือการออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองอย่างนี้มีความสัมพันธ์กันอย่างมากทั้ง

นี้เนื่องจากว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้และหลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลองคือ

1) เรเพลิกชัน (Replication) หมายถึง การทดลองซ้ำ เรเพลิกชันมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรก เรเพลิกชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ด้วยประมาณค่าความผิดพลาด ถ้ายเป็นหน่วยของการชี้วัดขึ้นพื้นฐานสำหรับการพิจารณาว่า ความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ ประการที่สอง ถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเรเพลิกชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระบวนการนี้

2) แรนดอมไไมเซชัน (Randomization) เป็นหลักพื้นฐานสำหรับการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลองและคำนับของการออกแบบการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการทางสถิติกำหนดว่าข้อมูลหรือความผิดพลาดจะต้องเป็นคัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ แรนดอมไไมเซชันจะทำให้สมมุติฐานนี้เป็นจริง การที่ทำแรนดอมไไมเซชันทดลอง ทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

3) บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซ็ตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง

2.5.2 แนวทางในการออกแบบการทดลอง

การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ที่เกี่ยวข้องในการทดลองต้องมีความเข้าใจอย่างถ่องแท้ลงหน้า ว่ากำลังศึกษาอะไรอยู่ จะเก็บข้อมูลอย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บนั้นอย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินการอาจทำได้ดังต่อไปนี้

1) ทำความเข้าใจถึงปัญหา จะต้องพยายามพัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของ การทดลอง และบางครั้งจะต้องหาอินพุตจากบุคคลหรือหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องการเข้าใจปัญหาอย่างชัดเจนเป็นผลอย่างมากต่อการหาคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้น

2) การเลือกปัจจัยระดับและขอบเขต ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดของเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง ดังนั้นผู้ทำการทดลองต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการนั้นอย่างมาก ซึ่งอาจจะมาจากประสบการณ์หรือจากทฤษฎี มีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบคุณภาพปัจจัยที่กำหนดขึ้นมาทั้งหมดมีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการ

กรองปัจจัย (Screening) เราคาจะกำหนดให้ระดับต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองให้มีจำนวนน้อยการเลือกของเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกัน ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเราควรของเขตให้กว้างมากๆ หมายถึงว่าของเขตของปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ค่อนข้างมาก แต่เมื่อเราทราบว่าตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ก็อาจจะลดของเขตลงมาให้แคบลงได้

3) เลือกตัวแปรผลตอบ ใน การเลือกตัวแปรผลตอบนี้ ผู้ทำการทดลองควรแนวใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ หลายครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือทั้งคู่ ของกระบวนการผลิตเป็นตัวแปรผลตอบ ซึ่งในการทดลองหนึ่งอาจจะมีผลตอบหลายตัว และมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรผลตอบและจะวัดค่าตัวแปรนั้นอย่างไร

4) เลือกการออกแบบการทดลอง การเลือกการออกแบบการทดลองเกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดตัวอย่าง การเลือกขนาดที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูลและการตัดสินใจว่าควรจะใช้วิธีแบบสุ่มหรือการใช้การแรนดอมไม่ เช่น ในการเลือกทางวิศวกรรมศาสตร์ ส่วนมาก เราจะทราบดังแต่เริ่มแล้วว่า ปัจจัยบางตัวมีผลต่อผลตอบที่จะเกิดขึ้น ดังนั้นเราจะรู้ว่า ปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่จะเกิดขึ้น

5) ทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองจะต้องดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน หากมีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้น เกี่ยวกับวิธีการทดลอง ถือว่าการทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนการทดลองในขั้นตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

6) วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ควรนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการทดลองเพื่อ ผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบมาเป็นอย่างดี และทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้จะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทดลองทางสถิติก็คือ การทำให้ผู้ที่มีอำนาจในการตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพ และถ้านำเอาวิธีการทางสถิติมาพนักกับความรู้ทางวิศวกรรมศาสตร์ ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกแบบมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

7) สรุปและนำเสนอแนะ เมื่อได้มีการวิเคราะห์ข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้อง หาข้อสรุปในทางปฏิบัติและนำเสนอแนะแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้จะนำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาย่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราต้องการนำเสนอผลงานนี้ให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้วการทำ

ทดสอบเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) การทำขึ้นเพื่อที่จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

2.5.3 การทดสอบปัจจัยเดียวและการวิเคราะห์ (Single Factor Experiment)

การทดสอบปัจจัยเดียวเป็นการทดสอบที่มีปัจจัยเดียว คือมี a ระดับของปัจจัย (a เรื่อง ไข่) โดยการทดสอบเป็นแบบการสุ่มสมบูรณ์ ลำดับการทดสอบแบบสุ่มเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการหลักเลี่ยงผลของตัวแปรควบคุมที่ไม่ทราบค่า ซึ่งบางครั้งอาจจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าไป หรือไม่สามารถควบคุมได้ในขณะทำการทดสอบ

2.5.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน หากมีระดับซึ่งแตกต่างของปัจจัยเดียวที่ต้องการศึกษาเปรียบเทียบและค่าตอบสนองที่ได้จากการสังเกตในแต่ละระดับเป็นตัวแปรสุ่ม เราสามารถที่จะอธิบายค่าสังเกตต่างๆ นี้ด้วยแบบจำลองทางสถิติเชิงเดินตรง

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad \left\{ \begin{array}{l} i=1,2,\dots,a \\ j=1,2,\dots,a \end{array} \right. \quad (2-6)$$

โดยที่ค่า y_{ij} เป็นค่าสังเกตที่ ij และ μ คือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ร่วมกันทุกระดับซึ่งเรียกว่ามัธยมิรวม (Overall Mean) τ_i คือค่าพารามิเตอร์สำหรับระดับที่ i หรือผลกรบทจากระดับที่ i และ ε_{ij} คือองค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) จุดประสงค์เพื่อที่จะตรวจสอบสมมุติฐานที่เหมาะสมเกี่ยวกับผลกรบทต่อระดับต่างๆ และทำการประเมินค่านั้น สำหรับการทดสอบสมมุติฐานความผิดพลาดของแบบจำลองให้เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติและอิสระต่อกัน ด้วยมัธยมิเท่ากับ 0 และความแปรปรวน σ^2 และสามารถสังเกตการออกแบบข้อมูลสำหรับการทดสอบปัจจัยเดียวได้ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลสำหรับการทดลองปัจจัยเดียว

Treatment		Observations		Total	Averages
(Level)		Y_{11}	Y_{12}	Y_{1n}	\bar{Y}_1
1		Y_{21}	Y_{22}	Y_{2n}	\bar{Y}_2
.
.
a		Y_{a1}	Y_{a2}	Y_{an}	\bar{Y}_a
		ผลรวม		$\bar{Y}...$	\bar{Y}

แบบจำลองนี้เรียกว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว เพราะมีเพียงแค่ปัจจัยเดียว ที่นำมาพิจารณา ยิ่งกว่านั้นลำดับในการทดลองจะต้องเป็นแบบสุ่มเพื่อที่จะกำหนดสิ่งแวดล้อมทั้งหมดในต่างๆ จะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากที่สุด ดังนั้นการออกแบบการทดลองแบบนี้จึงเป็นการทดลองที่เรียกว่า การออกแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design) นอกจากนี้อาจจะต้องมีการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองซึ่งเรียกว่า แบบจำลองผลกระแทบคงที่

2.5.3.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียวของแบบจำลองแบบผลกระแทบคงที่ ผลกระแทบทองระดับ (τ_i) มีนิยามเหมือนกับส่วนเบี่ยงเบนจากมัชณิมรวม

$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$$

มัชณิมของระดับ i คือ $E(Y_{ij}) \equiv \mu_i = \mu + \tau_i, i = 1, 2, \dots, a$ ซึ่งในการทดสอบความเท่ากันของมัชณิม a ระดับ คือ

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อยหนึ่งคู่ของ } (i,j)$$

ถ้าหาก H_0 เป็นจริง ทุกระดับจะมีมัชณิมที่เท่ากันคือ μ ซึ่งอาจจะเป็นในรูปสมมุตฐานใหม่ ในรูปของผลกระแทบทองระดับ τ_i ได้ดังนี้

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0 \text{ อย่างน้อยหนึ่งคู่ของ } i$$

จากการคาดหมายกำลังสองเฉลี่ย พบว่า โดยทั่วไป MS_E จะเป็นค่าประมาณที่ไม่ถูกอ้างของ σ^2 ภายใต้สมมุติฐานหลัก $MS_{\text{treatment}}$ จะเป็นค่าประมาณที่ไม่ถูกอ้างของ σ^2 เช่นกัน อย่างไรก็ตามถ้า สมมุติฐานหลักเป็นเท็จ ค่าคาดหมายของ $MS_{\text{treatment}}$ จะมากกว่า σ^2 ดังนั้นภายในสมมุติฐานรอง ค่าคาดหมายของตัวตั้งของสถิติทดสอบ จะมากกว่าค่าคาดหมายตัวหาร และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่าสถิติทดสอบมีค่ามากกว่า หรือค่าต่ำกว่าในช่วงวิกฤตซึ่งหมายถึงพื้นที่ด้านขวาของค่าวิกฤต ($F_{\alpha, a-1, N-a}$) ดังนั้นถ้าจะปฏิเสธ H_0 และสรุปว่า มีความแตกต่างระหว่างมัชณิ์ของระดับ

$$F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a}$$

เมื่อ

$$F_0 = \frac{SS_{\text{treatment}} / (a-1)}{SS_E / (N-a)} = \frac{MS_{\text{treatment}}}{MS_E}$$

ซึ่งค่า F_0 สามารถคำนวณโดยการใช้ P -value ในการตัดสินใจได้ กฎสำหรับการคำนวณ ผลรวมกำลังสองสามารถหาได้จากการลดรูปของ $MS_{\text{treatment}}$ และ SS_T ซึ่งจะได้

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij}^2 - \bar{Y}_{..}^2 \quad \text{an} \quad (2-7)$$

และ

$$SS_{\text{treatment}} = \sum_{ni=1}^1 a \bar{Y}_{ij}^2 - \bar{Y}_{..}^2 \quad \text{an} \quad (2-8)$$

ค่าผิดพลาดของผลรวมกำลังสองสามารถหาได้ดังนี้

$$SS_E = SS_T - MS_{\text{treatment}} \quad (2-9)$$

ซึ่งขั้นตอนการทดสอบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งเรียกว่า ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

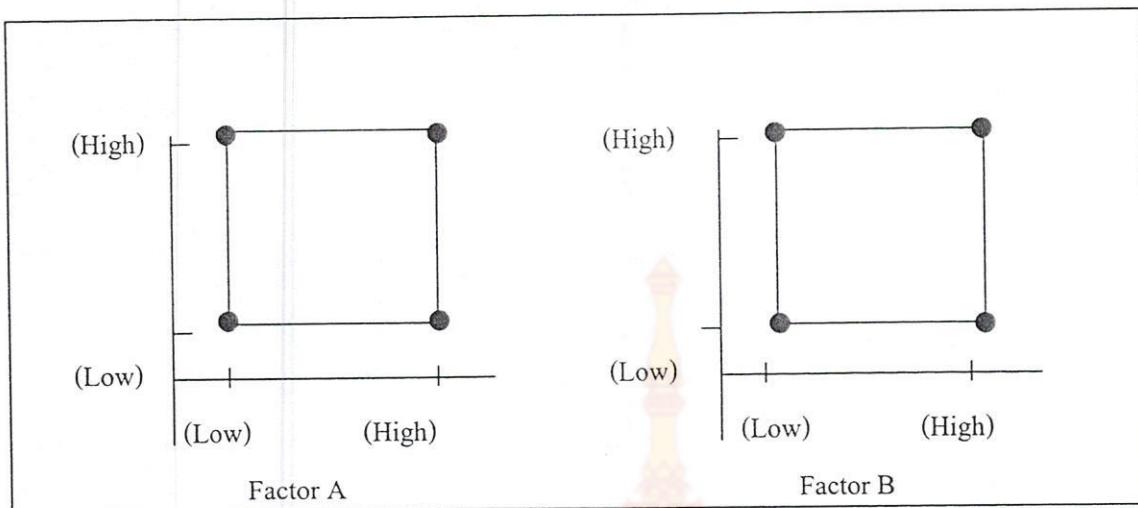
ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับ Fix Effect Model ตัวแปรเดียว

แหล่งความ ผันแปร	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Squares	F_0
ทรีตเมนต์	$SS_{\text{treatment}}$	$a - 1$	$MS_{\text{treatment}}$	$\frac{MS(\text{tr})}{MS(E)}$
รีพิกทะบิกิตี้	SS_E	$a(n - a)$	$MS(E)$	
รวม	SS_T	$an - 1$		

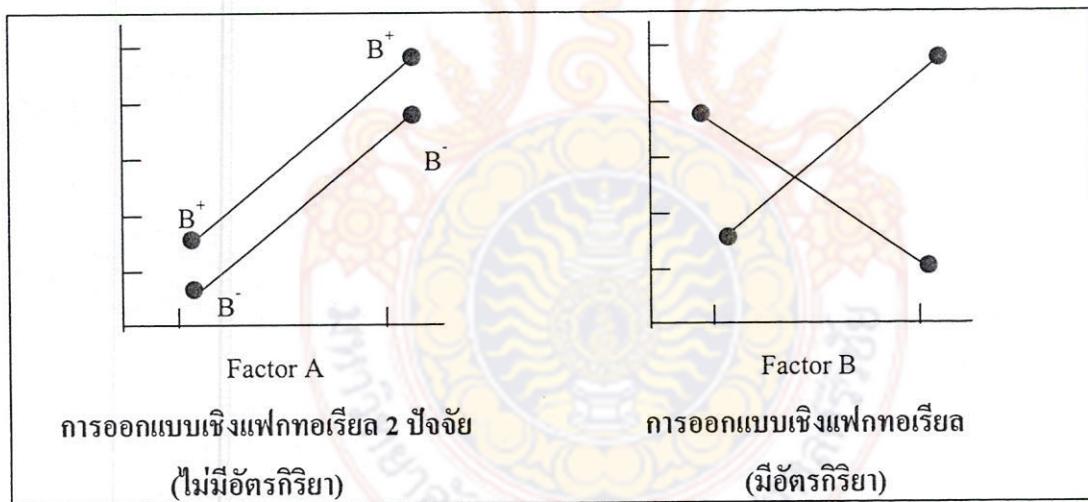
2.5.4 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกторเรียล (Factorial Design)

การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตัวเดียว 2 ปัจจัยขึ้นไป กรณี เช่นนี้ การออกแบบเชิงแฟกторเรียล เป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟกторเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น เช่น กรณี 2 ปัจจัย คือ ปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B มี b ระดับ ในการทดลอง 1 เรเพลคิด จะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด ab การทดลองและเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกторเรียล นั้นคือปัจจัยเหล่านั้นมีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ (Response) ที่เกิดจาก การเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก (Main Effect) เนื่องมาจากการว่ามันเกี่ยวข้อง กับปัจจัยเบื้องต้นของการทดลอง ในการทดลองบางอย่าง อาจจะพบว่าความแตกต่างของผลตอบที่เกิดขึ้นบนระดับต่างๆ ของปัจจัยหนึ่งมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่นๆ ทั้งหมดของปัจจัยอื่น ซึ่งหมายถึง ผลตอบของปัจจัยหนึ่งจะเกิดขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่น เรียกเหตุการณ์นี้ว่า การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ดังภาพที่ 2.11 และภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.11 การออกแบบเชิงแฟกторเรียล 2 ปัจจัย



ภาพที่ 2.12 การออกแบบเชิงแฟกторเรียล

2.5.4.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกตอร์เรียลแบบ 3 ปัจจัย เป็นการออกแบบการทดลองที่ประกอบด้วย 3 ปัจจัย คือปัจจัย A มี a ระดับ ปัจจัย B มี b ระดับและปัจจัย C มี c ระดับ ซึ่งมีจำนวนข้อมูลที่ได้จากการทดลองเท่ากับ $abc \dots n$ สำหรับแบบจำลองแบบตายตัว ตัวทดสอบเชิงสถิติที่ใช้ F – Test จำนวนขั้นความเรียบง่ายลดลงโดยมาก ไม่เท่ากับระดับของปัจจัยจำนวนระดับ

ลงค่าวัย 1 ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองการวิเคราะห์ความแปรปรวน 3 ปัจจัยได้ดังนี้ และแสดงการวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำลอง 3 ปัจจัย แบบจำกัดปัจจัย (Fixed Effect)

Source of Variation	Sum of Square	Degrees of Freedom	Mean Square	F_0
A	SS_A	$a - 1$	MS_A	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	$b - 1$	MS_B	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
C	SS_C	$c - 1$	MS_C	$F_0 = \frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	$(a - 1) - (b - 1)$	MS_{AB}	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	SS_{AC}	$(a - 1) - (c - 1)$	MS_{AC}	$F_0 = \frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	SS_{BC}	$(b - 1) - (c - 1)$	MS_{BC}	$F_0 = \frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SS_{ABC}	$(a - 1) - (b - 1) - (c - 1)$	MS_{ABC}	$F_0 = \frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Error	SS_E	$abc(n - 1)$	MS_E	
Total	SS_T	$abc(n - 1)$		

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

(2-10)

$\left. \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, c \\ l = 1, 2, \dots, n \end{array} \right\}$

การคำนวณค่าผลรวมทั้งหมดของกำลังสอง สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n Y_{ijkl}^2 - \frac{\bar{X}^2}{abcn} \quad (2-11)$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของผลหลักหาได้ดังนี้

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a Y_i^2 - \frac{\bar{X}^2}{abcn} \quad (2-12)$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b Y_{..j..}^2 - \frac{\bar{X}^2}{abcn} \quad (2-13)$$

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c Y_{...k..}^2 - \frac{\bar{X}^2}{abcn} \quad (2-14)$$

$$\begin{aligned} SS_{AB} &= \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b Y_{ij..}^2 - \frac{\bar{X}^2}{abcn} SS_A - SS_B \\ &= SS_{\text{Subtotals}(AB)} - SS_A - SS_B \end{aligned} \quad (2-15)$$

$$\begin{aligned} SS_{AB} &= \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b Y_{i..jk..}^2 - \frac{\bar{X}^2}{abcn} SS_A - SS_C \\ &= SS_{\text{Subtotals}(AC)} - SS_A - SS_C \end{aligned} \quad (2-16)$$

$$\begin{aligned} SS_{BC} &= \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c Y_{..jk..}^2 - \frac{\bar{X}^2}{abcn} SS_B - SS_C \\ &= SS_{\text{Subtotals}(BC)} - SS_B - SS_C \end{aligned} \quad (2-17)$$

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n Y_{ijkl}^2 - \frac{\bar{X}^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{BC} - SS_{AC}$$

$$= SS_{\text{Subtotals(ABC)}} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{BC} - SS_{AC} \quad (2-18)$$

แล้ว

$$SS_E = SST - SS_{\text{Subtotals(ABC)}} \quad (2-19)$$

2.5.4.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอรีลีบแบบ 2^k ใช้งานมากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งต้องการศึกษาถึงผลร่วมที่มีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบเชิงแฟกทอรีลีบมีความสำคัญที่สุดคือ กรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัยซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดันหรือเวลา หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักรหรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวมานั้น จะแทนระดับ สูง หรือ ต่ำ ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการมีหรือไม่มี ของปัจจัยนั้นๆ ได้ ใน 1 เรเพลิกต์ ที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times 2 \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล และเรียกว่าการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอรีลีบแบบ 2^k

2.5.4.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอรีลีบแบบ 2^3 เป็นการทดลองที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ซึ่งสามารถเขียนในรูปเมตริกซ์การออกแบบ (Design Matrix) ได้ดังตารางที่ 2.4 และวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 เมตริกซ์การออกแบบ (Design Matrix)

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

ค่าเฉลี่ยของผลของตัวแปรหลักสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$A = \frac{1}{4n} [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc] \quad (2-20)$$

$$B = \frac{1}{4n} [b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac] \quad (2-21)$$

$$C = \frac{1}{4n} [c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab] \quad (2-22)$$

$$AB = \frac{[abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)]}{4n} \quad (2-23)$$

$$AC = \frac{1}{4n} [(1) - a + b - ab - c + ac - bc - abc] \quad (2-24)$$

$$BC = \frac{1}{4n} [(1) + a - b - ab - c + ac + bc + abc] \quad (2-25)$$

$$ABC = \frac{1}{4n} [abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)] \quad (2-26)$$

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอรีลแบบ 2^k มีประโยชน์มากต่อการทดลองในช่วงแรก เมื่อปัจจัยเป็นจำนวนมากที่ต้องการจะตรวจสอบ การออกแบบนี้จะทำให้การทดลองมีจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้ เพื่อศึกษาผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์ โดยการใช้การออกแบบการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอรีล ดังนั้นจึงมีการนำการออกแบบการทดลอง เชิงแฟกทอรีลแบบ 2^k มาใช้กันอย่างกว้างขวาง เพื่อที่จะรองรับปัจจัยที่มีอยู่จำนวนมากให้เหลือน้อยลง นอกจากนี้แล้วการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอรีล ยังมีประโยชน์อีกหลายประการ ทั้งยังเป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพเนื่องจากว่าการทดลองที่ละปัจจัย ยังกว้างขึ้นแล้วการออกแบบเชิงแฟกทอรีล ยังเป็นสิ่งจำเป็นเมื่อมีอัตราริบิกเกิดขึ้น ซึ่งกรณีเช่นนี้ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ นอกจากนี้แล้วการออกแบบเชิงแฟกทอรีลทำให้เราสามารถประมวลผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยอื่นได้ทำให้สามารถที่จะสรุปผลได้สมเหตุสมผล (Valid) ตลอดเงื่อนไขของการทดลอง

ตารางที่ 2.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบ 2^k

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom
k main effect		
A	SS_A	1
B	SS_B	1
.	.	.
.	.	.
K	SS_K	1
$\left\{ \begin{matrix} k \\ 2 \end{matrix} \right\}$ Two - factor interactions		
AB	SS_{AB}	1
.	.	.
.	.	.
JK	SS_{JK}	1
.	.	.
$\left\{ \begin{matrix} k \\ 3 \end{matrix} \right\}$ Three - factor interactions		
ABC	SS_{ABC}	1
.	.	.
.	.	.
IJK	SS_{IJK}	1
.	.	.
.	.	.
$\left\{ \begin{matrix} k \\ k \end{matrix} \right\}$ = 1 k - factor interactions		
ABC...K	$SS_{ABC...K}$	1
Error	SS_E	$2^k (n-1)$
Total	SS_T	$n2^k - 1$

2.5.4.4 การวิเคราะห์ข้อมูล เป็นการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองมีความเหมาะสมเพียงใดนั้น คือ ในการทดลองจะเกิดความผิดพลาดทุกครั้ง การทดลองที่ดีคือ ต้องมีความผิดพลาด (e_{ih}) น้อยที่สุด วิธีการทดสอบว่าการทดลองที่มีความเหมาะสมคือ การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ (Model Adequacy Checking) การตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้น (Error) ที่เป็นไปตามหลัก $e_{ih} \sim NID(0, \sigma^2)$ ซึ่งทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและเชื่อถือได้หรือไม่

2.5.4.5 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล (Experimental Performing)

1) การตรวจสอบว่ามีการกระจายของแบบปกติหรือไม่ โดยใช้ Normal Probability Paper หรืออิติโตแกรมทดสอบโดยดูความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่อและค่าความถี่สะสมว่าเป็นแบบเด่นตรงหรือไม่ ถ้าเป็นแบบเด่นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ

2) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) โดยใช้แผนภูมิการกระจายทดสอบโดยดูความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่อ และค่าลำดับการสุ่มว่าสามารถคาดการณ์ได้หรือไม่ ถ้าทุกจุดของข้อมูลไม่สามารถคาดการณ์ได้ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

3) การตรวจสอบความสม่ำเสมอของการแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย ทดสอบโดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าของการปฏิบัติ (Treatment) และเศษเหลือ ว่ากราฟมีความสูงสม่ำเสมอหรือไม่ ถ้ากราฟของแต่ละการปฏิบัติมีความสูงไม่แตกต่างกันแสดงว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

2.5.4.6 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) เป็นการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ และแสดงผลว่าข้อมูลได้รับการเก็บรวบรวมภายใต้สภาวะควบคุมตามแผนการทดลองแล้ว จะทำการวิเคราะห์ค่า R^2 ทั้งหมดของข้อมูลในรูป SS_T ว่าเกิดจากความแปรปรวนจากทรีตเมนต์เท่าใด (SS_u) หาได้จากสมการที่ 2-27

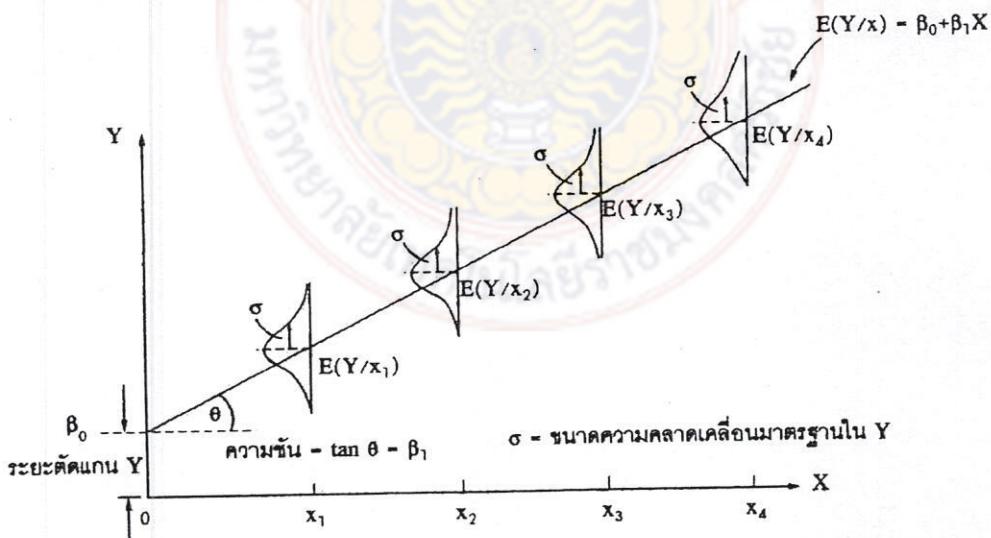
$$R^2 = \frac{\text{ความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้}}{\text{ความแปรปรวนทั้งหมดของข้อมูล}} \quad (2-27)$$

ซึ่งถ้าค่า R^2 ออกมาก็สามารถแก้ไขได้โดย

- 1) เพิ่มจำนวนการทำซ้ำโดยเพิ่มชั้นงานในการทดสอบให้มากขึ้น
- 2) ตรวจสอบว่ามีปัจจัยอื่นเกี่ยวข้องหรือไม่ ถ้ามีการออกแบบการทดลองใหม่
- 3) ถ้าเพิ่มจำนวนการทำซ้ำแล้ว ค่า R^2 ยังคงที่อยู่ ควรจะทำการบล็อกเพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

2.5.4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) หลักการ ANOVA เป็นการหาความแปรปรวนโดยรวม แล้วแยกความแปรปรวนเนื่องจาก ทรีตเมนต์และความแปรปรวนที่ไม่ได้รับการควบคุมซึ่งหมายถึง รีพิกท์ที่บล็อกด้วยพิจารณาเหตุผลความแปรปรวนเนื่องจากทรีตเมนต์ว่ามีบริมาณมากหรือไม่เทียบกับผลจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ระหว่างเงื่อนไขการทดลองหรือรีโปรดิวซิลิตี้ (Reproducibility)

2.5.4.8 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ในการตัดสินใจปัญหาทางวิศวกรรมนั้นมักต้องทำการตัดสินใจภายใต้ตัวแปรจำนวนอย่างน้อยสองตัวหรือมากกว่าที่มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งมีความจำเป็นต้องทำการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้ เพื่อการตัดสินใจที่ดีในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรจำนวนสองตัวนี้จะดำเนินการได้ง่ายที่สุดด้วย การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการทดสอบโดยอาศัยเครื่องหมายชี้ในการวิเคราะห์ดังกล่าวอยู่ภายใต้ข้อสมมุติว่า ตัวแปรทั้งสองที่ทำการศึกษานั้นเป็นตัวแปรอิสระเป็นตัวแปรทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถควบคุมได้และตัวแปรตามเป็นตัวแปรสุ่มแล้ว จะเรียกเทคนิคการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าว การวิเคราะห์การถดถอย โดยการวิเคราะห์การถดถอยหมายถึง กลไกที่ทางสถิติหนึ่งที่ใช้ในการวินิจฉัย และสร้างตัวแบบสำหรับความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ให้ความสนใจ ตัวแบบทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์การถดถอยนี้จะได้มาจากการกำหนดตัวแปรอิสระจำนวน k ตัว ซึ่งต้องเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ในโครงงานนี้คือความเร็วตัดและอัตราป้อน โดยเรียกตัวแปรนี้ว่าตัวแปรถดถอย (Regressor) หรือตัวนำ (Carrier) หรือตัวทำนาย (Predictor) และเมื่อทำการกำหนดค่าของตัวแปรถดถอยค่าหนึ่งๆ แล้วทำการศึกษาถึงค่าของตัวแปรตามที่มีลักษณะเป็นตัวแปรสุ่ม และเรียกตัวแปรประเภทนี้ว่าตัวแปรตอบสนอง (Response Variable)



ภาพที่ 2.13 โครงสร้างของเส้นถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่าย (ที่มา: กิตติศักดิ์ พลอยพาณิชเจริญ, 2546)

ข้อมูล (Independent Test) การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normality Test) และการทดสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูล (Variance Stability Test) ดังนั้นก่อนที่จะนำข้อมูลมาวิเคราะห์นั้นต้องทราบก่อนว่าข้อมูลนั้นเป็นข้อมูลที่มีคุณภาพหรือไม่ตามลักษณะสมบัติของข้อมูล

2.5.4.11 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent Test) เป็นการตรวจสอบข้อมูลที่เก็บมาなんเป็นอิสระต่อกันเนื่องจากความสุ่ม เพื่อให้ข้อมูลมีการกระจายรอบค่าที่ควรจะเป็นเท่าๆ กันเนื่องจากผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Balance Out) เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัตินี้ได้แก่ แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) หรือแผนภูมิควบคุม I (I Chart of residual) โดยแกน X คือลำดับการทดลองและแกน Y คือค่าเศษเหลือ (Residual) ถ้าข้อมูลที่เก็บมาไม่ถูกต้อง ความอิสระต่อกันนั้นค่าเศษเหลือที่นำมาใส่ลงในแผนภูมิการกระจายจะต้องกระจัดกระจายไว้บน หรือกรณีแผนภูมิควบคุม I คู่ว่าค่าเศษเหลือ ไม่มีแนวโน้มหรือออกนอกรีด (Outlier) ถ้าข้อมูลนี้รูปแบบ หรือออกนอกรีดแสดงว่าข้อมูลที่เก็บมาไม่ได้เก็บมาอย่างสุ่ม ทั้งนี้หากข้อมูลมีรูปแบบไม่สุ่มแล้วจะทำให้วิเคราะห์ข้อมูลไม่ได้ โดยเฉพาะการหาค่าเฉลี่ยหรือค่าคาดหมายของตัวแปรตอนสนอง ดังนั้นถ้าหากข้อมูลไม่สุ่มแล้ว แสดงว่าข้อมูลมีความลำเอียงจำเป็นต้องค้นหาสาเหตุเพื่อการแก้ไขก่อนการวิเคราะห์

2.5.4.12 การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล เป็นการตรวจสอบว่าข้อมูลแต่ละตัวที่เป็นตัวสุ่มจะต้องมีแนวโน้มเข้าหากันที่ที่ค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าที่ควรจะเป็นเนื่องจากสาเหตุของการเฉลี่ยออก (Average Out) ของสิ่งที่มิได้รับการควบคุม แล้วมีการกระจายรอบค่าดังกล่าวในลักษณะสมมาตร เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัตินี้ได้แก่ กระดาษทดสอบความเป็นปกติ (Normal Probability Plot, NOOP) โดยที่แกน X คือค่าเศษเหลือ และแกน Y คือค่าความเป็นปกติมาตรฐาน (Normal Score) ถ้าการแจกแจงของข้อมูลเป็นการแจกแจงแบบปกติจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ทั้งนี้ถ้าหากข้อมูลไม่ได้มีรูปแบบปกติแล้วก็จะทำผู้วิเคราะห์ข้อมูลไม่ได้ ดังนั้นถ้าหากข้อมูลไม่ได้เป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติแล้ว แสดงว่าข้อมูลได้มาจากการวนการที่มิได้กำหนดเป็นมาตรฐาน จึงจำเป็นต้องค้นหาสาเหตุเพื่อการแก้ไขก่อนการวิเคราะห์

2.5.4.13 การทดสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance Stability) เป็นการตรวจสอบว่าข้อมูลแต่ละทรีตเมนต์มีความผันแปรรอบค่าศูนย์หรือไม่ โดยข้อมูลจะต้องได้รับการเก็บมาจากกระบวนการที่ได้มีการจัดทำเป็นมาตรฐาน แล้วจึงทำให้ความแตกต่างของข้อมูลเกิดมาจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Chance Cause) ในระบบที่ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเท่านั้น เครื่องมือในการตรวจสอบคุณสมบัตินี้ได้แก่ แผนภูมิการกระจาย โดยแกน X คือ ผลต่างของค่าความเรียงผิว และแกน Y คือค่าเศษเหลือ ถ้าข้อมูลที่เก็บมาไม่เสถียรภาพของความแปรปรวนค่าเศษเหลือที่นำมาใส่ลงในแผนภูมิการกระจาย ต้องมีความยาวเท่าๆ กัน นอกจากนี้สามารถทดสอบ

ความเสถียรภาพของความแปรปรวน โดยพิจารณาจากความน่าจะเป็นเทียบเคียงกับค่าอัลฟ่า (α) ที่ระดับ 0.05 ซึ่งกรณีค่าความน่าจะเป็นมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของความแปรปรวน ดังนั้นถ้าหากข้อมูลมีความแปรปรวนที่ไม่เสถียรภาพแล้ว แสดงว่าข้อมูลเกิดจากสาเหตุที่สามารถควบคุมได้ แต่ไม่ได้รับการควบคุม (Assignable Cause) จึงมีความจำเป็นต้องกันหาสาเหตุเพื่อการแก้ไขก่อนการวิเคราะห์ต่อไป

2.5.4.14 การวิเคราะห์ผลการทดลอง (Experiment Analysis) หลังจากการทดสอบคุณสมบัติของข้อมูล และข้อมูลมีคุณสมบัติทั้ง 3 ประการเรียบร้อยแล้ว ก่อนนำข้อมูลวิเคราะห์ต่อ ตรวจสอบก่อนว่าข้อมูลที่เก็บมาภายใต้การออกแบบการทดลองมีความผิดพลาดมากน้อยเพียงใด โดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ถ้าหากสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูง แสดงว่าข้อมูลที่เก็บมาส่วนใหญ่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบสมการและสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์ต่อไปได้โดยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน แต่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจต่ำ แสดงว่าข้อมูลที่เก็บมาเนื่องจากการออกแบบนั้นมีสิ่งที่ไม่สามารถอธิบายได้จำนวนมาก จำเป็นต้องวิเคราะห์ถึงความรู้สึกในกันแห่งความผันแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ออกไป และพยายามหางจากที่ได้วิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน แล้วทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเรียบผิว เพื่อนำไปสร้างความสัมพันธ์ในเชิงคณิตศาสตร์ต่อไป

2.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการแปรรูปวัสดุด้วยเครื่องมือกลมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ซึ่งกระบวนการโดยส่วนใหญ่ก็จะเกี่ยวข้องกับการตัดเนื่องด้วยเครื่องมือตัดคุณภาพผิวชิ้นงานภายหลังการแปรรูปโดยปัจจัยที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น ความเร็วของ ความเร็วตัด และอัตราป้อนตัดของเครื่องมือตัด เป็นต้น จากการศึกษาและค้นคว้าพบว่ามีผู้ที่สนใจเกี่ยวกับการตัดเนื่องโดย ประเภท เป้าหมายก็คือคุณภาพงานที่เหมาะสม เช่น การหาเงื่อนไขหรือพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการตัด ปัจจัยต่อความชรุขระผิวกับขนาดที่ถูกต้อง รอยคมมีด โดยใช้มีดตัดชนิดต่างๆ และรูปทรงทางเรขาคณิตที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

2.6.1 เงื่อนไขที่เหมาะสมในการตัด (Optimum Cutting Conditions)

ในการตัดวัสดุความต้องการอย่างหนึ่งก็คือ เศษตัดที่เป็นไปอย่างต่อเนื่องเพื่อหลีกเลี่ยงการทำให้เกิดความร้อนและการเปลี่ยนรูปของวัสดุในขณะที่ทำการตัดเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่พึงพอใจ ให้มีการศึกษาเกี่ยวกับ มุมเงย (Rake Angle) ที่ให้ผลต่อเนื่องของเศษ และการเปลี่ยนรูปน้อยที่สุด การเลือกเงื่อนไขในการตัด เฉพาะที่สำคัญคือ ความหนาในการตัด และ อัตราป้อน

A. Kobayashi ได้อธิบาย นูมเบย (Rake Angle) ที่ให้แรงตัดตั้งฉาก (Normal Cutting) เท่ากับศูนย์ และหานูมเบยวิกฤติ โดยอ้างเหตุผลว่าเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ชิ้นงานมีขนาดถูกต้องที่สุด และมีค่าตัดสึกหรอน้อยที่สุด จากการพิจารณาพบว่าทิศทางของแรงตัด (Cutting Force) เกิดขึ้นพร้อมกับทิศทางของการตัด (Direction of Cutting) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปน้อยที่สุดของ การตัดที่พื้นผิว ดังนี้ A. Kobayashi ได้สรุปว่า ค่าวิกฤติของนูมเบย (Rake Angle) ควรจะกำหนดค ในการตัดพลาสติกแต่ละชนิด พร้อมกับเงื่อนไขในการตัด แต่ย่างไรก็ตามบันเป็นไปไม่ได้ที่จะ พยายกรณ์แรงตัดตั้งฉาก และค่าวิกฤติของนูมเบย (Rake Angle)

Okoshi and Kamogawa ได้ศึกษาเกี่ยวกับการตัดในลอนโดยใช้ ใบมีดเพชรและใบมีด การใบดี พบร่วมกับนูมเบย ไม่มีเศษติดที่ปลายมีด แต่สำหรับใบมีดcarbide มีเศษติดที่ปลายมีดและมี แนวโน้มว่าจะนำไปสู่ การเกิดความรุนแรงที่พื้นผิว นอกจากนี้ยังพบว่า ความรุนแรงลดลงเมื่อใช้มูม เบย (Rake Angle) ที่เป็นมูมลบ

R. J. Crawford ได้กล่าวถึงการเกิดความร้อนที่มากเกินปกติ ระหว่างการตัดว่าเกิดจาก (a) เกิดจากการคุดซับพลังงานระหว่างแตกหัก (Fracture) ของวัสดุ และส่งผลให้เกิดความร้อน (b) ความร้อนจากการเสียดสี (Frictional heat) เกิดขึ้นเมื่อมีดเสียดสีกับวัสดุ และสรุปว่าความร้อนต่อ หน่วยปริมาตร เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความลึกในการตัดลดลง และพบว่าถ้าความลึกในการตัดมี ขนาดใหญ่ จะเกิดปัญหาการแตกหักที่พื้นผิว (Surface cracks)

J. J. Bickerman ได้ให้ข้อสังเกตเกี่ยวกับทฤษฎีของแรงต้านที่เกิดจากการตัดแบบตั้งฉาก (Friction in Orthogonal Cutting) และพบว่ามีข้อสังเกตเกี่ยวกับทฤษฎีของแรงต้านที่เกิดจากการตัดแบบตั้งฉากโพลีเมอร์ (Polymer) โดยมากน่าจะเกิดจากกลไกมากกว่า และสรุปว่าสัมประสิทธิ์ การเสียดทานลดลง เมื่อแรงตัดตั้งฉากเพิ่มขึ้น

Sungkhapong, A. (2000) ได้ศึกษาทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานระหว่าง ใบมีดเซรามิกและใบมีด CBN ในกรณีที่มีดลีกหล่อโดยใช้ใบมีดเซรามิก 2 ชนิด คือ $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TIC}$ และ Si_3N_4 ที่ 18 สภาพการตัด ประกอบด้วยค่าความเร็วในการตัด 3 ระดับ อัตราการป้อนมีด 2 ระดับ และความลึกในการตัด 3 ระดับ พบว่าใบมีดเซรามิก Si_3N_4 และใบมีด CBN ให้ค่าความเร็ว ของพื้นผิวชิ้นงานใกล้เคียงกันแต่ใบมีดเซรามิก Si_3N_4 ให้ค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นงาน (Dimensional error) น้อยที่สุด ณ สภาพการตัดที่เหมาะสมค่าหนึ่ง

Vickerstaff and Ginby ได้ศึกษาการตัดโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate) โดยใช้ใบมีด ไฮสปีดสตีล (High Speed Steels : HSS.) ชิ้นงานมีความหนา 3.55 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องไส (Planning machine) โดยที่มีดได้ติดตั้ง Piezo-Electric Dynamometer มีเงื่อนไขการตัดคือ มูมเบย (Rake Angle) $-5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ ความเร็วตัด (Cutting Speed : m/min.) 9, 15, 23, 30, 36

ความหนาในการตัด (Cut Thickness : mm.) 0.13, 0.25, 0.30, 0.38 และสรุปไว้ว่า (a) แรงตัดลดลง เมื่อ มุมเบย (Rake angle) เพิ่มขึ้นจากลบไปบวก (b) ทิศทางของแรงตัดยังเปลี่ยนจากลงค่าเป็นขึ้น สูงเมื่อมุมเบย (Rake Angle) เพิ่มขึ้นจากลบไปบวก

2.6.2 รอยกมีด (Feed Mark)

ในอดีตมีความเข้าใจกันว่า พื้นผิวสำเร็จในการตัดวัสดุ คือพื้นผิวที่คมมีดฝ่ากรอยเอาไว้แต่ เมื่อไม่นานมานี้ มีความตระหนักว่าแนวคิดนี้อาจไม่ถูกต้อง แต่ยังมีอิทธิพลของตัวแปรอื่นๆ ที่อาจมี ความสำคัญและต้องนำมาพิจารณาด้วย ซึ่งปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อ ค่าความชรุยะที่เกิดขึ้นจริงได้มีผู้ เสนอไว้ดังนี้

E.J.A. Amarego ได้เสนอแนวคิดที่ว่า ค่าความชรุยะผิวที่วัดได้จริงจะเท่ากับค่าความ ชรุยะทางทฤษฎี ที่คำนวณจากการอยู่ในมีด คูณด้วยค่าการขยายส่วน (Amplifying Factor : A_m) และ เป็นที่เข้าใจกันทั่วๆ ไปว่า ค่าของ A_m จะใกล้เคียงกับ 1 หรือจะสูงกว่า 1 ไม่มากนัก เพราะค่า ความชรุยะทางทฤษฎี ที่คำนวณจากการอยู่ในมีด ควรจะใกล้เคียงกับค่าความชรุยะ ที่วัดได้จริงหรือ เกิดขึ้นจริงซึ่งแสดงรูปแบบสมการ ได้ดังนี้

$$R_a = R_{at} + R_{af} + R_{ac}$$

เมื่อ R_a = ค่าความชรุยะที่วัดได้

R_a = ค่าความชรุยะที่เกิดจากการอยู่ในมีด

R_{af} = ค่าความชรุยะที่เกิดจากการกระแทกของผิวชิ้นงาน

R_{ac} = ค่าความชรุยะที่เกิดจาก ปัจจัยอื่นๆ

ศุภโชค วิริยะโภคสุ ได้ทำการทดลองเพื่อตรวจสอบสมมุติฐานที่มีผู้เสนอไว้ว่า ความชรุยะ ของใบมีดเท่ากับความชรุยะที่เกิดขึ้นจริง โดยการกลึงชิ้นงานทองเหลือง ด้วยใบมีดcarbide พบว่า ค่าความชรุยะที่วัดได้จริง สูงกว่า ค่าความชรุยะที่คำนวณ จากรอยใบมีดอย่างมากและได้นำเสนอ รูปแบบสมการดังต่อไปนี้

$$R_a = R_{at} + R_{af} + R_{ac}$$

เมื่อ R_a = ค่าความชรุยะที่วัดได้

R_a = ค่าความชรุยะที่เกิดจากการอยู่ในมีด

R_{ac} = ค่าความชรุยะที่เกิดจากอิทธิพลตัวแปรอื่นๆ จากรอยใบมีด

มีความเข้าใจกันว่า R_{ac} เกี่ยวข้องกับการเกิดขึ้นของรอยนีกขาด บนผิวสำเร็จการที่เศษวัสดุ เข้าไปติดแน่น กับคมมีดทำให้มีดหัก ซึ่งจะครุณกับผิวชิ้นงาน ทำให้ผิวชิ้นงานนีกขาดเป็นหลุม มี เสี้ยนเล็กๆ เกาะติดตามผิว และยังเกี่ยวข้องกับการแก่งหรือสันสะเทือนของชิ้นงานและใบมีด เป็นต้น



บทที่ 3

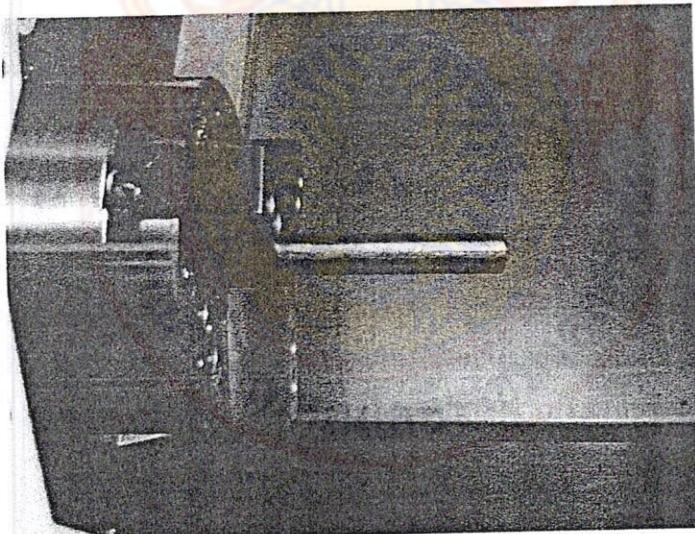
วิธีการดำเนินงาน

การวิจัยครั้งนี้ เป็นการวิจัยเชิงทดลอง เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการกลึงเหล็ก เครื่องมือ SKD11 ด้วยใบมีดคาร์บไบด์ โดยใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์ในการทดลองของสาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ซึ่งในลำดับ ของการทดลองขั้นตอนต่าง ๆ จำเป็นต้องมีการทดสอบความมีคุณรูปของข้อมูล ความปกติของข้อมูล ความเป็นอิสระของข้อมูล และการเปรียบเทียบความแปรปรวนของข้อมูล

ดังนั้นเพื่อความน่าเชื่อถือของข้อมูลทุกขั้นตอน สามารถแสดงวิธีออกแบบการวิเคราะห์ได้ ตามลำดับต่อไปนี้ สำหรับวัสดุชิ้นงานและวัสดุคอมพิวเตอร์ที่มีข่ายในห้องทดลองและสอดคล้องกับ วัตถุประสงค์ของการทดลอง โดยมีอุปกรณ์และขั้นตอนการทดลองดังนี้

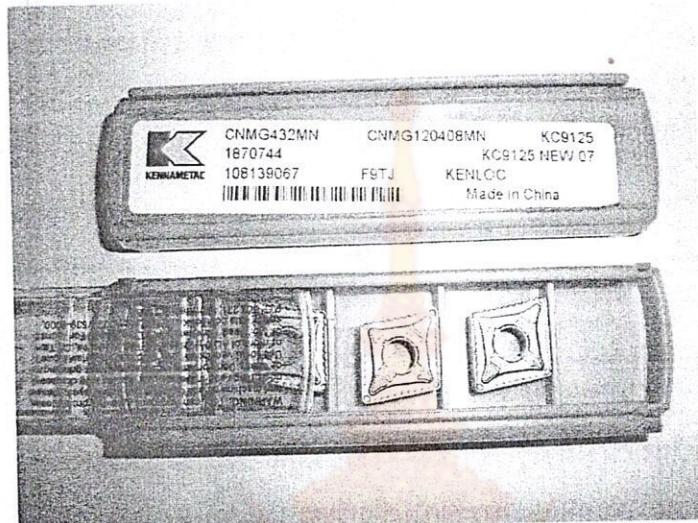
3.1 วัสดุชิ้นงานและใบมีดตัด

3.1.1 ชิ้นงานเป็นเหล็กสำหรับทำแม่พิมพ์ SKD 11 ขนาด Ø25 มิลลิเมตร ยาวท่อนละ 200 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ชิ้นงานเหล็ก SKD 11

3.1.2 ใบมีดตัดในการทดลองครั้งนี้มีค่ารีไซเคิลคือ Kennametal แบบ CNMG432MN เกรด KC9125



ภาพที่ 3.2 ใบมีดตัดยึดหัว ยึดหัว Kennametal แบบ CNMG432MN เกรด KC9125

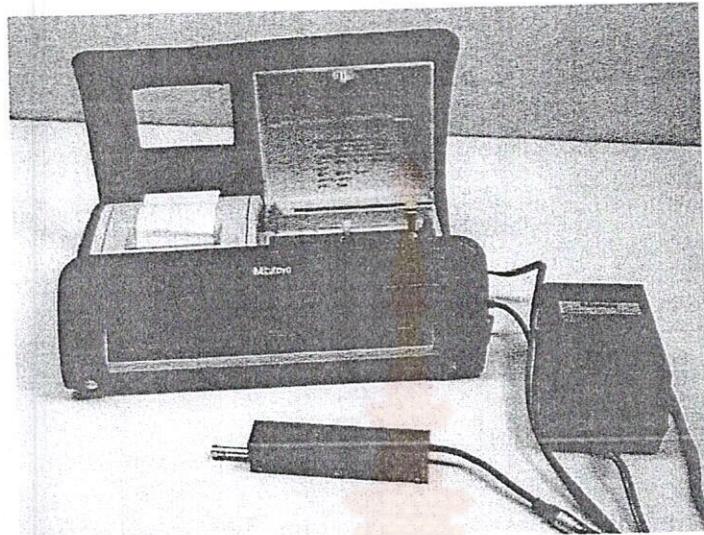
3.2 เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องกลึงควนคุณค่าวิบัติระบบคอมพิวเตอร์ ยึดหัว Haas



ภาพที่ 3.3 เครื่องกลึง CNC ยึดหัว Haas

3.2.2 เครื่องวัดความขรุขระผิว ยี่ห้อ มิตตูโตโยรุ่น เชิฟเทส 301 (Mitutoyo Surf test. 301)



ภาพที่ 3.4 เครื่องวัดความขรุขระผิว ยี่ห้อ มิตตูโตโยรุ่น เชิฟเทส 301

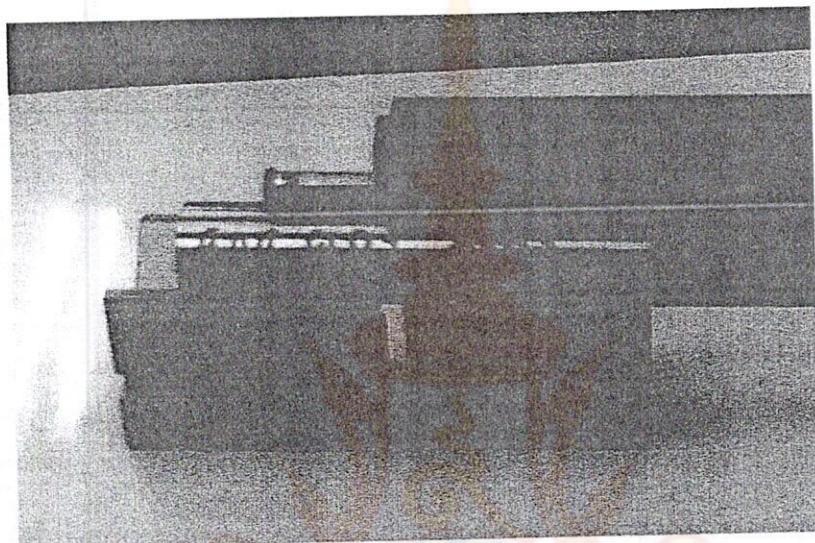
3.2.3 เวอร์เนียร์คัลิปเปอร์



ภาพที่ 3.5 เวอร์เนียร์คัลิปเปอร์

3.3 การออกแบบวิธีการวัด (Design of Measurement Method)

ในการทดลองนี้จะทำการกลึงปอกชิ้นงาน เป็นระยะทาง 130 มิลลิเมตร โดยจับชิ้นงานออกมาราบหัวจับ 140 มิลลิเมตร จากนั้นการวัดค่าความขรุขระผิว จะวัดด้วยเครื่องวัดความขรุขระ มิตตูโตโยรุ่น เชฟเทส 301 โดยในแต่ละค่าของสภาพการกัดจะวัดสามครั้งเพื่อที่จะหาค่าเฉลี่ยโดยใช้ค่า $R_a =$ ค่าเฉลี่ยทางเลขคณิต (Arithmetic Average) เพราะเป็นค่าที่ใช้กันกว้างขวางในงานอุตสาหกรรม



ภาพที่ 3.6 วิธีการวัดค่าความขรุขระผิว

3.4 วิธีการทดลอง

ในการศึกษาเพื่อหาสภาพที่เหมาะสมในการกลึงเหล็กเครื่องมือ SKD11 เพื่อผลิตเป็นชิ้นส่วนแม่พิมพ์ ผู้ทดลองได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรกจะทำการหาขนาดสิ่งตัวอย่าง จำนวนครั้งในการทดลองแต่ละระดับ ขั้นตอนที่สองเป็นการทดลองหาสภาพที่เหมาะสมของสิ่งตัวอย่าง จำนวนครั้งในการทดลองแต่ละระดับ ขั้นตอนที่สามเป็นการทดลองเพื่อหาค่าความขรุขระผิวและความยาวที่เหมาะสมในการกลึงโดยไม่ใช้ยันสูญญากาศ ท้ายที่สุดที่ยังคงเป็นการทดลองเพื่อยืนยันผล

3.4.1 การทดลองตอนที่ 1 เพื่อหาขนาดสิ่งตัวอย่าง

การทดลองเพื่อหาขนาดสิ่งตัวอย่างในการออกแบบการทดลองนี้จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ มินิแทป รุ่น 15 (Minitab Release 15) อาศัยหลักการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) เนื่องจากพารามิเตอร์ α, β, D, σ จะเป็นค่าที่กำหนดค่าແเนื่องอนไม่ได้เพียงแต่จะประมาณการเท่านั้น ประกอบกับในงานวิศวกรรม ขนาดของสิ่งตัวอย่างจะได้รับการกำหนดอยู่แล้วภายใต้ข้อจำกัดทางวิศวกรรม โดยให้ป้อนค่าที่ทำการเก็บจากการทดลอง โดยที่มีปัจจัยเดียวกันตลอดการ



ทดลอง และให้ป้อนข้อมูลขนาดตัวอย่าง (n) ในช่วงที่สามารถทำการทดลองได้ เพื่อพิจารณาถึงความไวของขนาดสิ่งตัวอย่างที่มีต่อค่ากำลังการทดสอบภายใต้ขนาดความแตกต่างสูงสุด (D) โดยค่าความแตกต่างพิจารณาจากความชรุขยะผิวงานซึ่งค่าความชรุขยะผิว (R_a) ถือว่าความแตกต่างที่ทำให้เกิดการปฏิเสธสมมติฐาน โดยค่าทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลคือ ค่าระดับความเชื่อมั่น 95 % หรือที่ระดับนัยสำคัญ 5 % ($\alpha = 0.05$) โดยค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) เท่ากับ 0.178 μm . ซึ่งได้จากการคำนวนความเบี่ยงเบนมาตรฐานจากสมการที่ 3.1 โดยการเก็บข้อมูลจาก ความเร็วตัด 180 เมตร/นาที อัตราป้อน 0.4 รอบ/นาที ความลึก 1 มิลลิเมตร ทดลองช้าสภาวะในครั้ง 12 ครั้ง สามารถหาค่าเฉลี่ยของความชรุขยะผิว $\bar{X} = 3.26 \mu\text{m}$. แล้วนำไปคำนวนหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังสมการที่ 3.1 สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 3.1

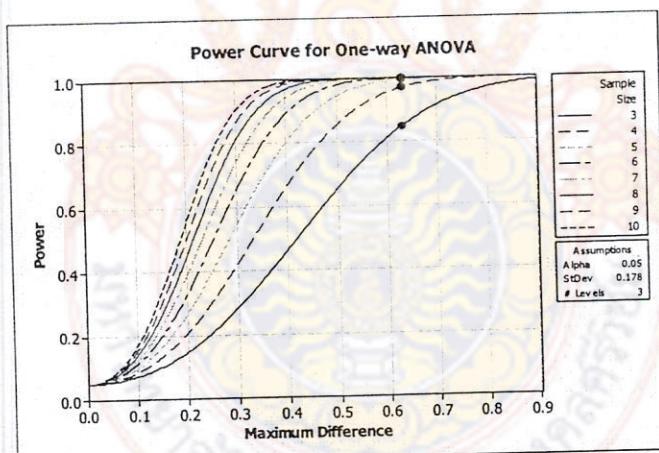
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3.1 การทดลองในการหาขนาดสิ่งตัวอย่าง

No.	Cutting Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	R_a
1	180	0.4	1	3.29
2	180	0.4	1	3.47
3	180	0.4	1	3.38
4	180	0.4	1	3.23
5	180	0.4	1	3.40
6	180	0.4	1	3.33
7	180	0.4	1	3.32
8	180	0.4	1	3.36
9	180	0.4	1	3.00
10	180	0.4	1	3.34
11	180	0.4	1	2.84
12	180	0.4	1	3.24

ตารางที่ 3.2 การหาขนาดสิ่งตัวอย่าง

Power and Sample Size		
One-way ANOVA		
Alpha = 0.05 Assumed standard deviation = 0.178 Number of Levels = 3		
SS Means	Sample Size	Power
0.63	3	0.84752
0.63	4	0.96958
0.63	5	0.99496
0.63	6	0.99926
0.63	7	0.9999
0.63	8	0.99999
0.63	9	1
0.63	10	1



ภาพที่ 3.7 การหาขนาดสิ่งตัวอย่าง

จากตารางที่ 3.2 และภาพที่ 3.7 ผลการหาขนาดสิ่งตัวอย่าง จะเห็นได้ว่าขนาดสิ่งตัวอย่างเท่ากับ 4-10 ตัวอย่าง จะไม่มีความไวต่อกำลังการทดสอบ ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดสิ่งตัวอย่าง 4 ตัวอย่างในการทดสอบ

3.4.2 การทดลองต่อนที่ 2 การทดลอง เพื่อทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระของผิวเหล็กเครื่องมือ SKD11

การทดลองครั้งนี้เป็นการทดลองเบื้องต้น โดยใช้สถิติในการวิเคราะห์ผลการทดลอง และใช้หลักการวิเคราะห์ข้อมูลแบบแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ทดลองชั้น 4 ครั้งและวัดชั้น 3 ครั้ง เพื่อลดความแปรปรวนของตัวอย่าง และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ มินิแทป รุ่น 16 ช่วยในการคำนวณค่าทางสถิติ โดยค่าทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลคือ อัตราความเปลี่ยนแปลง (F-Ratio) และค่าระดับความเชื่อมั่น 95% หรือที่ระดับนัยสำคัญ 5% ($\alpha = 0.05$) กำหนดปัจจัยในการทดลอง 3 ปัจจัย คือ ความเร็วตัด (Cutting speed) อัตราป้อน (Feed) และความลึกในการตัด (Depth of cut) โดยกำหนดปัจจัยในการทดลองปัจจัยละ 3 ระดับ คั่งตารางที่ 3.3 ซึ่งในการกำหนดระดับแต่ละปัจจัยจะอ้างอิงจากข้อมูลของเม็ดที่นำมาถึง สำหรับผลตอบสนองเป็นค่าความขรุขระผิวเหล็กเครื่องมือ SKD11 และความยาวสูงสุดในการกลึงโดยไม่ใช้ยันศูนย์ท้ายเท่น

ตารางที่ 3.3 การกำหนดค่าตัวแปรสำหรับการทดลองเบื้องต้น

Factor	Low	Medium	Height
Cutting Speed (m/min)	135	180	225
Feed (mm/rev)	0.2	0.4	0.6
Depth of cut (mm)	0.5	1.5	2.5

ตารางที่ 3.4 การทดลองต่อนที่ 2

No.	Cutting Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)	R_a				Length
				1	2	3	(Ave)	
1	225	0.6	0.5					
2	180	0.4	1.5					
3	225	0.4	0.5					
4	225	0.2	0.5					
5	180	0.4	2.5					
6	225	0.2	1.5					
7	180	0.6	0.5					
8	225	0.6	0.5					

ตารางที่ 3.4 (ต่อ) การทดลองตอนที่ 2

No.	Cutting Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)	R_a				Length
				1	2	3	(Ave)	
9	180	0.6	0.5					
10	135	0.6	1.5					
11	180	0.6	0.5					
12	180	0.2	2.5					
13	135	0.4	1.5					
14	180	0.6	2.5					
15	135	0.6	0.5					
16	225	0.2	0.5					
17	180	0.2	0.5					
18	180	0.4	0.5					
19	225	0.4	0.5					
20	180	0.6	0.5					
21	180	0.6	1.5					
22	180	0.4	0.5					
23	225	0.4	1.5					
24	225	0.6	0.5					
25	225	0.2	1.5					
26	225	0.6	1.5					
27	225	0.4	1.5					
28	180	0.6	1.5					
29	180	0.2	0.5					
30	135	0.6	0.5					
31	225	0.2	0.5					
32	225	0.4	0.5					

ตารางที่ 3.4 (ต่อ) การทดสอบต่อนที่ 2

No.	Cutting Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)	R_a				Length
				1	2	3	(Ave)	
33	225	0.4	0.5					
34	225	0.6	2.5					
35	135	0.4	1.5					
36	225	0.2	1.5					
37	135	0.6	2.5					
38	135	0.4	2.5					
39	135	0.6	1.5					
40	225	0.4	2.5					
41	225	0.6	1.5					
42	135	0.4	2.5					
43	135	0.4	2.5					
44	135	0.2	0.5					
45	225	0.6	1.5					
46	135	0.6	0.5					
47	180	0.2	2.5					
48	225	0.6	0.5					
49	225	0.4	1.5					
50	180	0.2	0.5					
51	135	0.6	2.5					
52	225	0.4	1.5					
53	180	0.6	1.5					
54	180	0.2	1.5					
55	135	0.4	0.5					
56	180	0.2	0.5					

ตารางที่ 3.4 (ต่อ) การทดลองต่อนที่ 2

No.	Cutting Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)	R_a				Length
				1	2	3	(Ave)	
57	225	0.2	1.5					
58	225	0.2	0.5					
59	180	0.4	2.5					
60	180	0.2	1.5					
61	135	0.6	2.5					
62	225	0.4	2.5					
63	135	0.4	1.5					
64	180	0.4	1.5					
65	135	0.6	2.5					
66	180	0.4	2.5					
67	225	0.4	2.5					
68	180	0.2	1.5					
69	135	0.2	1.5					
70	180	0.6	2.5					
71	135	0.4	0.5					
72	135	0.2	1.5					
73	180	0.6	2.5					
74	135	0.2	1.5					
75	180	0.6	2.5					
76	225	0.6	2.5					
77	135	0.4	0.5					
78	180	0.6	1.5					
79	135	0.4	1.5					
80	180	0.4	2.5					

ตารางที่ 3.4 (ต่อ) การทดสอบต่อนที่ 2

No.	Cutting Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)	R_a				Length
				1	2	3	(Ave)	
81	180	0.2	2.5					
82	225	0.6	0.5					
83	135	0.2	0.5					
84	225	0.6	1.5					
85	180	0.2	2.5					
86	225	0.4	2.5					
87	135	0.4	0.5					
88	135	0.2	2.5					
89	180	0.4	0.5					
90	135	0.2	2.5					
91	180	0.4	0.5					
92	225	0.6	2.5					
93	135	0.2	0.5					
94	135	0.6	0.5					
95	180	0.4	1.5					
96	135	0.2	0.5					
97	180	0.2	1.5					
98	225	0.2	2.5					
99	135	0.2	2.5					
100	135	0.4	2.5					
101	180	0.4	1.5					
102	225	0.2	2.5					
103	225	0.2	2.5					
104	225	0.2	2.5					

ตารางที่ 3.4 (ต่อ) การทดลองต่อนที่ 2

No.	Cutting Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)	R_a				Length
				1	2	3	(Ave)	
105	135	0.2	1.5					
106	135	0.6	1.5					
107	225	0.6	2.5					
108	135	0.6	1.5					

3.4.4 การทดลองต่อนที่ 3 การทดลองเพื่อยืนยันผล

ขั้นตอนนี้เป็นการทดลองเพื่อยืนยันว่า ผลการทดลองให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกัน โดยเป็นการนำสมการเชิงเส้นจากสมการการทดลองต่อนที่ 2 แล้วนำมาพยากรณ์สภาวะการกลึงที่เกิดจากการสูมเลือก เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองดังตารางที่ 3.5 การออกแบบการทดลอง ได้ทำการสูมสภาวะการตัดที่อยู่ในขอบเขตของสมการเชิงเส้นตรงสามารถพยากรณ์ได้ โดยการสูมเลือก 6 สภาวะการตัด กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ไม่เกิน 10 %

ตารางที่ 3.5 การทดลองเพื่อการยืนยันผล R_a

No.	Cutting Speed	Feed	Depth	R_a Cal.	R_a	Error (R_a Cal. - R_a)
1.	180	0.2	1			
2.	225	0.3	1			
3.	200	0.4	1			
4.	170	0.2	1			
5.	150	0.5	1			
6.	160	0.2	1			

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

สำหรับการวิเคราะห์การทดลอง หลังจากการออกแบบการทดลองเสร็จแล้ว ได้นำข้อมูล การทดลองมาวิเคราะห์ตามกระบวนการที่ได้ออกแบบไว้ชี้ในแต่ละขั้นตอน ได้วิเคราะห์แตกต่าง กันออกไปตามความเหมาะสมทางสถิติ เพื่อความน่าเชื่อถือของข้อมูล ได้นำเทคนิค และตาราง มาตรฐานการวิเคราะห์ที่กล่าวไว้ในภาคผนวก ก. มาใช้ดังนั้นสามารถวิเคราะห์การทดลองได้ ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองที่ 1 การทดลองเพื่อหาขนาดสิ่งตัวอย่าง

ผลการทดลองเพื่อหาขนาดสิ่งตัวอย่าง โดยค่าสถิติที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลคือ ที่ระดับ ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และระดับนัยสำคัญ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยการเก็บข้อมูลจาก ความเร็วตัด 180 เมตร/นาที อัตราป้อน 0.4 มิลลิเมตร/รอบ ความลึก 1 มิลลิเมตร ทดลองซ้ำในสภาพการกัด 12 ครั้ง แสดงผลการทดลองได้ดังตารางที่ 3.1 ซึ่งนำมาหาค่าเฉลี่ยของความชรุขยะท่ากับ 3.26 แล้ว นำค่าไปคำนวณหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังสมการที่ 3.1 ได้เท่ากับ 0.178 จากนั้นนำมา จำนวนครั้งในการทดลองแต่ละระดับโดยใช้โปรแกรม มินิแทป รุ่น 16 ผลการทดลองพบว่าควร เลือกใช้ขนาดสิ่งตัวอย่างเท่ากับ 4 ตัวอย่าง

4.2 ผลและการวิเคราะห์การทดลองที่ 2 การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมความชรุขยะและ ความยาวที่เหมาะสมในการกัดโดยไม้ขันศูนย์ท้ายแท่น

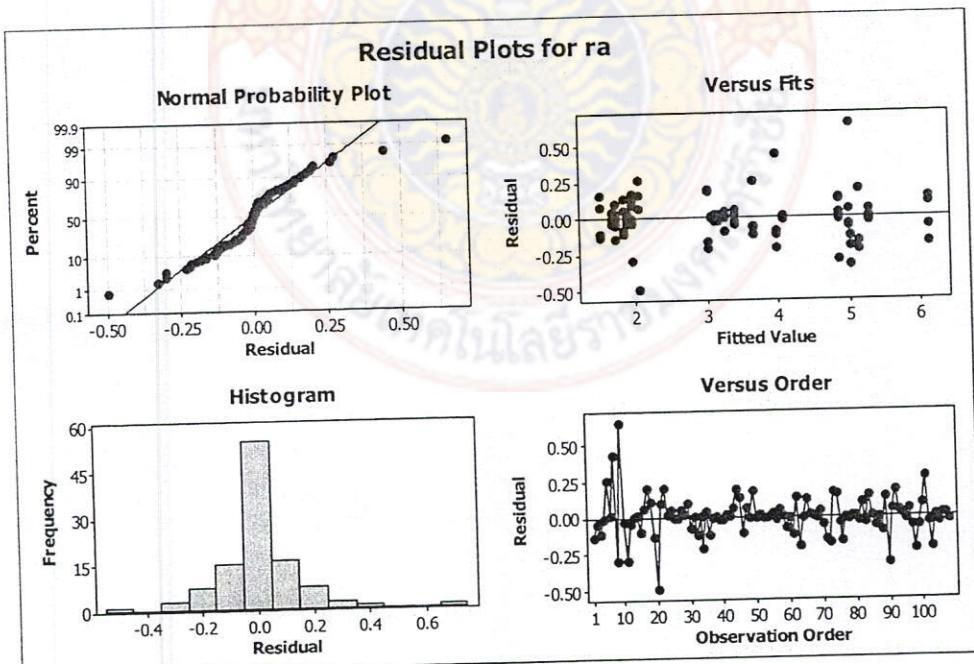
ใช้สถิติวิธีการออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomize Block Factorial Design) ใน การวิเคราะห์ผลการทดลอง และใช้หลักการวิเคราะห์ข้อมูลแบบแผนการ ทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ทดลองซ้ำ 4 ครั้ง และวัดซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อลดความแปรปรวนของตัวอย่าง ศึกษาปัจจัยที่คาดว่ามีผลต่อความชรุขยะ และใช้โปรแกรม มินิแทป รุ่น 16 ช่วยในการคำนวณค่า ทางสถิติ โดยค่าสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลคือ อัตราความเปลี่ยนแปลง (F-Ratio) และที่ระดับ ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และที่ระดับนัยสำคัญ 5 เปอร์เซ็นต์ ($\alpha = 0.05$) กำหนดปัจจัย 3 ปัจจัย ประกอบด้วย ความเร็วตัด (Cutting speed) อัตราป้อน (Feed) และความลึกในการตัด (Depth of cut) ผลตอบสนองเป็นความชรุขยะ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การกำหนดค่าตัวแปรสำหรับการทดลองเบื้องต้น

Factor	Low	Medium	Height
Cutting Speed (m/min)	135	180	225
Feed (mm/rev)	0.2	0.4	0.6
Depth of cut (mm)	0.5	1.5	2.5

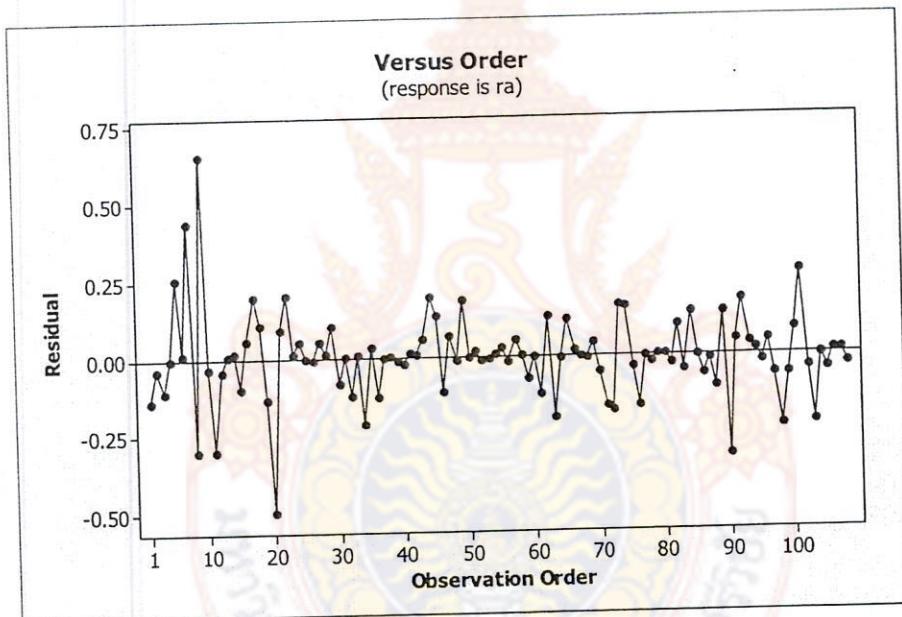
4.2.1 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล

เมื่อดำเนินการทดลองตามที่ออกแบบไว้ ก็จะได้ค่าความชุกระพิภัติที่จะนำข้อมูลไปวิเคราะห์ ต้องตรวจสอบก่อนว่าข้อมูลที่เก็บมานี้เป็นข้อมูลที่มีคุณภาพหรือไม่ โดยมีความจำเป็นต้องพิสูจน์คุณสมบัติของข้อมูล 3 ประการด้วยกัน คือ การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent Test) การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normality Test) และการทดสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูล (Variance Stability Test) ดังนั้นก่อนที่จะนำข้อมูลมาวิเคราะห์นั้นต้องทราบก่อนว่าข้อมูลนั้นมีคุณภาพหรือไม่ตามลักษณะสมบัติของข้อมูล



ภาพที่ 4.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลของความชุกระพิว

1) การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบข้อมูลที่เก็บมานั้นเป็นอิสระต่อกันเนื่องจากการสุ่ม เพื่อให้ข้อมูลมีการกระจายรอบค่าที่ควรจะเป็นเท่า ๆ กันเนื่องจากผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ เครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบคุณสมบัตินี้ได้แก่ แผนภูมิกระจาบ (Residuals Versus the Fitted Values) โดยแกน X คือลำดับการทดลอง และแกน Y คือค่าเศษเหลือ ถ้าข้อมูลที่เก็บมา มีความเป็นอิสระต่อกันนั้น ค่าเศษเหลือที่นำมาใส่ลงในแผนภูมิกระจาบท้องจะจัดเรียงไว้รูปแบบไม่มีแนวโน้มหรือออกนอกพิกัด (Outlier) และจะว่าข้อมูลที่เก็บมาไม่ได้เก็บมาอย่างสุ่ม ทั้งนี้หากข้อมูลมีรูปแบบไม่สุ่มแล้วจะทำให้วิเคราะห์ข้อมูลไม่ได้ โดยเฉพาะการหาค่าเฉลี่ย หรือค่าคาดหมายของตัวแปรตอบสนอง ดังนั้นหากข้อมูลไม่สุ่มแล้ว จะแสดงว่าข้อมูลมีความล้ำเอียงจำเป็นต้องค้นหาสาเหตุเพื่อการแก้ไขก่อนการวิเคราะห์

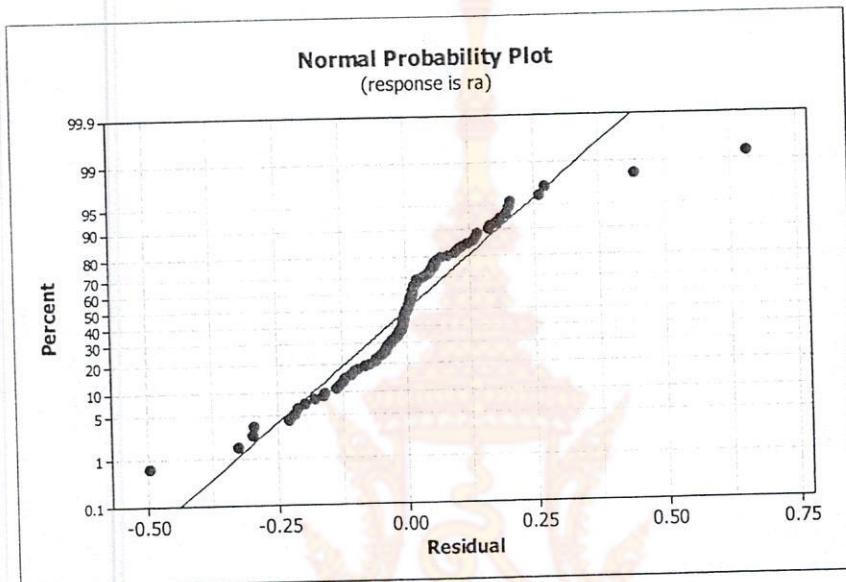


ภาพที่ 4.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความชุ่มชื้น

จากภาพที่ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นถึงการทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล จะเห็นได้ว่า มีการกระจายข้อมูลอย่างไว้รูปแบบ ดังนั้นสรุปได้ว่าไม่มีความเป็นอิสระของข้อมูล นั้นคือข้อมูลเก็บมาอย่างสุ่ม

2) การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล เป็นการตรวจสอบว่าข้อมูลแต่ละตัวที่เป็นตัวสุ่มจะต้องมีแนวโน้มเข้าหากันที่ค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าที่ควรจะเป็นเนื่องจากสาเหตุของการเจลี่ย ออกของสิ่งที่ไม่ได้รับการควบคุม แล้วมีการกระจายรอบค่าดังกล่าวในลักษณะสมมาตร เครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบคุณสมบัตินี้ได้แก่ กระดาษทดสอบความเป็นปกติ โดยที่แกน X คือค่า เศษเหลือ และ

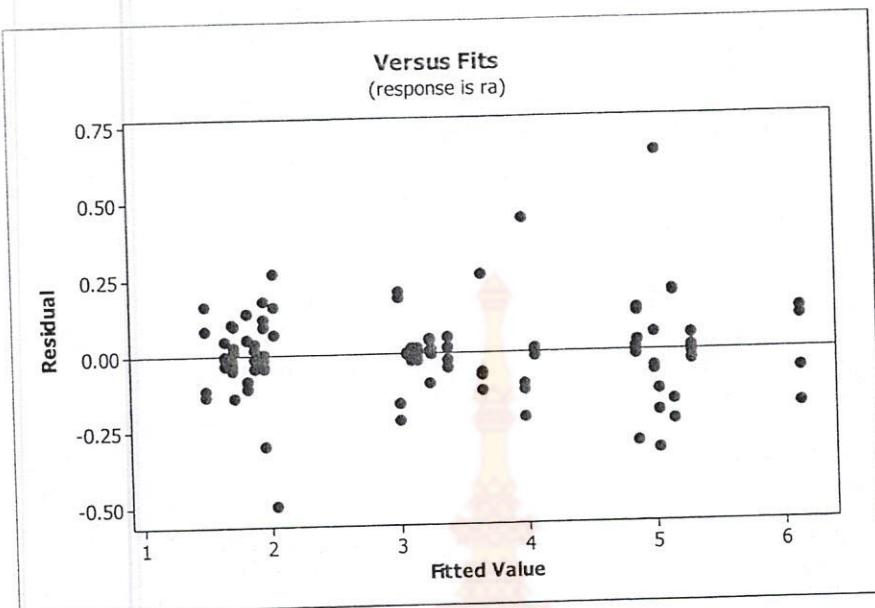
แกน Y คือค่าความเป็นปกติมาตรฐาน ถ้าการแจกแจงของข้อมูลเป็นการแจกแจงแบบปกติกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ทั้งนี้ถ้าหากข้อมูลไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลไม่ได้ ดังนั้นถ้าหากข้อมูลเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ แสดงว่าข้อมูลได้มาจากการบวนการที่ไม่ได้กำหนดเป็นมาตรฐาน จึงจำเป็นต้องค้นหาสาเหตุเพื่อการแก้ไขก่อนการวิเคราะห์



ภาพที่ 4.3 การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลความชรุขระผิว

จากภาพที่ 4.3 รูปที่ได้มีลักษณะเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นปกติของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

- 3) การทดสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน เป็นการตรวจสอบว่าข้อมูลแต่ละทรีตเมนต์มีความผันแปรรอบค่าศูนย์หรือไม่โดยข้อมูลจะต้องได้รับการเก็บมาจากการบวนการที่ได้จัดทำเป็นมาตรฐาน แล้วจึงทำให้ความแตกต่างของข้อมูลเกิดมาจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ในระบบที่ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเท่านั้น เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัตินี้ได้แก่แผนภูมิการกระจาย ดังแสดงในภาพที่ 4.4 โดยแกน X คือผลต่างของความชรุขระผิว และแกน Y คือค่าเศษเหลือถ้าข้อมูลที่เก็บมา มีเสถียรภาพของความแปรปรวนค่าเศษเหลือที่ใส่ลงในแผนภูมิกระจายต้องมีความยาวเท่ากัน



ภาพที่ 4.4 การทดสอบความเสถียรภาพของข้อมูลความชรุขยะพิว

จากภาพที่ 4.4 โดยแกน X คือผลค่าของค่าความชรุขยะพิว และแกน Y คือค่าเศษเหลือ ถ้าข้อมูลที่เก็บมา มีเสถียรภาพของความแปรปรวนค่าเศษเหลือที่นำมาใส่ลงในแผนภูมิจะต้องมีความยาวเท่า ๆ กันดังนั้น ข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวนตามที่ได้ออกแบบไว้

จากการประเมินคุณสมบัติทั้ง 3 ประการของข้อมูล การทดสอบหาค่าความชรุขยะพิว สามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีคุณสมบัติทั้ง 3 ประการ คือ มีความเป็นอิสระของข้อมูล มีความเป็นปกติ ของข้อมูล และมีความเสถียรภาพของข้อมูล

4.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง (Experiment Analysis)

หลังจากตรวจสอบคุณสมบัติของข้อมูล และข้อมูลมีคุณสมบัติทั้ง 3 ประการเรียบร้อยแล้ว ก่อนนำข้อมูลมาวิเคราะห์ต้องทำการตรวจสอบก่อนว่า ข้อมูลที่เก็บมากายให้การออกแบบการทดลองมีความผิดพลาดมากน้อยเพียงใด โดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การตัดสินใจถ้าหาก สัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูง แสดงว่า ข้อมูลส่วนใหญ่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบสมการ และสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์ต่อไปได้ โดยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแต่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ ต่ำ แสดงว่า ข้อมูลที่เก็บมาเนื่องจากการออกแบบนั้นมีสิ่งที่ไม่สามารถอธิบายได้จำนวนมาก จำเป็นต้องวิเคราะห์ถึงความรู้ในเชิงวิศวกรรมใหม่ และจะต้องออกแบบการทดลองใหม่โดยการ เพิ่มบล็อก (Blocking) โดยกันเหล่งความแปรปรวนที่ไม่สามารถควบคุมได้ออกไป และภายหลัง

จากที่ได้วิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน แล้วทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าความชรุขระผิว เพื่อนำไปสู่การสร้างความสัมพันธ์ในเชิงคณิตศาสตร์ต่อไป

$$R^2 = \frac{\text{ความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบทดสอบ}}{\text{ความแปรปรวนของข้อมูลทั้งหมด}} \quad (4.1)$$

$$R^2 = \frac{SS_{\text{อธิบาย}}}{SS_{\text{ทั้งหมด}}} = 1 - \frac{SS_{\text{คงเหลือ}}}{SS_{\text{ทั้งหมด}}} \quad (4.2)$$

แต่เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการตีความหมาย R-Square จึงต้องใช้สถิติอีกตัวในการประเมินเรียกว่า R-Square ที่ได้รับการปรับค่า R-Square (adjust)

$$\text{Adjust } R^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) (1-R^2) \quad (4.3)$$

4.2.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองของการทดสอบวัดความชรุขระผิว

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนจากการทดลองวัดความชรุขระผิวตามที่ได้ออกแบบไว้ได้ผลว่า R^2 มีค่าเท่ากับ 98.97 เปอร์เซ็นต์ และค่า Adjust R^2 มีค่าเท่ากับ 98.64 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความหมายว่าถ้าหากความแปรปรวนในข้อมูลมี $100 \mu\text{m}^2$ แล้วความแปรปรวน $98.97 \mu\text{m}^2$ สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบทดสอบอย่างส่วนปริมาณที่เหลือไม่สามารถอธิบายได้เนื่องจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้

ดังนี้จะได้ว่า ความแปรปรวนของข้อมูลวัดความชรุขระผิว ส่วนใหญ่สามารถอธิบายได้ด้วยอัตราป้อน และความเร็วรอบ แสดงว่าการออกแบบการทดลองนี้ถูกต้อง และมีความเหมาะสม จึงสามารถวิเคราะห์ต่อไปได้ด้วยการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนโดยผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของค่าความชรุขระผิว

Analysis of Variance for Ra, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Cutting Speed	2	0.4146	0.4146	0.2073	7.81	0.001
Feed	2	191.1672	191.1672	95.5836	3601.68	0.000
Depth of Cut	2	5.4461	5.4461	2.7231	102.61	0.000
Cutting Speed*Feed	4	4.9683	4.9683	1.2421	46.80	0.000
Cutting Speed*Depth of Cut	4	0.6972	0.6972	0.1743	6.57	0.000
Feed*Depth of Cut	4	1.2126	1.2126	0.3032	11.42	0.000
Cutting Speed*Feed*Depth of Cut	8	2.0672	2.0672	0.2584	9.74	
Error	81	2.1496	2.1496	0.0265		
Total	107	208.1229				

$$S = 0.162907 \quad R-Sq = 98.97\% \quad R-Sq(\text{adj}) = 98.64\%$$

ผลการวิเคราะห์

จากสมมติฐานการทดลอง

H_0 : ตัวแปรไม่มีผลต่อความชรุขระผิวเหล็ก SKD11

H_1 : ตัวแปรมีผลต่อความชรุขระผิวเหล็ก SKD11

จากตารางที่ 4.2 ทำการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ หรือที่ระดับนัยสำคัญ 5 เปอร์เซ็นต์ ($\alpha = 0.05$) ค่าของ $F_{\alpha, v1, v2}$ จากตาราง F-Ratio (ภาคผนวก ค-3) ที่ $\alpha = 0.05$ จะได้ค่า $F_{0.05, 2, 81} = 3.11$ มีเกณฑ์การตัดสินใจคือ ถ้า F-Ratio มีค่ามากกว่า $F_{\alpha, v1, v2}$ จะปฏิเสธ H_0 ซึ่งหมายถึง ตัวแปรนี้ ๆ มีผลต่อความชรุขระผิวเหล็กเครื่องมือ SKD11

1) การวิเคราะห์ค่า Cutting Speed จากตารางที่ 4.2 ค่า F-Ratio = 7.81 ซึ่งมีค่ามากกว่า $F_{0.05, 2, 81} = 3.11$ (ภาคผนวก ค-3) และค่า P-Value = 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ ดังนั้น จึงทำการปฏิเสธสมมติฐาน H_0 สรุปได้ว่าค่า Speed นี้มีผลต่อความชรุขระผิวเหล็กเครื่องมือ SKD11

2) การวิเคราะห์ค่า Feed จากตารางที่ 4.2 ค่า F-Ratio = 3601.68 ซึ่งมีค่ามากกว่า $F_{0.05, 2, 81} = 3.11$ (ภาคผนวก ค-3) และค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ ดังนั้น จึงทำการปฏิเสธสมมติฐาน H_0 สรุปได้ว่าค่า Feed นี้มีผลต่อความชรุขระผิวเหล็กเครื่องมือ SKD11

3) การวิเคราะห์ค่า Depth จากตารางที่ 4.2 ค่า F-Ratio = 102.61 ซึ่งมีค่ามากกว่า $F_{0.05, 2, 81} = 3.11$ (ภาคผนวก ค-3) และค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ ดังนั้น จึงทำการยอมรับสมมติฐาน H_0 สรุปได้ว่าค่า Depth นี้มีผลต่อความชรุขระผิวเหล็กเครื่องมือ SKD11

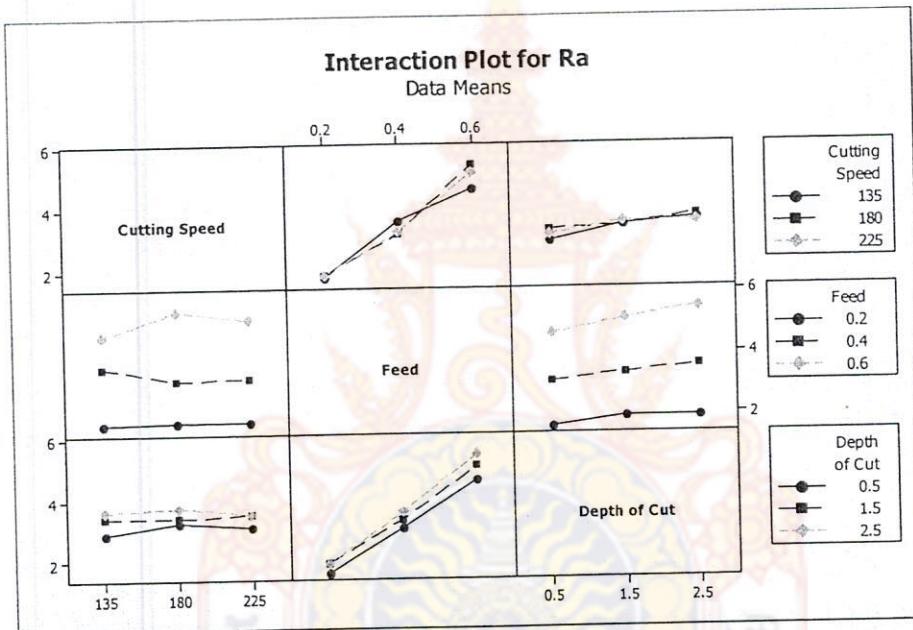
5) การวิเคราะห์ค่า Interaction ระหว่าง Cutting Speed และค่า Feed จากตารางที่ 4.2 ค่า F – Ratio = 46.80 ซึ่งมีค่ามากกว่า $F_{0.05, 2, 81} = 3.11$ (ภาคผนวก ค-3) และค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่า น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ ดังนั้น จึงทำการปฏิเสธสมมติฐาน H_0 สรุปได้ว่าค่า Interaction ระหว่าง Cutting Speed และค่า Feed นี้มีผลต่อความชรุขระผิวเหล็กเครื่องมือ SKD11

6) การวิเคราะห์ค่า Interaction ระหว่าง Cutting Speed และค่า Depth จากตารางที่ 4.2 ค่า F – Ratio = 6.57 ซึ่งมีค่ามากกว่า $F_{0.05, 2, 81} = 3.11$ (ภาคผนวก ค-3) และค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่า น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ ดังนั้น จึงทำการปฏิเสธสมมติฐาน H_0 สรุปได้ว่าค่า Interaction ระหว่าง Cutting Speed และค่า Depth นี้มีผลต่อความชรุขระผิวเหล็กเครื่องมือ SKD11

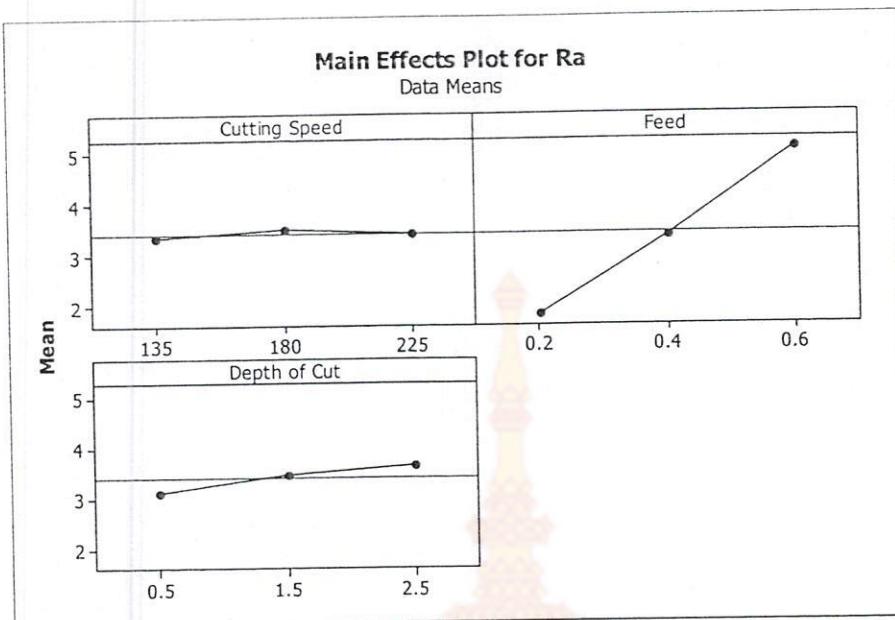
7) การวิเคราะห์ค่า Interaction ระหว่าง Feed และค่า Depth จากตารางที่ 4.2 ค่า F – Ratio = 11.42 ซึ่งมีค่ามากกว่า $F_{0.05, 2, 81} = 3.11$ (ภาคผนวก ค-3) และค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่า

น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ ดังนั้นจึงทำการปฏิเสธสมมุติฐาน H_0 สรุปได้ว่าค่า Interaction ระหว่าง Feed และค่า Depth นั้นมีผลต่อความขรุขระผิวเหล็กเครื่องมือ SKD11

8) การวิเคราะห์ค่า Interaction ระหว่าง Cutting Speed, Feed และค่า Depth จากตารางที่ 4.2 ค่า F – Ratio = 9.74 ซึ่งมีค่ามากกว่า $F_{0.05, 2, 81} = 3.11$ (ภาคผนวก ค-3) และค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ ดังนั้นจึงทำการปฏิเสธสมมุติฐาน H_0 สรุปได้ว่าค่า Interaction ระหว่าง Cutting Speed, Feed และค่า Depth นั้นมีผลต่อความขรุขระผิวเหล็กเครื่องมือ SKD11



ภาพที่ 4.5 ปฏิสัมพันธ์ของความขรุขระผิว



ภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงของความขรุขระผิวจากการเปลี่ยนระดับของปัจจัยหลัก

ผลวิเคราะห์การทดลองจากภาพที่ 4.5, 4.6 และตารางที่ 4.2 พบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวเหล็กเครื่องมือ SKD11 คือ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความเร็wtัด โดยอัตราป้อนมีแนวโน้มว่าเมื่อเพิ่มอัตราป้อนจาก 0.2 เป็น 0.6 มิลลิเมตร/รอบ ค่าความขรุขระผิวจะเพิ่มขึ้น ความลึกในการตัดมีแนวโน้มว่าเมื่อลดความลึกจาก 0.6 มิลลิเมตร มาเป็น 0.2 มิลลิเมตร ค่าความขรุขระผิวจะลดลง และเมื่อปรับอัตราป้อนลดลง และความลึกลดลงทำให้ความขรุขระผิวของเหล็กเครื่องมือ SKD11ลดลงด้วย โดยมีแนวโน้มว่าที่อัตราป้อน 0.2 มิลลิเมตร/รอบ ความเร็wtอบตัด 135 เมตร/นาที และความลึก 0.2 มิลลิเมตร ให้ค่า R_a ต่ำสุด

4.2.4 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความขรุขระผิว

เป็นการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของความขรุขระผิวกับอัตราป้อน ความเร็wtัด และความลึก โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองปรับตัวแปรเพื่อหาค่าความขรุขระผิว กำหนด อัตราป้อน 3 ระดับคือ 0.2, 0.4 และ 0.6 รอบ/นาที ความเร็wtัด 3 ระดับคือ 135, 180 และ 225 เมตร/นาที นำมาวิเคราะห์การถดถอยโดยใช้โปรแกรม มินิแทบ รุ่น 16 ซึ่งสามารถวิเคราะห์การถดถอยโดยผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความขรุขระผิว กับ ความเร็วตัด อัตราปื้น และความลึก

Regression Analysis: Ra versus Cutting Speed, Feed, Depth of Cut

The regression equation is

$$Ra = -0.416 + 0.000797 \text{ Cutting Speed} + 8.14 \text{ Feed} + 0.272 \text{ Depth of Cut}$$

Predictor	Coeff	SE Coef	T	P
Constant	-0.4157	0.1901	-2.19	0.031
Cutting Speed	0.0007968	0.0008825	0.90	0.369
Feed	8.1414	0.1986	41.00	0.000
Depth of Cut	0.27200	0.03971	6.85	0.000

$$S = 0.336986 \quad R-Sq = 94.3\% \quad R-Sq(adj) = 94.2\%$$

การทดสอบสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลัก และตัวแปรตามในรูปแบบสมการเชิงเส้นได้ดังสมการที่ 4.1

$$Ra = -0.416 + 0.000797 \text{ Cutting Speed} + 8.14 \text{ Feed} + 0.272 \text{ Depth of Cut} \quad (4.1)$$

โดยที่

R _a	คือ ความขรุขระผิว (ไมโครเมตร)
Cutting Speed	คือ ความเร็วตัด (อยู่ในช่วง 135-225 เมตร/นาที)
Feed	คือ อัตราปื้น (อยู่ในช่วง 0.2-0.6 มิลลิเมตร/รอบ)
Depth of Cut	คือ ความลึกในการตัด (อยู่ในช่วง 0.5-2.5 มิลลิเมตร)

4.2.4 การวิเคราะห์ผลความชี้นήางานการกึง โดยไม่ใช้ยันศูนย์ท้ายเท่น

เป็นการวิเคราะห์ทำความยาวยสูงสุดในการกลึงชิ้นงานโดยไม่ใช้ยันศูนย์ท้ายเท่นกับอัตราปื้น ความเร็วตัด และความลึก โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองปรับตัวแปรเพื่อหาค่าความขรุขระผิว กำหนดอัตราปื้น 3 ระดับคือ 0.2, 0.4 และ 0.6 รอบ/นาที ความเร็วตัด 3 ระดับคือ 135, 180 และ 225 เมตร/นาที หากทำความยาวยสูงสุดโดยใช้โปรแกรม มินิแทบ รุ่น 16 ซึ่งสามารถหาผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.4

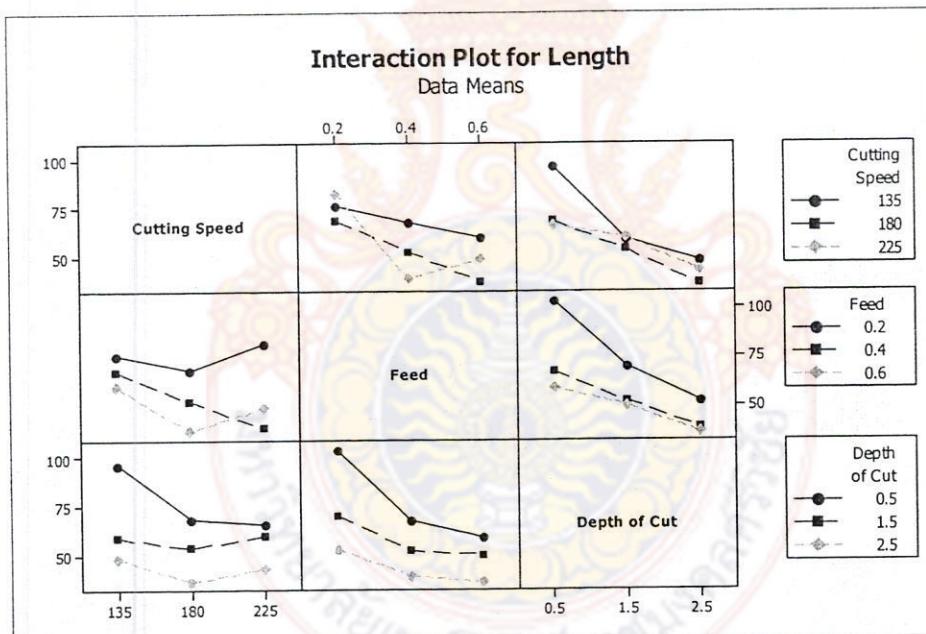


ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ค่าความความยาวชิ้นงานโดยการกลึงแบบไม่ใช้ขันศูนย์ท้ายแท่นกับความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึก

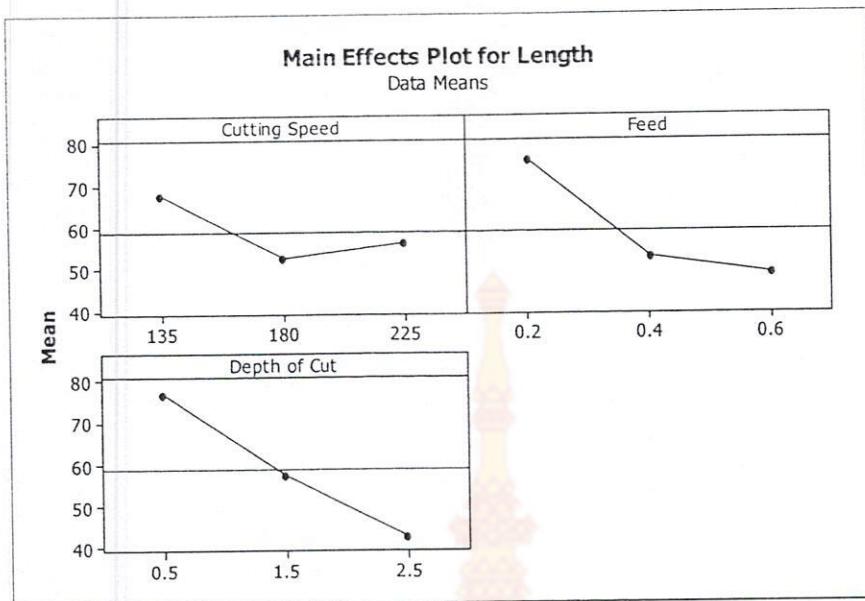
Analysis of Variance for Length, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Cutting Speed	2	4523.6	4523.6	2261.8	188.05	0.000
Feed	2	15538.7	15538.7	7769.3	645.95	0.000
Depth of Cut	2	21486.2	21486.2	10743.1	893.19	0.000
Cutting Speed*Feed	4	4852.4	4852.4	1213.1	100.86	0.000
Cutting Speed*Depth of Cut	4	3411.6	3411.6	852.9	70.91	0.000
Feed*Depth of Cut	4	3201.8	3201.8	800.4	66.55	0.000
Cutting Speed*Feed*Depth of Cut	8	2233.8	2233.8	279.2	23.21	0.000
Error	81	974.3	974.3	12.0		
Total	107	56222.2				

$$S = 3.46811 \quad R-Sq = 98.27\% \quad R-Sq(adj) = 97.71\%$$



ภาพที่ 4.7 ปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีต่อความยาวในการกลึงแบบไม่ใช้ขันศูนย์ท้ายแท่น



ภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงของความยาวชิ้นงานจากการเปลี่ยนระดับของปัจจัยหลัก

ผลการวิเคราะห์วิเคราะห์การทดลองจากภาพที่ 4.7, 4.8 และตารางที่ 4.3 พบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อกำไรในกระบวนการกลึงเหล็กเครื่องมือ SKD11 โดยไม่ใช้ยันศูนย์ท้ายแท่น คือ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความเร็วตัด โดยอัตราป้อนมีแนวโน้มว่าเมื่อเพิ่มอัตราป้อนจาก 0.2 เป็น 0.6 มิลลิเมตร/รอบ ค่ากำไรในกระบวนการกลึงชิ้นงานจะลดลง ความลึกในการตัดมีแนวโน้มว่าเมื่อลดความลึกจาก 0.6 มิลลิเมตร/รอบ มาเป็น 0.2 มิลลิเมตร/รอบ ค่ากำไรชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น และเมื่อปรับตัวแปรทั้ง 3 ลดลงจะทำให้สามารถกลึงชิ้นงานเหล็กเครื่องมือ SKD11 โดยไม่ใช้ยันศูนย์ได้ กำไรเพิ่มขึ้น จากตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.7 และพบว่าปัจจัยร่วมอื่น ๆ ส่งผลต่อกำไรด้วย

4.3 การทดลองเพื่อยืนยันผล

เป็นการทดลองเพื่อยืนยันผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองที่ผ่านมา โดยนำสมการเชิงเส้นมาพยากรณ์ความชรุระบุ โดยทำการสุ่มสภาวะการตัดอยู่ในขอบเขตที่กำหนดแล้วนำผลที่ได้จากการพยากรณ์มาเปรียบเทียบค่าจริงที่ได้จากการทดลองและกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์สำหรับค่าความชรุระบุไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ เพราะซึ่งค่าจากการทดลอง และการคำนวนได้แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าความชรุขระผิวที่คำนวณจากสมการและค่าความชรุขระผิวที่วัดได้จริง

No	Cutting Speed	Feed	Depth	R_a Cal.	R_a	Error (R_a Cal.- R_a)
1	180	0.2	0.5	2.32	2.2	0.12
2	225	0.3	1	3.31	3.43	-0.12
3	200	0.4	2	4.38	4.29	0.09
4	170	0.2	2	2.72	3.01	-0.29
5	150	0.5	0.4	4.71	4.68	0.03
6	160	0.2	0.8	2.39	2.34	0.05

การหาค่าเฉลี่ยเบอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error : MAPE)

$$\begin{aligned}
 \text{MAPE} &= \sum_{i=1}^n \frac{\left(\frac{|X_i - F_i|}{X_i} \right) \times 100}{N} \quad (4.6) \\
 &= \frac{5.17 + (-3.63) + 2.05 + (-10.66) + 0.64 + 2.09}{6} \\
 &= -4.33 \text{ หรือ } 4.33 \text{ เปอร์เซ็นต์}
 \end{aligned}$$

โดยที่

X_i คือ ค่าความชรุขระผิวที่คำนวณจากสมการ (R_a Cal.)

F_i คือ ค่าความชรุขระผิวจากการทดลอง

N คือ จำนวนสภาวะการทดลอง

จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าเฉลี่ยเบอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 4.33 ซึ่งน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนด 5.67 % ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาทดลองการกลึงเหล็กเครื่องมือ SKD 11 ด้วยเครื่องกลึงควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ทำการกลึงเพื่อหาค่าความชรุขยะผิว เพื่อผลิตเป็นชิ้นส่วนแม่พิมพ์โดยใช้วิธีออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Block Factorial Design) โดยในเมืองตันได้กำหนดตัวแปรที่คาดว่ามีผลในการทดลองคือ ความเร็วตัด อัตราปื้อน และความลึกในการตัดผลตอบสนอง คือ ความชรุขยะผิว ผลการศึกษาพบว่า

5.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความชรุขยะผิวเหล็กเครื่องมือ SKD11 คือ อัตราปื้อน ความลึกในการตัด และความเร็วตัด โดย ความเร็วตัด ก็มีผลต่อความชรุขยะผิวมากที่สุด และมีแนวโน้มว่าการใช้อัตราปื้อนต่ำ และ ความลึกในการตัดที่ต่ำ มีผลทำให้ค่าความชรุขยะผิวลดลง

5.1.2 จากการทดลองได้สมการเชิงเส้นดังนี้

$$Ra = -0.416 + 0.000797 \text{ Cutting Speed} + 8.14 \text{ Feed} + 0.272 \text{ Depth of Cut} \quad (5.1)$$

โดยสมการที่ได้นี้สามารถนำไปใช้กับ ความเร็วตัด ระหว่าง 135-225 เมตรต่อนาที อัตราปื้อน ระหว่าง 0.2-0.6 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึก 0.5-2.5 มิลลิเมตร

5.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความยาวชิ้นงานที่สามารถกลึงได้สูงสุด โดยไม่ใช้ยันศูนย์ท้ายแท่น คือ อัตราปื้อน ความลึกในการตัด และความเร็วตัด โดยมีแนวโน้มว่าการใช้อัตราปื้อนต่ำลงและ ความลึกในการตัด มีผลทำให้สามารถกลึงได้ความยาวเพิ่มขึ้น

5.1.4 จากการทดลองเพื่อการยืนยันผลเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการกับค่าที่วัดจริงโดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์สำหรับค่าความชรุขยะผิวและค่าความคลาดเคลื่อนขนาดไม่เกิน 10 % ผลจากการทดลองหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของสมการความชรุขยะผิวเท่ากับ 4.33 % ซึ่งน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้และค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

5.1.5 ถ้าต้องการความชรุขยะผิวน้อยที่สุด ให้ปรับตั้งเครื่องที่อัตราปื้อน 0.2 มิลลิเมตร/รอบ ความเร็วรอบตัด 135 เมตร/นาที และความลึก 0.2 มิลลิเมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ความมีการศึกษาทดลองปรับเปลี่ยนมุมมีด (Rack Angle) ของใบมีดในการกลึงเหล็กรีดเย็น โดยการปรับเปลี่ยนที่ด้ามมีดกลึง
- 5.2.2 ความมีการศึกษาอิทธิพลของการสักหรือของมีดกัดที่มีผลต่อคุณภาพพิวของเหล็กรีดเย็น SKD11

บรรณานุกรม

- [1] กิติศักดิ์ พลอยพาณิชเจริญ. 2547. สอดีสำหรับงานวิศวกรรม. เล่ม 1 พิมพ์ครั้งที่ 4 สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) กรุงเทพฯ
- [2] กิติศักดิ์ พลอยพาณิชเจริญ. 2545. สอดีสำหรับงานวิศวกรรม. เล่ม 2 พิมพ์ครั้งที่ 3 สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) กรุงเทพฯ
- [3] ประไพศรี สุทธันณ อุยธยา และ พงษ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2549. สอดีวิศวกรรม. สำนักพิมพ์หอป จำกัด กรุงเทพฯ
- [4] ปราเมศ ชุตima. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
- [5] ศุภโชค วิริยะกอสล. 2543. การตัดวัสดุ. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา.
- [6] ไชยศักดิ์ ศรีสุขเดช. 2546. เครื่องมือวัดและการวัดละเอียด. พิมพ์ครั้งที่ 3. ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ. กรุงเทพฯ
- [7] Edward, M.T. and Paul, K.W., 2000. **Metal Cutting**, 4th ed, Butterworth-Heinemann. Oxford.
- [8] Milton, C. Shaw., 2005. **Metal Cutting Principles**, 2nd ed, Oxford.
- [9] Montgomery, D. C., 2001. **Design and Analysis of Experiment**. John Wiley & Son, Inc. 6th edition.
- [10] Montgomery, D.C. and Runger, G.C., 1999. **Applied Statistics and Probability for Engineering**. Second Edition. John Wiley & Son. Inc.
- [11] Scrope, K., 1997. **Manufacturing Processes for Engineering Material**, 3rd ed, Illinois, Addison – Wesley.
- [12] Waren, R.D., 1992. **Analysis of Material Removal Process**, New York.

ภาคผนวก ก
ตารางบันทึกผลการทดลอง



ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดลอง

ภาคผนวก ก-1 การทดลองที่ 1 ผลการทดลองหาจำนวนครั้งในการทดลอง

No.	Cutting Speed (rpm)	Feed (mm/min)	Depth of Cut (mm)	R_a (μm)
1	180	0.4	1	3.29
2	180	0.4	1	3.47
3	180	0.4	1	3.38
4	180	0.4	1	3.23
5	180	0.4	1	3.40
6	180	0.4	1	3.33
7	180	0.4	1	3.32
8	180	0.4	1	3.36
9	180	0.4	1	3.00
10	180	0.4	1	3.34
11	180	0.4	1	2.84
12	180	0.4	1	3.24

ภาคผนวก ก-2 ผลการทดลองต่อนที่ 2 การวัดค่าความขรุขระผิวเหล็ก SKD 11

No.	Cutting Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)	R _a				Length
				1	2	3	(Ave)	
1	135	0.2	0.5	1.48	1.56	1.68	1.57	111
2	135	0.2	1.5	1.67	1.74	1.59	1.67	70
3	135	0.2	2.5	1.94	1.56	1.64	1.71	56
4	135	0.4	0.5	3.01	3	3.17	3.06	96
5	135	0.4	1.5	3.27	4.21	4.24	3.91	67
6	135	0.4	2.5	3.96	4.1	4.16	4.07	51
7	135	0.6	0.5	3.25	4.78	5.21	4.41	90
8	135	0.6	1.5	5.02	2.54	6.1	4.55	51
9	135	0.6	2.5	6.39	5.35	5.29	5.68	49
10	180	0.2	0.5	1.49	1.44	1.92	1.62	102
11	180	0.2	1.5	1.42	1.58	1.97	1.66	71
12	180	0.2	2.5	2.2	1.68	1.63	1.84	44
13	180	0.4	0.5	3.47	3.32	2.67	3.15	70
14	180	0.4	1.5	2.87	3.14	3.33	3.11	59
15	180	0.4	2.5	3.34	2.5	3.58	3.14	39
16	180	0.6	0.5	5.19	5.03	4.91	5.04	44
17	180	0.6	1.5	5.09	5.37	5.55	5.34	42
18	180	0.6	2.5	6.4	6.08	6.25	6.24	36
19	225	0.2	0.5	1.47	1.22	1.38	1.36	108
20	225	0.2	1.5	1.52	1.57	1.51	1.53	81
21	225	0.2	2.5	1.92	2.68	1.54	2.05	69
22	225	0.4	0.5	3.26	3.32	3.03	3.20	47
23	225	0.4	1.5	3.3	3.36	3.12	3.26	41
24	225	0.4	2.5	2.99	3.64	3.67	3.43	38



ภาคผนวก ก-2 ผลการทดลองตอนที่ 2 การวัดค่าความขรุขระพิเศษ SKD 11 (ต่อ)

No.	Cutting Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)	R_a				Length
				1	2	3	(Ave)	
25	225	0.6	0.5	5.03	4.88	4.61	4.84	55
26	225	0.6	1.5	5.41	5.26	5.14	5.27	68
27	225	0.6	2.5	4.97	5.61	5.41	5.33	34
28	135	0.2	0.5	1.97	1.62	1.58	1.72	107
29	135	0.2	1.5	1.67	2.12	1.63	1.81	65
30	135	0.2	2.5	1.83	1.60	1.79	1.74	51
31	135	0.4	0.5	3.04	3.09	3.09	3.07	91
32	135	0.4	1.5	3.59	3.23	3.76	3.52	62
33	135	0.4	2.5	4.02	4.13	4.06	4.07	46
34	135	0.6	0.5	3.83	3.21	4.23	3.76	85
35	135	0.6	1.5	4.79	4.32	5.56	4.89	46
36	135	0.6	2.5	3.51	5.32	5.84	4.89	44
37	180	0.2	0.5	1.55	1.68	1.71	1.65	97
38	180	0.2	1.5	2.40	1.78	1.70	1.96	66
39	180	0.2	2.5	2.02	1.66	1.92	1.86	39
40	180	0.4	0.5	3.31	3.00	3.07	3.13	65
41	180	0.4	1.5	2.99	3.24	3.10	3.11	54
42	180	0.4	2.5	3.24	3.04	3.46	3.25	34
43	180	0.6	0.5	5.12	4.97	5.05	5.05	39
44	180	0.6	1.5	5.21	5.46	5.32	5.33	37
45	180	0.6	2.5	6.32	6.17	6.33	6.27	31
46	225	0.2	0.5	1.41	1.30	1.43	1.38	103
47	225	0.2	1.5	3.24	1.54	1.52	2.10	76
48	225	0.2	2.5	1.98	2.11	1.73	1.94	64

ภาคผนวก ก-2 ผลการทดลองตอนที่ 2 การวัดค่าความขรุขระผิวเหล็ก SKD 11 (ต่อ)

No.	Cutting Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)	R_a				Length
				1	2	3	(Ave)	
49	225	0.4	0.5	3.23	3.18	3.15	3.18	42
50	225	0.4	1.5	3.28	3.24	3.21	3.24	36
51	225	0.4	2.5	3.21	3.66	3.33	3.40	33
52	225	0.6	0.5	4.94	4.75	4.82	4.83	50
53	225	0.6	1.5	5.34	5.20	5.28	5.27	63
54	225	0.6	2.5	5.15	5.51	5.19	5.28	29
55	135	0.2	0.5	1.85	1.60	1.78	1.74	113
56	135	0.2	1.5	1.54	1.88	1.65	1.69	68
57	135	0.2	2.5	1.78	2.03	1.81	1.87	54
58	135	0.4	0.5	3.05	3.09	3.06	3.07	94
59	135	0.4	1.5	3.56	3.49	3.67	3.57	65
60	135	0.4	2.5	4.04	4.10	4.04	4.06	49
61	135	0.6	0.5	3.79	3.72	4.03	3.85	88
62	135	0.6	1.5	4.84	4.94	5.17	4.98	49
63	135	0.6	2.5	4.20	5.58	4.68	4.82	47
64	180	0.2	0.5	1.60	1.69	1.63	1.64	100
65	180	0.2	1.5	2.18	1.74	2.31	2.07	69
66	180	0.2	2.5	1.94	1.79	1.97	1.90	42
67	180	0.4	0.5	3.22	3.03	3.19	3.15	68
68	180	0.4	1.5	3.05	3.17	3.05	3.09	57
69	180	0.4	2.5	3.24	3.25	3.35	3.28	37
70	180	0.6	0.5	4.71	5.01	5.08	4.93	42
71	180	0.6	1.5	4.27	5.39	5.27	4.98	40
72	180	0.6	2.5	6.30	5.25	6.32	5.96	34

ภาคผนวก ก-2 ผลการทดลองตอนที่ 2 การวัดค่าความขรุขระพิเวหลิก SKD 11 (ต่อ)

No.	Cutting Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)	R _a				Length
				1	2	3	(Ave)	
73	225	0.2	0.5	1.40	2.15	1.42	1.66	106
74	225	0.2	1.5	2.67	1.53	2.38	2.19	79
75	225	0.2	2.5	1.96	1.92	1.86	1.91	67
76	225	0.4	0.5	3.21	3.16	2.14	2.84	45
77	225	0.4	1.5	3.26	3.23	3.25	3.24	39
78	225	0.4	2.5	3.31	3.49	3.27	3.36	36
79	225	0.6	0.5	4.88	4.78	4.88	4.85	53
80	225	0.6	1.5	5.31	5.24	5.31	5.28	66
81	225	0.6	2.5	5.22	5.35	5.17	5.25	32
82	135	0.2	0.5	1.93	1.69	1.81	1.81	110
83	135	0.2	1.5	1.61	1.76	1.59	1.66	62
84	135	0.2	2.5	1.83	1.92	2.14	1.96	48
85	135	0.4	0.5	3.06	3.08	3.06	3.06	88
86	135	0.4	1.5	3.56	3.58	3.61	3.59	59
87	135	0.4	2.5	4.05	4.07	4.04	4.05	43
88	135	0.6	0.5	3.82	3.88	3.91	3.87	82
89	135	0.6	1.5	4.91	5.06	5.01	4.99	43
90	135	0.6	2.5	4.51	5.13	4.44	4.69	41
91	180	0.2	0.5	1.62	1.69	1.78	1.70	94
92	180	0.2	1.5	2.13	2.02	2.24	2.13	63
93	180	0.2	2.5	1.92	1.88	1.95	1.92	36
94	180	0.4	0.5	3.18	3.11	3.20	3.17	62
95	180	0.4	1.5	3.07	3.11	3.05	3.07	51
96	180	0.4	2.5	3.26	3.30	3.30	3.29	31

ภาคผนวก ก-2 ผลการทดลองต่อนที่ 2 การวัดค่าความชุกระพิวเหล็ก SKD 11 (ต่อ)

No.	Cutting Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)	R_a				Length
				1	2	3	(Ave)	
97	180	0.6	0.5	4.82	5.05	4.90	4.92	36
98	180	0.6	1.5	4.62	5.33	4.77	4.91	34
99	180	0.6	2.5	6.13	5.79	6.31	6.07	28
100	225	0.2	0.5	1.53	1.78	1.41	1.57	100
101	225	0.2	1.5	2.43	1.95	2.52	2.30	73
102	225	0.2	2.5	1.94	1.89	1.91	1.91	61
103	225	0.4	0.5	3.02	2.65	2.67	2.78	39
104	225	0.4	1.5	3.25	3.24	3.25	3.25	33
105	225	0.4	2.5	3.33	3.38	3.29	3.33	30
106	225	0.6	0.5	4.87	4.83	4.88	4.86	47
107	225	0.6	1.5	5.29	5.27	5.31	5.29	60
108	225	0.6	2.5	5.23	5.31	5.19	5.24	26

ภาคผนวก ก-2 ผลการทดลองต่อนที่ 3 การทดลองเพื่อการยืนยันผล

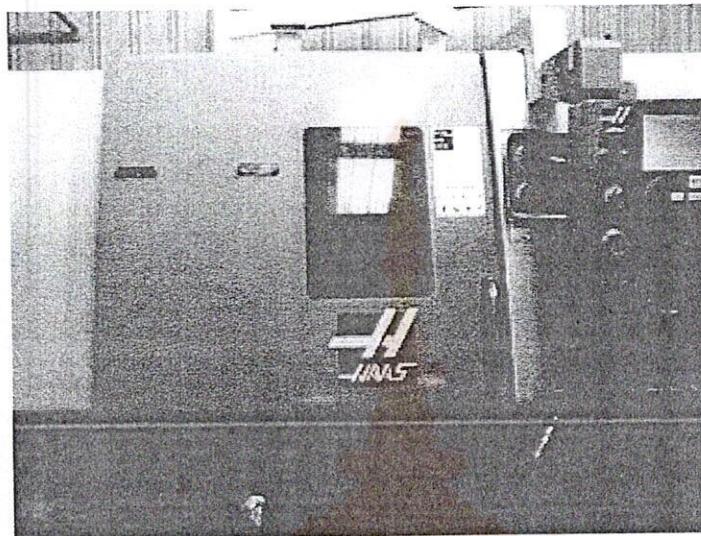
No	Cutting Speed	Feed	Depth	R_a Cal.	R_a	Error (R_a Cal.- R_a)
1	180	0.2	0.5	2.32	2.2	0.12
2	225	0.3	1	3.31	3.43	-0.12
3	200	0.4	2	4.38	4.29	0.09
4	170	0.2	2	2.72	3.01	-0.29
5	150	0.5	0.4	4.71	4.68	0.03
6	160	0.2	0.8	2.39	2.34	0.05

ภาคผนวก ๘

ข้อมูลเครื่องจักรและอุปกรณ์ในการทดลอง



ภาคผนวก ข-1 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องกัดควนคุณค่าวัสดุระบบคอมพิวเตอร์ Haas



รูปที่ ข-1 เครื่องกัดควนคุณค่าวัสดุระบบคอมพิวเตอร์ Haas

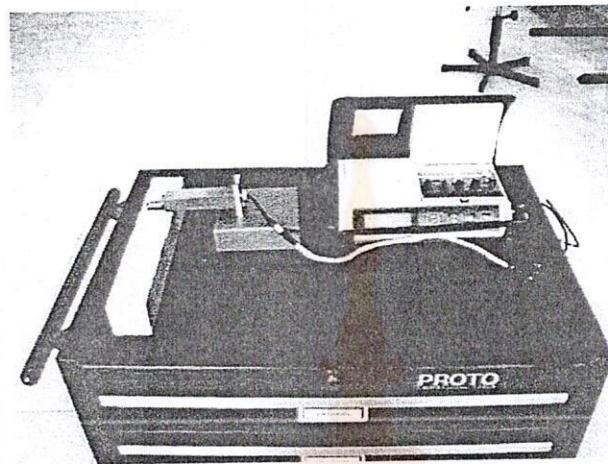
SWING DIAMETER	S.A.E.	Metric
Over Front Apron	23.0 "	584 mm
Over Cross Slide	9.5"	241 mm
CAPACITIES	S.A.E.	Metric
Chuck Size	8.3 "	210 mm
Max Cutting Diameter	10.3 "	262 mm
Max Cutting Length	20.0 "	508 mm
Max Cutting Length w/Std Workholding	19.0 "	483 mm
Bar Capacity	2.0 "	51 mm
Between Centers	24.0 "	610 mm
TRAVELS & FEEDRATES	S.A.E.	Metric
X Axis	8.45"	215 mm
Z Axis	20.00 "	508 mm
Rapids	1200 ipm	30.5 m/min

TRAVELS & FEEDRATES		S.A.E.	Metric
Max Thrust X		2400 lb	10675 N
Max Thrust Z		3700 lb	16458 N
BIG BORE (OPT) CAP.		S.A.E.	Metric
Chuck Size		10.0 "	254 mm
Max Cutting Diameter		10.3 "	262 mm
Max Cutting Length		20.0 "	508 mm
Max Cutting Length w/Std Workholding		17.5 "	444 mm
Bar Capacity		2.5 "	64 mm
Between Centers		24.0 "	610 mm
BIG BORE (OPT) SPINDLE		S.A.E.	Metric
Spindle Nose		A2-6	A2-6
Max Rating		30 hp	22 kW
Max Speed		3400 rpm	3400 rpm
Max Torque		300 ft-lb @ 700 rpm	407 Nm @ 700 rpm
Spindle Bore ø		3.00 "	76.2 mm
Draw Tube Bore ø		2.56 "	65.0 mm
TAILSTOCK OPTION		S.A.E.	Metric
Z Axis		20.00 "	508 mm
Taper		MT4 "	MT4
Thrust (max)		1500 lb	6672 N
Thrust (min)		300 lb	1334 N
TURRET		S.A.E.	Metric
Number of Tools		10	
OD vs ID Tools		Any combination	
Tool Size (OD turning)		1.0 "	
Index Time (one tool)		1 sec	
Boring Bar Rear Clearance (from turret face)		4.37 "	

LIVE TOOLING	S.A.E.	Metric
Max Speed	3000 rpm	3000 rpm
Drive Ratio	1:1	
Brake Clamp Force	1000 lb	4448 N
Brake Diameter	13.25"	337 mm
Tooling	Standard 40 mm VDI	Standard 40 mm VDI
ACCURACY	S.A.E.	Metric
Positioning (\pm)	0.0002 "	0.005 mm
Repeatability	0.0001 "	0.003 mm



ภาคผนวก ข-2 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องวัดความชุกระดับวีห้อ มิตูโตโยรุ่น เชิฟเทส 301



รูปที่ ข-2 เครื่องวัดความชุกระดับวีห้อ มิตูโตโยรุ่น เชิฟเทส 301

ข้อมูลทั่วไป

ชื่อเครื่องจักร	เครื่องวัดความชุกระดับวี
ยี่ห้อ/รุ่น	มิตูโตโยรุ่น เชิฟเทส 301
ประเภทผู้ผลิต	ญี่ปุ่น

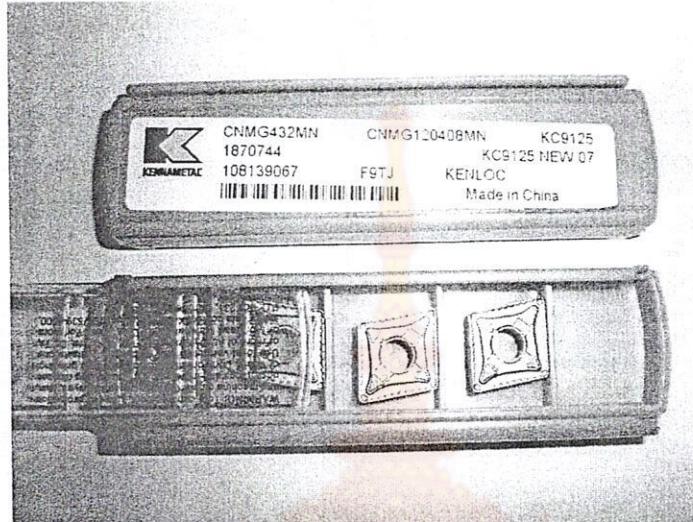
รายละเอียดทางเทคนิค

ระยะในการวัด	12.5 มิลลิเมตร
ความเร็วในการวัด	0.25, 0.5 มิลลิเมตร/วินาที
ทิศทางในการวัด	ถอยหลังกลับ
ความละเอียดในการวัด	350 ไมโครเมตร (-200 ไมโครเมตร ถึง +250 ไมโครเมตร)
ลักษณะการวัด	หัวกัดเคลื่อนที่
แรงกดในการวัด	4 มิลลินิวตัน หรือ 0.75 มิลลินิวตัน
หัวกัด	หัวเพชร 90 องศา (60 องศา สำหรับการใช้แรงกดต่ำ)
การเคลื่อนที่แนวโถง	40 มิลลิเมตร
แรงเคลื่อนที่ของหัวกัด	น้อยกว่า 400 มิลลินิวตัน

การเคลื่อนที่หัววัด	หัวคดเคลื่อนที่โดยใช้แม่เหล็ก
แหล่งกระจายไฟฟ้า	หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรง และแบตเตอรี่สำรอง
ขนาดและน้ำหนัก	307×165×94 มิลลิเมตร, 1.2 กิโลกรัม



ภาคผนวก ข-3 ข้อมูลทางเทคนิคด้อมีค่าร์บีบีช์ห้อ Kennametal แบบ CNMG432MN เกรด KC9125



รูปที่ ข-3 แสดงใบมีดตัดบีช์ห้อ บีช์ห้อ Kennametal แบบ CNMG432MN เกรด KC9125

ข้อมูลเทคนิคและวิธีการเลือกสภาพ

1st Step – Select the Insert Geometry

Negative Inserts

▼ Roughing



-RN
-RP^{*}
(positive)

▼▼ Medium Machining



-MN

▼▼▼ Finishing

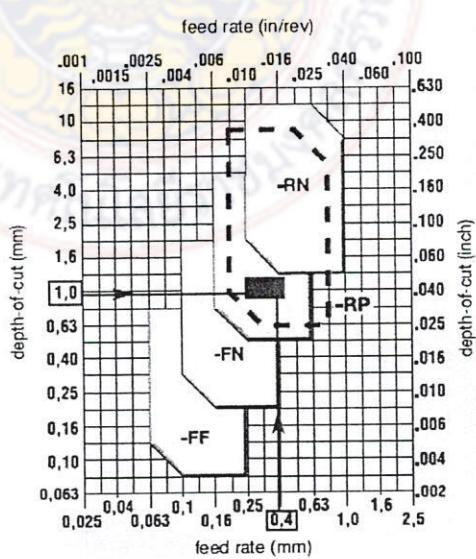


-FN

▼▼▼▼ Fine Finishing



-FF



รูปที่ ข-4 แสดงวิธีการเลือก อัตราปั่นและความลึก

2nd Step – Select the Grade

	Negative Insert Geometry				
	-FF	-FN	-MN	-RN	-RP
Cutting Condition					
heavily interrupted cut	◎	KC9110	KC9125	K9140	KC9140
lightly interrupted cut	○	KC9110	KC9125	KC9125	KC9125
varying depth-of-cut, casting, or forging skin	○	KT315	KC9110	KC9110	KC9110
smooth cut, pre-turned surface	○	KT315	KT315	KC9110	KC9110

รูปที่ ข-5 แสดงวิธีการเลือก เกรดของเม็ดมีด

3rd Step – Select the Cutting Speed

Alloy Steels and Tool Steels (≤ 330 HB) (≤ 35 HRC)

KENNA PERFECT Material Group	grade	Speed – [m/min] sfm							Starting Conditions	
		135 (450)	180 (600)	225 (750)	275 (900)	320 (1050)	360 (1200)	410 (1350)	m/min	sfm
P3	KT315 / KC9105								210	680
	KC9110 / KC9315		▷◁						190	630
	KC9125 / KC9225 / KCS010	▷◁							155	510
	KC9140 / KC9240	▷◁							120	400

รูปที่ ข-6 แสดงวิธีการเลือก ความเร็วตัดของเม็ดมีด

ภาคผนวก ค

ตารางการวิเคราะห์ผลทางสถิติ



ภาคผนวก ค-1 ตารางวิเคราะห์ผลทางสถิติ ค่า F ภายใต้ความน่าจะเป็น $\alpha = 0.25$

		V_1														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30
	1	5.83	7.5	8.2	8.58	8.82	8.98	9.1	9.19	9.26	9.32	9.41	9.49	9.5	9.63	9.67
	2	2.57	3	3.15	3.23	3.28	3.31	3.34	3.35	3.37	3.38	3.39	3.41	3.43	3.44	3.44
	3	2.02	2.28	2.36	2.39	2.41	2.42	2.43	2.44	2.44	2.44	2.45	2.46	2.46	2.46	2.47
	4	1.81	2	2.05	2.06	2.07	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08
	5	1.69	1.85	1.88	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.88	1.88	1.88
	6	1.62	1.76	1.78	1.79	1.79	1.78	1.78	1.78	1.77	1.77	1.77	1.76	1.76	1.75	1.75
	7	1.57	1.7	1.72	1.72	1.71	1.71	1.7	1.7	1.69	1.69	1.68	1.68	1.17	1.67	1.66
	8	1.54	1.66	1.67	1.66	1.66	1.65	1.64	1.64	1.63	1.63	1.62	1.62	1.61	1.61	1.6
	9	1.51	1.62	1.63	1.63	1.62	1.61	1.6	1.6	1.59	1.59	1.58	1.57	1.56	1.55	1.55
	10	1.49	1.6	1.6	1.59	1.59	1.58	1.57	1.56	1.56	1.55	1.54	1.53	1.52	1.52	1.51
	11	1.47	1.58	1.58	1.57	1.56	1.55	1.54	1.53	1.53	1.52	1.51	1.5	1.49	1.49	1.48
	12	1.46	1.56	1.56	1.55	1.54	1.53	1.52	1.51	1.51	1.5	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45
	13	1.45	1.55	1.55	1.53	1.52	1.51	1.5	1.49	1.49	1.4	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43
	14	1.44	1.53	1.53	1.52	1.51	1.5	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41
	15	1.43	1.52	1.52	1.51	1.49	1.48	1.47	1.46	1.46	1.45	1.44	0.143	1.41	1.4	1.4
	16	1.42	1.51	1.51	1.5	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.44	1.43	1.41	1.4	1.39	1.38
	17	1.42	1.51	1.5	1.49	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37
	18	1.41	1.5	1.49	1.48	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.42	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36
	19	1.41	1.49	1.49	1.47	1.46	1.44	1.43	1.42	1.41	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.35
	20	1.4	1.49	1.48	1.47	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.41	1.4	1.39	1.37	1.36	1.35
	21	1.4	1.48	1.48	1.46	1.44	1.43	1.42	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.35	1.34	1.33
	22	1.4	1.48	1.47	1.45	1.44	1.42	1.41	1.4	1.39	1.39	1.37	1.36	1.34	1.33	1.32
	23	1.39	1.47	1.47	1.45	1.43	1.42	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.35	1.34	1.33	1.32
	24	1.39	1.47	1.46	1.44	1.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.38	1.36	1.35	1.33	1.32	1.31
	25	1.39	1.47	1.46	1.44	1.42	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.34	1.33	1.31	1.31
	26	1.38	1.46	1.45	1.44	1.42	1.41	1.39	1.38	1.37	1.37	1.35	1.34	1.32	1.31	1.3
	27	1.38	1.46	1.45	1.43	1.42	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.33	1.32	1.3	1.3
	28	1.38	1.46	1.45	1.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.34	1.33	1.31	1.3	1.29
	29	1.38	1.45	1.45	1.43	1.4	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.32	1.32	1.31	1.3	1.29
	30	1.38	1.45	1.44	1.42	1.41	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.32	1.3	1.29	1.28
	40	1.36	1.44	1.42	1.4	1.39	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.31	1.3	1.28	1.26	1.25
	50	1.35	1.43	1.41	1.39	1.37	1.36	1.34	1.33	1.32	1.31	1.3	1.28	1.26	1.25	1.23
	60	1.35	1.42	1.41	1.38	1.37	1.35	1.33	1.32	1.31	1.3	1.29	1.27	1.25	1.23	1.22
	120	1.34	1.4	1.4	1.37	1.35	1.33	1.31	1.3	1.29	1.28	1.26	1.24	1.22	1.2	1.19



ภาคผนวก ค-2 ตารางวิเคราะห์ผลทางสถิติ ค่า F ภายใต้ความน่าจะเป็น $\alpha = 0.10$

		V_1														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30
	1	5.83	7.5	8.2	8.58	8.82	8.9	9.1	9.19	9.26	9.32	9.41	9.49	9.58	9.63	9.67
	2	2.57	3	3.15	3.23	3.28	3.31	3.34	3.35	3.37	3.38	3.39	3.41	3.43	3.44	3.44
	3	2.02	2.28	2.36	2.39	2.41	2.42	2.43	2.44	2.44	2.44	2.45	2.46	2.46	2.46	2.47
	4	1.81	2	2.05	2.06	2.07	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08
	5	1.69	1.85	1.88	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.88	1.88	1.88
	6	1.62	1.76	1.78	1.79	1.79	1.78	1.78	1.78	1.77	1.77	1.77	1.76	1.76	1.75	1.75
	7	1.57	1.7	1.72	1.72	1.71	1.71	1.7	1.7	1.69	1.69	1.68	1.68	1.67	1.67	1.66
	8	1.54	1.66	1.67	1.66	1.66	1.65	1.64	1.64	1.63	1.63	1.62	1.62	1.61	1.6	1.6
	9	1.51	1.62	1.63	1.63	1.62	1.61	1.6	1.6	1.59	1.59	1.58	1.57	1.56	1.55	1.55
	10	1.49	1.6	1.6	1.59	1.59	1.58	1.57	1.56	1.56	1.55	1.54	1.53	1.52	1.52	1.51
	11	1.47	1.58	1.58	1.57	1.56	1.55	1.54	1.53	1.53	1.52	1.51	1.5	1.49	1.49	1.48
	12	1.46	1.56	1.56	1.55	1.54	1.53	1.52	1.51	1.51	1.5	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45
	13	1.45	1.55	1.55	1.53	1.52	1.51	1.5	1.49	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43
	14	1.44	1.53	1.53	1.52	1.51	1.5	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41
	15	1.43	1.52	1.52	1.51	1.49	1.48	1.47	1.46	1.46	1.45	1.44	1.43	1.41	1.4	1.4
	16	1.42	1.51	1.51	1.5	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.44	1.43	1.43	1.41	1.4	1.39
V_2	17	1.42	1.51	1.5	1.49	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37
	18	1.41	1.5	1.49	1.48	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.42	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36
	19	1.41	1.49	1.49	1.47	1.46	1.44	1.43	1.42	1.41	1.41	1.4	1.38	1.37	1.36	1.35
	20	1.4	1.49	1.48	1.47	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.4	1.39	1.37	1.36	1.35	1.34
	21	1.4	1.48	1.48	1.46	1.44	1.43	1.42	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.35	1.34	1.33
	22	1.4	1.48	1.47	1.45	1.44	1.42	1.41	1.4	1.39	1.39	1.37	1.36	1.34	1.33	1.32
	23	1.39	1.47	1.47	1.45	1.43	1.42	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.35	1.34	1.33	1.32
	24	1.39	1.4	1.46	1.44	0.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.38	1.36	1.35	1.33	1.32	1.31
	25	1.39	1.47	1.46	1.44	1.42	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.34	1.33	1.31	1.31
	26	1.38	1.46	1.45	1.4	1.42	1.41	1.39	1.38	1.37	1.37	1.35	1.34	1.32	1.31	1.3
	27	1.38	1.46	1.45	1.43	1.42	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.33	1.32	1.3	1.3
	28	1.38	1.46	1.45	1.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.37	1.36	1.34	1.33	1.31	1.3	1.29
	29	1.38	1.45	1.45	1.43	1.41	1.4	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.32	1.31	1.3	1.29
	30	1.38	1.45	1.44	1.42	1.41	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.32	1.3	1.29	1.28
	40	1.36	1.44	1.42	1.4	1.39	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.31	1.3	1.28	1.26	1.25
	50	1.35	1.43	1.41	1.39	1.37	1.36	1.34	1.33	1.32	1.31	1.3	1.28	1.26	1.25	1.23
	60	1.35	1.42	1.41	1.38	1.37	1.35	1.33	1.32	1.31	1.3	1.29	1.27	1.25	1.23	1.22
	120	1.34	1.4	1.39	1.37	1.35	1.33	1.31	1.3	1.29	1.28	1.26	1.24	1.22	1.2	1.19

ภาคผนวก ค-3 ตารางวิเคราะห์ผลทางสถิติ ค่า F ภายใต้ความน่าจะเป็น $\alpha = 0.05$

		V_1														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30
	1	161.5	199.5	215.7	224.6	230.2	234	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	246	248	249.3	250.1
	2	18.51	19	19.16	19.25	19.3	19.33	19.35	19.37	19.38	19.4	19.41	19.43	19.45	19.46	19.46
	3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.7	8.66	8.63	8.62
	4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6	5.96	5.91	5.86	5.8	5.77	5.75
	5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.52	4.5
	6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.1	4.06	4	3.94	3.87	3.83	3.81
	7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.4	3.38
	8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.5	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.11	3.08
	9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.95	2.89	2.86
	10	4.96	4.1	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.73	2.7
	11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.2	3.09	3.01	2.95	2.9	2.85	2.79	2.72	2.65	2.6	2.57
	12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3	2.91	2.85	2.8	2.75	2.69	2.62	2.54	2.5	2.47
	13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.6	2.53	2.46	2.41	2.38
	14	4.6	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.7	2.65	2.6	2.53	2.46	2.39	2.34	2.31
	15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.9	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.4	2.33	2.28	2.25
	16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.23	2.19
V_2	17	4.45	3.59	3.2	2.96	2.81	2.7	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.18	2.15
	18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.14	2.11
	19	4.38	3.52	3.13	2.9	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07
	20	4.35	3.49	3.1	2.87	2.71	2.6	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.2	2.12	2.07	2.04
	21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.1	2.05	2.01
	22	4.3	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.4	2.34	2.3	2.23	2.15	2.07	2.02	1.98
	23	4.28	3.42	3.03	2.8	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.2	2.13	2.05	2	1.96
	24	4.26	3.4	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.3	2.25	2.18	2.11	2.03	1.97	1.94
	25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.6	2.49	2.4	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92
	26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.94	1.9
	27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.2	2.13	2.06	1.97	1.92	1.88
	28	4.2	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87
	29	4.18	3.33	2.93	2.27	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.1	0.03	1.94	1.89	1.85
	30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.88	1.84
	40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2	1.92	1.84	1.78	1.74
	50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.4	2.29	2.2	2.13	2.07	2.03	1.95	1.87	1.78	1.73	1.69
	60	4	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.1	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.69	1.65
	120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.6	1.55

ภาคผนวก ค-4 ตารางวิเคราะห์ผลทางสถิติ ค่า F ภายใต้ความน่าจะเป็น $\alpha = 0.025$

		V_1														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30
	1	647.79	799.84	864.15	899.6	921.83	937.11	948.2	956.64	963.28	968.63	976.72	984.87	993.08	998.09	1001.4
	2	38.51	39	39.17	39.25	39.3	39.33	39.36	39.37	39.39	39.4	39.41	39.43	39.45	39.46	39.46
	3	17.44	16.04	15.44	15.1	14.88	14.73	14.62	14.54	14.47	14.42	14.34	14.25	14.17	14.12	14.08
	4	12.22	10.65	9.98	9.6	9.36	9.2	9.07	8.98	8.9	8.84	8.75	8.66	8.56	8.5	8.46
	5	10.01	8.43	7.76	7.39	7.15	6.98	6.85	6.76	6.68	6.62	6.52	6.43	6.33	6.27	6.23
	6	8.81	7.26	6.6	6.23	5.99	5.82	5.7	5.6	5.52	5.46	5.37	5.27	5.17	5.11	5.07
	7	8.07	6.54	5.89	5.52	5.29	5.12	4.99	4.9	4.82	4.76	4.67	4.57	4.47	4.4	4.36
	8	7.57	6.06	5.42	5.05	4.82	4.65	4.53	4.43	4.36	4.3	4.2	4.1	4	3.94	3.89
	9	7.21	5.71	5.08	5.72	4.48	4.32	4.2	4.1	4.03	3.96	3.87	3.77	3.67	3.6	3.56
	10	6.94	5.46	4.83	4.47	4.24	4.07	3.95	3.85	3.78	3.72	3.62	3.52	3.42	3.35	3.31
	11	6.72	5.26	4.63	4.28	4.04	3.88	3.76	3.66	3.59	3.53	3.43	3.33	3.23	3.16	3.12
	12	6.55	5.1	4.47	4.12	3.89	3.73	3.61	3.51	3.44	3.37	3.28	3.18	3.07	3.01	2.96
	13	6.41	4.97	4.35	4	3.77	3.6	3.48	3.39	3.31	3.25	3.15	3.05	2.95	2.88	2.84
	14	6.3	4.86	4.24	3.89	3.66	3.5	3.38	3.29	3.21	3.15	3.05	2.95	2.84	2.78	2.73
	15	6.2	4.77	4.15	3.8	3.58	3.41	3.29	3.2	3.12	3.06	2.96	2.86	2.76	2.69	2.64
	16	6.12	4.69	4.08	3.73	3.5	3.34	3.22	3.12	3.05	2.99	2.89	2.79	2.68	2.61	2.57
	17	6.04	4.62	4.01	3.66	3.44	3.28	3.16	3.06	2.98	2.92	2.82	2.72	2.62	2.55	2.5
	18	5.98	4.56	3.95	3.61	3.38	3.22	3.1	3.01	2.93	2.87	2.77	2.67	2.56	2.49	2.44
	19	5.92	4.51	3.9	3.56	3.33	3.17	3.05	2.96	2.88	2.82	2.72	2.62	2.51	2.44	2.39
	20	5.87	4.46	3.86	3.51	3.29	3.13	3.01	2.91	2.84	2.77	2.68	2.57	2.46	2.4	2.35
	21	5.83	4.42	3.82	3.48	3.25	3.09	2.97	2.87	2.8	2.73	2.64	2.53	2.42	2.36	2.31
	22	5.79	4.38	3.78	3.44	3.22	3.05	2.93	2.84	2.76	2.7	2.6	2.5	2.39	2.32	2.27
	23	5.75	4.35	3.75	3.41	3.18	3.02	2.9	2.81	2.73	2.67	2.57	2.47	2.36	2.29	2.24
	24	5.72	4.32	3.72	3.38	3.15	2.99	2.87	2.78	2.7	2.64	2.54	2.44	2.33	2.26	2.21
	25	5.69	4.29	3.69	3.35	3.13	2.97	2.85	2.75	2.68	2.61	2.51	2.41	2.3	2.23	2.18
	26	5.66	4.27	3.67	3.33	3.1	2.94	2.82	2.73	2.65	2.59	2.49	2.39	2.28	2.21	2.16
	27	5.63	4.24	3.65	3.31	3.08	2.92	2.8	2.71	2.63	2.57	2.47	2.36	2.25	2.18	2.13
	28	5.61	4.22	3.63	3.29	3.06	2.9	2.78	2.69	2.61	2.55	2.45	2.34	2.23	2.16	2.11
	29	5.59	4.2	3.61	3.27	3.04	2.88	2.76	2.67	2.59	2.53	2.43	2.32	2.21	2.14	2.09
	30	5.57	4.18	3.59	3.25	3.03	2.87	2.75	2.65	2.57	2.51	2.41	2.31	2.2	2.12	2.07
	40	5.42	4.05	3.46	3.13	2.9	2.74	2.62	2.53	2.45	2.39	2.29	2.18	2.07	1.99	1.94
	50	5.34	3.97	3.39	3.05	2.83	2.67	2.55	2.46	2.38	2.32	2.22	2.17	2.06	1.94	1.87
	60	5.29	3.93	3.34	3.01	2.79	2.63	2.51	2.41	2.33	2.27	2.17	2.06	1.94	1.87	1.82
	120	5.15	3.8	3.23	2.89	2.67	2.52	2.39	2.3	2.22	2.16	2.05	1.94	1.82	1.75	1.69

ภาคผนวก ค-5 ตารางวิเคราะห์ผลทางสถิติ ค่า F ภายใต้ความน่าจะเป็น $\alpha = 0.001$

		V_1														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30
	1	4052	4999	5404	5624	5764	5859	5928	5981	6022	6056	6017	6157	6209	6240	6260
	2	98.5	99	99.2	99.3	99.3	99.3	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.5	99.5	99.5
	3	34.1	30.8	29.5	28.7	28.2	27.9	27.7	27.5	27.3	27.2	27.1	26.9	26.7	26.6	26.5
	4	21.2	18	16.7	16	15.5	15.2	15	14.8	14.7	14.6	14.4	14.2	14	13.9	13.8
	5	16.3	13.3	12.1	11.4	11	10.7	10.5	10.3	10.2	10.1	9.89	9.72	9.55	9.45	9.38
	6	13.8	10.9	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.1	7.98	7.87	7.72	7.56	7.4	7.3	7.23
	7	12.3	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72	6.62	6.47	6.31	6.16	6.06	5.99
	8	11.3	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81	5.67	5.52	5.36	5.26	5.2
	9	10.6	8.02	6.99	6.42	6.06	5.8	5.61	5.47	5.35	5.26	5.11	4.96	4.81	4.71	4.65
	10	10	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.2	5.06	4.94	4.85	4.71	4.56	4.41	4.31	4.25
	11	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54	4.4	4.25	4.1	4.01	3.94
	12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.5	4.39	4.3	4.16	4.01	3.86	3.76	3.7
	13	9.07	6.7	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.3	4.19	4.1	3.96	3.82	3.66	3.57	3.51
	14	8.86	6.541	5.56	5.04	4.69	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.8	3.66	3.51	3.41	3.35
	15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4	3.89	3.8	3.67	3.52	3.37	3.28	3.21
	16	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.2	4.03	3.89	3.78	3.69	3.55	3.41	3.26	3.16	3.1
V_2	17	8.4	6.11	5.19	4.67	4.34	4.1	3.93	3.79	3.68	3.59	3.46	3.31	3.16	3.07	3
	18	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.6	3.51	3.37	3.23	3.08	2.98	2.92
	19	8.18	5.93	5.01	4.5	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52	3.43	3.3	3.15	3	2.91	2.84
	20	8.1	5.85	4.94	4.43	4.1	3.87	3.7	3.56	3.46	3.37	3.23	3.03	2.94	2.84	2.78
	21	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.4	3.31	3.17	3.03	2.88	2.79	2.72
	22	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35	3.26	3.12	2.98	2.83	2.73	2.67
	23	7.88	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.54	3.41	3.3	3.21	3.07	2.93	2.78	2.69	2.62
	24	7.82	5.61	4.72	4.22	3.9	3.67	3.5	3.36	3.26	3.17	3.03	2.89	2.74	2.64	2.58
	25	7.77	5.57	4.68	4.18	3.85	3.63	3.46	3.32	3.22	3.13	2.99	2.85	2.7	2.6	2.54
	26	7.72	5.53	4.64	4.14	3.82	3.59	3.42	3.29	3.18	3.09	2.96	2.81	2.66	2.57	2.5
	27	7.68	5.49	4.6	4.11	3.78	3.56	3.39	3.26	3.15	3.06	2.93	2.78	2.63	2.54	2.47
	28	7.64	5.45	4.57	4.07	3.75	3.563	3.36	3.23	3.12	3.03	2.9	2.75	2.6	2.51	2.44
	29	7.6	5.42	4.54	4.04	3.73	3.5	3.33	3.2	3.09	3	2.87	2.73	2.57	2.48	2.41
	30	7.56	5.39	4.51	4.02	3.7	3.47	3.3	3.17	3.07	2.98	2.84	2.7	2.55	2.45	2.39
	40	7.31	5.18	4.31	3.83	3.51	3.29	3.12	2.99	2.89	2.8	2.66	2.52	2.37	2.27	2.2
	50	7.17	5.06	4.2	3.72	3.41	3.19	3.02	2.89	2.78	2.7	2.56	2.42	2.27	2.17	2.1
	60	7.08	4.98	4.13	3.65	3.34	3.12	2.95	2.82	2.72	2.63	2.5	2.35	2.2	2.1	2.03
	120	6.85	4.79	3.95	3.48	2.17	2.96	2.79	2.66	2.56	2.47	2.34	2.19	2.03	1.93	1.86