

การศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบผิวคมตัดที่มีผลต่อการสึกหรอและค่าความเรียบผิวชิ้นงาน

สามารถ มาลาเนียม

TNI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2564

STUDY ON EFFECT OF COATING MATERIALS ON TOOL WEAR AND SURFACE  
ROUGHNESS

Samart Malaniyom

**TNI**

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
For the Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology  
Graduate School  
Thai-Nichi Institute of Technology  
Academic Year 2021



สามารถ มาลานิยม: การศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบผิวคมตัดที่มีผลต่อการสึกหรอและค่าความเรียบผิวชิ้นงาน อาจารย์ที่ปรึกษา: ดร.ดอน แก้วดก, จำนวน 100 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาอิทธิพลของวัสดุเคลือบผิวคมตัดที่มีผลต่อการสึกหรอและระดับความเรียบผิวชิ้นงานหลังการตัดเฉือนบนวัสดุอินโคเนล เกรด 718 ซึ่งมีคุณสมบัติการกระจายความร้อนต่ำ มีความแข็งแรงสูงยากต่อการตัดเฉือนส่งผลให้คมตัดเกิดการสึกหรออย่างรวดเร็ว การเคลือบผิวคมตัดเพื่อต้านทานการสึกหรอที่อุณหภูมิสูงและเพิ่มความแข็งพื้นผิวถูกนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ การทดลองแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ประกอบด้วยสารเคลือบ ALTiZrSiN, ALTiSiN, ALTiN/TiSiXN และแบบไม่เคลือบผิว ทำการตัดเฉือนบนเครื่องกัด ซี เอ็น ซี ยี่ห้อ Makino รุ่น S33 ด้วยคมตัดแบบเอ็นมิลหัวตรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร แบบ 4 ฟัน ชิ้นงานทดลองเป็นวัสดุอินโคเนล เกรด 718 มีขนาดด้านกว้าง 150 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร หนา 25 มิลลิเมตร ทำการตัดเฉือนแบบกัดตามในทิศทางเป็นเส้นตรง ประเมินการสึกหรอตามมาตรฐาน ISO 3685:1993 และความเรียบผิวตามมาตรฐาน ISO 4287:1997 ปัจจัยหลักการตัดเฉือนประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึก ออกแบบการทดลองด้วยพื้นผิวผลตอบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน นำค่าที่ได้มาทำการทดลองตัดเฉือนเพื่อหาขีดจำกัดการสึกหรอของคมตัดและความเรียบผิวงาน ผลการทดลองพบว่าคมตัดที่เคลือบด้วยสาร ALTiZrSiN ให้ระยะทางการตัดเฉือนสูงสุด 20 เมตร คิดเป็น 4 เท่าของอายุคมตัดแบบไม่เคลือบผิวและมีค่าความเรียบผิวเฉลี่ย 0.2 ไมโครเมตร มีค่าต้นทุนดำเนินการเพิ่มขึ้น 17.5% จากราคาคมตัดภายใต้สภาวะการตัดเฉือนแบบแห้ง ผลที่ได้จากการศึกษาสามารถใช้เป็นแนวทางเพื่อเพิ่มผลผลิตภาพการใช้งานคมตัดในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

บัณฑิตวิทยาลัย  
สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม  
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

SAMART MALANIYOM : STUDY ON COATINGS EFFECT OF CUTTING TOOL ON TOOL WEAR AND SURFACE ROUGHNESS. ADVISOR : DR.DON KAEWDOOK, 100 PP.

This research aims to investigate the effects of coating materials on tool wear and surface roughness after machining of Inconel 718 material. Inconel 718 is a high-strength, corrosion-resistant, low heat dissipation material with high hardness, that is difficult to machine. The extreme properties are the main cause of wear on the cutting edge. A cutting-edge coating to resist high-temperature wear and increase surface hardness was used in this study. The experiments were divided into four groups, consisting of coatings AlTiZrSiN, AlTiSiN, AlTiN/TiSiXN, and uncoated. The experiments were divided into four groups, consisting of coatings AlTiZrSiN, AlTiSiN, AlTiN/TiSiXN, and uncoated. Machining on a Makino CNC milling machine, model S33, with a straight-head end mill, diameter 4 mm., 4 flutes, Inconel material grade 718, width 150 mm., length 200 mm., thickness 25 mm. Straight-line milling. Flank wear is assessed in accordance with ISO 3685:1993 and surface roughness in accordance with ISO 4287:1997. The main machining factors are cutting speed, feed, and depth of cut. Design an experiment with a box-behnken response surface. The obtained values were carried out on machining, a trial to determine the edge wear limits and surface roughness. The results showed that the cutting edge had a maximum cutting distance of 20 m, four times that of the uncoated tool, and an average surface roughness of 0.2  $\mu\text{m}$  under dry machining conditions. There was a 17.5% increase from the original price of the cutting tool. The results of this study can be used as a guide to increase productivity in cutting-edge applications in related industries.

Graduate School

Student's Signature .....

Field of Engineering of Technology

Advisor's Signature .....

Academic Year 2021

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับคำปรึกษาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ดอน แก้วตัก ประธานกรรมการสอบ ศาสตราจารย์ ศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ จาก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรรมการสอบ รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต สุขสวัสดิ์ จากสถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และดร.พิมพ์เพชร สระทอง อุ่นอาจารย์ประจำคณะ วิศวกรรมศาสตร์ รวมถึงอาจารย์ทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้ด้วยที่คอยให้คำแนะนำและให้ความ ช่วยเหลือในทุกขั้นตอนของการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี เพื่อให้งานวิจัยฉบับนี้มีความเรียบร้อย สมบูรณ์

ขอขอบคุณ บริษัท Makino (Thailand) และ บริษัท Mitutoyo (Thailand) สำหรับ คำแนะนำด้านเทคนิคเกี่ยวกับการใช้เครื่องจักรและเครื่องมือวัด และขอขอบคุณ อาจารย์เทอดศักดิ์ ใจงาม และ อาจารย์จิรพงศ์ สุขาทิพย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น สำหรับ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ จนส่งผลให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่นที่ให้การสนับสนุนในส่วนของทุนวิจัย เพื่อพัฒนาผลงานของห้องวิจัย ขอบพระคุณพ่อ แม่ ครอบครัว และเพื่อนๆทุกท่านทั้งผู้ที่กล่าวนาม และไม่ได้กล่าวนาม ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาและสนับสนุนในการทำงาน จนดำเนินงานสำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี

สามารถ มาลานิยม

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญรูป .....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
1.5 แผนงานและระยะเวลาดำเนินงาน .....	3
2 หลักการพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 คุณสมบัติของวัสดุอินโคเนล 718 .....	4
2.2 วัสดุคมตัด .....	6
2.3 เครื่องจักรและเครื่องมือวัด .....	7
2.4 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้ตัดเฉือน .....	10
2.5 วัสดุเคลือบผิวคมตัด .....	12
2.6 งานกัดขึ้นรูปชิ้นงาน .....	14
2.7 การสึกหรอในเครื่องมือกล .....	15
2.8 หลักการของเครื่องมือทดสอบผิววัสดุ .....	20
2.9 การออกแบบทดลอง (Design of Experiment, DOE) .....	22
2.10 การทบทวนวรรณกรรม .....	28

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3	33
3.1	33
3.2	34
3.3	35
3.4	37
3.5	38
3.6	40
3.7	43
3.8	44
4	46
4.1	46
4.2	47
4.3	64
4.4	80
5	87
5.1	87
5.2	89
บรรณานุกรม	90
ภาคผนวก	94
ภาคผนวก ก. โปรแกรมหลักที่ใช้สำหรับการทดลองกัด	95
ภาคผนวก ข. รายการสัญลักษณ์	98
ประวัติย่อผู้วิจัย	100



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินการศึกษาวิจัย.....	2
2.1 อัตราส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุอินโคเนล 718.....	5
2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปร.....	36
3.2 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุชิ้นงานอินโคเนล 718.....	36
3.3 ตารางสารเคลือบผิวคมตัดเอ็นมิล.....	38
3.4 ลำดับขั้นการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ทดลองซ้ำ 2 ครั้ง.....	40
3.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องป้อนเข้าเครื่องกัด.....	42
3.6 ช่วงการทดสอบค่าความเรียบผิวเฉลี่ยมาตรฐาน ISO 4287:1997.....	45
4.1 ผลวัดค่าความหยาบผิวของแต่ละคมตัดตามลำดับการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	47
4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคมตัดไม่เคลือบสาร.....	49
4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสารเคลือบ AlTiZrSiN.....	53
4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคมตัดสารเคลือบ AlTiSiN.....	57
4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคมตัดสารเคลือบ AlTiN/TiSiXN.....	61
4.6 ค่าการหาสภาวะที่เหมาะสมของคมตัดไม่เคลือบสาร.....	65
4.7 ค่าการหาสภาวะที่เหมาะสมของคมตัด AlTiZrSiN.....	66
4.8 ค่าการหาสภาวะที่เหมาะสมของคมตัด AlTiSiN.....	67
4.9 ค่าการหาสภาวะที่เหมาะสมของคมตัดเคลือบด้วยสาร AlTiN/TiSiXN.....	69
4.10 ค่าการหาสภาวะที่เหมาะสมของสารเคลือบและไม่เคลือบ.....	70
4.11 ค่า Ra และค่าการสึกหรอของคมตัดเคลือบด้วยสาร AlTiZrSiN ครั้งที่ 1.....	81
4.12 ค่า Ra และค่าการสึกหรอของคมตัดเคลือบด้วยสาร AlTiZrSiN ครั้งที่ 2.....	82
4.13 ค่า Ra และค่าการสึกหรอของคมตัดเคลือบด้วยสาร AlTiSiN ครั้งที่ 1.....	83
4.14 ค่า Ra และค่าการสึกหรอของคมตัดเคลือบด้วยสาร AlTiSiN ครั้งที่ 2.....	83
4.15 ค่า Ra และค่าการสึกหรอของคมตัดเคลือบด้วยสาร AlTiN/TiSiXN ครั้งที่ 1.....	84
4.16 ค่า Ra และค่าการสึกหรอของคมตัดเคลือบด้วยสาร AlTiN/TiSiXN ครั้งที่ 2.....	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
4.17	ค่า Ra และค่าการสึกหรอของคมตัดเคลือบด้วยสาร Non-coat ครั้งที่ 1.....	85
4.18	ค่า Ra และค่าการสึกหรอของคมตัดเคลือบด้วยสาร Non-coat ครั้งที่ 2.....	86



## สารบัญรูป

รูป	หน้า
1.1 ผลรวมข้อมูลการใช้วัสดุชุบเปอร์อัลลอย.....	1
2.1 อัตราส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุอินโคเนล 718.....	5
2.2 แผ่นวัสดุอินโคเนล 718.....	6
2.3 เครื่องมือตัด End mill 4 ฟัน.....	6
2.4 MAKINO S33 CNC Vertical Machining Center.....	7
2.5 อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือ.....	8
2.6 ปลอกจับ.....	8
2.7 MITTUTOYO Microscope 10X+Vision21X.....	9
2.8 Surface roughness Tester.....	9
2.9 ช่วงการตัดความเร็วสูงการตัดเฉือนวัสดุต่างๆ.....	10
2.10 อัตราความเร็วป้อนคมตัดเฉือนวัสดุต่างๆ.....	11
2.11 สมการคำนวณหาค่า V, N, F, S <sub>z</sub> ของการตัดเฉือน.....	11
2.12 ตารางคุณสมบัติการเคลือบผิวคมตัดด้วยรูปแบบต่างๆ.....	13
2.13 เศษที่ถูกเฉือนออกมา (a) Discontinuous Chips (b) Continuous Chips (c) Continuous Chips with “Built Up Edge”.....	15
2.14 การสึกหรอแบบแนบติด (Adhesive Wear).....	17
2.15 การสึกหรอจากการแพร่ (Diffusion Wear).....	17
2.16 การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear).....	18
2.17 การแบ่งเขตการสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear).....	19
2.18 การวัดขนาดการสึกหรอบนผิวหลบ.....	20
2.19 กราฟแสดงความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นผิว.....	21
2.20 แบบจำลองทั่วไปหรือกระบวนการหรือระบบ.....	22
2.21 อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผล.....	24
2.22 อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล.....	25
2.23 พื้นผิวผลตอบแบบสามมิติ.....	27
2.24 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ.....	27
3.1 Flow chart ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	35

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า	
3.2	วัสดุชิ้นงานอินโคเนล 718.....	36
3.3	ภาพการทดสอบความแข็งของวัสดุอินโคเนล 718.....	37
3.4	ดอกกัดเคลือบสาร ALTiZrSiN , ALTiN/TiSiXN, ALTiSiN และ Non-coat.....	37
3.5	เครื่องกัด ซี เอ็น ซี ยี่ห้อ MAKINO S33.....	38
3.6	เครื่องวัดค่าความหยาบผิว MITTUTOYO รุ่น SJ -210 V.1.008.....	39
3.7	กล้องไมโครสโคป MITTUTOYO รุ่น 10X+ 21X VISION.....	39
3.8	ทิศทางการตัดเฉือนแบบกัดสวน (a) การตัดเฉือนแบบกัดตาม (b).....	43
3.9	ทิศทางการกัดแบบกัดตามชิ้นงาน วัสดุอินโคเนล 718.....	43
3.10	การตัดเฉือนบนเครื่องกัด ซี เอ็น ซี Makino รุ่น S33.....	44
3.11	การวัดความเรียบผิวชิ้นงานด้วยเครื่องวัด MITTUTOYO รุ่น SJ-210.....	44
3.12	การวัดขนาดการสึกหรอบนผิวหลบ.....	45
3.13	การวัดค่าการสึกหรอคมตัดด้วยกล้องไมโครสโคป MITUTOYO รุ่น 10X+ 21X VISION..	46
4.1	กราฟ Parato ของคมตัดไม้เคลือบสาร.....	50
4.2	ค่า Residual ของคมตัดไม้เคลือบสาร.....	50
4.3	กราฟ Main Effects ของคมตัดไม้เคลือบสาร.....	51
4.4	กราฟ Interaction ของคมตัดไม้เคลือบสาร.....	52
4.5	กราฟ Surface Plot ของคมตัดไม้เคลือบสาร.....	52
4.6	กราฟ Parato ของคมตัดที่เคลือบด้วยสาร ALTiZrSiN.....	54
4.7	ค่า Residual ของคมตัดที่เคลือบด้วยสาร ALTiZrSiN.....	54
4.8	กราฟ Main Effects ของคมตัดที่เคลือบด้วยสารALTiZrSiN.....	55
4.9	กราฟ Interaction ของคมตัดที่เคลือบด้วยสาร ALTiZrSiN.....	56
4.10	กราฟ Surface Plot ของคมตัดที่เคลือบด้วยสาร ALTiZrSiN.....	56
4.11	กราฟ Pareto ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiSiN.....	58
4.12	กราฟ Residual ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiSiN.....	58
4.13	กราฟ Main Effects ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiSiN.....	59
4.14	กราฟ Interaction ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiSiN.....	60
4.15	กราฟ Surface Plot ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiSiN.....	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.16 กราฟ Pareto ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiN/TiSiXN.....	62
4.17 กราฟ Residual ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiN/TiSiXN.....	62
4.18 กราฟ Main Effects ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiN/TiSiXN.....	63
4.19 กราฟ Interaction ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiN/TiSiXN.. ..	64
4.20 กราฟ Surface Plot ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiN/TiSiXN.....	64
4.21 กราฟ Optimization Plot ของคมตัดไม่เคลือบสาร.....	66
4.22 กราฟ Optimization Plot ของคมตัดสารเคลือบ ALTiZrSiN.....	67
4.23 กราฟ Optimization Plot ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiSiN.....	68
4.24 กราฟ Optimization Plot ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiN/TiSiXN.....	69
4.25 กราฟ Optimization Plot ของสารเคลือบและไม่เคลือบ.....	71
4.26 กราฟการสึกหรอของแต่ละคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiZrSiN, ALTiSiN, ALTiN/TiSiXN, Non-Coat ต่อระยะตัดเฉือน.....	73
4.27 กราฟความเรียบผิวของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiZrSiN, ALTiSiN, ALTiN/TiSiXN, Non-Coat ต่อระยะตัดเฉือน.....	74
4.28 กราฟ Interval Plot ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiZrSiN, ALTiSiN, ALTiN/TiSiXN, Non-Coat ต่อระยะตัดเฉือน.....	74
4.29 ค่าการกระจายพรีตของคมตัดไม่เคลือบสาร.....	75
4.30 กราฟค่าความหยาบผิวต่อระยะตัดเฉือนของคมตัดไม่เคลือบสาร.....	75
4.31 กราฟรวมการสึกหรอของคมตัดไม่เคลือบสารต่อระยะตัดเฉือน.....	76
4.32 กราฟ Scatterplot คมตัดเคลือบสาร ALTiZrSiN.....	76
4.33 กราฟค่าความหยาบผิวต่อระยะตัดเฉือนของ ALTiZrSiN.....	77
4.34 กราฟการสึกหรอของคมตัด ALTiZrSiN ต่อระยะตัดเฉือน.....	77
4.35 กราฟ Scatterplot คมตัด ALTiSiN.....	78
4.36 กราฟค่าความหยาบผิวต่อระยะตัดเฉือนของ ALTiSiN.....	78
4.37 กราฟการสึกหรอของคมตัด ALTiSiN ต่อระยะตัดเฉือน.....	79
4.38 กราฟ Scatterplot คมตัด ALTiN/TiSiXN.....	79

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.39 กราฟค่าความหยาบผิวต่อระยะตัดเฉือนของ ALTiN/TiSiXN.....	80
4.40 กราฟการสึกหรอของคมตัด ALTiN/TiSiXN ต่อระยะตัดเฉือน.....	80
4.41 ภาพขนาดของการสึกหรอสูงสุดและค่าระยะการกัดเฉลี่ย.....	87
5.1 ภาพอัตราส่วนอายุใช้งานคมตัดหลังถูกเคลือบสารในการตัดเฉือน อินโคเนล 718.....	89
5.2 ความเรียบผิวเฉลี่ยของสารเคลือบคมตัดในการตัดเฉือน อินโคเนล 718.....	89

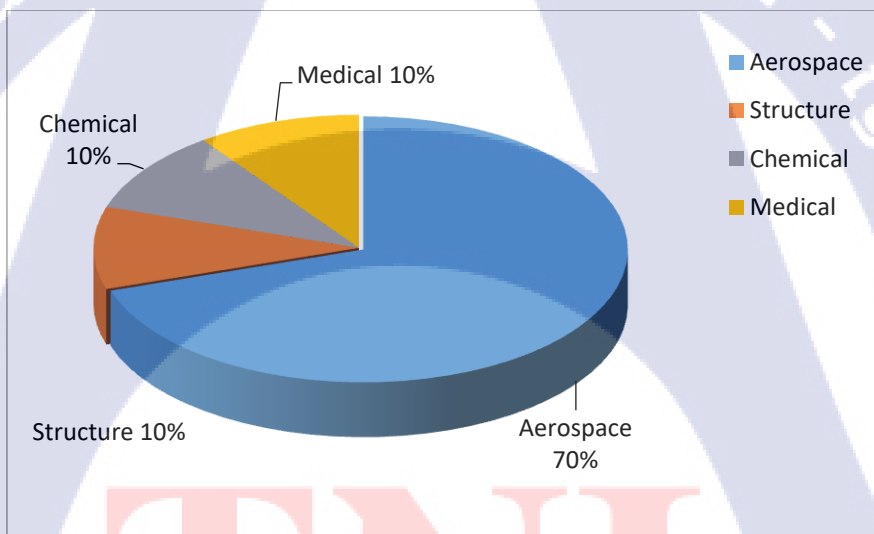


## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมการบินและการขนส่งทางอากาศเป็น 1 ใน 10 อุตสาหกรรมเป้าหมายที่จะช่วยผลักดันให้มีการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศตามยุทธศาสตร์การพัฒนาอุตสาหกรรมไทยแลนด์ 4.0 ที่มีต่ออุตสาหกรรมการบินและการขนส่ง แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) การผลิตชิ้นส่วนอากาศยาน เช่น ชุดฐานล้อ ล้อและชุดเบรก 2) วัสดุคอมโพสิต ยางเครื่องบิน คาร์บอนไฟเบอร์สำหรับผลิตปีกเครื่องบิน หรือวัสดุตั้งต้นต่างๆ เป็นต้น 3) การซ่อมบำรุงอากาศยานและชิ้นส่วน เช่น งานซ่อมลำตัว งานซ่อมชิ้นส่วน เช่น ชุดฐานล้อ ล้อและชุดเบรก ระบบเครื่องบินไฟสำรอง ระบบจ่ายน้ำมันและระบบควบคุม อุปกรณ์ล้อและบันทึง และงานซ่อมเครื่องยนต์ เป็นต้น [1]



รูปที่ 1.1 ผลรวมข้อมูลการใช้วัสดุซูเปอร์อัลลอย [2]

อินโคเนล เกรด 718 เป็นหนึ่งในวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงนิยมใช้ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์เจ็ทในอากาศยานทั้งพาณิชย์และหน่วยงานทหาร ด้วยคุณสมบัติที่มีความแข็งแรงสูง การกระจายความร้อนต่ำ และมีความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้การตัดเฉือนทำได้ยากและสิ้นเปลืองคมตัด [3, 4] ในการศึกษานี้ได้ทำการทดลองตัดวัสดุอินโคเนล เกรด 718 ด้วยคมตัดทำจากคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยสารเคลือบแบบ  $AlTiZrSiN$ ,  $AlTiSiN$ ,  $AlTiN/TiSiN$  และ Non-Coat เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบผิวคมตัดที่มีผลต่อการสึกหรอและความเรียบผิวชิ้นงานบนการตัดเฉือนด้วยเครื่องกัด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบผิวคมตัดที่มีผลต่อการสึกหรอและค่าความเรียบผิวชิ้นงาน โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 กระบวนการตัดเฉือนบนเครื่องกัด ซี เอ็น ซี ยี่ห้อ Makino S33 Max. Speed 12,000 RPM

1.3.2 วัสดุคมตัดเป็นเอ็นมิลคาร์ไบด์ปลายหน้าตัดตรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร แบบ 4 ฟัน ความยาวรวม 50 มิลลิเมตร

1.3.3 วัสดุชิ้นงานอินโคเนล เกรด 718 ขนาดกว้าง 150 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร หน้า 25 มิลลิเมตร

1.3.4 การตรวจวัดระดับการสึกหรอของคมตัดทุกระยะทางการตัดเฉือน 1 เมตร

1.3.5 การตรวจวัดความเรียบผิวของชิ้นงานทุกระยะทางการตัดเฉือน 1 เมตร

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เราสามารถที่จะเลือกการใช้งานวิธีการเคลือบผิวคมตัดของตัวเครื่องมือตัด End mill ได้เหมาะสมสำหรับคมตัดที่ใช้ตัดเฉือนวัสดุอินโคเนล 718 ทำให้เกิดความคุ้มค่าด้านอายุการใช้งานในการเปลี่ยนคมตัด ลดต้นทุนคมตัด และเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตชิ้นส่วนอากาศยานในประเทศไทย

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY





## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

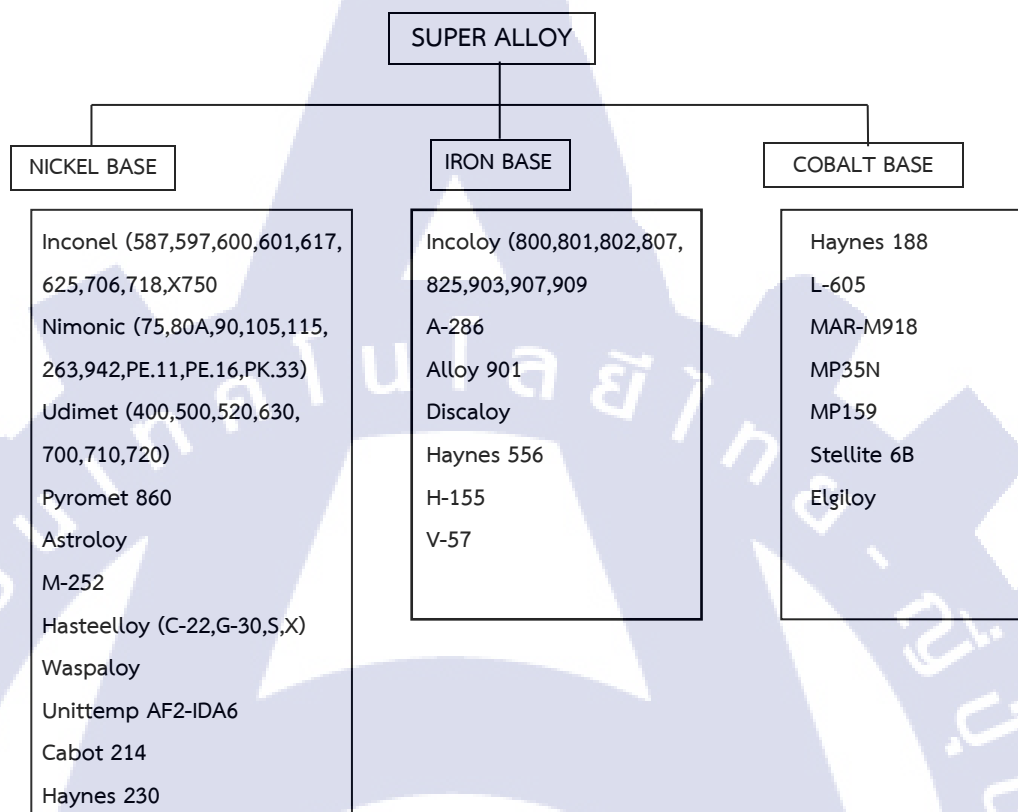
ในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของอินโคเนล 718 (Inconel 718) พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้ตัดเฉือนวัสดุและอิทธิพลของวัสดุเคลือบผิวคมตัดที่มีผลต่อการสึกหรอและคุณภาพผิว โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อที่มาจากปัจจัยหลักๆ อาทิเช่น ปัจจัยที่มาจาก การปรับตั้งพารามิเตอร์การตัดเฉือน ปัจจัยที่มาจาก การเคลือบผิวคมตัด ปัจจัยที่มาจาก เครื่องมือตัดที่ใช้ ปัจจัยที่มาจาก ผู้ปฏิบัติงาน รวมถึงการแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องชิ้นงาน เป็นต้น การทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

- คุณสมบัติของวัสดุอินโคเนล 718
- วัสดุคมตัด
- เครื่องจักรและเครื่องมือวัด
- พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้ตัดเฉือน
- วัสดุเคลือบผิวคมตัด
- งานกัดขึ้นรูปชิ้นงาน
- การสึกหรอคมตัด
- หลักการของเครื่องมือทดสอบผิววัสดุ
- การออกแบบทดลอง (Design of Experiment, DOE)
- การทบทวนวรรณกรรม

#### 2.1 คุณสมบัติของวัสดุอินโคเนล 718

อินโคเนล เกรด 718 เป็นหนึ่งในโลหะผสมที่สำคัญในหมู่โลหะผสมนิกเกิล พบในหลายอุตสาหกรรมเนื่องจากใช้กันอย่างแพร่หลายในงานระดับไฮเอนด์เช่น ส่วนประกอบเครื่องยนต์เจ็ท แก๊สกังหัน ปัมป์ จรวด ยานอวกาศ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ การผลิตเครื่องบิน [2-5] การใช้งานทางการแพทย์ทางทะเล การใช้งานอุปกรณ์ควบคุมมลพิษ ภาคยานยนต์ ฯลฯ ซึ่งในวงการอุตสาหกรรมเรานิยมเรียกโลหะผสมนี้ว่าซูเปอร์อัลลอยเพราะมีความแข็งแรงและความต้านทานต่อการย่อยสลายของพื้นผิว ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงขึ้น ความแข็งแรง อัตราการชุบแข็งสูงที่อัตราความเครียดในการตัดเฉือนนำไปสู่แรงในการตัดเฉือนสูง การแพร่กระจายความร้อนต่ำนำไปสู่อุณหภูมิสูง การปรากฏตัวของอนุภาคคาร์ไบด์ที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง และมีแนวโน้มในการเชื่อมกับคมตัดและก่อตัวขึ้นเป็นรอยรูน

ดังนั้นจึงสามารถจัดได้ว่าเป็นวัสดุที่ตัดเฉือนแปรรูปทรงได้ยาก [6] มีการจำแนกประเภทของโลหะผสมเหล่านี้ได้รับในรูปที่ 2.1 [7]



รูปที่ 2.1 ประเภทชนิดของฐานโลหะผสมวัสดุซูเปอร์อัลลอย [7]

อินโคเนล 718 เป็นโลหะผสมฐานนิกเกิลประกอบด้วยนิกเกิลอย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุอินโคเนล เกรด 718

องค์ประกอบทางเคมี % Inconel 718						
C	Cr	Ni	Mn	Al	P	Co
0.03	19.55	51.12	0.34	0.36	0.01	0.36
S	Mo	Ti	Nb	Fe		
0.01	2.97	0.81	5.08	REM		

แต่เนื่องจากลักษณะเฉพาะเช่นการนำความร้อนต่ำความแข็งแรงความสัมพัทธ์ที่จะทำปฏิกิริยากับวัสดุ เครื่องมือตัด ฯลฯ ทำให้ยากต่อการตัดเฉือน ดังนั้นจึงเป็นที่ทราบกันว่าซูเปอร์อัลลอยด์ที่เป็นนิกเกิล เป็นหนึ่งในวัสดุที่ยากที่สุดในการกัดกลึง จัดอยู่ในประเภท " วัสดุที่ตัดยาก " การตัดเฉือนที่คุ้มค่า พร้อมการสร้างพื้นผิวที่ดี จึงเป็นสิ่งที่ท้าทายให้กับวิศวกรการผลิตในทางปฏิบัติ [4-9]

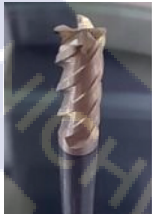
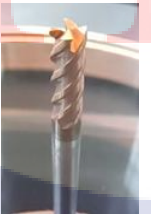
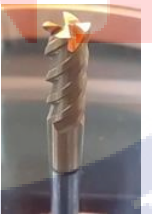



รูปที่ 2.2 แผ่นวัสดุอินโคเนล 718

ในงานวิจัยนี้ใช้ชิ้นทดสอบเป็นวัสดุโลหะผสมฐานนิกเกิลซูเปอร์อัลลอย อินโคเนล เกรด 718 ขนาด กว้าง 150 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตรหนา 25 มิลลิเมตร

## 2.2. วัสดุคมตัด

เป็นเอ็นมิลคาร์ไบด์ปลายหน้าตัดตรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร แบบ 4 ฟัน ความ ยาวรวม 50 มิลลิเมตรนำมาเคลือบผิวคมตัดด้วยวัสดุสารเคลือบแบบ  $AlTiZrSiN$ ,  $AlTiSiN$ ,  $AlTiN/TiSiXN$  และ Non-Coat

$AlTiZrSiN$	$AlTiN/TiSiXN$	$AlTiSiN$	Non-coat
			

รูปที่ 2.3 เครื่องมือตัด End mill 4 ฟัน

## 2.3 เครื่องจักรและเครื่องมือวัด

### 2.3.1 เครื่องกัด ซี เอ็น ซี

กระบวนการตัดเฉือนบนเครื่องกัด ซี เอ็น ซี ยี่ห้อ Makino S33 Max. Speed 12,000 rpm เป็นเครื่องจักรอัตโนมัติที่มีการควบคุมการเคลื่อนที่ของแท่นเลื่อน และเครื่องมือตัดเฉือนโดยใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาควบคุมการทำงานเพื่อให้เกิดการตัดเฉือนวัสดุให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการ เครื่องกัดซีเอ็นซีมีชุดคอนโทรลซึ่งจะทำการป้อนคำสั่ง G Code และ M Code เพื่อกำหนดขั้นตอนการทำงาน การเลือกใช้เครื่องมือตัด การควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ การควบคุมอัตราการป้อน และความเร็วรอบ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญใน การควบคุมปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลอง ข้อมูลจำเพาะของเครื่องกัดมีความเร็วรอบสูงสุดที่ 12,000 รอบต่อนาที



Table: 800 x 450 mm (600 x 450 mm)  
 X: 650 mm Y: 500 mm Z: 450 mm  
 Spindle RPM. 12,000.  
 Spindle Taper. CAT40.  
 Rapid Traverse. 40,000 mm/min.  
 Cutting Feedrate. 1,575 in/min.  
 Maximum Workpiece. (23.6" x 15.7" x 16.5") pallet.  
 Maximum Payload. 880 lbs (pallet)  
 ATC Capacity. 20 (30 opt)  
 Tool to Tool. 1.3 secs.

### รูปที่ 2.4 Makino S33 CNC Vertical Machining Center

### 2.3.2 อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือสำหรับเครื่องกัดซีเอ็นซี

อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือ (Tools Holder) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการจับยึดเครื่องมือตัด เช่น ยึด End Mill ดอกตัดाप และดอกสว่าน เป็นต้น ดังรูปที่ 2.5 ในการจับยึดเครื่องมือตัดบางชนิดอาจจะต้องใช้ปลอกจับ (Collet) มาช่วย ดังรูปที่ 2.6 โดยลักษณะของปลอกจับจะมีหลายขนาด ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องมือตัดที่ใช้งาน



รูปที่ 2.5 อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือ (Tools Holder)



รูปที่ 2.6 ปลอกจับ (Collet)

### 2.3.3 เครื่องวัดที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องวัดกล้องขยายยี่ห้อ MITUTOYO Measuring Microscope รุ่น 10X + 21X



รูปที่ 2.7 MITTUTOYO Microscope 10X+Vision21X

2.3.4 อุปกรณ์สำหรับการวัดค่าความหยาบผิว (Surface roughness Tester) รุ่น SJ -210

Mitutoyo Surftest SJ-210 Series Portable Surface Roughness Testers

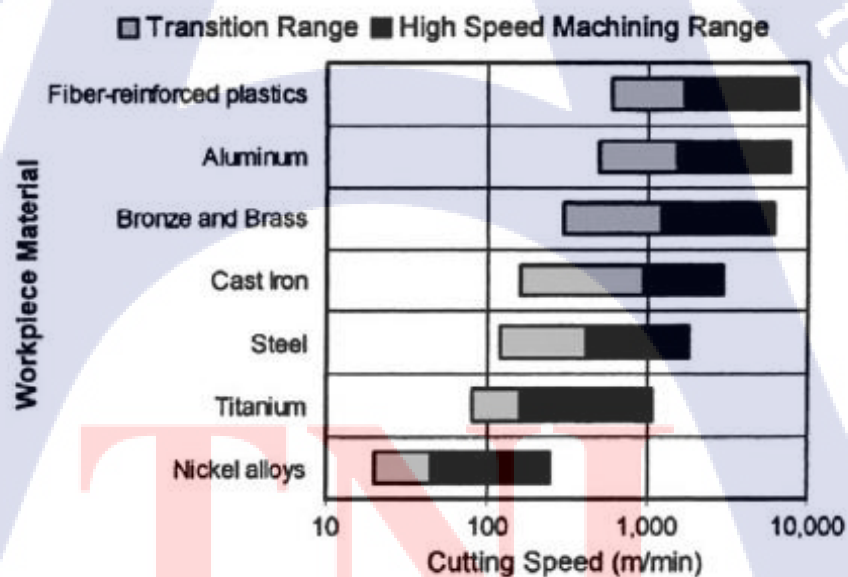


รูปที่ 2.8 Surface roughness Tester

## 2.4 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้ตัดเฉือน

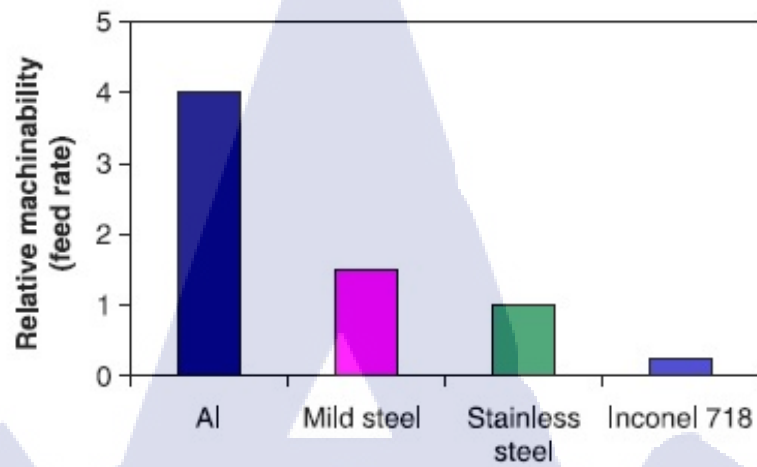
การตัดเฉือนวัสดุที่แข็งและเป็นโลหะผสมที่มีส่วนประกอบของโลหะหลายๆจำพวกผสมอยู่ด้วยกันตามตารางที่ 2.1 ก็ถือว่าเป็นงานที่ซับซ้อนที่ต้องกำหนดและหาการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ว่าถูกต้องหรือเหมาะสมกับลักษณะวัสดุที่จะตัดเฉือนหรือไม่ มีการศึกษาทดลองและกำหนดช่วงความเร็วในการตัดเฉือนของวัสดุต่างๆในรูปที่ 2.9 [9] และอัตราความเร็วของการป้อนคมตัดรูปที่ 2.10 [10] ซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการกัดวัสดุอินโคเนล เกรด 718 และมีอิทธิพลต่อการทนทานของเครื่องมือตัด ตลอดจนคุณภาพของชิ้นงานที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพผิวของชิ้นงานนั้นมีอยู่ด้วยกัน 3 กลุ่มใหญ่ๆคือ [3] มีสมการพื้นฐานในการคำนวณหาค่าที่สัมพันธ์กันดังสมการที่แสดงดังรูปที่ 2.11

1. Cutting speed (m/min)
2. Feed rate (mm/min)
3. Cutting depths (mm)



รูปที่ 2.9 ช่วงการตัดความเร็วสูงการตัดเฉือนวัสดุต่างๆ [9]





รูปที่ 2.10 อัตราความเร็วป้อนคมตัดเฉือนวัสดุต่างๆ [9]

**1** Velocity : V (m/min)  
切削速度 (周速)

$$V = \frac{\pi \times D \times N}{1000}$$

$\pi=3.14$  (the circular constant)      $\pi=3.14$  (圓周率)  
 D=Outside Diameter     D=銑刀直徑 (mm)  
 N=Spindle Speed     N=回轉數 (r.p.m)

**2** Spindle Speed : N (r.p.m)  
回轉數

$$N = \frac{1000 \times V}{\pi \times D}$$

V=Velocity     V=切削速度 (m/min)  
 $\pi=3.14$  (the circular constant)      $\pi=3.14$  (圓周率)  
 D=Outside Diameter     D=銑刀直徑 (mm)

**3** Feed : F (mm/min)  
進給速度

$$F = N \times Z \times S_z$$

N=Spindle Speed     N=回轉數 ( r.p.m)  
 Z=Number of flutes     Z=刃數  
 S<sub>z</sub>=Feed per tooth     S<sub>z</sub>=每一刃的進刀量 (mm/刃)

**4** Feed per tooth : (mm)  
每一刃的進刀量 (刃)

$$S_z = \frac{F}{N \times Z}$$

F=Feed     F=進給速度 (mm/min)  
 N=Spindle Speed     N=回轉數 (r.p.m)  
 Z=Number of flutes     Z=刃數

รูปที่ 2.11 สมการคำนวณหาค่า V, N, F, S<sub>z</sub> ของการตัดเฉือน

## 2.5 วัสดุเคลือบผิวคมตัด

ในอุตสาหกรรมเครื่องมือตัดเฉือนได้มีการปรับปรุงคุณภาพเครื่องมือตัดโดยมีออกแบบเครื่องมือตัดให้เหมาะสมกับวัสดุมากที่สุดและยังมีการเคลือบผิวคมตัดเพื่อเพิ่มความคงทนในการใช้งานเครื่องมือตัดให้สามารถตัดวัสดุที่มีความแข็งได้ยาวนานขึ้นในการวิจัยนี้ได้รับรวบรวมข้อมูลเนื้อหาของผู้ผลิตที่รับจ้างในการเคลือบผิวคมตัดในแบบต่างๆที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการตัดเฉือนในการผลิตชิ้นรูปวัสดุโลหะ โลหะผสมนับตั้งแต่การถือกำเนิดของเครื่องมือเคลือบแข็งในต้นปี 1970 โดยผู้รับจ้างบางรายมีความสามารถเครื่องเคลือบผิวเครื่องมือขึ้นมาเองโดยมีการค้นคว้าเทคโนโลยีการสะสมไอสารเคมี (CVD) และเทคโนโลยีการสะสมไอทางกายภาพ (PVD) และพัฒนาอย่างต่อเนื่องซึ่งได้เปิดบทบาทใหม่ในประวัติศาสตร์ของการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องมือ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่ไม่เคลือบผิวเครื่องมือเคลือบมีข้อดีที่สำคัญสามารถปรับปรุงอายุของเครื่องมือตัดได้อย่างมาก ปรับปรุงประสิทธิภาพการตัดอย่างมีประสิทธิภาพ ปรับปรุงความแม่นยำในการตัดเฉือนและคุณภาพพื้นผิวของชิ้นงานกลึง ลดการใช้วัสดุเครื่องมืออย่างมีประสิทธิภาพลดต้นทุนการประมวลผล ลดการใช้น้ำหล่อเย็นลดค่าใช้จ่ายเอื้อต่อการปกป้องสิ่งแวดล้อม

### 2.5.1 การเคลือบผิวคมตัดที่นิยมใช้กันทั่วไป

2.5.1.1 การเคลือบไททาเนียมไนไตรด์: ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) เป็นการเคลือบ PVD ทั่วไปซึ่งสามารถปรับปรุงความแข็งของเครื่องมือและมีอุณหภูมิสูงในการเกิดออกซิเดชันการเคลือบสามารถใช้กับเครื่องมือตัดเหล็กความเร็วสูงหรือเครื่องมือขึ้นรูปเพื่อให้ได้ผลลัพธ์การตัดเฉือนที่ดี

2.5.1.2 การเคลือบโครเมียมไนไตรด์: การเคลือบ CrN มีความต้านทานการยึดเกาะที่ดีทำให้การเคลือบที่ต้องการในการประมวลผลของร่องอกเนื่องอก ด้วยการเคลือบที่มองไม่เห็นนี้คุณสมบัติการตัดเฉือนของเครื่องมือ HSS หรือคาร์ไบด์และเครื่องมือขึ้นรูปจะได้รับการปรับปรุงอย่างมาก

2.5.1.3 การเคลือบเพชร: เคลือบเพชร CVD สำหรับเครื่องมือตัดการประมวลผลวัสดุที่ไม่ใช่เหล็กให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดการประมวลผลของกราไฟท์คอมโพสิตเมทริกซ์โลหะ (MMC) โลหะผสมอลูมิเนียมซิลิกอนสูงและอื่นๆ อีกมากมาย หมายเหตุ: เครื่องมือที่เคลือบเพชรบริสุทธิ์ไม่สามารถใช้สำหรับการแปรรูปเหล็กได้เนื่องจากเหล็กที่ผ่านการแปรรูปจะทำให้เกิดความร้อนในการตัดจำนวนมากและทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้ชั้นกาวติดระหว่างชั้นเคลือบและเครื่องมือตัด

2.5.1.4 การเคลือบไททาเนียมไนไตรด์: องค์ประกอบคาร์บอนที่เพิ่มในการเคลือบไททาเนียมไนไตรด์ (TiCN) สามารถปรับปรุงความแข็งของเครื่องมือและรับการหล่อลื่นพื้นผิวที่ดีขึ้นทำให้เป็นเครื่องมือเคลือบที่เหมาะสมสำหรับเครื่องมือเหล็กความเร็วสูง

2.5.1.5 อลูมิเนียมไนไตรด์ / ไทเทเนียมไนไตรด์ / อลูมิเนียมไนไตรด์เคลือบ (TiAlN/AlTiN): ชั้นอลูมิเนียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นในการเคลือบ TiAlN / AlTiN สามารถปรับปรุงคุณภาพการใช้งานที่อุณหภูมิสูงของเครื่องมือได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเคลือบสามารถใช้กับเครื่องมือตัดคาร์ไบด์ที่ใช้เป็นหลักสำหรับการตัดแบบแห้งหรือแบบกึ่งแห้ง การเคลือบ AlTiN ให้ความแข็งแรงสูงกว่าการเคลือบ TiAlN ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมที่มีอยู่ในการเคลือบ ทำให้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเคลือบผิวที่มีศักยภาพสำหรับการตัดความเร็วสูง

2.5.1.6 การเคลือบเหมือนเพชร (DLC): DLC มีคุณสมบัติที่ยอดเยี่ยมมากมาย ความแข็งแรงสูง -60GPa หรือ Hv6000 หรือสูงกว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำความหนาแน่นของฟิล์มดีเยี่ยม เสถียรภาพทางเคมีที่ดีและคุณสมบัติทางแสง การเคลือบ DLC ที่ใช้กับเครื่องมือนั้นแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่พิเศษกว่าการเคลือบแบบแข็งอื่น ๆ เครื่องมือที่เคลือบด้วย DLC ส่วนใหญ่ได้แก่ การตัดกราไฟต์การตัดโลหะที่ไม่ใช่เหล็กชนิดต่าง ๆ (เช่นอลูมิเนียมอัลลอยด์โลหะผสมทองแดง ฯลฯ) วัสดุที่ไม่ใช่โลหะแข็ง (เช่นอะคริลิกใยแก้ววัสดุ PCB) [11-13]

BALINIT®	Coating material	Coating hardness $H_v$ (GPa)	Compressive stress (GPa)	Max. service temperature (°C)	Coating temperature (°C)	Coating colour
A	TiN	30 +/-3	-2 +/-1	600	< 500	golden yellow
B	TiCN	37 +/-3	-3 +/-1	400	< 500	blue grey
ALCRONA PRO	AlCrN-based	36 +/-3	-3 +/-1	1,100	< 500	bright grey
ALTENSA	AlCrN-based	40 +/-3	-2 +/-1	1,100	< 500	light grey
ALNOVA	AlCrN-based	38 +/-3	-3 +/-1	1,100	< 500	light grey
LATUMA	AlTiN-based	35 +/-3	-3 +/-1	1,000	< 500	grey
PERTURA	AlTiN-based	35 +/- 3	-4 +/-1	1,000	< 600	aubergine grey
TISAFLEX	AlTiN/TiSiN	38 +/-5	-5 +/-1	1,100	< 600	bronze
DIAMOND MICRO	C (sp <sup>3</sup> ) micro-crystalline	80 – 100	-	600	< 900	grey
DIAMOND NANO	C (sp <sup>3</sup> ) nano-crystalline	80 – 100	-	600	< 900	grey
HARD CARBON	ta-C	50 – 60	-	500	< 150	black rainbow

รูปที่ 2.12 ตารางคุณสมบัติการเคลือบผิวคมตัดด้วยรูปแบบต่างๆ [12]

## 2.6 งานกัดขึ้นรูปชิ้นงาน

การกัดขึ้นรูป (Milling) เป็นกระบวนการตัดแต่งแปรรูปชิ้นงานด้วยการตัดเฉือนเนื้อวัสดุที่บอกจากชิ้นงานจนกลายเป็นรูปทรงที่ต้องการ โดยการตัดเฉือนจะเกิดขึ้นจากการหมุนมีดกัดงานหรือคัตติ้งทูล (Cutting Tool) ให้มีความเร็วที่เหมาะสม ซึ่งทูลจะมีลักษณะคล้ายกับดอกสว่านสำหรับเจาะงาน แต่มีคมตัดที่สามารถตัดเฉือนจากด้านข้างได้ เมื่อคมตัดสัมผัสกับชิ้นงานก็จะตัดเฉือนเนื้อชิ้นงานออกไปทีละน้อย เป็นหนึ่งในกระบวนการหลักที่ปัจจุบันใช้ในการแปรรูปและผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม สามารถใช้กับวัสดุได้หลากหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นการกัดขึ้นรูปเหล็ก อะลูมิเนียม ทองแดง ไม้ พลาสติก กราไฟต์ ฯลฯ

เครื่องกัด (Milling Machine) คือ เครื่องจักรที่ใช้สำหรับกัดขึ้นรูป โดยหลักการ เครื่องกัดจะประกอบด้วย แกนหมุน (Spindle) คือ ส่วนที่ทำหน้าที่จับยึดทูลและขับเคลื่อนให้ทูลหมุนด้วยความเร็วสูง และ โต๊ะจับชิ้นงาน (Work Table) คือ โต๊ะที่ใช้วางและจับยึดชิ้นงานให้มั่นคง เพื่อไม่ใช้ชิ้นงานขยับหนีเมื่อเกิดแรงจากการกัดขึ้นรูป

ในการใช้งานเครื่องกัด เมื่อติดตั้งทูลที่หัว Spindle และชิ้นงานบนโต๊ะวางชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว ผู้ควบคุมเครื่องจะปรับความเร็วของ Spindle ให้เหมาะสมกับชนิดของทูลและชิ้นงานที่ใช้ และปรับตำแหน่งความสูงของ Spindle ขึ้นลง (Z-axis) ให้ได้ความสูงตามที่จะกัดขึ้นรูป จากนั้นจะใช้มีดหมุนในการควบคุมโต๊ะวางชิ้นงานให้เคลื่อนที่เข้าหาทูล ทั้งในแนวยาว (X-axis) และแนวขวาง (Y-axis) เพื่อให้ทูลกัดขึ้นรูปเป็นรูปทรงตามต้องการ และยังสามารถตั้งค่าให้โต๊ะงานเคลื่อนที่เป็นแนวตรงเพื่อป้อนชิ้นงานเข้าหาทูลกัดงาน (feed) ด้วยความเร็วคงที่ได้ เพื่อให้สภาพผิวชิ้นงานที่ถูกกัดมีความเรียบเนียนสม่ำเสมอตลอดชิ้นงานได้

เครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ (Machining Center) คือ เครื่องกัดขึ้นรูปแบบอัตโนมัติ ซึ่งต่างจากเครื่องกัดธรรมดา (Milling Machine) ที่การควบคุมการเคลื่อนที่และการทำงานต่าง ๆ จะควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ (Computer Numerical Control, CNC) รวมถึงสามารถเปลี่ยนชนิดของทูลได้อย่างอัตโนมัติ (Automatic Tool Change, ATC) ทำให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องจนจบกระบวนการทำงานโดยไม่ต้องใช้คนในการควบคุมการเคลื่อนที่ ไม่ต้องเสียเวลาในการหยุดเครื่องจักรเพื่อให้ผู้ควบคุมเครื่องจักรเปลี่ยนทูลด้วยมือเหมือนเครื่องกัดแบบธรรมดา ดังนั้น แมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ หรือที่นิยมเรียกกันสั้น ๆ ว่าเครื่องซีเอ็นซี จึงเป็นที่นิยมในปัจจุบัน เหมาะกับการใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตทั้งในประเทศไทยและทั่วโลก เนื่องจากช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต ลดความผิดพลาด และที่สำคัญยังลดต้นทุนในการจ้างแรงงานอีกด้วย

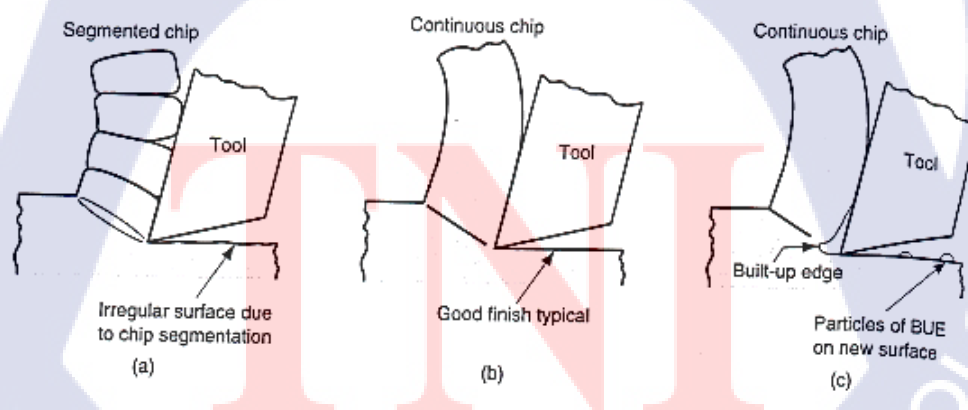
เครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ 3 แกน แบบแนวตั้ง (3-axis Vertical Machining Center, VMC) ซึ่งเป็นเครื่องแบบพื้นฐานที่นิยมใช้มากที่สุด แน่แน่นอนว่ายังมีเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ประเภทอื่น เช่น เครื่องแบบแนวนอน (Horizontal Machining Center, HMC) ที่แกน Spindle ติดตั้งใน

แนวอนชนานกับโต๊ะวางชิ้นงาน และโต๊ะวางชิ้นงานสามารถหมุนได้รอบตัว เพื่อให้ Spindle สามารถกัดชิ้นงานได้รอบด้าน กลายเป็นเครื่อง 4 แกน หรือไม่ว่าจะเป็นเครื่อง 5 แกนที่โต๊ะวางชิ้นงานทั้งสามารถหมุนได้รอบตัว และยังสามารถยกชิ้นงานให้เอียงองศาได้ จึงมีแกน C และแกน A เพิ่มเข้ามาบวกกับของเดิมแกน X Y และ Z รวมทั้งหมดกลายเป็น 5 แกน เหมาะสำหรับกัดงานที่มีความซับซ้อน ต้องเอียงชิ้นงานหลบมุมมิด เช่นงานกัดชิ้นรูปใบพัด (Turbine Blade) รูปแกะสลัก ชิ้นส่วนอากาศยาน ฯลฯ [14] ด้วยคุณสมบัติดังได้กล่าวมาแล้ว กระบวนการกัดจึงมักนิยมใช้กับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการผลิตแบบอื่น ๆ มาแล้ว เช่น งานหล่อ (Casting) หรือการขึ้นรูปขนาดใหญ่ ตัวอย่างเช่น การตีขึ้นรูป (Forging) โดยรูปร่างทั่วไปของชิ้นงานจะถูกผลิตโดยกระบวนการอื่นและใช้กระบวนการกัดในการผลิตชิ้นงานสำเร็จให้มีขนาดรูปร่างที่ถูกต้องและมีผิวงานตามที่ต้องการ [15]

## 2.7 การสึกหรอในเครื่องมือกล

การสึกหรอของเครื่องมือตัด (Tool Wear) คือ การใช้งานจนกระทั่งเครื่องมือตัดหมดสภาพการใช้งานระหว่างการตัดเฉือนที่ถูกกระทำด้วยพลังงานความร้อนและพลังงานกล

ในการศึกษาการสึกหรอของเครื่องมือกล เราจะต้องเข้าใจศัพท์ของการตัดเฉือน ซึ่งได้สรุปไว้ดังรูปที่ 2.13 ในรูปประกอบจะเห็นว่าชิป (Chip) หรือเศษวัสดุที่ถูกตัดเฉือนจะหลุดออกมาจากผิวชิ้นงาน โดยเคลื่อนที่ออกทางด้านหน้าเครื่องมือตัดด้วยแรงเฉือนบนเนื้อชิ้นงานที่กระทำอย่างต่อเนื่องชิปที่ถูกเฉือนออกมาสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่



รูปที่ 2.13 ชิปที่ถูกเฉือนออกมา (a) Discontinuous Chips (b) Continuous Chips  
(c) Continuous Chips with “Built Up Edge”

1. ชิปสั้นไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Chips) ชิปลักษณะนี้เกิดจากการตัดเฉือนโลหะที่มีความยืดหยุ่นไม่สูงมาก ชิปจะเกิดจากการแปรรูปแบบพลาสติกเพียงเล็กน้อยแล้วจึงแตกหลุดออกจึงมีลักษณะสั้นและไม่ต่อเนื่อง ถ้าโลหะที่นำมากัดแต่งมีเฟสที่ 2 ในโครงสร้าง เช่น อนุภาคของสารประกอบซิลไฟด์ ก็จะสามารถช่วยตัดชิปให้สั้นลงได้ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุม Built Up Edge ให้อยู่ในปริมาณที่ไม่สูงมากได้เช่นกัน

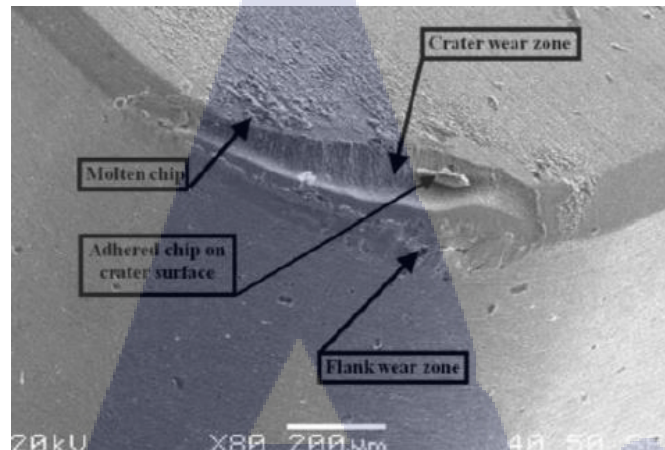
2. ชิปยาวต่อเนื่อง (Continuous Chips) ชิปลักษณะนี้ เกิดจากการเฉือนหรือกัดแต่งโลหะที่มีความยืดหยุ่นสูง (Ductile) ในขณะที่เนื้อโลหะถูกกัดออกมาเป็นชิปจะมีการแปรรูปแบบพลาสติกของโลหะที่นำมากัดแต่งค่อนข้างมาก ทำให้มีความร้อนจากการแปรรูปเกิดขึ้น ชิปที่ได้มีลักษณะโค้งยาวคล้ายสปริง

3. ชิปยาวต่อเนื่องและมี Built Up Edge เกิดขึ้นคล้ายกับชิปยาวต่อเนื่องในข้อแรก (Continuous Chips with “Built Up Edge”) แต่เมื่อชิปแตกหลุดออกจากชิ้นงานจะทำให้ผิวชิ้นงานที่มีรอยแตก ซึ่งเป็นผิวใหม่ที่ยังสะอาดปราศจากสารประกอบใด ๆ และมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีสูงสามารถเชื่อมติดไปบนผิวของเครื่องมือกล กลายเป็น Built Up Edge ได้ในการใช้งานจะต้องระวังไม่ให้เกิด Built Up Edge ที่หนาจนเกินไป เนื่องจากการที่ผิวเครื่องมือกลมีเศษวัสดุที่ผ่านการแปรรูปแบบพลาสติกอย่างรุนแรงมาเกาะอยู่จะทำให้เสียขอบตัดซึ่งจะส่งผลเสมือนว่าเครื่องมือกลนั้น “ที่้อ” ลง ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือที่ลดลง โดยทั่วไปในการใช้งานจะพบว่า Built Up Edge เกิดขึ้นและแตกหลุดออกอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยอาจเกิดขึ้นได้หลายรอบใน 1 วินาทีเศษของ Built Up Edge ที่หลุดออกมักจะไปเกาะติดอยู่กับผิวด้านใต้ของชิป ช่วยเพิ่มปริมาณการสึกหรอด้านหน้าเรก (Rake Face) ของเครื่องมือกลและยังทำให้ผิวสำเร็จ (Surface Finish) ที่ได้ไม่ดีเท่าที่ควร หากนำเศษของ Built Up Edge มาวัดค่าความแข็งบางที่จะพบว่า มีความแข็งสูงกว่าวัสดุที่นำมากัดแต่งได้ถึง 3 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุ Built Up Edge ได้ผ่านกระบวนการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Work Hardening) จากการแปรรูปที่รุนแรงมาหลายครั้งนั่นเอง [14, 15]

### 2.7.1 กลไกของการสึกหรอ

การสึกหรอของเครื่องมือกลสามารถเกิดได้ทั้งบนด้านหน้าเรก (Rake Face) และหน้าแฟรงก์ (Flank Face) ซึ่งการสึกหรอพบว่ามีกลไกพื้นฐาน ดังนี้

1. การสึกหรอแบบแนบติด (Adhesive Wear) การสึกหรอในลักษณะนี้เกิดจากการที่ผิวสัมผัสเชื่อมติดกันเป็นจุดเล็ก ๆ ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อของเครื่องมือกลให้แก่ชิปหรือผิวกัดแต่งของชิ้นงาน



รูปที่ 2.14 การสึกหรอแบบแนบติด (Adhesive Wear) [14]

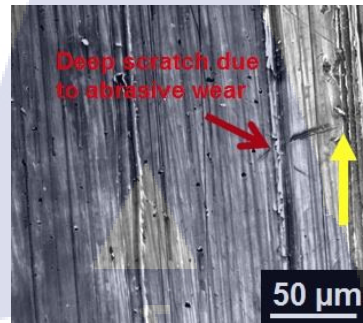
2. การสึกหรอจากการแพร่ (Diffusion Wear) ในขณะที่ใช้งานจะพบว่าการแพร่ของอะตอมระหว่างผิวของเครื่องมือกลและผิวชิ้นงานเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา การแพร่ของอะตอมจะทำให้ผิวสัมผัสเชื่อมติดกันได้ง่ายขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่การแตกหักของยอดสูงในที่สุด กลไกการแพร่และการเชื่อมติดนี้เป็นสาเหตุหลักของการสึกหรอแบบครีเตอร์ ยกตัวอย่าง เช่น ในการกัดแต่งเหล็กกล้าด้วยเครื่องมือกลที่เป็นวัสดุประกอบ WC-Co ธาตุเหล็ก (Fe) จากชิ้นงานสามารถแพร่เข้าไปในเหล็กกล้าได้เช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.15 การสึกหรอจากการแพร่ (Diffusion Wear) [14]

3. การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) การสึกหรอลักษณะนี้จะเกิดในกรณีที่ชิ้นงานที่นำมากัด แต่งมีเฟสที่สองที่มีความแข็งสูงอยู่ในโครงสร้าง เช่น เฟสคาร์ไบด์หรือไนไตรต์ในเหล็กกล้า

และเหล็กหล่ออนุภาคอะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ในเหล็กกล้าเฟสของซิลิคอนและอะลูมินาในอลูมิเนียมผสม เป็นต้น



รูปที่ 2.16 การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear)

### 2.7.2 ชนิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดบนคมตัด

การสึกหรอของเครื่องมือตัดบนคมตัดขณะตัดเฉือนโลหะ จะเกิดความเค้น การเสียดสี และความร้อนสูงส่งผลทำให้เครื่องมือตัดมีอายุการใช้งานสั้นลงซึ่งปรากฏออกมาในรูปความสึกหรอ (wear) ทำให้ชิ้นงานที่ได้มีขนาดผิดไปจากที่ต้องการและมีผิวหยาบ อัตราการสึกหรอส่วนมากมีสาเหตุมาจาก การเลือกใช้เครื่องมือตัดที่ไม่เหมาะสมกับวัสดุงาน รวมทั้งรูปร่างของวัสดุเครื่องมือตัดด้วย นอกจากนี้ การหล่อเย็นที่ไม่ถูกชนิดหรือการหล่อเย็นไม่ตรงจุดและไม่มีกำลังน้ำหล่อเย็นฉีดเพียงพอ และที่สำคัญคือการเลือกใช้ค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ความเร็วรอบ ความเร็วตัดและอัตราการป้อนไม่ถูกต้อง การสึกหรอของมีดกัดแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะดังนี้

1. การสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear) เกิดขึ้นได้กับคมตัดทุกประเภท ซึ่งโดยทั่วไปเป็นการเกิดจากการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างหน้าแฟงกับชิ้นงาน ในขณะที่เดียวกันก็เกิดเศษตัด (Chip) เป็นการสึกหรอที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ถ้าการสึกหรอขยายไปถึงขอบตัดจะทำให้แรงตัดและความเค้นเกิดกับเครื่องมือสูงขึ้น

2. การสึกหรอบนผิวคาย (Crater Wear) เป็นความเสียหายที่เกิดบนหน้าเรกหรือด้านบนของเครื่องมือตัดส่วนใหญ่จะพบในงานกัดของเหล็กกล้าความเร็วสูง การสึกหรอในลักษณะนี้เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างชิปกับวัสดุเครื่องมือกลที่อุณหภูมิใช้งานค่อนข้างสูงในระหว่างการตัดเฉือนวัสดุเครื่องมืออาจจะละลายเข้าไปอยู่ในชิป หรืออนุภาคขนาดเล็กจากเครื่องมืออาจถูกดึงติดไปกับชิปได้ แต่ไม่ว่าจะเป็นกรณีไหนก็จะเกิดเป็นหลุมตื้นบนผิวเครื่องมือตัดขึ้น สาเหตุของการสึกหรอของมีดกัดโดยทั่วไป สาเหตุการหมดสภาพของเครื่องมือภายใต้การทำงานแบบปกติในการตัดเฉือน จะเป็นการสึกหรอจากการสึกหรอเพียงเล็กน้อยก่อน ต่อจากนั้นเมื่อใช้งานในการตัดเฉือนเพิ่มขึ้นการสึกหรอของ

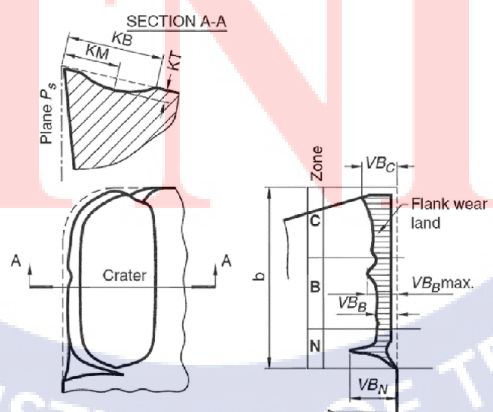


เครื่องมือตัดจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆและอัตราการสึกหรอก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งไม่สามารถตัดเฉือนโลหะได้ สาเหตุเกิดจากการขัดสีเนื่องมาจากชิ้นงานมีความแข็งมากกว่าและเกิดการลื่นไถลในลักษณะการขัดถูประกบติดกันภายใต้ภาวะที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานขึ้น การสึกหรอทางเคมีและการแตกตัวทางไฟฟ้า ถ้าหากมีการหล่อเย็นขบวนการทางเคมีจะกระทำหรือเกิดขึ้นต่อระบบของสารหล่อเย็นในขณะที่ทำการตัดเฉือน นอกจากนี้องค์ประกอบและเงื่อนไขที่มีผลต่อการสึกหรอประกอบด้วยควมลึกในการตัด ความเร็วรอบ ความเร็วตัด รูปทรงเรขาคณิต มุดตั้งมีด ความยาวมีด วัสดุชิ้นงาน ระยะความยาวจากคมตัดบริเวณการตัดถึงจุดจับยึดของด้ามเอ็นมิล [15-17]

### 2.7.3 ข้อกำหนดในการวัดขนาดของการสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear) ตามมาตรฐาน ISO 3685: 1993

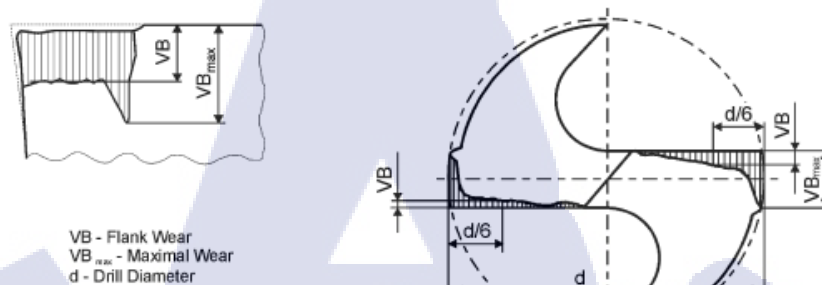
ตามมาตรฐาน ISO ได้มีการแบ่งเขตการสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear) เพื่อการวัดระยะของการสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear) ออกเป็น 3 เขต คือ เขต A เขต B และเขต C โดยกำหนดให้  $b$  เป็นระยะบ่อนลึกในการตัดเฉือนชิ้นงาน

- เขต N เป็นเขตที่อยู่บนผิวหลบด้านในสุดของคมตัด มาตรฐาน ISO 3685 : 1993 (E) ได้กำหนดให้เขต N มีค่าเท่ากับ 1 ใน 4 ของ  $b$  (เมื่อ  $b$  = ระยะบ่อนลึก) ดังรูปที่ 2.17
- เขต B เป็นเขตที่อยู่บนผิวหลบเช่นเดียวกับเขต A และเขต B ก็เป็นเขตที่อยู่ระหว่างเขต A กับเขต C มาตรฐาน ISO 3685 : 1993 (E) ไม่ได้กำหนดช่วงกว้างของเขต B แต่จะกำหนดให้ช่วงกว้างของเขต B ขึ้นอยู่กับช่วงกว้างของเขต A และเขต C ดังรูปที่ 2.17
- เขต C เป็นเขตที่อยู่บนผิวหลบเช่นเดียวกับเขต A และเขต B เขต C จะอยู่นอกสุดของคมตัดและเขต C ก็อยู่ติดกับเขต B มาตรฐาน ISO 3685 : 1993 (E) ได้กำหนดให้เขต C มีช่วงกว้างเท่ากับรัศมีปลายมีด (Nose) ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การแบ่งเขตการสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear)

โดยกำหนดให้ทำการวัดขนาดการสึกหรอบนผิวหลบ VB เป็นขนาดการสึกหรอบนผิวหลบเฉลี่ย ส่วน  $VB_{max}$  เป็นขนาดการสึกหรอบนผิวหลบสูงสุด ดังรูปที่ 2.18 [15]



รูปที่ 2.18 การวัดขนาดการสึกหรอบนผิวหลบ [16]

## 2.8 หลักการของเครื่องมือทดสอบผิววัสดุ

ความหยาบผิว (Surface Roughness) ในงานอุตสาหกรรมการวัดความหยาบผิวของชิ้นงานจากการตัดขึ้นรูปโลหะมีความสำคัญต่อคุณภาพชิ้นงานเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะงานที่ต้องการความละเอียดผิวสูง ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลการวัดความหยาบผิวมีหลายอย่าง ตั้งแต่การกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของความหยาบผิวในขั้นตอนการออกแบบ การเลือกเครื่องมือที่เหมาะสมและครอบคลุมมาตรฐานที่ต้องการ รวมทั้งการตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องมือวัดให้เหมาะสมกับลักษณะของชิ้นงานความหยาบผิว หมายถึง ขนาดความขรุขระของผิว ซึ่งสามารถสัมผัสและแยกแยะได้ด้วยมือและสายตา แต่บางครั้งก็ไม่สามารถแยกแยะได้ด้วยการสัมผัสด้วยมือและสายตาด้วยเหตุดังกล่าว ในการวัดความหยาบผิวจะใช้เครื่องวัดความหยาบผิวโดยการวัดค่าความหยาบผิวแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ การวัดความหยาบผิวโดยเฉลี่ย กับ การวัดความหยาบผิวโดยขนาด

### 2.8.1 ลักษณะของพื้นผิว

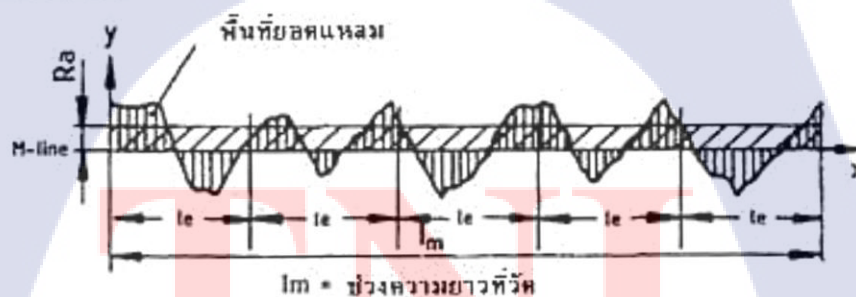
ลักษณะความหยาบผิวมี 3 ชนิด คือ ผิวลักษณะหลัก P (Primary Profile) ผิวลักษณะความหยาบ R (Roughness Profile) และผิวคลื่นคือ W (Waviness Profile) นอกจากนี้ยังมีลักษณะผิวอื่น เช่น WC, WCA, WE, WEA และ IN4776 โดยลักษณะของพื้นผิวนี้อาจสัมพันธ์กับค่าตัวกรองหรือ Digital filter ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถของการกรองสัญญาณในรูปแบบของเฟสหรือแบบเกาส์เซียน เช่น 2CR-75%, 2CR-50%, 2CR-75% (Phase Corrected), 2CR-50% (Phase Corrected), Gaussian-50% (Phase Corrected) ซึ่งผู้วัดจะต้องกำหนดค่าตัวกรองความถี่ให้สัมพันธ์กับลักษณะ

ของชิ้นงานที่ต้องการวัดไม่เช่นนั้น จะส่งผลให้ค่าที่วัดออกมาได้นั้นไม่ตรงกับค่าของชิ้นงาน นอกจากนี้เรายังต้องกำหนด Cutoff Length หรือระยะทางในการกรองค่าความถี่ของความยาวผิวที่ต้องการวัด และค่า Sampling Length คือค่าความยาวที่หัววัดเคลื่อนที่บนชิ้นงานที่ต้องการวัดจะต้องปรับตั้งค่าทั้งสองนี้ให้ถูกต้อง ซึ่งหน่วยความยาวก็จะขึ้นกับมาตรฐานที่ใช้ด้วย เช่น หน่วยนิ้ว หรือมิลลิเมตร

### 2.8.2 มาตรฐานวิทยาการวัดความหยาบผิว

โดยทั่วไปการวัดความหยาบผิวของชิ้นงานสามารถวัดออกมาใน 3 แบบ คือ

1. แสดงค่าสถิติ (Statistical Descriptors) เช่น ความหยาบผิวเฉลี่ย ( $R_a$ ) ความหยาบผิวรากกำลังสองเฉลี่ย ( $R_q$ ) หรือ ความสูงกลางของลักษณะความหยาบ ( $R_c$ ) เป็นต้น
2. แสดงค่าสูงสุดต่ำสุด (Extreme Value Descriptors) ซึ่งในบางลักษณะงานอาจต้องการแสดงค่าสูงสุดและต่ำสุดของความหยาบผิว เช่น จุดสูงสุด ( $R_p$ ) จุดต่ำสุด ( $R_v$ )
3. แสดงค่าลักษณะพื้นผิว (Texture Descriptors) เช่น โดยทั้งหมดนี้ ค่าสถิติ  $R_a$  เป็นค่าที่ดีที่สุดและได้รับการยอมรับในงานด้านวิศวกรรมมากที่สุด ค่า  $R_a$  คือ ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิตที่ได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลางกับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลางหารด้วยความยาวเฉลี่ย ( $l_m$ ) ดังรูปที่ 2.19 ตามข้อกำหนดมาตรฐาน ISO 4287 โดยค่าของ  $R_a$  มีหน่วยวัดเป็น ไมโครเมตร ( $\mu m$ )

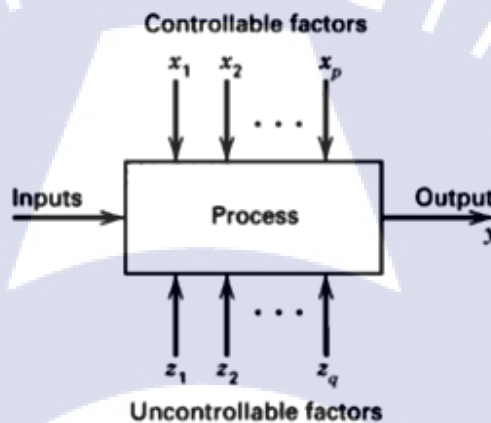


รูปที่ 2.19 กราฟแสดงความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นผิว

เครื่องมือวัดความหยาบมีความแตกต่างจากเครื่องมือวัดทั่วไป สิ่งสำคัญประการหนึ่ง คือ มาตรฐานอุตสาหกรรมของเครื่องมือวัดซึ่งบ่งบอกว่าเครื่องมือวัดความหยาบผิวรุ่นนั้น ๆ สามารถวัดความหยาบผิวของชิ้นงานตามข้อกำหนดของมาตรฐานใดบ้าง เช่น ISO 4287 : 1997 (ยุโรป), ANSI/ASME B 46.1-1995 (อเมริกา), JIS B 0601-1994 (ญี่ปุ่น) เป็นต้น [17]

## 2.9 การออกแบบทดลอง (Design of Experiment, DOE)

การทดลองหมายถึงการทดสอบหรือการลองเพื่อหาผลลัพธ์ที่อยู่ภายใต้ความไม่แน่นอนสามารถกระทำ ได้ 2 วิธี คือ การทดลองปฏิบัติงานจริง (Physical Experiment) และการทดลองด้วยการจำลองผล (Simulation) จุดประสงค์ที่สำคัญของการทดลองมี 2 ประการ คือ เป็นการยืนยันข้อเท็จจริง เพื่อพิสูจน์ถึงข้อเท็จจริงหรือความเชื่อจากประสบการณ์หรือทฤษฎีบางอย่างที่อธิบายเกี่ยวกับ กระบวนการผลิต และเป็นการค้นหาข้อเท็จจริง เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของเงื่อนไขใหม่ที่มีต่อระบบการผลิต ซึ่งผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับวิธีการเก็บข้อมูล [18] ตามปกติแล้วการทดลองถูกนำมาใช้ เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบ ซึ่งทั้งกระบวนการและระบบสามารถที่จะแทนด้วยแบบจำลองดังรูปที่ 2.20 [18-19]



รูปที่ 2.20 แบบจำลองทั่วไปหรือกระบวนการหรือระบบ

เราอาจมองได้ว่า กระบวนการคือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักร วิธีการ และทรัพยากรอื่น ๆ เข้าด้วยกัน เพื่อเปลี่ยนอินพุต (เช่น วัตถุดิบ) ไปสู่เอาต์พุตที่มีผลตอบออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่าซึ่งเราสามารถเห็นได้ ตัวแปรกระบวนการบางชนิด  $x_1, x_2, \dots, x_p$  เป็นตัวแปรที่เราสามารถควบคุมได้ ในขณะที่ตัวแปรบางตัว  $z_1, z_2, \dots, z_q$  เป็นตัวแปรที่เราไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองอาจเกี่ยวข้องกับ

- 1) การหาปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อผลตอบ  $y$
- 2) การหาวิธีการตั้งค่า  $x$  ที่มีผลต่อค่าผลตอบ  $y$  เพื่อให้ค่า  $y$  ได้ตามค่าที่ต้องการ
- 3) การหาวิธีการตั้งค่า  $x$  ที่มีผลต่อค่าผลตอบ เพื่อให้ค่า  $y$  น้อยที่สุด

4) การหาวิธีการตั้งค่า  $x$  ที่มีผลต่อค่าผลตอบ  $y$  เพื่อให้ผลของตัวแปรที่เราไม่สามารถคุมได้  $z_1, z_2, \dots, z_q$  มีค่าน้อยสุด

การทดลองส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายตัว ถ้าต้องการให้การทดลองเกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผลได้สูงสุด เราจะต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง คำว่าการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment) หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมผลวิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งที่จำเป็น เมื่อต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่และถ้ายังเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experiment Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการ สำหรับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการทดลองก็คือ การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้ง 2 นี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE) คือแนวคิดทางสถิติที่ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตช่วยเพิ่มผลผลิต ช่วยลดความผันแปรในกระบวนการผลิต ช่วยลดเวลาในการผลิต และช่วยลดต้นทุนการผลิต เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาและปรับปรุง กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์โดยคำนึงถึงคุณภาพสูงสุดตามความต้องการของลูกค้าเป็นสิ่งสำคัญ Montgomery กล่าวว่า การออกแบบการทดลองคือ การกำหนดเงื่อนไขสำหรับการทดลองที่จะทำให้สามารถตีความหมายถึงสาเหตุและผลที่ต้องการตัดสินใจได้ กล่าวคือเป็นการออกแบบการทดลองเพื่อตรวจสอบดูว่าปัจจัย (Factor) ใดหรือตัวแปร (Input Variable) ใดที่มีผลต่อสิ่งที่ให้ความสำคัญหรือสิ่งที่สนใจในลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ออกมา (Output Response) ปัจจัยในการผลิตสามารถแบ่งออกได้เป็น

1. ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต
2. ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต

ดังนั้น การออกแบบการทดลอง จึงเป็นการกำหนดเงื่อนไขที่จะทำให้ค่าความแตกต่างของข้อมูลมีสาเหตุจากสิ่งที่ไม่สามารถควบคุมได้เท่านั้นเพื่อให้เกิดข้อมูลที่มีสาระมากที่สุดเพื่อสำหรับการตัดสินใจ [14]

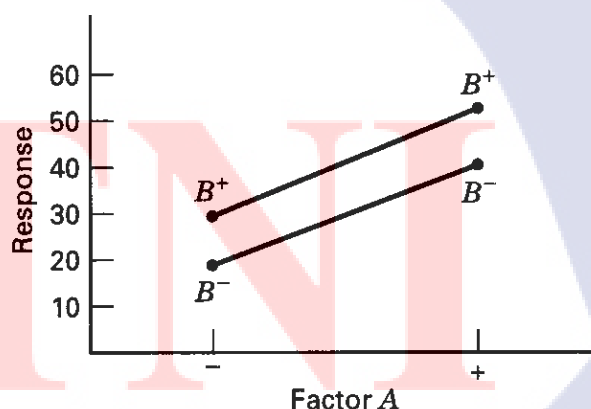
การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ในกรณีเช่นนี้ การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) จะเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งการทดลองจะพิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมตัวกันของระดับ

(Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้นโดยใช้โปรแกรมช่วยคำนวณ Minitab มาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติเพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง [18,19]

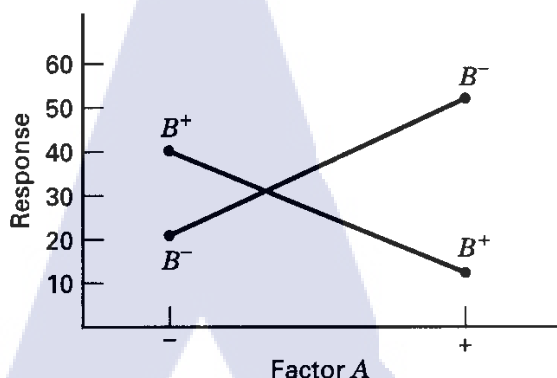
การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) เป็นการออกแบบสำหรับการสร้างพื้นผิวผลตอบ โดยใช้ Response Surface Methodology (RSM) ซึ่งเป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่เราสนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้

### 2.9.1 การออกแบบการทดลองแบบแฟรคชันัลแฟคทอเรียล

การออกแบบการทดลองแบบแฟรคชันัลแฟคทอเรียล เป็นการทดลองที่มีลักษณะเฉพาะคือ ทรีทเมนต์ประกอบด้วยการรวมกันของระดับของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปเรียกว่า ทรีทเมนต์คอมบิเนชัน (Treatment Combination) ใช้กับการทดลองที่มีปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยซึ่งเป็นการทดลองที่มีหลายปัจจัย (Multiple Factor Experiment) กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 Replicate จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด  $ab$  การทดลอง และเนื่องจากมีปัจจัย (Factor) มากกว่า 1 ปัจจัย ดังนั้นนอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่สนใจแล้วยังอาจเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction Effect) ได้ด้วย



รูปที่ 2.21 อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผล



รูปที่ 2.22 อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล

อิทธิพลของปัจจัยร่วมคือ ผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปแล้วมีผลทำให้เกิดอิทธิพล (Effect) ของปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปดังตัวอย่างการเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วมหรือปฏิสัมพันธ์ ดังรูปที่ 2.21 ซึ่งเมื่อไม่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วม ดังรูปที่ 2.22 เมื่อมีอิทธิพลของปัจจัยร่วม การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่สนใจที่จะศึกษา ซึ่งมีอยู่หลายตัวและจะต้องเข้าใจถึงผลกระทบร่วมกันของปัจจัยเหล่านั้นบนตัวแปรตามที่สนใจอยู่การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $2^k$  เป็นการออกแบบที่มี  $k$  ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ซึ่งระดับเหล่านี้ อาจเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักรหรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับ ที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับสูงหรือต่ำของปัจจัยเหล่านั้น ใน 1 เพลทเคตที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น  $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$  ข้อมูล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $2^k$  มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่ต้องการจะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง  $k$  ชนิดได้อย่างบริบูรณ์ ดังนั้น การออกแบบการทดลองชนิดนี้จะทำให้สามารถรองรับปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลง

### 2.9.2 วิธีการพื้นผิวผลตอบ

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology; RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรและมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบโดย

กำหนดให้ปัจจัยนั้นแทนค่าด้วย  $x$  และ  $\epsilon$  คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบ  $y$  ที่เป็นผลมาจากการทดลอง

$$y = f(x_1, x_2) + \epsilon \quad (2.1)$$

ถ้ากำหนดว่า  $E(y) = f(x, x) = \eta$  ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้ คือ

$$H = f(x_1, x_2) \quad (2.2)$$

ซึ่งจะเรียกว่า “พื้นผิวผลตอบ (Response Surface)”

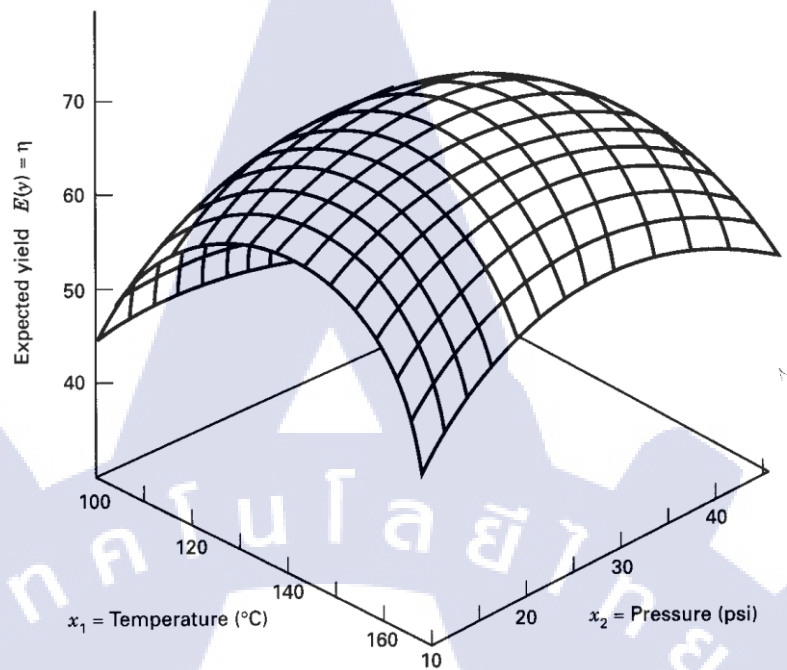
โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปของกราฟฟิก ดังรูปที่ 2.23 โดยที่  $\eta$  จะถูกพล็อตกับระดับของ  $x_1$  และ  $x_2$  เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้นซึ่งอาจจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบ ดังรูปที่ 2.24 ในการสร้างเส้นโครงร่างเช่นนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบของ  $x_1$  และ  $x_2$  เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบที่เท่ากันค่าหนึ่งโดยที่ปัญหาในส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ โดยในขั้นแรกจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง  $y$  และเซตของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำ ๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณความสัมพันธ์คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง [18,19]

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (2.3)$$

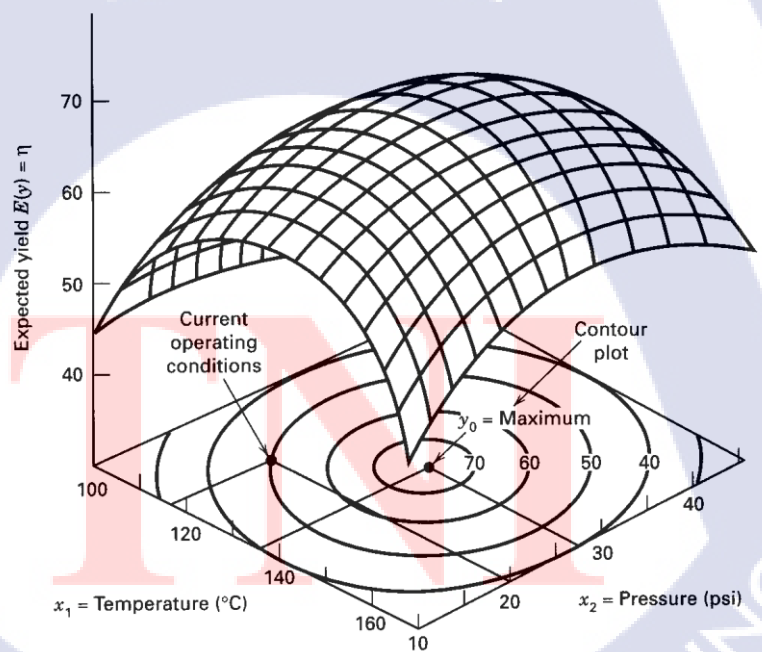
แต่ถ้ามีส่วนโค้งเกี่ยวข้องในระบบจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสองดังสมการ

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2.4)$$





รูปที่ 2.23 พื้นผิวผลตอบแบบสามมิติ [18]



รูปที่ 2.24 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ [19]

## 2.10 การทบทวนวรรณกรรม

ตาราง 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ที่	คณะผู้วิจัย	ปี	วิธีวิจัย	ผลที่ได้รับ
1	E. O. Ezugwu et al. [2]	2005	การปรับปรุงที่สำคัญในการตัดเฉือนที่ตัดเฉือนยากของวัสดุซูเปอร์อัลลอยในชิ้นส่วนการบินและอวกาศ	
2	M.S. Kasin, et al. [3]	2013	ผลกระทบของความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกของการตัดบนพื้นผิวความหยาบของ Inconel 718	
3	I. Uzun et al. [4]	2013	ผลกระทบของวัสดุเคลือบผิวคมตัดต่อการสึกหรอของเครื่องมือคมตัดขนาดเล็กของ อินโคเนล718 super alloy โดยการเคลือบผิวคมตัดและไม่เคลือบผิวคมตัดในการทดลองแบบแห้ง	
4	M. A. Hadi et al. [6]	2013	เปรียบเทียบระหว่างการกัดทวนและกัดตามการสึกหรอของคมตัดในการกัด Inconel 718	
5	D. Zhu et al. [7]	2013	การสึกหรอของคมตัดในการตัดเฉือนซูเปอร์อัลลอยด์ที่มีนิกเกิลเป็นส่วนประกอบหลัก	
6	B. Kursuncu et al. [8]	2017	การสึกหรอของคมตัด TiAlSiN/TiSiN/TiAlN นาโนคอมโพสิตหลายชั้นระหว่างการกัดปาดหน้า Inconel 718	
7	I. A. Choudhury and M. A. El-Baradie [9]	1998	การตัดเฉือนซูเปอร์อัลลอย Inconel 718	
8	K. H. Park et al. [10]	2015	การวิเคราะห์การสึกหรอของเครื่องมือคาร์ไบด์เคลือบและไม่เคลือบผิวคมตัดในการกลึง Inconel	
9	U.Thanasuptawee [17]	2018	การเพิ่มประสิทธิภาพความหยาบของพื้นผิวและการสึกหรอของคมตัดในการกัดอะลูมิเนียมกึ่งแข็ง A356	

ตาราง 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ที่	คณะผู้วิจัย	ปี	วิธีวิจัย	ผลที่ได้รับ
10	S. Hanasaki et al. [20]	1990	การสึกหรอของเครื่องมือเคลือบผิวคมตัดเมื่อตัดแผ่นโลหะผสมนิกเกิลสูง	
11	V. Schornik et al. [21]	2015	อิทธิพลของสภาพแวดล้อมในการทำงานและเงื่อนไขการ मिलिंगนิกเกิล – ซูเปอร์โลหะผสมด้วยเครื่องมือคาร์ไบด์	

ผู้วิจัยได้ทำการหาข้อมูลในฐานข้อมูลมาตรฐานต่างๆอาทิเช่น [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com) และบทความต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวัสดุ Inconel เกรด 718 และการตัดแผ่นวัสดุด้วยเครื่องมือตัดแผ่นเคลือบผิวคมตัดเป็นต้น โดยได้พบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้ ดังสรุปในตารางที่ 2.2

จากข้อมูลในตารางที่ 2.2 E.O. Ezugwu et al. [2] การปรับปรุงที่สำคัญในการตัดแผ่นที่ตัดแผ่นยากของวัสดุซูเปอร์อัลลอยในชิ้นส่วนการบินและอวกาศโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคใหม่ ๆ และการพัฒนาวัสดุเครื่องมือตัดในการตัดแผ่นโลหะฐานนิกเกิลและโลหะผสมไททาเนียมมีผลทำให้อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดเพิ่มขึ้นหลายเท่าโดยไม่กระทบกับคุณภาพความสมบูรณ์ของพื้นผิวและความสมบูรณ์ของชิ้นส่วนกลึงการปรับปรุงเหล่านี้ทำได้โดยการลดอุณหภูมิที่สร้างขึ้นที่ส่วนต่อประสานอุณหภูมิและโดยการเปลี่ยนรูปร่างการคายเศษจากต่อเนื่องเป็นรูปแบบที่ไม่ต่อเนื่องและแบ่งส่วนโลหะผสมที่ตัดได้ยากที่อุณหภูมิห้องสามารถทำการกลึงได้ง่ายที่อุณหภูมิสูงถึงระดับอุณหภูมิที่เหมาะสม เทคนิคการตัดแผ่นแบบผสมผสานความร้อนของชิ้นงานและการทำความเย็นด้วยอุณหภูมิของเครื่องมือตัดแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการปรับปรุงการตัดแผ่นฐานนิกเกิลและไททาเนียมที่ตัดยาก

M.S. Kasin et al. [3] บทความนี้ศึกษาผลกระทบของความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกบนพื้นผิวความเรียบของ Inconel 718 เมื่อกัดภายใต้ปริมาณการหล่อลื่นขั้นต่ำด้วยวิธีการแบบ Box-Behnken เพื่อระบุสาเหตุและผลกระทบของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรควบคุมกับการตอบสนอง พารามิเตอร์การกัดที่ตรวจสอบคือความเร็วตัด 100, 135 และ 170 ม./นาที อัตราป้อน 0.15, 0.2 และ 0.25 มม./รอบ และระยะกินลึก 0.6, 0.8 และ 1.0 มม. ผลการศึกษาพบว่าระหว่างอัตราป้อน และระยะกินลึกในแนวรัศมีคือปัจจัยหลักที่ควบคุมความเรียบของพื้นผิว การตอบสนองของปัจจัยต่างๆถูกวางแผนโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่จำเป็นสำหรับความหยาบผิวขั้นต่ำ ได้แก่

ความเร็วตัด 136 ม./นาที อัตราป้อน 0.1 มม./รอบ ความลึกของแนวแกน 0.5 มม. และระยะกินลึกในแนวรัศมี 1.38 มม. ด้วยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดนี้ได้ความหยาบผิว  $0.117 \mu\text{m}$

I. Uzun, et al. [4] ได้ศึกษาตรวจสอบเชิงทดลองเกี่ยวกับผลกระทบของวัสดุเคลือบผิวคมตัดต่อการสึกหรอของเครื่องมือคมตัดขนาดเล็กของ อินโคเนล 718 super alloy โดยการเคลือบผิวคมตัดและไม่เคลือบผิวคมตัดในการทดลองแบบแห้งและแบบมีสารหล่อลื่นชั้นต่ำการสึกหรอเกิดขึ้นที่รัศมีคมตัดและขอบข้างคมตัดหาได้จากผลของความไม่สอดคล้องในรูปลักษณะของความสมมาตรของร่อง slot ได้ผลลัพธ์ในเครื่องมือเคลือบผิวคมตัดด้วย AlTiN, TiAlN+AlCrN และ AlCrN ออกมาได้ดีกว่าการเคลือบผิวคมตัดด้วย TiAlN+WC / C และ DLC นอกจากนี้ การเคลือบผิวคมตัดด้วย TiAlN+WC / C และ DLC แสดงผลให้เห็นว่าประสิทธิภาพที่ดีกว่าในการต้านทานการสึกหรอของขอบข้างคมตัดในการทดลองแบบมีสารหล่อลื่นใช้ในระหว่างการตัดกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญในการต้านทานการสึกหรอ

M. A. Hadi et al. [6] บทความนี้ศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับกลไกการสึกหรอของเครื่องมือและอายุของเครื่องมือในปลายมันในการกัด Inconel 718 ภายใต้การสารหล่อลื่นชั้นต่ำ การประเมินผลคือเน้นการเปรียบเทียบการกัดขึ้นและกัดลงโดยใช้ PVD คาร์ไบด์ พารามิเตอร์การตัดเฉือน ระยะกินลึก อัตราป้อน และความเร็วตัด การทดลองพบว่า การกัดตามให้ผลลัพธ์ในด้านการสึกหรอของเครื่องมือดีกว่าการกัดทวน บันทึบเมื่อตัดขอบเครื่องมือเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการสึกหรอแบบบากด้วยการตัดเฉือนที่ยืดเยื้อ

D. Zhu et al. [7] บทความนี้เน้นลักษณะการสึกหรอของเครื่องมือเป็นหลักในการตัดเฉือน superalloys ที่มีนิคเกิลเป็นองค์ประกอบ การสึกหรอของรัศมีปลายคมตัด บ่งชี้ถึงการแพร่กระจายความร้อนในคมตัดเคลือบ การคาดคะเนอายุของคมตัด เกี่ยวกับการเกิดคู่กันระหว่างความร้อนทางกลและการใช้งานทางอุตสาหกรรมของอุปกรณ์ตรวจสอบการสึกหรอของเครื่องมือออนไลน์ การทบทวนนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับลักษณะการสึกหรอของคมตัดในการตัดเฉือนซูเปอร์อัลลอยด์ที่มีนิคเกิลเป็นพื้นฐาน และแสดงศักยภาพที่ยืดเยื้อสำหรับการตรวจสอบเพิ่มเติมและนวัตกรรมในด้านการสึกหรอของเครื่องมือ

B. Kursuncu et al. [8] ในการศึกษา คมตัดคาร์ไบด์เคลือบด้วย TiAlSiN/TiSiN/TiAlN นาโนคอมโพสิตหลายชั้นและหาการสึกหรอของคมตัดในระหว่างการกัดปาดหน้าของ Inconel 718 ภายใต้สภาวะแห้ง พบว่าคมตัดคาร์ไบด์เคลือบ TiAlSiN/TiSiN/TiAlN นาโนคอมโพสิต ทนต่อการสึกหรอได้ดีขึ้น ทำให้อายุการใช้งานเครื่องมือยาวนานขึ้น 1.7 เท่า และพื้นผิวเรียบขึ้น  $Ra < 0.18 \mu\text{m}$  บนวัสดุ Inconel 718 มากกว่าวัสดุที่ไม่เคลือบผิว

I. A. Choudhury et al. [9] ได้ทดลองศึกษาการตัดเฉือน super alloy ฐานนิคเกิลอินโคเนล 718 โดยใช้คมตัดคาร์ไบด์เคลือบผิวและไม่เคลือบผิวคมตัดสามารถอธิบายถึงผลกระทบของตัว

แปรงการตัด ความเร็วตัดของเครื่องมือตัด, ความเร็วการป้อนและความลึกของการตัด ต่อแรงตัดและอายุการใช้งานของเครื่องมือ เครื่องมือคาร์ไบด์ในรูปแบบของเม็ดมีดรูปทรงกลม 80 แฉกโดยไม่ต้องมีตัวตัดพิเศษใด ๆ ใช้ในสภาพการตัดที่แตกต่างกัน พารามิเตอร์การตัดเฉือนได้รับการปรับให้เหมาะสมโดยการวัดแรงของการตัดการสึกหรอด้านข้างถือเป็นเกณฑ์สำหรับอายุการใช้งานของเครื่องมือคมตัดเปรียบเทียบระหว่างแบบไม่เคลือบผิวและเคลือบผิวคมตัดโดยใช้หลักสมการการของเทย์เลอร์หาอายุของคมตัดของความเร็วอัตราป้อนและระยะลึกของการตัดไม่พบว่าอายุการใช้งานของเครื่องมือเคลือบผิวคมตัดดีกว่าเครื่องมือที่ไม่เคลือบผิวคมตัด

K. H. Park et al. [10] ได้ทำการวิเคราะห์การสึกหรอของคมตัดคาร์ไบด์เคลือบและไม่เคลือบผิวคมตัดในการกลึง Inconel เนื่องด้วยความเร็วตัดสำหรับ Inconel ไม่สามารถสูงขึ้นได้เนื่องจากคมตัดบิ่น การสึกหรอมากเกินไปเกิดขึ้นที่ความเร็วในการตัดสูง ในการศึกษาที่ตัดเฉือนด้วยการหล่อลื่นปริมาณขั้นต่ำ (MQL) ที่มีและไม่มีอนุภาคนาโน และเครื่องมือตัดที่ผ่านการบำบัดด้วยความเย็นได้ถูกนำไปใช้ วิเคราะห์และเมื่อเทียบกับวิธีการตัดเฉือนแบบกลึงแบบแห้งและแบบเปียก ใช้เครื่องมือคาร์ไบด์แบบเคลือบและไม่เคลือบผิว จากผลการทดลองพบว่าการตัดเฉือนแบบแห้งและแบบเปียกมีประสิทธิภาพดีกว่าทั้ง MQL และ MQL ด้วยอนุภาคนาโนในแง่ของการสึกหรอของคมตัดที่ผ่านการบำบัดด้วยความเย็นแสดงให้เห็นการสึกหรอของเครื่องมือที่มั่นคงไม่มีการแตกหักของขอบอย่างรุนแรง เนื่องจากการแข็งตัวของเครื่องมือตัดด้วยความเย็นในขณะที่ MQL และ Nano-MQL แตกหักอย่างรุนแรง และคมตัดคาร์ไบด์ที่ไม่เคลือบผิวทำงานได้ดีกว่าคมตัดที่เคลือบสำหรับการสึกหรอด้านข้าง คมตัดคาร์ไบด์ที่ไม่เคลือบผิวจะทำงานได้ดีกว่าแบบเคลือบ แม้ว่าความยาวด้านข้างของคาร์ไบด์เคลือบและไม่เคลือบผิวสามารถเทียบเคียงได้ แต่สำหรับคมตัดคาร์ไบด์เคลือบความขรุขระของพื้นผิวด้านข้างไม่ดีและมีหน้าตัดสึกหรออย่างมีนัยสำคัญ

U. Thanasuptawee [17] ค่าความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัดเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการตัดเฉือนโลหะในการทดลองได้ออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลางทดลองตัดเฉือนด้วยเครื่องซีเอ็นซีและดอกเอ็นมิลที่ผลิตจากคาร์ไบด์ภายใต้กระบวนการกัดแบบแห้งจากการทดลองสมการทำนายจากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนในการทำนายค่าความหยาบผิวและค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดโดยพารามิเตอร์ที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความหยาบผิวได้แก่อัตราการป้อนต่อฟัน, ความเร็วตัดเฉือนและมุมคายเศษ ในขณะที่พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดได้แก่ความเร็วตัดเฉือนและอัตราป้อนต่อฟัน

S. Hanasaki et al. [20] การสึกหรอของเครื่องมือเคลือบผิวคมตัดเมื่อตัดเฉือนโลหะผสมนิกเกิลสูงโดยใช้เครื่องมือเคลือบผิวคมตัด 4 ประเภทและสืบหาการสึกหรอของคมตัดด้านข้างของร่องลดลงและอายุการใช้งานของเครื่องมือจะขึ้นอยู่กับ การสึกหรอของขอบแทนเครื่องมือเคลือบคมตัด

เคลือบด้วย  $Al_2O_3$  มีประสิทธิภาพสำหรับการสึกหรอของขอบส่วนการเคลือบ  $TiC/Al_2O_3$  บนคาร์ไบด์ซีเมนต์ K10 มีร่องสึกหรอน้อยที่สุด

V. Schorník et al. [21] ได้ศึกษาอิทธิพลของสภาพแวดล้อมในการทำงานและเงื่อนไขการ मिलिंगนิกเกิล - ซุปเปอร์โลหะผสมด้วยเครื่องมือคาร์ไบด์มีการอธิบายปัจจัยหลักที่มีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือมากที่สุด อิทธิพลของการเจียรในในสภาพแวดล้อมเช่นความดันของสารหล่อเย็นได้รับการพิจารณาและอธิบายด้วยโดยการทดลองได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีการกลึงด้วยเม็ดเม็ดโค้งมน แสดงมูลค่าการสึกหรอของเครื่องมือที่แตกต่างกันเงื่อนไขการตัด การสึกหรอของเครื่องมือต่ำที่สุดจะทำได้เมื่อความเร็วตัด 30 ม. / นาทีและอัตราป้อนงานเท่ากับ 0.21 มิลลิเมตร / นาที แต่ในแง่ของผลผลิตตัวเลือกที่ดีที่สุดสำหรับเงื่อนไขการตัดคืออัตราป้อน 0.4 มิลลิเมตร / นาทีและการตัดความเร็ว 30 ม. / นาที อาจระบุได้ว่าระบบการสึกหรอของเครื่องมือที่แตกต่างกันจะปรากฏขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัด การสึกหรอเกิดร่องรอยบากจะสังเกตได้เมื่ออัตราป้อนสูงขึ้นและไม่ปรากฏขึ้นเมื่ออัตราป้อนต่ำลงและการตัดความเร็วสูงกว่าในช่วงทดสอบมันจะเป็นการเหมาะสมที่จะตรวจสอบสิ่งที่เกิดขึ้นที่คมตัดส่วนคำแนะนำคือการเพิ่มความเย็นมีผลกับการสึกหรอและอายุการใช้งานของเครื่องมือเพิ่มขึ้น



TNI

TNI  
NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

### บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงระเบียบวิธีวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบผิวคมตัดที่มีผลต่อการสึกหรอและค่าความเรียบผิวชิ้นงานบนการตัดเฉือนวัสดุอินโคเนล 718 ซึ่งรายละเอียดวิธีวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

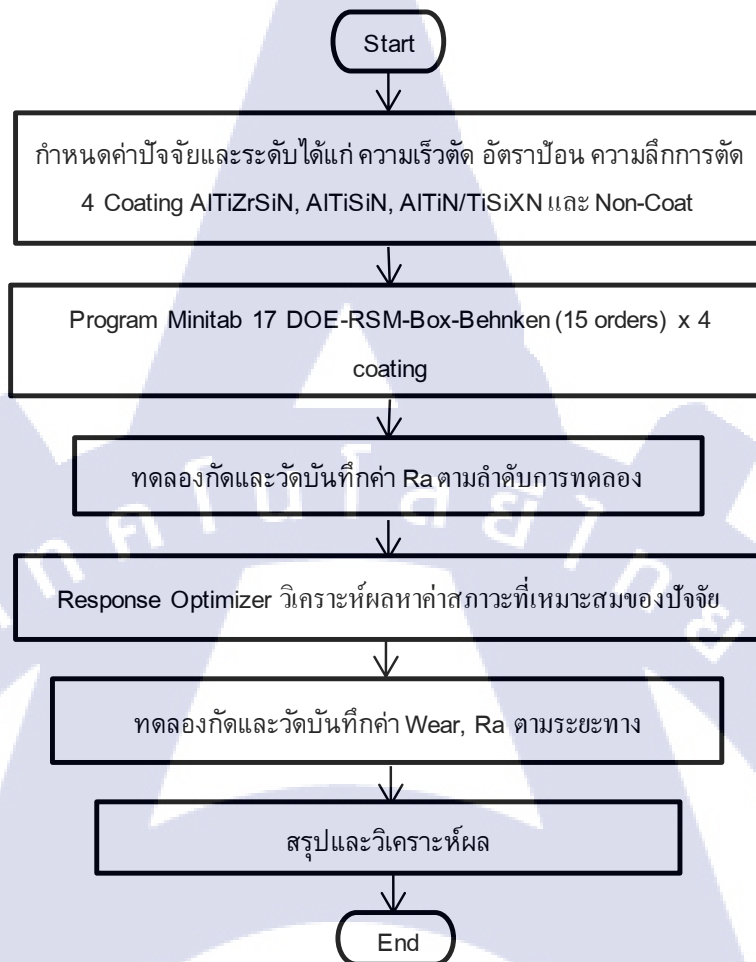
- กรอบแนวคิดการวิจัย
- การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยสำหรับการทดลอง
- วัสดุและอุปกรณ์
- เครื่องจักรและเครื่องมือวัด
- การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน
- การดำเนินการทดลอง
- การวิเคราะห์ค่าความเรียบผิวชิ้นงานและการสึกหรอของเครื่องมือตัด

#### 3.1 กรอบแนวคิดการวิจัย

การรวบรวมเนื้อหางานวิจัยและจากการที่ได้ศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาอ้างอิงและปรับเปลี่ยนให้สอดคล้องกับการทดลองนี้สามารถเขียนอธิบายเป็น Flow chart ลำดับขั้นตอนทำวิจัยครั้งนี้ได้ดังนี้

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY



รูปที่ 3.1 Flow chart ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.2 การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยสำหรับการทดลอง

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและความทนทานต่อการสึกหรอของคมตัดเคลือบผิวในการกัดด้วยเครื่องกัด ซี เอ็น ซี ดังรายละเอียด Flow chart ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในรูปที่ 3.1 โดยใช้โปรแกรม Minitab 17 ทำการศึกษาผลกระทบของความเร็วตัด อัตราป้อน ความลึกการตัดแบ่งเป็น 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

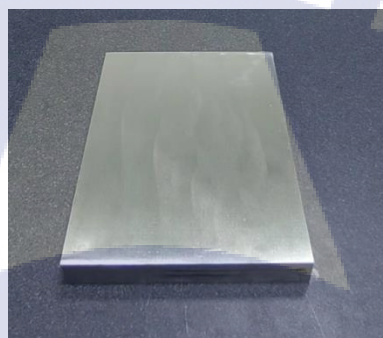


ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปร

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับ			หน่วย
		ต่ำสุด	กลาง	สูงสุด	
ความเร็วตัด	V	50	100	150	เมตรต่อนาที
อัตราป้อน	Sz	0.050	0.010	0.015	มิลลิเมตรต่อฟัน
ความลึกตัด	Ap	0.1	0.15	0.20	มิลลิเมตร

### 3.3 วัสดุและเครื่องมือตัด

วัสดุอินโคเนล 718 ขนาดกว้าง 150 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร หนา 25 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 วัสดุชิ้นงานอินโคเนล 718

3.3.1 องค์ประกอบทางเคมี การทดสอบความแข็งของชิ้นงานวัสดุอินโคเนล 718 และคุณสมบัติสารเคลือบของคมตัดเอ็นมิล

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุชิ้นงานอินโคเนล 718

องค์ประกอบทางเคมี % Inconel 718						
C	Cr	Ni	Mn	Al	P	Co
0.03	19.55	51.12	0.34	0.36	0.01	0.36
S	Mo	Ti	Nb	Fe		
0.01	2.97	0.81	5.08	REM		

### 3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานด้วยการวัดค่า ความแข็งด้วยเครื่อง Hardness Testing Machine

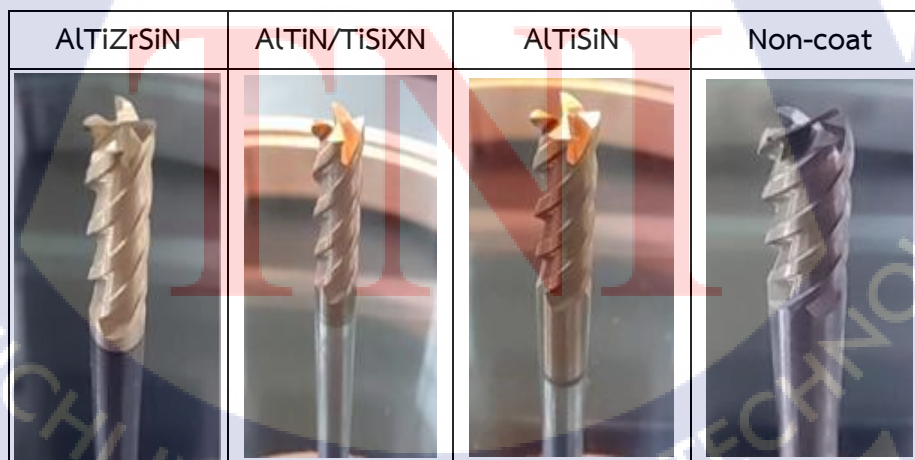
การทดสอบใช้เครื่องวัดความแข็งวัสดุหือ Mitutoyo รุ่น HV-100 ดังรูปที่ 3.3 ทดสอบจำนวน 3 ครั้งค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 41.1 - 43.8 HRC



รูปที่ 3.3 ภาพการทดสอบความแข็งของวัสดุอินโคเนล 718

### 3.3.3 คมตัดเอ็นมิลและคุณสมบัติของสารเคลือบผิวคมตัด

วัสดุคมตัดเป็นเอ็นมิลล์คาร์ไบด์ปลายหน้าตัดตรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร แบบ 4 ความยาวรวม 50 มิลลิเมตรพื้นเคลือบผิวคมตัดแบบ ALTiZrSiN, ALTiSiN, ALTiN/TiSiXN และ Non-coat ดังรูปที่ 3.4 และตารางที่ 3.3 แสดงค่าคุณสมบัติที่สำคัญของการเคลือบคมตัดเอ็นมิล



รูปที่ 3.4 ดอกกัดเคลือบสาร ALTiZrSiN , ALTiN/TiSiXN, ALTiSiN และ Non-coat

ตารางที่ 3.3 ตารางสารเคลือบผิวคมตัดเอ็นมิล

Coating Material	AlTiN/TiSiXN	AlTiSiN	AlTiZrSiN	Non-coat
Coating Hardness HIT (GPa)	37 +/-3	38 +/-5	35	-
Thickness (µm)	1-4	1-4	2-5	-
Friction coefficient	0.6	Not show	0.4	-
Compressive Stress (GPa)	-3.5+/-1	-3.1+/-1	Not show	-
Max.Service Temp. (°C)	1100	1000	1100	-
Coating Temp. (°C)	<500	<500	500	-
Coating colour	bronze	bronze	gold	Grey

### 3.4 เครื่องจักรและเครื่องมือวัด

กระบวนการกัดบนเครื่องกัด ซี เอ็น ซี ยี่ห้อ Makino S33 Max. Speed 12,000 rpm



รูปที่ 3.5 เครื่องกัด ซี เอ็น ซี ยี่ห้อ Makino S33

การวัดค่าความหยาบผิวโดยเครื่องวัดค่าความหยาบผิวยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ -210

Mitutoyo Surftest SJ-210 Series Portable Surface Roughness Testers



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดค่าความหยาบผิว Mitutoyo รุ่น SJ -210 V.1.008

กล้องไมโครสโคป ยี่ห้อ Mitutoyo Measuring Microscope รุ่น 10X+ 21X VISION



รูปที่ 3.7 กล้องไมโครสโคป Mitutoyo Measuring Microscope รุ่น 10X+ 21X VISION

### 3.5 ประยุกต์ใช้การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ทาสภาวะเหมาะสม

การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยหลักที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความหยาบของผิวและการสึกหรอของคมตัดในการกัดวัสดุอินโคเนล 718 โดยการออกแบบพื้นผิวผลตบนี้ก็มีวิธีการที่

น่าสนใจอยู่ 2 วิธีคือ การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) และการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ซึ่งการทดลองที่บริบูรณ์ของการออกแบบส่วนประสมกลางจะมีการเพิ่มข้อมูล เพื่อให้มีจุดเพียงพอที่จะหาแบบจำลองกำลังสองได้ จึงเหมาะสำหรับการทดลองบนปัจจัยที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าของปัจจัยในขอบเขตที่อยู่นอกเหนือจากค่าในระดับต่ำและระดับสูงของปัจจัยได้ กล่าวคือปัจจัยนำเข้าทุกปัจจัยจะต้องสามารถปรับเปลี่ยนค่าให้มีขนาดเท่าใดก็ได้ แต่การทดลองที่บริบูรณ์ของการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนจะไม่มีเพิ่มข้อมูล เช่นเดียวกับการออกแบบส่วนประสมกลางทำให้สามารถทำการทดลองบนค่าในระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูงได้โดยไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยใด ๆ ทั้งสิ้น เหมาะสำหรับการทดลองที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าของปัจจัยให้อยู่นอกเหนือจากสามระดับได้ [18-19]

ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน โดยระดับของปัจจัยในการออกแบบการทดลองโดยละเอียดนี้จะมี 3 ระดับ โดยใช้ค่าจากระดับต่ำ-สูง ของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ซึ่งปัจจัยและระดับ ของปัจจัยได้แสดงดังตารางที่ 3.1 และนำโปรแกรม Minitab 17 มาออกสร้างรูปแบบตารางลำดับการทดลองได้ 15 การทดลองและทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง รวมทดลองจำนวน 30 ครั้ง ในแต่ละคมตัด รวมทั้งสิ้น 120 ครั้ง ดังตารางที่ 3.4 จากนั้นทำการทดลองและบันทึกค่าผลตอบคือค่าความเรียบผิว สุดท้ายนำค่าผลตอบที่ได้มาวิเคราะห์ทำนายค่าปัจจัยหลักที่สภาวะที่เหมาะสม (Response Optimizer) ดังในตารางที่ 3.4 [24]

ตารางที่ 3.4 ลำดับขั้นการออกแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน ทดลองซ้ำ 2 ครั้ง

Std Order	Run Order	Pt Type	Blocks	V	Feed	Depth	Non	AlTiZr SiN	AlTi SiN	AlTiN/TiSiXN
1	1	2	1	50	0.05	0.15				
2	2	2	1	150	0.05	0.15				
3	3	2	1	50	0.15	0.15				
4	4	2	1	150	0.15	0.15				
5	5	2	1	50	0.1	0.1				
6	6	2	1	150	0.1	0.1				
7	7	2	1	50	0.1	0.2				
8	8	2	1	150	0.1	0.2				
9	9	2	1	100	0.05	0.1				
10	10	2	1	100	0.15	0.1				

ตารางที่ 3.4 ลำดับขั้นการออกแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน ทดลองซ้ำ 2 ครั้ง (ต่อ)

Std Order	Run Order	Pt Type	Blocks	V	Feed	Depth	Non	AlTiZr SiN	AlTi SiN	AlTiN/TiSiXN
11	11	2	1	100	0.05	0.2				
12	12	2	1	100	0.15	0.2				
13	13	0	1	100	0.1	0.15				
14	14	0	1	100	0.1	0.15				
15	15	0	1	100	0.1	0.15				
16	16	2	1	50	0.05	0.15				
17	17	2	1	150	0.05	0.15				
18	18	2	1	50	0.15	0.15				
19	19	2	1	150	0.15	0.15				
20	20	2	1	50	0.1	0.1				
21	21	2	1	150	0.1	0.1				
22	22	2	1	50	0.1	0.2				
23	23	2	1	150	0.1	0.2				
24	24	2	1	100	0.05	0.1				
25	25	2	1	100	0.15	0.1				
26	26	2	1	100	0.05	0.2				
27	27	2	1	100	0.15	0.2				
28	28	0	1	100	0.1	0.15				
29	29	0	1	100	0.1	0.15				
30	30	0	1	100	0.1	0.15				

### 3.6 การดำเนินการทดลอง

#### 3.6.1 การเตรียมการวิจัย

3.6.1.1 การเตรียมชิ้นงานเป็นวัสดุอินโคเนล 718 ขนาดกว้าง 150 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร หนา 25 มิลลิเมตร เจียรผิวเรียบเสมอกันทุกด้านนำมาวางยึดบนปากกาจับงานที่ตำแหน่งตรงกลางยึดบนแท่นเครื่องกัด CNC ให้แน่นและปรับตำแหน่งให้ตั้งฉากขนานกับแกนเคลื่อนที่ของเครื่องกัด

3.6.1.2 การเตรียมเครื่องมือตัด Endmil คาร์ไบด์เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตรหัวตรงแบบ 4 ฟันโดยนำไปเคลือบผิวคมตัดแบบ ALTiZrSiN, ALTiSiN, ALTiN/TiSiXN และ Non-coat จำนวนที่เพียงพอต่อการออกแบบการทดลอง

ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องป้อนเข้าเครื่องกัด

StdOrder	RunOrder	V	Speed	Feed	Feed_mc	Depth
1	1	50	3980	0.05	796	0.15
2	2	150	11942	0.05	2388.4	0.15
3	3	50	3980	0.15	2388	0.15
4	4	150	11942	0.15	7165.2	0.15
5	5	50	3980	0.1	1592	0.1
6	6	150	11942	0.1	4776.8	0.1
7	7	50	3980	0.1	1592	0.2
8	8	150	11942	0.1	4776.8	0.2
9	9	100	7961	0.05	1592.2	0.1
10	10	100	7961	0.15	4776.6	0.1
11	11	100	7961	0.05	1592.2	0.2
12	12	100	7961	0.15	4776.6	0.2
13	13	100	7961	0.1	3184.4	0.15
14	14	100	7961	0.1	3184.4	0.15
15	15	100	7961	0.1	3184.4	0.15
16	16	50	3980	0.05	796	0.15
17	17	150	11942	0.05	2388.4	0.15
18	18	50	3980	0.15	2388	0.15
19	19	150	11942	0.15	7165.2	0.15
20	20	50	3980	0.1	1592	0.1
21	21	150	11942	0.1	4776.8	0.1
22	22	50	3980	0.1	1592	0.2
23	23	150	11942	0.1	4776.8	0.2

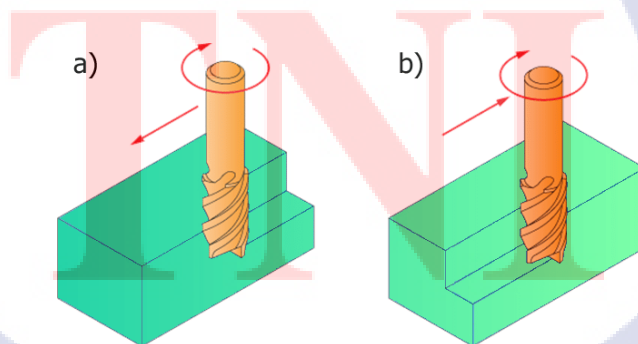
ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องป้อนเข้าเครื่องกัด (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	V	Speed	Feed	Feed_mc	Depth
24	24	100	7961	0.05	1592.2	0.1
25	25	100	7961	0.15	4776.6	0.1
26	26	100	7961	0.05	1592.2	0.2
27	27	100	7961	0.15	4776.6	0.2
28	28	100	7961	0.1	3184.4	0.15
29	29	100	7961	0.1	3184.4	0.15
30	30	100	7961	0.1	3184.4	0.15

3.6.1.3 การเตรียมค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการทดลองเพื่อสามารถหาค่าที่เหมาะสมสำหรับเครื่องมือตัดที่ตัดเฉือนชิ้นงาน ได้ค่าความหนาผิวและการสึกหรอที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานสำหรับการออกแบบตัดเฉือนสนใจค่าพารามิเตอร์ความเร็วการตัดในช่วง High speed machining ของวัสดุ [2-6, 8-10]

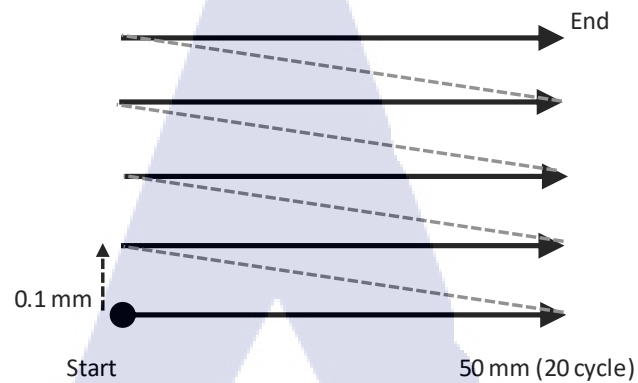
### 3.6.2 การทดลอง

ทดลองกัดชิ้นงานตามค่าปัจจัยตามตารางที่ 3.5 ตัดเฉือนกัดตามแสดงในรูปที่ 3.8 (b) มีทิศทางทางการตัดเฉือนแนวแกน X ตามรูปที่ 3.9 มีระยะตัดเฉือน 50 มิลลิเมตร จำนวน 20 ครั้ง มีระยะป้อนด้านข้าง 0.1 มิลลิเมตร บันทึกผลทุกกระยะตัดเฉือน 1 เมตร



รูปที่ 3.8 ทิศทางการตัดเฉือนแบบกัตสวน (a) การตัดเฉือนแบบกัตตาม (b)





รูปที่ 3.9 ทิศทางการกัดแบบกัดตามชิ้นงาน วัสดุอินโคเนล 718

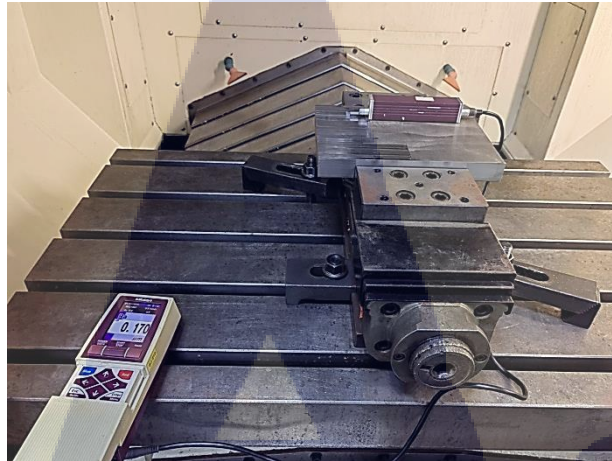


รูปที่ 3.10 การตัดเฉือนบนเครื่องกัด ซี เอ็น ซี Makino รุ่น S33

### 3.7 การวิเคราะห์ความหยาบผิว

#### 3.7.1 วิธีวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย Ra

วิธีวัดค่าความหยาบผิวการบันทึกผลความเรียบผิวจากการกัดทุกๆระยะทาง 1 เมตร โดยใช้เครื่อง Surface Roughness Testing รุ่น SJ-210 MITUTOYO ดังรูปที่ 3.6 ในงานวิจัยอ้างอิงวิธีการตามมาตรฐาน ISO4287:1997 ดังตารางที่ 3.6 ชนิดของรูปแบบ คือ R\_ISO กำหนดการใช้ค่า Sampling length เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตรจำนวนครั้ง Sampling เท่ากับ 5 Cut-off Length 0.8 มิลลิเมตร ชนิดของ filter คือ Gaussian และ Evaluation lengths 4 มิลลิเมตร



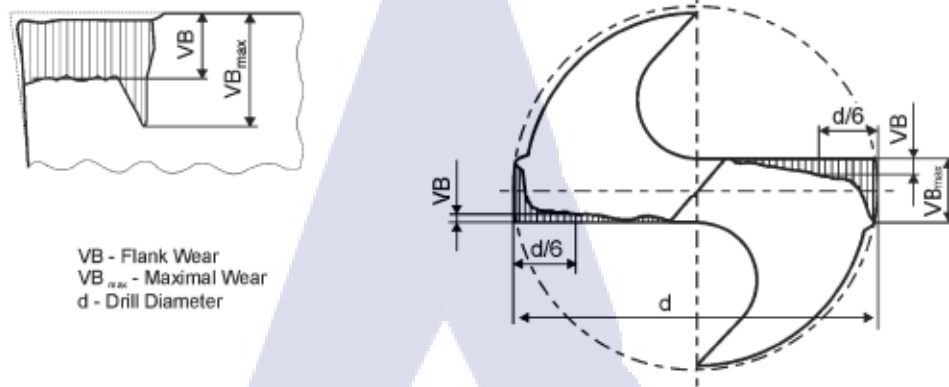
รูปที่ 3.11 การวัดความเรียบผิวชิ้นงานด้วยเครื่องวัด MITUTOYO รุ่น SJ-210

ตารางที่ 3.6 ช่วงการทดสอบค่าความเรียบผิวเฉลี่ยมาตรฐาน ISO 4287:1997

Ra ( $\mu\text{m}$ )	Sampling length (mm)	Cutoff (mm)	Value	Evaluation length (mm)
$0.006 < Ra \leq 0.02$	0.08	0.08		0.4
$0.02 < Ra \leq 0.1$	0.25	0.25		1.25
$0.1 < Ra \leq 2.0$	0.8	0.8		4
$2 < Ra \leq 10$	2.5	2.5		12.5
$10 < Ra \leq 80$	8	8		40

### 3.8 การวิเคราะห์ค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัด

การวัดค่าการสึกหรอของคมตัดทำการบันทึกผลทุกระยะตัดเดือน 1 เมตร โดยวัดที่มุมหลบของคมตัดทั้ง 4 คม แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย อ้างอิงข้อกำหนดมาตรฐาน ISO 3685:1993 มีค่าการสึกหรอที่มุมหลบไม่เกิน 200 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 3.10 ด้วยเครื่องวัดกล้องขยาย MITUTOYO Measuring Microscope 10X + Vision unit 21X ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.12 การวัดขนาดการสึกหรอบนผิวทอล



รูปที่ 3.13 การวัดค่าการสึกหรอคมตัดด้วยกล้องไมโครสโคป MITUTOYO รุ่น 10X+21X VISION

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้โดยผู้วิจัยได้ดำเนินการบันทึกผลการทดลองและวิเคราะห์ผลผ่านโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab R17 เพื่อประยุกต์ใช้งานค่าปัจจัยที่ประมวลผลตอบโดยการนำค่าปัจจัยที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน มาวิเคราะห์ด้วยการหาสภาวะที่เหมาะสม มีผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

1. ผลการวัดค่า Ra ตามการทดลองแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนของแต่ละคมตัดสารเคลือบ
2. ผลวิเคราะห์การถดถอยพื้นผิวผลตอบการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance ) ของแต่ละคมตัดสารเคลือบ
3. ผลการหาค่าปัจจัยที่สภาวะเหมาะสมที่สุด
4. ผลการวัดผลค่าความหยาบผิว
- 5 ผลการวัดผลค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัด
6. การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเรียบผิวกับการสึกหรอของคมตัดตามระยะตัดเฉือน

#### 4.1 ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

ทำการทดลองตามลำดับของตารางการออกแบบออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนบันทึกผลค่าการวัดความหยาบผิว (Ra) ดังในตารางที่ 4.1 จากนั้นนำค่าความหยาบผิวที่วัดของแต่ละคมตัดดกกัดเคลือบสารมาวิเคราะห์การถดถอยพื้นผิวผลตอบการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance ) วิเคราะห์ค่าความผิดพลาด (residual) วิเคราะห์ด้วยกราฟ Factorial Plots, Surface Plots และวิเคราะห์ด้วย Response optimizer เลือกเป้าหมายคือค่าการหาค่าของผลตอบที่ค่าต่ำที่สุด (choose minimize target ) บนโปรแกรม Minitab17 จนสามารถทำนายค่าปัจจัยหลักที่เหมาะสมสำหรับค่าความหยาบผิว (Ra) ที่น้อยที่สุด

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่าความเรียบผิวของแต่ละคมตัดตามการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	V	Feed	Depth	Ra_ Non	Ra_ALTiZr SiN	Ra_ALTi SiN	Ra_ALTiN/TiSiXN
1	1	2	1	50	0.05	0.15	0.113	0.139	0.14	0.169
2	2	2	1	150	0.05	0.15	0.112	0.165	0.172	0.236
3	3	2	1	50	0.15	0.15	0.182	0.261	0.176	0.274

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่าความเรียบผิวของแต่ละคมตัดตามการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (ต่อ)

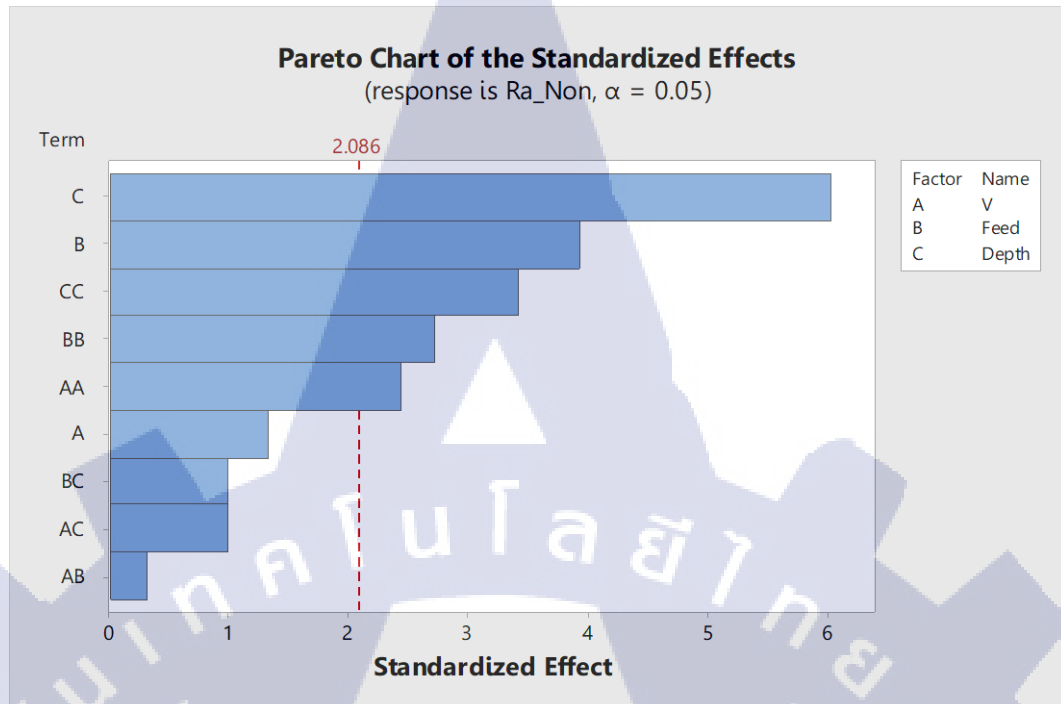
StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	V	Feed	Depth	Ra_ Non	Ra_ALTiZr SiN	Ra_ALTi SiN	Ra_ALTiN/TiSiXN
4	4	2	1	150	0.15	0.15	0.21	0.191	0.212	0.205
5	5	2	1	50	0.1	0.1	0.13	0.176	0.139	0.249
6	6	2	1	150	0.1	0.1	0.18	0.154	0.164	0.215
7	7	2	1	50	0.1	0.2	0.267	0.3	0.326	0.427
8	8	2	1	150	0.1	0.2	0.378	0.292	0.435	0.424
9	9	2	1	100	0.05	0.1	0.093	0.12	0.17	0.143
10	10	2	1	100	0.15	0.1	0.204	0.191	0.18	0.171
11	11	2	1	100	0.05	0.2	0.181	0.258	0.264	0.283
12	12	2	1	100	0.15	0.2	0.231	0.317	0.471	0.377
13	13	0	1	100	0.1	0.15	0.16	0.202	0.164	0.2
14	14	0	1	100	0.1	0.15	0.147	0.261	0.158	0.167
15	15	0	1	100	0.1	0.15	0.162	0.243	0.151	0.241
16	16	2	1	50	0.05	0.15	0.112	0.176	0.134	0.153
17	17	2	1	150	0.05	0.15	0.129	0.163	0.126	0.23
18	18	2	1	50	0.15	0.15	0.213	0.266	0.182	0.217
19	19	2	1	150	0.15	0.15	0.167	0.224	0.195	0.259
20	20	2	1	50	0.1	0.1	0.141	0.198	0.137	0.229
21	21	2	1	150	0.1	0.1	0.139	0.113	0.168	0.241
22	22	2	1	50	0.1	0.2	0.322	0.258	0.297	0.354
23	23	2	1	150	0.1	0.2	0.366	0.278	0.408	0.483
24	24	2	1	100	0.05	0.1	0.101	0.107	0.144	0.105
25	25	2	1	100	0.15	0.1	0.189	0.153	0.169	0.186
26	26	2	1	100	0.05	0.2	0.153	0.229	0.237	0.246
27	27	2	1	100	0.15	0.2	0.195	0.277	0.455	0.356
28	28	0	1	100	0.1	0.15	0.15	0.251	0.182	0.166
29	29	0	1	100	0.1	0.15	0.156	0.2	0.171	0.207
30	30	0	1	100	0.1	0.15	0.176	0.247	0.195	0.194

#### 4.2 ผลวิเคราะห์การถดถอยพื้นผิวผลตอบการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละคมตัดสารเคลือบ

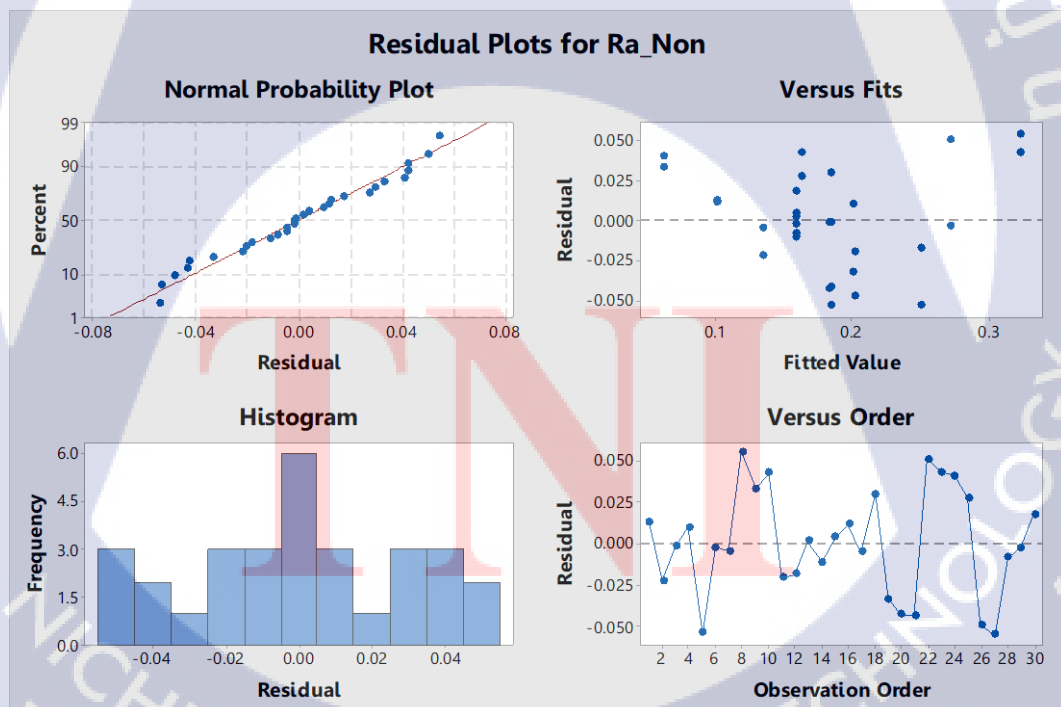
##### 4.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคมตัดไม้เคลือบสาร

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคมตัดไม้เคลือบสาร

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.118249	0.013139	9.16	0.000
Linear	3	0.077242	0.025747	17.94	0.000
V	1	0.002525	0.002525	1.76	0.200
Feed	1	0.022276	0.022276	15.52	0.001
Depth	1	0.052441	0.052441	36.55	0.000
Square	3	0.038000	0.012667	8.83	0.001
V*V	1	0.008600	0.008600	5.99	0.024
Feed*Feed	1	0.010593	0.010593	7.38	0.013
Depth*Depth	1	0.016837	0.016837	11.73	0.003
2-Way Interaction	3	0.003007	0.001002	0.70	0.564
V*Feed	1	0.000144	0.000144	0.10	0.754
V*Depth	1	0.001431	0.001431	1.00	0.330
Feed*Depth	1	0.001431	0.001431	1.00	0.330
Error	20	0.028698	0.001435		
Lack-of-Fit	3	0.022947	0.007649	22.61	0.000
Pure Error	17	0.005751	0.000338		
Total	29	0.146947			
Model Summary					
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
0.0378803	80.47%	71.68%	50.41%		
Regression Equation in Uncoded Units					
$\text{Ra\_Non} = 0.285 - 0.00311 V + 4.75 \text{ Feed} - 4.58 \text{ Depth} + 0.000014 V*V - 15.15 \text{ Feed*Feed} \\ + 19.10 \text{ Depth*Depth} - 0.00170 V*\text{Feed} + 0.00535 V*\text{Depth} - 5.35 \text{ Feed*Depth}$					



รูปที่ 4.1 กราฟ Parato ของคมตัดไม้เคลือบสาร



รูปที่ 4.2 ค่า Residual ของคมตัดไม้เคลือบสาร

จากข้อมูลที่น่าเสนอในตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของคมตัดไม้เคลือบสาร พบว่าค่า P-Value ของแต่ละปัจจัย หากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าสมการของปัจจัยนั้นส่งผลกับผลตอบสนองของการทดลอง

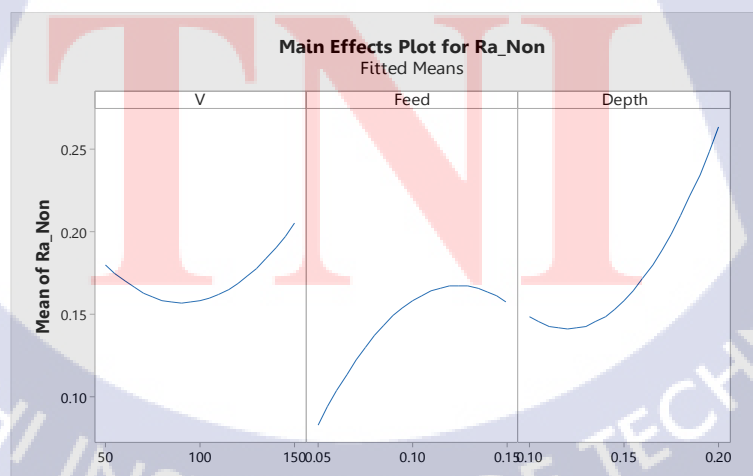
1. ค่า P-value ของเทอมกำลังสองมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นส่งผลกับผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ
2. ค่า P-value ของ Lack of fit มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าสมการความสัมพันธ์อาจจะมีบางช่วงของปัจจัยที่มีความผิดพลาดสูง
3. ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $r^2$ ) โดย  $R^2$  (adj) = 71.68% มากกว่า 70% ถือว่ายอมรับได้
4. สมการความสัมพันธ์ของระหว่างปัจจัยและผลตอบสนอง

$$\begin{aligned} Ra\_Non = & 0.285 - 0.00311 V + 4.75 \text{ Feed} - 4.58 \text{ Depth} + 0.000014 V*V - 15.15 \text{ Feed*Feed} \\ & + 19.10 \text{ Depth*Depth} - 0.00170 V*\text{Feed} + 0.00535 V*\text{Depth} - 5.35 \text{ Feed*Depth} \end{aligned}$$

5. กราฟผลกระทบพาราเรโตของคมตัดไม้เคลือบสารแสดงค่าผลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนองในรูปแบบกราฟพาราเรโตปัจจัย C, B มีค่ามากกว่าเส้นวิกฤตแสดงว่าปัจจัยนั้นส่งผลกับผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญดังรูปที่ 4.1

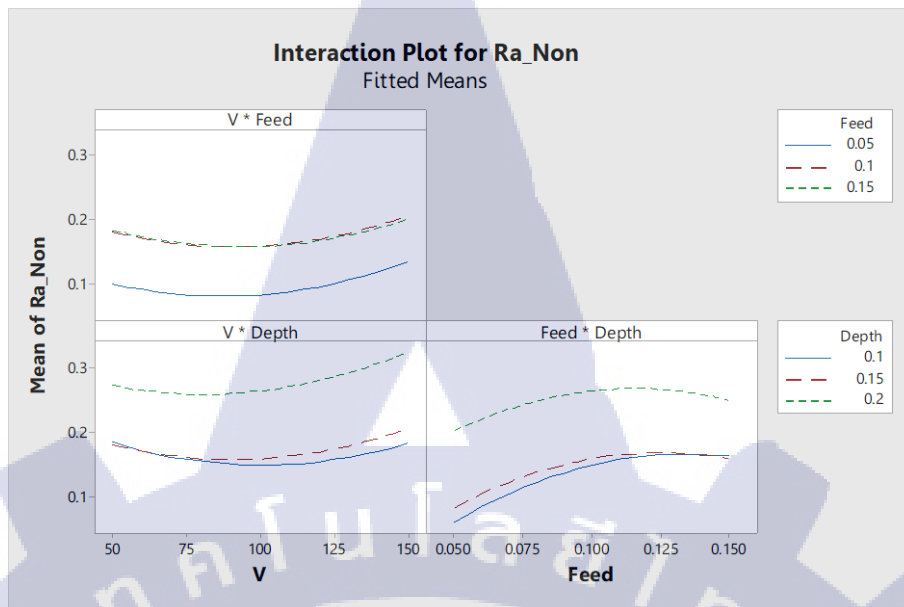
6. การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด (Residual) จากกราฟรูปที่ 4.2 โดยข้อมูลที่ตีมีการกระจายตัวของค่าผิดพลาดเป็นการแจกแจงแบบปกติ มีความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดสม่ำเสมอและมีความเป็นอิสระต่อกันดังรูปที่ 4.2

7. การวิเคราะห์ด้วยกราฟ Factorial Plots



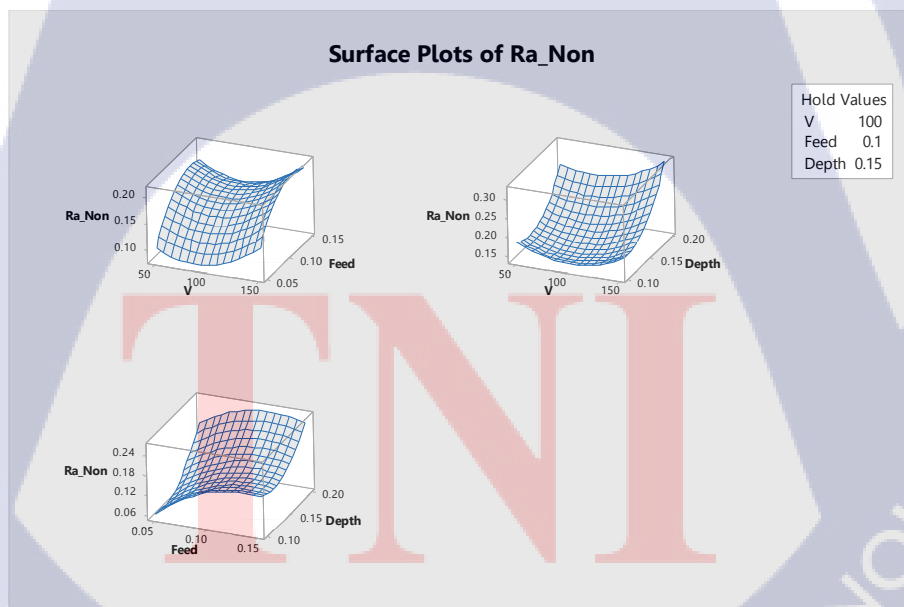
รูปที่ 4.3 กราฟ Main Effects ของคมตัดไม้เคลือบสาร





รูปที่ 4.4 กราฟ Interaction ของคมตัดไม้เคลือบสาร

8. การวิเคราะห์ด้วย Surface Plot

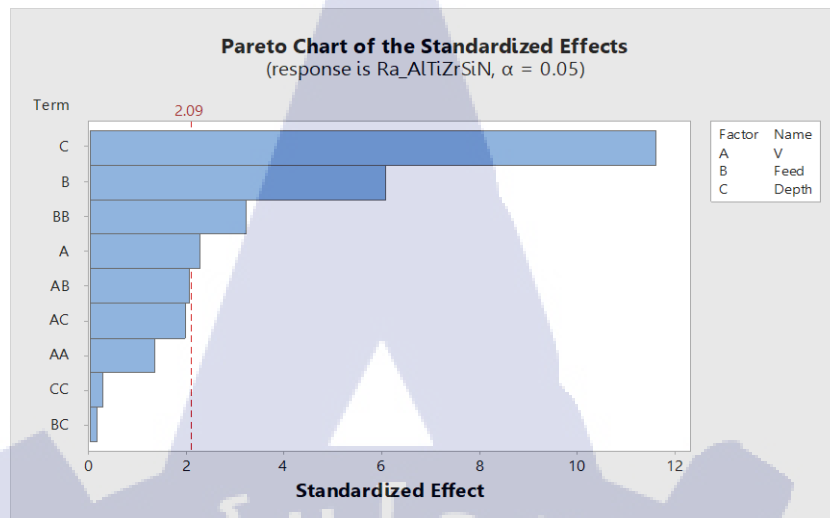


รูปที่ 4.5 กราฟ Surface Plot ของคมตัดไม้เคลือบสาร

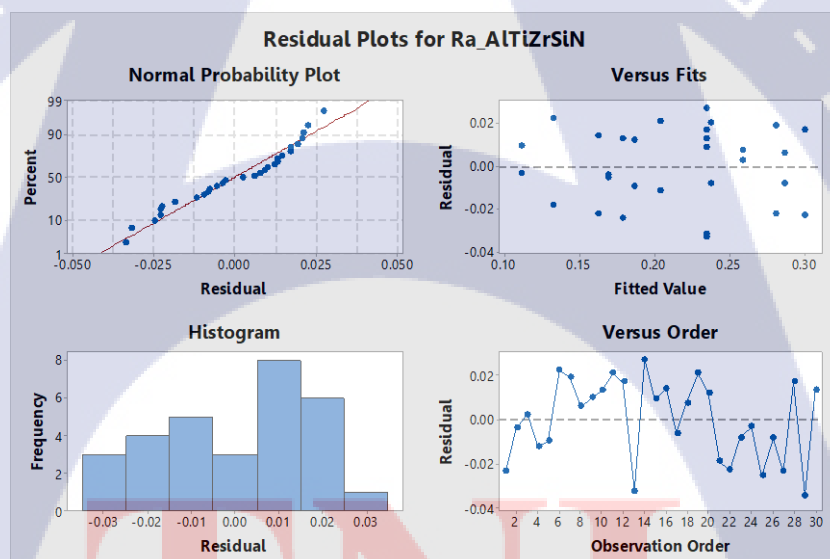
#### 4.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสารเคลือบ AlTiZrSiN

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสารเคลือบ AlTiZrSiN

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.090578	0.010064	21.96	0.000
Linear	3	0.081573	0.027191	59.33	0.000
V	1	0.002352	0.002352	5.13	0.035
Feed	1	0.017096	0.017096	37.30	0.000
Depth	1	0.062126	0.062126	135.55	0.000
Square	3	0.005269	0.001756	3.83	0.026
V*V	1	0.000834	0.000834	1.82	0.193
Feed*Feed	1	0.004708	0.004708	10.27	0.004
Depth*Depth	1	0.000037	0.000037	0.08	0.778
2-Way Interaction	3	0.003736	0.001245	2.72	0.072
V*Feed	1	0.001953	0.001953	4.26	0.052
V*Depth	1	0.001770	0.001770	3.86	0.063
Feed*Depth	1	0.000013	0.000013	0.03	0.870
Error	20	0.009167	0.000458		
Lack-of-Fit	3	0.000386	0.000129	0.25	0.861
Pure Error	17	0.008781	0.000517		
Total	29	0.099745			
Model Summary					
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
0.0214087	90.81%	86.67%	80.35%		
Regression Equation in Uncoded Units					
Ra_AlTiZr = -0.139 + 0.000340 V + 3.374 Feed + 0.97 Depth - 0.000004 V*V - 10.10 Feed*Feed					
SiN - 0.90 Depth*Depth - 0.00625 V*Feed + 0.00595 V*Depth - 0.50 Feed*Depth					



รูปที่ 4.6 กราฟ Parato ของคมตัดที่เคลือบด้วยสาร ALTiZrSiN



รูปที่ 4.7 ค่า Residual ของคมตัดที่เคลือบด้วยสาร ALTiZrSiN

จากข้อมูลที่นำเสนอในตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของคมตัดสารเคลือบ ALTiZrSiN จากข้อมูลด้านบน

1. การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสารเคลือบ ALTiZrSiN พิจารณาว่า P-value ของเทอมกำลังสองค่า P-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าค่าปัจจัยส่งผลกับผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ
2. ค่า P-Value ของ Lack-of-Fit มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการคำนวณมีความแม่นยำ

3. ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $r^2$ ) โดย  $R^2(\text{adj}) = 86.67\%$  มากกว่า 70% ถือว่ายอมรับได้

4. สมการความสัมพันธ์ของระหว่างปัจจัยและผลตอบสนอง

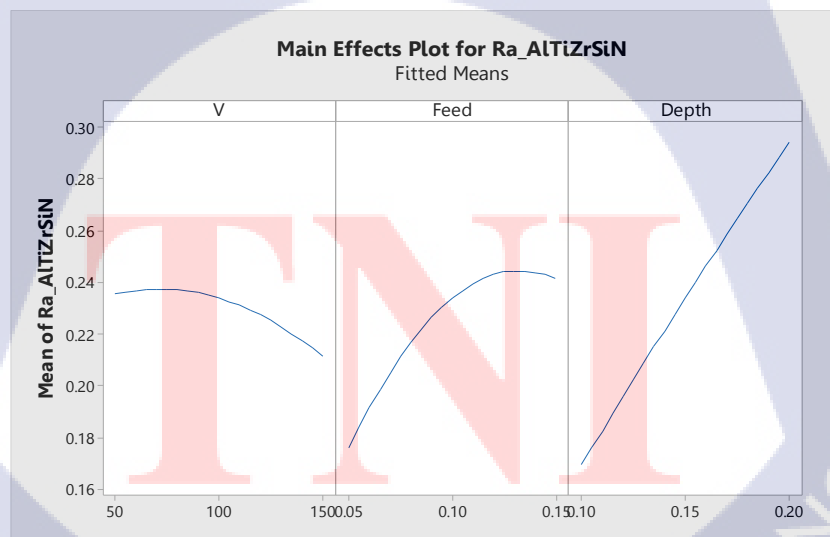
$$\begin{aligned} \text{Ra\_AlTiZrSiN} = & -0.139 + 0.000340 V + 3.374 \text{ Feed} + 0.97 \text{ Depth} - 0.000004 V*V - 10.10 \text{ Feed*Feed} \\ & - 0.90 \text{ Depth*Depth} - 0.00625 V*\text{Feed} + 0.00595 V*\text{Depth} - 0.50 \text{ Feed*Depth} \end{aligned}$$

5. กราฟผลกระทบพาราเรโตของคมตัด ALTiZrSiN (Effects Pareto for Ra\_AltiZrSiN) แสดงค่าผลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนองในรูปแบบกราฟพาราเรโตปัจจัย C, B และ A มีค่ามากกว่าเส้นวิกฤตแสดงว่าปัจจัยนั้นส่งผลกับผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญดังรูปที่ 4.6

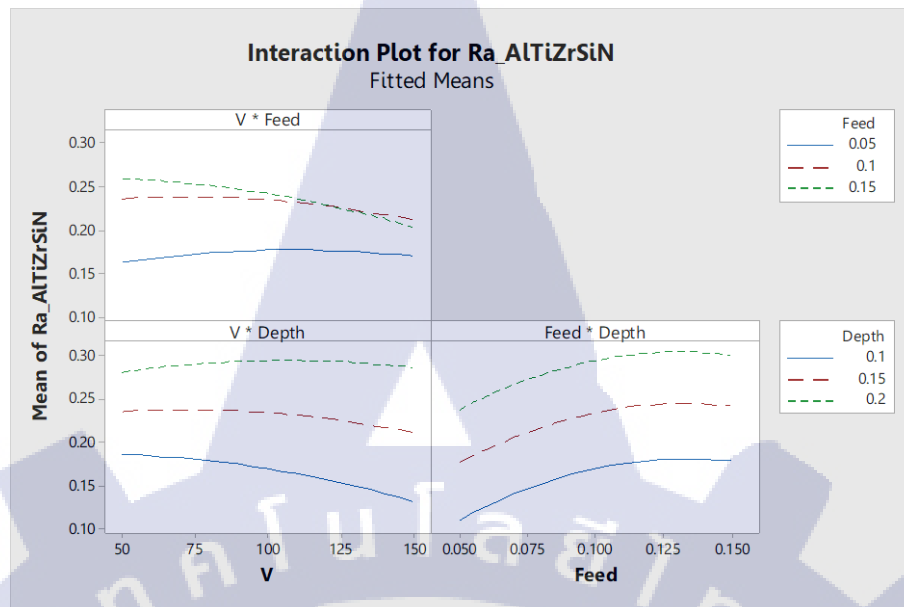
6. การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด (Residual) จากกราฟ Residual Plots for Ra\_AltiZrSiN

ตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของค่าความผิดพลาด ข้อมูลมีการกระจายตัวของค่าผิดพลาดเป็นการแจกแจงแบบปกติ ตรวจสอบความแปรปรวนคงที่ของความผิดพลาด ข้อมูลมีค่าความผิดพลาดสม่ำเสมอและมีความเป็นอิสระต่อกันดังรูปที่ 4.7

7. การวิเคราะห์ด้วยกราฟ Factorial ของคมตัดที่เคลือบด้วยสาร ALTiZrSiN

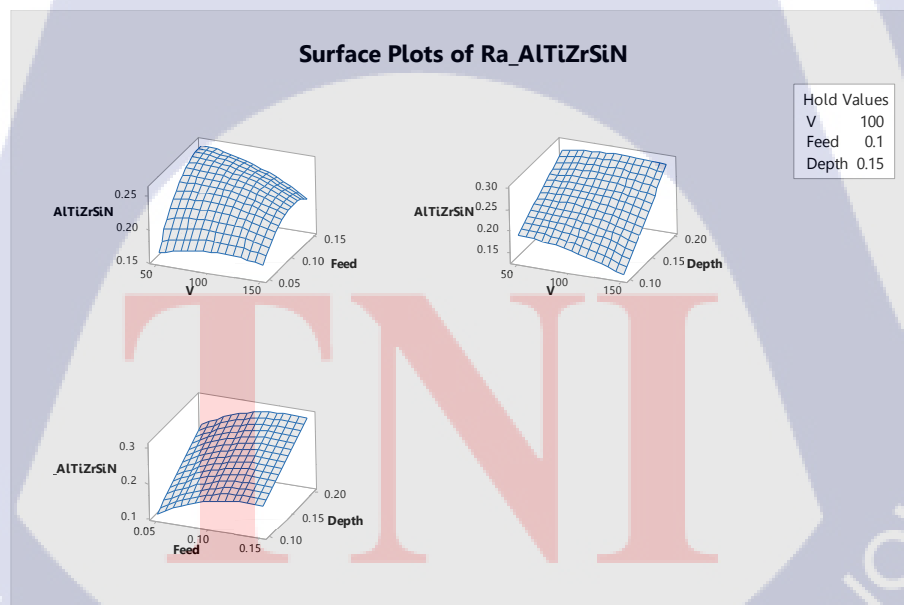


รูปที่ 4.8 กราฟ Main Effects ของคมตัดที่เคลือบด้วยสาร ALTiZrSiN



รูปที่ 4.9 กราฟ Interaction ของคมตัดที่เคลือบด้วยสาร ALTiZrSiN

#### 8. การวิเคราะห์ด้วย Surface Plot

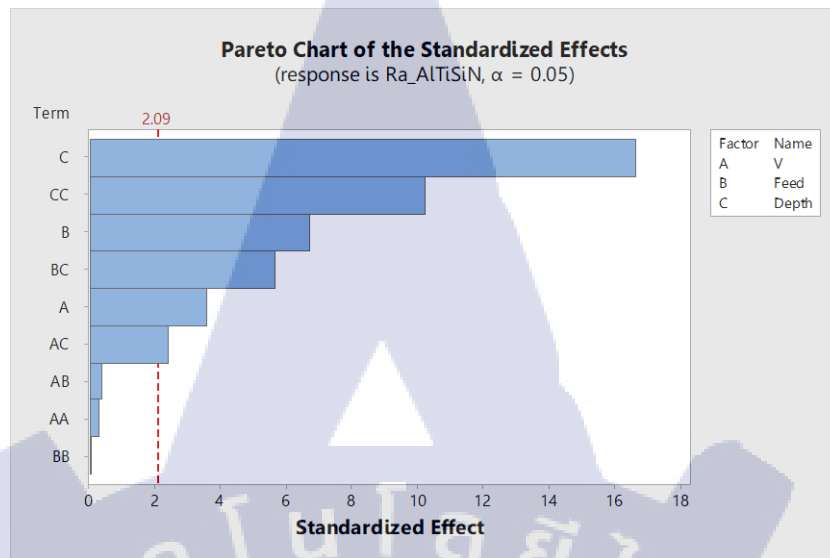


รูปที่ 4.10 กราฟ Surface Plot ของคมตัดที่เคลือบด้วยสาร ALTiZrSiN

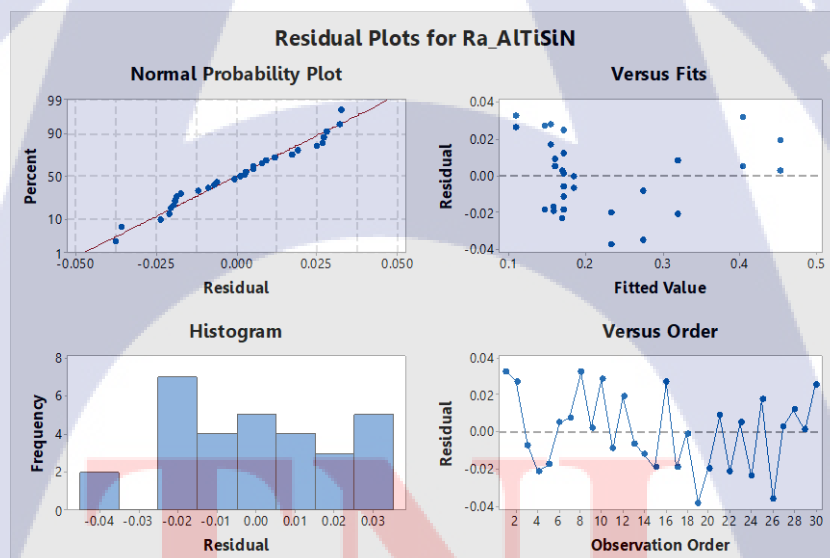
#### 4.2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคมตัดสารเคลือบ AlTiSiN

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคมตัดสารเคลือบ AlTiSiN

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.284146	0.031572	53.43	0.000
Linear	3	0.198693	0.066231	112.08	0.000
V	1	0.007613	0.007613	12.88	0.002
Feed	1	0.026651	0.026651	45.10	0.000
Depth	1	0.164430	0.164430	278.25	0.000
Square	3	0.063000	0.021000	35.54	0.000
V*V	1	0.000047	0.000047	0.08	0.781
Feed*Feed	1	0.000002	0.000002	0.00	0.954
Depth*Depth	1	0.061967	0.061967	104.86	0.000
2-Way Interaction	3	0.022453	0.007484	12.67	0.000
V*Feed	1	0.000078	0.000078	0.13	0.720
V*Depth	1	0.003362	0.003362	5.69	0.027
Feed*Depth	1	0.019012	0.019012	32.17	0.000
Error	20	0.011819	0.000591		
Lack-of-Fit	3	0.007583	0.002528	10.15	0.000
Pure Error	17	0.004235	0.000249		
Total	29	0.295965			
Model Summary					
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
0.0243092	96.01%	94.21%	90.27%		
Regression Equation in Uncoded Units					
$\text{Ra\_AlTiSiN} = 0.981 - 0.000717 \text{ V} - 2.192 \text{ Feed} - 11.73 \text{ Depth} - 0.000001 \text{ V*V} - 0.21 \text{ Feed*Feed} \\ + 36.64 \text{ Depth*Depth} + 0.00125 \text{ V*Feed} + 0.00820 \text{ V*Depth} + 19.50 \text{ Feed*Depth}$					



รูปที่ 4.11 กราฟ Pareto ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiSiN



รูปที่ 4.12 กราฟ Residual ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiSiN

จากข้อมูลที่น่าเสนอในตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของคมตัดสารเคลือบ ALTiSiN พิจารณาค่า P-Value ของแต่ละปัจจัยหาค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าสมการของปัจจัยนั้นส่งผลกับผลตอบสนอง (Response) ของการทดลอง

1. ค่า P-value ของเทอมกำลังสองมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นส่งผลกับผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ

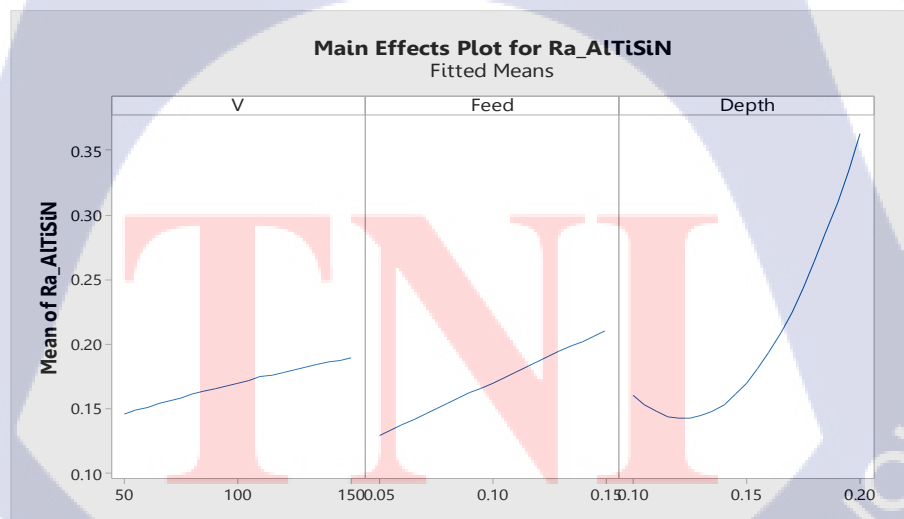
2. ค่า P-value ของ Lack of fit มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าสมการความสัมพันธ์อาจจะมีบางช่วงของปัจจัยที่มีความผิดพลาดสูง
3. ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $r^2$ ) โดย  $R^2(\text{adj}) = 94.21\%$  มากกว่า 70% ถือว่ายอมรับได้
4. สมการความสัมพันธ์ของระหว่างปัจจัยและผลตอบสนอง

$$\begin{aligned} \text{Ra\_ALTiSiN} = & 0.981 - 0.000717 V - 2.192 \text{ Feed} - 11.73 \text{ Depth} - 0.000001 V*V - 0.21 \text{ Feed*Feed} \\ & + 36.64 \text{ Depth*Depth} + 0.00125 V*\text{Feed} + 0.00820 V*\text{Depth} + 19.50 \text{ Feed*Depth} \end{aligned}$$

5. กราฟผลกระทบพาเรโตของคมตัด ALTiSiN (Effects Pareto for Ra\_ALTiSiN) แสดงค่าผลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนองในรูปแบบกราฟพาเรโตปัจจัย C, B และ A มีค่ามากกว่าเส้นวิกฤตแสดงว่าปัจจัยนั้นส่งผลกับผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญดังรูปที่ 4.11

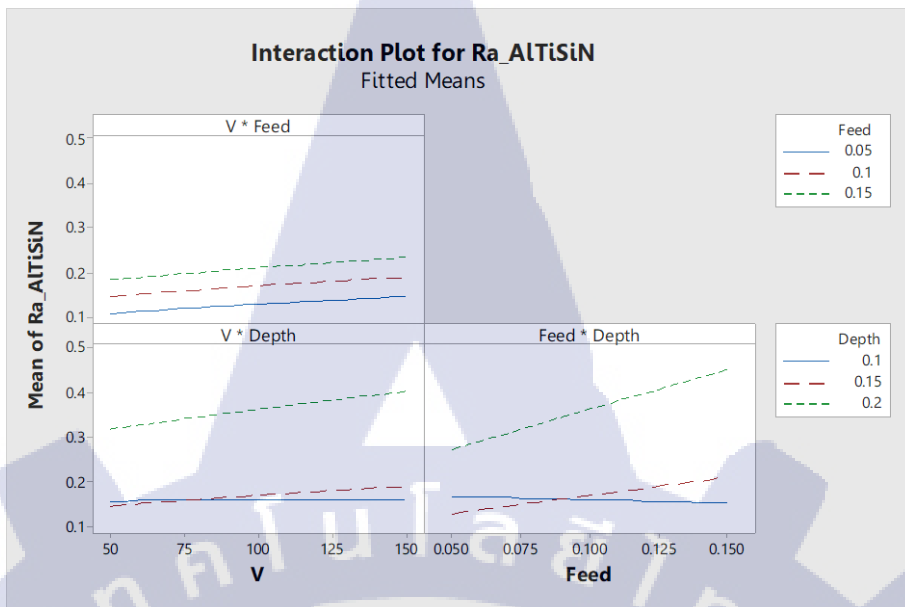
6. การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด (Residual) จากกราฟรูปที่ 4.12 ตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของค่าความผิดพลาด ข้อมูลมีการกระจายตัวของค่าผิดพลาดเป็นการแจกแจงแบบปกติ ตรวจสอบความแปรปรวนคงที่ของความผิดพลาด ข้อมูลมีค่าความผิดพลาดสม่ำเสมอและมีความเป็นอิสระต่อกันดังรูปที่ 4.12

7. การวิเคราะห์ด้วยกราฟ Factorial Plots ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiSiN



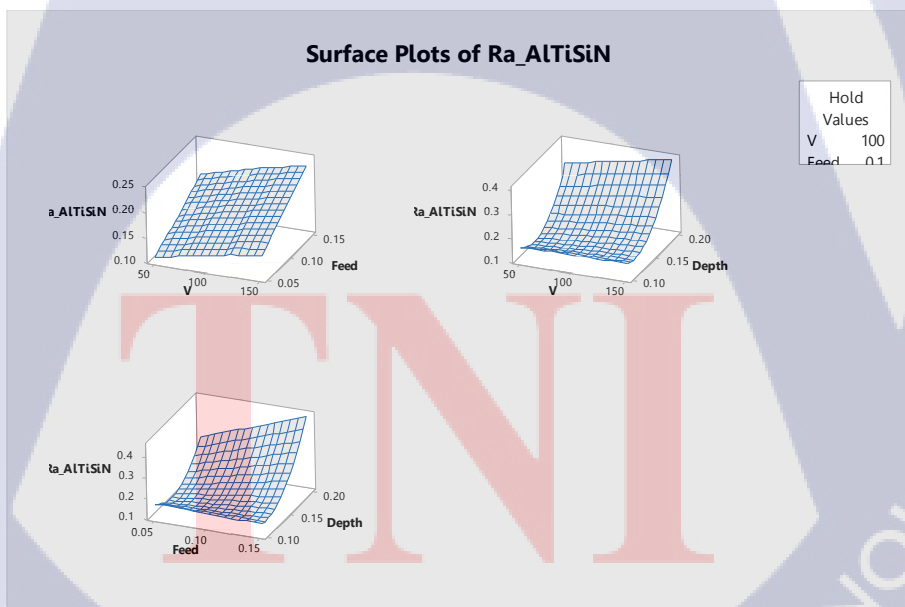
รูปที่ 4.13 กราฟ Main Effects ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiSiN





รูปที่ 4.14 กราฟ Interaction ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiSiN

8. การวิเคราะห์ด้วย Surface Plot

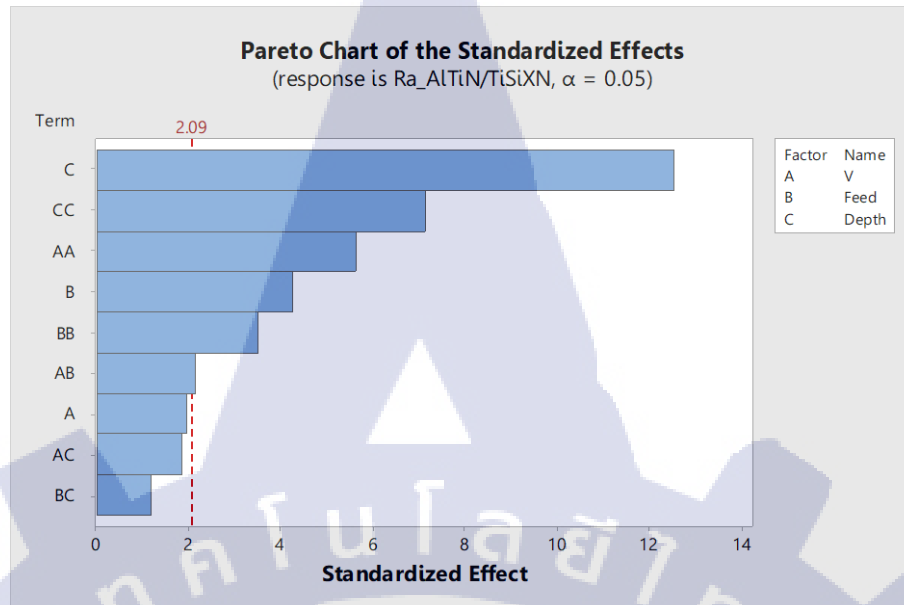


รูปที่ 4.15 กราฟ Surface Plot ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiSiN

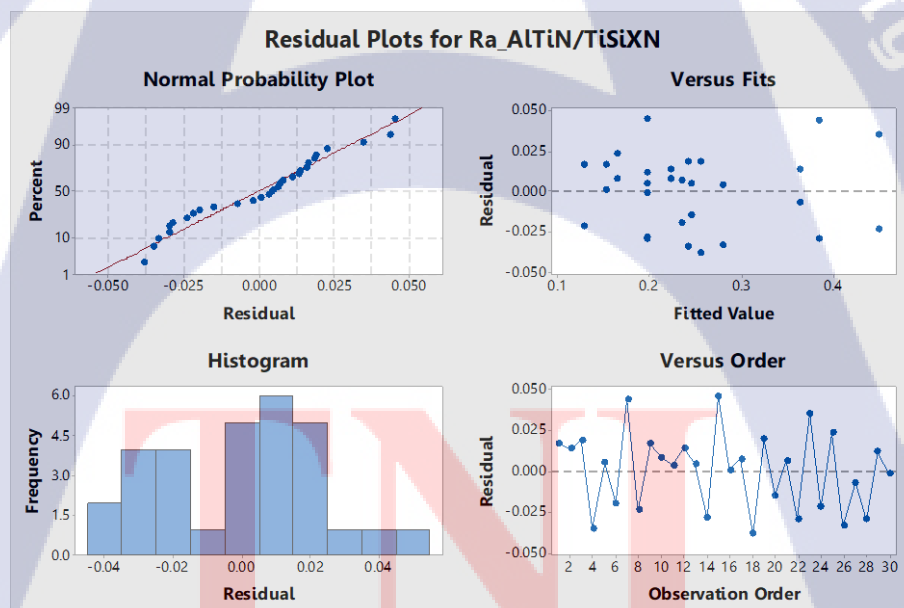
#### 4.2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสารเคลือบ AlTiN/TiSiXN

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคมตัดสารเคลือบ AlTiN/TiSiXN

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.225550	0.025061	31.83	0.000
Linear	3	0.141885	0.047295	60.06	0.000
V	1	0.003053	0.003053	3.88	0.063
Feed	1	0.014400	0.014400	18.29	0.000
Depth	1	0.124433	0.124433	158.02	0.000
Square	3	0.076144	0.025381	32.23	0.000
V*V	1	0.025021	0.025021	31.77	0.000
Feed*Feed	1	0.009659	0.009659	12.27	0.002
Depth*Depth	1	0.040120	0.040120	50.95	0.000
2-Way Interaction	3	0.007521	0.002507	3.18	0.046
V*Feed	1	0.003655	0.003655	4.64	0.044
V*Depth	1	0.002738	0.002738	3.48	0.077
Feed*Depth	1	0.001128	0.001128	1.43	0.245
Error	20	0.015749	0.000787		
Lack-of-Fit	3	0.001931	0.000644	0.79	0.515
Pure Error	17	0.013818	0.000813		
Total	29	0.241299			
Model Summary					
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
0.0280613	93.47%	90.54%	85.11%		
Regression Equation in Uncoded Units					
$\text{Ra\_AlTi N/TiSiX N} = 0.692 - 0.00464 V + 3.64 \text{ Feed} - 8.30 \text{ Depth} + 0.000023 V*V - 14.47 \text{ Feed*Feed} + 29.48 \text{ Depth*Depth} - 0.00855 V*\text{Feed} + 0.00740 V*\text{Depth} + 4.75 \text{ Feed*Depth}$					



รูปที่ 4.16 กราฟ Pareto ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiN/TiSiXN



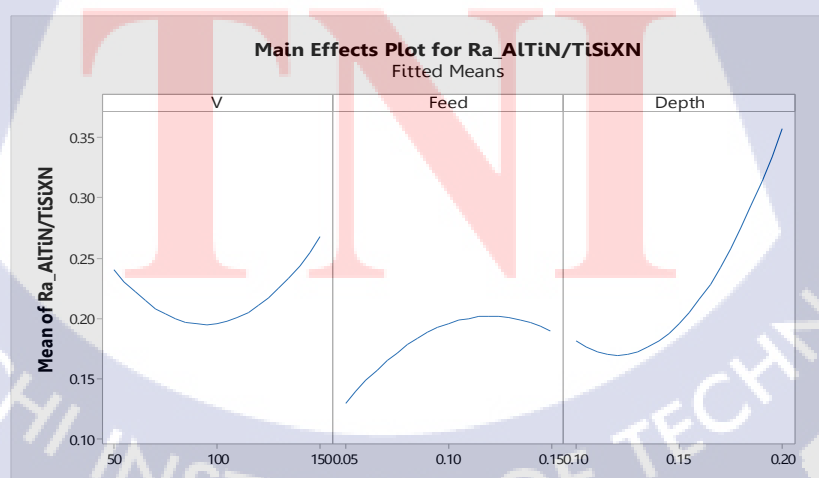
รูปที่ 4.17 กราฟ Residual ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiN/TiSiXN

จากข้อมูลที่น่าเสนอในตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของคมตัดสารเคลือบ ALTiN/TiSiXN จากข้อมูลด้านบน

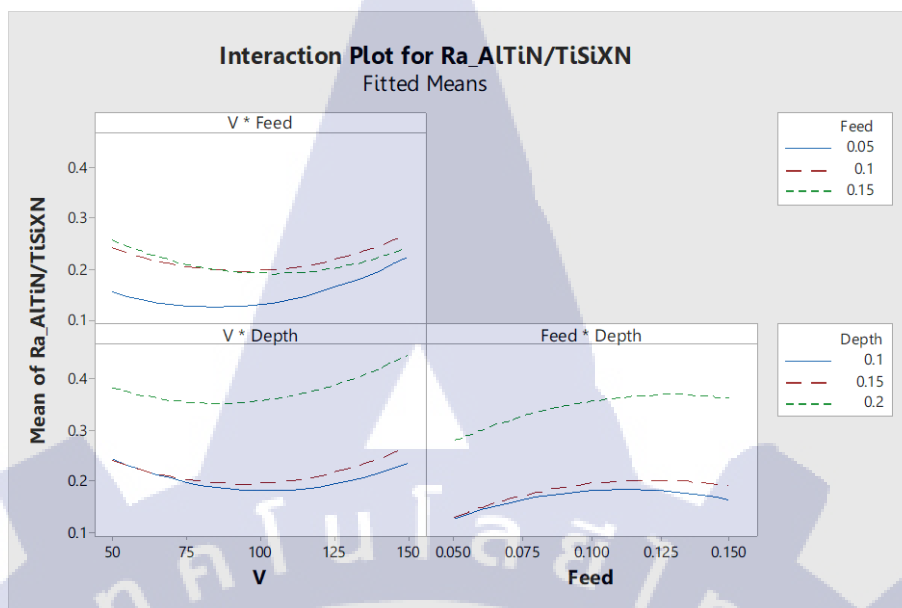
1. การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสารเคลือบ ALTiN/TiSiXN พิจารณาว่า P-value ของเทอมกำลังสองค่า P -value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าค่าปัจจัยส่งผลกับผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ
2. ค่า P -Value ของ Lack-of-Fit มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการคำนวณมีความแม่นยำ
3. ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $r^2$ ) โดย  $R^2(\text{adj}) = 90.54\%$  มากกว่า 70% ถือว่ายอมรับได้
4. สมการความสัมพันธ์ของระหว่างปัจจัยและผลตอบสนอง

$$\begin{aligned} \text{Ra\_ALTiN/TiSiXN} = & 0.692 - 0.00464 V + 3.64 \text{ Feed} - 8.30 \text{ Depth} + 0.000023 V*V - 14.47 \text{ Feed*Feed} \\ & + 29.48 \text{ Depth*Depth} - 0.00855 V*\text{Feed} + 0.00740 V*\text{Depth} + 4.75 \text{ Feed*Depth} \end{aligned}$$

5. กราฟผลกระทบพาราโตนของคมตัด ALTiSiN (Effects Pareto for Ra\_ALTiSiN) แสดงค่าผลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนองในรูปแบบกราฟพาราโตนปัจจัย C, B มีค่ามากกว่าเส้นวิกฤต แสดงว่าปัจจัยนั้นส่งผลกับผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญดังรูปที่ 4.16
6. การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด (Residual) จากกราฟรูปที่ 4.17 ตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของค่าความผิดพลาด ข้อมูลมีการกระจายตัวของค่าผิดพลาดเป็นการแจกแจงแบบปกติ ตรวจสอบความแปรปรวนคงที่ของความผิดพลาด ข้อมูลมีค่าความผิดพลาดสม่ำเสมอและมีความเป็นอิสระต่อกันดังรูปที่ 4.17
7. การวิเคราะห์ด้วยกราฟ Factorial Plots

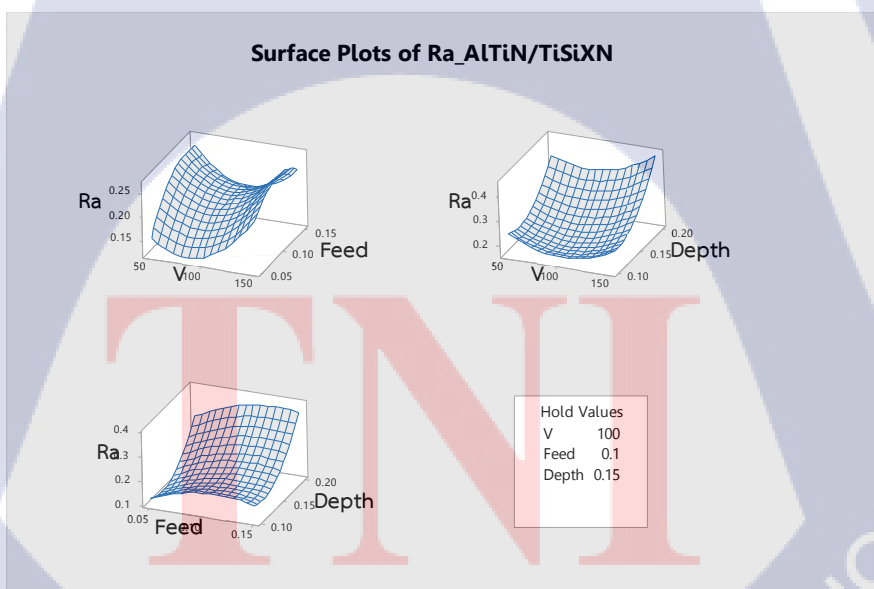


รูปที่ 4.18 กราฟ Main Effects ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiN/TiSiXN



รูปที่ 4.19 กราฟ Interaction ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiN/TiSiXN

#### 8. การวิเคราะห์ด้วย Surface Plot



รูปที่ 4.20 กราฟ Surface Plot ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiN/TiSiXN

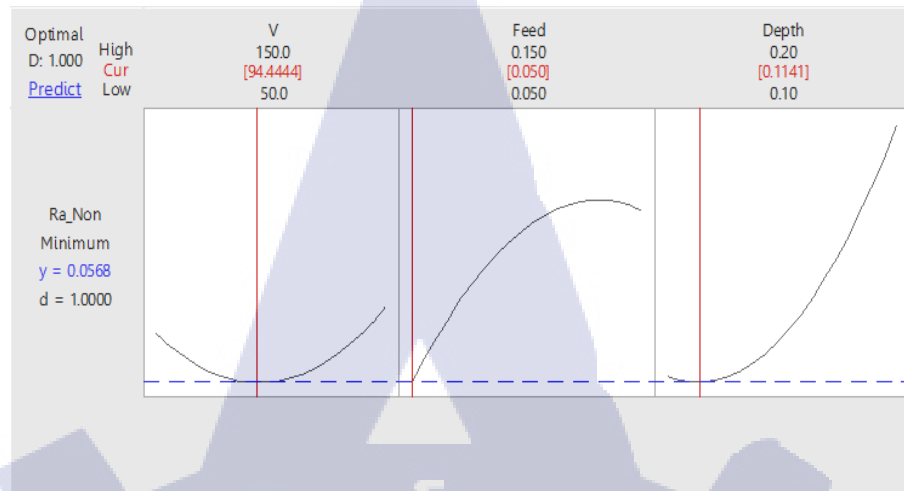
### 4.3 การหาค่าสภาวะที่เหมาะสม (Response Optimization)

#### 4.3.1 การหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของคมตัดไม้เคลือบสาร

ตารางที่ 4.6 ค่าการหาสภาวะที่เหมาะสมของคมตัดไม้เคลือบสาร

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Ra_Non	Minimum		0.093	0.378	1	1
Solution						
Solution	V	Feed	Depth	Ra_Non Fit	Composite Desirability	
1	94.4444	0.05	0.114141	0.0568408	1	
Multiple Response Prediction						
Variable			Setting			
V			94.4444			
Feed			0.05			
Depth			0.114141			
Response	Fit	SE Fit	95% CI		95% PI	
Ra_Non	0.0568	0.0192	(0.0168, 0.0969)		(-0.0317, 0.1454)	

จากข้อมูลที่น่าเสนอในตารางที่ 4.6 ของการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของคมตัดไม้เคลือบสาร เป้าหมายที่ค่าของผลตอบสนองคือ ค่าต่ำที่สุด (Minimize) ได้ค่าการพยากรณ์ของปัจจัยคือ ค่าความเร็วตัด (Cutting Speed) เท่ากับ 94.4444 เมตรต่อนาที อัตราป้อน (Feed) เท่ากับ 0.050 มิลลิเมตรต่อฟัน และความลึกการตัด (Dept of cut) เท่ากับ 0.114141 มิลลิเมตรและค่าความเรียบผิว เท่ากับ 0.0568 ไมโครเมตร ส่วนรูปที่ 4.21 และตารางที่ 4.2 กราฟบ่งชี้ว่าค่า Feed และ Dept มีผลโดยตรงต่อความเรียบผิวเป็นเชิงเส้นตรงแต่ค่าความเร็วตัดกับความเรียบผิวมีความสัมพันธ์แบบสมการกำลังสอง



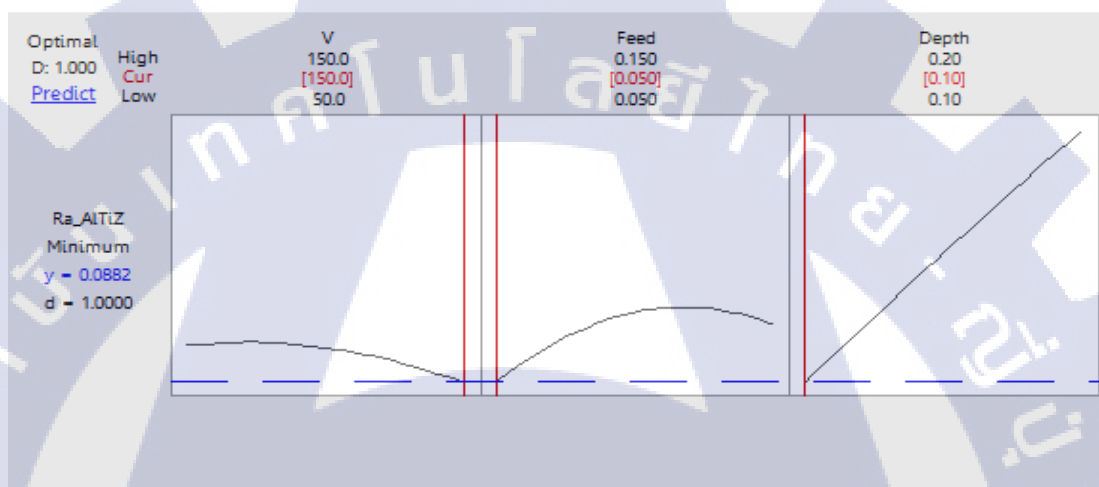
รูปที่ 4.21 กราฟ Optimization Plot ของคมตัดไม้เคลือบสาร

#### 4.3.2 การหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของคมตัดสารเคลือบ ALTiZrSiN

ตารางที่ 4.7 ค่าการหาสภาวะที่เหมาะสมของคมตัด ALTiZrSiN (Parameters)

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Ra_ALTiZrSiN	Minimum		0.107	0.317	1	1
Solution						
Solution	V	Feed	Depth	Ra_ALTiZrSiN Fit	Composite Desirability	
1	150	0.05	0.1	0.08825	1	
Multiple Response Prediction						
	Variable	Setting				
	V	150				
	Feed	0.05				
	Depth	0.1				
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI		
Ra_ALTiZrSiN	0.0882	0.0179	(0.0509, 0.1256)	(0.0301, 0.1464)		

จากข้อมูลที่น่าเสนอในตารางที่ 4.7 ของการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของคมตัด ALTiZrSiN เป้าหมายที่ค่าของผลตอบสนองคือ ค่าต่ำที่สุด (Minimize) ได้ค่าการพยากรณ์ของปัจจัยคือ ค่าความเร็วตัด เท่ากับ 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อน เท่ากับ 0.050 มิลลิเมตรต่อฟันและความลึกการตัด เท่ากับ 0.1 มิลลิเมตรและค่าความเรียบผิว เท่ากับ 0.0882 ไมโครเมตร ส่วนรูปที่ 4.22 และตารางที่ 4.3 กราฟบ่งชี้ว่า ค่าความลึกมีผลโดยตรงต่อความเรียบผิวเป็นเชิงเส้นตรงมากที่สุด อัตราป้อน มีอิทธิพลทั้งเชิงเส้นตรงและสมการกำลังสอง และความเร็วตัด มีผลต่อความเรียบผิวเป็นเชิงเส้นตรงเท่านั้น



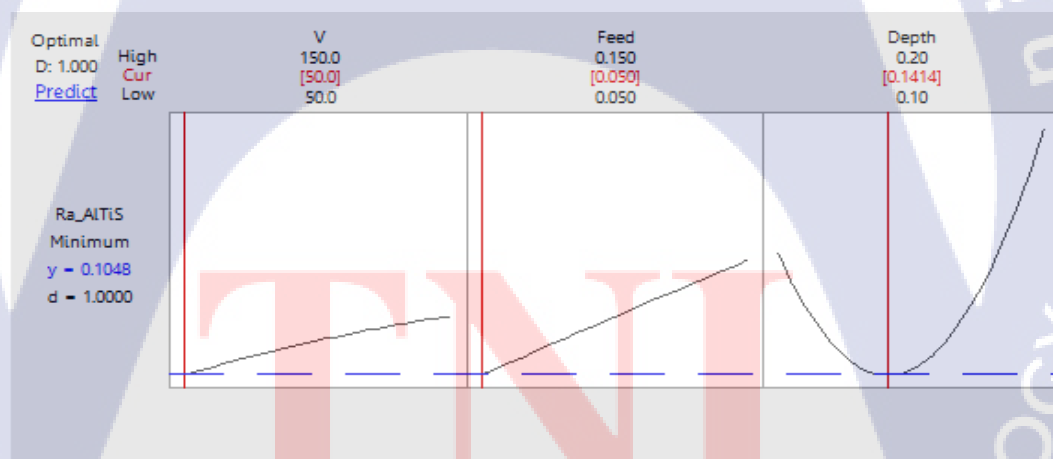
รูปที่ 4.22 กราฟ Optimization Plot ของคมตัดสารเคลือบ ALTiZrSiN

#### 4.3.3 การหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiSiN



ตารางที่ 4.8 ค่าการหาสภาวะที่เหมาะสมของคมตัด ALTiSiN

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Ra_ALTiSiN	Minimum		0.126	0.471	1	1
Solution						
Solution	V	Feed	Depth	Ra_ALTiSiN	Fit	Composite Desirability
1	50	0.05	0.141414	0.104810		1
Multiple Response Prediction						
Variable			Setting			
V			50			
Feed			0.05			
Depth			0.141414			
Response	Fit	SE Fit	95% CI		95% PI	
Ra_ALTiSiN	0.1048	0.0150	(0.0735, 0.1361)		(0.0452, 0.1644)	



รูปที่ 4.23 กราฟ Optimization Plot ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiSiN

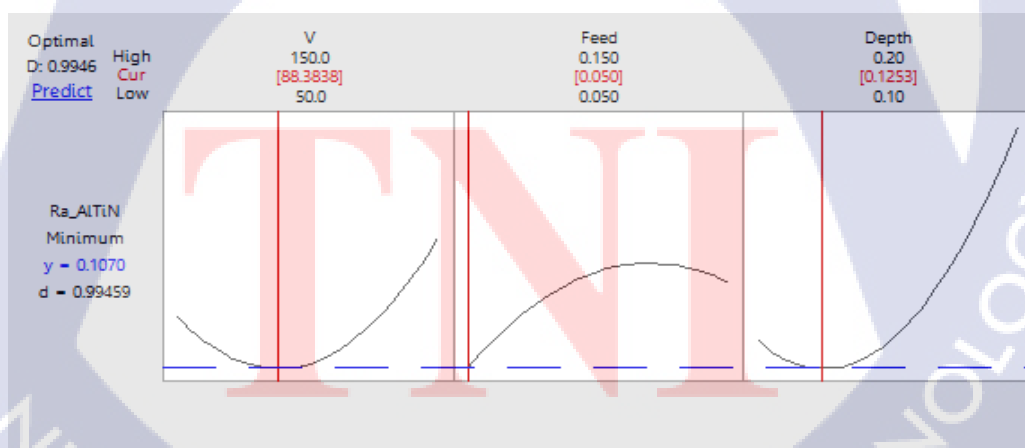
จากข้อมูลในตารางที่ 4.8 แสดงค่าสภาวะที่เหมาะสมของคมตัด ALTiSiN เป้าหมายที่ค่าของผลตอบสนองคือ ค่าต่ำที่สุด ได้ค่าการพยากรณ์ของปัจจัยคือ ค่าความเร็วตัด เท่ากับ 50 เมตรต่อนาที อัตราป้อน เท่ากับ 0.050 มิลลิเมตรต่อนาทีและความลึกการ เท่ากับ 0.141414 มิลลิเมตรและค่าความเรียบผิว เท่ากับ 0.1048 ไมโครเมตร ส่วนรูปที่ 4.23 และตารางที่ 4.4 กราฟบ่งชี้ว่าค่าความลึก

มีผลโดยตรงต่อความเรียบผิวเป็นเชิงเส้นตรงและกำลังสองมากที่สุด อัตราป้อน และ ความเร็วตัด มีผลเชิงเส้นตรงต่อความเรียบผิวเป็นเชิงเส้นตรงตามลำดับ

#### 4.3.4 การหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของคมตัด ALTiN/TiSiXN

ตารางที่ 4.9 ค่าการหาสภาวะที่เหมาะสมของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiN/TiSiXN

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Ra_ALTiN/TiSiXN	Minimum		0.105	0.483	1	1
Solution						
Solution	V	Feed	Depth		Ra_ALTiN/TiSiXN Fit	Composite Desirability
1	88.3838	0.05	0.125253		0.107047	0.994585
Multiple Response Prediction						
Variable						Setting
V						88.3838
Feed						0.05
Depth						0.125253
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI		
Ra_ALTiN/TiSiXN	0.1070	0.0132	(0.0795, 0.1346)	(0.0424, 0.1717)		



รูปที่ 4.24 กราฟ Optimization Plot ของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiN/TiSiXN

จากข้อมูลในตารางที่ 4.9 แสดงค่าสภาวะที่เหมาะสมของคมตัดเคลือบด้วยสาร AlTiZrSiN เป้าหมายที่ค่าของผลตอบสนองคือ ค่าต่ำที่สุด ได้ค่าการพยากรณ์ของปัจจัยคือ ค่าความเร็วตัด เท่ากับ 88.3838 เมตรต่อนาที อัตราป้อน เท่ากับ 0.050 มิลลิเมตรต่อนาทีและความลึกการตัด เท่ากับ 0.125253 มิลลิเมตรและค่าความเรียบผิว เท่ากับ 0.1070 ไมโครเมตร ส่วนรูปที่ 4.24 และตารางที่ 4.5 กราฟบ่งชี้ว่าค่าความลึก มีอิทธิพลต่อความเรียบผิวเป็นเชิงเส้นตรงและกำลังสองมากที่สุด อัตราป้อน มีอิทธิพลต่อความเรียบผิวเป็นเชิงเส้นตรงและกำลังสอง ส่วนความเร็วตัด มีผลต่อความเรียบผิวแบบสมการกำลัง

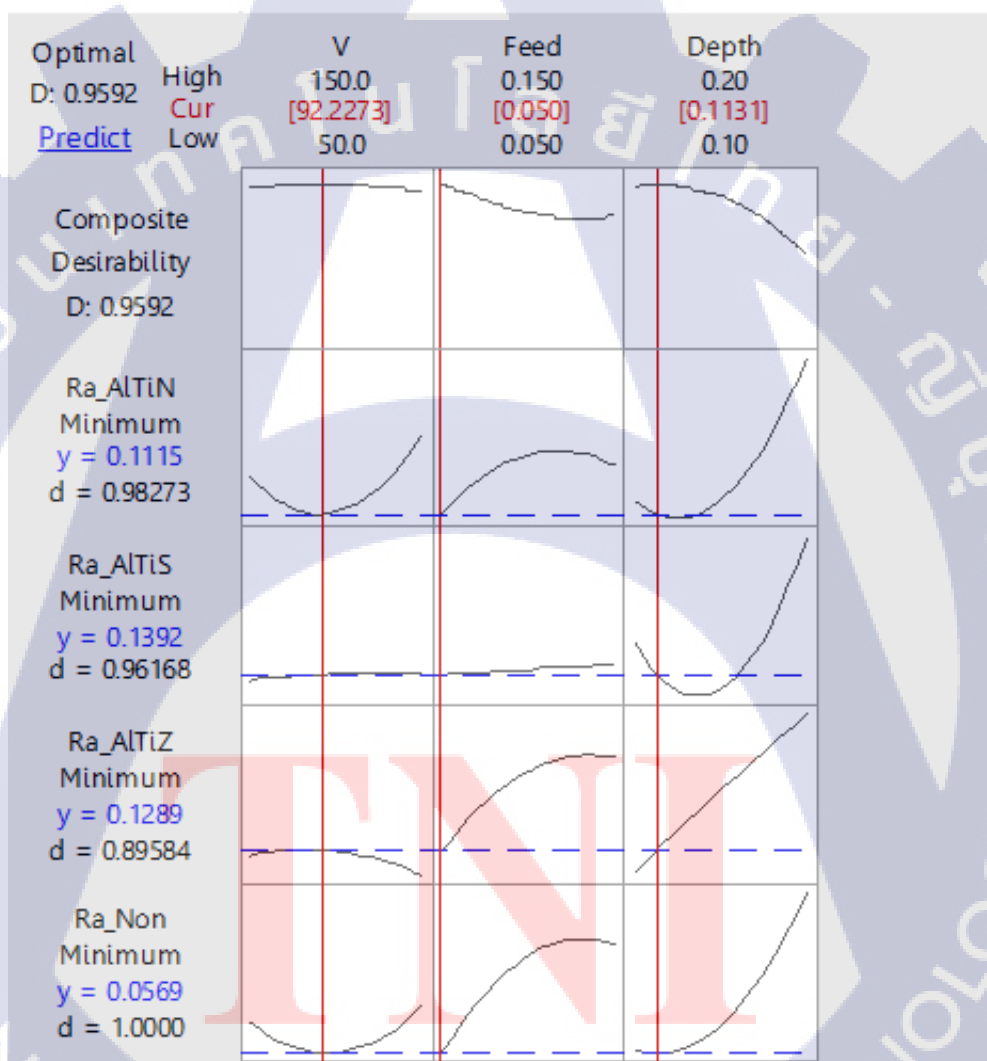
#### 4.3.5 การหาค่าสภาวะที่เหมาะสมรวมของสารเคลือบและไม่เคลือบ

ตารางที่ 4.10 ค่าการหาสภาวะที่เหมาะสมของสารเคลือบและไม่เคลือบ

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance	
Ra_ALTiN/TiSiXN	Minimum		0.105	0.483	1	1	
Ra_ALTiSiN	Minimum		0.126	0.471	1	1	
Ra_ALTiZrSiN	Minimum		0.107	0.317	1	1	
Ra_Non	Minimum		0.093	0.378	1	1	
Solution							
Solution	V	Feed	Depth	Ra_ALTiN/TiSiXN Fit	Ra_ALTiSiN Fit	Ra_ALTiZrSiN Fit	Ra_Non Fit
1	92.2273	0.05	0.113131	0.111530	0.139220	0.128874	0.0569424
Solution				Composite Desirability			
1				0.959231			
Multiple Response Prediction							
Variable				Setting			
V				92.2273			
Feed				0.05			
Depth				0.113131			

ตารางที่ 4.10 ค่าการหาสภาวะที่เหมาะสมของสารเคลือบและไม่เคลือบ (ต่อ)

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Ra_ALTiN/TiSiXN	0.1115	0.0144	(0.0815, 0.1416)	(0.0457, 0.1773)
Ra_ALTiSiN	0.1392	0.0125	(0.1132, 0.1653)	(0.0822, 0.1962)
Ra_ALTiZrSiN	0.1289	0.0110	(0.1059, 0.1518)	(0.0787, 0.1791)
Ra_Non	0.0569	0.0194	(0.0164, 0.0975)	(-0.0319, 0.1458)



รูปที่ 4.25 กราฟ Optimization Plot ของสารเคลือบและไม่เคลือบ

#### 4.3.6 การวิเคราะห์ด้วยการหาค่าสถานะที่เหมาะสมของสารเคลือบและไม่เคลือบ

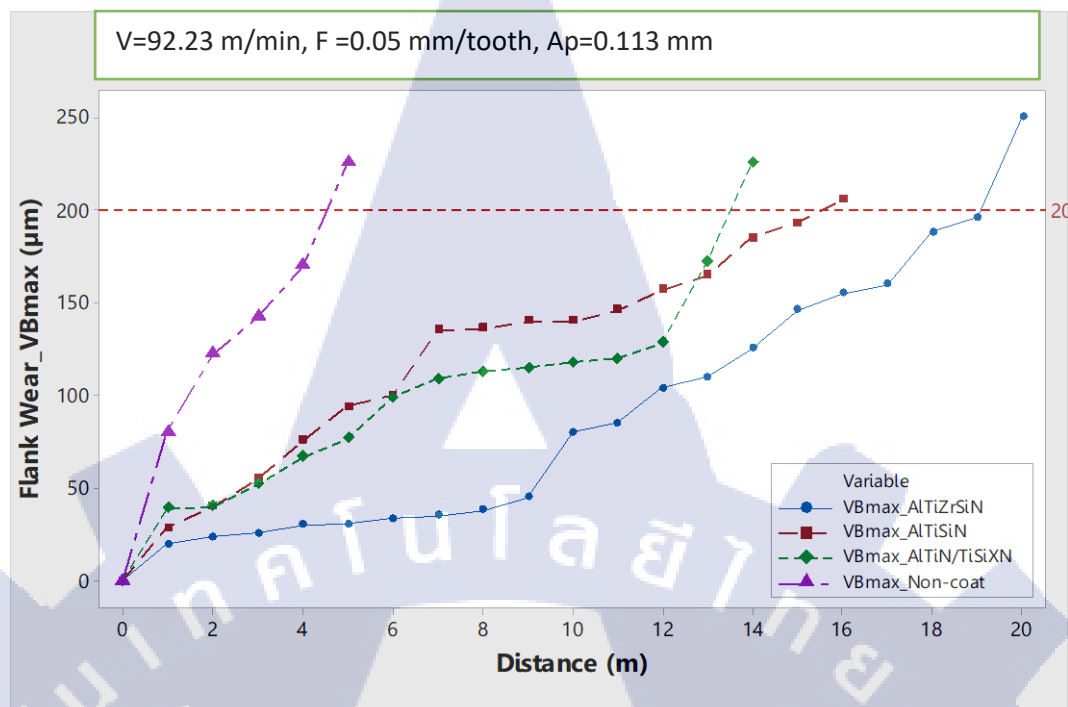
โดยการเลือกเป้าหมายที่ต้องการหาค่าของผลตอบสนองคือค่าต่ำที่สุด ในการทดลองนี้ได้ใช้ค่าการวิเคราะห์ด้วยการหาค่าสถานะที่เหมาะสมรวมของทุกผลการทดลองของทุกสารเคลือบมาวิเคราะห์ค่าสถานะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่ากลางของปัจจัยสำหรับการตั้งค่าปัจจัยหลักในการหาขีดจำกัดของสารเคลือบและไม่เคลือบได้แก่ ค่าความเร็วตัด (Cutting Speed) เท่ากับ 92.2273 เมตรต่อนาที อัตราป้อน (Feed) เท่ากับ 0.050 มิลลิเมตรต่อฟันและความลึกการตัด (Dept of cut) เท่ากับ 0.113 มิลลิเมตร

ค่าของผลตอบที่ได้ คือ ค่า Fit ช่วงความเชื่อมั่น 95% CI และช่วงการทำนาย 95% PI หากทำการทดลองแบบเดิมซ้ำๆจะพบว่าโอกาสที่ได้ค่าของผลตอบสนองอยู่ในช่วงนี้ประมาณ 95%

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Ra_ALTiN/TiSiXN	0.1115	0.0144	(0.0815, 0.1416)	(0.0457, 0.1773)
Ra_ALTiSiN	0.1392	0.0125	(0.1132, 0.1653)	(0.0822, 0.1962)
Ra_ALTiZrSiN	0.1289	0.0110	(0.1059, 0.1518)	(0.0787, 0.1791)
Ra_Non	0.0569	0.0194	(0.0164, 0.0975)	(-0.0319, 0.1458)

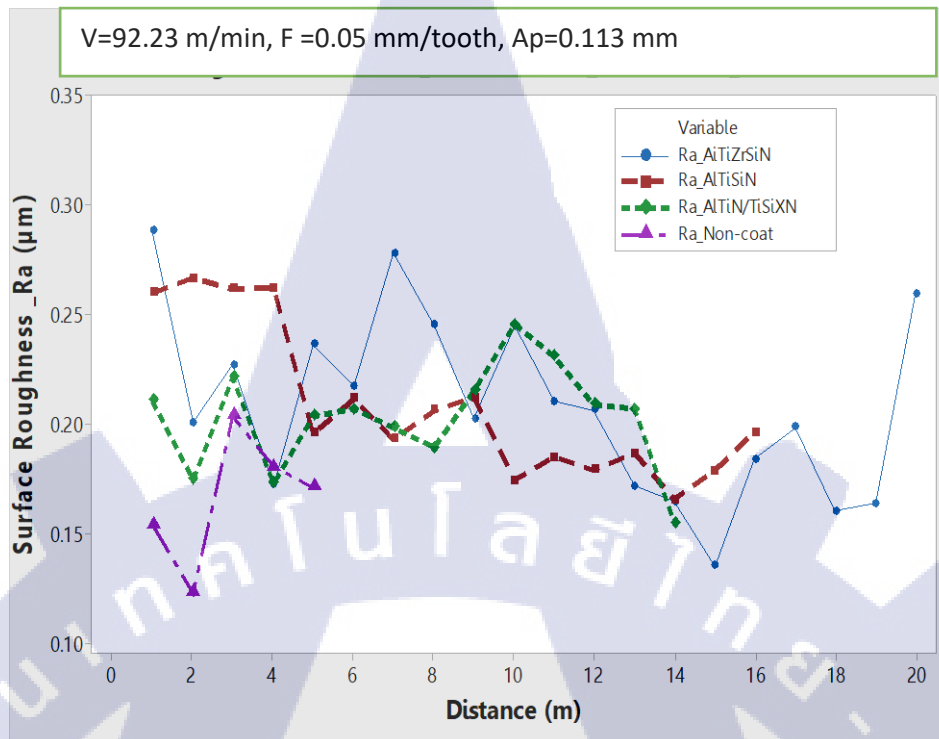
#### 4.3.7 ยืนยันผลการตั้งค่าทดลองหาขีดจำกัดความทนทานของคมตัดเคลือบผิวและแบบไม่เคลือบผิวด้วยค่าการพยากรณ์รวม

นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทำนายนำค่าพารามิเตอร์จากหัวข้อ 4.3.6 ทำการทดลองตัดเฉือนเพื่อหาอิทธิพลของสารเคลือบคมตัดที่มีผลต่อการสึกหรอและความหยابผิวงานผลการทดลองดังรูปที่ 4.26 พบว่าคมตัดที่เคลือบด้วย ALTiZrSiN ให้ระยะทางการตัดเฉือนมากที่สุดที่ 20 เมตร รองลงมาคือ ALTiSiN ให้ระยะทางการตัดเฉือนที่ 16 เมตร ALTiN/TiSiXN ให้ระยะทางการตัดเฉือนที่ 14 เมตร และสุดท้ายคือ แบบไม่เคลือบผิว ได้ระยะทางการตัดเฉือนต่ำที่สุด คือ 5 เมตร โดยมีการทดสอบซ้ำ 1 รอบ ซึ่งมีผลแนวโน้มใกล้เคียงกันสามารถดูได้จากตารางที่ 4.11-4.18 จากข้อมูลคุณสมบัติสารเคลือบ ALTiZrSiN มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายต่ำกว่าสารเคลือบ ALTiN/TiSiXN, ALTiSiN มีส่วนทำให้การเกาะยึดของเศษระหว่างการตัดเฉือนน้อยกว่าสารเคลือบอื่น และส่วนผสมของธาตุ Zr ซึ่งมีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนได้ดีและมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง

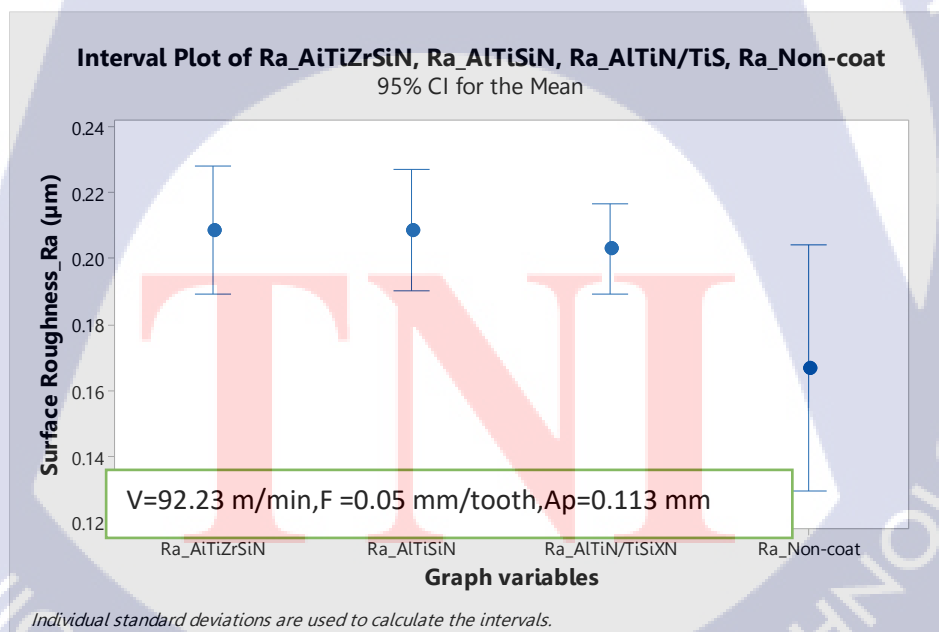


รูปที่ 4.26 กราฟการสึกหรอของคมตัดเคลือบสาร ALTiZrSiN, ALTiSiN, ALTiN/TiSiXN, Non-Coat

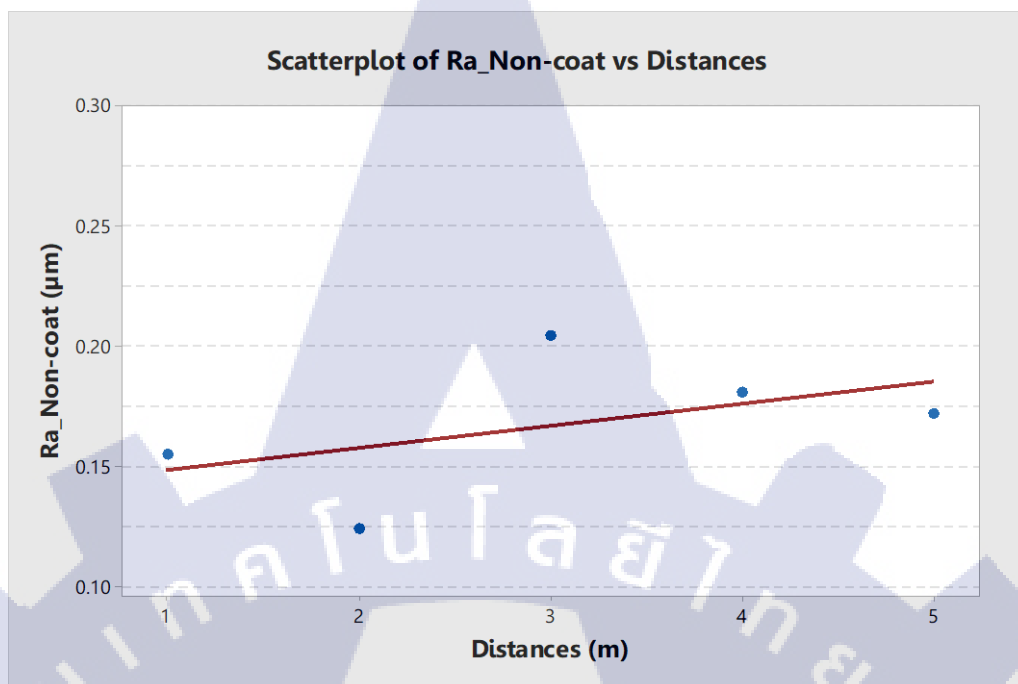
จากรูปที่ 4.27 ผลการทดลองพบว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ย ( $R_a$ ) ของคมตัดต่อระยะการกัดที่ขนาดการสึกหรอของคมตัดบนผิวหลบที่เคลือบด้วยสารเคลือบ ALTiSiN เท่ากับ 0.208802 ไมโครเมตร ALTiZrSiN เท่ากับ 0.208675 ไมโครเมตร และ ALTiN/TiSiXN 0.20325 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนแบบไม่เคลือบผิวมีความหยาบผิวเฉลี่ยน้อยที่สุด เท่ากับ 0.1669 ไมโครเมตร



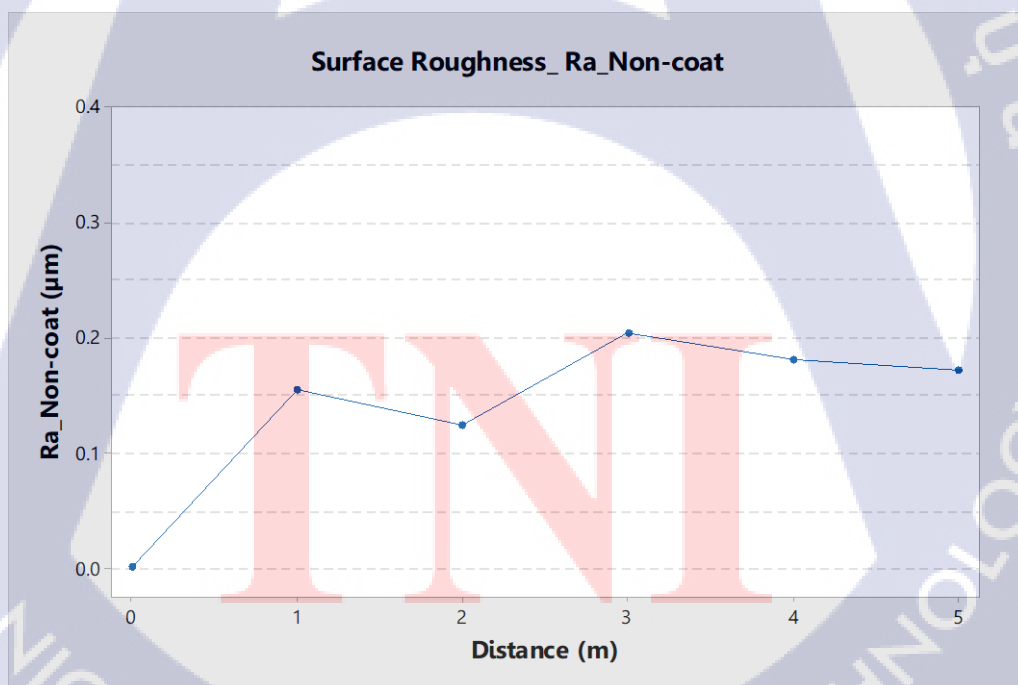
รูปที่ 4.27 กราฟความเรียบผิวคมตัดเคลือบสาร ALTiZrSiN, ALTiSiN, ALTiN/TiSiXN, Non-Coat



รูปที่ 4.28 กราฟ Interval Plot ของคมตัดเคลือบสาร ALTiZrSiN, ALTiSiN, ALTiN/TiSiXN, Non-Coat ต่อระยะตัดเฉือน

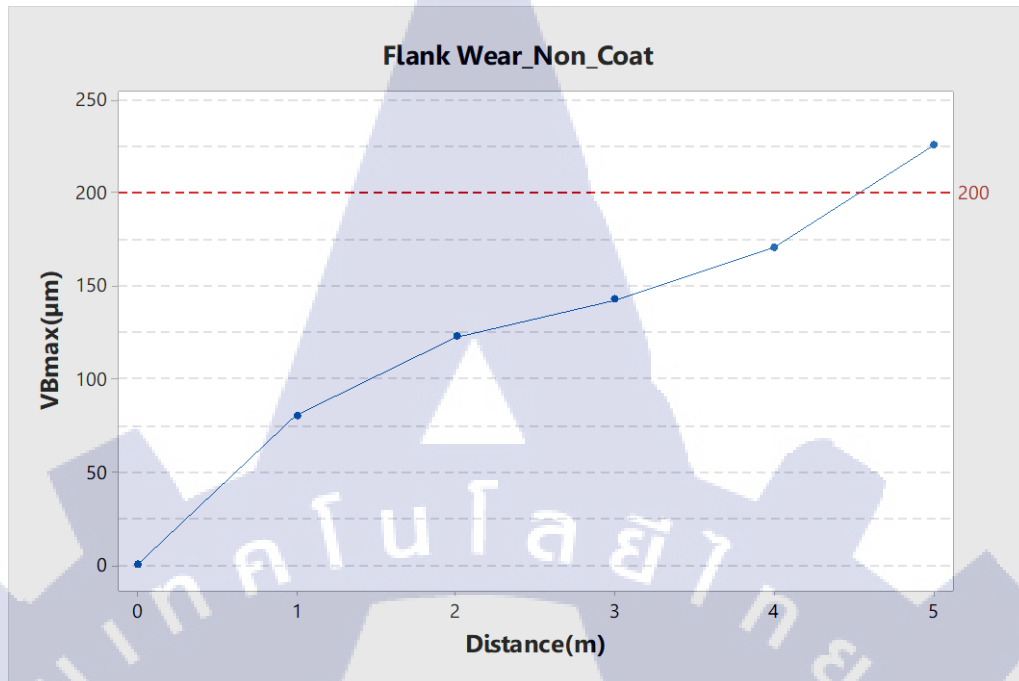


รูปที่ 4.29 ค่าการกระจายพรีอตของคมตัดไม้เคลือบสาร

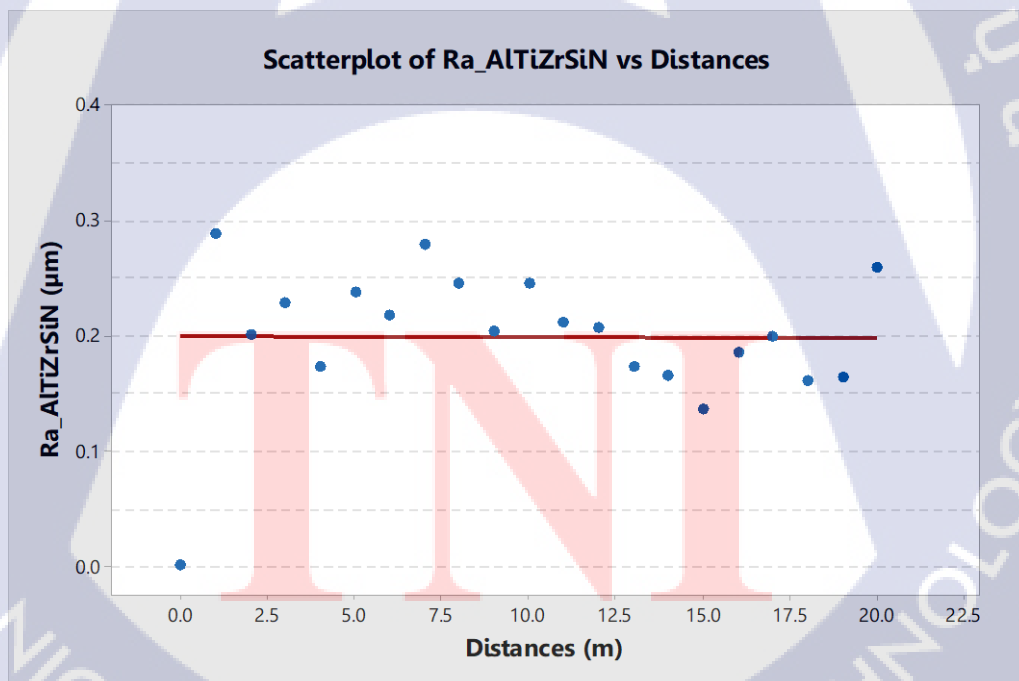


รูปที่ 4.30 กราฟค่าความหยาบผิวต่อระยะทางตัดเฉือนของคมตัดไม้เคลือบ

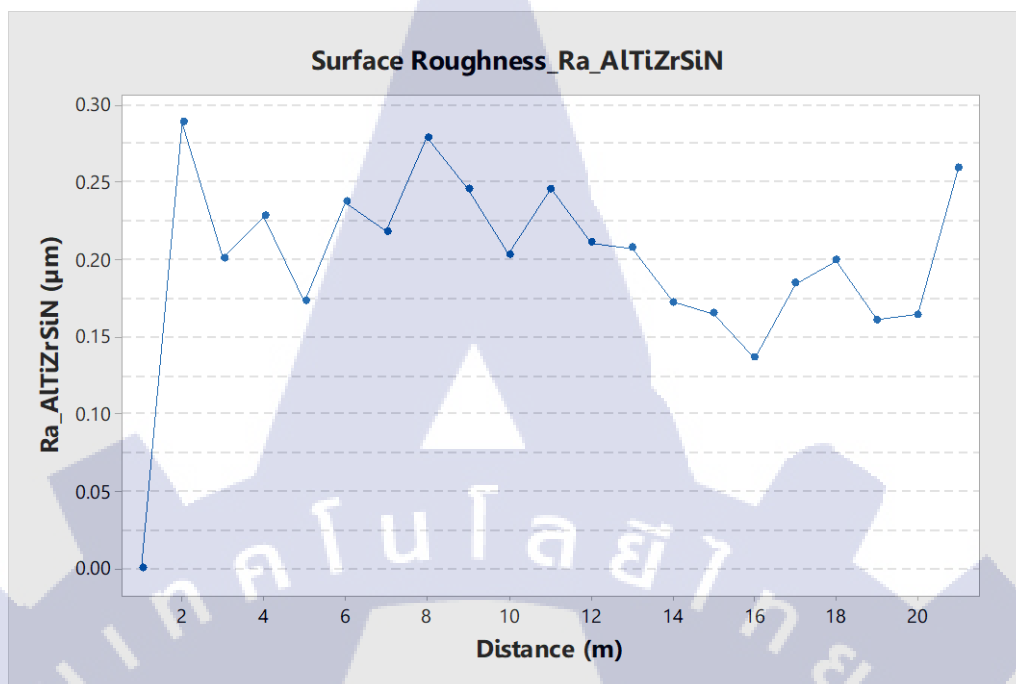




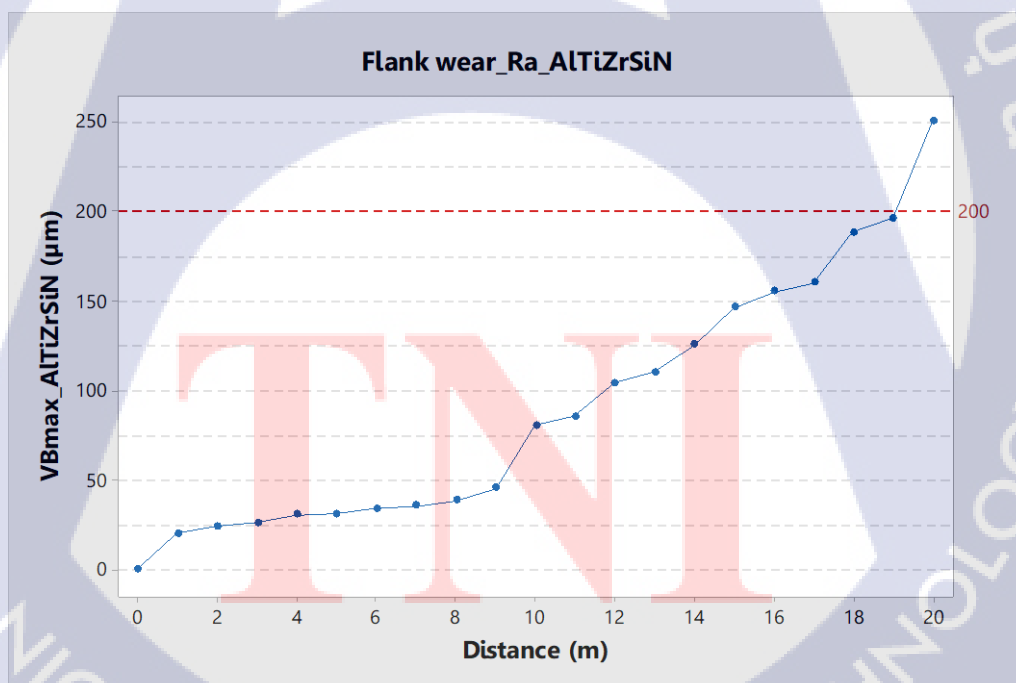
รูปที่ 4.31 กราฟรวมการสึกหรอของคมตัดไม้เคลือบสารต่อระยะตัดเฉือน



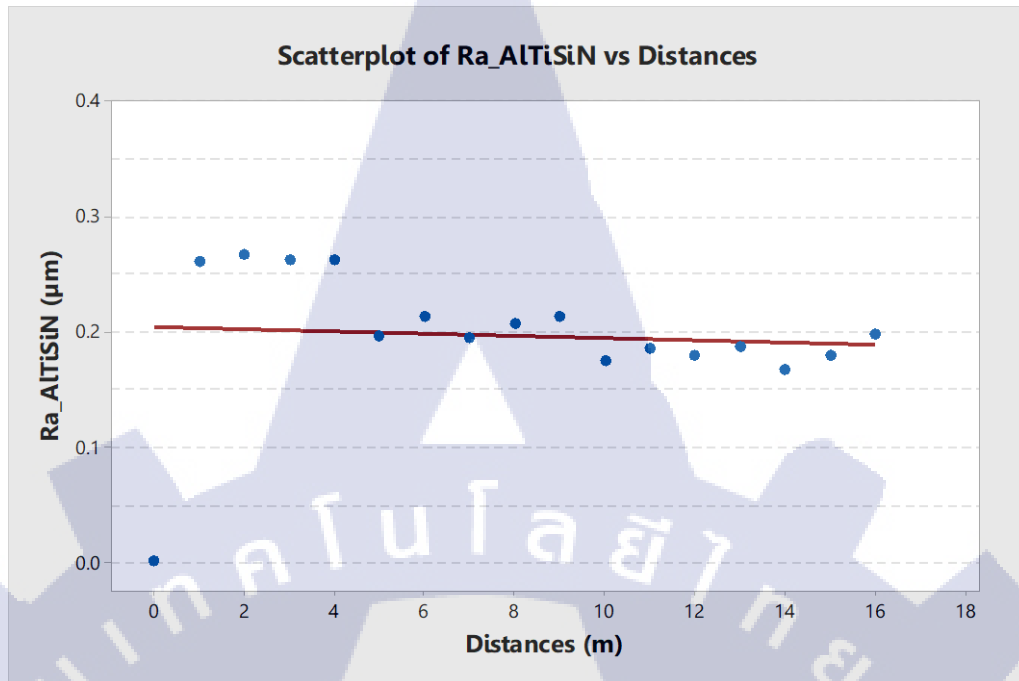
รูปที่ 4.32 กราฟ Scatterplot คมตัดเคลือบสาร AlTiZrSiN



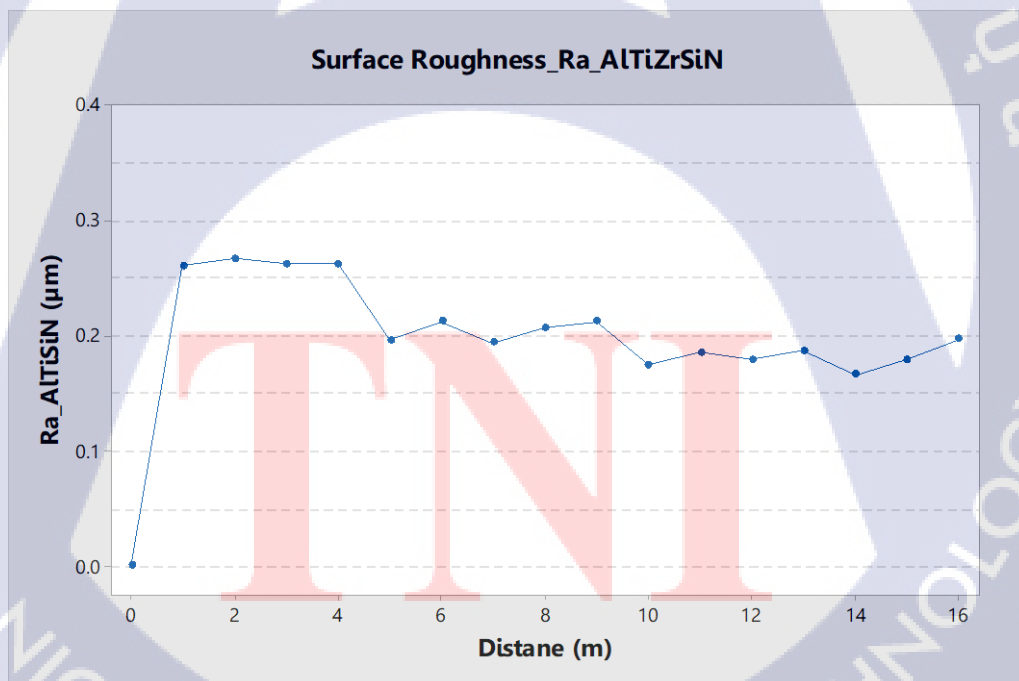
รูปที่ 4.33 กราฟค่าความหยาบผิวต่อระยะตัดเฉือนของ ALTiZrSiN



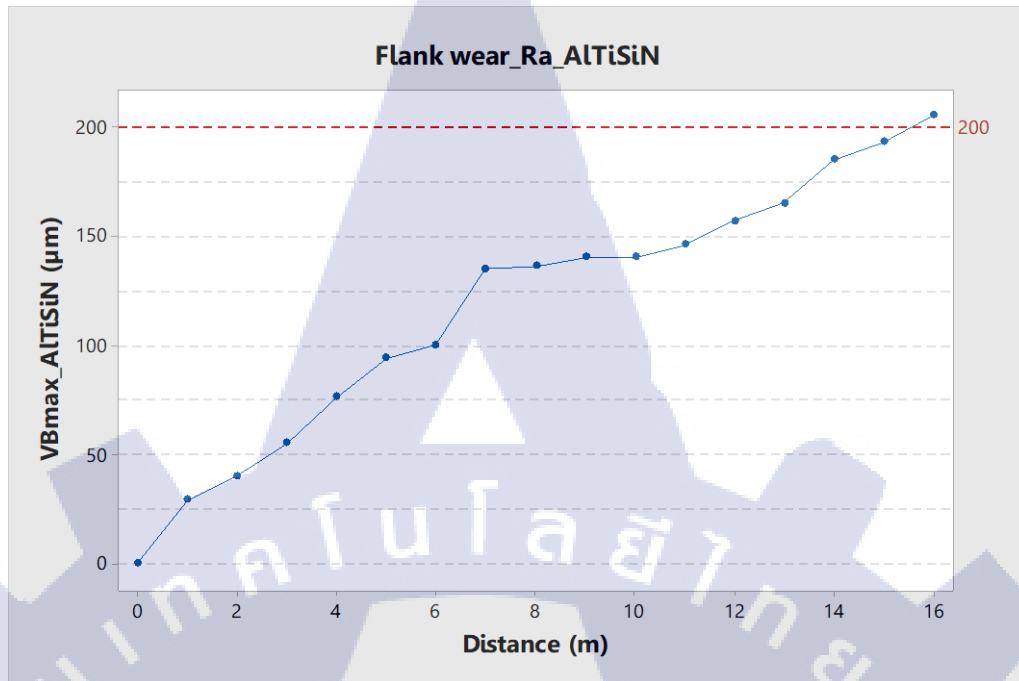
รูปที่ 4.34 กราฟการสึกหรอของคมตัด ALTiZrSiN ต่อระยะตัดเฉือน



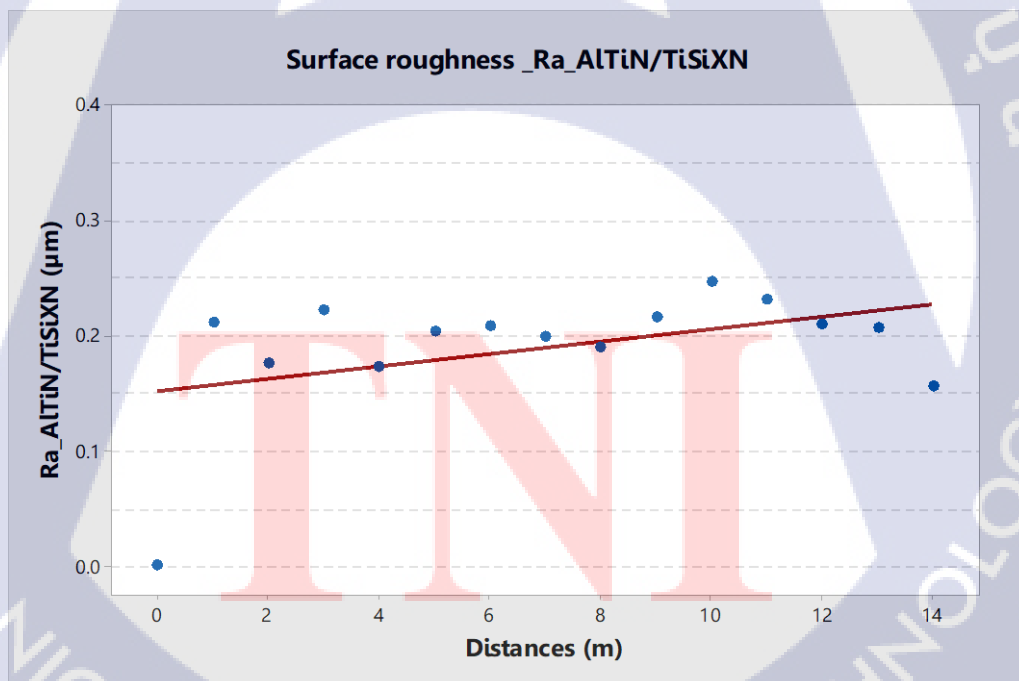
รูปที่ 4.35 กราฟ Scatterplot คมตัด AlTiSiN



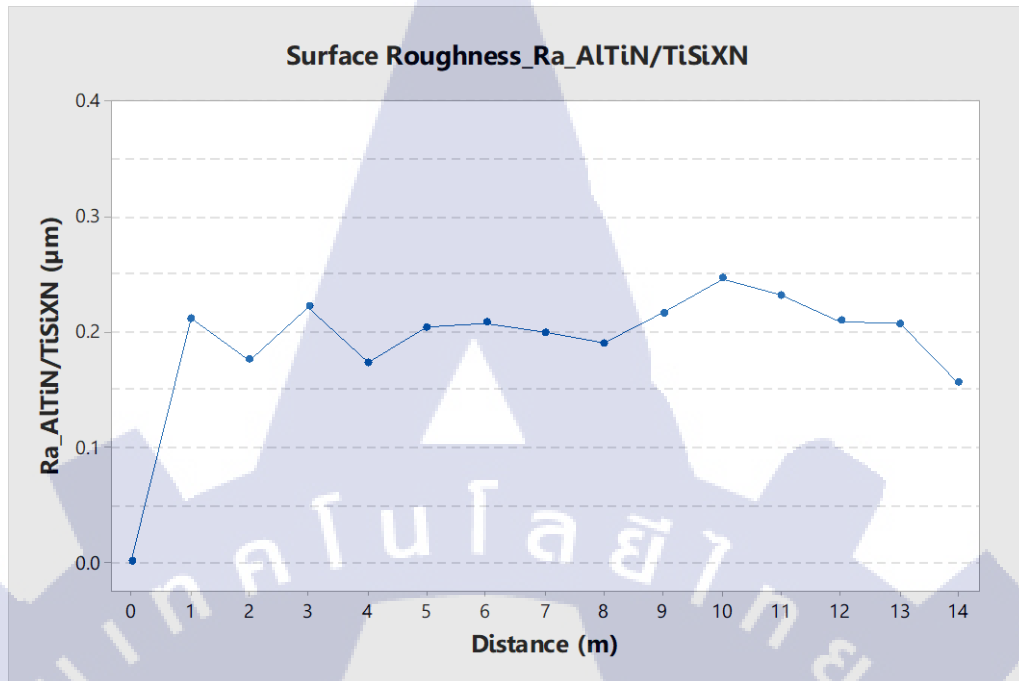
รูปที่ 4.36 กราฟค่าความหยาบผิวต่อระยะตัดเฉือนของ AlTiSiN



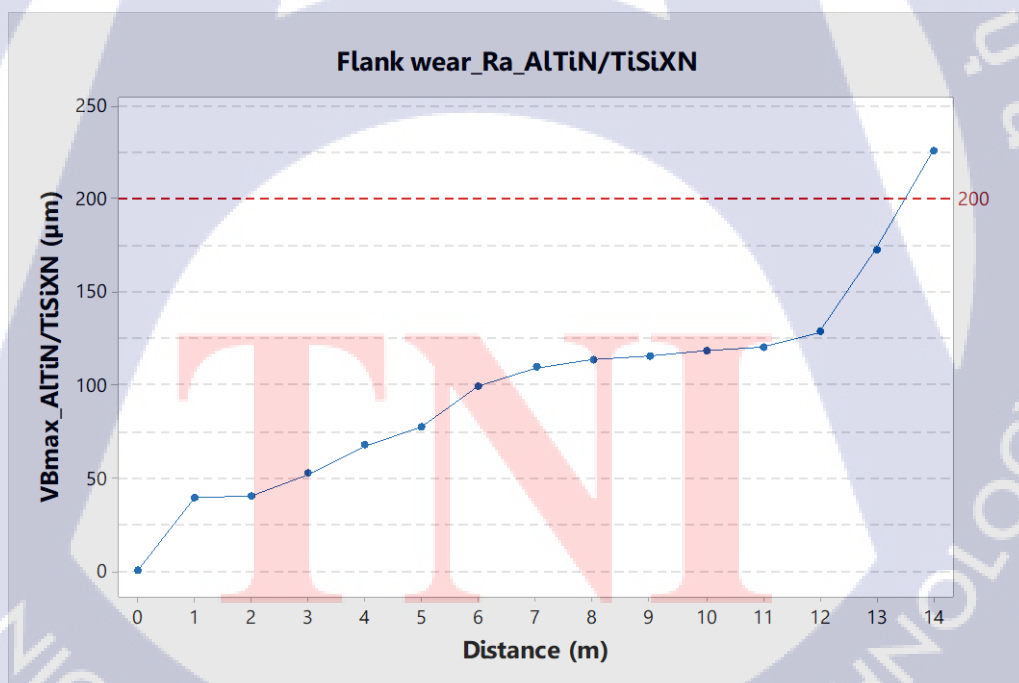
รูปที่ 4.37 กราฟการสึกหรอของคมตัด ALTiSiN ต่อระยะตัดเฉือน



รูปที่ 4.38 กราฟ Scatterplot คมตัด ALTiN/TiSiXN



รูปที่ 4.39 กราฟค่าความหยาบผิวต่อระยะตัดเฉือนของ ALTiN/TiSiXN



รูปที่ 4.40 กราฟการสึกหรอของคมตัด ALTiN/TiSiXN ต่อระยะตัดเฉือน

#### 4.4 ค่า Ra และค่าการสึกหรอของคมตัดเคลือบสารและไม่เคลือบสาร

สำหรับการวัดค่าการสึกหรอของคมตัดที่เคลือบสารและไม่เคลือบสารทดลองกัดชิ้นงานทดสอบหลังจากนำปัจจัยที่วิเคราะห์จากการออกแบบการทดลองหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการตัดเฉือนซึ่งทำให้เกิดค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดทำการทดลองกัดชิ้นงานตามการทดลองที่กล่าวไว้ข้างต้นได้บันทึกผลการทดลองของแต่ละเงื่อนไขดังในตารางด้านล่าง

ตารางที่ 4.11 ค่า Ra และค่าการสึกหรอของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiZrSiN ครั้งที่ 1

Distances	Ra_ALTiZrSiN			Avr.		Flank	Flank	Flank	Flank	V <sub>Bmax</sub>
						1	2	3	4	
0	0	0	0	0.000		0	0	0	0	0
1	0.281	0.257	0.292	0.277		18	17	19	20	20
2	0.213	0.125	0.142	0.160		21.8	21.7	22.8	23.6	23.6
3	0.221	0.204	0.198	0.208		25	24.7	26	25	26
4	0.203	0.119	0.221	0.181		28.3	27	30.4	28.6	30.4
5	0.225	0.277	0.283	0.262		29	28	30.7	30	30.7
6	0.219	0.281	0.245	0.248		30.3	32.7	31	33.6	33.6
7	0.242	0.267	0.28	0.263		32	32.7	31.7	35	35
8	0.309	0.294	0.253	0.285		34.6	32.9	32.1	37.9	37.9
9	0.244	0.218	0.197	0.220		44	43	43	45	45
10	0.188	0.233	0.181	0.201		61.5	43.4	45	71.5	71.5
11	0.19	0.188	0.207	0.195		71	70	72	75	75
12	0.128	0.133	0.17	0.144		85	84	79	80	85
13	0.133	0.15	0.165	0.149		88	87	84	90	90
14	0.118	0.139	0.125	0.127		125	124	117	120	125
15	0.109	0.106	0.116	0.110		144	146	130	140	146
16	0.155	0.145	0.19	0.163		155	150	138	142	155
17	0.208	0.109	0.247	0.188		160	155	140	144	160
18	0.149	0.131	0.168	0.149		164	188	145	146	188
19	0.104	0.208	0.107	0.140		170	196	165	195	196
20	0.14	0.142	0.149	0.144		180	201	178	250	250

ตารางที่ 4.12 ค่า Ra และค่าการสึกหรอของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiZrSiN ครั้งที่ 2

Distances	Ra_ALTiZrSiN			Avr.		Flank	Flank	Flank	Flank	V <sub>Bmax</sub>
						1	2	3	4	
0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
1	0.251	0.286	0.364	0.300		18	18	18	17	18
2	0.205	0.275	0.245	0.242		22	20	21.8	21	22
3	0.294	0.221	0.227	0.247		25	23	22.4	22.5	25
4	0.136	0.18	0.177	0.164		27	27	25	26	27
5	0.237	0.223	0.175	0.212		27.5	29	26	28	29
6	0.102	0.255	0.204	0.187		30	29.5	29.8	29.8	30
7	0.267	0.367	0.247	0.294		34	33	31	33	34
8	0.186	0.201	0.23	0.206		38	36	35	36	38
9	0.114	0.206	0.238	0.186		40	38	42	37	42
10	0.247	0.302	0.32	0.290		60	75	75	80	80
11	0.313	0.173	0.192	0.226		70	78	76	85	85
12	0.28	0.301	0.229	0.270		96	87	80	104	104
13	0.235	0.153	0.197	0.195		110	90	83	105	110
14	0.124	0.211	0.272	0.202		117	8	85	106	117
15	0.18	0.119	0.185	0.161		118	98	90	115	118
16	0.179	0.299	0.138	0.205		120	99	100	120	120
17	0.19	0.162	0.278	0.210		125	120	110	125	125
18	0.115	0.278	0.124	0.172		133	125	119	131	133
19	0.232	0.139	0.195	0.189		150	140	160	140	160
20	0.354	0.392	0.379	0.375		160	148	235	155	235

ตารางที่ 4.13 ค่า Ra และค่าการสึกหรอของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiSiN ครั้งที่ 1

Distances	Ra_ALTiSiN			Avr.		Flank	Flank	Flank	Flank	V <sub>Bmax</sub>
	0	1	2			1	2	3	4	
0	0	0	0	0.000		0	0	0	0	
1	0.273	0.265	0.255	0.264		18	19	17	18	19
2	0.262	0.271	0.239	0.257		24.9	24	22.6	23.8	24.9
3	0.256	0.248	0.276	0.260		34	32	29	31	34
4	0.259	0.27	0.217	0.249		36.1	34.2	30	34	36.1
5	0.266	0.234	0.219	0.240		51	42	38	37	51
6	0.252	0.213	0.315	0.260		59	46.1	41	38.8	59
7	0.237	0.255	0.261	0.251		61	48	45	49	61
8	0.227	0.202	0.274	0.234		62	50	49	72	72
9	0.2	0.211	0.231	0.214		65	54	53	73	73
10	0.199	0.205	0.173	0.192		71.4	69	56	79	79
11	0.188	0.179	0.164	0.177		78	69	68	80	80
12	0.165	0.154	0.247	0.189		95	70	70	82	95
13	0.196	0.231	0.189	0.205		150	76	74	83	150
14	0.224	0.153	0.166	0.181		170	82	75	84	170
15	0.192	0.217	0.195	0.201		190	185	188	164	190
16	0.236	0.236	0.213	0.228		202	205.2	203.2	164	205.2

ตารางที่ 4.14 ค่า Ra และค่าการสึกหรอของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiSiN ครั้งที่ 2

Distances	Ra_ALTiSiN			Avr.		Flank	Flank	Flank	Flank	V <sub>Bmax</sub>
	0	1	2			1	2	3	4	
0	0	0	0	0						
1	0.238	0.23	0.301	0.256		20	18	28	29	29
2	0.275	0.262	0.292	0.276		40	21.6	31.6	36	40
3	0.28	0.224	0.289	0.264		45	48.3	39	55	55
4	0.275	0.215	0.339	0.276		58.8	76	55	63.8	76
5	0.109	0.133	0.216	0.153		71.5	86	64	94	94



ตารางที่ 4.14 ค่า Ra และค่าการสึกหรอของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiSiN ครั้งที่ 2 (ต่อ)

Distances	Ra_ALTiSiN			avr.		Flank	Flank	Flank	Flank	V <sub>Bmax</sub>
						1	2	3	4	
6	0.179	0.18	0.134	0.164		93	100	75	98	100
7	0.158	0.124	0.126	0.136		124	125	115	135	135
8	0.181	0.152	0.203	0.179		134	131	134.6	136	136
9	0.154	0.272	0.206	0.211		138	133	136	140	140
10	0.139	0.177	0.156	0.157		139	140	140	135	140
11	0.158	0.167	0.255	0.193		144	144	130	146	146
12	0.161	0.183	0.167	0.170		146	157	152	156	157
13	0.148	0.189	0.17	0.169		163	165	150	150	165
14	0.151	0.141	0.161	0.151		168	185	158	166	185
15	0.147	0.168	0.156	0.157		170	193	166	175	193
16	0.154	0.145	0.195	0.165		175	202	170	195	202

ตารางที่ 4.15 ค่า Ra และค่าการสึกหรอของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiN/TiSiXN ครั้งที่ 1

Distances	Ra_ALTiN/TiSiXN			Avr.		Flank	Flank	Flank	Flank	V <sub>Bmax</sub>
						1	2	3	4	
0	0	0	0	0.000		0	0	0	0	0
1	0.198	0.21	0.244	0.217		31	36	28	32	36
2	0.118	0.134	0.128	0.127		36	46	32.1	38	46
3	0.216	0.238	0.216	0.223		45	48	44	46	48
4	0.22	0.199	0.207	0.209		56.2	56	46	50	56.2
5	0.222	0.261	0.239	0.241		58	70	50	64	70
6	0.21	0.212	0.28	0.234		60	80	53	66	80
7	0.219	0.223	0.216	0.219		67	73	70	78	78
8	0.262	0.244	0.162	0.223		69	88	79	98	98
9	0.225	0.241	0.236	0.234		76	89	96	100	100
10	0.211	0.273	0.278	0.254		78	90	98	103	103
11	0.251	0.228	0.256	0.245		120	129	148	150	150

ตารางที่ 4.15 ค่า Ra และค่าการสึกหรอของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiN/TiSiXN ครั้งที่ 1 (ต่อ)

Distances	Ra_ALTiN/TiSiXN			Avr.		Flank	Flank	Flank	Flank	V <sub>Bmax</sub>
						1	2	3	4	
12	0.271	0.292	0.323	0.295		123	130	173	175	175
13	0.168	0.19	0.168	0.175		188	147	180	185	188
14	0.208	0.172	0.155	0.178		193	150	195	201	201

ตารางที่ 4.16 ค่า Ra และค่าการสึกหรอของคมตัดเคลือบด้วยสาร ALTiN/TiSiXN ครั้งที่ 2

Distances	Ra_ALTiN/TiSiXN			Avr.		Flank 1	Flank	Flank	Flank	V <sub>Bmax</sub>
						2	3	4		
0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
1	0.192	0.266	0.157	0.205		35	25	36	39	39
2	0.106	0.262	0.302	0.223		40	40	36	39	40
3	0.216	0.257	0.186	0.220		48	52	48	50	52
4	0.117	0.158	0.138	0.138		54	55	59	67	67
5	0.178	0.187	0.137	0.167		76	74	77	74.5	77
6	0.145	0.22	0.177	0.181		93	85	96	99	99
7	0.176	0.114	0.246	0.179		103	88	104	109	109
8	0.124	0.095	0.251	0.157		108	90	107	113	113
9	0.159	0.158	0.275	0.197		110	104	109	115	115
10	0.196	0.243	0.274	0.238		116	110	112	118	118
11	0.148	0.277	0.228	0.218		118	115	114	120	120
12	0.166	0.11	0.094	0.123		123	115	118	128	128
13	0.148	0.276	0.292	0.239		172	130	129	139	172
14	0.11	0.106	0.182	0.133		225	180	137	173	225

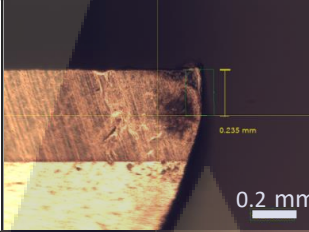
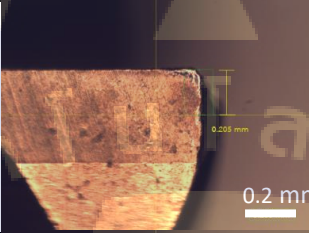
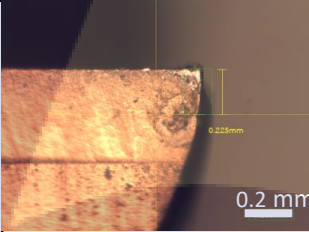
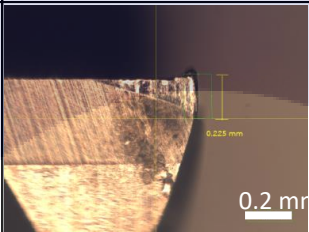
ตารางที่ 4.17 ค่า Ra และค่าการสึกหรอของคมตัดเคลือบด้วยสาร Non-coat ครั้งที่ 1

Distances	Ra_Non			Avr.		Flank	Flank	Flank	Flank	V <sub>Bmax</sub>
						1	2	3	4	
0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
1	0.153	0.178	0.183	0.171		55	80	60	65.7	80
2	0.152	0.117	0.104	0.124		122.2	72	114	78.2	122.2
3	0.23	0.185	0.195	0.203		140	134	142	140	142
4	0.276	0.211	0.276	0.254		160	170	170	155	170
5	0.165	0.201	0.19	0.185		170	184	200	165	200

ตารางที่ 4.18 ค่า Ra และค่าการสึกหรอของคมตัดเคลือบด้วยสาร Non-coat ครั้งที่ 2

Distances	Ra_Non			Avr.		Flank	Flank	Flank	Flank	V <sub>Bmax</sub>
						1	2	3	4	
0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
1	0.136	0.115	0.163	0.138		34.5	43	49	55	55
2	0.155	0.107	0.106	0.123		60	66	52	60	66
3	0.105	0.264	0.245	0.205		82.8	100	84	77	100
4	0.128	0.091	0.102	0.107		128	112	120	122	128
5	0.139	0.122	0.213	0.158		180	178	195	190	200

จากตารางที่ 4.11 - 4.18 เป็นบันทึกการเก็บข้อมูลวัดความสึกหรอที่คมตัดทำโดยการวัดทุกระยะทางการกัด 1 เมตร ทำการหยุดการกัดนำดอกกัดออกมาทำความสะอาดด้วยผ้าเช็ดด้วยแอลกอฮอล์และนำไปตรวจวัดด้วยกล้องขยายเพื่อตรวจวัดค่าการสึกหรอของคมตัดทั้ง 4 หน้าคมตัดพิจารณาเลือกนำค่าสึกหรอที่มากที่สุดมาใช้ในการวิเคราะห์ สรุปได้ ค่าระยะทางตัดเฉือนมากที่สุดของแต่ละสารเคลือบดังรูปที่ 4.40 จากนั้นนำค่าการสึกหรอที่ได้มาวิเคราะห์สร้างกราฟความสัมพันธ์ต่อระยะทางการกัดขึ้นงาน ว่าการกัดด้วยคมตัดเคลือบสารใดให้ระยะตัดเฉือนใช้งานได้ยาวนานที่สุด ดังรูปที่ 4.26 - 4.28

Tool wear Coating Material	ISO VBmax (200 $\mu$ m)	Avg.Distance (m)	Tool life Ratio %
AlTiZrSiN		20	400
AlTiSiN		16	320
AlTiN/TiSiXN		14	280
Non_Coat		5	100

รูปที่ 4.41 ภาพขนาดของการสึกหรอสูงสุดและค่าระยะการกัดเฉลี่ย

## บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

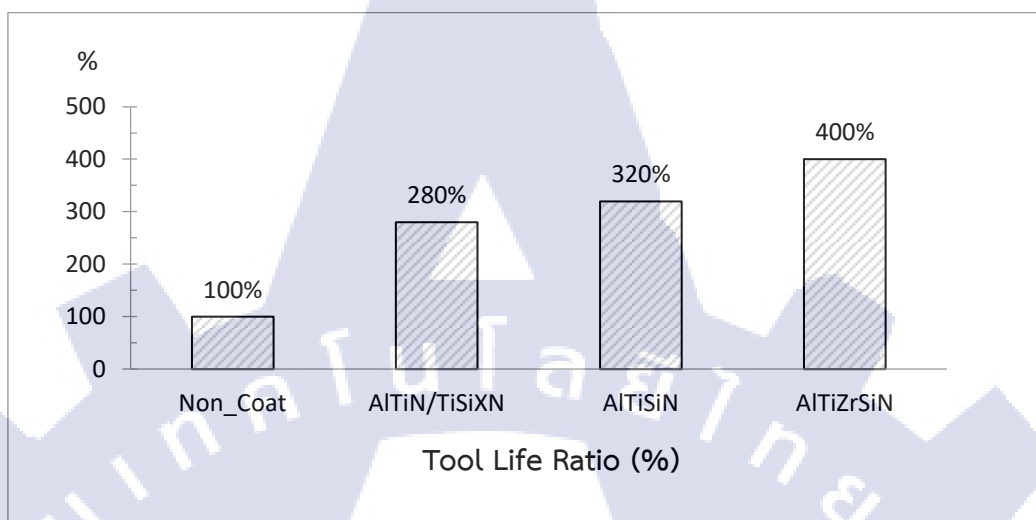
ผลจากการทดลองกัดวัสดุอินโคเนล เกรด 718 บนเครื่องกัด ซี เอ็น ซี ยี่ห้อ Makino รุ่น S33 ด้วยคมตัดทำจากวัสดุคาร์ไบด์แบบเอ็นมิลหัวตรงชนิด 4 ฟัน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ความยาว 50 มิลลิเมตร ประกอบด้วยพื้นผิวคมตัดเคลือบสาร 4 แบบ ได้แก่ เคลือบด้วยสาร ALTiZrSiN, ALTiSiN, ALTiN/TiSiXN และแบบไม่เคลือบสาร โดยพิจารณาปัจจัยหลักประกอบด้วยค่าความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกการตัด วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab 17 โดยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ใช้ฟังก์ชัน Response optimizer แบบค่าต่ำสุด

ผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่าค่าที่เหมาะสมของความเร็วตัด เท่ากับ 92.2273 เมตรต่อนาที อัตราป้อนเท่ากับ 0.050 มิลลิเมตรต่อฟัน และความลึกการตัดเท่ากับ 0.113 มิลลิเมตร จากนั้นนำค่าของปัจจัยที่ได้มาทำการทดลองตัดเฉือน เพื่อหาค่าการสึกหรอของคมตัดต่อระยะทางตัดเฉือน โดยพิจารณาการสึกหรอของมุมหลบ อ้างอิงมาตรฐาน ISO 3685:1993 และค่าความหยาบผิวชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ISO 4287:1997 พบว่าคมตัดที่เคลือบสารชนิด ALTiZrSiN มีความทนทานต่อการสึกหรอมากที่สุดโดยมีระยะทางการตัดเฉือนเฉลี่ยเท่ากับ 20 เมตร เกิดการสึกหรอสูงสุด 200 ไมโครเมตร คิดเป็น 4 เท่าของอายุคมตัดแบบไม่เคลือบผิว มีค่าความเรียบผิวเฉลี่ย 0.2 ไมโครเมตร ถัดมาเป็นสารเคลือบแบบ ALTiSiN ได้ระยะทางการตัดเฉือนเท่ากับ 16 เมตร สารเคลือบแบบ ALTiN/TiSiXN ได้ระยะทางการตัดเฉือนเท่ากับ 14 เมตร และแบบไม่เคลือบสารที่คมตัดได้ระยะทางการตัดเฉือนเท่ากับ 5 เมตร ตามลำดับ ภายใต้สภาวะตัดเฉือนแบบแห้ง ซึ่งสามารถนำเสนอออกมาในภาพแผนภูมิแสดงอัตราส่วนระหว่างอายุการใช้งานคมตัดหลังถูกเคลือบสารดังแสดงในรูปที่ 5.1

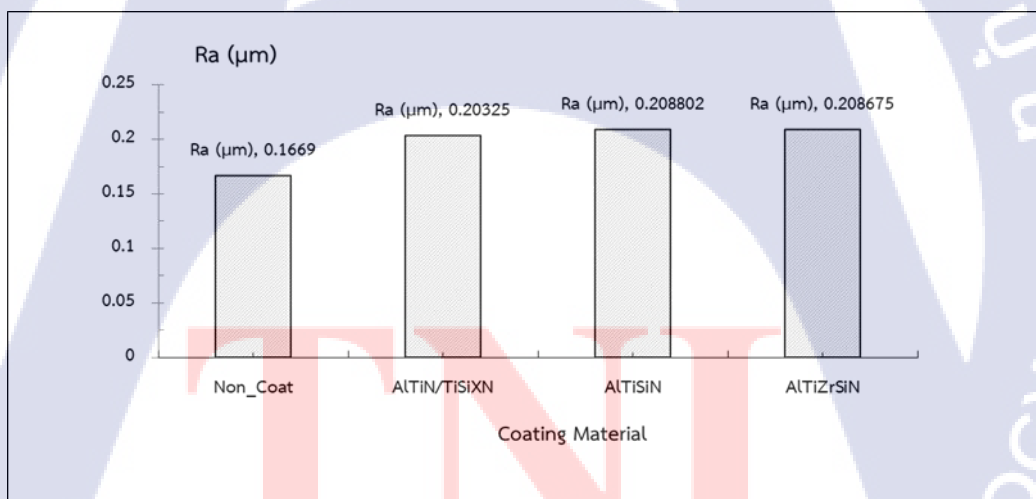
ในด้านของค่าความหยาบผิวชิ้นงานหลังการตัดเฉือนเฉลี่ยน้อยที่สุดได้จากคมตัดที่ไม่ผ่านการเคลือบผิววัดระดับความหยาบเฉลี่ย (Ra) เท่ากับ 0.1669 ไมโครเมตร และสารเคลือบแบบ ALTiN/TiSiXN วัดระดับความหยาบเฉลี่ย (Ra) เท่ากับ 0.20325 ไมโครเมตร และ ALTiZrSiN วัดระดับความหยาบเฉลี่ย (Ra) เท่ากับ 0.208675 ไมโครเมตร และสารเคลือบ ALTiSiN วัดระดับความหยาบเฉลี่ย (Ra) เท่ากับ 0.208802 ไมโครเมตร ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 5.2

ซึ่งค่าความเรียบผิวเฉลี่ยที่ได้จากคมตัดเคลือบสารทั้ง 3 ชนิดสามารถบ่งชี้ว่ามีค่าไม่แตกต่างกันคือเฉลี่ยประมาณ 0.200 ไมโครเมตร และสูงกว่าค่าของคมตัดไม่ผ่านการเคลือบผิวเพียง 0.040

ไมโครเมตรเมื่อเทียบกับการคัมค่าในด้านความทนทานต่อการใช้งานที่เพิ่มขึ้นต่อค่าใช้จ่ายที่ดำเนินการ



รูปที่ 5.1 ภาพอัตราส่วนอายุใช้งานคมตัดหลังถูกเคลือบสารในการตัดเฉือน อินโคเนล เกรด 718



รูปที่ 5.2 ความเรียบผิวเฉลี่ยของสารเคลือบคมตัดในการตัดเฉือน อินโคเนล เกรด 718

### 5.1.1 ผลการทดลองด้วย DOE แบบ Box-Behnken

ผลจากการทดลองพบว่าการทำงานหาสภาวะความเหมาะสมของระดับของปัจจัยที่ทำให้ค่าความหยาบผิวชิ้นงานน้อยที่สุดทำให้เกิดการแตกแฉงหรือการกระจายที่เหมาะสมของจุดของข้อมูลตลอดบริเวณที่อยู่ในจุดที่สนใจ ทำให้สามารถตรวจความพอเพียงของแบบจำลอง และ Lack of fit

ตรวจสอบความแม่นยำได้ ทำให้การทดลองสามารถเกิดขึ้นใน block ให้ค่าประมาณภายในของความผิดพลาด ช่วยลดจำนวนชุดการทดลองโดยยังคงไว้ซึ่งความน่าเชื่อถือของข้อมูลในการทดลอง

### 5.1.2 ผลการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพสารเคลือบคมตัด

เมื่อพิจารณาด้านต้นทุนในการเคลือบผิวคมตัดพบว่ามีการใช้จ่ายเพิ่มขึ้นคิดเป็น 17.5% จากราคาเริ่มต้นของคมตัดที่ยังไม่ผ่านการเคลือบผิว แต่สามารถใช้งานได้ยาวนานกว่าคมตัดที่ไม่เคลือบถึง 4 เท่า ลดเวลาการเปลี่ยนคมตัดระหว่างกระบวนการ จึงมีส่วนในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้

ผลการทดลองบ่งชี้ให้เห็นว่าสารเคลือบผิวคมตัดมีอิทธิพลต่อกลไกการสึกหรอ บนหลักการการปรับสภาพผิวให้ลื่นเพื่อลดความเสียหายของพื้นผิวคมตัดและเศษวัสดุงาน เมื่อคมตัดถูกเคลือบด้วยฟิล์มบาง จะช่วยลดการสะสมของความร้อนที่ปลายคมตัดเป็นหนึ่งในวิธีการป้องกันการเชื่อมติดของวัสดุที่หน้าคมตัดซึ่งสามารถยืดอายุการใช้งานของคมตัดได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 งานวิจัยนี้เป็นการหาค่าสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยความเร็วตัดเฉือนในย่าน High speed machining ในการกัดชิ้นงาน Nickel alloy ให้ได้ค่าความเรียบผิวที่ดีที่สุดและสารเคลือบคมตัดใดทนทานการสึกหรอได้ดีที่สุดเพียงเท่านั้น หากผู้สนใจดำเนินวิจัยต่อขอแนะนำให้ศึกษาปัจจัยหลักตัวอื่นๆเพิ่มเติม เพื่อลดเวลาการกัดชิ้นงาน

5.2.2 งานวิจัยนี้ทดลองกัดงานด้วยคมตัดสารเคลือบที่ถูกรออกแบบมาสำหรับตัดเฉือนวัสดุอินโคเนลประเภทนิกเกิล แต่ละผู้ให้บริการเคลือบสารคมตัดมีประสิทธิภาพความทนทานแตกต่างกัน หากผู้สนใจดำเนินวิจัยต่อขอแนะนำให้เลือกใช้สารเคลือบที่เหมาะสมกับชนิดวัสดุชิ้นงานโดยพิจารณาส่วนผสมทาวเคมีของสารเคลือบและส่วนผสมของวัสดุงานเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการตัดเฉือนที่ต้านทานการสึกหรอได้ดีที่สุด



บรรณานุกรม

TNI



### บรรณานุกรม

- [1] กรมทรัพย์สินทางปัญญา, “อุตสาหกรรมการบินและการบิน,” *รายงานการวิเคราะห์แนวโน้มเทคโนโลยีและอุตสาหกรรม*, [Online]. Available: <https://www.ipthailand.go.th/th/กฎหมายทรัพย์สินทางปัญญาของต่างประเทศ/เอกสารเผยแพร่/item/รายงานการวิเคราะห์แนวโน้มอุตสาหกรรมการบินและโลจิสติกส์.html>. [Accessed: 4 พฤษภาคม 2561].
- [2] E. O. Ezugwu, “Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, no. 12–13, pp. 1353–1367, October 2005.
- [3] M.S. Kasin et al., “Prediction surface roughness in high-speed milling of inconel 718 under using RSM method,” *Middle-East of Scientific Research*, vol. 13, no. 3, pp. 264-272, January 2013.
- [4] I. Uzun et al., “An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of inconel 718 super alloy,” *Wear*, vol. 300, no. 1–2, pp. 8–19, March 2013.
- [5] I. Uzun et al., “Effect of tool coating material on surface roughness in micro-machining of inconel 718 super alloy,” *SAGE Journals*, vol. 228, no. 12, pp. 1550–1562, February 28, 2014.
- [6] M. A. Hadi et al., “Comparison between up-milling and down-milling operations on tool wear in milling inconel 718,” *Procedia Engineering*, vol. 68, pp. 647-653, November 2013.
- [7] D. Zhu et al., “Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys” *Interation Journal of machine tools & Manufacture*, vol. 64, pp. 60-77, January 2013.
- [8] B. Kursuncu et al., “Wear behavior of multilayer nanocomposite TiAlSiN/TiSiN-/TiAlN coated carbide cutting tool during face milling of inconel superalloy,” *Journal of Nano Research*, vol. 47, pp. 11-16, May 2017.
- [9] I. A. Choudhury et al., “Machining nickel base superalloys: inconel 718,” *SAGE Journals*, vol. 212, no. 3, pp. 195–206, March 1 1998.

- [10] K. H. Park et al., “Tool wear analysis on coated and uncoated carbide tools in inconel machining,” *International Journal of Precision Engineering*, vol. 16, no. 7, pp. 1639–1645, June 24 2015.
- [11] IKS PVD Technology, “Technology Coating Cutting Tool,” [Online]. Available: <http://m.th.ikstechnology.com/info/coating-technology-tool-coating-31632482.html>. [Accessed: December 18, 2018].
- [12] Oerlikon Balzers, “Catalog,” [Online]. Available: <https://www.oerlikon.com/balzers/th/th/applications/tools/cutting/milling.html> [Accessed: April 30, 2021]
- [13] Nissin Electric, “Catalog,” [Online]. Available: <http://www.nissin-thai.com/th/pvdcoating.html>, [Accessed: April 30, 2021].
- [14] Group Engineer Product, “งานกัดขึ้นรูปชิ้นงาน” [Online]. Available: <http://groupcor.com//งานกัดขึ้นรูปชิ้นงาน>. [Accessed: March 2, 2020].
- [15] A. Prapaspong, “The Screening of machining parameters on surface roughness and tool wear in the end-milling process of aluminum semi-solid A356,” M.S. Thesis (Manufacturing Engineering), Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2016.
- [16] J. Rujisomnapa, “Wear behavior of milling tool surface coated by PVD” M.S. Thesis (Metallurgical Engineering), Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2013.
- [17] U. Thanasuptawee, “Optimization of Surface Roughness and Tool Wear in Milling for Semi-Solid A356 Aluminum,” Ph.D.dissertation, (Manufacturing Engineering), Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2018.
- [18] ปารเมศ ชูติมา, “การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม,” กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [19] Montgomery DC., “Design and Analysis of Experiments,” 7th ed. New York : John Wiley& Sons, 2009.
- [20] S. Hanasaki et al., “Tool wear of coated tools when machining a high nickel alloy,” *CIRP Annual-Manufacturing Technology*, vol. 39, no. 1, pp. 77–80, January 1990.

- [21] V. Schornik et al., “The influence of working environment and cutting conditions on milling nickel - Based super alloys with carbide tools,” *Procedia Engineering*, vol. 100, pp. 1262–1269, February 2015.
- [22] International Organization for Standardization, *ISO 4287 : 1997 Geometrical Product Specifications (GPS)-Surface texture: Profile method-Terms, Definitions and Surface Texture Parameters*, Geneva: ISO Central Secretariat, 1997.
- [23] International Organization for Standardization, *ISO 3685 : 1993 (E) Tool- life Testing with Single-Point Turning Tool*, Geneva: ISO Central Secretariat, 1993.
- [24] ปรัชญา พลพะพันธ์, “คู่มือวิเคราะห์และจัดการข้อมูลสถิติด้วย Minitab ฉบับมืออาชีพ,” นนทบุรี: ไอทีซี, 2560.
- [25] M. Nalbant et al., “The effect of coating material and geometry of cutting tool and cutting speed on machinability properties of inconel 718 super alloys,” *Materials & Design*, vol. 28, no. 5, pp. 1719–1724, May 2007.
- [26] H. Li and J. Wang, “Assessment of cutting forces in high-speed milling of inconel 718 considering the dynamic effects,” *SAGE Journals*, vol. 227, no. 11, pp. 1581–1595, June 2013.
- [27] V. P. Astakhov and J. P. Davim, “Tools (geometry and material) and tool wear,” *Machining Fundamentals and Recent Advances*, vol. 6795, pp. 29–57, January 2008.



TNI

THAI-NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

ภาคผนวก

TNI

THAI

NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ภาคผนวก ก.

โปรแกรมหลักที่ใช้สำหรับการทดลองกັดบนเครื่อง ซี เอ็น ซี Makino S 33

TNI

## โปรแกรมหลักที่ใช้สำหรับการทดลองกัดบนเครื่อง ซี เอ็น ซี Makino S 33

NC Program (O0030)

00030 ;

G28 G91 Z0 ;

G28 G91 X0 Y0 ;

T01 M06 ;

G0 G90 G54 X0 Y0 ;

G43 H1 Z150. ;

M0 ;

S3980 M03 ;

G0 G90 X-10. Y0 ;

Z5. ;

G01 Z-.1 F1592 ;

X50. ;

Z5 ;

G00 G90 X-10. ;

M98 P0031 L20 ;

G00 G90 Z50 ;

M05 ;

G28 G91 Z0 ;

G28 G91 X0 Y0 ;

M30 ;

%

## โปรแกรมรอง (วนลูป)

NC Program (O0031)

O0031 ;

G01 G91 Y0.1 ;

G01 G90 X-10. ;

G01 G90 Z-1 ;

X50. ;

Z5. ;

G00 X-10. ;

M99 ;

%



THAI-NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

TNII

ภาคผนวก ข.

รายการสัญลักษณ์

TNI



### รายการสัญลักษณ์

Tin	คือ การเคลือบผิวคมตัดแบบไทเทเนียมไนไตรด์
Crn	คือ การเคลือบผิวคมตัดแบบโครเมียมไนไตรด์
TiCn	คือ การเคลือบผิวคมตัดแบบไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์
AlTin	คือ การเคลือบผิวคมตัดแบบอลูมิเนียมไทเทเนียมไนไตรด์
DLC	คือ การเคลือบผิวคมตัดแบบไดมอนด์ไลค์คาร์บอน
AlTiZrSiN	คือ การเคลือบผิวคมตัดแบบอลูมิเนียมไทเทเนียมเซอร์โคเนียมซิลิคอนไนไตรด์
AlTiSiN	คือ การเคลือบผิวคมตัดแบบอลูมิเนียมไทเทเนียมซิลิคอนไนไตรด์
AlTiN/TiSiXN ไตรต์	คือ การเคลือบผิวคมตัดแบบอลูมิเนียมไทเทเนียมไนไตรด์/ไทเทเนียมซิลิคอนไนไตรด์
Non-Coat	คือ คมตัดไม่เคลือบสาร
End mill	คือ เครื่องมือคมตัดสำหรับงานกัดมีลักษณะเป็นแท่งกลม
DOE	คือ การออกแบบการทดลอง
V	คือ ความเร็วในการตัดเฉือน, m/min
F	คือ อัตราการป้อน, mm/rev
Ap	คือ ความลึกในการตัดเฉือน, mm
N	คือ ความเร็วรอบหมุนของสปินเดิล, rpm
D	คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเครื่องมือคมตัด, mm
Z	คือ จำนวนของคมตัด
Sz	คือ อัตราป้อนต่อคมตัด, mm