



การวิเคราะห์ลักษณะเชิงกลเพื่อทำนายความหยาบผิวของสไลเดอร์
ด้วยเครื่องตัดที่มีความแม่นยำสูง

MECHANICAL CHARACTERISTICS ANALYSIS FOR SURFACE ROUGHNESS OF
SLIDER IN HIGH PRECISION CUTTING MACHINE

กิตติคม นนท์ประสาท

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2562

การวิเคราะห์ลักษณะเชิงกลเพื่อทำนายความหยาบผิวของสไลเดอร์
ด้วยเครื่องตัดที่มีความแม่นยำสูง



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

MECHANICAL CHARACTERISTICS ANALYSIS FOR SURFACE ROUGHNESS OF
SLIDER IN HIGH PRECISION CUTTING MACHINE



KITTIKOM NONTPRASAT

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY
(Mechanical Engineering)

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

2019

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง
การวิเคราะห์ลักษณะเชิงกลเพื่อทำนายความเสียหายของสไลเดอร์
ด้วยเครื่องตัดที่มีความแม่นยำสูง
ของ
กิตติคม นนท์ประสาธ

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก	 ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร.กัณวรัช พลุปราชญ์)	(ศาสตราจารย์ พลโทสมชาย สิงห์โต)
..... ที่ปรึกษาร่วม	 กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรเชษฐ์ ชุติมา)	(รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยวานิชกุล)

ชื่อเรื่อง	การวิเคราะห์ลักษณะเชิงกลเพื่อทำนายความหยาบผิวของสไลเดอร์ ด้วยเครื่องตัดที่มีความแม่นยำสูง
ผู้วิจัย	กิตติคม นนท์ประสาท
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. กัณวรัช พลุปราชญ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. สุรเชษฐ์ ชูติมา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความหยาบผิวของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ใช้เป็นฐานรองของหัวอ่าน-เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive) ปัญหาที่พบในการผลิตคือความหยาบผิวภายหลังจากกระบวนการตัดแท่งอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ออกเป็นชิ้นเล็กๆ เรียกว่า “สไลเดอร์ (Slider)” ซึ่งความหยาบผิวจะส่งผลต่อการสะสมฝุ่นที่มีผลกระทบโดยตรงกับฮาร์ดดิสก์ เพื่อให้ได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อให้เข้าใจตัวแปรในกระบวนการตัดที่มีผลต่อแรงในการตัดและความหยาบผิว รวมถึงหาตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการตัดแท่งอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ให้ผลแรงในกระบวนการตัดและความหยาบผิวน้อยที่สุดด้วยเครื่องตัดที่มีความแม่นยำสูง ด้วยเครื่องวัดแรง 3 แกนที่มีความละเอียดสูงและวัดความหยาบผิวด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคด้วยแรงกด (Atomic Force Measurement Machine) ผลการวิจัยพบว่าแรงที่มีขนาดน้อยที่สุดเกิดจากใบตัดที่มีเม็ดเกรน SD8000 คือ 18.605 N โดยที่ผลกระทบจาก ความเร็วรอบ 81.25%, อัตราป้อน 15.15% และความลึกในการตัด 3.60% ขณะที่ใบตัดที่มีเม็ดเกรน SD10000 มีแรงในการตัดที่น้อยที่สุดคือ 20.963 N จากความเร็วรอบ 82.58%, อัตราป้อน 14.78%, และความลึกในการตัด 2.46% อย่างมีนัยสำคัญ ความหยาบผิวน้อยที่สุด คือ 1.221 nm เมื่อใช้ใบตัดชนิด SD10000 จากความเร็วรอบ 69.45% อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดคือ 1.635 nm เมื่อใช้ใบตัดชนิด SD8000 ส่วนในการทดลองเพื่อยืนยันผลพบว่า มีค่าความผิดพลาดของผลการทดลองและการทำนายของแรงคือ 4.73% และ 2.20% สำหรับใบตัดชนิด SD8000 และ SD10000 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความหยาบผิวมีความผิดพลาดคือ 2.88% สำหรับใบตัดชนิด SD8000 และค่าความหยาบผิวมีความผิดพลาด 2.77% เมื่อใช้ใบตัดชนิด SD10000

คำสำคัญ : อะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์, วิธีทางสถิติ, เงื่อนไขการตัด, ความหยาบผิว, เครื่องตัดที่มีความแม่นยำสูง, แรงในการตัด, ใบตัดเพชร

Title	MECHANICAL CHARACTERISTICS ANALYSIS FOR SURFACE ROUGHNESS OF SLIDER IN HIGH PRECISION CUTTING MACHINE
Author	KITTIKOM NONTPRASAT
Degree	DOCTOR OF PHILOSOPHY
Academic Year	2019
Thesis Advisor	Associate Professor Dr. Ganwarich Pluphrach
Co Advisor	Associate Professor Dr. Surachate Chutima , Ph.D.

This research studies the surface roughness of the Al_2O_3 -TiC composite used as a substrate for the Read-Write head in the hard disk drive. In the fabrication of the hard disk drive, the Al_2O_3 -TiC composite wafer is cut into a designated bar shape by slicing and dicing and known as a slider. The surface of the hard disk achieves the quality and reliability of the product. The research objective is to understand the cutting force affected by the parameters and surface roughness. Then, the optimization of the cutting parameters affected the minimum cutting force and surface roughness in the cutting process of Al_2O_3 -TiC with a high precision cutting machine, the cutting force used in the high precision, three-axis dynamometer and the surface roughness using atomic force measurement. The results revealed that the minimum cutting force was 18.605 N, which affected spindle speed (81.25%), feed rate (15.15%) and cutting depth (3.6%); the SD8000 blade type, while the SD10000 blade type is 20.963 N, and affected by the spindle speed (81.58%), feed rate (14.78%), and cutting depth (2.46%), all of which were significant. The minimum surface roughness is 1.221 nm of the SD10000 blade type and spindle speed was significant at 69.45%, with the SD8000 blade type at 1.635 nm. The confirmation of the experiment, the error of percentage was 4.73% and 2.20% for the cutting force of blade type SD8000 and SD10000, while the error of surface roughness showed 2.88% of the SD8000 blade type and 2.77% for the SD10000 blade type respectively.

Keyword : Al_2O_3 -TiC, High precision cutting machine, Taguchi method, Surface roughness, Cutting condition, Cutting force, Diamond blade

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถช่วยเหลือ และเอาใจใส่เป็นอย่างดี ตลอดจนการให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการปรับแก้ไขข้อบกพร่อง จากคณะกรรมการผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.กัณวรัช พลุปราชน์ และรองศาสตราจารย์ ดร. สุรเชษฐ์ ชูติมา ที่ได้ให้ความเมตตากรุณาเป็นที่ปรึกษาและให้ความช่วยเหลือชี้แนะแนวทางในสิ่งที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและการทำปริญญานิพนธ์นี้ด้วยความเอาใจใส่ตลอดมา รวมทั้งรองศาสตราจารย์ ดร. ประชา บุญยวานิชกุล, และศาสตราจารย์พลโท สมชาย สิงห์โต ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะต่างๆเพิ่มเติมแก่ผู้วิจัยทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์และกรรมการบริหารหลักสูตรสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ทุกท่านที่ได้กรุณาประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่างๆให้แก่ผู้วิจัย ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณโครงการการผลิตฮาร์ดดิสก์ชั้นสูงของศูนย์วิจัยอุตสาหกรรม/มหาวิทยาลัย (I/UCRC), สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาควิชาเทคโนโลยีสารสนเทศบุรีที่ให้เงินสนับสนุนในการทำวิจัยตามสัญญาเลขที่ HDD-06-01-53D และบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับความกรุณาให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขออน้อมรำลึกถึงคุณของบิดามารดาและครูอาจารย์ ที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา

กิตติคม นนท์ประสาท

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
ศัพท์เทคนิคที่สำคัญ และ ความหมาย.....	4
แผ่นเวเฟอร์	6
การเจียระไน.....	8
พื้นฐานของการเจียระไน	9
วิธีการนำเศษวัสดุออกจากล้อเจียระไน	9
การออกแบบล้อเจียระไน	10
วัสดุสารขัดถู.....	10
พื้นฐานในการเคลือบผิวโลหะ	12
การเจียระไนหยาบ	13

ล้อยืดระยะในพิเศษ.....	13
คุณภาพผิว.....	13
การออกแบบล้อยืด.....	13
ขนาดผงเพชร.....	14
ความเข้มข้นของผงเพชร.....	14
ระบบของเครื่องยืดในผิว	15
สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	17
เครื่องจักรในกระบวนการตัดสไลเดอร์	17
กำลังมอเตอร์	18
เครื่องมือวัดความหยาบผิว	19
สถิติที่ใช้ในการวิจัย.....	22
การแบ่งวิชาสถิติ	24
เทคนิคการพยากรณ์	26
การพยากรณ์ด้วยวิธีการพยากรณ์เชิงสาเหตุ.....	26
การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน	26
เงื่อนไขการดำเนินงานที่เหมาะสมที่สุด.....	28
การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น	28
วิธีทากูชิ	30
บทปริทัศน์วรรณกรรม	34
สรุปบทปริทัศน์วรรณกรรม.....	41
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	42
ขั้นตอนการทดลอง.....	42
วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง.....	43

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	43
เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	44
การออกแบบการทดลอง.....	48
การทดลอง	50
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	52
ผลการศึกษาแรงที่กระทำของกระบวนการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์.....	52
การวิเคราะห์แรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์.....	53
การวิเคราะห์แรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยอัตราส่วน SN.....	54
การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	56
การหาความเหมาะสม ของแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์.....	58
การหาสมการเชิงคณิตศาสตร์ของแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	59
ผลการศึกษากระบวนการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ต่อความหยาบผิว	60
ผลการวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวของการตัดสไลเดอร์บาร์ ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	61
การวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวของการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยอัตราส่วน S/N	63
การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับอัตราส่วน S/N ของความหยาบผิวในการตัดสไลเดอร์บาร์.....	64

การหาความเหมาะสมของค่าความหยابผิวของการตัดสไลเดอร์บาร์	66
การหาสมการเชิงคณิตศาสตร์ของความหยابผิวของการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสม อะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	68
การทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง	68
การเปรียบเทียบระหว่างการทดลองกับการทำนาย สำหรับแรงที่ใช้ในกระบวนการตัด สไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	68
การเปรียบเทียบระหว่างการทดลองกับการทำนาย สำหรับค่าความหยابผิวของการตัด สไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	70
บทที่ 5 สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ	72
สรุปผลการทดลอง	72
อภิปรายผล	73
ข้อเสนอแนะ	73
บรรณานุกรม	74
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลอง	84
ภาคผนวก ข ข้อมูลทางด้านเทคนิค	98
ประวัติผู้เขียน.....	103

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 สมบัติทางกลของวัสดุของอะลูมิเนียมอัลลอยด์และไทเทเนียมคาร์ไบด์.....	17
ตาราง 2 ตารางการออกแบบการทดลอง Cord และ uncorded	49
ตาราง 3 ผลการทดลองและอัตราส่วน S/N ของแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมอัลลอยด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	55
ตาราง 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ของใบตัดชนิด SD8000 กับแรงในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมอัลลอยด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	56
ตาราง 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของใบตัดชนิด SD10000กับแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมอัลลอยด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์.....	57
ตาราง 6 การวิเคราะห์การจัดลำดับของอิทธิพลที่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมอัลลอยด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์.....	58
ตาราง 7 ผลการทดลองและอัตราส่วน S/N ของค่าความหยาบผิวของการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมอัลลอยด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์.....	63
ตาราง 8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของใบตัดชนิด SD8000 กับความหยาบผิวของการตัดสไลเดอร์ บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมอัลลอยด์ - ไทเทเนียมคาร์ไบด์.....	65
ตาราง 9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของใบตัดชนิด SD10000 กับความหยาบผิวของการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมอัลลอยด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์.....	65
ตาราง 10 การวิเคราะห์การจัดลำดับของอิทธิพลที่มีผล ต่อค่าความหยาบผิว ของการตัดสไลเดอร์ บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมอัลลอยด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	66

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 ส่วนประกอบที่สำคัญของสไลเดอร์.....	5
ภาพประกอบ 2 การใช้เตาหลอมไฟฟ้าในการหลอมอะลูมิเนียมออกไซด์.....	6
ภาพประกอบ 3 แร่บ็อกไซต์, ถ่านโค้ก, และเศษเหล็ก ที่ใช้ในการหลอมอะลูมิเนียมออกไซด์	7
ภาพประกอบ 4 ภาพอะลูมิเนียมออกไซด์ถูกหลอมก่อนทำการบดและร่อน	8
ภาพประกอบ 5 การเจียระไนกับเกรนของสารขัดถู.....	9
ภาพประกอบ 6 ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเจียระไน.....	10
ภาพประกอบ 7 ความหนาแน่น และความแข็ง ของเพชรธรรมชาติเพชรสังเคราะห์ และ คิวบิกโบรอนไนไตรด์.....	11
ภาพประกอบ 8 สมบัติการนำความร้อนของเพชรและ CBN	12
ภาพประกอบ 9 ระบบของเครื่องเจียระไนผิว	16
ภาพประกอบ 10 ภาพเครื่อง Atomic force microscope : AFM.....	20
ภาพประกอบ 11 หลักการทำงานของเครื่อง AFM	21
ภาพประกอบ 12 การทำงานของ Probe ของเครื่อง AFM	21
ภาพประกอบ 13 พื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AFM	22
ภาพประกอบ 14 แผนภูมิบล็อกแสดงกระบวนการผลิต	32
ภาพประกอบ 15 ขั้นตอนการทดลอง.....	42
ภาพประกอบ 16 แผ่นเวเฟอร์, ชิ้นงานที่ถูกตัดแบ่งออกเป็นส่วน, และสไลเดอร์บาร์	43
ภาพประกอบ 17 ใบตัดเพชรชนิดพิเศษสำหรับการตัดเจียระไน	44
ภาพประกอบ 18 หินสำหรับลับใบตัดเพชร.....	44
ภาพประกอบ 19 เครื่องตัดและเจียระไนแผ่นเวเฟอร์.....	45
ภาพประกอบ 20 เครื่องตัดแบ่งสไลเดอร์ที่มีความแม่นยำสูง	46

ภาพประกอบ 21 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสไลเดอร์บาร์ เพื่อสำหรับตัดให้เป็นตัวสไลเดอร์	46
ภาพประกอบ 22 เครื่องสำหรับวัดแรง 3 แกน และอุปกรณ์ต่อพ่วงของเครื่องสำหรับวัดแรง 3 แกน	47
ภาพประกอบ 23 เครื่องวัดความหนาผิว AFM	47
ภาพประกอบ 24 การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab	48
ภาพประกอบ 25 การเลือก Factor และ level ในโปรแกรม Minitab	48
ภาพประกอบ 26 ผลลัพธ์ของการออกแบบการทดลอง	49
ภาพประกอบ 27 การตัดสไลเดอร์บาร์ให้เป็นสไลเดอร์	51
ภาพประกอบ 28 ผลของแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	52
ภาพประกอบ 29 แรงที่ได้จากการตัดสไลเดอร์บาร์ ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์กับความเร็วรอบและอัตราป้อนในการตัด	53
ภาพประกอบ 30 แรงที่ได้จากการตัดสไลเดอร์บาร์ ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์กับความเร็วรอบในการตัดและความลึกในการตัด	54
ภาพประกอบ 31 การวิเคราะห์ผลกระทบหลัก ของอัตราส่วน S/N ของแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	56
ภาพประกอบ 32 ความหนาผิวจากการทดลองของการตัดสไลเดอร์บาร์ ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	60
ภาพประกอบ 33 ความหนาผิวกับความเร็วรอบและอัตราป้อนในการตัดสไลเดอร์บาร์ ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	61
ภาพประกอบ 34 ความหนาผิว ของการตัดกับความเร็วรอบในการตัดและความลึก ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	62
ภาพประกอบ 35 การวิเคราะห์ผลกระทบหลัก ของความหนาผิวในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียม-ออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยอัตราส่วน S/N	64

ภาพประกอบ 36 การเปรียบเทียบผลการทดลอง และการทำนายของแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์สำหรับใบตัดชนิด SD8000	69
ภาพประกอบ 37 การเปรียบเทียบผลการทดลอง และการทำนาย ของแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์สำหรับใบตัดชนิด SD10000	69
ภาพประกอบ 38 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายความหนาผิว ของการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์สำหรับใบตัดชนิด SD8000.....	70
ภาพประกอบ 39 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายของความหนาผิว ของการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์สำหรับใบตัดชนิด SD10000	71



บทที่ 1

บทนำ

คอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วงที่ผ่านมาและยังคงพัฒนาอย่างต่อเนื่อง การผลิตฮาร์ดดิสก์ก็มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วควบคู่ไปกับความสามารถของฮาร์ดดิสก์ การควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิตมีความสำคัญต่อกระบวนการผลิต ซึ่งการที่มีคุณภาพตามความต้องการของลูกค้าเป็นการเพิ่มความไว้วางใจและสร้างความมั่นใจในผลิตภัณฑ์ การเพิ่มความสามารถในการแข่งขันในตลาดจึงต้องมีการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ตรงกับความต้องการของตลาด

ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทําวิจัย

ส่วนประกอบที่สำคัญในคอมพิวเตอร์คือ ส่วนที่เรียกว่า “ฮาร์ดแวร์” (Hardware) และ ส่วนโปรแกรมคอมพิวเตอร์หรือชุดคำสั่ง เรียกว่า “ซอฟต์แวร์ (Software)” ซึ่งจะทำงานเป็นชั้นเป็นตอนตามคำสั่งของคอมพิวเตอร์ ฮาร์ดดิสก์ (Hard disk) เป็นฮาร์ดแวร์ที่มีความสำคัญในการเก็บข้อมูลแบบถาวร ซึ่งมีขนาดความจุสูงถึงหน่วยเมกะไบต์ (Megabytes) จนถึง เทราไบต์ (Terabyte) ในขณะที่งานจะใช้ความเร็วรอบที่ใช้ในการหมุนจานฮาร์ดดิสก์ค่อนข้างสูง ส่วนประกอบที่สำคัญในฮาร์ดดิสก์คือ หัวอ่านเขียน (Read/Write Head) จะทำหน้าที่เขียนและอ่านข้อมูลจากแผ่นบันทึกข้อมูล (Media/Disk Platters) ความถูกต้อง ความแม่นยำ ความรวดเร็วในการอ่านและเขียนข้อมูลเป็นสิ่งจำเป็นและเป็นตัวชี้วัดถึงประสิทธิภาพและคุณภาพของหัวอ่านเขียนนี้

ในปัจจุบันวัสดุที่ใช้ทำหัวอ่านเขียนคือ อะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$) หรือ AlTiC เป็นชื่อทางการค้า เป็นวัสดุผสมที่มีความแข็งแรง ความทนทาน ความเสถียรทางเคมี และมีความต้านทานในการสึกหรอ ซึ่งสมบัติเชิงกลที่เด่นนี้ จึงนิยมนำไปทำเครื่องมือทางกล เช่น มีดกลึง ดอกสว่าน เป็นต้น และนอกจากสมบัติทางกลแล้วยังมีสมบัติด้านการนำไฟฟ้าด้วย (Emami, 2014; Jana, 2010 ; Takuya, 2007) จากสมบัติที่กล่าวมาจึงได้นำวัสดุผสมนี้เป็นส่วนรองรับ (Substrate) ในการผลิตหัวอ่านเขียนด้วยกรรมวิธีการปลูกวงจรรีโวลูชันนิกส์ ซึ่งมีความสำคัญในหัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ (Biro, 2015; Fnides, 2008; Kadirgama, 2012) การใช้วัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ เป็นส่วนรองรับมีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมเรียกว่า “แผ่นเวเฟอร์” มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 203.2 mm (8 นิ้ว) ที่สามารถบรรจุวงจรรีโวลูชันนิกส์ได้มากกว่า 100,000 ตัว ในกระบวนการผลิตจำเป็นต้องมีกระบวนการตัดและเจียรระนาบที่หลายขั้นตอน จึงจะได้หัวอ่านเขียนจากวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์แต่ละตัว สมบัติต่างๆของ

วัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์นี้ได้รับปัจจัยจาก ขนาดของอนุภาค ขนาดของ เม็ดเกรน การกระจายตัวของส่วนผสม สัดส่วนของการเติมไทเทเนียมคาร์ไบด์ และกระบวนการ ผลิต ซึ่งสมบัติของวัสดุผสมเป็นสิ่งสำคัญและส่งผลต่อกระบวนการตัดและเจียระไน เพื่อให้ได้ ขนาดตามที่ต้องการและเกิดความเสียหายของผลิตภัณฑ์จากการตัดและเจียระไนน้อยที่สุด เพื่อให้ได้หัวอ่านเขียนที่มีคุณภาพและมีประสิทธิภาพสูงสุด

การศึกษาแรงที่ใช้ในการตัด (Cutting force) สไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์และความหยาบผิว (Surface roughness) ของสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสม อะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ จึงมีความจำเป็นและมีความสำคัญเป็นอย่างมากใน กระบวนการผลิตหัวอ่านเขียน ซึ่งสามารถที่จะนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาและแก้ปัญหาที่ เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตหัวอ่านเขียน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและมีประสิทธิภาพสูงสุด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลแรงที่กระทำและความหยาบผิวจากกระบวนการตัดสไลเดอร์บาร์ของ วัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์
2. เพื่อหาเงื่อนไขของกระบวนการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์- ไทเทเนียมคาร์ไบด์ต่อแรงที่กระทำและความหยาบผิว

ขอบเขตของการวิจัย

1. การศึกษาวิจัยดำเนินการภายใต้ตัวอย่างสไลเดอร์บาร์ที่มีขนาด $1.253 \times 46.06 \times 0.18$ mm วัสดุนำมาตัดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ซึ่งมีอัตราส่วนผสม Al_2O_3 เท่ากับ 65% และ TiC เท่ากับ 35% โดยน้ำหนักและมีความแข็ง 207 GPa, Young's Modulus 390 GPa, Bending Strength 880 MPa
2. การศึกษาวิจัยทำภายใต้สมมติฐานว่า วัสดุผสมอะลูมิเนียม-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ มี สมบัติทางกลในระดับมหภาคที่มีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic) และวัสดุผสมที่ ศึกษาจะมีการเรียงตัวกันอย่างสมบูรณ์ (Preferred-orientation)
3. การศึกษาวิจัยใช้ใบตัดชนิดพิเศษที่มีส่วนผสมของกากเพชร (Diamond Blade) ที่มี ขนาดเม็ดเกรน SD8000 และ SD10000
4. การศึกษาวิจัยทำภายใต้สมมติฐานว่า วัสดุที่ทำใบตัดเป็นวัสดุชนิดเดียวกันและมี อัตราส่วนผสมของเม็ดเพชรที่เท่ากัน

5. การศึกษาวิจัยทำภายใต้สมมติฐานว่าน้ำยาหล่อเย็นมีส่วนผสมที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และมีอุณหภูมิคงที่ในขณะที่การทดลอง

6. การศึกษาวิจัยทำภายใต้สมมติฐานว่าไม่มีการสึกหรอของใบตัดหรือมีการสึกหรอน้อยมากจนสามารถเพิกเฉยไปได้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในกระบวนการตัดสไลเดอร์บาร์ที่ทำมาจากวัสดุผสมอะลูมิเนียม-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

2. นำองค์ความรู้ที่ได้เกี่ยวกับความสัมพันธ์ในกระบวนการตัดสไลเดอร์บาร์ที่ทำมาจากอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ระหว่างความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัดไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิต

3. เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาและเลือกใช้ชนิดวัสดุผสมของใบตัด เพื่อให้ได้งานตัดที่มีคุณภาพมากขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันการผลิตสไลเดอร์มีกระบวนการผลิตที่หลากหลาย แต่จะกล่าวเฉพาะกระบวนการตัดสไลเดอร์บาร์ให้เป็นสไลเดอร์เท่านั้น โดยเนื้อหาทั้งหมดจะเกี่ยวกับการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรม และลักษณะทางกายภาพของสไลเดอร์หลังทำการตัดด้วยใบตัดเพชร รวมถึงอิทธิพลต่างๆที่มีต่อความหนาของด้านข้างของสไลเดอร์ เพื่อใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตและเป็นการลดความเสี่ยงในการนำฝุ่นที่ติดด้านข้างของสไลเดอร์ไปสร้างปัญหากับกระบวนการประกอบฮาร์ดดิสก์ในบทนี้จะประกอบไปด้วย การอธิบายความหมาย ศัพท์เทคนิค และชื่อเรียกต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต รวมถึงทฤษฎีต่างๆที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้

ศัพท์เทคนิคที่สำคัญ และ ความหมาย

เพื่อความเข้าใจที่ตรงกันในอุตสาหกรรมการผลิต ฮาร์ดดิสก์ การใช้ศัพท์ เทคนิคต่างๆจึงต้องเข้าใจตรงกันอย่างถูกต้อง ดังนั้น ชื่อเรียกและศัพท์เทคนิคจะมีความหมายเฉพาะ โดยศัพท์เทคนิคเป็นภาษาอังกฤษที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมจะไม่ต้องแปลเป็นภาษาไทย แต่จะเขียนทับศัพท์ ความหมายเหล่านี้ถูกอธิบายเพื่อความเข้าใจของผู้สนใจทั่วไป

1. สไลเดอร์ (Slider) เป็นอุปกรณ์สำหรับการอ่านและเขียนบนแผ่นของฮาร์ดดิสก์ ซึ่งใช้หลักการทางแม่เหล็ก สไลเดอร์มีขนาด $0.7 \times 1.254 \times 0.18$ mm

2. แผ่นเวเฟอร์ (Wafer) มีลักษณะเป็นแผ่นกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 203 mm จะบรรจุตัวสไลเดอร์มากกว่าแสนตัวต่อหนึ่งแผ่นเวเฟอร์ ขึ้นอยู่กับขนาดของตัวสไลเดอร์ และทำการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ

3. ซับสเตรท (Substrate) เป็นวัสดุที่ใช้ทำฐานของแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งทำมาจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ มีสมบัติแข็งแต่เปราะ

4. สไลเดอร์บาร์ (Slider bar) ได้มาจากการนำแผ่นเวเฟอร์มาตัดให้เป็นเช็ทช์ จากนั้นก็นำเช็ทช์ไปตัดให้บาง (Slicing) มีขนาด $1.254 \times 50.4 \times 0.18$ mm โดยมีจำนวนสไลเดอร์ประมาณ 54 สไลเดอร์ต่อ 1 บาร์

5. พื้นผิวแอร์เบริง (Air bearing surface เรียกว่า ABS) คือด้านที่หันหน้าเพื่อที่อ่านและเขียนข้อมูลบนแผ่นดิสก์เรียกว่า ABS

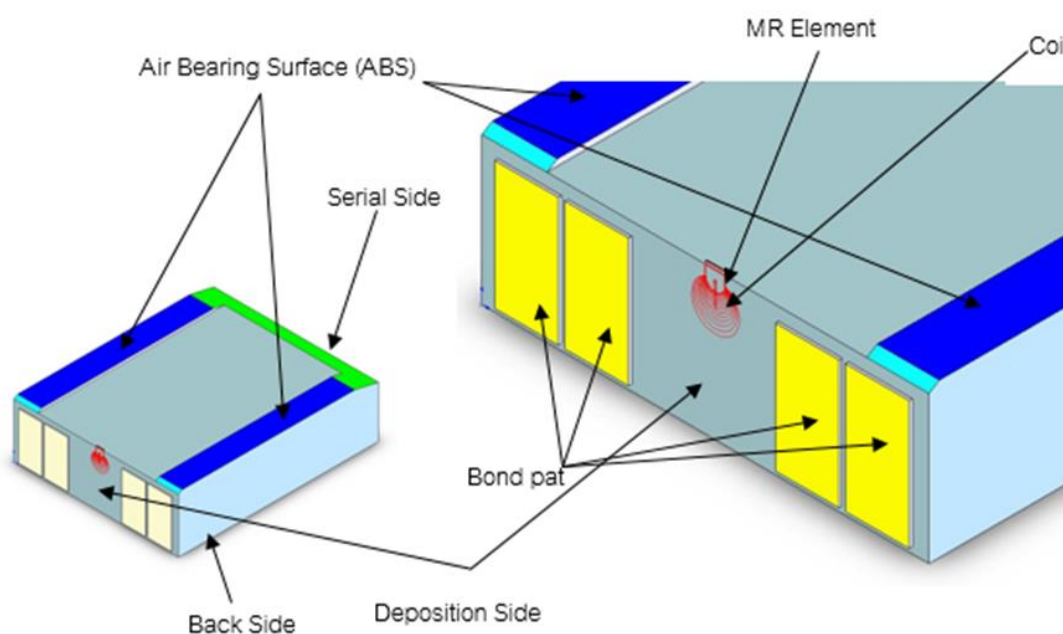
6. ด้านหลังสไลเดอร์ (Back side) คือด้านที่อยู่ตรงกับข้ามกับ ABS ซึ่งนำไปติดกับชั๊พเพ็นชัน (Suspension) ของ Head gimble assembly (HGA)

7. ด้านดีโพสิชัน (Deposition side) เป็นด้านที่มีบรรจุ Magnetic reader เอลิเมนต์ คอลย์ สิ่งต่างๆที่ใช้สำหรับการอ่านและเขียน

8. ด้านซีเรียล (Serial side) เดิมจะทำการสลักเลขสไลเดอร์ ซึ่งอยู่ตรงกันข้ามกับด้านดีโพสิชัน

9. กระบวนการตัด (Cutting process) เป็นกระบวนการในการที่จะทำการแยกตัวอย่างเช่น การแยกสไลเดอร์บาร์ออกจากเวเฟอร์ เป็นต้น

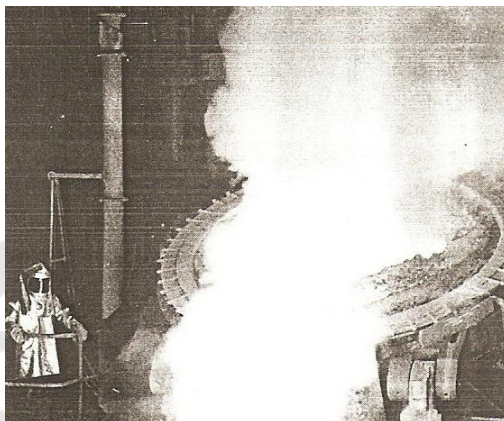
ภาพประกอบ 1 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของสไลเดอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ และตำแหน่งต่างๆ บนตัวของสไลเดอร์



ภาพประกอบ 1 ส่วนประกอบที่สำคัญของสไลเดอร์

แผ่นเวเฟอร์

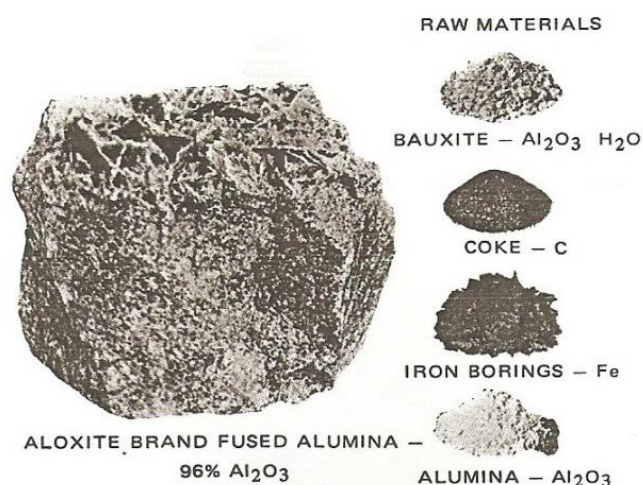
แผ่นเวเฟอร์ (Wafer) ทำมาจากอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$) ซึ่งได้มาจากการหลอมละลายแร่บ็อกไซต์ (Bauxite) โดยใช้เตาหลอมไฟฟ้า โดยทั่วไปใช้กับวัสดุทนต่อความเค้น และความเครียดสูง



ภาพประกอบ 2 การใช้เตาหลอมไฟฟ้าในการหลอมอะลูมิเนียมออกไซด์

ที่มา: (Stephen F Krar & Oswald, 1974)

การผลิตแร่บ็อกไซต์ มีลักษณะคล้ายดินเหนียวที่มีสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์มาก ชั้นแรกเผาให้เป็นผง (ให้ความร้อนด้านนอกกระทงละลาย) เพื่อกำจัดความชื้น จากนั้นนำวัสดุที่ได้ไปผสมกับถ่านหินและแร่เหล็ก ดังภาพประกอบ 2 ในสัดส่วนที่เหมาะสมและจากนั้นใส่ลงไปในเตาหลอมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2,286 mm และสูงประมาณ 1,828.8 mm ด้านล่างของเตาหลอมเป็นสายการผลิตกับอิฐคาร์บอนที่ไม่มีการหล่อเย็นด้านข้างของแบบ การทำงานของเตาหลอมขณะทำการผลิต ประจุของชั้นข้างเคียงจะกระทบกันทำให้เกิดความร้อนสูงจนสามารถหลอมละลาย ออกไซด์ ถ่านหิน และเหล็กได้ ดังภาพประกอบ 3 เตาหลอมที่ดีจะต้องมีการป้องกันความร้อนจากประกายไฟฟ้าที่รุนแรงได้



ภาพประกอบ 3 แร่บ็อกไซต์, ถ่านโค้ก, และเศษเหล็ก ที่ใช้ในการหลอมอะลูมิเนียมออกไซด์

ที่มา: (S.F. Krar, 1994)

เมื่อเติมส่วนผสมลงในเตาหลอมจนมีปริมาตรครึ่งของเตา ทำการย้ายขั้วไฟฟ้าลดลงมาให้สัมผัสบริเวณด้านบนของส่วนผสม ใช้พลังงานประจุที่มีปริมาณสูงเริ่มที่บริเวณถ่านหิน ถ่านหินจะถูกทำให้เกิดความร้อนจะลุกโชติอย่างรวดเร็วและเริ่มทำการหลอมละลาย บ็อกไซด์ที่ถูกความร้อนที่รุนแรงจากกระแสไฟฟ้า (ประมาณ $2,037.78^{\circ}\text{C}$) จะถูกหลอมละลายและทำให้บริสุทธิ์ ส่วนความไม่บริสุทธิ์จะถูกรวมกันกับการหลอมเหล็กและถูกกำจัดโดยการแยกออกไปทางด้านล่างของเตาหลอม

การเพิ่มส่วนผสมจะทำการเพิ่มทางด้านบนของเตาหลอมจนกระทั่งเต็มชั้นระยะห่างระหว่างชั้นบ็อกไซด์ประมาณ 16 ถึง 36 ซม. กระแสไฟฟ้าจะถูกเพิ่มและลดโดยอัตโนมัติ และรักษากำลังไฟฟ้าให้คงที่ จนกระทั่งกระบวนการหลอมละลายเสร็จสมบูรณ์ เตาหลอมจะถูกทำให้เย็นตัวลง จากนั้นทำการแกะก้อนโลหะของอะลูมิเนียมออกไซด์ออกจากแบบ และปล่อยให้เย็นลงในอากาศทำการลอกผิวโลหะด้านนอกและทำให้แตกเป็นก้อนเล็กนำไปใส่เครื่องบดและทำการบดโลหะนั้น จากนั้น ทำการล้างและคัดแยกขนาดของโลหะ ภาพประกอบ 4



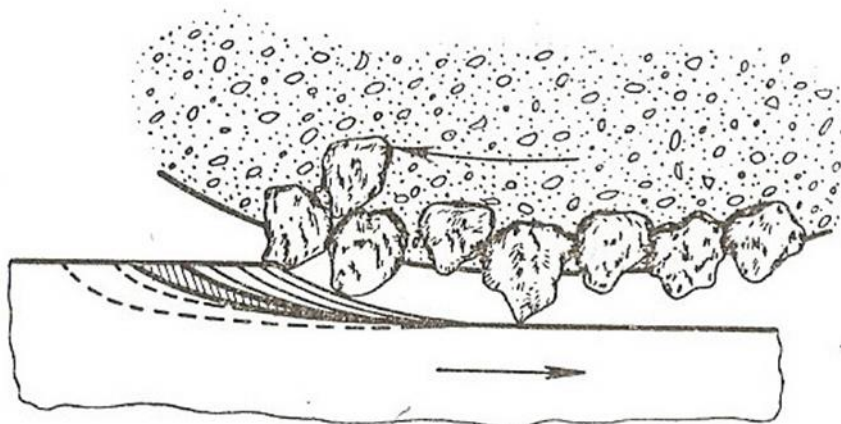
ภาพประกอบ 4 ภาพอะลูมิเนียมออกไซด์ถูกหลอมก่อนทำการบดและร่อน

ที่มา: (S.F. Krar, 1994)

ในกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมออกไซด์ต้องกระทำอย่างต่อเนื่อง และใช้ประกายไฟจากกระแสไฟฟ้าเตาหลอมจะต้องเอียงทุกๆ สามถึงสี่ชั่วโมง อะลูมิเนียมที่ถูกหลอมละลายแล้วจะถูกใส่ลงในแม่พิมพ์ที่มีความแข็งแรงมาก ซึ่งการปล่อยให้มันเย็นตัวลงอย่างช้าๆ จะทำให้ได้ผลึกที่มีขนาดใหญ่ แต่ถ้าทำให้มันเย็นตัวลงในอ่างน้ำเย็นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดโครงสร้างผลึกที่ดี

การเจียรไน

กระบวนการเจียรไนและการกัดคือการตัดเฉือนโดยการเอาวัสดุของพื้นผิวของชิ้นส่วนหรือชิ้นงานไปยังชิป (Ribeiro, 2017; Tebassi, 2017) กระบวนการเจียรไนมีความสัมพันธ์กับขนาดของกริดของสารขัดถู (อนุภาคที่มีความแข็งและมีขอบที่คม) ผสมลงในล้อเจียรไนที่หมุนด้วยความเร็วสูงและมีขนาดของเกรนที่แตกต่างกัน เพราะฉะนั้น เกรนที่มีขนาดใหญ่จะกระแทกกับผิวของชิ้นงานที่ตำแหน่งศูนย์ หรือในทำนองเดียวกันกับการเอียงมุมของล้อขัดงาน ความสำคัญของการบวนการนี้จะมีความสัมพันธ์กับความลึกในการเจียรไน การเจียรไนสามารถเปลี่ยนแปลงทรงเรขาคณิตได้เหมือนกระบวนการทางกลอื่นๆ เช่น การเจียรไนผิวบางร่วมกับเพลาหมุนแนวอน การเจียรไนผิวกับเพลาหมุนแนวตั้ง การเจียรไนทรงกลม การเจียรไนภายใน และการเจียรไนวงกลมเล็ก เป็นต้น ดังภาพประกอบ 5



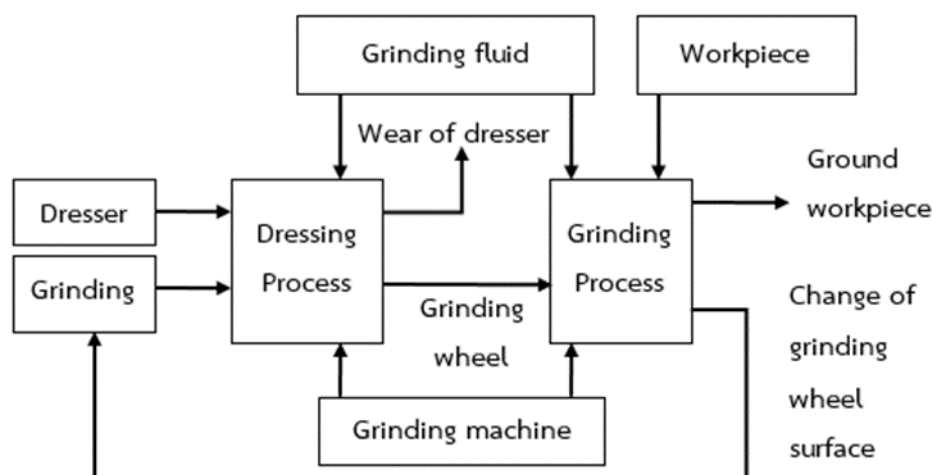
ภาพประกอบ 5 การเจียระไนกับเกรนของสารขัดถู

ที่มา: (S.F. Krar, 1994)

พื้นฐานของการเจียระไน

วิธีการนำเศษวัสดุออกจากล้อเจียระไน

การเจียระไนคือกระบวนการขัดถูซึ่งล้อเจียระไนทำมาจากสารขัดถูกับตัวประสานวัสดุ ล้อเจียระไนจะมีเงื่อนไขในการใช้งาน เช่น การปรับแต่ง (Truing) และการลับล้อเจียระไน (Dressing) ก่อนที่จะทำการเจียระไนซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของกระบวนการเจียระไน เงื่อนไขของกระบวนการนี้มีอิทธิพลต่อความสามารถในกระบวนการเจียระไน (Barrau, 2004; Bissey, 2005; Poulachon, 2004; G. Poulachon, Bandyopadhyay, B.P., Jawahir, I.S., Pheulpin, S., & Seguin, E., 2003) วิธีการนำเศษวัสดุออกจากผิวของขอบตัดของล้อจะเหมือนกันกับการใช้พื้นฐานการตัดด้วยเครื่องมือตัดในเครื่องตัดโลหะต่างๆ ตัวอย่างเช่น เศษวัสดุจะถูกนำออกจากล้อเจียระไนโดยกระบวนการเฉือน อย่างไรก็ตาม การเตรียมวิธีการตัดและการเตรียมกรรมวิธีที่ดีจะทำให้ได้ผิวมีขนาดเล็ก ความหนาเศษในการเจียระไนเล็กกว่า 0.1 mm ประสิทธิภาพของการเจียระไนสามารถพิจารณาจากคุณภาพของความขรุขระของพื้นผิว (Abou-El-Hossein, 2017; Kiprawi, 2019; Rogov, 2013; Santosh, 2019) นอกเหนือจากความหยาบที่ได้รับตามต้องการแล้วจะต้องลดต้นทุนการผลิตด้วยเช่นกัน ซึ่งจำเป็นกับอุตสาหกรรมการผลิต (Kiprawi, 2019; Kumar, 2013; Narasimha, 2013; Rogov, 2013; Santosh, 2019) ดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเจียระไน

ที่มา: (Marinescu, 1998)

การออกแบบล้อเจียระไน

ในการออกแบบล้อเจียระไนจะต้องมีความเข้าใจถึงวัตถุประสงค์ของการเจียระไนและความหนาผิวที่ต้องการ สารขัดถูเป็นวัสดุหลักในการนำเอาวัสดุออกจากผิวดังนั้นชนิดของสารขัดถูจึงมีส่วนสำคัญในการกำหนดวัสดุรวมถึงสัดส่วนของสารขัดถูจะเป็นตัวช่วยในการขัดถูอีกด้วย

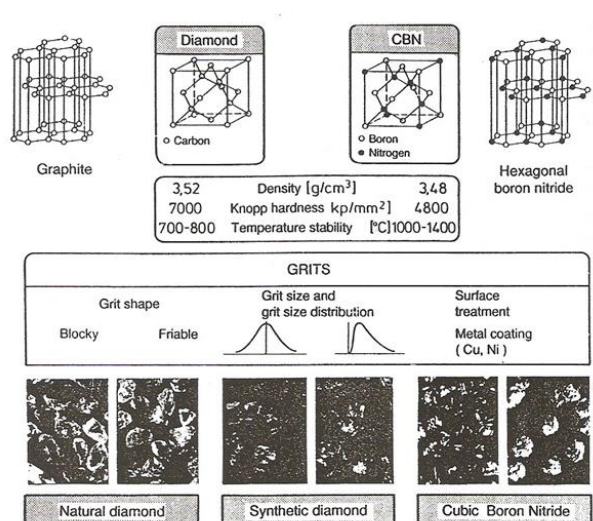
วัสดุสารขัดถู

เกณฑ์ที่สำคัญสำหรับสารขัดถูคือความแข็งของวัสดุชิ้นงาน เมื่อทำการเปรียบเทียบความแข็งระหว่างเซรามิกกับวัสดุเมทาลิคพบว่า อนุภาคของเพชรจะมีความแข็งที่เหมาะสมกับเซรามิกจึงจะใช้ผงเพชรสังเคราะห์เป็นหลัก ซึ่งจะผลิตโดยการเปลี่ยนแปลงตาข่ายจากโครงสร้างชั้นแลตติค 6 เหลี่ยม ของกราฟไฟต์ การเพิ่มความหนาแน่นเป็นการเพิ่มความแข็งที่ต้องใช้ประกอบการพิจารณาด้วย เทคโนโลยีการเจียระไนได้ถูกค้นพบและความหนาผิวที่ได้นั้นมีคุณภาพดีด้วยการใช้ล้อเจียเม็ดเพชรที่มีความละเอียดสูงและมีความแม่นยำสูง (Mokbel, 2000)

จากรูปร่างภายนอกของเพชรที่มีแตกต่างกันนี้ โดยพื้นฐานแล้วผลึกผงเพชรเป็น การทำขึ้นมาจากรูปลูกบาศก์และรูปแปดเหลี่ยมรวมกัน ซึ่งรูปร่างพื้นฐานนี้อาจจะมีอิทธิพลต่อตัวแปรสังเคราะห์ กระบวนการสังเคราะห์จะเป็นการควบคุมขนาดรูปร่างของผงเพชร การเกิดกริทที่มีรูปร่างแบบกล่องจะมีความแข็งแรงต่อการกระแทกสูงมากหรือกริทที่เปราะจะมีความแข็งแรงต่อการกระแทกต่ำ ผงเพชรถูกแบ่งตามขนาดของกริทและการจำแนกตามขนาดของกริท อนุภาคอาจจะถูก

กำหนดด้วยการจำแนกขนาดกริท เช่น ลำดับชั้นขนาดถูกกำหนดขอบเขตโดยตรง ดังภาพประกอบ

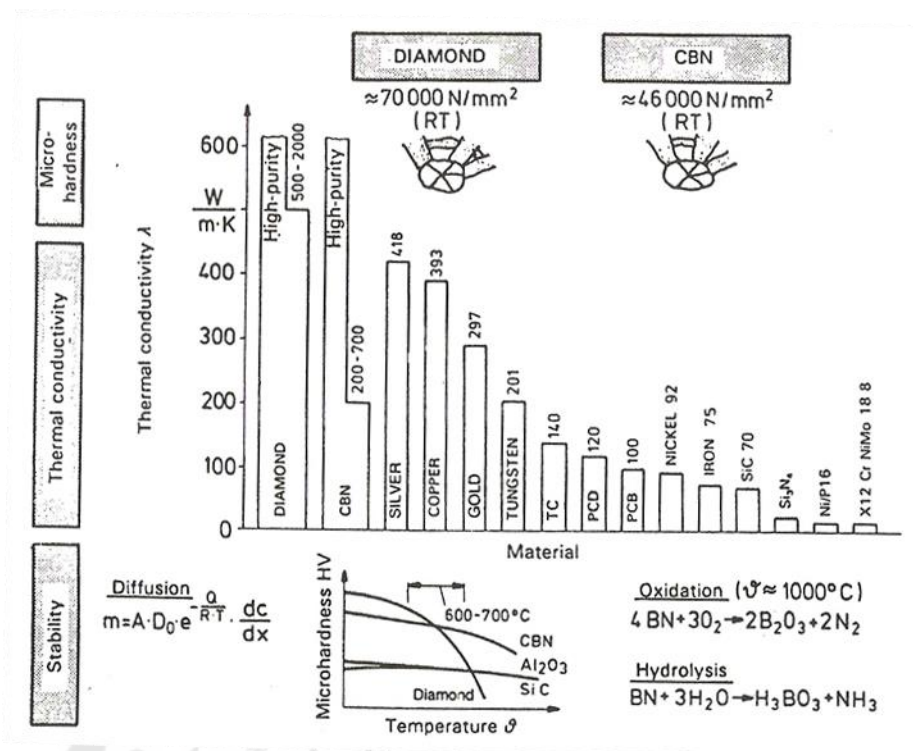
7



ภาพประกอบ 7 ความหนาแน่น และความแข็ง ของเพชรธรรมชาติเพชรสังเคราะห์ และ คิวบิกโบรอนไนไตรด์

ที่มา: (Marinescu, 1998)

พฤติกรรมการส่งผ่านความร้อนระหว่างเพชร, พันธนาการ, และชนิดตัวประสานในพันธนาการอาจจะเป็นตัวสำคัญในการเคลือบเพชร ซึ่งโดยทั่วไปทองแดงผสมหรือนิเกิลผสมฟอสฟอรัส มีสมบัติการนำความร้อนคือเป็นสมบัติทางกายภาพที่สำคัญซึ่งขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของผงเพชร ดังภาพประกอบ 8 ดังนั้น ตัวนำความร้อนของผงเพชรบริสุทธิ์จะสูงประมาณ 2000 W/mK ซึ่งมีสมบัติการนำความร้อนสูงกว่าวัสดุอื่น ๆ มากและผงเพชรสังเคราะห์ที่ใช้ในการเจียระไนต้องมีการนำความร้อนสูงกว่าเงินและทองแดง



ภาพประกอบ 8 สมบัติการนำความร้อนของเพชรและ CBN

ที่มา: (Marinescu, 1998)

พื้นฐานในการเคลือบผิวโลหะ

การเคลือบผิวโลหะที่สมบูรณ์แบบมี 2 วิธี คือ วิธีแรก โครงสร้างภายนอกที่มีความแตกต่างกัน ความเหนียว, ความหยาบหรือโครงสร้างผิวแหลมคมที่สม่ำเสมอ หลักการทำเชิงกลของกริทใช้พันธนาการแบบเรซิน วิธีที่สอง ชั้นฟอสฟอรัสไนเกิลที่มีสมบัติการนำความร้อนค่อนข้างต่ำกว่าเพชร ดังนั้นประสิทธิภาพการนำความร้อนที่แตกต่างของระบบแสดงว่า กริทสามารถควบคุมผลการทำงานในระยะกว้างได้

เพชรเป็นวัสดุที่แข็ง โดยความแข็งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่อุณหภูมิสูงตาข่ายเพชรถูกเปลี่ยนแปลงให้เป็นชั้นตาข่าย 6 มุม ปัจจุบันมีความสำคัญลำดับต้นๆต่ออุณหภูมิที่สูงเกินของเพชร จึงต้องมีการเตรียมน้ำหล่อเย็น/น้ำมันหล่อลื่นที่เหมาะสม รวมถึงรายละเอียดของตัวแปรในกระบวนการผลิตตัวอื่นด้วย อะตอมของคาร์บอนจากกราไฟต์บางส่วนอาจจะแพร่กระจายลงไปในงานและเป็นสาเหตุจากการสึกหรอทางเคมี นี่คือการสัมพันธ์ทางเคมีกับชิ้นงานมากกว่าปฏิกิริยาทางพลังงาน

การเจียรไนหยาบ

เกณฑ์ที่สำคัญคือ ความแตกต่างของการเจียรไนหยาบในกรณีที่มีการทำงาน ภายหลังจากการนำผิวของชิ้นงานเปิดออกแล้ว ผิวของชิ้นงานในกระบวนการตัดปาดครั้งสุดท้าย จะต้องดีกว่าค่าความหยาบผิวของการตัดปาดก่อน

การออกแบบล้อเจียรไนที่ดีจะต้องมีสมบัติดังนี้

ต้องใช้พลังงานต่ำเมื่อนำวัสดุออกต่อปริมาตรหนึ่ง ซึ่งจะเป็นการลดต้นทุนและลด ระยะเวลาการทำงานในกระบวนการและสอดคล้องกับการปรับปรุงผิวที่เหมาะสม (Samir, 2011)

ใช้แรงน้อยต่อจำนวนหนึ่งปริมาตรวัสดุที่นำออก เพื่อควบคุมกำลังของการเจียร ทั่วไปเช่นการลดและควบคุมแรงเจียรที่จุดเริ่มต้นของกระบวนการเจียร (Malkin, 2008)

การสึกหรอล้อเจียรไนต่ำเป็นพิเศษ

ล้อเจียรไนพิเศษ

ในการรักษาคุณภาพการเจียรไน ล้อเพชรสำหรับการเจียรไนของวัสดุเซรามิค ที่มีความเปราะ จะต้องเป็นชนิดพิเศษ 2 ชนิด

การออกแบบล้อแบบหยาบ จะออกแบบตามวัสดุ มีความสำคัญดังต่อไปนี้

รูปทรงเรขาคณิต

ขนาดที่ต้องการ, ความคมและความถูกต้องของตำแหน่งที่ต้องการ

คุณภาพผิว

ตัวแปรต่างๆที่ส่งผลเช่น กระบวนการลับและกระบวนการปรับแต่ง เป็นสิ่งที่ต้อง นำมาพิจารณาถึง ดังรายละเอียดต่อไปนี้ ขนาดล้อ, การพันหนาการล้อเพชร

การออกแบบล้อละเอียด

การปรับล้อละเอียดจะให้ผลลัพธ์ที่ดีต่อกระบวนการเจียรไน ตามสมบัติเชิงกล ทางด้านความร้อนของวัสดุเป็นพื้นฐาน เป้าหมายต่อไปนี้

การเจียรไนครั้งสุดท้ายจะมีอิทธิพลต่อบริเวณผิวน้อยที่สุดจากกระบวนการ เจียรไน การเจียรไนหยาบได้จากความสามารถพลังงานของกระบวนการแตกหัก ตัวแปรหลักนี้ เป็นกระบวนการทางเทคโนโลยีการผลิต (เช่น การเจียรไนป้อนเลื่อย, การเจียรไนไปมา, การ เจียรไนขึ้น/ลง, การเจียรไนที่ความเร็วสูง) และตัวแปรน้ำหล่อเย็น/น้ำมันหล่อลื่นที่เหมาะสม ดังต่อไปนี้ ชนิดผงเพชร, ขนาดผงเพชร, ความเข้มข้นผงเพชร

ขนาดผงเพชร

ขนาดผงเพชรมีอิทธิพลต่อคุณภาพผิว การสึกหรอ และการเกิดแรงภายใน กระบวนการเจียรระไนและกระบวนการตัด ถ้าพบว่าในการเจียรระไนผิวมีอัตราป้อนสูงขนาดของผงเพชรที่ดีจะทำให้เกิดคุณภาพผิวที่ดีแต่แรงจะสูงกว่าปกติ จากเงื่อนไขนี้จะทำการเจียรระไนป้อนกลับของ HPSN กับล้อเจียรระไนพันธนาการเฟโนลิก ขนาดผงเพชรที่ใหญ่จะใช้แรงในการเจียรระไนที่สูงกว่า นี่เป็นเพราะผงเพชรที่มีใหญ่จะรักษาความแข็งแรงของพันธนาการและจากการสึกหรอที่แนวราบได้มากกว่า อิทธิพลต่อการสึกหรอจากแรงเจียรระไนจะเกิดขึ้นในกระบวนการตัด ดังนั้นความแข็งที่ค่อนข้างสูงนี้สามารถลดขนาดความลึกในการตัดหรือการเพิ่มขนาดของผงเพชร แต่ลักษณะของล้อเจียรระไนและการทำการเจียรระไนขึ้นอยู่กับขอบตัดที่ยื่นมากกว่าพันธนาการ ความคมและผงเพชรที่ยื่นทั้งคู่เป็นตัวชี้ถึงการสึกหรอและแรงในการเจียรระไนที่เกิดขึ้น ถ้าการเตรียมช่องว่างของเศษวัสดุด้วยกระบวนการที่แหลมคม หรือกระบวนการที่เหมาะสมอื่นจะไม่ส่งผลต่อการกระทำกับวัสดุและตัวแปรเชิงกล เป็นผลการทำงานที่น่าพอใจด้วยส่วนประกอบของล้อเจียรระไนที่เหมาะสม

การเลือกขนาดผงเพชรที่เหมาะสมจะส่งผลต่อวัสดุด้วย ความแข็งแรงที่ต่ำกว่าของวัสดุเซรามิกกับเครื่องจักรและกระบวนการทำที่มากมาย จะทำให้มีการสึกหรอที่รวดเร็วขณะทำการตัด หมายความว่าแรงในการเจียรระไนรวมที่น้อยกว่าจะเกิดในกรณีที่มีขนาดผงมีขนาดใหญ่กว่า นี่แสดงการเจียรระไนเซอร์คอนออกไซด์เปรียบเทียบกับ HPSN และ SiC

ความเข้มข้นของผงเพชร

ในการเพิ่มปริมาณของผงเพชรเป็นการเพิ่มแรงที่จุดตัด การลดระยะทางเฉลี่ยจากขอบตัดหนึ่งไปอีกขอบตัดหนึ่งและการลดขนาดของเศษวัสดุ ภายใต้เงื่อนไขกลศาสตร์เชิงกลอีกอย่างหนึ่ง ผลลัพธ์คือการลดแรงต่อผงเพชรเดียวอย่างไรก็ตาม ไม่ได้หมายถึงความเข้มข้นของผงเพชรที่มีขนาดใหญ่กว่าจะให้ผลงานที่ดีกว่าเสมอ ปริมาตรความเข้มข้นของผงเพชรจะถูกปรับให้เหมาะสมกับการใช้งานของเครื่องจักรนั้นๆ

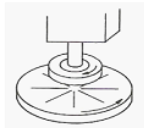
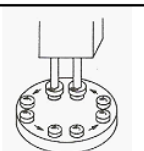
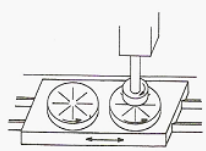
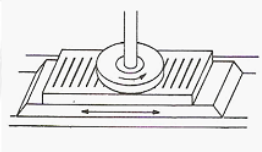
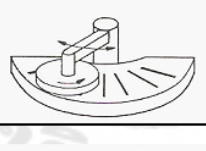
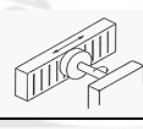
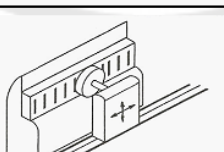
การป้อนในการเจียรระไน ความเข้มข้นผงเพชรมีผลกระทบน้อยกว่าในเรื่องการชนของแรง และคุณภาพผิวจะสัมพันธ์กับความกว้างของผิวหน้าของพื้นที่สัมผัสของล้อเจียรระไนกับผิวเจียรระไน สำหรับการเจียรระไนผิวเซรามิกทั้งหลายโดยพบว่าปริมาณความเข้มข้นของผงเพชรจะมีการปรับตามวัสดุของชิ้นงานด้วย ในการเจียรระไน HPSN มีการพิจารณาการเพิ่มแรงกับการเพิ่มความเข้มข้นของผงเพชรจาก C50 ถึง C100 อย่างไรก็ดี เป็นวิธีการที่ไม่ถูกต้องเสมือนกับเป็นการยัดยัด คำแนะนำนี้กล่าวถึงจุดตัดเป็นจุดหลักในการเพิ่มแรง ล้อที่มีความเข้มข้นสูงนั้นไม่เหมาะกับกระบวนการเจียรระไน HPSN กับ Si-SiC ซึ่งมีแนวโน้มการแตกหักที่ใกล้เคียงกันมาก ภาวะ

ทางความร้อนบนส่วนประกอบการเจียระไนที่ต่ำกว่ามีการสึกหรอในแนวราบที่น้อย การเพิ่มแรงรวมของการเจียระไนเล็กน้อยจะเหมือนกับเพิ่มความเข้มข้นขึ้น ในตัวอย่างนี้หมายความว่า ความเข้มข้นผงที่สูงกว่านั้นเป็นเหตุให้แรงต้านผงเดียวต่ำด้วย ดังนั้นให้ทำการพิจารณาจากการสึกหรอที่ต่ำด้วย

ระบบของเครื่องเจียระไนผิว

ระบบของเครื่องเจียระไนผิวจะแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบการเจียระไนแนวตั้ง และระบบการเจียระไนแบบแนวนอน ขึ้นอยู่กับการออกแบบและการต้องการในการใช้งาน ระบบเจียระไนแบบแนวตั้งสามารถแบ่งออกเป็น แบบการหมุน แบบเส้นแนวขวางทั้งสองทิศทาง และแบบพิเศษใต้คกงที่และหัวล้อแกว่ง ส่วนระบบการเจียระไนแบบแนวนอนจะแบ่งออกเป็น การเจียระไนแบบเส้นแนวขวางทั้งสองทิศทาง และแบบคกงที่-ใต้คกงที่และหัวล้อแกว่ง ดังภาพประกอบ 9



ตำแหน่ง มอเตอร์หมุน	ตารางการ เคลื่อนไหว			แผนภาพ	การพิจารณาลักษณะและการใช้งาน
ทิศทางแนวตั้ง	การหมุน	ตาราง ตำแหน่ง	คงที่		การใช้หัวหน้าเจียรระโน่มากที่สุดกับช่วงความกว้างของการใช้ที่มีความแตกต่างกันและสามารถดัดแปลงการใช้งานที่หลากหลาย การทำงานด้วยการจับยึดด้วยแม่เหล็กทั่วไป แม้กระทั่งการใช้กับโต๊ะเครื่องจักรและกลไกการจับยึดงาน
			เคลื่อนที่		การพัฒนาแบบพิเศษสำหรับชิ้นงานเล็กๆ เพื่อการเจียรระโน่ผิวชนิดโต๊ะหมุนเป็นวิธีการที่เหมาะสมมาก อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนต่อไปคือต้องการกระบวนการผลิตที่สมบูรณ์
			อื่นๆ		ออกแบบสำหรับงานที่ต้องการการเจียรระโน่ผิวในผิวหมุน แต่ใช้เวลาในการทำงานด้วยใน fixture พิเศษ โดยเลือกโต๊ะหมุนสองทางในบริเวณติดตั้งและตำแหน่งการเจียรระโน่ของกระบวนการเจียรระโน่ที่แท้จริงสามารถที่เจียรได้อย่างต่อเนื่อง
	เส้นขวางทั้งสอง ทิศทาง			ชิ้นงานกับผลลัพธ์รูปร่างทั่วไปทำให้เส้นตามแนวยาวเป็นกระบวนการที่มีผลในทิศทางการเคลื่อนที่ เช่น ชิ้นส่วนที่ต้องการเปลี่ยนแปลงโต๊ะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่า ซึ่งใช้งานได้ดีของผิวโต๊ะที่ผ่านบริเวณเจียรระโน่	
	ระบบพิเศษ - โต๊ะคงที่และหัว ล้อแกว่ง			แทนการแปลงบางส่วนของระบบการเจียรระโน่ผิวทั้งสองส่วน การใช้งานเหมือนกัน แต่ได้รับผลด้วยทิศทางตรงกันข้ามของวิธีเส้นขวางทั้งสองทิศทาง	
ทิศทางแนวนอน	เส้นขวางทั้งสอง ทิศทาง			สำหรับระยะที่ยาวกว่ายังถึงชิ้นงานที่มีความบาง เช่น เครื่องผ่า ซึ่งง่ายต่อการจับยึดและมีความลาดชันน้อยเมื่อยึดติดในแนวตั้งกับผิวโต๊ะงาน	
	คงที่ - โต๊ะคงที่ และหัวล้อแกว่ง			การใช้งานเหมือนกับชนิดก่อน ระบบไม่ถูกใช้บ่อยนัก ซึ่งประโยชน์สำหรับชิ้นงานที่มีความใหญ่มากๆ ทั้งสองตำแหน่งแนวโต๊ะงานที่นำจะต้องความกว้างของพื้นที่ที่ยึดออกไป	

ภาพประกอบ 9 ระบบของเครื่องการเจียรระโน่ผิว

ที่มา: (Ghenis, 1960)

สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

ในการศึกษาสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เวสเทิร์นดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำแผ่นเวเฟอร์นี้เป็นวัสดุผสมชนิดพิเศษเฉพาะเท่านั้น ดังแสดงในตาราง 1 แสดงสมบัติทางกลของวัสดุของอะลูมิเนียมออกไซด์และไททาเนียมคาร์ไบด์

ตาราง 1 สมบัติทางกลของวัสดุของอะลูมิเนียมออกไซด์และไททาเนียมคาร์ไบด์

Properties of material	หน่วย	Al ₂ O ₃ -TiC
Density	kg/m ³	4,300
Poisson's Ratio		0.22
Hardness	Pa	20.7x10 ⁹
Young's Modulus	Pa	3.9x10 ¹¹
Thermal Expansion	1/ °C	8.2x10 ⁻⁶
Specific Heat	J/ kg· °C	880
Thermal Conductivity	W/ m· °C	6,302
Resistivity	Ohm· m	20,000

เครื่องจักรในกระบวนการตัดสไลเดอร์

ในการตัดสไลเดอร์ในกระบวนการผลิตต้องมีการควบคุม ขนาดความกว้างของสไลเดอร์ และขนาดของรอยแตกและรอยร้าวของสไลเดอร์ ประสิทธิภาพของกระบวนการตัดนี้มีองค์ประกอบหลายประการเช่น คุณภาพของเครื่องจักร, คุณภาพของน้ำหล่อเย็น, และคุณภาพของใบตัดเพชร เครื่องที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์นี้มีความเสถียรค่อนข้างสูง

เครื่องจักรแบบดั้งเดิมที่มีใช้กับการขัดถูเชิงกลของกระบวนการเจียระไนเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งของการออกแบบทางกลคือ ความขรุขระของพื้นผิวซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบเจียระไนเช่น การสร้างเครื่องมือประเภทเครื่องมือตัด วัสดุของชิ้นงาน การป้อนชิ้นงานของโต๊ะ ความเร็วของแกนหมุน การหล่อลื่น, การสั่นสะเทือน, ผิวสำเร็จ, อัตราการเกิดความร้อน, การสึกหรอ, อายุการใช้งานของการคืบและความล้า เป็นต้น (Bin, 2008; Dogra, 2011; Kumar, 2013; Osman, 2016; Reith, 2012)

กำลังมอเตอร์

กำลังมอเตอร์ที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีหรือการตัดสไลเดอร์บาร์ สามารถหาพลังงานที่เกิดขึ้นได้

การคำนวณหากำลังของมอเตอร์ (Power; kW) จากกระแสไฟฟ้า (Current; Amp) และแรงดันไฟฟ้า (Pressure; Volt)

$$\text{Power (kW)} = E \times I \times \eta \quad (1)$$

เมื่อ Power = กำลังของมอเตอร์ หน่วยเป็นกิโลวัตต์ (kW)
 I = กระแสไฟฟ้า หน่วยเป็นแอมแปร์ (Amp)
 E = แรงดันไฟฟ้า หน่วยเป็นโวลต์ (Volt)
 η = ประสิทธิภาพของมอเตอร์

การคำนวณหาแรงบิด (Torque) จากมอเตอร์ (Motor)

$$T = \frac{\text{Power}}{(2\pi n)} \quad (2)$$

โดย T = แรงบิด (Torque) หน่วยเป็นนิวตันเมตร (N-m)
 Power = กำลังของมอเตอร์ (Power motor) หน่วยเป็นกิโลวัตต์ (kW)
 n = ความเร็วมอเตอร์ หน่วยเป็น รอบต่อวินาที (rps)

การคำนวณหาแรงที่กระทำกับชิ้นงาน

$$T = Fls \quad (3)$$

เมื่อ F = แรง หน่วยเป็นนิวตัน (N)
 l = ระยะรัศมีของล้อ หน่วยเป็นเมตร (m)
 s = อัตราป้อน หน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/min)

ใบตัดเพชร (Diamond blade) มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำไปทำการตัดและความต้องการทางด้านคุณภาพในการตัด ซึ่งวิธีการทำใบตัดเพชรจะนำวัสดุประสานหลักของใบตัดเพชรมาผสมกับผงเพชรที่มีขนาดที่ต้องการและนำไปใส่แบบพิมพ์ที่เตรียมไว้ จากนั้นก็นำแบบแม่พิมพ์ไปให้ความร้อนที่มีอุณหภูมิที่สูงตามเวลาที่กำหนด ปล่อยให้แม่พิมพ์เย็นตัวลงและทำการแกะใบตัดเพชรออกจากแม่พิมพ์ ทำการเจียรในใบตัดเพชรทั้งสองข้างเพื่อให้ได้ขนาดความหนาของใบตัดเพชรตามต้องการ จากนั้นทำการปรับแต่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในและเส้นผ่านศูนย์กลางนอก ให้มีขนาดตามต้องการ

น้ำหล่อเย็น (Coolant) การผสมของน้ำหล่อเย็นที่มีส่วนผสมที่ไม่เท่ากัน จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพในการตัดที่แตกต่างกันด้วย รวมถึงอัตราการจ่ายขณะทำการตัดและทำการเจียรใน

หินลับใบตัดเพชร (Dresser) ชนิดของหินลับใบตัดเพชรและวิธีการลับใบตัดเพชรก็ส่งผลทางด้านความตรงและการเกิดรอยแตกร้าวในการตัดสไลเดอร์ด้วย

เครื่องตัดที่มีคุณภาพสูงและมีราคาแพงมาก หลังจากที่ได้รับสไลเดอร์บาร์ที่ถูกยึดติดกับถาดสำหรับตัดงานเรียบร้อยแล้ว ทำการใส่ถาดสำหรับตัดงานลงไปในเครื่อง จากนั้นทำการปรับศูนย์กลางของตัวสไลเดอร์ให้ตรงกับศูนย์กลางของเครื่องตัด เครื่องตัดจะทำการวัดโดยอัตโนมัติและเลื่อนตัดสไลเดอร์โดยอัตโนมัติ

เครื่องมือวัดความหยาบผิว

กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope: AFM) เป็นเครื่องมือระดับนาโนสำหรับการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง ซึ่งใช้หลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอม (Atomic force) ของหัวเข็มวัดที่ระดับนาโนกับพื้นผิวของสาร และทำการประมวลผลในลักษณะของภาพพื้นผิว ข้อมูลจะรายงานค่าความหยาบผิวด้านพารามิเตอร์ทางสถิติ โดยค่าที่นิยมรายงานผล ได้แก่ ค่าเฉลี่ยของความหยาบผิว (Roughness average, Ra) ค่าเฉลี่ยของรากที่สองของความหยาบผิว (Root mean square, RMS or Rq) ค่าเฉลี่ยของความหยาบผิว (Roughness points mean, Rz) และค่าความลึกสูงสุดของร่องความหยาบของความหยาบผิว (Maximum roughness, Rmax)

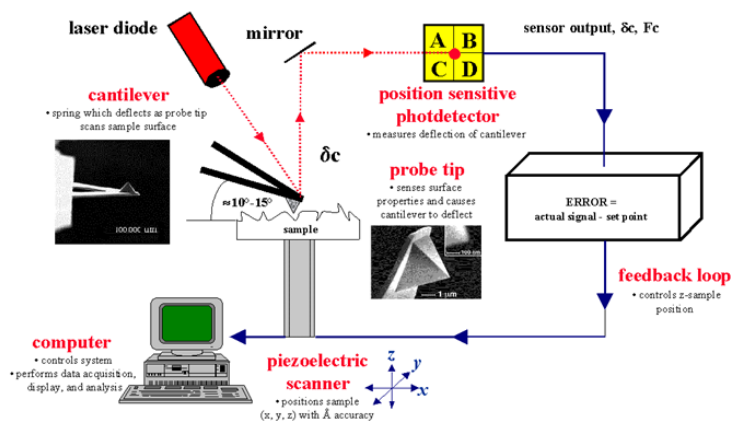


ภาพประกอบ 10 ภาพเครื่อง Atomic force microscope : AFM

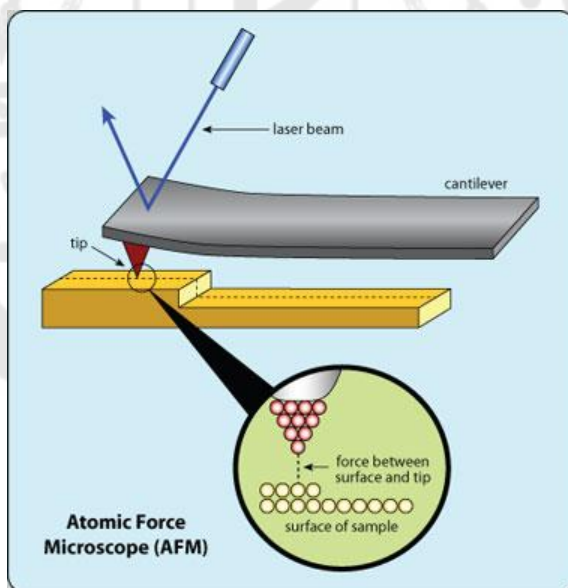
Atomic force microscope (AFM) เป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่ระดับนาโนเมตร โดยเฉพาะ และเป็นชนิดเดียวกับ STM แต่เครื่อง AFM ถูกพัฒนาหลังจากเครื่อง STM และใช้หลักการพื้นฐานเดียวกันกับเครื่อง STM โดยที่เครื่อง AFM จะทำงานโดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับหรือโพรบ (Probe) ที่มีปลายแหลมและเล็ก (เหมือนกันกับเครื่อง STM) ที่ติดอยู่บนคานยื่น (Cantilever) ที่มีการโก่งงอตัวได้และเคลื่อนที่สัมผัสไปบนพื้นผิวของวัตถุ (ซึ่งวัตถุกระทำที่บริเวณปลายแหลมของโพรบได้ ถึงแม้ว่าจะมีขนาดในระดับนาโนก็ตาม) และความสามารถที่มีมากกว่าเครื่อง STM คือ เครื่อง AFM นี้จะสามารถตรวจวัดพื้นผิวที่เป็นฉนวนไฟฟ้า เช่น ผิวของคอมโพสิต พื้นผิวเซรามิก พื้นผิวกระจกหรือแก้ว โพลีเมอร์ หรือโมเลกุลทางชีวภาพต่างๆก็สามารถวัดได้ ดังภาพประกอบ 10

หลักการทำงานของเครื่อง AFM คือแสงเลเซอร์จะผ่านที่ปลายแหลม (tipper) ระยะใกล้ๆ ของคานยื่นที่มีขนาดระดับอะตอม ซึ่งส่วนปลายของคานนั้นสัมผัสแบบกระดกในทิศทางขึ้นลงตามพื้นผิวของวัตถุ เมื่อส่วนปลายแหลมของเครื่อง AFM ลากผ่านโครงสร้างในระดับนาโน แรงปฏิกิริยาที่กระทำในแนวตั้งฉากระหว่างพื้นผิวระดับอะตอมกับปลายแหลมของโพรบก็จะดึงคาน ทำให้เกิดการโก่งงอตัวของคาน และทำการตรวจวัดระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายแหลมและผิวของวัตถุ ด้วยขนาดของแรงเชิงปฏิกิริยาสัมผัส (ทำให้ทราบถึงระดับพลังงานที่เกิดขึ้น) ซึ่งจะนำสัญญาณนี้มาแปรเพื่อทำการสร้างเป็นภาพพื้นผิวที่มีลักษณะเชิงโครงสร้างในระดับอะตอมที่มีกำลังขยายที่สูงไปแสดงบนจอภาพมอนิเตอร์ เหมือนกับเครื่อง STM ด้วยหลักการเดียวกันนี้สามารถใช้ปลายแหลมของคานนี้ในการสร้างแรงผลักเพื่อเคลื่อนย้ายอะตอมแต่ละตัวของโครงสร้างวัตถุได้ ดังภาพประกอบ 11 และ 12

Atomic Force Microscopy (AFM) : General Components and Their Functions



ภาพประกอบ 11 หลักการทำงานของเครื่อง AFM



ภาพประกอบ 12 การทำงานของ Probe ของเครื่อง AFM

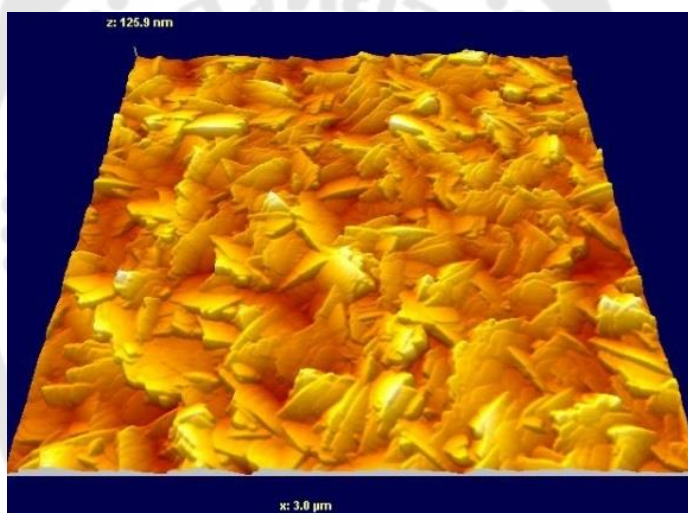
วิธีการทำงานของเครื่อง AFM ในงานทางด้านวิทยาศาสตร์ในระดับนาโน ซึ่งแบ่งได้เป็น

2 วิธี คือ

1. วิธีสัมผัสกับพื้นผิวตลอดเวลาพร้อมกับการลากปลายแหลมไปบนพื้นผิวนั้น วิธีนี้มีข้อเสียคือ จะมีแรงต้านในแนวการเคลื่อนที่ที่ขนานกับพื้นผิวขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการโก่งงอหรือบิดเบี้ยวของคานาโพรบที่ใช้ในการวัดได้ โดยเกิดจากแรงดึงดูดที่ปลายเนื่องจากแรงในแนวตั้งฉากเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ข้อมูลการวัดผิดพลาดจากความสูงที่แท้จริงของพื้นผิวที่วัดได้นั้น

2. วิธีสัมผัสระยะเวลานั้นๆ ของพื้นผิวด้วยปลายแหลมสัมผัสในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว (มันคล้ายๆกับการใช้ปลายนิ้วเคาะโต๊ะเป็นจังหวะนั่นเอง) ในลักษณะของการสัมผัสแบบนี้จะไม่พบแรงต้านในแนวตั้งฉาก แต่เนื่องจากพื้นผิวของปลายแหลมสัมผัสเป็นระยะสั้นๆ ซึ่งทำให้คานาเกิดการสั่น ซึ่งจะส่งผลกับสัญญาณที่ตรวจวัดได้นั้นไม่คงที่หรือไม่มีความแม่นยำได้

ภาพประกอบ 13 แสดงพื้นผิวจากการวิเคราะห์ด้วย AFM



ภาพประกอบ 13 พื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AFM

ที่มา: วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถิติที่ใช้ในการวิจัย

เป็นกระบวนการในการตัดสินใจที่มีเหตุมีผลที่ดีอีกวิธีหนึ่งคือ ใช้การวิเคราะห์โดยการผ่านสถิติในการตัดสินใจต้องอาศัยความรู้และประสบการณ์ที่สะสมมาเป็นเวลานาน การเก็บข้อมูลที่ดีควรมีการสามารถครอบคลุมหรือสามารถแทนจำนวนประชากรที่ต้องการเก็บข้อมูล

สถิติ หมายถึง ตัวเลขที่รวบรวมขึ้น ซึ่งอาจจะได้มาจากการนับจำนวนเป็นตัวเลขของสมาชิกในกลุ่มที่แบ่งตามลักษณะต่างๆ หรือได้มาจากการคำนวณตัวเลขในรูปของสัดส่วนร้อยละ

การเปรียบเทียบหรือค่าเฉลี่ยหรือ การศึกษาขั้นตอนวิธีการปฏิบัติเพื่อนำไปสู่การตัดสินใจในสถานะที่ไม่แน่นอน อย่างมีเหตุผลมีวิธีการปฏิบัติทางสถิติ 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การเก็บข้อมูล (Collection of data) เป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เป็นตัวเลขหรือข้อความที่เป็นจริง วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลแบ่งตามแหล่งที่มาของข้อมูลได้ 2 ชนิด คือ ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary data) หมายถึงข้อมูลโดยตรงที่เก็บรวบรวมมาจากหน่วยงานที่ให้ข้อมูล ซึ่งยังไม่ผ่านขั้นตอนการวิเคราะห์ใดๆ และ ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary data) หมายถึงข้อมูลที่เก็บรวบรวมโดยการคัดลอกจากเอกสารหรือข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จะนำไปใช้ในขั้นตอนการทางสถิติขั้นต่อไป ข้อมูลแบ่งตามลักษณะได้ 2 ชนิด คือ

1. ข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative data) คือข้อมูลที่วัดออกมาเป็นค่าตัวเลข ซึ่งจะใช้แทนขนาดหรือปริมาณ แบ่งตามลักษณะของค่าได้ 2 ประเภท คือ ข้อมูลกั้นหรือข้อมูลไม่ต่อเนื่อง (Discrete data) เป็นข้อมูลที่แสดงค่าตัวเลขที่ไม่มีลักษณะเป็นช่วง มีค่าไม่ต่อเนื่องกัน ข้อมูลอีกประเภทหนึ่งคือ ข้อมูลต่อเนื่อง (Continuous data) เป็นการแสดงค่าของข้อมูลที่มีลักษณะเป็นช่วงๆที่มีความต่อเนื่องกัน

2. ข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative data) คือข้อมูลที่ไม่สามารถวัดเป็นตัวเลขได้ โดยตรงบอกคุณภาพหรือลักษณะได้ เช่น สีแดง สีขาว เพศชาย หญิง เห็นด้วย ไม่เห็นด้วย เป็นต้น

2. การจัดระบบข้อมูล (Organization of data) เป็นการจัดเรียงข้อมูลดิบที่ได้เก็บรวบรวมมา จัดเก็บอาจจะเป็นกลุ่มหรือชั้น ทำให้อ่านข้อมูลเปรียบเทียบข้อมูลหลายชุดและมองแนวโน้มของข้อมูลชุดนั้นได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง เพื่อให้สะดวกในการวิเคราะห์ข้อมูลควรนำเสนอในรูปแบบของตาราง

3. การวิเคราะห์ข้อมูล (Analysis of data) จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ระดับดังนี้ การวิเคราะห์ระดับพื้นฐาน เป็นการศึกษาลักษณะของข้อมูลเบื้องต้น สามารถที่จะนำผลที่วิเคราะห์ได้มาอธิบายลักษณะของข้อมูลกลุ่มนั้น แต่ไม่สามารถจะนำไปอธิบายกลุ่มอื่นได้ การวิเคราะห์ระดับสูงเป็นการประยุกต์ใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็นในการวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มย่อย ซึ่งผลการวิเคราะห์กลุ่มย่อยสามารถนำไปใช้อธิบายลักษณะของกลุ่มใหญ่ได้

4. การตีความหมายของข้อมูล (Interpretation of data) เป็นการนำเอาผลการวิเคราะห์ข้อมูลมาอธิบายลักษณะของข้อมูลชุดนั้นหรือสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลหลายชุด ซึ่งจะเป็นแนวทางนำไปใช้ในการช่วยตัดสินใจ

การแบ่งวิชาสถิติ

ในการแบ่งวิชาสถิติจะแบ่งออกเป็น 3 สาขา ดังนี้

1. สถิติปฏิบัติ เป็นการศึกษาระเบียบวิธีที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ได้แก่ การวางแผนและการดำเนินงานสำรวจ (Planning and execution of survey) การเก็บข้อมูลโดยวิธีสำรวจสำมะโน (Census survey) หมายถึงการเก็บรวบรวมข้อมูลจากทุกหน่วยของประชากร การเก็บข้อมูลโดยวิธีการสำรวจตัวอย่าง (Sample survey) หมายถึง การเก็บรวบรวมข้อมูลโดยวิธีสุ่มเพียงบางส่วนของประชากร

2. สถิติพรรณนา (Descriptive statistics) เป็นการนำเสนอข้อมูลในรูปแบบกราฟเส้น แผนภูมิแท่ง ตาราง จากการศึกษาด้วยวิธีการจัดเรียง การจัดกลุ่ม และการวิเคราะห์ข้อมูลระดับพื้นฐาน ซึ่งสามารถนำผลการวิเคราะห์ไปใช้อธิบายลักษณะของประชากรหรือข้อมูลชุดนั้นๆ

3. สถิติอนุมาน (Inferential statistics) เป็นการศึกษาข้อมูลเพียงบางส่วนของกลุ่มใหญ่ที่สนใจศึกษามาวิเคราะห์แล้วนำไปสรุปผลกลุ่มใหญ่ ซึ่งจะนำไปสู่ข้อสรุปของผลการทดลองหรือการวิจัยเป็นการอนุมานแบบอุปนัย (Inductive inference) การอนุมานอีกแบบหนึ่งเป็นการนำผลการวิเคราะห์ ตัวแบบ ลักษณะ นิยามหรือทฤษฎีของกลุ่มใหญ่มาอธิบายกลุ่มย่อยเป็นการอนุมานแบบนิรนัย (Deductive inference)

การวิเคราะห์ข้อมูลระดับพื้นฐาน เป็นการคำนวณหาค่ากลาง ค่าการกระจายตัว ตำแหน่ง ความเบ้และเคอร์โทซิสของข้อมูลซึ่งจะบอกลักษณะของข้อมูลชุดนั้น สัญลักษณ์ของสถิติแสดงดังตาราง 2 การวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

ตาราง 2 สัญลักษณ์ของสถิติ

ลักษณะสมบัติ	ประชากร (พารามิเตอร์)	ตัวอย่าง (สถิติ)
ค่าเฉลี่ย	μ	$\bar{x}$
ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน	σ	SD
ความแปรปรวน	σ^2	S^2

การวัดแนวโน้มสู่ส่วนกลาง (Measure of central tendency) ได้จากการคำนวณหาค่ากลางของข้อมูล ซึ่งเป็นตัวแทนของข้อมูล มี 5 ชนิด

ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic mean) หรือมัชฌิมเลขคณิต หรือค่าเฉลี่ย (Average) เป็นค่ากลางของข้อมูลเชิงปริมาณใช้สัญลักษณ์ μ (Mu)

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (4)$$

ค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิก (Harmonic mean) เป็นค่าเฉลี่ยที่เหมาะสมกับข้อมูลที่เป็นอัตราส่วน ใช้สัญลักษณ์ H.M.

ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (Geometric mean) เป็นค่าเฉลี่ยที่เหมาะสมกับข้อมูลที่แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลง ใช้สัญลักษณ์ G.M.

มัธยฐาน (Median) คือค่าที่ตำแหน่งตรงกลางของข้อมูลจากการนำมาจัดเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก สัญลักษณ์ด้วย Med

ฐานนิยม (Mode) คือค่าที่มีความถี่มากที่สุดของข้อมูล เหมาะสำหรับข้อมูลเชิงคุณภาพสัญลักษณ์ MO

การวัดการแปรผัน (Measure of variation) เป็นการคำนวณค่าที่ใช้บอกขนาดการแปรผันของข้อมูลหรือขนาดความแตกต่างของข้อมูลชุดนั้น และเปรียบเทียบการแปรผันของข้อมูลหลายๆชุดการหาขนาดการแปรผันของข้อมูลชุดหนึ่ง เรียกว่า การวัดความแปรผันสัมบูรณ์ ส่วนการเปรียบเทียบการแปรผันของข้อมูลหลายๆชุด เรียกว่าการแปรผันสัมพัทธ์

การวัดการแปรผันสัมบูรณ์ (Measure of absolute variation) เป็นการคำนวณค่าที่ใช้บอกขนาดการแปรผันของข้อมูล ใช้วัด 4 ชนิด

- 1.พิสัย (Range) เป็นผลต่างของค่าที่สูงสุดกับค่าที่ต่ำสุด
2. ส่วนเบี่ยงเบนควอไทล์ (Quartile deviation) เป็นค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างควอไทล์ที่3 กับควอไทล์ที่1
3. ส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย (Mean deviation) เป็นค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของผลต่างระหว่างข้อมูลค่าเฉลี่ยเลขคณิต
4. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เป็นค่าของผลรวมกำลังสองของผลต่างระหว่างข้อมูลกับค่าเฉลี่ยเลขคณิต สัญลักษณ์ σ (Sigma)

เทคนิคการพยากรณ์

ในการพยากรณ์สามารถจำแนกเทคนิคที่ใช้ออกเป็น 2 ประเภทได้แก่

1. เทคนิคการพยากรณ์เชิงคุณภาพ (Qualitative Forecasting Techniques) เป็นเทคนิคที่ใช้ดุลพินิจและขึ้นกับประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ โดยทั่วไปมักใช้ในกรณีที่ข้อมูลในอดีตไม่มีเลยหรือมีจำกัด เช่น การพยากรณ์ความต้องการของผลิตภัณฑ์ใหม่

2. เทคนิคการพยากรณ์เชิงปริมาณ (Quantitative Forecasting Techniques) เป็นเทคนิคที่ใช้ข้อมูลในอดีตมาสร้างแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการพยากรณ์ เทคนิคสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 วิธีใหญ่ๆ คือ

1. วิธีอนุกรมเวลา (Time Series Methods) เป็นการใช้เฉพาะข้อมูลในอดีตเพื่อพยากรณ์ค่าในอนาคต จากการวิเคราะห์แนวโน้ม (Trend) ฤดูกาล (Seasonal) วัฏจักร (Cyclical) และความผิดปกติ (Irregular) โดยมีตัวแปรอิสระคือเวลาเพียงอย่างเดียว

2. วิธีการพยากรณ์เชิงสาเหตุ (Causal Methods) เป็นวิธีที่ศึกษาถึงความสัมพันธ์ในเชิงเหตุและผลของตัวแปรที่สนใจกับตัวแปรอื่นที่เป็นสาเหตุหรือมีอิทธิพลต่อตัวแปรที่สนใจ เมื่อหาหรือประมาณความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้แล้ว ก็สามารถพยากรณ์ค่าของตัวแปรที่สนใจได้โดยอาศัยค่าของตัวแปรที่เป็นสาเหตุ

การพยากรณ์ด้วยวิธีการพยากรณ์เชิงสาเหตุ

วิธีการพยากรณ์เชิงสาเหตุเป็นการพยากรณ์ที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรโดยใช้ฟังก์ชันในการแปลงข้อมูลของตัวแปรที่เป็นสาเหตุ (x) มาเป็นค่าของตัวแปรที่สนใจ (y) ดังสมการ

$$y = f(x) \quad (5)$$

ฟังก์ชันที่ใช้ในวิธีการพยากรณ์เชิงสาเหตุนี้มีรูปแบบไม่ตายตัว เปลี่ยนแปลงได้ตามหลักการของวิธีต่างๆ ซึ่งบางวิธี ฟังก์ชันที่ใช้มีรูปแบบที่ชัดเจนทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร เช่น วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น แต่บางวิธี ฟังก์ชันมีลักษณะคล้ายกล่องดำ (Black Box) ไม่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอย่างชัดเจน เช่น วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (คณาจารย์สถาบันราชภัฏพระนครศรีอยุธยา, 2537)

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับกรณีที่มีประชากรของข้อมูลมากกว่า 2 กลุ่มและความ

แตกต่างของค่าเฉลี่ย ซึ่งการทดสอบจะทำการทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากรกลุ่มใดที่ไม่เท่ากัน เรียกว่า การเปรียบเทียบเชิงพหุ (Multiple Comparison) การวิเคราะห์ความแปรปรวนมี 2 แบบ คือ

1. การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way ANOVA)

หลักเกณฑ์ที่สำคัญในการวิเคราะห์ความแปรปรวนคือ แบ่งความแปรปรวนของข้อมูลทั้งหมดออกตามสาเหตุที่ทำให้ข้อมูลแตกต่างกัน คือความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within group) และความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between group) โดยที่ ความแปรปรวนรวม เท่ากับ ความแปรปรวนภายในกลุ่ม + ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม

1. ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between group sum of square, SSB)

พิจารณาความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจาก การที่ค่าเฉลี่ยของตัวอย่างในแต่ละกลุ่มมีความแตกต่างจากค่าเฉลี่ยรวม

$$SSB = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2 \quad (6)$$

2. ความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within group sum of square, SSE) เป็นการ

พิจารณาความแปรปรวนที่เกิดขึ้นภายในแต่ละกลุ่มที่ไม่ทราบสาเหตุว่าเกิดขึ้นจากสาเหตุใด ในบางครั้งเรียกว่า ความคลาดเคลื่อน (Error sum of square)

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_i)^2 \quad (7)$$

3. ความแปรปรวนรวม (Total sum of square, SST) พิจารณาความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากค่าสังเกตแต่ละค่าที่มีความแตกต่างจากค่าเฉลี่ยรวม

$$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (\bar{x}_{ij} - \bar{x})^2 \text{ และ } SST = SSB + SSE \quad (8)$$

ตัวสถิติทดสอบและค่าวิกฤต คือ $F = \frac{MSB}{MSE}$ ซึ่งคำนวณจากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance table)

$$MSB = \frac{SSB}{k-1} \quad (9)$$

$$MSE = \frac{SSE}{n-k} \quad (10)$$

$$F = \frac{MSB}{MSE} \quad (11)$$

เงื่อนไขการตั้งงานที่เหมาะสมที่สุด

ภายใต้เงื่อนไขการตั้งงานที่เหมาะสมที่ค่าน้อยที่สุด สามารถคำนวณจากสมการ [28]:

$$\mu = A_x + B_x - T_{mean} \quad (12)$$

$$CI = \mu \pm \sqrt{\frac{F_{95\%,1,2} V_{err}}{n_{eff}}} \quad (13)$$

เมื่อ μ คือค่ากลางภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม

A_x, B_x คือค่าตัวแปรระดับผลกระทบของการทดลอง

T_{mean} คือ ค่ากลางรวม

CI คือระดับความเชื่อมั่น

F คือค่าทางสถิติ F-ratio ได้จากตาราง F

V_{err} คือค่าเบี่ยงเบนของค่ากลางยกกำลังสอง

n_{eff} คือ $N/(1+dof)$ ค่าตัวแปรประกอบทั้งหมด ณ ระดับนั้นๆ

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น

การวิเคราะห์การถดถอย เป็นวิธีที่ใช้เทคนิคทางสถิติในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ (Independent Variable) ซึ่งตัวแปรที่ถูกกำหนดค่าที่แน่นอนไว้ล่วงหน้าและตัวแปรตาม (Dependent Variable) ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงตามตัวแปรอิสระ ในกรณีที่ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ในสมการการถดถอยเป็นแบบเชิงเส้นจะเรียกวิธีนี้ว่า การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (LRA) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression analysis) เป็นการวิเคราะห์ตัวแปรตามและตัวแปรอิสระอย่างละ 1 ตัวที่มีความสัมพันธ์กันด้วย สมการการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายดังสมการ (14)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (14)$$

โดย y คือ ตัวแปรตาม
 β_0 และ β_1 คือ สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอย
 x คือ ตัวแปรอิสระ
 ε คือ ค่าความผิดพลาด

สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าจึงต้องทำการประมาณค่า วิธีการประมาณค่าที่นิยมคือ วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least squares method)

2. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression analysis) เป็นการวิเคราะห์ตัวแปรตาม 1 ตัวและตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปที่มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งสมการการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ ดังสมการ (15)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (15)$$

โดย $x_1, x_2, \dots, x_n$ คือตัวแปรอิสระ
 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ คือ สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอย

การประมาณค่าของสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณนี้ นิยมใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดเช่นกันการวิเคราะห์การถดถอยมีข้อสมมติฐานพื้นฐาน 4 ข้อคือ ที่ค่าใดๆของตัวแปรอิสระ (1) ประชากรของค่าความผิดพลาดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ (2) ประชากรของค่าความผิดพลาดมีความแปรปรวนคงที่ (3) มีค่าความผิดพลาดของประชากรเป็นการแจกแจงแบบปกติ และ (4) มีความเป็นอิสระต่อกันสำหรับค่าความผิดพลาด

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเป็นวิธีการพยากรณ์เชิงสาเหตุที่นิยมใช้มากที่สุด โดยในการพยากรณ์ ตัวแปรตามของสมการคือสิ่งที่ต้องการพยากรณ์ ในขณะที่ตัวแปรอิสระคือปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อตัวแปรตาม เช่น การใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางสภาพอากาศและความต้องการพลังงานไฟฟ้ารายเดือน และใช้

ความสัมพันธ์ดังกล่าวในการพยากรณ์หาความต้องการพลังงานไฟฟ้ารายเดือน แต่การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นก็มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ไม่เหมาะกับการพยากรณ์ในกรณีที่มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear relationships) และใช้สำหรับการพยากรณ์ที่มีผลลัพธ์ที่เป็นตัวเลขเท่านั้น นอกจากนี้ผู้พยากรณ์มักจะละเลยในการตรวจสอบว่าข้อมูลที่เป็นไปตามข้อสมมติฐานของการวิเคราะห์การถดถอยหรือไม่ ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้ผลของการพยากรณ์ที่ได้มีความผิดพลาดไปมากและมีความน่าเชื่อถือลดลง

วิธีทาคุชิ

วิธีทาคุชิ (Taguchi method) เป็นวิธีการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งที่ใช้สถิติควบคุมให้ค่าเบี่ยงเบนจากเป้าหมายมีค่าน้อยที่สุด โดยหาค่าตัวแปรที่ควบคุมได้ (Controllable design variable) ในกระบวนการผลิตซึ่งทำให้ค่าเฉลี่ยมีค่าน้อยที่สุดหรือหาค่าของตัวแปรแบบที่ควบคุมได้ ทำให้มีค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean squares) ของค่าเบี่ยงเบน (Deviation) จากเป้าหมายมีค่าน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับสเปซของสิ่งรบกวนที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable noise space) โดยทั่วไปแล้วรูปแบบที่แท้จริง (Actual form) ของฟังก์ชันมีลักษณะหรือการทำงานของผลิตภัณฑ์เป็นสิ่งที่ได้ยาก ดังนั้นรูปแบบที่นิยมใช้กันมักจะอยู่ในรูปแบบกำลังสอง (Quadratic loss function)

กำหนดให้ y เป็นเวกเตอร์สะท้อน (Response vector) ของตัวแปรที่แสดงคุณภาพของผลิตภัณฑ์และให้เป็นค่าเป้าหมายของ y

ความแปรปรวน (Variation) ของ y เป็นสาเหตุทำให้เกิดความหยابผิวน ฟังก์ชันความหยابผิวกำลังสองคือ

$$l(y) = k(y - \tau)^2 \quad (16)$$

โดยที่ k เป็นค่าคงที่ และสามารถคำนวณได้เมื่อทราบค่าการแจกแจงของ y ความหยابผิวดังกล่าว

$$L(y) = E[l(y)] = kE(y - \tau)^2 \quad (17)$$

เห็นได้ว่า ค่าเฉลี่ยของส่วนเบี่ยงเบนจากเป้าหมายกำลังสอง $E(y - \tau)^2$ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหยาบผิว $L(y)$ ดังนั้น การทำให้ความหยาบผิวมีค่าน้อยที่สุดคือการทำให้ค่าเฉลี่ยของส่วนเบี่ยงเบนจากเป้าหมายกำลังสองมีค่าน้อยที่สุด

ค่าเฉลี่ยของส่วนเบี่ยงเบนจากเป้าหมายกำลังสองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นผลกระทบเชิงตำแหน่ง (Location effect) และความแปรปรวนซึ่งเป็นผลกระทบเชิงการกระจาย (Dispersion effect)

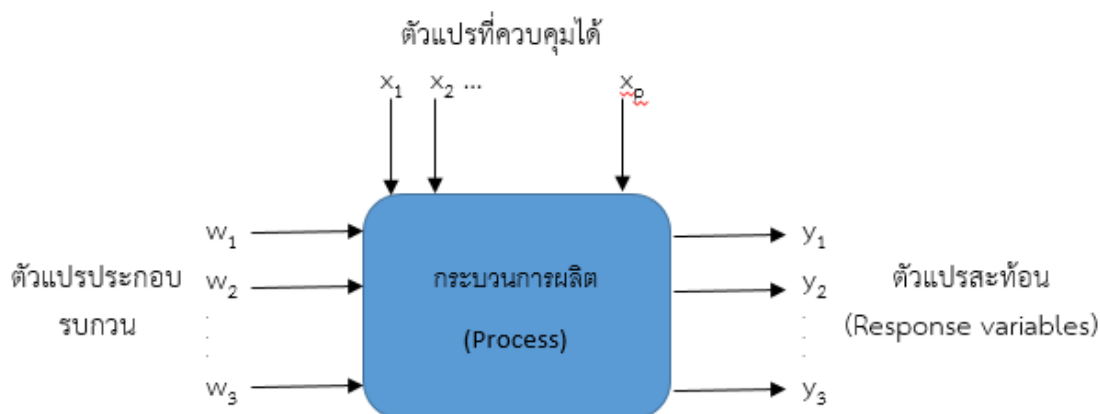
$$\begin{aligned} E(y - \tau)^2 &= E[\langle y - E(y) \rangle + \langle E(y) - \tau \rangle]^2 \\ &= E[y - E(y)]^2 + [E(y) - \tau]^2 \\ &= \sigma_y^2 + [E(y) - \tau]^2 \end{aligned} \quad (18)$$

ด้วยเหตุนี้ แบบแผนพารามิเตอร์สำหรับการทดลอง (Experimental parameter design) ของ ดร.ทาคุชิ (1980) จึงเน้นการประยุกต์แนวแถบตั้งฉาก (Orthogonal arrays) โดยใช้แนวแถบภายใน (Inner) และภายนอก (Outer) เพื่อให้สอดคล้องกับผลกระทบจากค่าเฉลี่ย (Mean effects) และผลกระทบความแปรปรวน (Variance effects) หาตัวแปรแบบแผนที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยในแนวแถบภายใน เพื่อมาปรับค่าเฉลี่ยให้เข้าใกล้ค่าเป้าหมายยิ่งขึ้น ซึ่งเรียกว่าตัวปรับปรุง (Adjustment variables) สำหรับแนวแถบภายนอกหาเพื่อใช้ในการประมาณค่าความแปรปรวนในแต่ละตำแหน่งแบบแผน (Design point) ในแนวแถบภายใน

จากกระบวนการผลิตซึ่งแสดงไว้ในภาพประกอบ 14 สำหรับการทำการปรับปรุงคุณภาพ จะต้องมีการกำหนดพารามิเตอร์ สำหรับตัวแปรที่ควบคุมได้ (Controllable variables) และตัวประกอบรบกวน (Noise factor) สำหรับตัวประกอบที่ควบคุมไม่ได้

ตัวประกอบรบกวน (Noise factor) เป็นการบังคับให้เกิดการแปรปรวนในการทดลองจากผลลัพธ์ดังกล่าวนำมาหาค่าตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้กระบวนการหรือผลิตภัณฑ์มีความต้านหรือทนต่อการเปลี่ยนแปลงจากปัจจัยด้านเสียง ค่าที่สูงขึ้นของอัตราส่วนสัญญาณต่อเสียงรบกวน (S/N) ระบุการตั้งค่าปัจจัยควบคุมที่ลดผลกระทบของปัจจัยเสียงรบกวน

วิธีของทาคุชิจะใช้กระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพ 2 ขั้นตอน คือ 1. ใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพื่อระบุปัจจัยควบคุมที่ลดความแปรปรวน และ 2. ระบุปัจจัยควบคุมที่ย้ายค่าเฉลี่ยไปยังเป้าหมายและมีผลเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน



ภาพประกอบ 14 แผนภูมิบล็อกแสดงกระบวนการผลิต

ขนาดเล็กที่ดีกว่า (Smaller-the-better) ในกรณีที่ต้องการลดการเกิดของลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ไม่พึงประสงค์บางอย่างให้น้อยที่สุด สามารถคำนวณอัตราส่วน S/N ต่อไปนี้

$$S/N_s = -10\log\left(\frac{1}{n} \sum y^2\right) \quad (19)$$

เมื่อ S/N = อัตราส่วนของค่าสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในแต่ละการทดลอง
 N = จำนวนการทดลอง
 Y = ค่าตอบสนอง (Response) ในการทดลอง

การวิเคราะห์ผ่านอัตราส่วน S/N นี้ ผลกระทบของปัจจัยสัญญาณคือศูนย์เนื่องจากศูนย์ข้อบกพร่องเป็นสถานะเดียวที่ต้องการ และ S/N จะแสดงด้วยสมการกำลังสองของฟังก์ชันการสูญเสียปัจจัย ทำให้แน่ใจว่าอัตราส่วนนี้วัดผกผันกับคุณภาพที่ไม่ดี ยิ่งข้อบกพร่องมากเท่าไรก็ยิ่งมีผลรวมของจำนวนข้อบกพร่องที่เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าและยิ่งอัตราส่วน S/N น้อยลง ดังนั้นการเพิ่มอัตราส่วนนี้ให้สูงสุดจะเป็นการเพิ่มคุณภาพ

เป้าหมายที่ดีที่สุด (Normal-the-better) เป็นการกำหนดค่าสัญญาณคงที่ และความแปรปรวนค่านี้สามารถพิจารณาได้ว่าเป็นผลที่ได้มาจากปัจจัยด้านเสียงรบกวน (Noise factor)

$$S/N_N = 10\log\left(\frac{\bar{y}^2}{s^2}\right) \quad (20)$$

S^2 = ความแปรปรวนของคุณลักษณะคุณภาพในการวัด (ตัวแปร)

อัตราส่วนสัญญาณต่อเสียงรบกวนนี้สามารถใช้ได้ทุกครั้งที่คุณภาพในอุดมคติถูกกำหนดด้วยค่าที่ระบุเฉพาะ เพื่อให้แน่ใจว่ามีคุณภาพสูงสุด

ขนาดใหญ่ที่ดี (Larger-the-better) เป็นการสมมติอัตราส่วน S/N เป้าหมายสูงสุดของผลตอบและเป็นค่าที่เหมาะสม หาได้จากสูตรต่อไปนี้

$$S/N_L = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum \frac{1}{y^2}\right) \quad (21)$$

วิธีการของ ดร.ทาคุชิ ในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์พอสรุปได้ดังนี้คือ จากแบบแผนการทดลองที่เหมาะสม ทำการทดลองจนได้ผลลัพธ์ต่างๆแล้ว นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยของตัวแปรควบคุมและความแปรปรวน และตัวแปรควบคุมที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยอย่างเดียว ซึ่งเรียกว่าตัวแปรปรับปรุงดังกล่าวข้างต้น พิจารณากลุ่มผสม (Combination) ของตัวแปรที่ควบคุมได้ ที่ให้ค่าสถิติอัตราส่วนสัญญาณไปยังสิ่งรบกวน (Signal-to-noise ratio) สูงสุด กลุ่มผสมนี้คือกลุ่มอุดมตะ (Optimal) ที่ต้องการและเพื่อยืนยันว่าตัวแปรต่างๆ ในกลุ่มอุดมตะนี้สามารถเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้จริง ผู้ศึกษาควรนำค่าอุดมตะนี้ไปใช้ในกระบวนการผลิตอีกครั้งหนึ่ง (Montgomery, 2013)

หนึ่งในเหตุผลของการใช้วิธีการที่มีประสิทธิภาพของทาคุชิการเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ไม่ซ้ำกันและการทดลองคือเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสำหรับการวิเคราะห์เทคนิคการเรียงลำดับแบบจากต้งจากที่ใช้ในการออกแบบ และทรัพยากรได้รับการช่วยอย่างมากมาย การวิเคราะห์เงื่อนไขที่เหมาะสมของผลการทดลองของทาคุชิสำหรับกระบวนการ / ผลิตภัณฑ์ประมาณการแต่ละปัจจัยของการมีส่วนร่วมร้อยละและปรับเงื่อนไขเพื่อทำนายการตอบสนอง วิธีการทาคุจินั้นให้อัตราส่วนสัญญาณต่อเสียงรบกวน (S / N) ที่ระบุถึงการวัดทางสถิติซึ่งพิจารณาทั้งค่าเฉลี่ยและความแปรปรวน ตามปกติมาตรฐานอัตราส่วน S / N ใช้สามประเภทสำหรับคุณสมบัติคุณภาพที่จะปรับให้เหมาะสมดังนี้: ใหญ่กว่าดีกว่าเล็กน้ยดีที่สุดดีกว่าและเล็กกว่าดีกว่า อัตราส่วน S / N สูงสุดจะรวมกับพารามิเตอร์สำหรับการตั้งค่าการปรับให้เหมาะสม นอกจากนี้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จะกำหนดนัยสำคัญทางสถิติของพารามิเตอร์

จากนั้นอัตราส่วน ANOVA และ S / N จะช่วยในการกำหนดพารามิเตอร์ด้วยการผสมผสานที่เหมาะสม ทำได้ดีแล้ววิธีการของทากุชิขอแนะนำสำหรับการทดสอบยืนยันด้วยการตรวจสอบประสิทธิภาพและประสิทธิภาพของการตอบสนองเพื่อปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะสม (Ross, 1996)

บทปริทัศน์วรรณกรรม

ในปี 1999 H.H. Gatzert และคณะ ได้ทำการศึกษาผลกระทบสำหรับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์เชิงกล อิทธิพลของขนาดเกรนของใบตัด (Dicing blade grain size) อัตราการป้อนหรือความเร็วตัด ในการตัดสไลเดอร์ซึ่งเป็นกระบวนการเชิงกลสุดท้ายของการผลิตสไลเดอร์ ส่งผลให้ ABS (Air bearing surface) เกิดแคมเบอร์เป็นลบ (Negative camber) ซึ่งพบว่ารอยของร่องเป็นสาเหตุให้เกิดแคมเบอร์ลบ การยืดแบบผิวดูปร่างเกิดที่ขอบของสไลเดอร์ขณะทำการตัด ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับ ABS แคมเบอร์ลบคือขนาดของร่องที่มีความแตกต่างกัน แต่โดยการเปลี่ยนชนิดของใบตัด (Blade) และพารามิเตอร์การตัดอื่นๆอีกเล็กน้อย นอกจากการสร้างร่อง, ตำแหน่งการตัด อาจเกิดรอยเสียหายไม่ต่อเนื่องของวัสดุที่ขอบสไลเดอร์

ในปี 2002 กฤษฎา อัสวารุ่งแสงกุล ทำการพัฒนาคุณภาพของกระบวนการตัดสไลเดอร์ ในการศึกษาการพัฒนาคุณภาพของสไลเดอร์ในกระบวนการตัดสุดท้ายของการผลิตฮาร์ดดิสก์ โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of experiment, DOE) เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการตัด (Better cutting condition) สำหรับกระบวนการตัด เพื่อลดจำนวนการแตกและการร้าว โดยการพิจารณาอิทธิพลตัวแปรที่เป็นสาเหตุของการแตกและการร้าว ตัวแปรที่เลือกมี 5 ตัวแปรมีความเร็วในการตัด, ความลึกในการตัด, อัตราความเร็วป้อน, เวลาในการลับใบมีดตัด และทิศทางในการตัด ผลแสดงว่าตัวแปรที่มีนัยสำคัญมีผลกระทบกับการแตกและการร้าวคือ ความเร็วตัดและทิศทางในการตัด จากผลที่ได้แนะนำว่าควรปรับความเร็วตัดที่ 8,500 รอบต่อนาทีและทิศทางการตัดจากด้านซ้ายไปด้านเอียง (Asawarungsaengkul, 2002)

ในปี 2003 Bo Liu และคณะ ได้ศึกษาเพื่อทำการผลิตและการทดลองสไลเดอร์เฟมโต (Femto slider) การเพิ่มความจุของฮาร์ดดิสก์ให้มีความจุที่ 600 ~ 1000 Gb/in² โดยการลดช่องว่างในการบินระหว่างหัวอ่านและแผ่นดิสก์ ดังนั้นได้มีออกแบบและผลิตสไลเดอร์เฟมโต จากนั้นได้ทำการศึกษาการทำงานเชิงไดนามิกเพื่อหาความไวการบิน (Flying performance sensitivity) และเปรียบเทียบกับความไวการบินของสไลเดอร์พิโค (Pico slider) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีในขณะนั้น ผลที่ได้คือ สไลเดอร์เฟมโตมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดขณะบิน ฉะนั้นต้องมี

การควบคุมอย่างมากในการออกแบบ Air bearing surface (ABS) ที่เหมาะสมจึงจะช่วยลดความไวของการบิน (B. Liu, Zhang, M., Yu, S., & et. al., 2003)

ในปี 2005 Koji Matsumaru และคณะ ได้มีการศึกษาความก้าวหน้าของใบมีดตัดบาง 3 ชนิดที่ใช้สำหรับแผ่น Sapphire substrate ซึ่งมีขนาดเหมือนกันและเกรนเพชรมีขนาดเท่ากัน ชนิดแรกคือ นิเกิลผสมฟอสฟอรัส และวัสดุ Vitric ทั้ง 2 ชนิด และแบ่งเป็นชนิดที่มีความหนาแน่นกับชนิดที่มีรูพรุน ใช้ความเร็วในการตัด 20,000 รอบต่อนาที, ความลึกในการตัด 200 μm และอัตราความเร็วป้อน 1 มม.ต่อวินาที, ตัดระยะความยาว 1000 mm ผลพบว่าการที่จะได้ใบตัดที่มีคุณภาพขึ้นอยู่กับการประดิษฐ์ใบตัด การสึกหรอของใบตัดก็มีผลกับคุณภาพและความสามารถในการตัดจะขึ้นอยู่กับเกรนเพชรในใบตัด

ในปี 2006 T. Jin และคณะ ได้ศึกษาหาความหยาบผิวสุดท้ายของ optical ที่ต่ำกว่า Ra 10nm สามารถทำให้ประสบความสำเร็จด้วยล้อเจียรในแบบ "Tetraform C" ที่มีความแข็งที่สูงเป็นพิเศษ เมื่อเจียรในเหล็กผสมต่ำโดยไม่ใช้ ELID ความหยาบผิวที่เกิดจากการออกแบบสามารถ ทำนายค่าความเหนียวที่ผิวได้ การมีความรู้ทางกระบวนการผลิตทำการเปลี่ยนแปลงเพื่อใช้ กับการวิธีการเจียรในในเครื่อง CNC 5 แกนที่แตกต่างกัน สัดส่วนของอัตราการนำวัสดุออก และขนาดผง แสดงออกมาจากผงออกผ่านความหยาบผิว (Jin, 2006)

ในปี 2006 Y. X. Feng และคณะ ทำการทดลองวัสดุที่มีความแข็งผิวกับตัวแปรในการตัด ซึ่งวิเคราะห์ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าค่าความหยาบผิวระหว่าง 0.55 และ 1.1 μm ตัวแปรภายใต้การตัดถูกขัดเซยและถูกเปลี่ยนแปลงตัวแปร ความหยาบผิวหลังตัดจะมีการเปลี่ยนแปลง ลดลงอย่างเห็นได้ชัด แรงดันน้ำที่ต่ำเป็นตัวแปรในการตัดซึ่งช่องว่างที่ใหญ่กว่าจะส่งกับความเร็วหัวตัด และกระทบต่อความหยาบผิว การตัดที่ประกอบกันด้วยความเร็ว 1000 mm/min คือความเร็วที่เหมาะสม สำหรับการตัด ceramic Si_3N_4 AWJ การลดความหยาบผิวหลังตัดก่อน จากนั้นเพิ่มมากขึ้นด้วยระยะ 10 mm ถึง 30mm ความหยาบผิวจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด การเพิ่ม mesh ของผงขัด เฉพาะระยะห่าง 20 mm ช่วงตรงกลาง และผงขัดเป็นตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการตัด Ceramic Si_3N_4 AWJ กับภายใต้การขัดเซยตัวแปรนั้น (Y. X. Feng, Huang, C.Z., Wang, J.X., Lu, Y., & Zhu, H.T. , 2006)

ในปี 2006 Z. Feng และคณะ เสนอเอกสารวิธีการการแยกแยะรูปร่างของผงเพชรด้วยการใช้เทคโนโลยีกระบวนการใช้รูปร่างจากการทำการเจียรใน Sobel นำมาใช้ค้นหาขอบรอยแหว่งในตำแหน่งทางเข้า สังเกตด้วยการใช้วิธีของ Otsu ภาพการติดต่อดำแหน่งตัดซึ่งติดต่อกันแต่ไม่ต่อเนื่อง ผลและสภาพบริเวณรอบของรอยแหว่งถูกกัฏก่อนการกำจัดสัญญาณรบกวนที่ได้มา

จากภาพรูปร่างที่แตกต่างกันระหว่างเศษโลหะและเกรนของสารขัด การวิเคราะห์สัดส่วนของเศษด้วยการคำนวณและการตรวจสอบภาพการทำงานของผิวล้อเจียรไน โดยใช้กระบวนการรูปร่างด้วยโปรแกรม Matlab (Z. Feng, & Chen, X. , 2006)

ในปี 2006 Y.Q. Yu และคณะ รวบรวมรายงานเรื่องการตกแต่งของใบตัดเพชร ชนิดพันธนาการโลหะ 4 วิธีการตกแต่งที่แตกต่างกันของการทำใบตัดส่วนผสมของเหลวกับของแข็ง ผิวของการเจียรไนของใบตัดกับล้อ Al_2O_3 การตกแต่งใบตัดกับล้อ SiC และการตกแต่งใบตัดผ่านวัสดุที่มีความแข็ง ผิวของการตกแต่งใบตัดใช้เครื่อง SEM ในการวิเคราะห์ส่วนที่ยื่นของผงเพชร หลังทำการตกแต่งใบตัด ปริมาณใช้ Microscope optical digital เป็นเครื่องวิเคราะห์ ในส่วนของแรงประกอบด้วย ทิศทางตั้งและนอน กำลังเพลลาจะทำการวัดในขณะที่ตัดงาน ผงเพชรที่ยื่นออกมานั้นเกิดวิธีการ กระตุ้นส่วนผงเพชรที่เหลือนั้นจะเกิดผลึกที่คม ซึ่งสามารถหาจุดเหมาะสมของความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการตัด การวิเคราะห์แรงชี้ว่าแรงต่อขนาดผงเพชรจากการรวมความแข็งเพชรในการตัดต่ำมาก การเปลี่ยนกำลังเพลลาในขณะที่ทำการตัดวัตถุสามารถใช้ในกระบวนการตรวจจับกระบวนการ ตกแต่งด้วย (Yu, 2006)

ในปี 2006 Y.Z. Liu และคณะ รวบรวมเอกสารส่วนประกอบของ Nano ceramics เรื่องวิเคราะห์เชิงเครื่องกลของผิววัสดุ Nano ceramics ในกระบวนการเจียรไนที่มีความแม่นยำสูงและความลึกในการเจียรไนที่วิกฤต จากนั้นได้ทำการทดลองการเจียรไนระหว่าง Nano ceramics และ ceramic แบบทั่วไป ตัวแปรการเจียรไนและวิธีการเจียรไนที่เหมือนกัน รูปจาก AFM แสดงให้เห็นว่า Nano ceramic มีประสิทธิภาพเชิงกลเหนือความคาดหวัง กระบวนการเจียรไนเป็นการตัดวัสดุพลาสติกเสมือนการตัดโลหะ เกิดร่องที่ชัดเจน และความเปราะหลุดเป็นออกเป็นหลุมด้านทางออกของผิวการเจียรไน ซึ่งไม่พบใน ceramic แบบทั่วไป หลังการเจียรไน Nano ceramic แล้วทำการวิเคราะห์คุณภาพผิวด้วย AFM สรุปได้ว่าคุณภาพผิวของ Nano ceramic ดีกว่า Ceramic แบบทั่วไปหลังกระบวนการเจียรไน ความหยาบผิว Ra ดีกว่าเมื่อลากด้านบนผิว Ceramic แบบทั่วไปอย่างชัดเจน และไม่มีรอยร้าว ด้านบนสังเกตจากการตรวจสอบการเตรียมผลการทดลอง ผลวิทยานิพนธ์และแนวทางทางทฤษฎีสำหรับการเลือกตัวแปรการเจียรไนและวิธีการเจียรไน (Y. Z. Liu, Liang, Y.C., & Zhang, F.H. , 2006)

ในปี 2006 Y.C. Liang และคณะ ได้ทำการทดลองหาค่าตัวแปรที่ถูกต้องระหว่าง ความหยาบผิวและตัวแปรในการตัด (อัตราการป้อน, ความลึกในการตัด) และรัศมีด้านปลาย และได้รูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายความหยาบผิว ขึ้นอยู่กับตัวแปรในการตัด และรัศมีด้านปลาย ทั้งคู่ ผลการวิเคราะห์แสดงอัตราการป้อนและรัศมีด้านปลายส่งผลกับความหยาบผิว อย่าง

เห็นได้ชัด การทดสอบอัตราส่วนรูปแบบนำเสนอเพียงพอ ซึ่งวิธีการนี้สามารถใช้ในการทำนายตัวแปร ความหยاب เหมือนกับการใช้ตัวแปรการตัด และรัศมีด้านปลายได้ (Liang, 2007)

ในปี 2006 Shigeki Okuyama และคณะ การจัดเตรียมเกรนล้อยัดเพชรเป็น การพัฒนา และสมรรถภาพการเจียระไนของล้อยัดในอุตสาหกรรมอลูมิเนียมบริสุทธิ์ ที่มีความแข็งมาก ๆ เพื่อการเจียระไนวัสดุ เป็นการหาการพัฒนาล้อยัดที่มีความสามารถพื้นฐานเป็นอลูมิเนียมบริสุทธิ์ นอกจากสารขัดขณะที่ใช้ของเหลวเจียระไนที่ใช้ทั่วไป ชนิด A3-1 นอกจากนั้นการสึกหรอของล้อยัดไม่สามารถเห็นในขณะที่การทดลอง และพลังงานที่ใช้ในการเจียระไนต่ำสุด ๆ สามารถใช้ล้อยัดที่พัฒนาแล้วนี้กับผิวกระจกได้ง่ายๆ โดยการการเจียระไนผ่านผิวที่ความเร็วโต๊ะงานที่ช้ามาก ๆ (Okuyama, 2007)

ในปี 2011 กิตติคม นนท์ประสาธ และคณะ ศึกษาผลกระทบจากการตัดส่งผลต่อส่วนโค้งของสไลเดอร์ ลักษณะการยึดของ Row bar 3 ชนิดและ 2 ทิศทางที่ค้นหา แรงการตัดสำหรับแต่ละลักษณะการตัดเปลี่ยนแปลง Crown, camber และ twist ชัดเจน ในการยึดแบบแนวนอนและแนวตั้ง ต้องการแรงตัดน้อยกว่าการยึดแบบ 45 องศา การตั้งตัดพื้นที่การตัดน้อยกว่า Crown และ Twist เปลี่ยนเล็กน้อย ซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนที่ไม่มีนัยสำคัญ ส่วน Camber มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการยึดแนวตั้งกับทิศทางการตัดขึ้นเป็นลักษณะที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด (Nontprasat, 2011)

ในปี 2012 P Chockalingam และคณะ ได้ทำการศึกษาการเจียระไนวัสดุกระจกเคลือบโพลิเมเมอร์เสริมความแข็งแรงด้วยไฟเบอร์ (Glass fibre reinforced polymer laminates) Chopped Strand Mat (CSM) โดยใช้ล้อยัดเจียระไนที่ทำมาจากอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminums oxide) ซึ่งศึกษาตัวแปรอิสระที่สำคัญคือ ความเร็วรอบการเจียระไน, อัตราป้อน และ ความลึกในการเจียระไน ผลลัพธ์ที่ต้องการคือ แรงในการตัดและความเรียบผิว การเจียระไนแบบแห้งจะมีแรงในการตัดที่น้อยกว่าอัตราป้อนช้าและอัตราป้อนเร็วกับทุก ๆ ความลึกในการตัด ซึ่งจะให้อัตราการกินชิ้นงานน้อยกว่าที่ทางโรงงานกำหนด การใช้น้ำยาหล่อเย็นสังเคราะห์ในการเจียระไนจะให้แรงในการเจียระไนที่ต่ำกว่าทั้งความเร็วป้อนสูงและต่ำ การเพิ่มน้ำยาหล่อเย็นและการเพิ่มแรงในการตัดด้วยเหตุผลที่ว่า น้ำยาหล่อเย็นเป็นฟิล์มเคลือบซึ่งใช้แรงน้อยกว่าที่อัตราการป้อนสูงและต่ำ ที่ความลึกในการตัดมาก ความเรียบผิวน้อยที่อัตราการป้อนสูงและต่ำโดยไม่ใช้น้ำยาหล่อเย็น อัตราการป้อนสูงกับความลึกในการตัดปรับปรุงความหยابผิวด้วยการใช้น้ำยาหล่อเย็นสังเคราะห์ ซึ่งเป็นฟิล์มเคลือบที่ดีในการที่จะเพิ่มความเร็วยรอบและอัตราป้อนที่สูงกว่า (Chockalingam, 2012; Okuyama, 2007)

ล้อยเพชรเป็นชนิดของล้อที่มีความนิยมใช้มากที่สุดในการใช้วัสดุแข็งของเครื่อง (Mokbel, 2000) ความเร็วที่ได้รับผลกระทบจากแรงเฉื่อยระไนและพลังงานเฉื่อยเฉพาะความเร็วสูงของกระบวนการบดลดแรงตึงและบรรลุอัตราส่วนการเฉื่อยที่สูงขึ้น (Emami, 2014; Rizea, 2011) และวัสดุผสม Al_2O_3-TiC เป็นประเภทเซรามิกวิศวกรรมที่มีความแข็งแรงสูงและมีความสัมพันธ์กันอย่างเหนียวแน่นมันถูกใช้โดยฐานวัสดุทั่วไปของหัวแม่เหล็ก (Emami, 2014; Jana, 2010 ; Takuya, 2007) แรงเฉื่อยระไนที่ถูกควบคุมจะลดลงลดผลกระทบชั่วคราวที่จุดเริ่มต้นของรอบการเฉื่อยระไนมันเป็นสิ่งสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งของความแข็งแรงต่ำโดยระบบการบดอ่อน (Hahn, 1965) Dynamometer เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดแรงในระหว่างกระบวนการตัดสามทิศทางขั้นสูงใช้เป็นพื้นฐานสำหรับแรงตัดบนชิ้นงาน (Barrau, 2004; Bissey, 2005; Poulachon, 2004; G. Poulachon, Bandyopadhyay, B.P., Jawahir, I.S., Pheulpin, S., & Seguin, E., 2003)

ประสิทธิภาพเชิงกลเป็นปัจจัยภายในหลายอย่างเช่นการสร้างความร้อนการสึกหรออายุการคืบและความแข็งแรงเมื่อล้อ (Dogra, 2011) เนื่องจากปัจจัยป้อนเข้าเช่นประเภทเครื่องมือตัดการสร้างเครื่องมืออัตราการป้อนความเร็วแกนหมุนความลึกตัดการหล่อเย็นการสั่นสะเทือน เป็นต้นในขณะที่การเตรียมการนั้นอยู่ภายใต้ความสัมพันธ์ที่สำคัญเช่นชนิดของเครื่องมือและเงื่อนไขการตัดพารามิเตอร์ชิ้นงานและเรขาคณิตและคุณสมบัติของวัสดุเครื่องมือซึ่งเป็นความซับซ้อนและยากลำบากของกระบวนการตัดเฉือน (Mustafa, 2013) พื้นผิวการตัดนั้นได้รับผลกระทบจากขนาดใบเพชรที่มีต่อความเร็วการเจาะและขนาดเม็ดขัด (Adachi, 2007) คุณภาพเพิ่มเติมของกระบวนการขึ้นรูปคืออัตราการกำจัดวัสดุ (MRR) (Madival, 2019) คุณภาพที่สำคัญยิ่งขึ้นของกระบวนการเฉื่อยคือความหยาบผิวและความแม่นยำของกระบวนการ (Shipulin, 2012) เนื่องจากการรวมกันของพารามิเตอร์การตัดได้รับผลกระทบต่อความขรุขระของพื้นผิว (M. Sortino, Totis, G. & Prospero, F., 2012) พารามิเตอร์ที่สำคัญของความลึกของการเฉื่อยคือการปรับปรุงพื้นผิวโดยการเพิ่มขึ้นและประเภทล้อ CBN คือล้อเฉื่อยที่ดีกว่าการใช้ประโยชน์คือความลึกการเฉื่อยสูงและคุณสมบัติทางความร้อนที่ดี (Yunus, 2012) ในขณะที่ความลึกของการตัด . การศึกษาผลกระทบของความขรุขระของพื้นผิวพบว่าความเร็วในการตัดสูงกว่าอัตราป้อนในขณะที่ความเค้นตกค้างจะลดลงเมื่ออัตราป้อนลดลง (Hussein, 2020) เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่สุดสามารถลดต้นทุนหรือเวลาในการผลิตและปรับปรุงพื้นผิว (Samir, 2011) การลดความหยาบของพื้นผิวศึกษาและลดการสั่นสะเทือนระหว่างกระบวนการตัดเฉือน (Martinez, 2008) ขนาดกำลังของการตัดสามารถปรับปรุงได้โดยลดการสั่นสะเทือนแบบอัลตราโซนิก (Azlan, 2019) การปรับตำแหน่งเครื่องมือแบบไดนามิกในระหว่างกระบวนการกลึงคือการควบคุมความแม่นยำ (Tareq,

2009) เมื่อเร็ว ๆ นี้ความสมบูรณ์ของพื้นผิวสูงและความแม่นยำของมิติสูงเป็นสิ่งจำเป็น กระบวนการบดความเร็วสูง (Kiprawi, 2019; Kumar, 2013; Narasimha, 2013) เทคโนโลยีการเจียรในถูกค้นพบและได้รับคุณภาพของพื้นผิวโดยใช้กรวดเพชรที่ละเอียดมากและเครื่องเจียรผิวที่มีความแม่นยำสูง (Matsuo, 1997) อิทธิพลของคุณภาพของชิ้นงานทำได้จากวัสดุอุปกรณ์เช่น รูปร่างเครื่องมือ, สภาพการตัด, กระบวนการตัด, วัสดุของชิ้นงาน, ชิป, การสึกหรอของเครื่องมือ และการสั่นสะเทือนในระหว่างการตัด (Bin, 2008; Kumar, 2013; Osman, 2016; Reith, 2012) นอกจากนี้การตัดด้วยความเร็วสูงและอัตราการกำจัดวัสดุยังส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของพื้นผิว (Kiprawi, 2019; Mahto, 2008; Mokbel, 2000; Santosh, 2019) งานวิจัยบางชิ้นได้รับรายงานว่า ความหยาบผิวมีผลกระทบอย่างมากจากความเร็วในการตัดขึ้นอยู่กับประเภทของเครื่องมือตัด และวัสดุชิ้นงาน (Ahmad, 2012; Kasim, 2015) แม้ว่านักวิจัยคนอื่น ๆ แนะนำว่าอัตราการป้อนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความขรุขระของพื้นผิว (Elkhabeery, 2016; Shahriar, 2012)

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่มีตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้เช่น ชนิดของเครื่องมือตัดเฉือน และการสั่นสะเทือนของกระบวนการวัสดุสมบัติเชิงกล (Elkhabeery, 2016; Shahriar, 2012) กระบวนการตัดความเร็วสูงและอัตราการกำจัดวัสดุได้รับผลกระทบโดยตรงจากคุณภาพของความหยาบ การศึกษาวิจัยที่มีผลกระทบอย่างมากของพารามิเตอร์การตัดโดยใช้วิธีการตอบสนอง RSM เพื่ออธิบายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถแสดงความสัมพันธ์กับความหยาบผิวสามารถมีผลกระทบอย่างมากต่อความเร็วในการตัดขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องมือตัดและวัสดุงาน (Ahmad, 2012; Kasim, 2015) แม้ว่านักวิจัยบางคนแนะนำว่าอัตราการป้อนแสดงปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระของพื้นผิว (Mahto, 2008; Reddy, 2011) และในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา นักวิจัยได้ศึกษาการลดความหยาบของผิวในระหว่างกระบวนการตัดเฉือนและลดการสั่นสะเทือน Martinez และคณะ (Martinez, 2008) มีการเสนอการคาดคะเนสำหรับแบบจำลองอิสระที่มีความหลากหลาย มีการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นงานและเครื่องมือตัดในกระบวนการกลึง การใช้กระบวนการกลึงมุมฉากมีอิทธิพลสำคัญของการยื่นของเครื่องมือตัดและการทำงานตรงกันข้ามที่แข็งแกร่งมั่นคง โดย Rama และคณะ (Rama, 2011) การปรับปรุงผิวด้วยการสั่นสะเทือนแบบพาสซีฟในกระบวนการทรงกระบอก (Kanaseand, 2012) การกลึงภายในขั้นสุดท้ายดำเนินการโดย Sortino และคณะ (M. Sortino, Totis, G., & Prosperi, F., 2012) การตรวจสอบอิทธิพลที่มีต่อรูปทรงเรขาคณิต, วัสดุของเครื่องมือตัดและชิ้นส่วนการสูมตัวอย่างต่อความเสถียรของกระบวนการ, การบ่งชี้ถึงอัตราส่วนของแท่ง boring สำหรับยื่นออกไปจนถึงเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของกระบวนการ ความมั่นคงจะได้รับผลกระทบอย่างเด่นชัด ซึ่งตำแหน่งของเครื่องมือเป็นการปรับเปลี่ยนไดนามิกใน

ระหว่างกระบวนการกลึงเป็นการควบคุมที่มีความแม่นยำของระบบปรับตัวทางกลที่เสนอโดย Tareq และคณะ (Tareq, 2009), Sasimurugan และคณะ (Sasimurugan, 2011) และเมทริกซ์ของ โลหะผสมอะลูมิเนียมไฮบริดต่อความหยาบผิวของการกลึงได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจาก อัตราการป้อน การค้นหาดำเนินการโดย Pragnesh และคณะ (Pragnesh, 2013), Gulhane และ คณะ (Gulhane, 2013) แสดงผลของอัตราการป้อนสูงกว่าความเร็วในการตัดสำหรับความขรุขระ ผิว (Zhang, 2007) การกัดของบล็อกอะลูมิเนียมด้วยการใช้การเพิ่มประสิทธิภาพของการขัดผิว ด้วยวิธี Taguchi (Mannaa, 2013) ความสามารถในการแปรรูปของ Al / SiC MMC ตรวจสอบ ความเร็วสูงที่ระดับต่ำทั้งในอัตราการป้อนและความลึกของการตัดเพื่อให้ผิวสำเร็จดีขึ้น (Doddapattar, 2012), Narayana และคณะ (Narayana, 2013) ใช้วิธี Taguchi ศึกษาความ ขรุขระผิวได้รับผลกระทบจากพารามิเตอร์ของการตัดบน Al-7050 ในการเปิดปัจจัยที่มีอัตราการ ป้อนที่มีอิทธิพลต่อความขรุขระพื้นผิวโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เป้าหมายของ งานที่ต้องการการลดแรงในการตัดและปรับปรุงคุณภาพผิวด้วยวิธีการที่เหมาะสม ทำการออกแบบ การทดลอง (DOE) ปัจจัยของกลางของปกติการทดลองปกติจะใช้ในการเรียกใช้และการตอบกลับ ในบางครั้ง DOE มีความซับซ้อนสูญเสียเวลาค่าใช้จ่ายและใช้งานยาก ยิ่งทดลองใช้มากขึ้นเมื่อมี ปัจจัยจำนวนมากขึ้นและต้องดำเนินการมากขึ้น ดังนั้นการแก้ปัญหาในงานวิศวกรรมวิธีการ ออกแบบการทดลองของทากูจิจึงใช้กันอย่างแพร่หลายในคลาสสิกแบบหลายมิติของ DOE (Ilzarbe, 2008) ประโยชน์ของการออกแบบการทดลอง (DOE) คือการปรับปรุงกระบวนการ ปรับปรุงผลกำไรและผลตอบแทนจากการลงทุนเพิ่มความสามารถของกระบวนการปรับปรุงลด กระบวนการลดต้นทุนการผลิตการออกแบบกระบวนการและลดเวลาในการพัฒนาเพิ่มความ เข้าใจเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่าง s) ฯลฯ (J., 2003) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เป็นเครื่องมือทางสถิติสำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์รวมกันมากขึ้นก็สามารถค้นหา ความสัมพันธ์ของสองกลุ่มหรือมากกว่ากลุ่มของข้อมูล (Ribeiro, 2017; Tebassi, 2017) ที่ดีขึ้น ของพื้นผิวได้รับผลกระทบจากความลึกต่ำตัด และอัตราการป้อนที่ตรวจสอบโดย (Doddapattar, 2012; Sasimurugan, 2011), (Pragnesh, 2013) ใช้ ANOVA สำหรับการดำเนินการตาม กระบวนการ (Gulhane, 2013) แสดงให้เห็นว่าความขรุขระของพื้นผิวได้รับผลกระทบจากอัตรา ป้อนมากกว่าความเร็วตัดด้วยวิธี Taguchi (Mannaa, 2013; Narayana, 2013)

สรุปบทประพันธ์วรรณกรรม

จากเอกสารงานวิจัย ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับขนาดของสไลเดอร์เพิ่มเติมที่เหมาะสมและทำการเทียบเคียงกันขนาดของสไลเดอร์ฟิโค สไลเดอร์เพิ่มเติมจะมีความไวในการบินมากกว่า ซึ่งการออกแบบส่วนโค้งของหน้า ABS จะมีผลอย่างมากในขณะทำการบินบนแผ่นดิสก์ ในกระบวนการตัด สไลเดอร์ขนาดเกรนของเพชรมีผลกับการตัด รวมถึงความเร็วป้อน คุณภาพในการตัดขึ้นอยู่กับ การประดิษฐ์ใบตัดและเนื้อเพชรในใบตัด แต่การสึกหรอของใบตัดก็ส่งผลกับคุณภาพในการตัดด้วย การสันนิษฐานทำการตัดก็มีผลการคุณภาพในการตัด และมีการศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมในการตัด สไลเดอร์ด้วยความเร็วรอบ 8,500 รอบต่อนาที ทิศทางการตัดจากด้านซ้าย (ด้าน ดิโปลิชั่น) เข้าไป การใช้ล้อยืดระยะที่มีความแข็งแรงสูงเป็นพิเศษกับเหล็กผสมต่ำและไม่ใช้ ELID สามารถทำนายความหยาบผิวได้และได้ Ra 10 nm ใช้ Minitab ในการแยกแยะความแตกต่างของสภาพผิวหลังการเจียระไน การตัดสไลเดอร์ด้วยวิธีตั้งสไลเดอร์บาร์นั้นใช้แรงที่น้อยและมีการเปลี่ยนแปลงหลังการตัดน้อยที่สุด การใช้น้ำยาหล่อเย็นจะช่วยลดแรงในการเจียระไนที่อัตราป้อนที่สูงและช่วยปรับปรุงความหยาบผิวด้วย

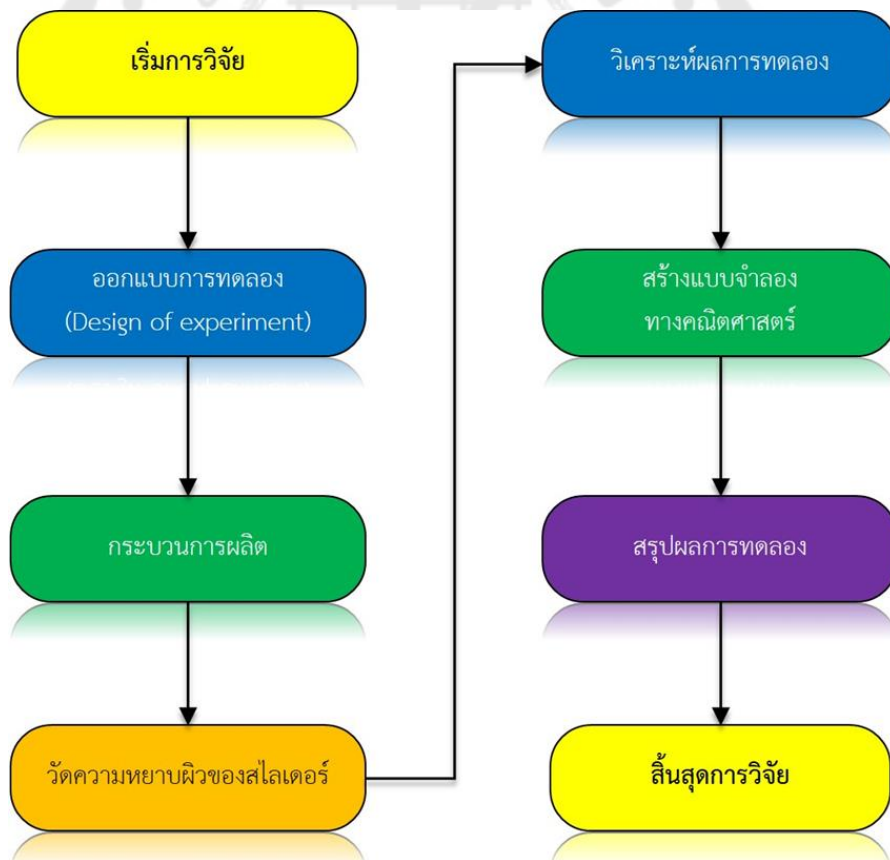
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยฉบับนี้จะทำการทดลองด้วยการใช้เครื่องตัดที่มีความแม่นยำสูงในการทดลอง และทำการตัดด้วยใบตัดเพชรที่มีส่วนผสมของขนาดเม็ดเกรนขนาดที่เล็กมากๆ จากนั้นนำสไลด์เตอร์ที่ได้มาทำการวัดค่าความหยาบผิวด้วยเครื่อง AFM

ขั้นตอนการทดลอง

ในการทำวิจัยนี้จะเริ่มจากการออกแบบการทดลอง ทำการทดลอง วัดความหยาบผิว การวิเคราะห์ผลการทดลอง การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองเพื่อยืนยันผล เพื่อเปรียบเทียบการทำนายกับผลของการทดลอง และสรุปผล ดังภาพประกอบ 15

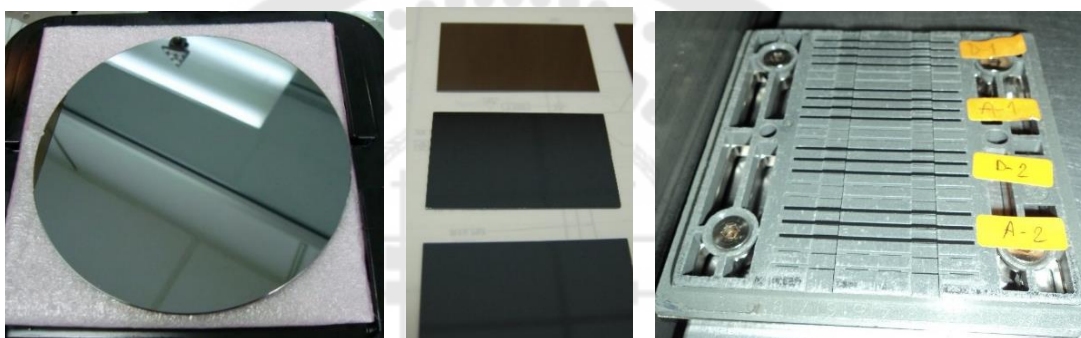


ภาพประกอบ 15 ขั้นตอนการทดลอง

วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

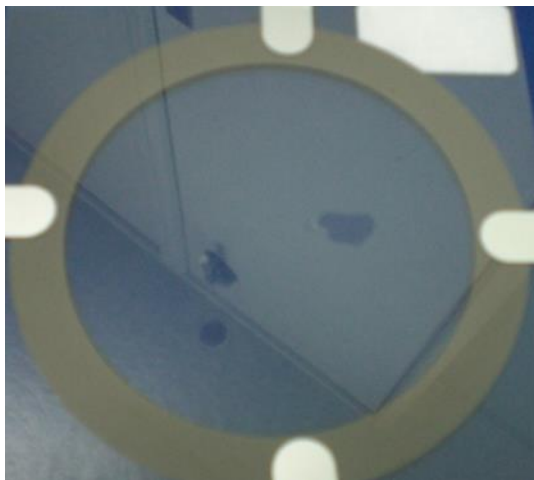
วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

แผ่นเวเฟอร์เป็นวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 203 mm (8 นิ้ว) ความหนา 1.254 mm ที่มีการปลูกวงจรรีเลย์ทรานซิสต์ที่ผิวหน้าของวัสดุผสมเรียบร้อยแล้ว ดังภาพประกอบ 16 โดยที่ชิ้นงานถูกตัดแบ่งจากแผ่นเวเฟอร์ตามกรรมวิธีการตัดให้มีขนาด 14.326 mm x 50.4 mm เรียกว่า “เซ็กชั่น” (Section) จากนั้นนำแผ่นเซ็กชั่นมาตัดให้ได้แผ่นบางที่มีขนาด 1,254 mm x 46.07 mm x 0.18 mm โดยชิ้นงานนี้เรียกว่า “สไลเดอร์บาร์” (Slider bar) และสไลเดอร์เดอร์บาร์นี้ไปทำการทดลอง



ภาพประกอบ 16 แผ่นเวเฟอร์, ชิ้นงานที่ถูกตัดแบ่งออกเป็นส่ว, และสไลเดอร์บาร์

ใบตัดที่ผลิตมาเป็นพิเศษมีส่วนผสมของเม็ดเพชรที่มีขนาดอนุภาค 8000 mesh และ 10,000 mesh ใช้โลหะผสมนิเกิลเป็นตัวผสมเป็นตัวประสาร สำหรับตัดเจียร์ไน ดังภาพประกอบ 17 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกเท่ากับ 114.3 mm เส้นผ่านศูนย์กลางในขนาด 88.9 mm และมีความหนาของใบตัดเจียร์ไนเท่ากับ 0.156 mm



ภาพประกอบ 17 ใบตัดเพชรชนิดพิเศษสำหรับการตัดเจียร์ไน

หินสำหรับลับใบตัดเพชร (Dresser) ทำมาจากอะลูมินาสีขาว (White alumina) ที่มีขนาดเม็ดอนุภาค 3000 mesh ดังภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 หินสำหรับลับใบตัดเพชร

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องตัดและเจียร์ไนแผ่นเวเฟอร์ (Slicing and grinding machine)

เครื่องตัดและเจียร์ไนแผ่นเวเฟอร์ ดังภาพประกอบ 19 เป็นเครื่องตัดที่มีแม่นยำในการตัดที่ค่อนข้างสูง โดยรับชิ้นงานจากกระบวนการผลิตตัดและแบ่งมีขนาดชิ้นงานเท่ากับ 1×2

นิ้ว และเครื่องตัดและเจียระไนนี้จะทำการเจียระไนและตัดให้มีขนาดเท่ากับสไลเดอร์บาร์ที่ต้องการ คือ $1.253 \times 46.07 \times 0.18$ mm เพื่อไปทำกระบวนการต่อไป



ภาพประกอบ 19 เครื่องตัดและเจียระไนแผ่นเวเฟอร์

เครื่องตัดแบ่งสไลเดอร์ (Head parting machine)

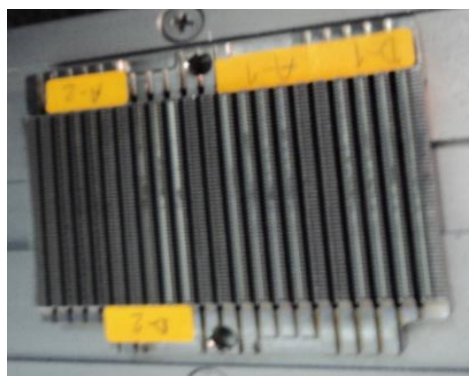
เครื่องตัดชิ้นงานในรูปแบบแท่ง ดังภาพประกอบ 20 เป็นเครื่องตัดที่มีแม่นยำสูง โดยรับชิ้นเป็นสไลเดอร์บาร์ที่มี ขนาด $1.253 \times 46.07 \times 0.18$ mm เพื่อทำการตัดให้เป็นสไลเดอร์ โดยมีขนาดที่ต้องการคือ $0.701 \times 1.253 \times 0.18$ mm



ภาพประกอบ 20 เครื่องตัดแบ่งสไลด์เดอร์ที่มีความแม่นยำสูง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการจับยึดชิ้นงาน (Fig Fixure)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับยึดชิ้นงาน โดยการนำเอาสไลด์เดอร์บาร์มาทำการติดกับอุปกรณ์จับยึดนี้ด้วยการร้อยและนำไปติดตั้งกับอุปกรณ์บนเครื่องตัดสไลด์เดอร์ อุปกรณ์นี้สามารถบรรจุสไลด์เดอร์บาร์ได้ถึง 22 สไลด์เดอร์บาร์/อุปกรณ์ ดังภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสไลด์เดอร์บาร์ เพื่อสำหรับตัดให้เป็นตัวสไลด์เดอร์

เครื่องสำหรับวัดแรง 3 แกน (Three Forcing measurement)

เป็นเครื่องที่ใช้สำหรับการวัดแรงในขณะตัดชิ้นงาน โดยเครื่องนี้จะสามารถวัดพร้อมกันทั้งแกน x , y , และ z และสามารถนำค่าที่ได้มาสร้างเป็นกราฟเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป



ภาพประกอบ 22 เครื่องสำหรับวัดแรง 3 แกน และอุปกรณ์ต่อพ่วงของเครื่องสำหรับวัดแรง 3 แกน

เครื่องมือสำหรับการวัดค่าความหยาบผิว (Atomic Force Microscopy)

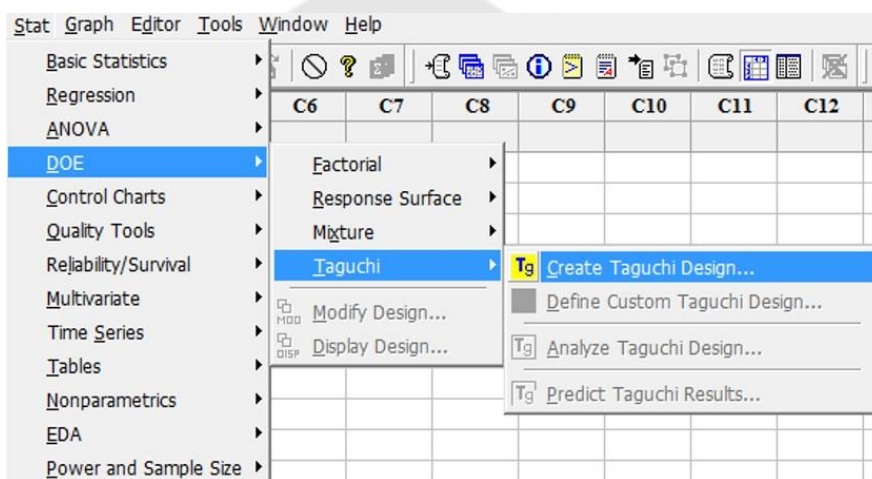
ภาพประกอบ 23 เป็นเครื่องมือสำหรับใช้วัดความหยาบผิวหลังจากกระบวนการตัดสไลเดอร์ โดยจะมีการวัดบริเวณพื้นที่ที่ต้องการ แสดงผลเป็นรูปพื้นผิวและค่าความหยาบผิวเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป



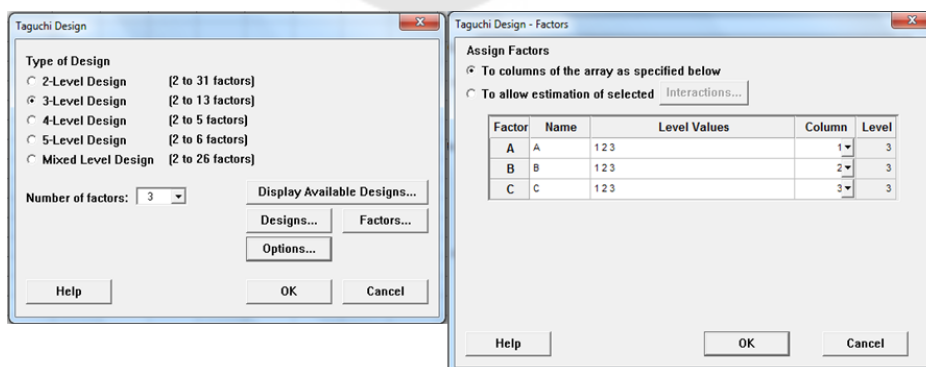
ภาพประกอบ 23 เครื่องวัดความหยาบผิว AFM

การออกแบบการทดลอง

จากตัวแปรที่ต้องการศึกษาหาผลกระทบในกระบวนการตัดมีด้วยกัน 3 ตัวแปรคือ ความเร็วรอบในการตัด (Spindle speed, rpm), อัตราป้อน (Feed rate, mm/min), และความลึกในการตัด (Depth of cutting) ด้วยขนาดเม็ดเกรนของใบตัด (Blade grit size) 2 ชนิด ซึ่งการออกแบบการทดลอง (Design of experiment, DOE) ใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการออกแบบโดยใช้วิธีทาคุชิ (Taguchi method) โดยมี 3 factors 3 levels และกำหนดวิธีการทดลอง L9 Orthogonal array ภาพประกอบ 24 – 26



ภาพประกอบ 24 การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab



ภาพประกอบ 25 การเลือก Factor และ level ในโปรแกรม Minitab

Taguchi Design	C1	C2	C3
	Vs	Vf	D
Taguchi Orthogonal Array Design	1	1	1
L9(3**3)	1	2	2
	1	3	3
Factors: 3	2	1	2
Runs: 9	2	2	3
	2	3	1
Columns of L9(3**4) Array	3	1	3
	3	2	1
1 2 3	3	3	2

ภาพประกอบ 26 ผลลัพธ์ของการออกแบบการทดลอง

ผลจากการออกแบบการทดลองซึ่งใช้ Taguchi design โดยมี 3 ตัวแปร (Factor), และ 3 ระดับ (Level) สามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 9 การทดลอง ดังตาราง 2

ตาราง 2 ตารางการออกแบบการทดลอง Cord และ uncorded

Experimental	Vs	Vf	D	Vs: Spindle speed (rpm)	Vf: Feed rate (mm/min)	D: Depth of cut (mm)
1	1	1	1	9000	50	1.50
2	1	2	2	9000	75	1.75
3	1	3	3	9000	100	2.00
4	2	1	2	10000	50	1.75
5	2	2	3	10000	75	2.00
6	2	3	1	10000	100	1.50
7	3	1	3	12000	50	2.00
8	3	2	1	12000	75	1.50
9	3	3	2	12000	100	1.75

การทดลอง

ก่อนทำการทดลองควรทำการตรวจความพร้อมของเครื่องตัด, เครื่องมือวัดแรง, อุปกรณ์จับยึด, ชิ้นงานที่จะนำมาตัดต้องทำการติดกับ Fixture โดยต้องแน่ใจว่าขณะที่ทำการทดลองจะต้องไม่มีตัวงานหลุดออกมาจาก fixture เพราะชิ้นงานดังกล่าวจะทำให้ใบตัดเกิดความเสียหายได้

การเตรียมชิ้นงานอะลูมิเนียมอัลลอยด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

จากแผ่นเวเฟอร์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 201 mm นำมาตัดและขัดให้มีขนาด $1.245 \times 46.07 \times 0.18$ mm ทำการยึดติดชิ้นงานกับฟิกเจอร์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C โดยใช้การความร้อนแบบซีฟี่ ทำการคลายความร้อนด้วยอุณหภูมิห้อง (25°C)

การเตรียมเครื่องตัดสำหรับอะลูมิเนียมอัลลอยด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

การติดตั้งใบตัดเพชร (Diamond blade) บนมอเตอร์ (Spindle motor) และทำการสมดุลใบตัดเพชรกับเครื่องตัดด้วยเครื่องสมดุล (Balancing) จากนั้น ติดตั้งหินลับ (Dresser) และทำการลับใบตัดด้วยเงื่อนไข ความเร็วรอบของมอเตอร์ 8,500 rpm, ความลึก 2 mm และ อัตราป้อน 1 mm/s 40 รอบ พร้อมด้วยน้ำยาหล่อเย็น 7.62 ลิตรต่อนาที

การวัดแรงตัดของอะลูมิเนียมอัลลอยด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

การติดตั้งเครื่องวัดแรง 3 แกนบนโต๊ะทำงานในเครื่องตัดทำการต่อสายสัญญาณจากเครื่องวัดแรง (Kistler, 9257BA) กับชุดควบคุม (Control unit, 5233A1) และต่อไปยัง A/D board ที่คอมพิวเตอร์ เครื่องวัดแรงนี้จะสามารถวัดแรงได้เป็น 3 แกน มีแกน x, y, และ z จากนั้นจะส่งสัญญาณไปที่คอมพิวเตอร์ เพื่อเก็บค่าแรงตัดและประมวลผล

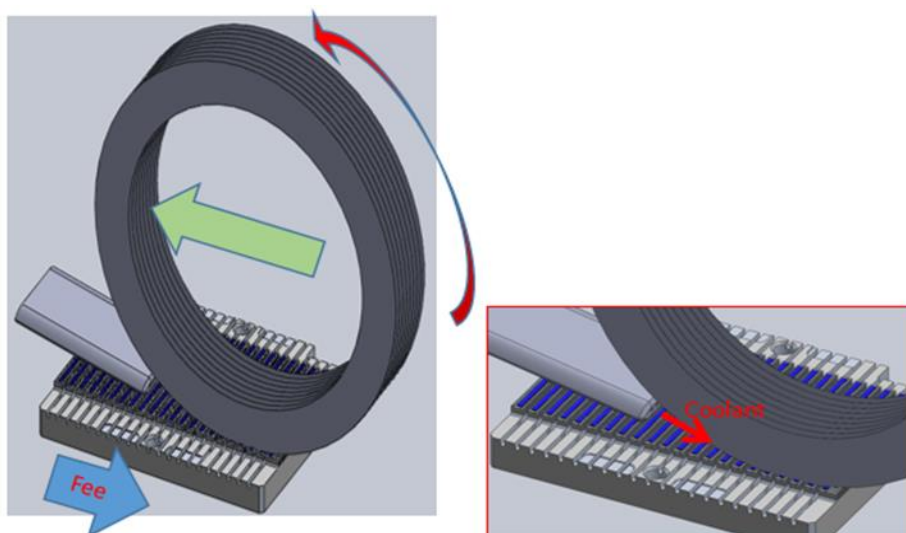
การวัดความหยาบของผิว

สไลเดอร์ที่ผ่านการตัดมีขนาด 0.7 mm (กว้าง) $\times$ 1.254 mm (ยาว) $\times$ 0.18 mm (หนา) มาวัดความหยาบผิวด้านข้างทั้ง 2 ด้าน (ด้านซ้ายและด้านขวาเมื่อหันด้าน ABS ขึ้น) ด้วยการสุ่มด้านละ 5 จุด ขนาดพื้นที่ 10×10 ไมโครเมตรแล้วเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness average, Ra) ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของรากกำลังสอง (Root mean square, RMS or Rq) และค่าความหยาบผิวความลึกสูงสุดของร่องความหยาบ (Maximum roughness, Rmax)

กระบวนการตัดสไลเดอร์บาร์

ในการตัดสไลเดอร์บาร์ให้เป็นสไลเดอร์นั้นต้องใช้เครื่องตัดที่มีความแม่นยำสูง และใช้ใบตัดที่มีความเสถียรด้วย เงื่อนไขในการตัดสไลเดอร์บาร์ที่มีความเหมาะสมจะช่วยลดการสูญเสียของชิ้นงาน เช่น การแตก การบิ่น การร้าวของชิ้นงาน เป็นต้น ความเร็วรอบที่สูงจะมีผลกับ

คุณภาพของผิว {Asawarungsaengkul, 2002 #6} ซึ่งในกระบวนการตัดสไลเดอร์บาร์นี้เป็นการตัดแบบเปียกคือมีการใช้น้ำหล่อเย็นตลอดกระบวนการนี้ ดังภาพประกอบ 27



ภาพประกอบ 27 การตัดสไลเดอร์บาร์ให้เป็นสไลเดอร์

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

- 1.วิเคราะห์ความหยาบผิวของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์กับเงื่อนไขในการตัด
- 2.วิเคราะห์แรงในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์กับแต่ละเงื่อนไขในการตัด
- 3.สร้างสมการทางคณิตศาสตร์ของความหยาบผิวกับเงื่อนไขการตัดวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์
- 4.สร้างสมการทางคณิตศาสตร์ของแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์กับเงื่อนไขการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ผลการศึกษาทดลองกระบวนการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ตัวแปรที่ต้องการศึกษา ชนิดของเม็ดอนุภาคของใบตัด ความเร็วรอบในการตัด และอัตราป้อนในการตัด ที่ส่งผลกับแรงในการตัดและความหนาผิว โดยจะมีผลดังต่อไปนี้

ผลการศึกษาแรงที่กระทำของกระบวนการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

ผลการทดสอบพบว่า แรงที่ใช้ในการตัดเฉลี่ยอยู่ในระหว่าง 18 – 23 N และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 2.5 – 5.8 N โดยแรงที่ใช้ต่ำสุดเฉลี่ย 18.605 N ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 4.992 N จากใบตัดที่มีขนาดเม็ดอนุภาค SD8000 ที่ความเร็วรอบในการตัด 9,000 rpm และอัตราป้อนในการตัด 50 mm/นาที และความลึกในการตัด 1.50 mm ส่วนแรงที่ใช้ในการตัดสูงสุดเฉลี่ย 23.580 N ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2.559 N ที่ใช้ใบตัดที่มีขนาดเม็ดอนุภาค SD10000 ที่ความเร็วรอบในการตัด 9,000 rpm กับอัตราป้อนในการตัด 100 mm/นาที และความลึกในการตัด 1.75mm ดังภาพประกอบ 28

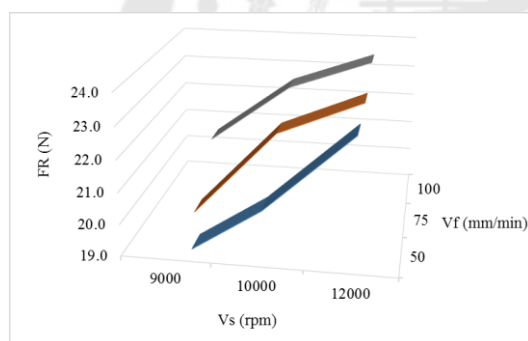


ภาพประกอบ 28 ผลของแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

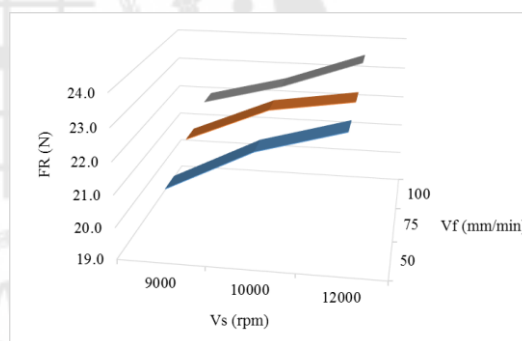
การวิเคราะห์แรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

ผลการทดลองพบว่า แรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียม ออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ การเพิ่มอัตราป้อนส่งผลให้แรงในการตัดแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อมีการเพิ่มความเร็วยรอบในการตัดทั้งใบตัดชนิด SD8000 และ SD10000 ในขณะที่แรงที่ใช้ในการตัดของใบตัดชนิด SD8000 จะมีความชันของกราฟที่สูงกว่าชนิดใบตัด SD10000 ภาพประกอบ 29 แสดงถึงความคมของใบตัดเพชรในขณะตัดและแรงต้านทานการตัด (Mannaa, 2013)

ที่อัตราป้อน 50 mm/min แรงที่ใช้ในการตัดมีความแตกต่างค่อนข้างสูงเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบในการตัดของใบตัดชนิด SD8000 เมื่อเปรียบเทียบกับใบตัดชนิด SD10000 อัตราป้อน 75 mm/min มีแนวโน้มคล้ายกันระหว่างใบตัดชนิด SD8000 และ SD 10000 ขณะที่อัตราป้อน 100 mm/min แรงที่ใช้ในการตัดก็มีแนวโน้มสูงขึ้นเช่นกันเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเร็วยรอบในการตัด

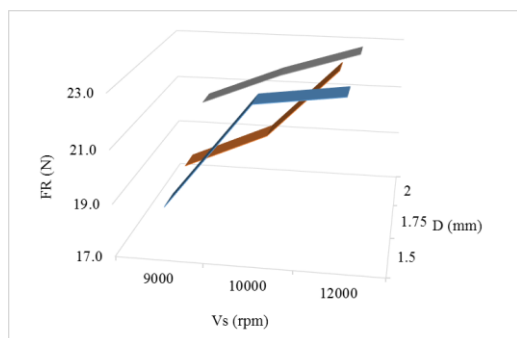


(ก) ใบตัดชนิด SD8000

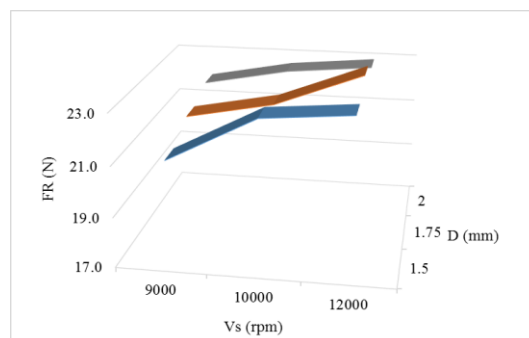


(ข) ใบตัดชนิด SD10000

ภาพประกอบ 29 แรงที่ได้จากการตัดสไลเดอร์บาร์ ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์กับความเร็วยรอบและอัตราป้อนในการตัด



(ก) ไบต์ชนิด SD8000



(ข) ไบต์ชนิด SD10000

ภาพประกอบ 30 แรงที่ได้จากการตัดสไลเดอร์บาร์ ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์กับความเร็วยรอบในการตัดและความลึกในการตัด

การวิเคราะห์แรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ความเร็วยรอบในการตัดและความลึกในการตัด ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มความลึกและความเร็วยรอบในการตัดส่งผลทำให้แรงในการตัดมีแนวโน้มสูงขึ้นทั้งไบต์ชนิด SD8000 และ SD10000 ในขณะที่แรงที่ใช้ในการตัดของไบต์ชนิด SD8000 จะมีความชันของกราฟที่สูงกว่าชนิดไบต์ SD10000 ภาพประกอบ 30 แสดงถึงความคมของไบต์เพชรในขณะตัดและแรงต้านทานการตัด (Mannaa, 2013)

ที่ความลึกในการตัด 1.50 mm แรงที่ใช้ในการตัดมีการเพิ่มขึ้นสูงเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบในการตัดของไบต์ชนิด SD8000 เมื่อเปรียบเทียบกับไบต์ชนิด SD10000 ที่ความลึก 1.75 mm, แนวโน้มของความชันกราฟคล้ายกันกับความลึกที่ 1.50 mm ขณะที่ความลึก 2.00 mm แรงที่ใช้ในการตัดก็มีแนวโน้มสูงขึ้นเช่นกันเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเร็วยรอบในการตัด โดยที่ไบต์ชนิด SD8000 มีความชันของกราฟมากกว่าไบต์ชนิด SD10000 ดังภาพประกอบ 30

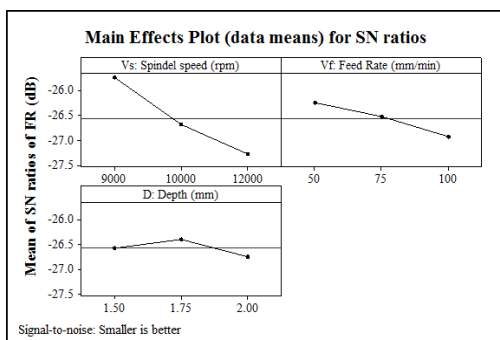
การวิเคราะห์แรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยอัตราส่วน SN

การวิเคราะห์แรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยอัตราส่วน S/N ตาราง 4 ได้จากการใช้สูตร (19) คำนวณหาค่า S/N

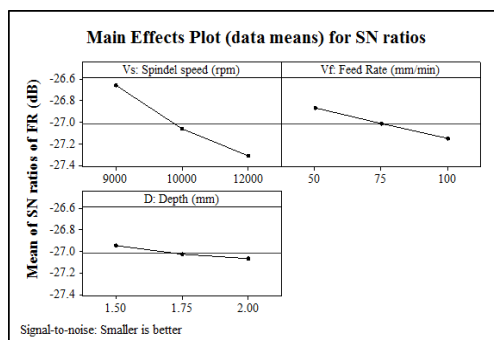
ตาราง 3 ผลการทดลองและอัตราส่วน S/N ของแรงที่ใช้ในการตัดสไลด์เคอร์บาร์ ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

Run no.	Vs	Vf	D	SD8000	SN ratio of SD8000	SD10000	SN ratio SD10000
1	1	1	1	18.605	-25.3926	20.963	-26.4291
2	1	2	2	18.985	-25.5682	21.587	-26.6838
3	1	3	3	20.576	-26.2672	22.016	-26.8548
4	2	1	2	20.384	-26.1858	22.253	-26.9478
5	2	2	3	21.854	-26.7906	22.670	-27.1090
6	2	3	1	22.569	-27.0702	22.765	-27.1454
7	3	1	3	22.855	-27.1796	22.986	-27.2293
8	3	2	1	22.986	-27.2293	23.058	-27.2564
9	3	3	2	23.544	-27.4376	23.580	-27.4509

ภาพประกอบ 31 แสดงกราฟของอัตราส่วน S/N ของการตัดสไลด์เคอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ กับตัวแปรที่ส่งผลใช้แรงในการตัด



(ก) ไบต์ดชนิด SD8000



(ข) ไบต์ดชนิด SD10000

ภาพประกอบ 31 การวิเคราะห์ผลกระทบหลัก ของอัตราส่วน S/N ของแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

ตาราง 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ของไบต์ดชนิด SD8000 กับแรงในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

Source	DOF	Diamond blade type SD8000				
		Sum of Square	Mean of Square	F-ratio	P-value	% contribution
Vs	2	21.214	10.607	499.22	0.002	81.25
Vf	2	3.956	1.978	93.09	0.011	15.15
D	2	0.9389	0.469	22.09	0.043	3.60
Error	2	0.0425	0.021			
Total	8	26.151				100%

ตาราง 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของใบตัดชนิด SD10000กับแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

Source	DOF	Diamond blade type SD10000				
		Sum of Square	Mean of Square	F-ratio	P-value	% contribution
Vs	2	4.342	2.171	1359.63	0.001	82.58
Vf	2	0.777	0.389	243.34	0.004	14.78
D	2	0.139	0.070	43.51	0.022	2.64
Error	2	0.003	43.51			
Total	8	5.261				100%

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแรงในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ พบว่าอิทธิพลที่ส่งผลกับแรงในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์คือ ความเร็วรอบ (Vs) ผลถึง 81.25%, อัตราป้อน (Vf) ที่ 15.15% และความลึกในการตัดมีผลกับแรงในการตัดที่ 3.60% ของใบตัดชนิด SD8000 ที่ $R^2 = 99.8\%$ และ $R^2_{adj} = 99.4\%$ ด้วยความเชื่อมั่น 95% ในตาราง 4 ขณะที่ใบตัดชนิด SD10000 มีอิทธิพลในการตัดคือ ความเร็วรอบในการตัดที่ 82.58%, อัตราป้อน (Vf) ที่ 14.78% และความลึกในการตัดมีผลกับแรงในการตัดที่ 2.64% ที่ $R^2 = 99.9\%$ และ $R^2_{adj} = 99.8\%$ ด้วยความเชื่อมั่น 99.9% ในตาราง 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราส่วน S/N สำหรับแรงในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ และตาราง 6 การวิเคราะห์ผลค่ากลางของแรงในการตัดแสดงผลในแนวทางเดียวกันคือ อัตราป้อน (Vf) อันดับแรก, ชนิดของใบตัด และความเร็วรอบในการตัด (Vs) ตามลำดับ

ตาราง 6 การวิเคราะห์การจัดลำดับของอิทธิพลที่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

Level	Mean of SD8000			Mean of SD10000		
	Vs	Vf	D	Vs	Vf	D
1	19.39	20.61	21.39	21.52	22.07	22.26
2	21.60	21.28	20.97	22.56	22.44	22.47
3	23.13	22.23	21.76	23.21	22.79	22.56
Delta	3.74	1.61	0.79	1.69	0.72	0.030
Rank	1	2	3	1	2	3

การหาความเหมาะสม ของแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

จากผลการทดลองในตาราง 4 แผนภาพกราฟอัตรา S/N ของแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่มีความแน่นอนสูง แสดงในภาพประกอบ 31 (ก) พบ Vs1Vf1D2 ของไบต์ชนิด SD8000 และ Vs1Vf1D1 ของไบต์ชนิด SD10000 จากภายใต้เงื่อนไขการตัดงานที่เหมาะสมที่ค่าน้อยที่สุดสามารถคำนวณจากสมการ (12) – (13):

$$A_{3SD8000} = 19.39 \text{ N (จากตาราง 6)}, B_{1SD8000} = 20.61 \text{ N (จากตาราง 6)}, \\ T_{meanSD8000} = 21.373 \text{ N (คำนวณจากตาราง 6)}$$

$$\mu_{SD8000} = A_x + B_x - T_{mean} = 19.39 + 20.61 - 21.373 = 18.627 \text{ N}$$

$$F = 18.51282 \text{ ได้จากตาราง F, } V_{err} = 0.021 \text{ จากตาราง 4.2, } n_{eff} = 9/(1+2+2) \\ = 1.8$$

$$CI_{SD8000} = \mu \pm \sqrt{\frac{F_{95\%,1,2} V_{err}}{n_{eff}}} = 18.627 \pm \sqrt{\frac{18.51282 \times 0.021}{\frac{9}{1+2+2}}}$$

$$= 18.627 \pm 0.14 \text{ N}$$

ผลจากการคำนวณพบว่า ค่าแรงที่กระทำในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสม อะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ของใบตัดชนิด SD8000 จะมีค่าเท่ากับ $18.479 \leq 18.627 \leq 18.775 \text{ N}$

จากภาพประกอบ 31 (ข) ใบตัดชนิด SD10000 พบว่ามีตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลกระทบบกกับแรงในการตัดคือ Vs1Vf1D1 ภายใต้เงื่อนไขการตัดงานที่เหมาะสมที่ค่าน้อยที่สุดสามารถคำนวณจากสมการ (12) – (13):

$$A_{1SD10000} = 21.52 \text{ N (จากตาราง 6)}, B_{1SD10000} = 22.07 \text{ N (จากตาราง 6)}, \\ T_{meanSD10000} = 22.431 \text{ N (คำนวณจากตาราง 6)}$$

$$\mu_{SD10000} = A_x + B_x - T_{mean} = 21.52 + 22.07 - 22.431 = 21.159 \text{ N}$$

$$F = 18.51282 \text{ ได้จากตาราง F, } V_{err} = 0.0016 \text{ จากตาราง 4.2, } n_{eff} = 9/(1+2+2) = 1.8$$

$$CI_{SD8000} = \mu \pm \sqrt{\frac{F_{95\%,1.2} V_{err}}{n_{eff}}} = 21.159 \pm \sqrt{\frac{18.51282 \times 0.0016}{1.8}} \\ = 21.159 \pm 0.128 \text{ N}$$

ผลจากการคำนวณพบว่า ค่าแรงที่กระทำในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสม อะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ของใบตัดชนิด SD10000 จะมีค่าเท่ากับ $21.031 \leq 21.159 \leq 21.287 \text{ N}$

การหาสมการเชิงคณิตศาสตร์ของแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสม อะลูมิเนียม ออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

จากผลการทดลองในตาราง 4 สามารถสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรในการตัด เช่น ความเร็วรอบ, อัตราป้อน และ ความลึกในการตัด วัสดุอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วย

สมการการถดถอย (Regression equation) โดยการใช้โปรแกรม Minitab ดังสมการ (14) และ (15)

จากสมการ (22) เป็นสมการของใบตัดชนิด SD8000 ซึ่งมีค่า $S = 0.723496$, $R^2 = 90.0\%$, และ $R^2_{adj} = 84.0\%$ ในขณะที่สมการ (23) ของใบตัดชนิด SD10000 มีค่า $S = 0.30114$, $R^2 = 91.4\%$, และ $R^2_{adj} = 86.2\%$

$$FR_{SD8000} = 5.471 + (0.0011775 * Vs) + (0.0323 * Vf) + (0.75 * D) \quad (22)$$

$$FR_{SD10000} = 14.864 + (0.0005278 * Vs) + (0.01493 * Vf) - (0.5907 * D) \quad (23)$$

ผลการศึกษากระบวนการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ต่อความหยาบผิว

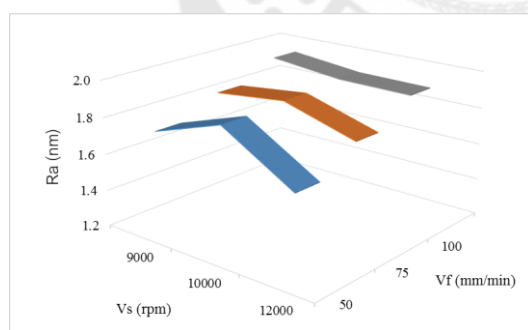


ภาพประกอบ 32 ความหยาบผิวจากการทดลองของการตัดสไลเดอร์บาร์ ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

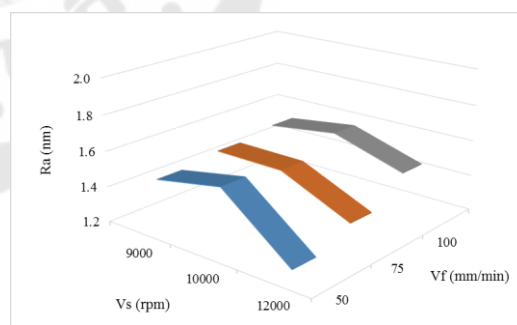
ผลการทดสอบพบว่า ความหยาบผิวจากการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุอะลูมิเนียม อ็อกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยใบตัดเพชรทั้งสองชนิดมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.221 – 1.947 nm และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.099 – 0.114 nm โดยมีค่าความหยาบผิวต่ำสุดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1.221 nm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0499 nm จากการทดลองด้วยการใช้ใบตัดที่มีขนาดเม็ดอนุภาค SD10000 ความเร็วรอบในการตัด 12,000 rpm และอัตราป้อนในการตัด 50 mm/นาที และความลึกในการตัด 2.00 mm ส่วนค่าความหยาบผิวสูงสุดเฉลี่ย 1.947 nm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.110 nm จากการใช้ใบตัดที่มีขนาดเม็ดอนุภาค SD8000 ภายใต้เงื่อนไข ความเร็วรอบในการตัด 9,000 rpm กับอัตราป้อนในการตัด 100 mm/นาที และความลึกในการตัด 2.00 nm ดังภาพประกอบ 32

ผลการวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวของการตัดสไลเดอร์บาร์ ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมอ็อกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

ผลการทดลองพบว่า ค่าความหยาบผิวของการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมอ็อกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ การเพิ่มอัตราป้อนส่งผลให้ค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อมีการเพิ่มความเร็วยรอบในการตัดทั้งใบตัดชนิด SD8000 และ SD10000 มีค่าความหยาบผิวที่ลดลง ในขณะที่ค่าความหยาบผิวรวมของใบตัดชนิด SD8000 มีค่าสูงกว่าค่าความหยาบผิวของใบตัดชนิด SD10000 ดังภาพประกอบ 33



(ก) ใบตัดชนิด SD8000

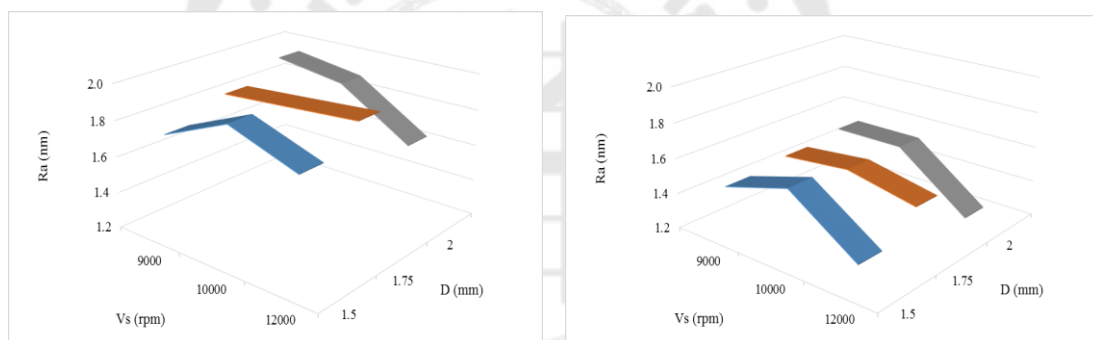


(ข) ใบตัดชนิด SD10000

ภาพประกอบ 33 ความหยาบผิวกับความเร็วยรอบและอัตราป้อนในการตัดสไลเดอร์บาร์ ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมอ็อกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

ที่อัตราป้อน 50 mm/min ค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ ในการตัดทั้งสองชนิดของใบตัดชนิด SD8000 และ SD10000 อัตราป้อน 75 mm/min, มีแนวโน้มลดลงเช่นกันสำหรับใบตัดชนิด SD8000 และ SD10000 ขณะที่อัตราป้อน 100 mm/min ค่าความหยาบผิวของการตัดก็มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบในการตัด

การวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวของการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ความเร็วรอบในการตัดและความลึกในการตัด ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มความลึกและความเร็วรอบในการตัดส่งผลทำให้ความหยาบผิวมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยของใบตัดชนิด SD8000 และ SD10000 มีความหยาบผิวมีแนวโน้มต่ำกว่าใบตัดชนิด SD8000 ดังภาพประกอบ 34 แสดงถึงความหยาบผิวของการตัดวัสดุอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์



(ก) ใบตัดชนิด SD8000

(ข) ใบตัดชนิด SD10000

ภาพประกอบ 34 ความหยาบผิว ของการตัดกับความเร็วรอบในการตัดและความลึก ในการตัด สไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

ที่ความลึกในการตัด 1.50 mm ค่าความหยาบผิวไม่มีการเปลี่ยนแปลงถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มความเร็วรอบในการตัดของใบตัดชนิด SD8000 เมื่อเปรียบเทียบกับใบตัดชนิด SD10000 ค่าความหยาบผิวมีการลดลงเมื่อมีการเพิ่มความเร็วรอบในขณะที่มีความลึกเท่ากัน ที่ความลึก 1.75 mm, ค่าความหยาบผิวแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความเร็วรอบในการตัดของใบตัดชนิด SD8000 ในขณะที่ค่าความลึกของใบตัดชนิด SD10000 มีค่าลดลงเล็กน้อย ขณะที่ความลึก 2.00

mm พบว่ามีค่าความหยาบผิวลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่ใบตัดชนิด SD8000 และ SD10000 ดังภาพประกอบ 34

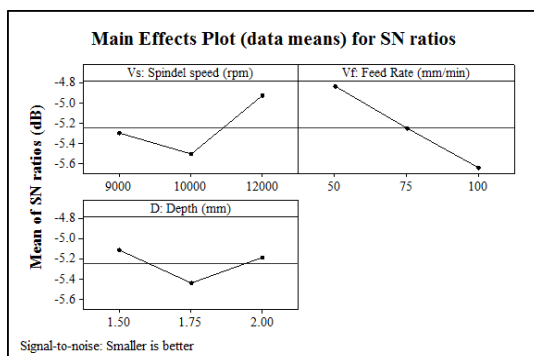
การวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวของการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยอัตราส่วน S/N

การวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวของการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยอัตราส่วน S/N ตาราง 7 ได้จากการใช้สูตร (19) คำนวณหาค่า S/N

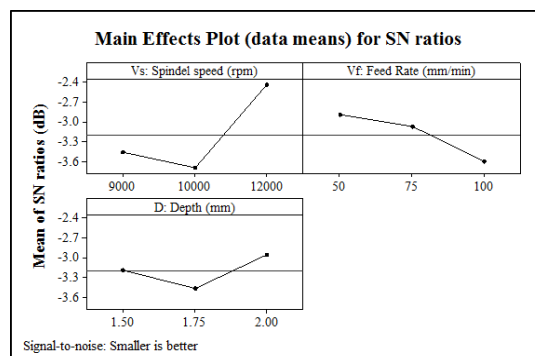
ตาราง 7 ผลการทดลองและอัตราส่วน S/N ของค่าความหยาบผิวของการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียม-ออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

Run no.	Vs	Vf	D	SD8000	SN ratio of SD8000	SD10000	SN ratio SD10000
1	1	1	1	1.739	-4.8060	1.457	-3.2692
2	1	2	2	1.843	-5.3105	1.491	-3.4696
3	1	3	3	1.947	-5.7873	1.525	-3.6654
4	2	1	2	1.870	-5.4368	1.532	-3.7023
5	2	2	3	1.886	-5.5108	1.487	-3.4462
6	2	3	1	1.903	-5.5888	1.576	-3.9511
7	3	1	3	1.635	-4.2704	1.221	-1.7343
8	3	2	1	1.767	-4.9423	1.311	-2.3487
9	3	3	2	1.898	-5.5659	1.450	-3.2274

ภาพประกอบ 35 แสดงกราฟของอัตราส่วน S/N ของการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ การแสดงให้เห็นว่า ทุกๆ ตัวแปรมีอิทธิพลส่งผลกับค่าความหยาบผิวของการตัด



(ก) ไบต์ดชนิด SD8000



(ข) ไบต์ดชนิด SD10000

ภาพประกอบ 35 การวิเคราะห์ผลกระทบหลัก ของความหยาบผิวในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียม-อีพอกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยอัตราส่วน S/N

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับอัตราส่วน S/N ของความหยาบผิวในการตัดสไลเดอร์บาร์

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับอัตราส่วน S/N ของค่าความหยาบผิวในการตัดสไลเดอร์บาร์ พบว่าอิทธิพลที่ส่งผลกับค่าความหยาบผิวของการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมอีพอกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์คือ ความเร็วรอบ (Vs) ผลถึง 30.85%, อัตราป้อน (Vf) ที่ 59.10% และความลึกในการตัดมีผลกับค่าความลึกที่ 10.05% ของไบต์ดชนิด SD8000 ที่ $R^2 = 90.9\%$ และ $R^2_{adj} = 63.5\%$ ด้วยความเชื่อมั่น 95% ในตาราง 8 ในขณะที่ไบต์ดชนิด SD10000 อิทธิพลที่ส่งผลกับความหยาบผิวในการตัดสไลเดอร์บาร์คือ ความเร็วรอบในการตัดที่ 69.45%, อัตราป้อน (Vf) ที่ 21.06 % และความลึกในการตัดมีผลกับค่าความหยาบผิวของการตัดที่ 9.48% ที่ $R^2 = 98.0\%$ และ $R^2_{adj} = 92.2\%$ ด้วยความเชื่อมั่น 95% ในตาราง 9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยสำหรับความหยาบผิวในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุอะลูมิเนียมอีพอกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

ตาราง 8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของใบตัดชนิด SD8000 กับความหยาบผิวของการตัดสไลเดอร์ บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์ - โทเทเนียมคาร์ไบด์

Source	DOF	Diamond blade type SD8000				
		Sum of Square	Mean of Square	F-ratio	P-value	% contribution
Vs	2	0.0221	0.0111	3.07	0.246	30.85
Vf	2	0.0423	0.0211	5.88	0.145	59.10
D	2	0.0072	0.0036	1.00	0.499	10.05
Error	2	0.0072	0.0036			
Total	8	0.0789				100%

ตาราง 9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของใบตัดชนิด SD10000 กับความหยาบผิวของการตัดสไลเดอร์ บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-โทเทเนียมคาร์ไบด์

Source	DOF	Diamond blade type SD10000				
		Sum of Square	Mean of Square	F-ratio	P-value	% contribution
Vs	2	0.0723	0.0351	34.72	0.028	69.45
Vf	2	0.0213	0.0165	10.53	0.087	21.06
D	2	0.0095	0.0048	4.73	0.174	9.48
Error	2	0.0020	0.0010			
Total	8	0.1031				100%

ตาราง 10 แสดงการวิเคราะห์ผลค่ากลางของความหยาบผิวในการตัดสไลเดอร์ บาร์ของใบตัดชนิด SD8000 คือ อัตราป้อน (Vf) อันดับแรก, ความเร็วรอบในการตัด (Vs), และความลึก

ในการตัด ขณะที่การวิเคราะห์ค่ากลางของความหยาบผิวของใบตัดชนิด SD10000 คือ ความเร็วรอบในการตัด (Vs), อัตราป้อน (Vf), และความลึกในการตัด (D) ตามลำดับ

ตาราง 10 การวิเคราะห์การจัดลำดับของอิทธิพลที่มีผล ต่อค่าความหยาบผิว ของการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

Level	Mean of SD8000			Mean of SD10000		
	Vs	Vf	D	Vs	Vf	D
1	1.843	1.748	1.803	1.491	1.403	1.448
2	1.886	1.832	1.870	1.532	1.430	1.491
3	1.767	1.916	1.823	1.327	1.517	1.411
Delta	0.120	0.168	0.067	0.204	0.114	0.080
Rank	2	1	3	1	2	3

การหาความเหมาะสมของค่าความหยาบผิวของการตัดสไลเดอร์บาร์

จากผลการทดลองในตาราง 7 และแผนภาพกราฟอัตราส่วน S/N ของค่าความหยาบผิวของการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่มีความแน่นอนสูง แสดงในภาพประกอบ 35 พบ Vs3Vf1D1 ของใบตัดชนิด SD8000 และ Vs3Vf1D3 ของใบตัดชนิด SD10000 จากภายใต้เงื่อนไขการตัดงานที่เหมาะสมที่ค่าน้อยที่สุดสามารถคำนวณจากสมการ (12) – (13):

$$A_{SD8000} = 1.767 \text{ nm (จากตาราง 10)}, B_{SD8000} = 1.748 \text{ nm (จากตาราง 10)}, \\ T_{meanSD8000} = 1.832 \text{ nm (คำนวณจากตาราง 10)},$$

$$\mu_{SD8000} = A_x + B_x - T_{mean} = 1.767 + 1.748 - 1.832 = 1.683 \text{ nm}$$

$F = 18.51282$ ได้จากตาราง F, $V_{err} = 0.003602$ จากตาราง 8, $n_{eff} = 9/(1+2+2) = 1.8$

$$CI_{SD8000} = \mu \pm \sqrt{\frac{F_{95\%,1,2} V_{err}}{n_{eff}}} = 1.683 \pm \sqrt{\frac{18.5182 \times 0.003602}{1.8}}$$

$$= 1.683 \pm 0.192 \text{ nm}$$

ผลจากการคำนวณพบว่า ค่าความหนาผิวของการตัดสไลด์เดอรับาร์ของอะลูมิเนียมออกไซด์ไทเทเนียมคาร์ไบด์ของไบตซ์ชนิด SD8000 จะมีค่าเท่ากับ $1.491 \leq 1.683 \leq 1.875 \text{ nm}$

ไบตซ์ชนิด SD10000 พบว่ามีตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหนาผิวของการตัดสไลด์เดอรับาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์คือ Vs3Vf1D3 ภายใต้เงื่อนไขการตัดงานที่เหมาะสมที่ค่าน้อยที่สุดสามารถคำนวณจากสมการ (2.12) – (2.13):

$$A_{3SD10000} = 1.327 \text{ nm (จากตาราง 10)}, B_{1SD10000} = 1.403 \text{ nm (จากตาราง 10)},$$

$$T_{meanSD10000} = 1.450 \text{ nm (คำนวณจากตาราง 10)}$$

$$\mu_{SD10000} = A_3 + B_1 - T_{mean} = 1.327 + 1.403 - 1.450 = 1.280 \text{ nm}$$

$F = 18.51282$ จากตาราง F, $V_{err} = 0.002023$ มาจากตาราง 4.5, $n_{eff} = 9/(1+2+2) = 1.8$

$$CI_{SD10000} = \mu \pm \sqrt{\frac{F_{95\%,1,2} V_{err}}{n_{eff}}} = 1.280 \pm \sqrt{\frac{18.5182 \times 0.002023}{1.8}}$$

$$= 1.280 \pm 0.114 \text{ nm}$$

ผลจากการคำนวณพบว่า ค่าความหนาผิวของการตัดสไลด์เดอรับาร์ของอะลูมิเนียมออกไซด์ไทเทเนียมคาร์ไบด์ของไบตซ์ชนิด SD10000 จะมีค่าเท่ากับ $1.136 \leq 1.280 \leq 1.424 \text{ nm}$

การหาสมการเชิงคณิตศาสตร์ของความหยาบผิวของการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

จากผลการทดลองในตาราง 7 สามารถสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรในการตัดสไลเดอร์บาร์ เช่น ความเร็วรอบ, อัตราป้อน และ ความลึกในการตัด ที่ส่งผลกับค่าความหยาบผิวสำหรับการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยสมการการถดถอย (Regression equation) โดยการใช้โปรแกรม Minitab ดังสมการ (14) และ (154)

จากสมการ (24) เป็นสมการของใบตัดชนิด SD8000 ซึ่งมีค่า $R^2 = 70.9\%$, และ $R_{adj}^2 = 53.4\%$ ในขณะที่สมการ (25) ของใบตัดชนิด SD10000 มีค่า $R^2 = 72.0\%$, และ $R_{adj}^2 = 55.2\%$

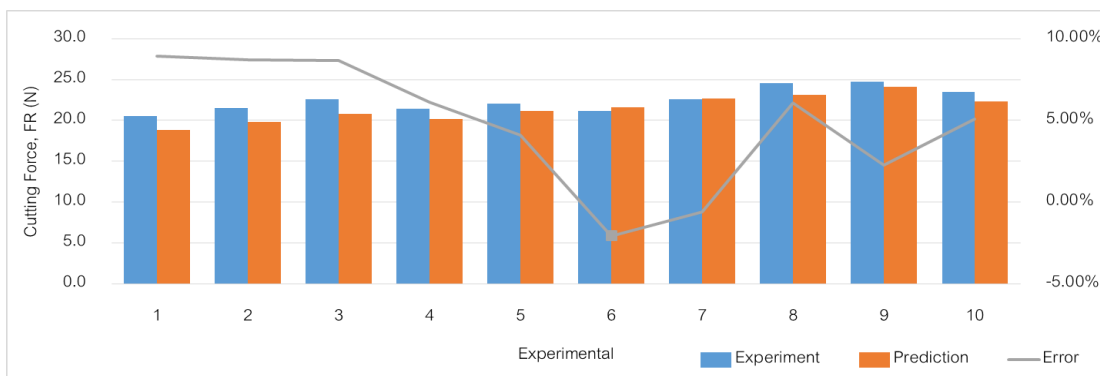
$$Ra_{SD8000} = 1.8248 - (0.00003042 * Vs) + (0.00336 * Vf) + (0.0397 * D) \quad (24)$$

$$Ra_{SD10000} = 2.0426 - (0.0000614 * Vs) + (0.002277 * Vf) - (0.0737 * D) \quad (25)$$

การทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง

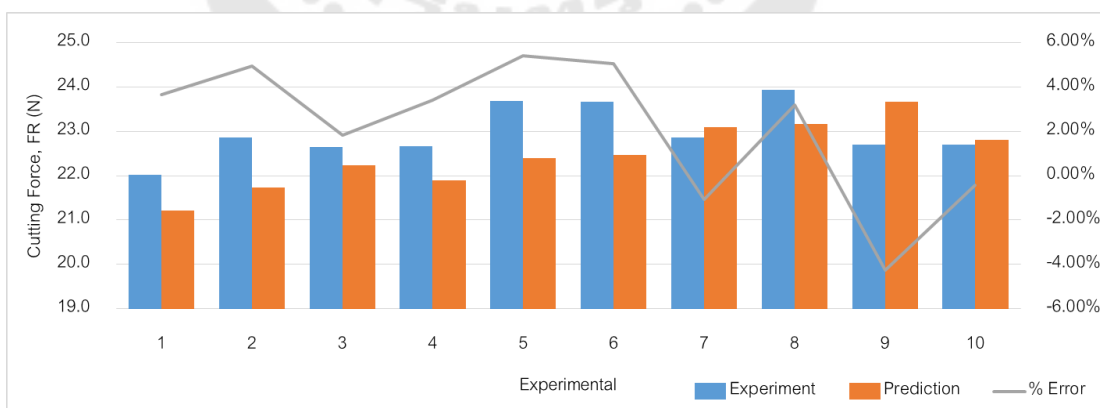
การเปรียบเทียบระหว่างการทดลองกับการทำนาย สำหรับแรงที่ใช้ในกระบวนการตัด สไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

จากการวิเคราะห์และทำการศึกษาสมการเชิงคณิตศาสตร์ โดยได้สมการในการหาค่าแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ดังสมการ (22) และ (23) ที่ใบตัดชนิด SD8000 มีค่าเฉลี่ยของการทดลองเท่ากับ 22.452 N และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.457 N ขณะที่ค่าเฉลี่ยของการทำนายเท่ากับ 21.470 N และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.715 N ทำการคำนวณค่าความผิดพลาดของค่าเฉลี่ย เท่ากับ 4.73% ดังภาพประกอบ 36



ภาพประกอบ 36 การเปรียบเทียบผลการทดลอง และการทำนายของแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์สำหรับใบตัดชนิด SD8000

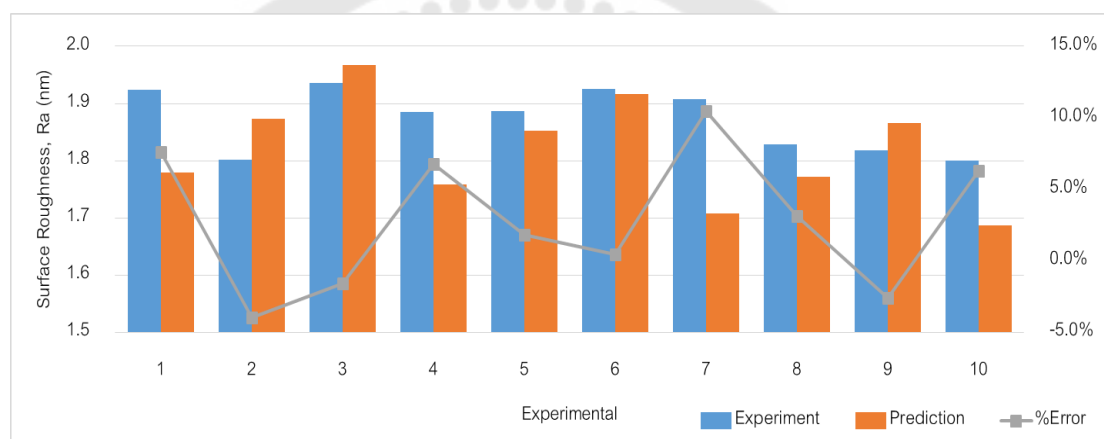
จากภาพประกอบ 37 แสดงเปรียบเทียบการทดลองกับค่าการทำนายของแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ในสมการ (24) และ (25) ของใบตัดชนิด SD10000 มีค่าเฉลี่ยของการทดลองเท่ากับ 22.975 N และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.593 N ขณะที่ค่าเฉลี่ยของการทำนายเท่ากับ 22.468 N และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.740 N ทำการคำนวณค่าความผิดพลาดของค่าเฉลี่ย เท่ากับ 2.20%



ภาพประกอบ 37 การเปรียบเทียบผลการทดลอง และการทำนาย ของแรงที่ใช้ในการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์สำหรับใบตัดชนิด SD10000

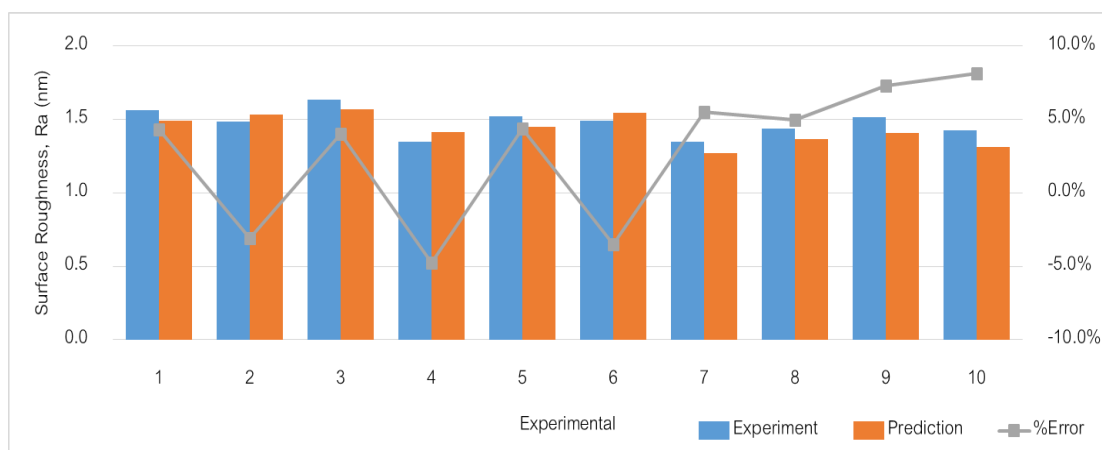
การเปรียบเทียบระหว่างการทดลองกับการทำนาย สำหรับค่าความหยาบผิวของการตัด สไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

จากภาพประกอบ 38 แสดงเปรียบเทียบการทดลองกับค่าการทำนายของค่าความหยาบผิวสำหรับการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ในสมการ (24) และ (25) ของใบตัดชนิด SD8000 มีค่าเฉลี่ยของการทดลองเท่ากับ 1.871 nm และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.054 nm ขณะที่ค่าเฉลี่ยของการทำนายเท่ากับ 1.817 nm และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.09 nm ทำการคำนวณค่าความผิดพลาดของค่าเฉลี่ย เท่ากับ 2.88%



ภาพประกอบ 38 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายความหยาบผิว ของการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์สำหรับใบตัดชนิด SD8000

จากภาพประกอบ 39 แสดงเปรียบเทียบการทดลองกับค่าการทำนายของค่าความหยาบผิวสำหรับการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ในสมการ (24) และ (25) ของใบตัดชนิด SD10000 มีค่าเฉลี่ยของการทดลองเท่ากับ 1.477 nm และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.090 nm ขณะที่ค่าเฉลี่ยของการทำนายเท่ากับ 1.436 nm และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.101 nm ทำการคำนวณค่าความผิดพลาดของค่าเฉลี่ย เท่ากับ 2.77%



ภาพประกอบ 39 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายของความหยาบผิว ของการตัด
สไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์สำหรับไบตัดชนิด SD10000

บทที่ 5

สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ

คอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วงที่ผ่านมาและยังคงพัฒนาอย่างต่อเนื่อง การผลิตฮาร์ดดิสก์ก็มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วควบคู่ไปกับความสามารถของฮาร์ดดิสก์ การควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิตมีความสำคัญต่อกระบวนการผลิต ซึ่งการที่มีคุณภาพตามความต้องการของลูกค้าเป็นการเพิ่มความไว้วางใจและสร้างความมั่นใจในผลิตภัณฑ์ การเพิ่มความสามารถในการแข่งขันในตลาดจึงต้องมีการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ตรงตามความต้องการของตลาด

สรุปผลการทดลอง

1. ค่าแรงที่น้อยที่สุดในการตัดที่เกิดขึ้นในเครื่องตัดอะลูมิเนียมอัลลอยด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ คือ 18.605 N สำหรับใบตัดที่มีขนาดกริท SD8000 และขนาดใบตัดที่มีขนาดกริท SD10000 มีค่าแรงที่น้อยที่สุดคือ 20.963 N
2. แรงที่ใช้ในการตัดวัสดุผสมอะลูมิเนียมอัลลอยด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ได้รับผลกระทบของใบตัดชนิด SD8000 คือ ความเร็วรอบในการตัดที่ 81.25%, อัตราป้อนที่ 15.15% และความลึกในการตัด เท่ากับ 3.60%ม อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ผลกระทบของใบตัดชนิด SD10000 คือ ที่ความเร็วรอบในการตัด เท่ากับ 82.58%, อัตราป้อน เท่ากับ 14.78% และความลึกในการตัด เท่ากับ 2.46% อย่างมีนัยสำคัญ
3. ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุดที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดอะลูมิเนียมอัลลอยด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยเครื่องตัดที่มีความแม่นยำสูงคือ 1.221 nm สำหรับใบตัดเพชรที่มีขนาดกริท SD10000 และใบตัดเพชรที่มีขนาดกริท SD8000 มีความหยาบผิวน้อยที่สุดคือ 1.635 nm
4. ความหยาบผิวที่ได้รับผลกระทบจากกระบวนการตัดวัสดุผสมอะลูมิเนียมอัลลอยด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ของใบตัดชนิด SD10000 คือ ความเร็วรอบ เท่ากับ 69.45% อย่างมีนัยสำคัญ
5. การทดลองเพื่อยืนยันผลมีค่าความผิดพลาดของการทดลองกับการทำนาย ของแรงที่ใช้ในการตัด เท่ากับ 4.73% และ 2.20% สำหรับใบตัดชนิด SD8000 และ SD10000 ตามลำดับ
6. การเปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายของค่าความหยาบผิวมีความผิดพลาด เท่ากับ 2.88% สำหรับใบตัดชนิด SD8000 และ 2.77% ของใบตัดชนิด SD10000

อภิปรายผล

จากวัตถุประสงค์การวิจัยการศึกษาแรงที่กระทำและความหยابผิวจากกระบวนการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ และการหาเงื่อนไขของกระบวนการตัดสไลเดอร์บาร์ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ต่อแรงที่กระทำและความหยابผิว

ผลการวิจัยพบว่าแรงที่ใช้การตัดวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ได้รับผลกระทบจากความเร็วในการตัดเป็นหลักอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าใบตัดที่มีขนาดผิวด้านหน้าใหญ่กว่าให้แรงในการตัดที่น้อยกว่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Y.Q. Yu ซึ่งอัตราป้อนในการตัดก็ส่งผลกับแรงตัดสอดคล้องกับการวิจัยของ Shigeki Okuyama แต่ความลึกในการตัดที่มีผลน้อยที่สุดซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hussein และมีแนวโน้มในการทำงานเดียวกันทั้งสองชนิดใบตัดคือ SD8000 และ SD10000

ผลการวิจัยความหยابผิวที่ได้รับจากการตัดวัสดุผสมอะลูมิเนียมออกไซด์-ไทเทเนียมคาร์ไบด์พบว่า ขนาดของผิวด้านหน้ามีผลกระทบกับความหยابผิว ขนาดของผิวด้านหน้าที่มีขนาดเล็กกว่าจะให้ความหยابผิวหลังการตัดที่น้อยกว่าขนาดผิวด้านหน้าที่มีขนาดใหญ่กว่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ T. Jin, Matsuo, Doddapatta และความเร็วในการตัดส่งผลกับความหยابผิวของใบตัดชนิด SD10000 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Y.X. Feng, Matsuo, Doddapatta, Kipriwi, Mokbel, Santosh, Ahmad, Kasim, Shahriar

ผลจากการทดลองเพื่อยืนยันผลการวิจัยพบว่า มีค่าแรงที่ใช้ในการตัดมีความผิดพลาดน้อยกว่า 5% สำหรับใบตัดทั้งสองชนิด และค่าความหยابผิวมีความผิดพลาดน้อยกว่า 3% สำหรับใบตัดทั้งสองชนิด

ข้อเสนอแนะ

1. ควรเลือกใช้ใบตัดที่เหมาะสมกับวัสดุที่ต้องการตัดเพื่อให้ได้คุณภาพของผิวบนชิ้นงานตามต้องการ
2. ในการติดตั้งใบตัดและการเลือกใช้พารามิเตอร์ในการแต่งใบตัดเพชรจะมีผลต่อแรงในการตัด



- Abou-El-Hossein, K., & Kops, N. (2017). Investigation on the use of Cutting Temperature and Tool Wear in the Turning of mild steel bars. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 11(4). doi: <https://doi.org/10.15282/jmes.11.4.2017.7.0273>
- Adachi, T., Matsumaru, K., & Ishizaki, K. . (2007). Diamond grain size effects on grinding-ability of dicing blades for cutting AlTiC (Al_2O_3 -TiC composite). *Journal of Australia Ceramic Society*, 43(1), 39-43.
- Ahmad, H., Ahmed, A.D.S., & Hamdi, M. (2012). An optimization method of the machining parameters in high-speed machining of stainless steel using coated carbide tool for best surface finish. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(1-4), 81–91.
- Asawarungaengkul, K. (2002). Quality Improvement on the Slider Cutting Process. *Thammasat Int. J. Sc. Tech.*, 7(2).
- Azlan, R., Izamshah, R., Kasim, M.S., & Noorazizi, M.S. (2019). Effects of RUARM Parameters Toward Cutting Force for Machining Hardened Steel Material. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, IJMME-IJENS*, 19(05).
- Barrau, O. (2004). Etude de frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud, .
- Bin, S., Albert, S., & Simon, C.T. (2008). Application of Nano-fluids in Minimum Quantity Lubrication Grinding. *Tribology Transactions*, 51(730-737). doi:10.1080/10402000802071277.
- Biro, I., Czampa, M., & Szalay, T. . (2015). Experimental Model for the Main Cutting Force in Face Milling of a High Strength Structural Steel. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 59(1), 16-22. doi:10.3311/PPme.7516
- Bissey, S. (2005). Développement d'un modèle d'efforts de coupe applicable à des familles d'outils : cas du frai-sage des aciers traités thermiquement, . *Thèse de doc-torat. ENSAM de Cluny*.

- Chockalingam, P., Kok, K., & Vijayaram, R. . (2012). Effect of coolant on Cutting Forces and Surface Roughness in Grinding of CSM GFRP. *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering.*, 223-229.
- Doddapattar, N. B., & Lakhmana, S.N. . (2012). An optimization of machinability of aluminium alloy 7075 and cutting tool parameters by using Taguchi technique. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2(3), 480–493.
- Dogra, M., Sharma, V.S., & Dureja, J. (2011). Effect of tool geometry variation on finish turning – A Review. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 4(1), 1–13.
- Elkhabeery, M. M., Kazamel, M.H., & Mansour, M.M. (2016). Modeling and Optimizing of CNC End Milling Operation Utilizing RSM Method. *International Journal of Advanced Engineering and Global Technology*, 4(1), 1612-1618.
- Emami, M., Sadeghi, M.H., Sarhan, A.A.D., & Hasani, F. . (2014). Investigating the Minimum Quantity Lubrication in Grinding of Al₂O₃ Engineering Ceramic. *Journal of Cleaner Production*, 66, 632-643.
doi:<http://dx.doi.org/10.1216/j.jclepro.2013.11.018>.
- Feng, Y. X., Huang, C.Z., Wang, J.X., Lu, Y., & Zhu, H.T. . (2006). *Surface characteristics of ceramics milled with abrasive waterjet Technology*. (Vol. 329).
- Feng, Z., & Chen, X. . (2006). *Grinding wheel loading features extracted by image processing*. (Vol. 304-305).
- Fnides, B., Aouici, H., & Yallese, M.A. . (2008). Cutting forces and surface roughness in hard turning of hot work steel X38CrMoV5-1 using mixed ceramic. *MECHANIKA*. N, , 2(70), 73-78.
- Ghenis, B., Doktir, L., & Tergan, V. . (1960). *Cylindrical Grinding Practice*. . Mir Publisher Moscow c1960s.
- Gulhane, U. D., Ayare, S.P., Chandorkare, V.S., & Jadhav, M.M. (2013). Investigation of turning process to improve productivity (MMR) for better surface finish of AL-

- 7075-T6 using DOE. *International journal of design and manufacturing technology*, 4(1), 59–67.
- Hahn, R. S. (1965). Some Characteristics of Controlled Force Grinding. *Proceedings of the Sixth International Machine Tool Design Research Conference*, 597.
- Hussein, Z. (2020). Investigation of Surface Texture and Surface Residual Stresses in the Dry Face Turning Process of AL2024-T351. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, IJMME-IJENS*, 20(01), 123-143.
- Ilzarbe, L., Álvarez, M.J., Viles, E., & Tanco, M. (2008). Practical applications of design of experiments in the field of engineering: a bibliographical review. *Quality and Reliability Engineering International*, 24(4), 417–428.
- J., A. (2003). Design of experiments for engineers and scientists. *Elsevier Science & Technology Books*, 7-8.
- Jana, S., & Jozef, M. (2010). Surface quality analysis of 102Cr6 bearing steel after CC6050 insert by hard turning and by SG grinding wheel. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 5(3), 137-142.
- Jin, T., & Stephenson, D. . (2006). *Optimizing the process conditions in ultra-precision grinding to achieve surface finish of optical quality*. (Vol. 304-305).
- Kadirgama, K., Rahman, M.M., Ismail, A.R., & Bakar, R.A. . (2012). A surrogate modeling to predict surface roughness and surface texture when grinding AISI 1042 carbon steel. *Scientific Research and Essays*, 7(5), 598-608.
doi:10.5897/SRE11.811
- Kanaseand, S., & Jadhav, V. (2012). Enhancement of surface finish of boring operation using passive damper. *Indian Journal of Applied Research*, 2(3), 68–70.
- Kasim, M. S., Atan, M.H., Haron, C.H., Ghani, J.A., Sulaiman, M.A., Mohamad, E., Minhat, M., Hadzley, M., & Saedon, J.B. (2015). Analysis of Tool Performance during Ball-End Milling of Aluminium Alloy 6061- T6. *Applied Mechanics and Materials*, 761, 318-323.
- Kiprawi, M. A., Yassin, A., Kamaruddin, A.M.N.A., Shazali, S.T.S., Islam, M.S., & Said, M.A.M. . (2019). Development of a cutting edge temperature measurement of

end mill tool by using infrared radiation technique. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 13(1), 4661-4678.

doi:<https://doi.org/10.15282/jmes.13.1.2019.22.0392>

Krar, S. F. (1994). *Grinding technology*. Albany. Bonn. Boston. Cincinnati. Detroit.

London. Madrid. Melbourne. Mexico city. New yoke. Pacific grove. Paris. San Francisco. Singapore. Tokyo. Toronto. Washington: Delmar publishers Inc.

Krar, S. F., & Oswald, J. W. (1974). *Grinding technology*: Delmar Pub.

Kumar, A., Kumar, P., Kumar, A., & Singh, B. (2013). Performance evaluation of TiN coated carbide insert for optimum surface roughness in turning of AISI1045 steel. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 02(11), 157-162.

Liang, Y. C., Zhai, Y.S., Wang, H.X., Bai, Q.S., & Zhao, Y. . (2007). *Surface Roughness Prediction Base On Cutting Parameter and Nose Radius in Precision Turning*. (Vol. 329).

Liu, B., Zhang, M., Yu, S., & et. al. (2003). Femto Slider: Fabrication and Evaluation. *IEEE Trans. Magn.*, 39(2).

Liu, Y. Z., Liang, Y.C., & Zhang, F.H. . (2006). Machining characteristics analysis of nano ceramics in ultra-precision grinding machining. . *Key engineering materials.*, 304-305(Feb, 2006), 50-53.

Madival, S., Ahmed, M.R., Halappa, M.L., & Marulaiah, L. (2019). Application Potential of Fuzzy and Regression in Optimization of MRR and Surface Roughness during Machining of C45 Steel. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 63(2), 132-139. doi:<https://Doi.org/10.3311/PPme.13171>

Mahto, D. G., & Kumar, A. (2008). Optimization of Process Parameters in Vertical CNC Mill Machines Using Taguchi's Design of Experiments. *Arab Research Institute in Sciences & Engineering*, 4(2).

Malkin, S. G., C. (2008). *Grinding technology. theory and applications of machining with abrasives*, 2d edition, Industrial Press, Inc., 2, 143.

- Mannaa, A., & Bhattacharya, B. (2013). A study on machinability of Al/SiCMMC. *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 711-716.
- Marinescu, L. D., Tonshoff H.K., & Inasaki I. (1998). *Handbook of ceramic grinding and polishing*. Noyespublications, Park Ridge, New Jersey / William Andrew Publishing, LLC, Norwich, New York, USA.
- Martinez, L. V., Jauregui-Correa, J.C., & Rubio-Cerda, E. (2008). Analysis of compliance between the cutting tool and the workpiece on the stability of a turning process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 1054–1062.
- Matsuo, T., Touge, M., & Yamada, H. . (1997). High-Precision Surface Grinding of Ceramics with Superfine Grain Diamond Cup Wheels. *Annals of the CIRP*, 46, 249-252.
- Mokbel, A. A., & Maksoud, T.M.A. . (2000). Monitoring of the condition of diamond grinding wheels using acoustic emission technique. *Journal of Materials Processing Technology*, 101, 292-297.
- Montgomery, D. C. (2013). *Design and analysis of experiments*. Arizona State University: John Wiley & Sons, Inc. .
- Mustafa, G., & Emre, Y.Y. (2013). Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron. *Measurement*, 46, 913–919, .
- Narasimha, M., Kumar, R.R., & Kassie, A. (2013). Performance of coated carbide tools. *The International Journal Of Engineering and Science*, 2(6), 47-54.
- Narayana, B. D., & Chenata, S.B. (2013). Optimization of cutting parameters for turning aluminium alloy using Taguchi method. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2(7), 1399–1407.
- Nontprasat, K., Chutima, S., & Srisang, J. . (2011). Impacted Dicing Process to Curvature Control of Slider. *Advances in Structural Engineering and Mechanics*.(2011), 220.

- Okuyama, S., Kitajima, T., & Akinori, Y. . (2007). Grinding performance of a grinding-arranged diamond wheel against industrial pure aluminum. . . *Key Engineering Materials.*, 329(2007), 38-39.
- Osman, M. H., Tamin, N.F., Ahmad, M.N., Rahman, M.H.AB., Mahid, M.K., Maidin, N.A., Abu Bakar, M.H., & Azahar, A.A. . (2016). EFFECT OF CUTTING PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS IN DRY DRILLING OF AISI D2 TOOL STEEL BY USING TAGUCHI METHOD. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 535-555.
- Poulachon, G. (2004). Usinabilité des matériaux difficiles. *Techniques de l'ingénieur*, 1-18.
- Poulachon, G., Bandyopadhyay, B.P., Jawahir, I.S., Pheulpin, S., & Seguin, E. (2003). The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 139-144.
- Poulachon, G., Bandyopadhyay, B.P., Jawahir, I.S., Pheulpin, S., & Seguin, E. . (2003). The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools. *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, 43, 139-144
- Pragnesh, R. P., & Patel, V.A. (2013). Effect of machining parameters on surface roughness and power consumption for 6063 Al alloy TiC composites (MMCs). *International journal engineering research and applications*, 2(4), 295–300.
- Rama, K. K., & Srinivas, J. (2011). Study of tool dynamics with a discrete model of workpiece in orthogonal turning. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 10(1-2), 71–85.
- Reddy, B. S., Kumar, J.S., & Kumar, K.V. (2011). Optimization of Surface Roughness in CNC End Milling using Response Surface Methodology and Genetic Algorithm. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 3(8), 102-109.
- Reith, M. J., & Stepan, G. . (2012). Optimization of material removal rate for orthogonal cutting with vibration limits. *Periodica polytechnic mechanical engineering.* , 56(2), 91-97. doi:103311/pp.me.2012-2.03

- Ribeiro, J., Lopes, H., Queijo, L., & Figueiredo, D. . (2017). Optimization of Cutting Parameters to Minimize the Surface Roughness in the End Milling Process Using the Taguchi Method. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 61(1), 30-35. doi:10.3311/PPme.9114
- Rizea, A., Plaiasu, A.G., & Anghel, D.C. . (2011). The influence of the working condition over the cutting forces in the processing of some ceramics. *Scientific bulletin automotive series*, 17(21(A)), 38-43.
- Rogov, V. A., & Siamak, G. (2013). Optimization of surface roughness and vibration in turning of aluminum alloy AA2024 using Taguchi technique. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*, 7(11), 1282-1291.
- Ross, P. J. (1996). Taguchi Techniques for Quality Engineering. *McGraw-Hill International Book Company*.
- Samir, K., Adel, M.H., & Amro, G. (2011). Investigation into the turning parameters effect on the surface roughness of flame hardened medium carbon steel with TiN-Al₂O₃-TiCN coated inserts based on Taguchi technique. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 59, 2137–2141.
- Santosh, M., Mohammed, R.A., Manjunath, L.H., & Loksha, M. (2019). Application Potential of Fuzzy and Regression in Optimization of MRR and Surface Roughness during Machining of C45 Steel. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 63(2), 132–139. doi:<https://doi.org/10.3311/PPme.13171>
- Sasimurugan, T., Palanikumar, K. . (2011). Analysis of the machining characteristics on surface roughness of a hybrid aluminium metal matrix composite (Al6061-SiC-Al₂O₃). *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 10(13), 1213–1224.
- Shahriar, J. H., & Nafis, A. (2012). Surface Roughness Prediction Modeling for AISI 4340 after Ball End Mill Operation using Artificial Intelligence. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 3(5), 1-10.

- Shipulin, L. V. (2012). Complex Model of Surface Grinding. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, 2.
- Sortino, M., Totis, G. & Prosperi, F. (2012). Development of a practical model for selection of stable tooling system configurations in internal turning. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 61, 58–70.
- Sortino, M., Totis, G., & Prosperi, F. (2012). Development of a practical model for selection of stable tooling system configurations in internal turning. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 61, 58–70
- Takuya, A., Koji, M., & Kozo, I. . (2007). DIAMOND GRAIN SIZE EFFECTS ON GRINDING-ABILITY OF DICHING BLADES FOR CUTTING AlTiC (Al₂O₃-TiC COMPOSITE). *J. Aust. Ceram. Soc.*, 43(1), 39-43.
- Tareq, A. A. (2009). Extending the technological capability of turning operation. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2(1), 192–201.
- Tebassi, H., Yallese, M. A., Meddour, T., Girardin, F., & Mabrouki, T. . (2017). On the Modeling of Surface Roughness and Cutting Force when Turning of Inconel 718 Using Artificial Neural Network and Response Surface Methodology: Accuracy and Benefit. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 61(1), 1-11.
doi:<https://Doi.org/10.3311/PPme.8742>
- Yu, Y. Q., Li, Y., & Xu, X.P. . (2006). *A comparative study on the dressing of metal-bonded diamond saws*. (Vol. 304-305). © 2006 Trans tech publications, Switzerland.
- Yunus, H., & ahman, J.F. (2012). Parametric Influence on Cutting Parameters Characteristics in Precision Machining of Ceramic Coating Materials. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 3(1).
- Zhang, J. Z., Chen, J.C., & Kirby, E.D. (2007). Surface roughness optimization in an end milling operation using the Taguchi design method. *Journal of Material Processing Technology*, 184(1-3), 233-239.
- คณาจารย์ สถาบันราชภัฏพระนครศรีอยุธยา. (2537). หลักสถิติ. .



ภาคผนวก



ตาราง ก.1 ข้อมูลการทดลองที่ 1 ที่ความเร็วรอบ 9,000 rpm, อัตราป้อน 50 mm/min, และความลึกในการตัด 1.5 mm

Run	Ra_SD8000	Ra_SD10000	FR_SD8000	FR_SD10000
1	1.150	1.587	20.062	21.510
2	1.853	1.687	19.358	21.677
3	2.197	0.842	17.268	19.278
4	2.016	1.687	18.072	21.138
5	1.823	2.124	18.384	20.988
6	1.458	0.773	21.019	21.315
7	2.137	1.575	18.453	19.829
8	1.701	1.352	18.002	22.547
9	2.103	1.576	16.305	21.504
10	0.929	1.365	19.127	19.746
Means	1.739	1.457	18.605	20.963
Std. dev.	0.428	0.403	1.358	1.003

ตาราง ก.2 ข้อมูลการทดลองที่ 2 ที่ความเร็วรอบ 9,000 rpm, อัตราป้อน 75 mm/min, และความลึกในการตัด 1.75 mm

Run	Ra_SD8000	Ra_SD10000	FR_SD8000	FR_SD10000
1	1.904	1.176	19.644	22.185
2	1.718	1.478	15.619	18.779
3	2.137	1.323	19.724	23.152
4	2.091	1.716	22.268	19.927
5	1.758	1.558	18.243	22.792
6	1.529	1.562	18.641	22.822
7	1.659	1.130	21.412	22.787
8	2.177	1.467	16.474	21.685
9	1.339	0.964	18.485	21.948
10	2.123	1.535	19.338	19.795
Means	1.843	1.491	18.985	21.587
Std. dev.	0.289	0.328	2.009	1.535

ตาราง ก.3 ข้อมูลการทดลองที่ 3 ที่ความเร็วรอบ 9,000 rpm, อัตราป้อน 100 mm/min, และความลึกในการตัด 2.0 mm

Run	Ra_SD8000	Ra_SD10000	FR_SD8000	FR_SD10000
1	1.622	1.532	18.881	23.326
2	1.923	1.367	22.847	21.138
3	2.159	1.924	20.635	21.472
4	1.693	1.790	18.969	22.238
5	2.349	1.295	23.085	23.600
6	2.115	1.329	17.254	23.147
7	2.255	2.057	22.856	21.123
8	1.934	1.160	19.935	21.091
9	1.666	1.125	21.979	19.753
10	1.759	1.674	19.324	23.273
Means	1.947	1.525	20.576	22.016
Std. dev.	0.261	0.324	2.030	1.290

ตาราง ก.4 ข้อมูลการทดลองที่ 4 ที่ความเร็วรอบ 10,000 rpm, อัตราป้อน 50 mm/min, และความลึกในการตัด 1.75 mm

Run	Ra_SD8000	Ra_SD10000	FR_SD8000	FR_SD10000
1	1.726	1.724	18.874	21.918
2	2.201	1.723	20.768	20.821
3	1.754	1.577	20.614	23.860
4	1.838	2.012	20.720	22.590
5	1.678	1.219	21.516	23.112
6	1.745	1.528	19.905	21.265
7	1.709	1.539	20.814	21.965
8	1.659	1.396	19.598	22.466
9	2.614	1.214	21.488	22.685
10	1.773	1.487	19.540	21.846
Means	1.870	1.532	20.384	22.253
Std. dev.	0.304	0.244	0.872	0.885

ตาราง ก.5 ข้อมูลการทดลองที่ 5 ที่ความเร็วรอบ 10,000 rpm, อัตราป้อน 75 mm/min, และความลึกในการตัด 2.0 mm

Run	Ra_SD8000	Ra_SD10000	FR_SD8000	FR_SD10000
1	1.618	1.493	23.243	24.013
2	1.719	1.679	21.598	21.897
3	1.875	1.732	21.622	22.192
4	1.607	0.965	21.469	22.345
5	2.111	1.412	23.248	21.720
6	2.347	1.597	21.268	22.225
7	2.250	1.531	21.465	24.125
8	1.893	1.402	23.056	23.276
9	1.864	1.314	20.556	22.553
10	1.579	1.749	21.018	22.357
Means	1.886	1.487	21/854	22.670
Std. dev.	0.272	0.234	0.970	0.845

ตาราง ก.6 ข้อมูลการทดลองที่ 6 ที่ความเร็วรอบ 10,000 rpm, อัตราป้อน 75 mm/min, และความลึกในการตัด 2.0 mm

Run	Ra_SD8000	Ra_SD10000	FR_SD8000	FR_SD10000
1	1.824	1.350	21.451	22.802
2	1.755	1.432	22.455	24.599
3	2.411	1.539	24.103	21.768
4	1.806	1.895	23.234	22.850
5	1.993	1.342	22.268	21.874
6	1.301	1.549	21.744	22.842
7	2.109	1.672	23.577	23.785
8	1.487	1.375	22.036	20.745
9	2.305	1.879	23.032	22.876
10	2.037	1.726	21.788	23.518
Means	1.903	1.576	22.569	22.765
Std. dev.	0.343	0.209	0.879	1.100

ตาราง ก.7 ข้อมูลการทดลองที่ 7 ที่ความเร็วรอบ 12,000 rpm, อัตราป้อน 75 mm/min, และความลึกในการตัด 2.0 mm

Run	Ra_SD8000	Ra_SD10000	FR_SD8000	FR_SD10000
1	1.560	1.014	21.898	22.149
2	1.450	1.362	22.628	23.494
3	1.313	1.026	23.162	23.050
4	1.683	1.358	23.532	23.869
5	2.094	1.140	23.321	22.579
6	1.707	1.319	22.490	22.038
7	1.904	1.697	23.406	22.859
8	1.505	1.174	21.441	24.110
9	1.320	1.225	22.796	22.424
10	1.816	0.892	23.874	23.292
Means	1.635	1.221	22.855	22.986
Std. dev.	0.254	0.229	0.761	0.707

ตาราง ก.8 ข้อมูลการทดลองที่ 8 ที่ความเร็วรอบ 12,000 rpm, อัตราป้อน 100 mm/min, และ
ความลึกในการตัด 2.0 mm

Run	Ra_SD8000	Ra_SD10000	FR_SD8000	FR_SD10000
1	1.733	1.376	23.757	22.742
2	1.567	1.136	21.806	23.268
3	2.158	1.471	22.136	22.929
4	1.986	1.022	23.922	23.877
5	2.205	1.238	23.655	23.216
6	1.481	1.613	23.593	23.212
7	1.680	1.282	22.692	22.958
8	1.732	1.351	22.170	24.178
9	1.587	1.465	22.130	21.662
10	1.538	1.155	23.925	22.539
Means	1.767	1.311	22.986	23.058
Std. dev.	0.260	0.180	0.860	0.696

ตาราง ก.9 ข้อมูลการทดลองที่ 9 ที่ความเร็วรอบ 12,000 rpm, อัตราป้อน 100 mm/min, และ ความลึกในการตัด 1.75 mm

Run	Ra_SD8000	Ra_SD10000	FR_SD8000	FR_SD10000
1	1.699	1.137	24.345	22.638
2	1.731	1.461	24.254	23.240
3	2.250	1.529	24.209	23.319
4	1.589	1.458	23.221	22.929
5	1.740	1.554	23.625	24.748
6	2.356	1.633	21.436	22.499
7	1.779	1.783	23.756	22.358
8	2.174	1.272	24.275	24.245
9	1.723	1.357	23.858	24.062
10	1.940	1.317	23.361	25.759
Means	1.898	1.450	23.544	23.580
Std. dev.	0.267	0.188	0.842	1.103

ตาราง ก.10 ข้อมูลเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการตัดของการทดลองกับค่าการทำนายของใบตัดชนิด SD8000

Run	Experimental	Prediction	% Error
1	20.492	18.809	8.95%
2	21.527	19.804	8.70%
3	22.599	20.799	8.65%
4	21.410	20.174	6.13%
5	22.034	21.169	4.09%
6	21.157	21.601	-2.06%
7	22.576	22.716	-0.62%
8	24.555	23.149	6.07%
9	24.692	24.144	2.27%
10	23.470	22.341	5.09%
Means	22.452	21.470	4.73%
Std. dev.	1.457	1.715	-

ตาราง ก.11 ข้อมูลเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการตัดของการทดลองกับค่าการทำนายของโปรแกรม
SD10000

Run	Experimental	Prediction	% Error
1	22.026	21.220	3.66%
2	22.861	21.727	4.96%
3	22.651	22.235	1.84%
4	22.663	21.895	3.39%
5	23.685	22.403	5.41%
6	23.664	22.467	5.06%
7	22.856	23.099	-1.06%
8	23.931	23.163	3.21%
9	22.704	23.671	-4.26%
10	22.704	22.803	-0.44%
Means	22.975	22.468	2.20%
Std. dev.	0.593	0.740	-

ตาราง ก.12 ข้อมูลเปรียบเทียบความหนาแน่นจากการตัดของการทดลองกับค่าการทำนายของใบตัดชนิด SD8000

Run	Experimental	Prediction	% Error
1	1.925	1.779	7.59%
2	1.801	1.872	-3.95%
3	1.936	1.966	-1.59%
4	1.886	1.758	6.77%
5	1.886	1.852	1.82%
6	1.925	1.916	0.45%
7	1.907	1.707	10.49%
8	1.829	1.771	3.13%
9	1.818	1.865	-2.58%
10	1.801	1.687	6.30%
Means	1.871	1.817	2.88%
Std. dev.	0.054	0.091	-

ตาราง ก.13 ข้อมูลเปรียบเทียบความหยาบผิวจากการตัดของการทดลองกับค่าการทำนายของใบตัดชนิด SD10000

Run	Experimental	Prediction	% Error
1	1.561	1.493	4.31%
2	1.486	1.532	-3.07%
3	1.636	1.570	4.04%
4	1.349	1.413	-4.76%
5	1.518	1.452	4.38%
6	1.493	1.546	-3.51%
7	1.346	1.272	5.50%
8	1.437	1.366	4.95%
9	1.515	1.405	7.29%
10	1.425	1.309	8.13%
Means	1.477	1.436	2.77%
Std. dev.	0.090	0.101	-



ภาคผนวก ข
ข้อมูลทางด้านเทคนิค



Technical Data

Range	F_x, F_y, F_z	kN	$-5 \dots 5^{11}$
F_z for F_x and $F_y \leq 0,5 F_z$	F_z	kN	$-5 \dots 10^{12}$
Calibrated partial range 1	F_x, F_y	N	$0 \dots 500$
	F_z	N	$0 \dots 1\,000$
Calibrated partial range 2	F_x, F_y	N	$0 \dots 50$
	F_z	N	$0 \dots 100$
Overload	F_x, F_y, F_z	kN	$-7,5/7,5$
	F_z for F_x and $F_y \leq 0,5 F_z$	kN	$-7,5/15$
Threshold		N	$<0,01$
Sensitivity	F_x, F_y	pC/N	$\approx -7,5$
	F_z	pC/N	$\approx -3,7$
Linearity, all ranges		%FSO	$\leq \pm 1$
Hysteresis, all ranges		%FSO	$\leq 0,5$
Cross talk		%	$\leq \pm 2$
Rigidity	c_x, c_y	kN/ μm	>1
	c_z	kN/ μm	>2
Natural frequency	$f_n(x, y, z)$	kHz	$\approx 3,5^{13}$
Natural frequency (mounted on flanges)	$f_n(x, y)$	kHz	$\approx 2,3^{14}$
	$f_n(z)$	kHz	$\approx 3,5^{15}$
Operating temperature range		$^{\circ}\text{C}$	$0 \dots 70$
Capacitance	F_x, F_y, F_z	pF	≈ 220
Insulation resistance (20 $^{\circ}\text{C}$)		Ω	$>10^{11}$
Ground insulation		Ω	$>10^9$
Protection class EN60529		–	IP67 ¹⁶
Weight		kg	7,3
Clamping area	mm		100x170
Connection			Fischer flange, 9 pol. neg.

ภาพประกอบ ข 1 เครื่องวัดแรง 3 แกน

SCANNING PROBE MICROSCOPE
AFM5500M



AFM5500M Unit	
Stage	Automated, fully addressable 100 mm (4 Inch) stage Travel range: XY ± 50 mm (2 Inch), Z ≥ 21 mm Minimum step size: XY 2 μ m, Z 0.04 μ m
Sample Size	Diameter : 100 mm (4 Inch) Thickness : 20 mm Weight : 2 kg
Scan Range	200 μ m x 200 μ m x 15 μ m (XY:closed-loop control, Z:displacement sensor)
RMS Noise Level *	≤ 0.04 nm (High-resolution mode)
Repeatability *	XY: ≤ 15 nm (3 σ , Measuring 10 μ m pitch) / Z: ≤ 1 nm (3 σ , Measuring 100 nm depth)
XY Orthogonality	$\pm 0.5^\circ$
Bow *	≤ 2 nm/50 μ m
Detection	Optical lever (Low-coherence light)
Top-view Optical Microscope	Zoom magnification: x1 ~ x7 Field of vision: 910 μ m x 650 μ m ~ 130 μ m x 90 μ m Monitor magnification: x465 ~ x3,255 (27 Inch monitor)
Anti-vibration	Desktop active anti-vibration 500 mm(W) x 600 mm (D) x 84 mm (H), approximately 28 kg
Soundproof Cover	750 mm(W) x 877 mm(D) x 1,400 mm(H), approximately 237 kg
Size	400 mm(W) x 526 mm(D) x 550 mm(H), approximately 90 kg

AFM5500M Exclusive Probe Station	
OS	Windows 7
RealTune® II	Automatic tuning of cantilever amplitude (DFM), contact force, scan speed, and feedback gains (Various tuning modes including Auto, Fast, Soft, Rough, and Point)
Various Functions	Operating Instructions: Tab structure (Measurement/Analysis); Measurement area Indicator/Measurement area tracking window; Batch processing; and Tip calibration
Operating Voltage	0 ~ 150 V
Multi Channel (Data Points)	4 channels (max. 2,048 x 2,048) 2 channels (max. 4,096 x 4,096)
Rectangular Scan	2:1, 4:1, 8:1, 16:1, 32:1, 64:1, 128:1, 256:1, 512:1, 1,024:1
Analysis Software	3D display and overlay, Roughness, Cross-section, Average cross-section
Automated Functions	Automated cantilever exchange and laser alignment
Size	340 mm(W) x 503 mm(D) x 550 mm(H), approximately 34 kg
Power Supply	AC 100 ~ 240 V $\pm 10\%$
Measurement Modes	AFM(Contact mode), DFM (Tapping mode), PM, FFM, LM-FFM, VE-AFM, Adhesion, Current, Pico-Current, SSRM, PRM, KFM, EFM (AC), EFM (DC), MFM, SIS-Topography, SIS-Property

Optional AFM and SEM Shared Alignment Sample Holder	
Compatible Hitachi SEMs	SU8240, SU8230(H36 mm), SU8220(H29 mm)
Sample Holder Size	41 mm(W) x 28 mm(D) x 16 mm(H)
Sample Size	$\varnothing 20$ mm x 7 mm
Alignment Accuracy	± 10 μ m (AFM alignment accuracy)

ภาพประกอบ ข 2 เครื่องวัดความหยาบผิว Atomic force measurement

ตาราง ข.1 สัดส่วนของขนาดเม็ดเพชร

สัดส่วนขนาดเม็ดเพชร	
ชื่อขนาดเม็ดเพชร	ช่วงของขนาดเม็ดเพชร (μm)
400	40 - 60
500	30 - 40
600	20 - 30
700	12 - 24
800	10 - 20
1000	8 - 16
1200	6 - 12
1500	5 - 10
2000	4 - 8
2400	4 - 6
3000	2 - 6
4000	2 - 4

ตาราง ข.2 ตารางแจกแจงอัตรา F (F-ratio distribution table)

v_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
v_2															
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88	243.91	245.36	246.46	247.32	248.01
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.42	19.43	19.44	19.45
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.71	8.69	8.67	8.66
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.87	5.84	5.82	5.80
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.64	4.60	4.58	4.56
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.96	3.92	3.90	3.87
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.53	3.49	3.47	3.44
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.24	3.20	3.17	3.15
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.03	2.99	2.96	2.94
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.86	2.83	2.80	2.77
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.74	2.70	2.67	2.65
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.64	2.60	2.57	2.54
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.55	2.51	2.48	2.46
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.48	2.44	2.41	2.39
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.42	2.38	2.35	2.33
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.37	2.33	2.30	2.28
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.33	2.29	2.26	2.23
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.29	2.25	2.22	2.19
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.26	2.21	2.18	2.16
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.22	2.18	2.15	2.12
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.20	2.16	2.12	2.10
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.17	2.13	2.10	2.07
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.15	2.11	2.08	2.05
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.13	2.09	2.05	2.03
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.11	2.07	2.04	2.01
26	4.22	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.09	2.05	2.02	1.99
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.08	2.04	2.00	1.97
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.06	2.02	1.99	1.96
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.05	2.01	1.97	1.94
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.04	1.99	1.96	1.93
35	4.12	3.27	2.87	2.64	2.49	2.37	2.29	2.22	2.16	2.11	2.04	1.99	1.94	1.91	1.88
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.95	1.90	1.87	1.84
50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.40	2.29	2.20	2.13	2.07	2.03	1.95	1.89	1.85	1.81	1.78
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.86	1.82	1.78	1.75
70	3.98	3.13	2.74	2.50	2.35	2.23	2.14	2.07	2.02	1.97	1.89	1.84	1.79	1.75	1.72
80	3.96	3.11	2.72	2.49	2.33	2.21	2.13	2.06	2.00	1.95	1.88	1.82	1.77	1.73	1.70
90	3.95	3.10	2.71	2.47	2.32	2.20	2.11	2.04	1.99	1.94	1.86	1.80	1.76	1.72	1.69
100	3.94	3.09	2.70	2.46	2.31	2.19	2.10	2.03	1.97	1.93	1.85	1.79	1.75	1.71	1.68
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.78	1.73	1.69	1.66
150	3.90	3.06	2.66	2.43	2.27	2.16	2.07	2.00	1.94	1.89	1.82	1.76	1.71	1.67	1.64
200	3.89	3.04	2.65	2.42	2.26	2.14	2.06	1.98	1.93	1.88	1.80	1.74	1.69	1.66	1.62
250	3.88	3.03	2.64	2.41	2.25	2.13	2.05	1.98	1.92	1.87	1.79	1.73	1.68	1.65	1.61
300	3.87	3.03	2.63	2.40	2.24	2.13	2.04	1.97	1.91	1.86	1.78	1.72	1.68	1.64	1.61
400	3.86	3.02	2.63	2.39	2.24	2.12	2.03	1.96	1.90	1.85	1.78	1.72	1.67	1.63	1.60
500	3.86	3.01	2.62	2.39	2.23	2.12	2.03	1.96	1.90	1.85	1.77	1.71	1.66	1.62	1.59
600	3.86	3.01	2.62	2.39	2.23	2.11	2.02	1.95	1.90	1.85	1.77	1.71	1.66	1.62	1.59
750	3.85	3.01	2.62	2.38	2.23	2.11	2.02	1.95	1.89	1.84	1.77	1.70	1.66	1.62	1.58
1000	3.85	3.00	2.61	2.38	2.22	2.11	2.02	1.95	1.89	1.84	1.76	1.70	1.65	1.61	1.58

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กิตติคม นนท์ประสาท
วัน เดือน ปี เกิด	21 พฤษภาคม 2512
สถานที่เกิด	สุโขทัย
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2541 อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จาก มหาวิทยาลัยเซนต์จอห์น พ.ศ. 2552 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2562 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จาก มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์นครราชสีมา พ.ศ. 2563 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จาก มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน	14/81 ม.1 ต. คลองสี่ อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี
ผลงานตีพิมพ์	Experimental of effected on the residue stress for thinner Al ₂ O ₃ -TiC in grinding and cutting processes, International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET) Volume 11, Issue 5, May 2020, pp. 75-85. Improvement the Bar Bow of Al ₂ O ₃ -TiC Thinner Bar in high precision of Grinding and Cutting Processes, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Volume 9, Issue 6, June - 2020, pp.463-468.