

การพัฒนาระบบการตรวจติดตามความขรุขระผิวบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี

นายศิริพงษ์ ดำรงทวีศักดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DEVELOPMENT OF IN-PROCESS MONITORING SYSTEM OF SURFACE ROUGHNESS  
ON CNC TURNING MACHINE

Mr. Siripong Damrongthaveesak

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนากระบวนการตรวจติดตามความซรุขระผิวงบน เครื่องกลึงซีเอ็นซี
โดย	นายศิริพงษ์ ดำรงทวิศักดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริ ประชานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพ็ชร์)

นายศิริพงษ์ ดำรงทีศักดิ์ : การพัฒนาระบบการตรวจติดตามความขรุขระผิวบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี. (DEVELOPMENT OF IN-PROCESS MONITORING SYSTEM OF SURFACE ROUGHNESS ON CNC TURNING MACHINE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, 191 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ พัฒนาระบบการตรวจติดตามร่วมกับการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ(SPC)สำหรับค่าความขรุขระผิวชิ้นงานบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยใช้อัตราส่วนแรงตัดระหว่างแรงป้อนตัดและแรงตัดหลัก ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานประกอบด้วยปัจจัยในการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด, อัตราการป้อนตัด, ความลึกตัด, รัศมีงูมกมิด, มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนแรงตัด

ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่พยากรณ์ได้จะถูกควบคุมด้วยกระบวนการเชิงสถิติ(SPC) จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับผิวชิ้นงานที่ไม่ได้คุณภาพในระหว่างกระบวนการตัดได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยอ้างอิงจากค่าขีดจำกัดควบคุมบน(UCL) ซึ่งระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถแจ้งเตือนเมื่อความขรุขระผิวชิ้นงานอยู่นอกเหนือขีดจำกัดควบคุมบนเพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้น ในขณะที่ตัดสินใจและปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดใหม่

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม   ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม   ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา...2555

# #5270522321 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : CNC TURNING/ SURFACE ROUGHNESS/ CUTTING FORCE/ CUTTING SPEED/  
FEED RATE/ IN-PROCESS MONITORING AND DETECTION

SIRIPONG DAMRONGTHAVEESAK: DEVELOPMENT OF IN-PROCESS MONITORING SYSTEM  
OF SURFACE ROUGHNESS ON CNC TURNING MACHINE. ADVISOR: ASSOC.PROF.SOMKIAT  
TANGJITSITCHAROEN, D.Eng, 191 pp.

This research aims to integrate the in-process monitoring system and the statistical process control (SPC) in order to control the machined surface finish on CNC turning machine. The ratio between the feed force ( $F_y$ ) and the main force ( $F_z$ ) is used to predict the in-process surface roughness. The surface roughness models are comprised of the cutting speed, the feed rate, the depth of cut, the tool nose radius, the rake angle and the cutting force ratio. The SPC is vitally used to control the predicted surface roughness during the cutting.

According to the experimental results, the integrated monitoring and SPC system is efficiently used to predict and control the in-process surface roughness by using the Upper Control Limit (UCL) to detect the surface roughness which is out of control limit. An alarm system of the out-of-process control can help to reduce the rejects during the cutting and the cutting parameters will be adjusted immediately.

Department : Industrial Engineering..... Student's Signature .....

Field of Study : Industrial Engineering..... Advisor's Signature .....

Academic Year : 2012.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยความช่วยเหลือจากท่านรองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้ซึ่งเสียสละเวลาคอยให้คำแนะนำ คำปรึกษา เกี่ยวกับความรู้ ตลอดจนข้อคิดต่างๆ ตลอดระยะเวลาของการจัดทำวิทยานิพนธ์ ทั้งยังเอาใจใส่คอยดูแลและติดตามความก้าวหน้าของงานวิจัยอยู่อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลให้งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงลงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สีรง ปรีชานนท์ ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร และท่านรองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคึก กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่อง พร้อมทั้งให้ข้อแ่งคิดและแนวทางในการปรับปรุงซึ่งเป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ตลอดจน พี่ๆ น้องๆ ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้กล่าวไว้ใน ณ ที่นี้ด้วย ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้ประสบความสำเร็จได้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่	
1    บทนำ.....	1
1.1 บทบาทระบบอัตโนมัติที่มีต่ออุตสาหกรรมการผลิตในอนาคต.....	1
1.2 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	5
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	8
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	8
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	9
1.7 ขั้นตอนการดำเนินวิจัย.....	9
1.8 แผนการดำเนิน.....	10
2    ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1.1 ทฤษฎีการตัด.....	11
2.1.2 กระบวนการกลึง turning process.....	11
2.1.3 ชิ้นงาน (Workpiece) .....	12
2.1.4 อิทธิพลของเงื่อนไขในการตัดที่มีต่อความขรุขระผิว.....	13

บทที่	หน้า
2.1.4.1 เครื่องจักรกล.....	13
2.1.4.2 เครื่องมือตัด(Tools) .....	14
2.1.4.3 สารหล่อเย็น (Coolant) .....	16
2.1.4.4 วัสดุ (Material) .....	17
2.1.4.5 ความเร็วรอบ (Spindle speed) และความเร็วการตัด (Cutting speed) .....	18
2.1.4.6 อัตราการป้อน (Feed rate) .....	19
2.1.4.7 ความลึกของการตัด (Depth of cut) .....	19
2.1.4.8 รัศมีจมูกมีด (Nose Radius) .....	21
2.1.5 ความขรุขระผิว.....	22
2.1.6 การสึกหรอของเครื่องมือ.....	25
2.1.7 สัญญาณแรงตัด.....	29
2.1.8 สมการการหาค่าความขรุขระ.....	30
2.1.9 ตรวจติดตาม.....	31
2.1.9.1 แผนภูมิควบคุมคุณภาพ.....	31
2.1.9.2 แนวความคิดของแผนภูมิควบคุม.....	31
2.1.9.3 แผนภูมิควบคุม I-MR.....	32
2.1.9.3.1 แผนภูมิควบคุม X,I.....	32
2.1.9.3.2 แผนภูมิควบคุม MR.....	33
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	39
3.1 ออกแบบการทดลอง.....	39
3.1.1 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	39
3.1.2 เกณฑ์การเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม.....	39



บทที่	หน้า
3.2 วัสดุชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.2.1 วัสดุชิ้นงาน(Workpiece material).....	40
3.2.2 ด้ามมีดตัด (Tool Holder).....	41
3.2.3 เม็ดมีดตัด (Insert) .....	42
3.2.4 เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC turning machine) .....	42
3.2.5 ไดนาโมมิเตอร์ (3-Component Dynamometer) .....	43
3.2.6 ชาร์จแอมพลิไฟเออร์(Charge Amplifier) .....	43
3.2.7 Ni-card (National Instruments -card) .....	43
3.2.8 คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal computer: PC) .....	44
3.2.9 เครื่องวัดค่าความขรุขระผิว(surface roughness measurement) .....	45
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	45
3.3.1 ช่วงการคำนวณค่าขีดจำกัดควบคุม.....	47
3.3.2 ช่วงพัฒนาโปรแกรมสำหรับระบบการตรวจติดตามและควบคุม กระบวนการเชิงสถิติ.....	48
3.3.2.1 LabVIEW.....	49
3.3.2.2 ออกแบบการทำงานของระบบ.....	49
3.3.2.3 ออกแบบโปรแกรม.....	50
3.3.3 ช่วงการควบคุมกระบวนการตัดเชิงสถิติ.....	65
3.3.3.1 ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์.....	65
3.3.3.2 ขั้นตอนการเริ่มการงานระบบ.....	66
4 ผลการวิจัย.....	69
4.1 ผลการหาค่าขีดจำกัดควบคุมบน.....	69
4.2 ผลการทดลอง.....	70
4.2.1 ผลการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลอง.....	71

บทที่	หน้า
4.2.2 ผลการทดลองของระบบการตรวจติดตาม.....	72
5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ.....	75
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	75
5.2 อภิปรายผลการทดลอง.....	75
5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในการวิจัย.....	76
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	76
รายการอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก.....	80
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	191

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3-1	ค่ามาตรฐาน, ส่วนประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกลของวัสดุ.....	41
3-2	เงื่อนไขในการทดลอง.....	47
4-1	ค่าขีดจำกัดความคืบหน้า.....	69

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1-1	โครงสร้างพื้นฐานของระบบการผลิตอัจฉริยะ.....	2
1-2	เซนเซอร์สำหรับการตรวจติดตามระบบการผลิต.....	4
1-3	ระบบการตรวจติดตามในกระบวนการเพื่อพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน ร่วมกับการควบคุมในกระบวนการเชิงสถิติ.....	6
2-1	กระบวนการกลึงชิ้นงาน.....	11
2-2	ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน.....	13
2-3	องค์ประกอบต่างๆ ของมีดกัดและมีดกลึง.....	14
2-4	รูปร่างเรขาคณิตของลิ้มการตัด.....	14
2-5	ลักษณะต่างๆของการสึกหรอ.....	15
2-6	คุณสมบัติของวัสดุเครื่องมือตัด.....	16
2-7	ปัจจัยที่เกิดจากอิทธิพลของวัสดุชิ้นงาน.....	17
2-8	ลักษณะของเศษที่ดี.....	18
2-9	ลักษณะของเศษที่ไม่ดี.....	18
2-10	ความเร็วตัดและความเร็วของชิ้นงาน.....	18
2-11	อัตราป้อนและความลึกของการตัด.....	19
2-12	พื้นที่ภาคตัดของเศษ.....	20
2-13	มุมของการปรับตั้งต่างๆกัน.....	21
2-14	ความขรุขระผิวที่เกิดจากรัศมีงูมกมิด.....	21
2-15	ความขรุขระผิว.....	22
2-16	การวัดค่าความขรุขระผิว.....	23
2-17	เงื่อนไขการเลือก Cut Off length และ Evaluation length.....	23
2-18	ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Average surface roughness :Ra) .....	24
2-19	ความขรุขระผิวสูงสุด (Surface Roughness :Rz) .....	24
2-20	ความขรุขระผิวแบบสิบจุด (Ten-spot Average surface roughness :Rt) .....	25

รูปที่		หน้า
2-21	ภาพประกอบในกระบวนการกัดแต่งโลหะแสดงให้เห็นในหน้าเรก (Rake face) และหน้าแฟรงก์ (Flank face) บนเครื่องจักรกล ลักษณะและทิศทางการเกิดเศษ และตำแหน่งมุมเรก (Rake angle) .....	26
2-22	การเกิด Built up edge ระหว่างการกัดแต่งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ.....	26
2-23	แสดงการสึกหรอบแบบเครเตอร์ (Crater wear) และการสึกหรอที่ Flank face (Flank wear) ในเครื่องมือกลสำหรับงานกลึง ตำแหน่งของการสึกหรอบแบบเครเตอร์ คือจุดที่เกิดความร้อนสูงที่สุดระหว่างการกัดแต่ง ในหลายกรณีจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงช่วงวิกฤติช่วงหนึ่ง ปริมาณการสึกหรอบแบบเครเตอร์ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนบน Flank face ผิวที่สึกหรอไปจนเรียบเสมอกันนั้น เรียกว่า “Wear land” .....	27
2-24	ทิศทางแรงตัด.....	29
2-25	สัญญาณแรงตัดสถิต.....	30
2-26	แนวความคิดการควบคุมกระบวนการ.....	31
3-1	แผนภูมิแสดงมาตรฐานค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน.....	40
3-2	วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3-3	ด้ามมีดตัดที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3-4	เม็ดมีดตัดที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3-5	เครื่องกลึงซีเอ็นซีที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3-6	ไดนาโมมิเตอร์.....	43
3-7	ชาร์จแอมป์ลิไฟเออร์.....	43
3-8	Ni-card PCI-6221.....	44
3-9	คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล.....	44
3-10	เครื่องวัดค่าความขรุขระผิว.....	45
3-11	แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	46
3-12	การวัดความขรุขระชิ้นงาน.....	48
3-13	โปรแกรม LabVIEW.....	49

รูปที่	หน้า
3-14	โครงสร้างหลักของโปรแกรม..... 50
3-15	ส่วนตัวดึงสัญญาณข้อมูล (Data Acquisition: DAQ) ..... 51
3-16	ส่วนแสดงสัญญาณแรงตัด..... 51
3-17	ส่วนเลือกค่าเงื่อนไขการตัด..... 51
3-18	ส่วนควบคุมระบบและแสดงสัญญาณเตือน..... 51
3-19	ส่วนแสดงค่าขีดจำกัดควบคุม..... 52
3-20	ส่วนแสดงตัวแปรสำหรับพักข้อมูล..... 52
3-21	ส่วนบันทึกข้อมูล..... 52
3-22	state machine ของระบบการตรวจติดตามความขรุขระผิวบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี. 53
3-23	ส่วนตั้งค่าเริ่มต้นของระบบ..... 53
3-24	ส่วนคำนวณสมการค่าความขรุขระผิวชิ้นงานบางส่วน..... 54
3-25	ส่วนคำนวณสมการค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยบางส่วน..... 55
3-26	ส่วนคำนวณสมการค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดบางส่วน..... 55
3-27	ส่วนคำนวณค่า case การทดลอง..... 56
3-28	ส่วนเก็บข้อมูลค่าขีดจำกัดควบคุม..... 56
3-29	ส่วนตั้งค่าขีดจำกัดควบคุมของแต่ละเงื่อนไข..... 57
3-30	ส่วนตัดสินใจเลือกสถานะต่อไป..... 57
3-31	ส่วนจัดเก็บสะสมสัญญาณแรงตัดศูนย์..... 58
3-32	ส่วนนับจำนวนข้อมูล..... 58
3-33	ส่วนตัดสินใจเลือกสถานะต่อไป..... 58
3-34	ส่วนล้างข้อมูลตัวนับจำนวนข้อมูล..... 59
3-35	ส่วนเก็บค่าสำหรับการตัดสัญญาณรบกวน..... 59
3-36	ส่วนล้างข้อมูลตัวนับจำนวนข้อมูลและสัญญาณแรงตัดศูนย์สะสม..... 59
3-37	ส่วนบันทึกค่าความขรุขระย้อนหลัง..... 60

รูปที่		หน้า
3-38	ตัดสินใจเลือกสถานะต่อไป.....	60
3-39	ส่วนคำนวณค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน.....	61
3-40	ส่วนคำนวณสมการค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย.....	61
3-41	ส่วนคำนวณสมการค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด.....	62
3-42	ส่วนแสดงกราฟ I chart.....	62
3-43	ส่วนแสดงกราฟ MR chart ในการทำงานรอบแรก.....	63
3-44	ส่วนแสดงกราฟ MR chart ในการทำงานตั้งแต่รอบที่สอง.....	63
3-45	ส่วนตัดสินใจเลือกสถานะต่อไป.....	64
3-46	ส่วนแสดงสัญญาณเตือน.....	64
3-47	ส่วนติดต่อผู้ใช้.....	65
3-48	ชิ้นงานและไดนาโมมิเตอร์ที่ติดตั้งในเครื่องกลึงซีเอ็นซี.....	66
4-1	ส่วนติดต่อผู้ใช้ของระบบสำหรับความขรุขระผิวชิ้นงานบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี ในตัวอย่างการตัดที่ 16 ความเร็วรอบ 150 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มม./รอบ ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจุ่มกมิต 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	70
4-2	ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยของชิ้นงาน (a) และค่าความขรุขระผิวสูงสุดของชิ้นงาน (b)ในแต่ละเงื่อนไขโดยเทียบระหว่างค่าพยากรณ์และค่าเฉลี่ย±10%.....	71
4-3	ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยของชิ้นงาน(a) และค่าความขรุขระผิวสูงสุดของชิ้นงาน (b)ในตัวอย่างการตัดที่ ความเร็วรอบ 200 ม. /นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มม./รอบ ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุ่มกมิต 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	72
4-4	ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยของชิ้นงาน (a) และค่าความขรุขระผิวสูงสุดของชิ้นงาน (b)ในแต่ละเงื่อนไขโดยเทียบระหว่างค่าพยากรณ์และค่าขีดจำกัดควบคุมบน...	73

## บทที่ 1

### บทนำ

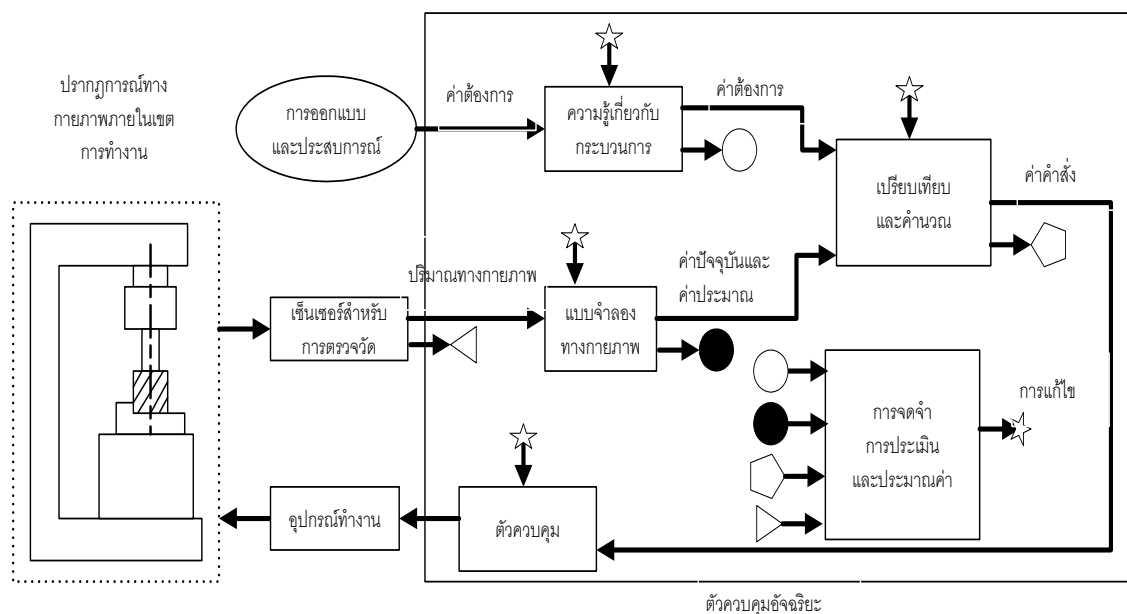
#### 1.1 บทบาทระบบอัตโนมัติที่มีต่ออุตสาหกรรมการผลิตในอนาคต [1]

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตมีการเปลี่ยนแปลงและมีการเพิ่มอัตราการแข่งขันที่สูงขึ้น เนื่องจากสภาพแวดล้อมต่างๆทางธุรกิจที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น กิจกรรมการผลิตที่เปลี่ยนแปลงไป, ความต้องการของตลาดที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นระบบการผลิตในอนาคตควรมีลักษณะที่คล่องแคล่ว, ความเป็นอัจฉริยะ, ตอบสนองความต้องการที่รวดเร็ว, ตอบสนองต่อผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง, รองรับการผลิตปริมาณน้อยที่มีความหลากหลายได้ และช่วยลดมลภาวะสิ่งแวดล้อม ได้ซึ่งระบบการผลิตที่สามารถตอบสนองต่อคุณลักษณะต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นก็คือ ระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing System : IMS) ซึ่งเป็นระบบการผลิตที่มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง เพื่อให้ระบบการผลิตอัจฉริยะสามารถที่จะควบคุมกระบวนการผลิตให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามข้อกำหนดของการออกแบบด้วยตนเองได้ และเพื่อให้มีความเข้าใจในประวัติของการพัฒนาของเทคโนโลยีของระบบการผลิตจากในอดีต ไปจนถึงระบบการผลิตที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

ระบบอัตโนมัติและการจัดการระบบการผลิตด้วยเครื่องจักรสมัยใหม่ เริ่มต้นในปีค.ศ. 1954 จากเครื่องจักรกลควบคุมเชิงตัวเลข (Numerical Control : NC) ต่อมาได้พัฒนาเป็นระบบการควบคุมเชิงตัวเลขทางตรง (Direct Numerical Control : DNC) โดยเครื่องจักรที่ควบคุมเชิงตัวเลขหลายๆเครื่องนี้จะถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์กลาง ระบบดีเอ็นซีถูกควบคุมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามความต้องการในรูปของชุดคำสั่งของเครื่องจักรในระบบการผลิต ระบบดีเอ็นซีเป็นการควบคุมทั้งเครื่องจักรและปริมาณวัตถุดิบ ซึ่งระบบดังกล่าว เรียกว่า ระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น (Flexible Manufacturing System : FMS) โดยชิ้นงานและเครื่องมือต่างๆได้ถูกขนส่งระหว่างคลังสินค้ากับเครื่องจักรอัตโนมัติโดยเอจีวี (Automated Guide Vehicles : AGVs) และทำการขนถ่ายโดยหุ่นยนต์สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมและอื่นๆ แต่โดยปกติแล้วระบบการผลิตแบบยืดหยุ่นต้องการการลงทุนสูง และการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อที่จะจัดการกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณการผลิตและชนิดของผลิตภัณฑ์นั้นทำได้ยาก ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ระบบการผลิตแบบเซลล์ (Flexible Manufacturing Cell: FMC) จึงเป็นที่นิยมมากกว่า และบางครั้งการตรวจสอบชิ้นงานอัตโนมัติด้วยระบบการผลิตแบบเซลล์ นั้นมีต้นทุนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น นอกจากนี้ตัวระบบสามารถเริ่มกระบวนการผลิตได้ง่ายและมีความยืดหยุ่นมากกว่าที่จะจัดการกับความต้องการที่เปลี่ยนแปลงไป



การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีทางการผลิต ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะรวม กิจกรรมทางด้านอุตสาหกรรม การตลาด การวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตในขั้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์และการส่งสินค้าเข้าด้วยกันซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในนามของ การผลิตแบบผสมผสานด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Integrated Manufacturing : CIM) การผลิตแบบนี้สามารถประมวลผลข้อมูลของกิจกรรมต่างๆนอกเหนือจากกิจกรรมการผลิตอันได้แก่ การตลาด การจัดการ การควบคุมกระบวนการผลิต และการบริการ แต่อย่างไรก็ตาม ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มความยืดหยุ่นและความสามารถในการผลิตจริง ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ ระบบการผลิตที่แจกจ่ายได้ด้วยตัวเอง (Autonomous distributed manufacturing systems : ADiMS) ซึ่งประกอบด้วยเทคโนโลยีการประมวลผลขั้นสูงมีความสำคัญต่อการผลิตในอนาคตสามารถตอบสนองต่อความต้องการในการผลิตสินค้าที่มีความหลากหลายและปริมาณความต้องการที่เปลี่ยนแปลงไป ระบบนี้มีชื่อวาระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing System: IMS) และเพื่อตอบสนองต่อระบบการผลิตอัจฉริยะ เครื่องจักรกลอัจฉริยะจึงได้ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้น โดยเครื่องจักรกลอัจฉริยะจะสามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง สามารถทำงานร่วมกับเครื่องจักรอื่นๆ และสามารถทำงานร่วมกันสิ่งอำนวยความสะดวกในการผลิตได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 1.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบการผลิตอัจฉริยะ [1]

ปริมาณความต้องการเซ็นเซอร์รูปแบบต่างๆสำหรับการตรวจติดตามในกระบวนการผลิตของระบบการผลิตอัจฉริยะที่สูงขึ้นอันเกิดจากแนวทางการพัฒนาของเทคโนโลยีการผลิตใน

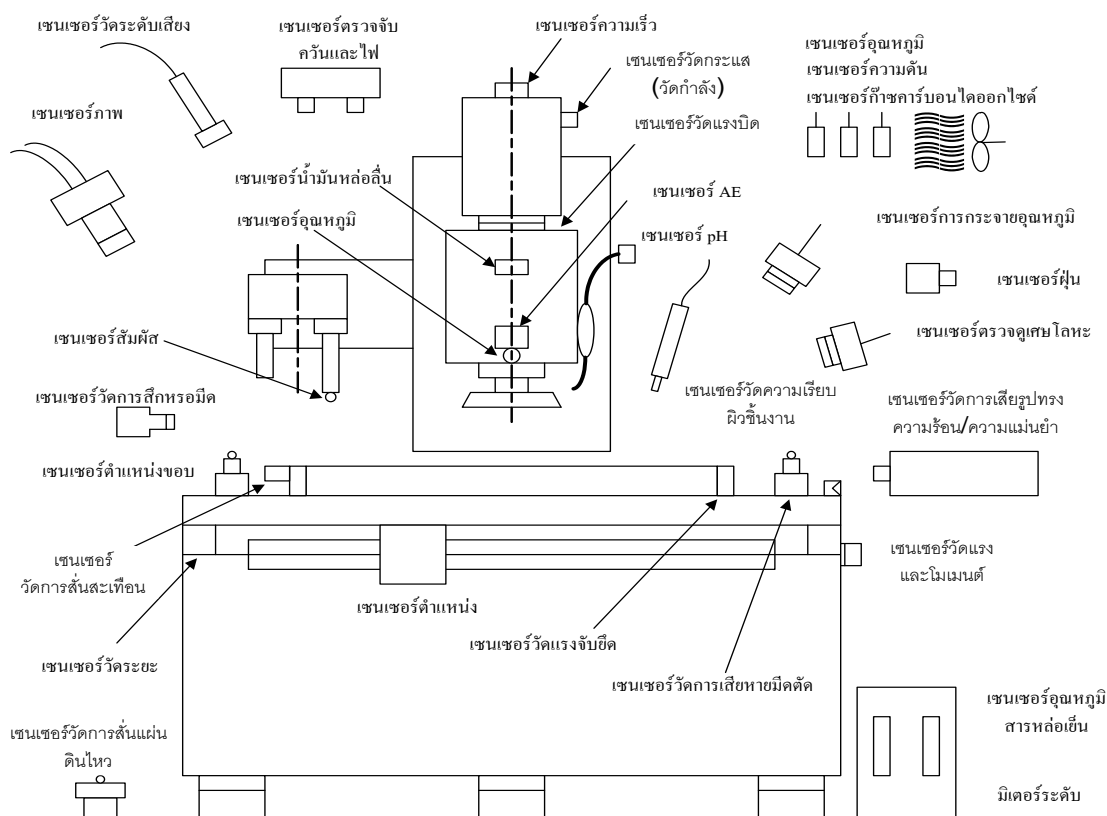
ปัจจุบัน ซึ่งสาเหตุของการที่ต้องตรวจติดตามระบบการผลิตก็เพื่อให้แน่ใจว่าระบบการผลิตนี้มีประสิทธิภาพเหมาะสมที่สุด โดยในการตรวจติดตามจะมุ่งเน้นไปที่เครื่องจักร (ประสิทธิภาพและความบกพร่องต่างๆ), เครื่องมือ (สถานะของการสึกหรอ), ชิ้นงาน (ขนาด, พื้นผิว) และกระบวนการ (รูปแบบของเศษโลหะ, อุณหภูมิ) ซึ่งได้มีการใช้เซนเซอร์ในรูปแบบที่แตกต่างกันสำหรับการที่จะตรวจติดตามกระบวนการผลิต และสภาพแวดล้อมของการผลิตแบบต่างๆดังแสดงในรูปที่ 1.1 จากการพิจารณาแนวโน้มการพัฒนาทางด้านการผลิตจะพบว่าเมื่อมีเหตุผลที่สามารถอธิบายว่าทำไม เซนเซอร์และเทคโนโลยีในการตรวจติดตามได้กลายมาเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมากขึ้นเรื่อยๆในระบบการผลิตอัจฉริยะดังเหตุผลต่อไปนี้

- ระบบการผลิตปริมาณมาก (Large-scale manufacturing system) ควรที่จะถูกปฏิบัติงานภายใต้ความน่าเชื่อถือและความพร้อมในการดำเนินการผลิตอย่างต่อเนื่องที่สูง เพราะการหยุดทำงานเนื่องจากระบบขัดข้องส่งผลอย่างมากต่อกิจกรรมทางการผลิต
- การเพิ่มขึ้นของค่าแรงงานและการขาดแคลนบุคลากรที่มีทักษะมีความจำเป็นสำหรับระบบการผลิตที่มีการใช้เครื่องจักรในกระบวนการผลิตเป็นส่วนใหญ่
- ระบบการผลิตที่มีความแม่นยำเที่ยงตรงพิเศษ (Ultra-precision manufacturing) ซึ่งมนุษย์ไม่สามารถทำได้จำเป็นที่จะต้องใช้ศาสตร์ของการวัดและเทคโนโลยีของการตรวจติดตามกระบวนการขั้นสูงโดยการใช้ระบบเซนเซอร์ที่มีความน่าเชื่อถือ
- เครื่องจักรกลที่มีความซับซ้อน มีการใช้ระบบการตรวจติดตามในกระบวนการทำงานเพื่อป้องกันความเสียหายของเครื่องจักร
- เครื่องจักรกลที่ใช้งานหนัก (Heavy-duty machine) ที่ใช้ในการตัดและการเจาะความเร็วสูง หรือประเภทงานที่มีอันตราย ควรใช้คนดำเนินการให้น้อยที่สุดเพื่อเหตุผลทางด้านความปลอดภัย
- การตระหนักในเรื่องสิ่งแวดล้อมในการผลิตปัจจุบันทำให้ความต้องการเซนเซอร์ที่จะตรวจติดตามการปล่อยของเสียจากกระบวนการผลิตมีมากขึ้น

ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน การรวมเซนเซอร์ชนิดต่างๆเข้าด้วยกัน หรือเซนเซอร์อัจฉริยะ ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อปกปิดข้อด้อยของเซนเซอร์เดี่ยว ทำให้สามารถเพิ่มข้อมูลในการตัดสินใจและสามารถตอบสนองต่อความต้องการในการตรวจติดตามกระบวนการผลิตได้ กระบวนการผลิตและระบบการผลิตเกือบจะทุกชนิดต้องการการตรวจติดตามเพื่อที่จะรักษาความ

นำเชื่อถือของกระบวนการผลิตและเพื่อหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาด ซึ่งบทบาทของเซนเซอร์ในกระบวนการผลิตและระบบการผลิตสามารถที่จะสรุปได้ดังนี้

- เซนเซอร์ควรมีที่จะมีความสามารถในการตรวจจับการทำงานที่ผิดปกติซึ่งอาจจะเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต โดยเฉพาะความผิดปกติที่เกินความสามารถของมนุษย์ในการตรวจจับได้
- เซนเซอร์แบบระบบการตรวจติดตามมีความสามารถในการนำข้อมูลที่ได้ในกระบวนการผลิต มาคำนวณหาวิธีการผลิตที่มีความเหมาะสมที่สุด ตามวัตถุประสงค์ของการผลิต อาทิเช่น ต้นทุนต่ำที่สุด
- เซนเซอร์และระบบการตรวจติดตามจะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลต่างๆที่ใช้ในกระบวนการผลิตกับผลลัพธ์หรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้โดยอาศัยข้อมูลของกระบวนการผลิตในอดีต



รูปที่ 1.2 เซนเซอร์สำหรับการตรวจติดตามระบบการผลิต [1]

## 1.2 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันวัสดุประเภทเหล็กกล้า ได้ถูกนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนสำคัญต่างๆมากมาย โดยเฉพาะชิ้นส่วนของเครื่องจักร ชิ้นส่วนรถยนต์ และชิ้นส่วนประกอบสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ กระบวนการกลึงเป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญในการตัดขึ้นรูปวัสดุทำให้ได้รูปร่างตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตามความขรุขระผิวชิ้นงานยังเป็นปัญหาหลักในกระบวนการกลึงขึ้นรูปชิ้นงาน เนื่องจากคุณภาพผิวของชิ้นงาน ส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของชิ้นงานไม่ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งทำให้เกิดอัตราการผลิตต่ำเนื่องมาจากการหยุดเครื่องเพื่อเปลี่ยนมีดตัดใหม่

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ทำให้มีงานวิจัยมากมายที่พยายามจะพัฒนาทฤษฎีสำหรับการตรวจติดตามความขรุขระผิว โดยการวิเคราะห์สัญญาณจากแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะทำการตัดชิ้นงาน[2-4, 15-25] แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากผลงานการวิจัยที่ผ่านมาไม่ได้ระบุถึงการตรวจติดตามในกระบวนการตัด ทำให้ไม่สามารถหาสาเหตุของการที่ผิวชิ้นงานไม่ได้คุณภาพในขณะทำการตัดชิ้นงาน ซึ่งการตรวจติดตามภายในกระบวนการตัดนั้นจะทำให้รู้ปัญหาและสามารถแก้ปัญหาได้ทันที

จากผลงานวิจัยและการทดลองที่ผ่านมาของนักวิจัย[2] พบว่าการตัดแบบแห้งในบางสภาวะสามารถให้ความขรุขระผิวของชิ้นงานตัดที่ดี อัตราการสึกหรอของมีดตัดที่น้อย ต้นทุนเครื่องมือตัดที่ลดลง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่งานวิจัยนี้ต้องการทำการทดลองเพื่อประมาณความขรุขระผิวของชิ้นงาน เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการตรวจติดตามในกระบวนการกลึง ช่วยให้ของเสียระหว่างกระบวนการน้อยลงอันเป็นประโยชน์ต่อการผลิตและเพิ่มอัตราการผลิต

แรงตัดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการตัดถูกตรวจติดตามด้วยเครื่องมือวัดแรงไดนามิเตอร์ ซึ่งแรงตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน อย่างไรก็ตามความขรุขระผิวที่ได้ในขณะตัดยังคงขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการตัด โดยความเร็วตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความขรุขระผิวที่ดีจากผลการตรวจติดตามด้วยแรงตัดพบว่าการตัดที่ความเร็วตัดที่มากขึ้นพบว่าแรงตัดมีค่าลดลง[3] กล่าวได้ว่าการตรวจติดตามกระบวนการด้วยเครื่องมือวัดแรงไดนามิเตอร์สามารถนำมาใช้ได้เป็นอย่างดี แต่แรงตัดที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงต่อเงื่อนไขการตัดด้วย ดังนั้นแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดทั้ง 3 แนวแกน (ได้แก่ แรงตัดหลัก, แรงป้อนตัด, แรงรัศมี) จะถูกนำมาพิจารณาเพื่อตัดอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้สามารถพยากรณ์ความขรุขระผิวได้ในกระบวนการตัดจริง ค่าแรงตัดที่วัดได้จะถูกเก็บเป็นข้อมูลเพื่อพัฒนาสมการต้นแบบการพยากรณ์

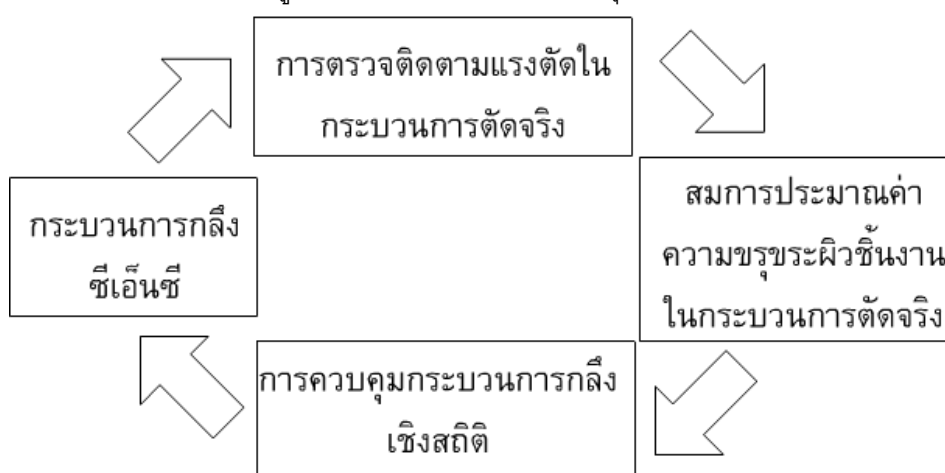
ความขรุขระผิวชิ้นงานตัดภายในกระบวนการตัด เพื่อเป็นการตรวจสอบความแม่นยำของสมการต้นแบบที่ได้ แรงตัดที่วัดได้จากเงื่อนขีดตัดอื่นๆ จะถูกนำมาพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจากงานวิจัยก่อนหน้านี้[4] ที่ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์หาความขรุขระผิว ในกระบวนการกลึง โดยอาศัยปัจจัย 6 ปัจจัยดังนี้ ความเร็วของการตัด, อัตราการป้อน, มุมคายเศษโลหะ, รัศมีจุ่มมีด, ความลึกของการตัด และ อัตราส่วนแรงตัด ซึ่งได้นำเสนอแบบจำลองการพยากรณ์ในรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลความขรุขระผิวเฉลี่ย (Average surface roughness: Ra)

$$R_a = C_1 \cdot V^{a_1} \cdot F^{a_2} \cdot R_n^{a_3} \cdot D^{a_4} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{a_5} \cdot e^{a_6 \gamma}$$

ความขรุขระผิวสูงสุด (Roughness depth: Rz)

$$R_z = C_2 \cdot V^{a_7} \cdot F^{a_8} \cdot R_n^{a_9} \cdot D^{a_{10}} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{a_{11}} \cdot e^{a_{12} \gamma}$$

ผลการพยากรณ์จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากการทดลองเพื่อเป็นการสอบเทียบสมการต้นแบบการพยากรณ์ให้มีประสิทธิภาพและสามารถใช้งานได้จริงซึ่งสามารถตรวจจับค่าความขรุขระผิวได้อย่างถูกต้องที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และสมการพยากรณ์ในรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลนี้สามารถรองรับต่อความเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่างๆที่ได้กล่าวข้างต้นมา เนื่องจากว่า อัตราส่วนแรงตัดนั้นจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาสมการพยากรณ์โดยใช้ Neural network จะพบว่า Neural network จำเป็นที่จะต้องทดลองเพื่อให้ได้ข้อมูลในการสอนระบบเป็นจำนวนมาก ซึ่งถ้ามีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยในการตัดก็จำเป็นที่จะต้องทำการทดลองเพิ่มเพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับการสอนระบบใหม่ทุกครั้ง



รูปที่ 1.3 ระบบการตรวจติดตามในกระบวนการเพื่อพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานร่วมกับการควบคุมในกระบวนการเชิงสถิติ

การควบคุมในกระบวนการเชิงสถิติเป็นอีกหนึ่งวิธีการที่เหมาะสมต่อการควบคุมและลดของเสียจากความขรุขระผิวในระหว่างกระบวนการจริงและเพิ่มอัตราการผลิต ซึ่งสามารถนำมาใช้ร่วมกับระบบตรวจติดตามเพื่อพัฒนาระบบการผลิตอัจฉริยะได้ โดยติดตั้งบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี และเชื่อมต่อกับสัญญาณแรงตัดที่วัดได้ในขณะตัดเพื่อแสดงผลการประมาณค่าความขรุขระผิวชิ้นงานโดยตรง เพื่อควบคุมการผลิตในขณะที่เครื่องจักรทำงานอยู่โดยไม่ต้องนำชิ้นงานออกมาวัดความขรุขระผิวด้วยเครื่องวัดอีกต่อไปดังแสดงในรูปที่ 1.3

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างระบบการผลิตอัจฉริยะสำหรับการตรวจติดตามคุณภาพของชิ้นงาน เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานที่ต้องการ โดยอาศัยสัญญาณจากเครื่องวัดแรงไดนาโมมิเตอร์ ด้วยการควบคุมในกระบวนการเชิงสถิติ โดยการติดตั้งเครื่องมือวัดแรงไดนาโมมิเตอร์ บนเครื่องกลึงซีเอ็นซีและเชื่อมต่อกับสัญญาณแรงตัดที่วัดได้ในขณะตัด แล้วจึงนำสัญญาณประเภทดิจิตอลที่ได้มาทำการประมาณค่าและวิเคราะห์หาค่าความขรุขระของชิ้นงานโดยตรง และแสดงผลเพื่อเปรียบเทียบแรงตัดกับช่วงค่าขีดจำกัดควบคุม หากค่าที่ได้มีค่านอกเหนือขีดจำกัดควบคุมระบบจะทำการแจ้งเตือนให้ผู้ควบคุมทำการแก้ไขได้ทันท่วงที ทำให้สามารถควบคุมกระบวนการผลิตในขณะที่เครื่องกลึงซีเอ็นซีกำลังทำงานได้โดยไม่ต้องนำชิ้นงานออกมาตรวจสอบความขรุขระผิวชิ้นงานด้วยเครื่องมือวัดความเรียบ ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสมต่อการควบคุมและลดของเสียในกระบวนการตัด ลดระยะเวลาในการผลิตชิ้นงาน และเพิ่มอัตราการผลิตให้สูงขึ้น เพื่อตอบสนองต่อกระบวนการผลิตที่มีอัตราการแข่งขันสูงในอนาคต

แรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึงจะถูกตรวจติดตามเพื่อประมาณค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจากสมการต้นแบบที่พัฒนาขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด โดยที่ค่าความขรุขระผิวจะถูกแสดงด้วยการควบคุมในกระบวนการเชิงสถิติ In-process SPC (In-process Statistic Process Control) ซึ่งข้อมูลจะถูกส่งมายังระบบควบคุมในกระบวนการเชิงสถิติโดยใช้หลักการของ I-MR Chart ซึ่งเหมาะกับกรณีที่ การสุ่มครั้งเดียวสามารถเป็นตัวแทนของกระบวนการได้ และการวัดค่าที่ได้จากกระบวนการที่ใช้เครื่องจักรอัตโนมัติ และระบบจะทำการตรวจสอบข้อมูลที่ได้ด้วยแผนภูมิควบคุมที่จะมีการคำนวณค่าขีดจำกัดควบคุมเพื่อควบคุมค่าความขรุขระให้อยู่ในระดับที่ต้องการ หากค่าความขรุขระผิวที่ได้ออกนอกขีดจำกัดควบคุมก็จะมีแจ้งเตือนให้ผู้ควบคุมทำการปรับแก้ไขเงื่อนไขการตัดได้อย่างทันท่วงที หรือเครื่องจักรจะทำการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดโดยอัตโนมัติในอนาคตได้ จนกระทั่งได้ค่าความขรุขระผิวที่อยู่ในค่าขีดจำกัดควบคุม

### 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาระบบการตรวจติดตามและการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ(SPC) ภายในกระบวนการกลึงจริงสำหรับความขรุขระผิวบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี

### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. ทำการทดลองบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี 4 แกน
2. วัสดุทดลองเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C)
3. สมการต้นแบบค่าความขรุขระผิว จากงานวิจัย[4] ซึ่งประกอบด้วย อัตราส่วนแรงตัด ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุกมีด และมุมคายเศษโลหะ
4. เงื่อนไขการทดลองโปรแกรมมี ดังนี้
  - ความเร็วตัด 150,200 เมตร/นาที
  - อัตราป้อนตัด 0.15,0.20 มิลลิเมตร/รอบ
  - ความลึกตัด 0.4, 0.8 มิลลิเมตร
  - รัศมีจุกมีด 0.4, 0.8 มิลลิเมตร
  - มุมคายเศษโลหะ -6, 11 องศา
5. ใช้เครื่องวัดแรงไดนาโมมิเตอร์ ในการตรวจจับสัญญาณแรงตัดแบบอนาล็อก
6. ใช้ Ni-card (National Instrument) รุ่น PCI-6221,37-Pin ในการแปลงสัญญาณประเภทอนาล็อกให้กลายเป็นสัญญาณประเภทดิจิทัล
7. ใช้โปรแกรม Labview ในการพัฒนาระบบตรวจติดตามควบคุมความขรุขระผิวในกระบวนการเชิงสถิติ

### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ระบบการตรวจติดตามและการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ(SPC) ภายในกระบวนการกลึงจริงสำหรับความขรุขระผิวบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาเครื่องจักรกลอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีการตรวจติดตามในงานกลึงโดยการประมาณค่าความขรุขระผิวจากแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดจริง
2. สามารถนำเทคโนโลยีระบบการตรวจติดตามและควบคุมกระบวนการเชิงสถิติมาใช้งานกลึงชิ้นงานจริงบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อควบคุมคุณภาพผิวชิ้นงาน
3. แนวทางในการลดต้นทุนการผลิตและของเสียแบบทันทีทันใดอันเนื่องมาจากผิวชิ้นงานไม่ได้คุณภาพ

## 1.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาผลงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีต่างๆที่จะนำมาใช้ในการวิจัย
2. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงตัดที่วัดได้ในขณะตัดกับค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานจากงานวิจัยก่อนหน้า
3. ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดแรงตัดไดนาโมมิเตอร์บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี เพื่อวัดแรงตัดสถิติที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดจริงพร้อมดำเนินการตัดโลหะเพื่อเก็บข้อมูล
4. ทำการตรวจสอบสมมติฐาน
5. นำสัญญาณแรงตัดไดนามิกส์ที่วัดได้มาแปลงค่าจากเดิมซึ่งเป็นสัญญาณในรูปแบบอนาล็อกให้กลายเป็นสัญญาณดิจิทัลโดยใช้ Ni-card (National Insurance card)
6. พัฒนาโปรแกรมสำหรับการควบคุมการผลิตโดยใช้โปรแกรม Labview
7. สร้างระบบการตรวจติดตามในกระบวนการตัดสำหรับชิ้นงานโดยใช้เครื่องมือวัดแรงตัดไดนาโมมิเตอร์ช่วยในการตรวจวัดแรงตัดสถิติที่เกิดขึ้น พร้อมทดสอบระบบตรวจติดตามและตรวจจับ และตรวจสอบความแม่นยำ



## 1.8 แผนการดำเนินงาน

### ขั้นตอนการทำวิจัย

รายละเอียดของแผนการดำเนินงานถูกแสดงในตารางเวลาข้างล่างต่อไปนี้

แผนการดำเนินงาน	เดือน											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	←→											
2			←→									
3			←→									
4		←→										
5								←→				
6											←→	

รายละเอียดของแผนการดำเนินงานที่

1. ศึกษาและตรวจสอบปัจจัยในกระบวนการกลิ้งที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพความขรุขระผิวชิ้นงานจากงานวิจัยก่อนหน้า
2. ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดแรงตัดไดนาโมมิเตอร์บนเครื่องกลิ้งซีเอ็นซี เพื่อตรวจวัดแรงตัดสถิติที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดจริง
3. ทำการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องกลิ้งซีเอ็นซีกับ Ni-card
4. สร้างระบบการตรวจติดตามในกระบวนการตัดสำหรับชิ้นงานโดยใช้เครื่องมือวัดแรงตัดไดนาโมมิเตอร์ช่วยในการตรวจวัดแรงตัดสถิติที่เกิดขึ้น
5. ตรวจสอบประสิทธิภาพและปรับปรุงการทำงานของระบบการตรวจติดตาม
6. สรุปผลการทดลอง

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 ทฤษฎีการตัด [5]

การทำงานของเครื่องมือตัด ไม่ว่าจะเป็นมีดกลึงหรือเครื่องมือกลใดๆจะอยู่ภายใต้พื้นฐานของทฤษฎีอันเดียวกัน จุดประสงค์ของการทำงานใดๆก็คือต้องการให้ได้มาซึ่งผลงานที่ดี งานเสร็จด้วยระยะเวลาอันสั้น ให้ความพยายามไม่มากและต้นทุนต่ำสุด

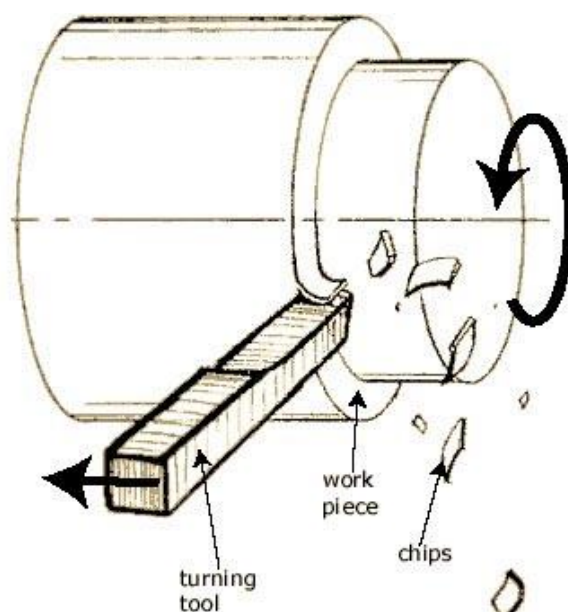
ความต้องการให้ได้การใช้งานที่ยาวที่สุดจากเครื่องมือซึ่งเป็นวัตถุประสงค์อย่างหนึ่งของเทคโนโลยีเครื่องมือกล สมมติฐานว่าเครื่องมือกลได้ออกแบบและทำขึ้นอย่างถูกต้องแล้ว ความเสียหายของเครื่องมือจะเกิดจากการที่คมตัดเกิดการสึกหรอ การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของเครื่องมือก็จะเกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงรูปทรงทางเรขาคณิตของเครื่องมือโดยทั่วไปก็คือการเปลี่ยนแปลงคมมีด ความเรียบ และมุมของมันเปลี่ยนไป การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ก็จะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งความร้อนนี้ทำให้ความแข็งแรงของเครื่องมือลดลง การเปลี่ยนแปลงอันนี้ไม่ได้หมายความว่าเครื่องมืออ่อน แต่หมายความว่าประสิทธิภาพในการกัดของเครื่องมือบนชิ้นงานลดลง ด้วยความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของเครื่องมือเพื่อกัด กลึง ไส เจาะมากเกินไป ส่วนที่กัดเนื้อชิ้นงานจะเกิดการสึกและหน้าสัมผัสกับชิ้นงานก็จะเพิ่มขึ้นทำให้เกิดความร้อนสูง ดังนั้นก็จะยังทำให้คมของมันมีขนาดใหญ่ขึ้น การเกิดการอ่อนของเครื่องมือและการหักสึกของคมเครื่องมือจะเกิดขึ้นจนกระทั่งเครื่องมือหักออกจากกัน

ความแข็งแรงเนื่องจากการใช้งานที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้า บางครั้งสามารถหลีกเลี่ยงโดยการตัดให้ลึกเพียงพอที่ผิวหน้าที่เกิดการแข็งตัวจากการกัดครั้งก่อนห่างจากคมมีดส่วนปลายของมีดกัดหรือคมตัด เนื่องจากบริเวณนั้นมีความแข็งแรงน้อย ส่วนผิวที่แข็งก็จะถูกกัดด้วยคมตัดของเครื่องมือที่แข็งแรงพอที่จะรับได้ และทำให้ได้สะเก็ดของเศษที่กัดออกมาก วิธีการเช่นเดียวกันนี้ ควรใช้กับการปอกวัสดุชนิดที่มีกรรมวิธีการผลิตโดยการรีดร้อน นอกจากนี้ยังมีวิธีที่จะปอกเนื้องานที่ผิวหน้าเกิดการแข็งตัว โดยการให้ความร้อนกับผิวหน้างานก่อนที่มีดกลึงจะทำการปอกเนื้องาน

##### 2.1.2 กระบวนการกลึง turning process [6]

กระบวนการกลึง คือ กระบวนการกำจัดเนื้อวัสดุโดยการหมุนชิ้นงานแล้วใช้มีดตัดคมเดียวในการตัดชิ้นงานโดยเคลื่อนไปสัมผัสกับผิวของชิ้นงาน เพื่อให้ได้พื้นผิวหรือรูปแบบชิ้นงานที่

ต้องการ การกลึงมีสองลักษณะหลัก คือ การกลึงปาดหน้า คือ การตัดโลหะโดยให้มีตัดคมเดียว ตัดชิ้นงานไปตามแนวขวาง (across the work) และ การกลึงปอก คือ การตัดโลหะโดยให้มีตัดคมเดียวตัดเคลื่อนที่ตัดชิ้นงานไปตามแนวขนานกับแนวแกนของชิ้นงาน โดยการกลึงรวมไปถึงการ เจาะ และ การคว้าน ด้วย



รูปที่ 2.1 กระบวนการกลึงชิ้นงาน

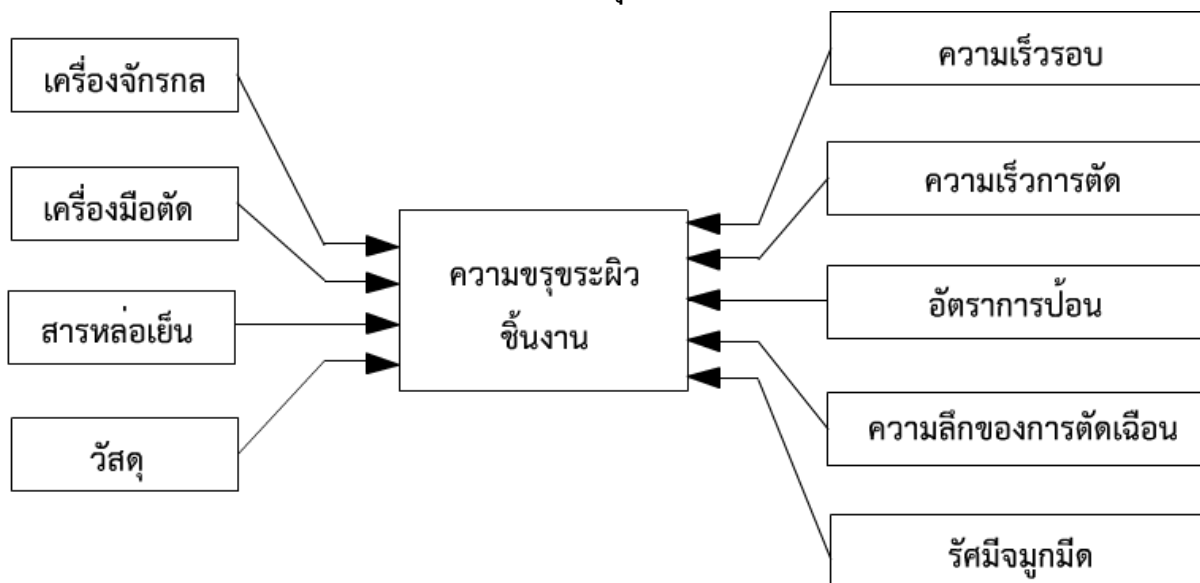
### 2.1.3 ชิ้นงาน (Workpiece) [7]

การผลิตชิ้นงานจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพ ดังนี้

- **รูปทรงและขนาดของวัสดุงาน** จะมีอิทธิพลต่อการเลือกใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานกับขนาดของแรงในการจับยึด และการเลือกใช้เครื่องมือตัดและรูปทรงของเครื่องมือตัด
- **ความแข็งแรงของชิ้นงาน** ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงไม่เพียงพอ อย่างเช่น ชิ้นงานที่มีลักษณะเล็กและยาว จำเป็นที่จะต้องจัดหาอุปกรณ์ช่วยงานอื่นๆ เพื่อป้องกันการสั่นสะท้าน (Vibrations) หรือ การโก่งงอ (Deflections) ของชิ้นงาน
- **ความเรียบผิวของชิ้นงาน** เพื่อให้ได้ความเรียบผิวของชิ้นงานที่ดี จะต้องเลือกใช้รูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือตัดให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุงาน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปของเศษสูงสุด และเลือกใช้ค่าเร็วตัดที่สูง ความลึกในการตัดน้อย และอัตราการป้อนชิ้นงานที่ต่ำ

- **พิกัดความเผื่อ (Tolerance)** ของชิ้นงานสำเร็จ จะเป็นตัวชี้ถึงระดับความเที่ยงตรง และวิธีดำเนินการตัดที่ต้องใช้ อย่างเช่น ช่วงระยะเวลาของการตรวจสอบขนาดชิ้นงาน และการเปลี่ยนแปลงคมตัด

#### 2.1.4 อิทธิพลของเงื่อนไขในการตัดที่มีต่อความขรุขระผิว [7,8]



รูปที่ 2.2 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน [7]

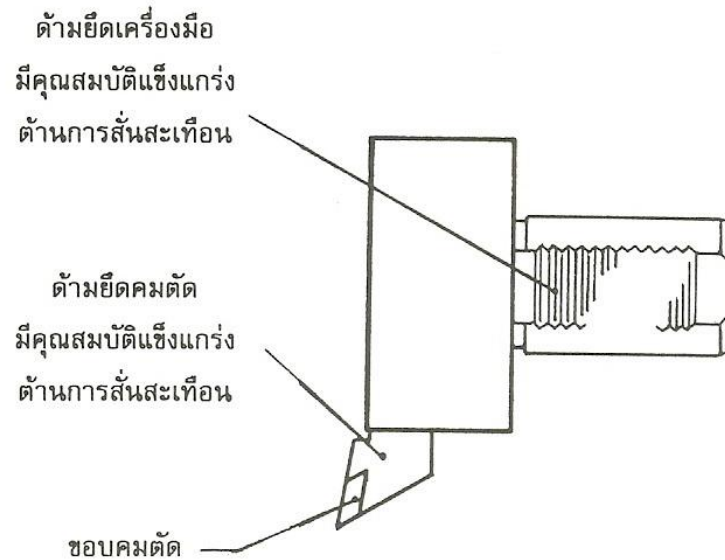
ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อขั้นตอนการตัดโลหะด้วยเครื่องจักรกลซึ่งได้แก่ เครื่องจักรกล (Machines) เครื่องมือตัด (Tools) สารหล่อเย็น (Coolant) ชิ้นงาน (Workpiece) วัสดุ (Material) ความเร็วรอบ (Spindle speed) ความเร็วการตัด (Cutting speed) อัตราการป้อน (Feed rate) และ ความลึกของการตัด (Depth of cut) และ รัศมีจุมุมมีด (nose radius)

##### 2.1.4.1 เครื่องจักรกล (Machines)

เครื่องจักรกลที่เลือกใช้จะต้องสามารถปฏิบัติงานตามขั้นตอนการตัดที่ต้องการได้ และมีความเที่ยงตรง (Accuracy) ตลอดจนสามารถผลิตชิ้นงานได้อย่างประหยัด (Economy)

หลักการเบื้องต้นในการออกแบบสำหรับโครงสร้างทางกลของเครื่องจักรกลได้แก่ ความแข็งแกร่ง (Rigidity) ความมั่นคง (Stability) และคุณสมบัติทางความถี่

### 2.1.4.2 เครื่องมือตัด (Tools)

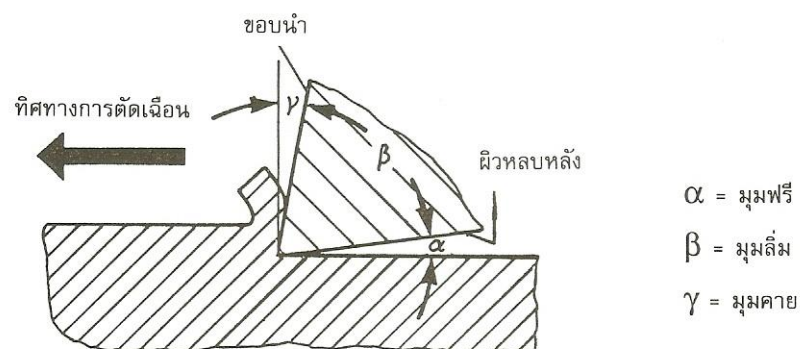


วัสดุ - รูปทรงเรขาคณิต - อายุคมมีด

รูปที่ 2.3 องค์ประกอบต่างๆ ของมีดกัดและมีดกลึง [7]

ข้อพิจารณาในการเลือกใช้เครื่องมือตัดสำหรับขั้นตอนการตัดด้วยเครื่องจักรซีเอ็นซี จะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้

- ชนิดของวัสดุยึดเครื่องมือตัดในอุปกรณ์ลำเลียงเครื่องมือ (Tool Carrier)
- รูปแบบของขอบรูปที่ต้องการตัด

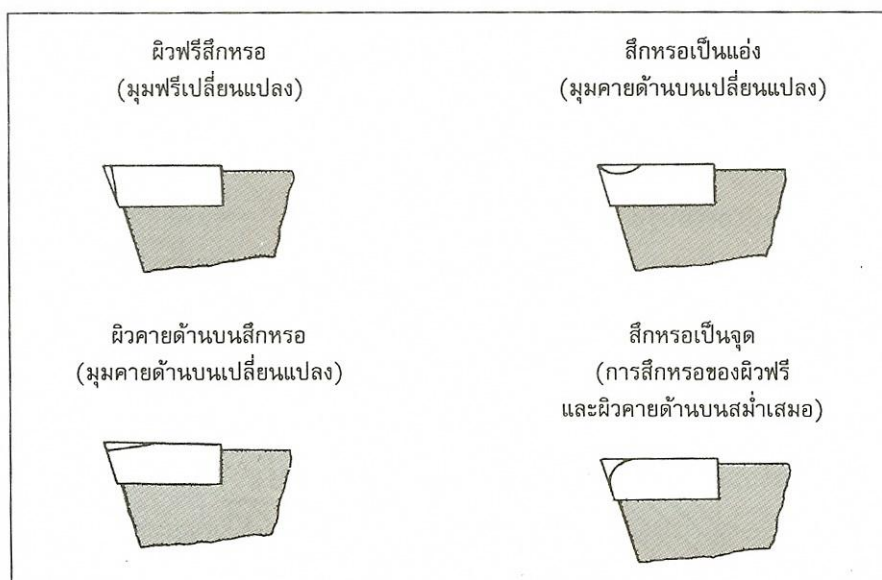


รูปที่ 2.4 รูปเรขาคณิตของลิ้มการตัด [7]

เนื่องจากอุปกรณ์ลำเลียงเครื่องมือและด้ามยึดเครื่องมือ จะถูกกระทำด้วยแรงจำนวนมาก และมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นอุปกรณ์ลำเลียงเครื่องมือและด้ามยึดเครื่องมือจึงควรมีคุณสมบัติดังนี้

- มีความแข็งแรงสูง (High rigidity)
- มีคุณสมบัติด้านการสั่นสะเทือนที่ยอมรับได้ (Vibration characteristics)

เครื่องมือตัดเมื่อถูกใช้งานไปชั่วระยะเวลาหนึ่ง จะเกิดการสึกหรอขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับเครื่องมือตัด ดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 และถ้ามีความเค้นมากเกินไปก็จะทำให้เครื่องมือเกิดการแตกหักได้ ในปัจจุบันความต้านทานต่อความเค้นที่เกิดขึ้นของเครื่องมือตัดสามารถเลือกใช้ได้หลายระดับ โดยเลือกใช้วัสดุเครื่องมือตัดชนิดต่างๆกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ลักษณะต่างๆของการสึกหรอ [7]

	เหล็กอบสูง	ทังสเตน คาร์ไบด์	เซรามิกส์	เพชร
ความเหนียว (Toughness)	● ● ● ●	● ● ●	● ●	●
ความแข็ง (Hardness)	●	● ●	● ● ●	● ● ● ●
ความต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance)	●	● ●	● ● ●	● ● ● ●
ความเร็วตัด (Cutting speed)	●	● ●	● ● ●	● ● ● ●

รูปที่ 2.6 คุณสมบัติของวัสดุเครื่องมือตัด [7]

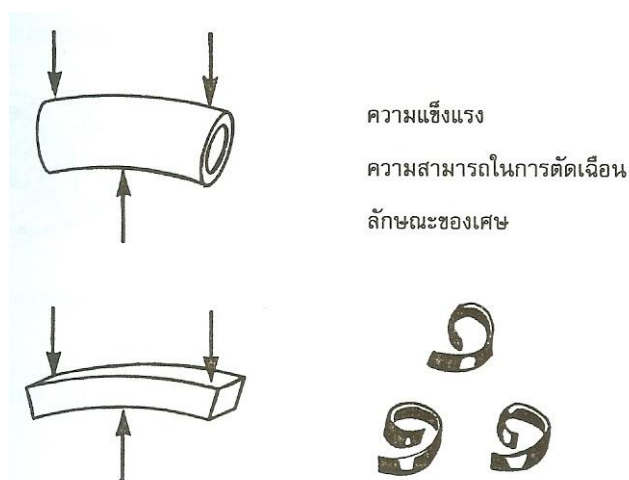
เครื่องมือตัดเมื่อใช้งานไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง จะเกิดการสึกหรอและทำให้เครื่องมือตัดที่ติดตั้งเฉื่อยระไนลึบคมใหม่หรือเปลี่ยนคมตัดใหม่ ระยะเวลาใช้งานดังกล่าวเรียกว่า อายุขุมมีด (Tool life) ซึ่งได้รับผลกระทบจาก ความเร็วตัด, วัสดุเครื่องมือตัด, วัสดุชิ้นงาน, พื้นที่ภาคของเศษตัด (พื้นที่ภาคตัดของเศษก่อนที่จะเปลี่ยนรูป) และ ความถี่ของการขัดจังหวะการตัด (Frequency of cut interruption) โดยทั่วไปเครื่องมือตัดที่มีอายุขุมมีดยาวจะมีราคาสูงกว่า แต่สามารถช่วยลดต้นทุนในการเปลี่ยนเครื่องมือได้

#### 2.1.4.3 สารหล่อเย็น (Coolant)

เพื่อให้ได้สภาวะการตัดที่ดีขึ้น จะต้องพิจารณาเลือกใช้สารหล่อเย็นที่เหมาะสม เป้าหมายหลักของการใช้สารหล่อเย็นมีดังนี้

1. เพื่อระบายความร้อนที่เกิดขึ้นที่จุดปลายเครื่องมือตัดและรักษาระดับอุณหภูมิของชิ้นงานให้ต่ำลง
2. ช่วยหล่อลื่นเพื่อลดความฝืดและการสึกหรอของเครื่องมือตัด
3. ช่วยไล่เศษออกจากบริเวณตัด

#### 2.1.4.4 วัสดุ (Material)

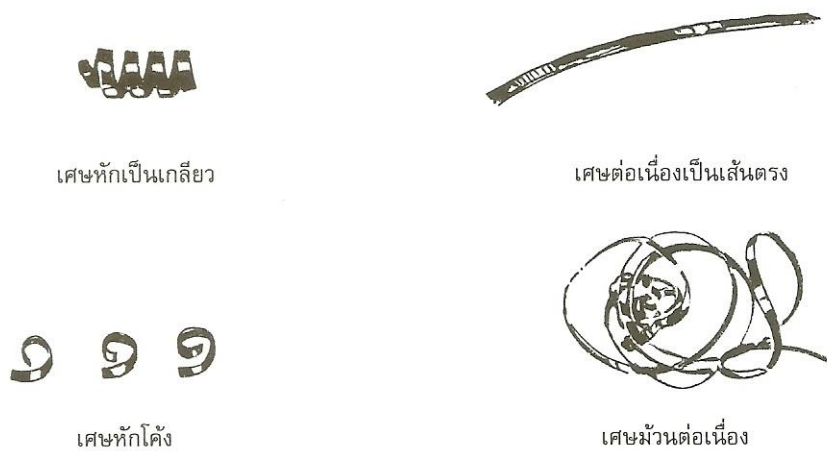


รูปที่ 2.7 ปัจจัยที่เกิดจากอิทธิพลของวัสดุชิ้นงาน [7]

สิ่งที่ควรคำนึงถึงเป็นอันดับแรกเกี่ยวกับวัสดุชิ้นงานคือความแข็งแรง (Strength) และความสามารถในการตัด (Machinability) ของวัสดุ ตลอดจนลักษณะเศษ (Type of chips) ที่เกิดขึ้นขณะทำการตัด

- **ความแข็งแรง (Strength)** เป็นปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาในการเลือกใช้ อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน
- **ความสามารถในการตัดของวัสดุ (Machinability)** เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการใช้เลือกใช้ปลายคมตัดและแรงตัด (Cutting force) ที่ต้องใช้ ลักษณะของความสามารถในการตัดของวัสดุชิ้นงานที่ดีคือ ลักษณะการเกิดเศษที่มีประสิทธิภาพขณะทำการตัดด้วยความเร็วสูง โดยมีการสึกหรอของเครื่องมือตัดน้อยและได้ผิวสำเร็จของชิ้นงานที่ดี เศษที่เกิดขึ้นจะต้องสามารถนำออกจากบริเวณพื้นที่การตัดได้สะดวก
- **ลักษณะเศษ (Type of chips)** โดยลักษณะของเศษที่เกิดจากการตัดจะขึ้นอยู่กับ แฟคเตอร์การอัด (Compression factor) ,วัสดุชิ้นงาน ,ความเร็วตัด ,ผิวสำเร็จของผิวคายด้านบน (Top rake face) ,วัสดุเครื่องมือ ,ส่วนหักเศษของปลายคมตัด (Chip breakers)

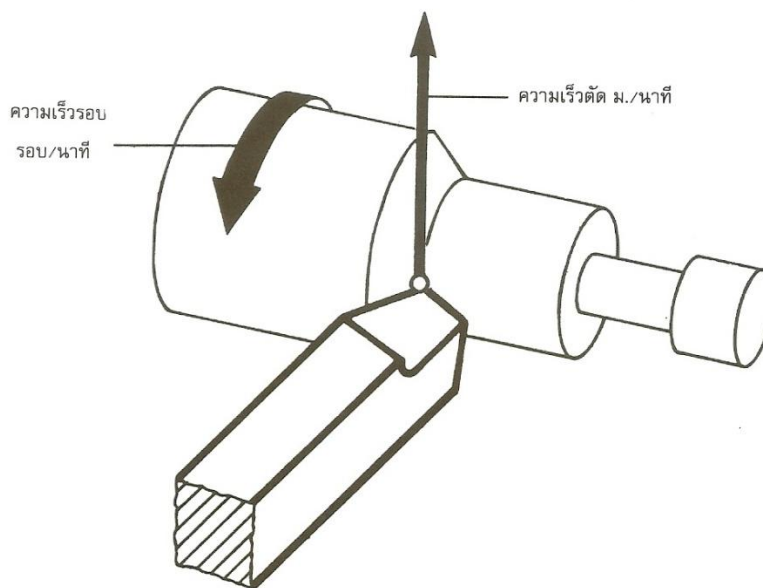




รูปที่ 2.8 ลักษณะของเศษที่ดี [7]

รูปที่ 2.9 ลักษณะของเศษที่ไม่ดี [7]

2.1.4.5 ความเร็วรอบ (Spindle speed) และความเร็วการตัด (Cutting speed)



รูปที่ 2.10 ความเร็วตัดและความเร็วของชิ้นงาน [7]

ความเร็วรอบของเพลางาน ถูกระบุในหน่วย จำนวนรอบ/นาที (r.p.m.) และจะต้องกำหนดทิศทางการหมุนของเพลาให้เข้ากับตัวชิ้นงาน คือ หมุนตามเข็มนาฬิกา (CW) หรือ หมุนทวนเข็มนาฬิกา (CCW)

ความเร็วตัด จะมีค่าเท่ากับความเร็วรอบ ณ จุดที่เกิดการตัดดังที่แสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความเร็วรอบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานกลึง ซึ่งความเร็วรอบต่ำกับ

ชิ้นงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กจะได้รับความเร็วตัดต่ำ ส่วนชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กับความเร็วรอบสูง จะได้ค่าความเร็วตัดสูง

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ ความเร็วตัด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน กลึง สามารถเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad \text{หรือ} \quad n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d}$$

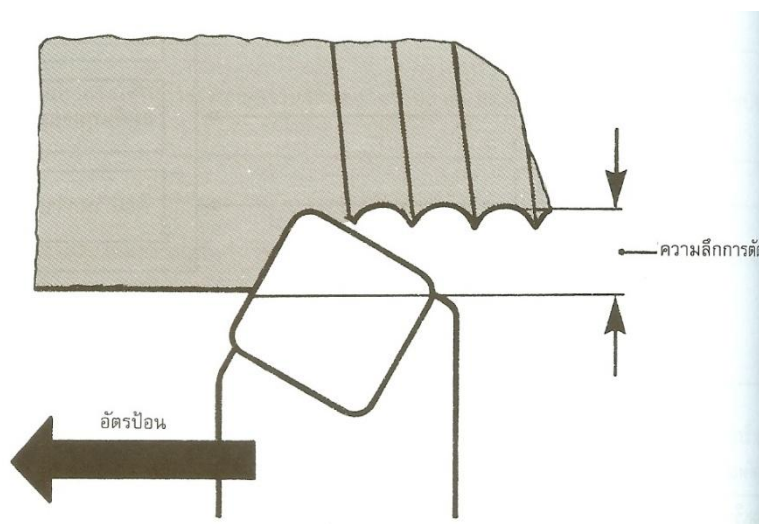
เมื่อ  $n$  = ความเร็วรอบ หน่วยเป็น r.p.m.

$V$  = ความเร็วตัด หน่วยเป็น m/min

$d$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางชิ้นงาน หน่วยเป็น mm.

#### 2.1.4.6 อัตราการป้อน (Feed rate)

อัตราการป้อน คือระยะทางที่เครื่องมือตัดเคลื่อนที่ไปในทิศทางของการตัด ดังที่แสดงในรูปที่ 2.11 ค่าอัตราการป้อนจะมีหน่วยเป็น ระยะทางต่อรอบการหมุน หรือ ระยะทางต่อนาที โดยอัตราการป้อนจะถูกกำหนดตามขนาดของแรงตัด (Cutting force) ที่เครื่องยอมให้ใช้ได้และได้ความเรียบผิวที่ต้องการ



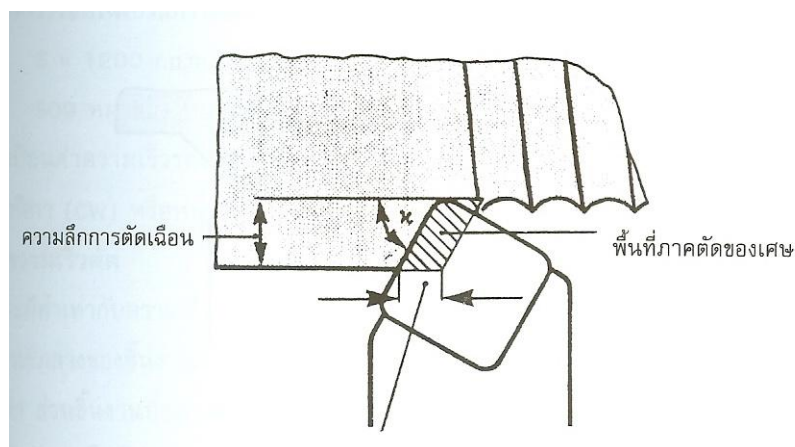
รูปที่ 2.11 อัตราป้อนและความลึกของการตัด [7]

#### 2.1.4.7 ความลึกของการตัด (Depth of cut)

ความลึกของการตัด คือระยะทางที่วัดจากผิวงานไปถึงจุดปลายเครื่องมือตัดในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของการทำงาน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.12 การตัดผิวสำเร็จในทิศทางตามแนวยาว

จะใช้ความลึกของการตัดเท่ากับค่าแตกต่างระหว่างขนาดเผื่องานตัด (Machining allowance) กับขนาดสำเร็จหลังการตัด

สำหรับการตัดหยาบ (Roughing) ความลึกของการตัด จะขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นของการตัดหยาบ ดังนั้น เพื่อให้ได้การสึกหรอที่สม่ำเสมอ จึงควรเลือกใช้ความลึกของการตัดที่สามารถใช้ประโยชน์จากความกว้างของจุดปลายคมตัดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งการเลือกใช้อัตราการป้อนและความลึกของการตัด จะเป็นตัวกำหนดขนาดพื้นที่ภาคตัดของเศษดังที่แสดงในรูปที่ 2.12

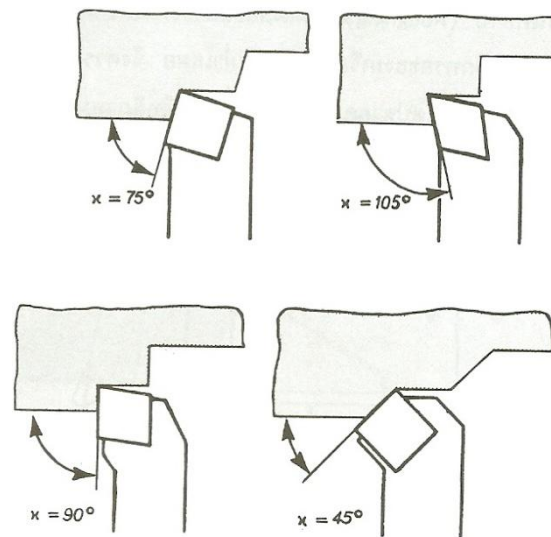


รูปที่ 2.12 พื้นที่ภาคตัดของเศษ [7]

$$\text{พื้นที่ภาคตัดของเศษ} = \text{อัตราการป้อนต่อรอบ} * \text{ความลึกของการตัด}$$

$$\text{ปริมาตรของการตัดเนื้อวัสดุออก} = \text{พื้นที่ภาคตัดของเศษ} * \text{ความเร็วตัด}$$

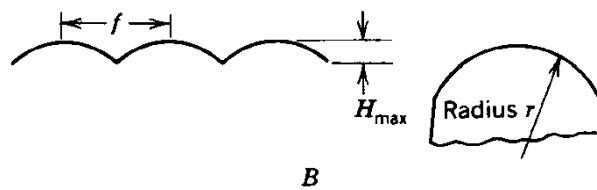
รูปทรงพื้นที่ภาคตัดของเศษสามารถเป็นได้ทั้งสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือสี่เหลี่ยมด้านขนาน ซึ่งขึ้นอยู่กับมุมของการปรับตั้ง ดังที่แสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 มุมของการปรับตั้งต่างๆกัน [7]

#### 2.1.4.8 รัศมีจมูกมีด (Nose Radius)

รัศมีจมูกมีด คือรัศมีของใบมีดส่วนที่สัมผัสกับผิวชิ้นงานขณะตัด ซึ่งรัศมีจมูกมีดและอัตราการป้อนมีความสัมพันธ์กับความขรุขระของผิวชิ้นงาน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ความขรุขระผิวที่เกิดจากรัศมีจมูกมีด [1]

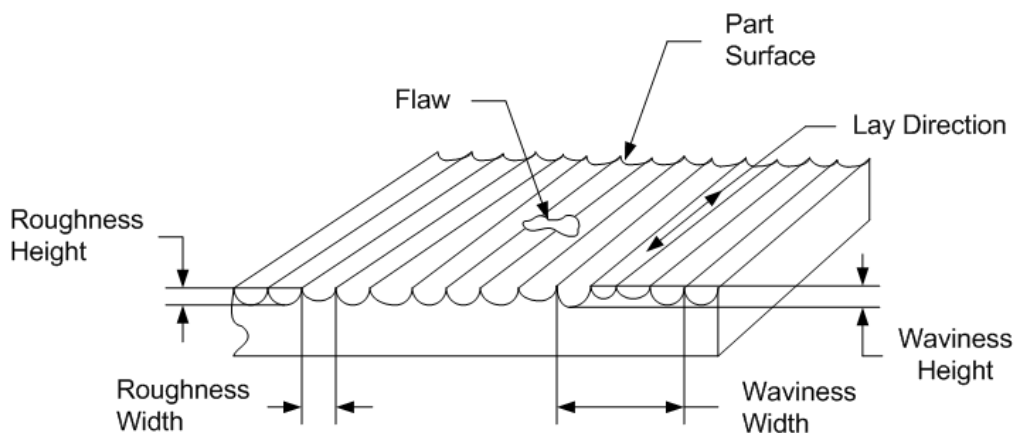
$$h = \frac{f^2}{8R_n}$$

เมื่อ  $h$  = ความขรุขระผิว หน่วยเป็น  $\mu\text{m}$ .

$f$  = อัตราการป้อน หน่วยเป็น  $\text{mm./rev}$

$R_n$  = รัศมีจมูกมีด หน่วยเป็น  $\text{mm}$ .

### 2.1.5 ความขรุขระผิว [9][10]



รูปที่ 2.15 ความขรุขระผิว

ลักษณะของความขรุขระผิว (Surface Finish) จะแสดงในรูปของคุณสมบัติของผิวชิ้นงานที่จะกล่าวดังต่อไปนี้

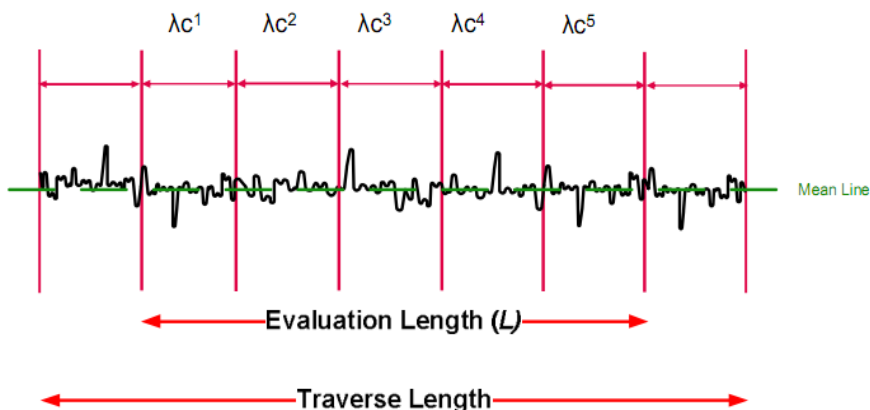
1. **ความขรุขระ (Roughness)** จะประกอบไปด้วยช่องขนาดเล็กและละเอียดที่ติดกันหลายๆช่อง สาเหตุหลักเกิดจากรอยที่เหลือไว้จากการทำตําหนิด้วย Cutting Tool ความสูงเฉลี่ยหรือความลึกเฉลี่ยถูกวัดโดยกำหนดช่วงความยาวหนึ่งเรียกว่า “Cutoff Length” หรือ “Roughness Sampling Length”

2. **รอยคลื่น (Waviness)** ประกอบไปด้วยรอยขรุขระบนชิ้นงานซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า Roughness Sampling Length (ประมาณ 1 ไมโครเมตร) สาเหตุเกิดจากการสั่นหรือมีรอยตําหนิบนชิ้นงานหรือ มีดตัดที่เกิดจากการรับภาระในการตัดมากและอุณหภูมิในการตัด

3. **รอยตําหนิยาว (Lay)** เป็นรอยตําหนิที่เป็นทิศทางยาว มักจะขึ้นกับทิศทางของชิ้นงานและมีดตัด รวมทั้งการเคลื่อนที่ระหว่างชิ้นงานและ Tool

4. **รอยตําหนิสุม (Surface Flow)** เป็นรอยตําหนิที่เกิดขึ้นแบบสุม สาเหตุเกิดมาจากรอยตําหนิที่มีมาแต่แรกแล้ว เช่นรอยร้าว ฟองอากาศ

5. **ความขรุขระผิว (Surface Finish)** มีความสำคัญต่อการสวมประกอบและการจัดวางของชิ้นงาน การสวมประกอบและการจัดวางต่างๆเกิดขึ้นได้ก็ต้องอาศัยการทาสีหรือทำตําหนิเข้าช่วย บางทีก็ใช้เป็นลักษณะก๊าสหรือของไหลผ่าน บางทีก็ใช้สายตาดูโดยอาศัยความมั่นใจของชิ้นงาน บางทีก็ใช้แสงที่มีคุณสมบัติการสะท้อนได้สูง



รูปที่ 2.16 การวัดค่าความขรุขระผิว

**Measuring condition: R-parameter**  
ISO4288: '96

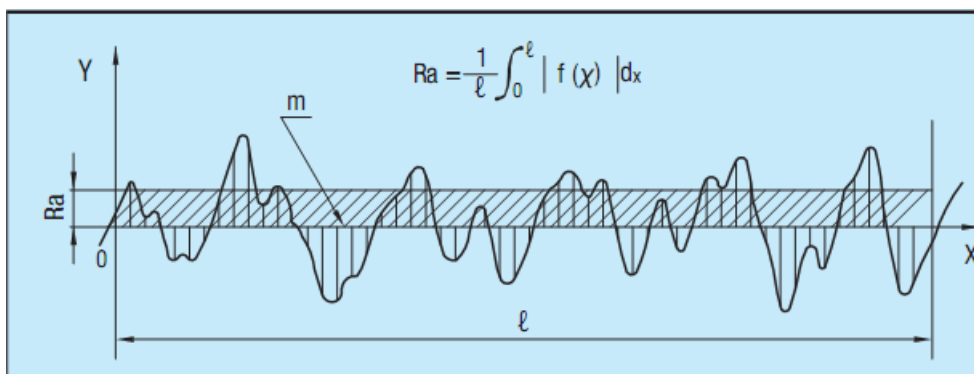
Non-periodic profile				Periodic profile or RSm		Measuring Condition	
Ra, Rq, Rsk, Rku or RΔq		Rz, Rv, Rp, Rc, or Rt				Sampling length: $l_r = l_n$ (mm) = CutOff $\lambda_c$ (mm)	Evaluation length $l_n$ (mm) = $5 \times l_r$
Ra (μm)		Rz (μm)		Over>	Less≤		
Over>	Less≤	Over>	Less≤	Over>	Less≤		
0.006	0.02	0.025	0.1	0.013	0.04	0.08	0.4
0.02	0.1	0.1	0.5	0.04	0.13	0.25	1.25
0.1	2	0.5	10	0.13	0.4	0.8	4
2	10	10	50	0.4	1.3	2.5	12.5
10	80	50	200	1.3	4	8	40

รูปที่ 2.17 เงื่อนไขการเลือก Cutoff Length และ Evaluation length

โดยพารามิเตอร์ที่ใช้วัดความขรุขระของผิวชิ้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ได้แก่ ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Average surface Roughness: Ra), ความขรุขระผิวสูงสุด (Surface roughness: Rz), ความขรุขระผิวแบบสิบจุด (Ten-spot Average surface roughness: Rt), ค่าเฉลี่ยระหว่างช่วงเส้นกราฟไม่สม่ำเสมอ (Sm), ค่าเฉลี่ยระหว่างยอดเส้นกราฟ (S) และอัตราส่วนความยาวในช่วงเส้นกราฟ (tp)

### ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Average surface roughness: Ra)

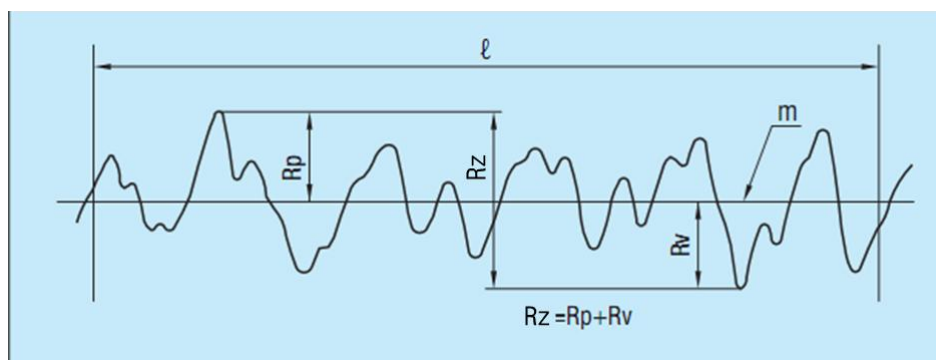
ความเฉลี่ยวัดจากกราฟความขรุขระผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิง ระยะเวลาเฉลี่ยนี้จะอยู่บนกราฟตามแนวแกน X ของเส้นอ้างอิงและแนวแกน y จะเป็นขนาดของความขรุขระผิว ค่า Ra จะแสดงจากสมการดังรูปที่ 2.18 มีหน่วยเป็น ( $\mu\text{m}$ ) โดยค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) ในช่วงที่ยอมรับได้ต้องไม่เกิน 5 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน ISO 4287-1997



รูปที่ 2.18 ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Average surface roughness :Ra) [10]

### ความขรุขระผิวสูงสุด (Surface Roughness: Rz)

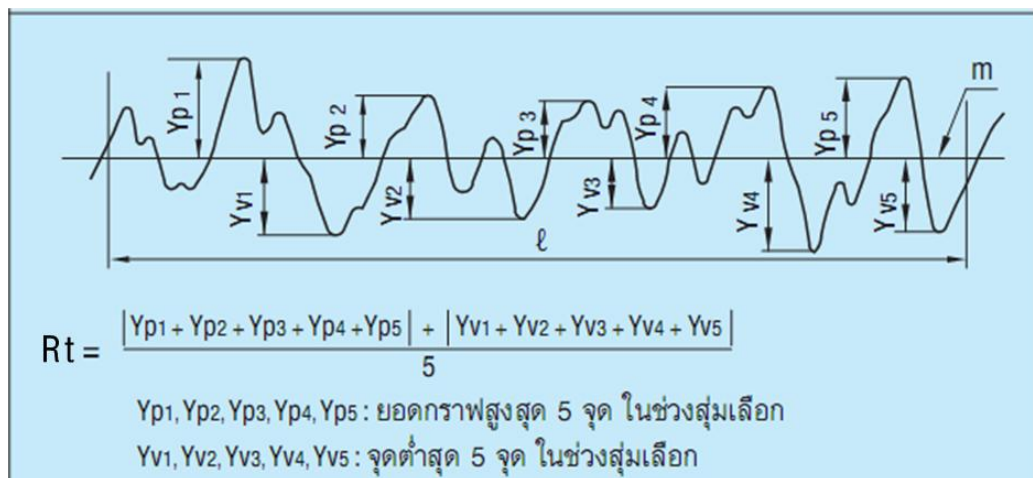
ค่าความขรุขระผิวสูงสุดวัดจากความขรุขระผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิงเป็นระยะที่เกิดจากระยะกราฟสูงสุดและต่ำสุด ดังรูปที่ 2.19 มีหน่วยเป็น ( $\mu\text{m}$ ) โดยค่าความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) ในช่วงที่ยอมรับได้ต้องไม่เกิน 20 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน ISO 4287-1997



รูปที่ 2.19 ความขรุขระผิวสูงสุด (Surface Roughness: Rz) [10]

### ความขรุขระผิวแบบสิบจุด (Ten-spot Average surface roughness: Rt)

ความเฉลี่ยวัดจากกราฟความขรุขระผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิง โดยคำนวณจากความสูงของยอดกราฟ 5 จุดบนและความสูงของยอดกราฟ 5 จุดล่างมารวมกันและหาค่าเฉลี่ย ดังรูปที่ 2.20 มีหน่วยเป็น ( $\mu\text{m}$ )



รูปที่ 2.20 ความขรุขระผิวแบบสิบจุด (Ten-spot Average surface roughness: Rt) [10]

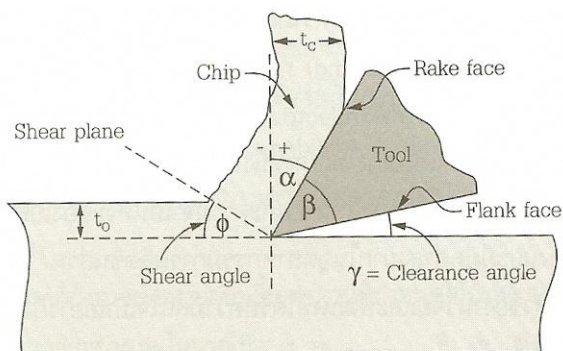
### 2.1.6 การสึกหรอของเครื่องมือ [11]

ในการผลิตชิ้นงานให้ได้ขนาด รูปร่างและความละเอียดผิวที่เหมาะสม มีการใช้เทคนิคการกำจัดเนื้อวัสดุออกจากผิวโดยการตัดแต่งผิวโลหะ (Metal cutting) การขัดถู (Abrasive means) การกัดกร่อนด้วยสารเคมี (Chemical method) หรือการกัดแต่งด้วยไฟฟ้า (Electrical method) จนกระทั่งได้เป็นชิ้นงานสำเร็จพร้อมใช้งาน ชิ้นส่วนโลหะส่วนใหญ่จะต้องผ่านการกัดแต่งอย่างใดอย่างหนึ่งในขั้นตอนสุดท้ายก่อนนำไปใช้งานไม่ว่าจะเป็นการกัด การเจียร การเจาะรูชิ้นงาน ฯลฯ ดังนั้น การสึกหรอและความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนใหม่ของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจึงเป็นต้นทุนการผลิตที่ต่อเนื่องและมีมูลค่าสูงมากในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วน

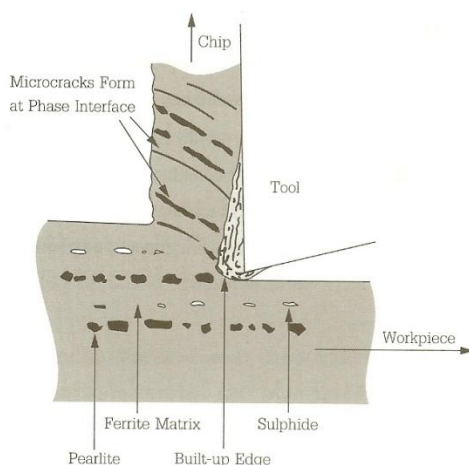
ในการกัดแต่งผิวโลหะเราใช้ชิ้นส่วน "Tool" ในการกระทำลงบนผิวโลหะให้ได้รูปร่างที่กำหนด Tool หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตชิ้นงาน ในที่นี้กล่าวถึงอุปกรณ์สิ้นเปลืองที่ใช้ในเครื่องจักรกลสำหรับการตัดแต่งรูปร่างชิ้นงาน (Cutting tools) ประเภทเครื่องกลึง เครื่องไส เครื่องตัด เครื่องเจาะ ฯลฯ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเหล่านี้ได้แก่ดอกสว่าน มีดเล็บ (Inserted-tooth) มีดตัด มีดกัด เป็นต้น

ที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาวัสดุเครื่องมือขึ้นหลายประเภท ตั้งแต่เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าผสมสูง (Alloyed steel) เหล็กกล้าความเร็วสูง (High speed steel) โคบอลต์อัลลอย ไปจนถึงวัสดุประกอบคาร์ไบด์ (Cemented carbide) เซรามิก และเพชร เป็นต้น



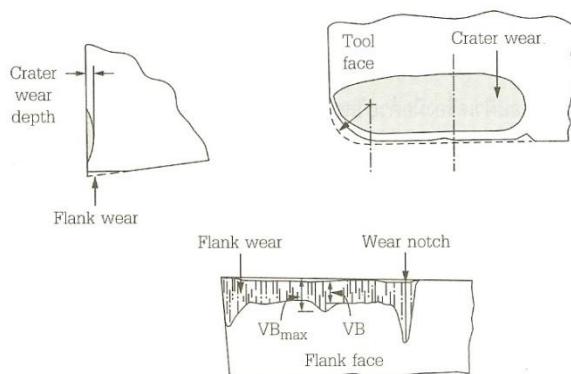


รูปที่ 2.21 ภาพประกอบในกระบวนการกัดแต่งโลหะแสดงให้เห็นในหน้าเรก (Rake face) และหน้าแฟรงก์ (Flank face) บนเครื่องจักรกล ลักษณะและทิศทางการเกิดเศษและตำแหน่งมุมเรก (Rake angle) [11]



รูปที่ 2.22 การเกิด Built up edge ระหว่างการกัดแต่งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ [11]

ในการใช้งานจะต้องระวังไม่ให้เกิด built up edge ที่หนาจนเกินไป เนื่องจากการที่ผิวเครื่องมือกลมีเศษวัสดุที่ผ่านการแปรรูปแบบพลาสติกอย่างรุนแรงมาเกาะอยู่จะทำให้เสียขอบตัด ซึ่งจะส่งเสมือนว่าเครื่องมือกลนั้นที่ลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการทำงาน of เครื่องมือกลนั้นลดลง โดยทั่วไปในการใช้งานจะพบว่า built up edge เกิดขึ้นและแตกหลุดออกอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยอาจเกิดขึ้นได้หลายรอบใน 1 วินาที เศษของ built up edge ที่หลุดออกมักจะไปติดอยู่กับผิวด้านใต้ของเศษ ช่วยเพิ่มปริมาณการสึกหรอบน Rake face ของเครื่องมือกล และยังทำให้ผิวสำเร็จ (Surface finish) ที่ได้ไม่ดีเท่าที่ควร หากนำเศษของ built up edge มาวัดค่าความแข็งบางที่จะพบว่ามีความแข็งสูงกว่าวัสดุแม่ที่นำมากัดแต่งได้ถึง 3 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุ built up edge ได้ผ่านกระบวนการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Work hardening) จากการแปรรูปที่รุนแรงมาหลายครั้งแล้วนั่นเอง



รูปที่ 2.23 แสดงการสึกหรอแบบเครเตอร์ (Crater wear) และการสึกหรอที่ Flank face (Flank wear) ในเครื่องมือกลสำหรับงานกลึง ตำแหน่งของการสึกหรอแบบเครเตอร์ คือจุดที่เกิดความร้อนสูงที่สุดระหว่างการกัดแต่ง ในหลายกรณีจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงช่วงวิกฤติช่วงหนึ่ง ปริมาณการสึกหรอแบบเครเตอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนบน Flank face ผิวที่สึกหรอไปจนเรียบเสมอกันนั้นเรียกว่า “Wear land” [11]

การสึกหรอของเครื่องมือกลสามารถเกิดได้ทั้งบน Rake face และ Flank face ดังแสดงในรูปที่ 2.23 ซึ่งการสึกหรอเหล่านี้จะเริ่มต้นจากกลไกพื้นฐานอย่างใดอย่างหนึ่งดังต่อไปนี้

1. การสึกหรอแบบแนบติด (Adhesive wear) การสึกหรอในลักษณะนี้เกิดจากการที่ผิวสัมผัสเชื่อมติดกันเป็นจุดเล็กๆ ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อเครื่องมือกลให้แก่เศษหรือผิวกัดแต่งของชิ้นงาน
2. การสึกหรอจากการแพร่ (Diffusion wear) ในขณะที่ใช้งานจะพบว่ามีการแพร่อะตอมระหว่างผิวของเครื่องมือกลและผิวชิ้นงานเกิดขึ้นขึ้นอยู่ตลอดเวลา การแพร่ของอะตอมจะทำให้ผิวสัมผัสเชื่อมติดกันได้ง่ายขึ้นซึ่งจะนำไปสู่การแตกหักในที่สุด กลไกการแพร่และการเชื่อมติดนี้เป็นสาเหตุในการสึกหรอแบบเครเตอร์
3. การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear) การสึกหรอลักษณะนี้จะเกิดในกรณีที่ชิ้นงานที่นำมากัดแต่งมีเฟสที่สองที่มีความแข็งสูงอยู่ในโครงสร้าง

สามารถจำแนกสาเหตุของความเสียหายที่เกิดขึ้นออกเป็น 8 ประเภทดังนี้ ซึ่งโดยทั่วไป เครื่องมือกลจะเสียหายด้วยสาเหตุหนึ่ง หรือ 2-3 สาเหตุเกิดร่วมกัน

1. Crater wear (การสึกหรอแบบเครเตอร์) เป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นบน Rake face หรือด้านบนเครื่องมือกล ส่วนใหญ่จะพบในงานกัดแต่งของเหล็กกล้าที่ความเร็วสูง การ

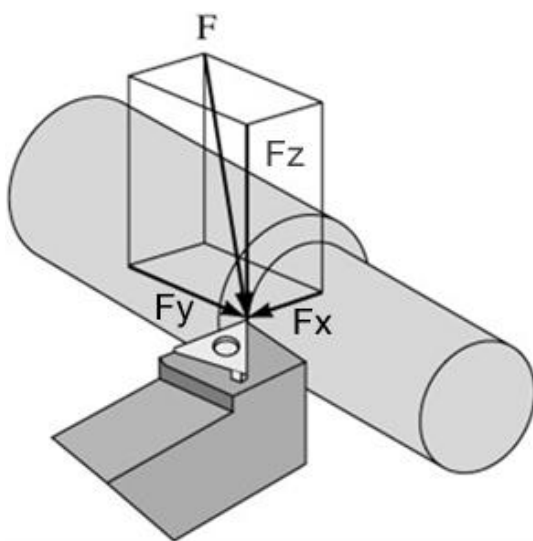
สึกหรอในลักษณะนี้เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างเศษกับวัสดุเครื่องมือกลที่อุณหภูมิสูง ในระหว่างการกัดแต่ง วัสดุเครื่องมืออาจจะละลายเข้าไปอยู่ในเศษ หรืออนุภาคขนาดเล็กจากเครื่องมืออาจถูกดึงติดไปกับเศษได้ ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นหลุมตื้น (แคเรเตอร์) บนผิวเครื่องมือกลขึ้น เครื่องมือกลที่เกิดการสึกหรอแบบแคเรเตอร์ในปริมาณสูงจะสูญเสียขอบตัดที่ดี กีดขวางการไหลของเศษ และทำให้ความร้อนและแรงกระทำของเครื่องมือที่สูงขึ้น ถ้าทิ้งไว้นานก็จะทำให้เครื่องมือกลแตกในที่สุด

2. **Thermal deformation** เกิดในขณะทำงาน ผิวสัมผัสได้รับความร้อนและแรงกดสูง ซึ่งสามารถทำให้วัสดุเครื่องมือหรือวัสดุที่เป็นเนื้อหลักก่อนตัวลงจนอนุภาคคาร์ไบด์สามารถเคลื่อนที่ได้ วัสดุเครื่องมือจะค่อยๆสึกหรอไปคล้ายกับการสึกหรอแบบแคเรเตอร์แต่ที่ปลาย (Nose) จะเริ่มบิดเบี้ยวเสียรูป ทำให้ชิ้นงานที่ผลิตไม่ได้ความเที่ยงตรงและเครื่องมืออาจแตกหักได้
3. **Thermal cracking** เกิดจากการที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิสูงมากระหว่างขอบตัดและเนื้อในของเครื่องมือ ทำให้เกิดรอยแตกเนื่องจากความเค้นจากการขยายตัวตั้งฉากกับขอบตัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว รอยแตกเหล่านี้จะขยายขึ้นอย่างต่อเนื่องและอาจทำให้เครื่องมือกลแตกได้
4. **Nose wear** เป็นความเสียหายที่เกิดจากการเสียดสี การขัดถูและการเสียรูปของปลายเครื่องมือ ซึ่งจะส่งผลต่อความละเอียดของผิวสำเร็จและความเที่ยงตรงของชิ้นงานที่ผลิต
5. **Depth-of-cut notching** เกิดจากงานกัดแต่งวัสดุประเภทเหล็กกล้าไร้สนิม โลหะผสมที่ใช้ในงานสูง และวัสดุที่ผ่านการทำให้แข็งด้วยความเครียด (work hardening) ซึ่งเป็นวัสดุที่ทำให้เกิดความร้อนจากการกัดแต่งสูง จึงอาจทำให้มีรอยบาก (Depth-of-cut notching) เกิดขึ้นที่ปลายเศษส่งผลให้เกิดรอยขูด (Burr) และอาจทำให้เครื่องมือกลแตกได้
6. **Built-up edge** เกิดจากการที่เนื้อวัสดุจากชิ้นงานมาเชื่อมติดกับผิวเครื่องมือกล ทับถมเป็นชั้นขึ้นมา Built-up edge ที่หนาเกินไปหรือไม่มีเสถียรภาพทางเคมีจะทำให้แรงกดของเครื่องมือเพิ่มขึ้น ผิวสำเร็จคุณภาพต่ำ ความแม่นยำในการกัดแต่งลดลง และอาจทำให้เครื่องมือแตกหัก

7. Chipping และ Fracturing เกิดจากแรงตัดที่ใช้ที่ไม่คงที่การตัดที่ต้องหยุดบ่อยๆ หรือแม้กระทั่งจากการที่เครื่องจักรสั่นสะเทือนมากขณะใช้งานก็ทำให้เครื่องมือแตกได้ ความเสียหายจากกลไกอื่นที่กล่าวมาก็อาจทำให้ความแข็งแรงของเครื่องมือลดลงจนแตกได้ นอกจากนี้ถ้าแรงตัดที่ใช้เพิ่มขึ้นจากสาเหตุใดก็ตามจนถึงจุดที่เครื่องกลไม่สามารถรับได้แล้วก็จะเกิดการแตกหักได้
8. Flank wear เกิดจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่าง Flank face บนชิ้นงาน เป็นการสึกหรอที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ถ้าการสึกหรอขยายไปถึงขอบตัดจะทำให้แรงตัดและความเค้นเกิดกับเครื่องสูงขึ้น

### 2.1.7 สัญญาณแรงตัด [3]

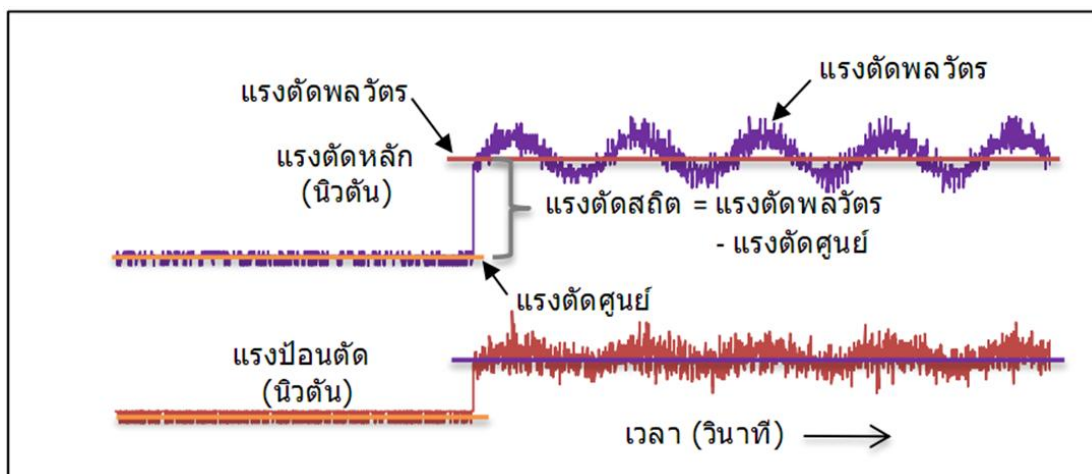
สัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้นขณะตัดจะอยู่ในรูปของสัญญาณอนาล็อก ซึ่งสัญญาณแรงตัดสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แกน คือ แรงตัดในแนวรัศมี (Radial Force,  $F_x$ ) แรงป้อนตัด (Feed force,  $F_y$ ) และแรงตัดหลัก (Main force,  $F_z$ ) ตามรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ทิศทางแรงตัด

แรงป้อนตัด ( $F_y$ ) ซึ่งเป็นแรงที่มีผลกระทบมากที่สุดต่อความขรุขระผิวชิ้นงานโดยมีเงื่อนไขการตัดร่วมด้วย แต่แรงตัดหลัก ( $F_z$ ) ซึ่งได้รับอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัด ดังนั้นอัตราส่วนแรงตัดระหว่างแรงป้อนตัดและแรงตัดหลัก ( $\frac{F_y}{F_z}$ ) จะเหลือแต่ผลกระทบของความขรุขระผิวชิ้นงานจึงสามารถนำมาใช้พยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานโดยที่อิทธิพลเงื่อนไขการตัดได้ถูกกำจัดออกไปแล้วด้วยอัตราส่วนระหว่าง ( $\frac{F_y}{F_z}$ ) โดยแรงที่ใช้ในการพิจารณาเป็นแรงตัดสถิตซึ่งเกิดจากการนำแรง

ตัดพลวัตเฉลี่ยที่เกิดระหว่างกระบวนการตัดนำมาหักออกจากแรงตัดศูนย์เฉลี่ยซึ่งเป็นสัญญาณแรงตัดก่อนทำการตัดจริงซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวนของอุปกรณ์ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.25 สัญญาณแรงตัดสถิต

#### 2.1.8 สมการการหาค่าความขรุขระ [4]

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [4] ที่ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์หาความขรุขระผิว ในกระบวนการกลึง ซึ่งสามารถตรวจจับค่าความขรุขระผิวได้อย่างถูกต้องที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยอาศัยปัจจัย 6 ปัจจัยดังนี้ ความเร็วของการตัด, อัตราการป้อน, มุมคายเศษโลหะ, รัศมีจุ่มกมิต, ความลึกของการตัด และ อัตราส่วนแรงตัด ซึ่งได้นำเสนอแบบจำลองการพยากรณ์ในรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Average surface roughness:  $R_a$ )

$$R_a = C_1 \cdot V^{a_1} \cdot F^{a_2} \cdot R_n^{a_3} \cdot D^{a_4} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{a_5} \cdot e^{a_6 \gamma}$$

ความขรุขระผิวสูงสุด (Surface roughness:  $R_z$ )

$$R_z = C_2 \cdot V^{a_7} \cdot F^{a_8} \cdot R_n^{a_9} \cdot D^{a_{10}} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{a_{11}} \cdot e^{a_{12} \gamma}$$

โดย

- $R_a$  = ความขรุขระผิวเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
- $R_z$  = ความขรุขระผิวสูงสุด ( $\mu\text{m}$ )
- $V$  = ความเร็วของการตัด (m/min)
- $F$  = อัตราการป้อน (mm/rev)
- $R_n$  = รัศมีจุ่มกมิต (mm)
- $D$  = ความลึกของการตัด (mm)

$F_y/F_z$  = อัตราส่วนแรงตัดระหว่างแรงป้อนตัดและแรงตัดหลัก

$\gamma$  = มุมคายเศษโลหะ

จากผลการทดลองของงานวิจัย[4] ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของความขรุขระในรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

$$R_a = 53.52 \cdot V^{-0.122} \cdot F^{1.6} \cdot R_n^{-0.519} \cdot D^{0.108} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{-0.296} \cdot e^{-0.00187\gamma}$$

$$R_z = 757.48 \cdot V^{-0.263} \cdot F^{1.59} \cdot R_n^{-0.205} \cdot D^{0.163} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{-0.18} \cdot e^{-0.00998\gamma}$$

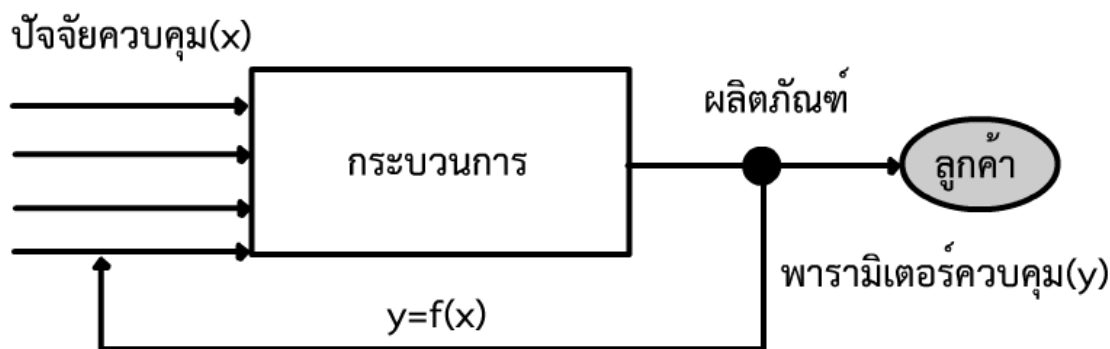
## 2.1.9 ตรวจสอบติดตาม

### 2.1.9.1 แผนภูมิควบคุมคุณภาพ [12],[13]

การวิเคราะห์กระบวนการเพื่อแก้ไขปัญหาด้านคุณภาพ จำเป็นที่จะต้องดำเนินการเพื่อรักษามาตรฐานและป้องกันการเกิดซ้ำของปัญหา โดยวิธีการหนึ่งของการควบคุมกระบวนการ คือ การอาศัยแนวความคิดและกลวิธีทางสถิติในการตรวจจับความผันแปรของกระบวนการเพื่อแยกแยะสาเหตุผิดปกติของความผันแปรออกจากสาเหตุปกติ ซึ่งเรียกลักษณะดังกล่าวว่า “การควบคุมคุณภาพกระบวนการโดยอาศัยสถิติ (SPC- Statistical Process Control)”

### 2.1.9.2 แนวความคิดของแผนภูมิควบคุม

ในการควบคุมกระบวนการนั้น ต้องเริ่มต้นจากการทำกระบวนการให้เป็นมาตรฐานก่อน และจากกระบวนการที่แก้ไขปัญหาคุณภาพหรือกระบวนการวิเคราะห์กระบวนการทำให้ทราบว่าพารามิเตอร์ที่ควรได้รับการควบคุม (y) คืออะไร และเมื่อพารามิเตอร์ควบคุมมีความผิดปกติ ควรจะมีการตรวจสอบพารามิเตอร์ใดของกระบวนการ (x) ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.26



### 2.1.9.3 แผนภูมิควบคุม I-MR

แผนภูมิประเภทนี้จะมีความเหมาะสมกับควบคุมด้วยข้อมูลที่ได้จากการวัดของชุดตัวอย่างอิสระเนื่องจากการผลิตแบบกลุ่มที่มีความสามารถในการซ้ำ (repeatability) สูงมาก และด้วยเหตุผลที่การควบคุมมีความจำเป็นต้องประเมินความผันแปรในกลุ่มย่อย จึงจำเป็นต้องพิจารณาความผันแปรจากกลุ่มต่อกกลุ่มหรือแบบซ้ำต่อแบบ จึงสามารถเรียกแผนภูมิควบคุมประเภทนี้ว่า พิสัยเคลื่อนที่ (moving range) โดยแผนภูมินี้เหมาะกับการที่ การสุ่มครั้งเดียวสามารถเป็นตัวแทนของกระบวนการได้ และการวัดค่าที่ได้จากกระบวนการที่ใช้เครื่องจักรอัตโนมัติ และสามารถวัดค่าทุกชิ้นที่ผลิตได้ ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการตรวจติดตามความเรียบผิวในกระบวนการกลึง โดยการกลึงแต่ละครั้งใช้พารามิเตอร์ไม่เหมือนกันและการตรวจติดตามความเรียบผิวจำเป็นที่จะต้องใช้การเลื่อนค่าพิสัยในการตรวจ จึงทำให้แผนภูมิประเภทนี้มีความเหมาะสมกับงานวิจัยฉบับนี้

#### 2.1.9.3.1 แผนภูมิควบคุม X, I

ในการพิจารณาถึงพิสัยควบคุมของแผนภูมิประเภทนี้ จะอาศัยค่าความผันแปรจากค่าพิสัยเคลื่อนที่โดย

$$\begin{aligned} UCL, LCL &= \mu_X \pm \sigma_X \\ &= \bar{X} \pm 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \end{aligned}$$

$$MR = |X_i - X_{i-1}|$$

โดยที่ค่าพิสัย MR จะต้องคิดจากข้อมูลที่ต่อเนื่องกัน 2 ตัวเสมอ ดังนั้นค่า  $d_2 = 1.128$  จึงสามารถประมาณค่าพิสัยควบคุมได้ดังนี้

$$UCL = \bar{X} + 2.659 \overline{MR}$$

$$CL = \bar{X}$$

$$LCL = \bar{X} - 2.659 \overline{MR}$$

### 2.1.9.3.2 แผนภูมิควบคุม MR

ในการควบคุมความผันแปรของแผนภูมิควบคุมประเภทนี้จะอาศัยการคำนวณโดยค่าพิสัย

ค่าพิสัยควบคุมสำหรับแผนควบคุม MR คือ

$$UCL, LCL = \mu_R \pm \sigma_R$$

$$= (1 \pm \frac{3d_3}{d_2})\overline{MR}$$

ซึ่งค่าพิสัย (MR) มีการคำนวณจากข้อมูล 2 ตัวเสมอ ทำให้ค่า  $d_2=1.128$  และ  $d_3=0.853$  ดังนั้น  $UCL=3.268\overline{MR}$  และ  $LCL=-1.268\overline{MR}$  ประมาณค่าเท่ากับ 0

$$UCL=3.268\overline{MR}$$

$$CL=\overline{MR}$$

$$LCL=0$$

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นายวรมัน โบราณินทร์ [14] ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมระบบการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีการตอบสนองได้อย่างทันท่วงที ด้วยวิธีการทางสถิติ (Statistic Process Control: SPC) เป็นการใช้ทฤษฎีทางสถิติในการคำนวณขอบเขตที่ยอมรับได้ของระบบการผลิต (Control Limit: CL) ทำให้สามารถดำเนินการผลิตได้ประสิทธิภาพ ผลของงานวิจัยนี้ โปรแกรมสามารถควบคุมกระบวนการผลิตด้วย Xbar-R charts และ Process Capability ซึ่งมีการตอบสนองแบบ Real-time ได้อย่างถูกต้อง

N.R. Dhar, M. Kamruzzaman, and Mahiuddin Ahmed [15] ได้ทำการศึกษาบทบาทของ การกลึงเหล็กกล้า AISI-4340 ด้วยวิธีการใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด (Minimum Quantity of Lubrication: MQL) ต่อการสึกหรอของมีด ตัดคาร์ไบด์ (uncoated carbide insert) และความขรุขระผิวของชิ้นงานที่ความเร็วการตัดและ อัตราการป้อนชิ้นงานต่างกัน ผลจากใช้วิธีการใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดสามารถลดอัตราการ สึกหรอของมีดตัดและความร้อนที่เกิดขึ้น บริเวณการตัดได้ สามารถสรุปได้เป็นข้อๆดังต่อไปนี้



1. สมรรถนะของการตัดด้วยวิธี MQL ดีกว่าวิธีแบบแห้งและแบบเปียก เพราะ MQL สามารถลดอุณหภูมิขณะตัดได้ดีกว่า ซึ่งจะทำให้คมตัดของมีดที่เสียดสีกับเศษกลึงโลหะ สึกหรอได้ช้าลง
2. วิธี MQL ช่วยลดการสึกหรอของมีดตัดและเพิ่มอายุของมีดตัด เมื่อเปรียบเทียบกับการกลึงเหล็ก AISI-4340 ด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง
3. วิธี MQL ทำให้คุณภาพของชิ้นงานสุดท้ายดีขึ้นเนื่องจากการสึกหรอของมีดตัดลดลง อัตราการสึกหรอของมีดตัดที่ลดลงนอกจากจะทำให้อายุของมีดตัดเพิ่มขึ้นแล้วยังทำให้ผลิตภาพของการกลึงเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากสามารถตัดชิ้นงานด้วยความเร็วมากขึ้น

N.R. Dhar, M.W. Islam, S. Isla, and M.A.H. Mithu [16] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของวิธีการใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด(MQL)ต่ออุณหภูมิที่เกิดขณะตัด รูปร่างของเศษกลึงโลหะและความ ชรุขระผิวของชิ้นงาน ในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอน AISI-1040 ด้วยเม็ดมีดคาร์ไบด์ (uncoated carbide) เปรียบเทียบกับการกลึงแบบแห้งและการกลึงแบบเปียกด้วยน้ำมันหล่อเย็น พบว่าผล จากการใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดสามารถลดอุณหภูมิขณะตัด ลดความชรุขระผิวของชิ้นงานได้ ทั้งนี้ขึ้นกับความเร็วยรอบการตัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน นอกจากนี้เศษกลึงโลหะที่ได้มีลักษณะดีทั้งรูปร่างและสีเมื่อใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด ดังนั้นการใช้วิธีการใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดอย่างถูกวิธี นอกจากจะช่วยเพิ่มความสามารถในการตัดโดยการลดความสึกหรอแล้วยังช่วยสร้างสภาพแวดล้อม การทำงานที่ดีอีกด้วย

K.H.W. Seah, X. Li and K.S. Lee [17] ได้เสนอแย้งกับความเชื่อเดิมว่าการใช้สารหล่อเย็นไม่ได้ทำให้ อายุของมีดตัดนานขึ้นเสมอไปข้อเท็จจริงที่พบกันก็คือผลจากการใช้สารหล่อเย็นจะช่วยลด crater wear ได้บ้างเล็กน้อยและอาจจะช่วยทำให้ตำแหน่งของ crater wear เลื่อนตำแหน่งออกจากปลายของมีดตัด ซึ่งจะช่วยให้รอยสึกหรอลึกขึ้นและแคบลงจนทำให้ความแข็งแรงของมีดตัดลดลงมากการใช้สารหล่อเย็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเร็วตัดสูงๆ ก็จะทำให้ flank wear เพิ่มขึ้นเช่นกัน ภายใต้สภาวะบางอย่างนั้น การใช้สารหล่อเย็นก็อาจจะเป็นสาเหตุให้อัตรา การสึกหรอของมีดตัดมีค่ามากกว่าการไม่ใช้สารหล่อเย็นเลยก็ได้

B. Fnides, H. Aouici และ M.A. Yallese [18] ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการตัดกับความขรุขระผิวชิ้นงานสำหรับงานกลึง โดยใช้มีดตัดแบบ Mixed ceramic ทำการตัดวัสดุชนิด X38CrMoV5-1(เหล็กกล้าสำหรับงานร้อน) จากงานวิจัยพบว่า

1. ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากอย่างเห็นได้ชัด เมื่ออัตราป้อนตัดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราป้อนตัดเป็นการเพิ่มช่วงความกว้างของการตัด ซึ่งส่งผลให้ช่วงผิวที่เกิดจากการตัดมีช่วงที่กว้างและลึกขึ้น
2. ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีค่าลดลงและค่อย ๆ คงที่เมื่อความเร็วตัดมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการที่ความเร็วตัดมีค่ามากขึ้นทำให้ระยะสัมผัสระหว่างผิวชิ้นงานกับมีดตัดมีมากขึ้นจึงเป็นการปรับระดับความลึกผิวที่เกิดจากจุมูกมีดตัดให้ราบเรียบมากขึ้น
3. ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความลึกตัดมีค่ามากขึ้น เนื่องจากเป็นการเพิ่มระยะสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับมีดตัด จึงทำให้มีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานเพียงเล็กน้อย
4. เมื่อขนาดความสึกหรอของมีดตัด (Flank wear) มีขนาดเพิ่มขึ้น เป็นผลให้แรงตัดมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับชิ้นงานมีมากขึ้น นั่นคือมีแรงเสียดทานมากขึ้น ผลที่ตามมาทำให้คุณภาพผิวชิ้นงานแย่ลง

L. Huang และ Joseph C. Chen [19] ใช้สมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple regression model) เพื่อพยากรณ์ความขรุขระผิวในระหว่างกระบวนการตัดสำหรับงานกลึงโดยใช้ตัววัดอัตราเร่ง (Accelerometer) งานวิจัยนี้ได้แบ่งข้อมูลออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ ข้อมูลสำหรับ Training (162 ข้อมูล) และข้อมูลสำหรับ Testing (54 ข้อมูล) ข้อมูลในส่วนของ Training นั้นจะถูกใช้เป็นตัวแบบและข้อมูล Testing จะถูกใช้เพื่อทดสอบความแม่นยำของข้อมูล Training ตัวแปรสำหรับงานวิจัยแบ่งออกเป็นตัวแปรผัน (ความเร็วรอบ อัตราป้อนตัด ความลึกการตัด และสัญญาณแอมพลิจูดเฉลี่ยของการสั่นสะเทือน) และตัวแปรตาม (ความขรุขระผิวชิ้นงาน) จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple regression) และสรุปความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ผ่าน Pearson correlation coefficients พบว่า อัตราป้อนตัด มีความสัมพันธ์กับความสัมพันธ์มากที่สุด และสัญญาณแอมพลิจูดเฉลี่ยของการสั่นสะเทือนมีความสัมพันธ์รองลงมา

E. Daniel Kirby, Zhe Zhang และ Joseph C. Chen [20] ทำการพัฒนาระบบการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานจากตัววัดอัตราเร่ง (Accelerometer) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression) สำหรับงานกลึง งานวิจัยนี้ได้แบ่งตัวแปรสำหรับการทดลองออกเป็นตัวแปรต้น (ความเร็วรอบ, อัตราป้อนตัด, ความลึกการตัด) และตัวแปรตาม (ความขรุขระผิวชิ้นงาน, สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวแกน X, สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวแกน Z) โดยทำการตัดชิ้นงานที่เงื่อนไขต่าง ๆ และทำการเก็บข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนระหว่างขั้นตอน Finish cut จากนั้นทำการวัดความขรุขระผิวชิ้นงานที่ผ่านการตัด ผลจากการวิเคราะห์ตามวิธีสมการถดถอย (Regression) พบว่า ความเร็วรอบและความลึกการตัดแทบจะไม่มีผลกระทบต่อความขรุขระของผิวชิ้นงาน ส่วนอัตราป้อนตัดนั้นจะมีผลกระทบต่อความขรุขระผิวมากกว่าเมื่อเทียบกับความเร็วรอบและความลึกการตัด

T. O' zel, Y. Karpat, L. Figueira, และ J. Paulo Davim [21] ศึกษาสมการแบบจำลองของผิวสำเร็จและการสึกหรอของมีดตัดสำหรับงานกลึงเหล็ก AISI D2 ด้วย Ceramic wiper insert จากงานวิจัยทำการเก็บผลการทดลองทั้งหมด 27 ชุดการทดลองจากการกำหนดค่า ความเร็วตัดเท่ากับ 80, 115, 150 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.05, 0.1, 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ และเวลาการตัด 5, 10, 15 นาที โดยใช้ค่าความลึกตัดคงที่ 0.2 มิลลิเมตร จากข้อมูลการทดลองได้ทำการวัดค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย ( $R_a$ ) และค่าการสึกหรอของมีดตัด ( $VB_c$ ) จากข้อมูลที่ได้ทำการสร้างแบบสมการจำลองเพื่อพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานและการสึกหรอของมีดตัดได้ตามสมการด้านล่าง

$$R_a = -1.8 \times 10^{-3} V_c + 3.44 f + 1.4 \times 10^{-2} t_c + 1.6$$

$$VB_c = 2.16 \times 10^{-4} V_c + 0.23 f + 6.5 \times 10^{-3} t_c - 8.7 \times 10^{-3}$$

จากงานวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. อัตราการป้อนตัดและความเร็วตัดมีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยผิวชิ้นงานมีค่าดีที่สุดเมื่อเลือกใช้อัตราการป้อนตัดต่ำและความเร็วตัดที่สูงสุด
2. อัตราการป้อนตัดและความเร็วตัดมีผลต่อการสึกหรอของมีดตัด

C. X. Feng และ X. F. Wang [22] ศึกษาแบบจำลองการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้วิธี Neural Networks กับ วิธีวิเคราะห์สมการถดถอย

(Regression) สำหรับวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression) งานวิจัยได้นำเสนอแบบจำลองการพยากรณ์เอ็กซ์โพเนนเชียลตามสมการด้านล่าง

$$R_a = Ch^{a_1} f^{a_2} r^{a_3} d^{a_4} s^{a_5}$$

โดยมีตัวแปรอิสระ คือ ความแข็งวัสดุ อัตราการป้อนตัด จมูกมีดตัด ความลึกตัด และ ความเร็วตัด เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน จากสมการทำการใส่ค่า log ทั้งสองข้างและทำการแทนค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรได้ดังสมการด้านล่าง

$$\ln R_a = \ln C + a_1 \ln h + a_2 \ln f + a_3 \ln r + a_4 \ln d + a_5 \ln s$$

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5$$

หลังจากหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม MINITAB จะได้สมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานดังสมการด้านล่าง

$$R_a = \frac{4.437 f^{1.925}}{s^{6.138} r^{3.176}} e^{1.358 \ln d \ln s + 0.702 \ln h \ln r - 0.347 \ln h \ln f}$$

จากสมการได้ทำการตัดตัวแปรความแข็งของวัสดุ และความลึกการตัดออกเนื่องจากว่ามีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานน้อยมาก และทำการเพิ่มความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ตัวแปรเข้าไปในสมการคือความสัมพันธ์ระหว่าง ความลึกการตัดกับความเร็รรอบตัด ความแข็งของวัสดุกับรัศมีจมูกมีด และ ความแข็งวัสดุกับอัตราการป้อนตัด จากแบบจำลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ความขรุขระผิวชิ้นงาน (ยังมีค่าน้อยยิ่งดี) สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ด้วยการลดอัตราการป้อนตัด ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของวัสดุกับรัศมีจมูกมีดตัด และความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งวัสดุและความเร็วตัด อย่างไรก็ตาม การเพิ่ม รัศมีจมูกมีดตัด, ความเร็วตัด หรือ ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งวัสดุกับอัตราการป้อนตัด ก็สามารถปรับปรุงคุณภาพผิวชิ้นงานให้ดีขึ้นได้เช่นกัน

T. Somkiat [23] เสนองานวิจัยในการพัฒนาระบบการตรวจติดตามที่ได้แยกสถานะการกลิ้งออกเป็น 4 แบบ คือ การเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง การเกิดเศษโลหะแบบแตก การเกิดเศษโลหะแบบแตกผสมต่อเนื่อง และการเกิดการสั่นในขณะตัด ซึ่งระบบที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถแยกสถานะของการกลิ้งได้เป็นอย่างดีเยี่ยม โดยการเกิดเศษโลหะแบบแตกเป็นสถานะของการกลิ้งที่ต้องการให้เกิด เพื่อลดปัญหาการพันกันของเศษโลหะแบบต่อเนื่อง และลดปัญหาความหยาบของผิวที่เกิดจากการสั่นในขณะตัด โดยใช้เซนเซอร์วัดแรงตัดเป็นเครื่องมือในการตรวจวัด และตรวจจับแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการกลิ้ง ระบบที่พัฒนาขึ้นยังได้เสนอดัชนีในการตรวจจับสถานะของการกลิ้งจากแรงตัดที่วัดได้ในขณะทำการกลิ้งจริง ชุดถ่ายแรงตัดที่ตรวจวัดได้จะถูกนำมาวิเคราะห์และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะทำให้กระบวนการกลิ้งได้สถานะตามที่ต้องการในที่สุด

T. Moriwaki, T. Somkiat, และ T. Shibasaka [24] เสนอระบบและขั้นตอนต่าง ๆ ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อหาค่าความเร็วตัดที่เหมาะสมในระหว่างกระบวนการกลึงจริงสำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซี ไดนาโมมิเตอร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นและติดตั้งในเครื่องกลึงซีเอ็นซีสำหรับใช้วัดแรงตัดในขณะทำการกลึงชิ้นงาน โดยแรงตัดที่วัดได้ถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าขนาดรอยลึกหรือของมีดตัดและตรวจสอบเสถียรภาพในขณะกลึงชิ้นงาน ว่าเศษโลหะที่เกิดขึ้นเป็นแบบใด ขนาดรอยลึกหรือของมีดตัดที่ประมาณได้ถูกนำมาคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดและอัตราการสึกหรอของมีดตัดในระหว่างกระบวนการกลึงจริง สมการอายุมีดตัดสามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดและอัตราการสึกหรอของมีดตัดทั้งหมดที่คำนวณในฐานข้อมูลโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด สมการอายุมีดตัดที่คำนวณได้ถูกนำไปใช้เพื่อหาค่าความเร็วตัดที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากเกณฑ์ต้นทุนการผลิตต่ำสุดหรืออัตราการผลิตสูงสุด ระบบจะเปลี่ยนค่าความเร็วตัดปัจจุบันเป็นค่าความเร็วตัดใหม่ที่เหมาะสมที่คำนวณได้ในกระบวนการกลึงจริง ชิ้นงานเหล็กกล้าและมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบถูกนำมาใช้ในการทดลองระบบที่พัฒนาขึ้น จากผลการทดลองได้พิสูจน์ว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณค่าความเร็วตัดที่เหมาะสมได้เองอย่างเป็นที่น่าพอใจในระหว่างกระบวนการกลึงจริง และระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับชิ้นงานและมีดตัดชนิดอื่นได้โดยระบบจะทำการหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมเองได้ในระหว่างการกลึงจริง

T. Moriwaki, T. Shibasaka, และ T. Somkiat [25] เป็นงานวิจัยที่มีจุดมุ่งหมายเพื่อจะพัฒนาระบบการตรวจติดตามการสึกหรอของมีดตัดในระหว่างกระบวนการกลึงสำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซี ฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียลแบบเลื่อนมถอยถูกนำมาใช้เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการตัดเฉพาและอัตราการป้อนตัด ค่าดัชนี  $a$  ในฟังก์ชันถูกกำหนดเป็นตัวชี้วัดขนาดของการสึกหรอของมีดตัด ซึ่งดัชนี  $a$  มีค่าเทียบเท่ากับอัตราส่วนความต้านทานการตัดเฉพา ที่อัตราการป้อนตัดศูนย์และที่อัตราการป้อนตัดอนันต์ เพื่อที่ต้องการจะหาค่า  $a$  ทฤษฎีได้ถูกเสนอให้แทรกคำสั่งเพิ่มตัดในกระบวนการตัดจริงเมื่อต้องการตรวจสอบหาขนาดการสึกหรอของมีดตัด โดยในคำสั่งเพิ่มตัดจะเปลี่ยนอัตราการป้อนตัดปัจจุบันในกระบวนการตัดปกติให้เป็นอัตราการป้อนตัดแบบขั้นขึ้นหรือขั้นลงที่อัตราการป้อนตัดต่ำ ๆ อย่างตั้งใจ เพื่อวัดแรงตัดและระบุอัตราการเพิ่มขึ้นของความต้านทานการตัดเฉพา ไดนาโมมิเตอร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นและติดตั้งในเครื่องกลึงซีเอ็นซีสำหรับใช้วัดแรงตัดในขณะทำการกลึงชิ้นงาน จากผลการทดลองการประมาณขนาดของการสึกหรอของมีดตัดในระหว่างกระบวนการตัดจริง ได้พิสูจน์แล้วว่าดัชนี  $a$  เป็นตัวชี้วัดที่ดีในการประมาณขนาดของการสึกหรอของมีดตัด ถึงแม้เงื่อนไขการตัดจะแตกต่างกัน

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 ออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ พัฒนาระบบการตรวจติดตามร่วมกับการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ(SPC) สำหรับค่าความขรุขระผิวชิ้นงานบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยใช้อัตราส่วนแรงตัดระหว่างแรงป้อนตัดและแรงตัดหลัก ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานประกอบด้วยปัจจัยในการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด, อัตราการป้อนตัด, ความลึกตัด, รัศมีจมูกมีด, มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนแรงตัด

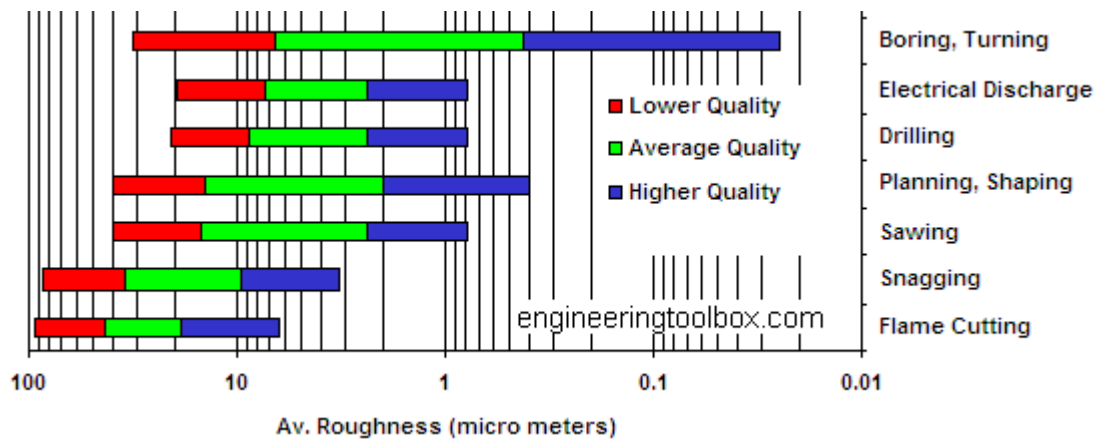
##### 3.1.1 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

เงื่อนไขการตัดนั้นมีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึง โดยเงื่อนไขที่เลือกมาทดลองให้เหมาะกับคุณภาพผิวชิ้นงานในงานวิจัยเป็นดังนี้

- ความเร็วตัด 150,200 เมตร/นาที
- อัตราการป้อนตัด 0.15,0.20 มิลลิเมตร/รอบ
- ความลึกตัด 0.4,0.8 มิลลิเมตร
- รัศมีจมูกมีด 0.4,0.8 มิลลิเมตร
- มุมคายเศษโลหะ -6,11 องศา

##### 3.1.2 เกณฑ์การเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม

เกณฑ์การเลือกเงื่อนไขการตัดพิจารณาจากรูปที่ 3.1 ในการกำหนดค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยไม่เกิน 5 ไมโครเมตร และ ค่าความขรุขระผิวสูงสุดไม่เกิน 20 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 4287-1997 ในกระบวนการกลึง



รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงมาตรฐานค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน[26]

### 3.2 วัสดุชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 วัสดุชิ้นงาน(Workpiece material) ที่ในการทดลอง เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 ค่ามาตรฐาน,ส่วนประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

มาตรฐาน	
JIS S45C, AISI1045, DIN1.0503, GB45, CK45, ASTM1045, EN8	
ส่วนประกอบทางเคมี	
คาร์บอน(C)	0.42% – 0.48%
ซิลิกอน (Si)	0.15% – 0.35%
แมงกานีส (Mn)	0.6% – 0.9%
ฟอสฟอรัส (P)	ไม่เกิน 0.030%
ซัลเฟอร์ (S)	ไม่เกิน 0.035%
คุณสมบัติทางกล	
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7700-8030
Young's Modulus (GPa)	190-210
Tensile Strength (Mpa)	569 (Standard)
	686 (Quenching, Tempering)
Yield Strength (Mpa)	343 (Standard)
	490 (Quenching, Tempering)
Poisson's ratio	0.27-0.30
Brinell Hardness (HB)	201 - 269
Hardness, Rockwell C (HRC)	13.8 - 27.6

3.2.2 **ด้ามมีดตัด (Tool Holder)** ยี่ห้อ KENNAMETAL รหัส PDJNR2525M-15 สำหรับ  
มูมคายพิเศษโลหะ 11 องศา และ รหัส WTJNR2525M-16N สำหรับมูมคายพิเศษโลหะ -6 องศา



รูปที่ 3.3 ด้ามมีดตัดที่ใช้ในการทดลอง



### 3.2.3 เม็ดมีดตัด (Insert) เป็นแบบคาร์ไบด์เคลือบผิว

- ยี่ห้อ Kennametal รหัส DNMG 150604FN KC9100 และ รหัส DNMG 150608FN KC9100 (รัศมีจมูกมีด 0.4 และ 0.8 ตามลำดับ) เป็นเม็ดมีดสำหรับ ต้ามมีดตัดรหัส PDJNR2525M-15 ใช้ในงานกลึงละเอียด
- ยี่ห้อ Ceratip รหัส TNMG 160404HQ CA5525 และ รหัส TNMG 160408HQ CA5525 (รัศมีจมูกมีด 0.4 และ 0.8 ตามลำดับ) เป็นเม็ดมีดสำหรับต้ามมีดตัด รหัส WTJNR2525M-16N ใช้ในงานกลึงหยาบ



รูปที่ 3.4 เม็ดมีดตัดที่ใช้ในการทดลอง

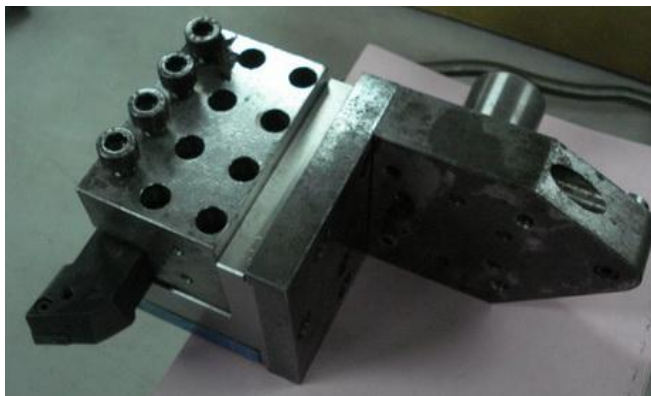
### 3.2.4 เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC turning machine) ชนิด 4 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น

NEXUS 200MY/MSY



รูปที่ 3.5 เครื่องกลึงซีเอ็นซีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.5 ไดนาโมมิเตอร์ (3-Component Dynamometer) ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 9121 เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดสัญญาณแรงตักที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัก



รูปที่ 3.6 ไดนาโมมิเตอร์

3.2.6 ชาร์จแอมพลิไฟเออร์ (Charge Amplifier) ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 5038 เป็นอุปกรณ์สำหรับขยายสัญญาณแรงตักที่ส่งมาจากไดนาโมมิเตอร์



รูปที่ 3.7 ชาร์จแอมพลิไฟเออร์

3.2.7 Ni-card (National Instruments -card) รุ่น PCI-6221(37-Pin) เป็นอุปกรณ์สำหรับแปลงสัญญาณจากสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

- Product Family: Multifunction Data Acquisition
- Operating System/Target: Real-Time , Linux , Mac OS , Windows

- LabVIEW RT Support: Yes
- Measurement Type: Frequency , Quadrature encoder , Digital , Voltage
- Sample Rate: 250 kS/s



รูปที่ 3.8 Ni-card PCI-6221

### 3.2.8 คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal computer: PC) สำหรับการพัฒนาระบบ

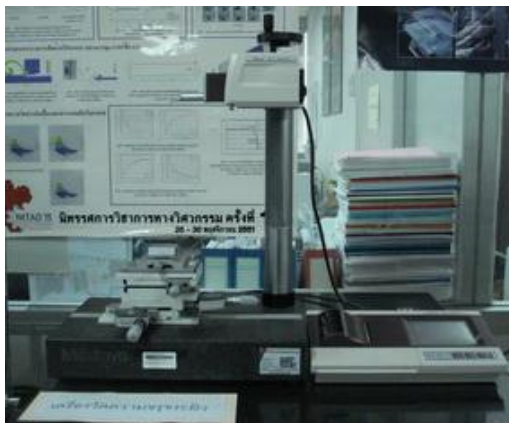
SPEC: HP Pavilion a1350l Home PC Intel Pentium4 Processor 524 3.06Hz, 1MB L2 Cache EM64T, Execute Disable Bit, 533MHz FSB, RAM 1024 MB 533MHz DDR2 SDRAM memory



รูปที่ 3.9 คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

### 3.2.9 เครื่องวัดค่าความขรุขระผิว(surface roughness measurement) ยี่ห้อ

Mitutoyo รุ่น SJ400 ใช้สำหรับวัดค่าความขรุขระผิวของชิ้นงาน



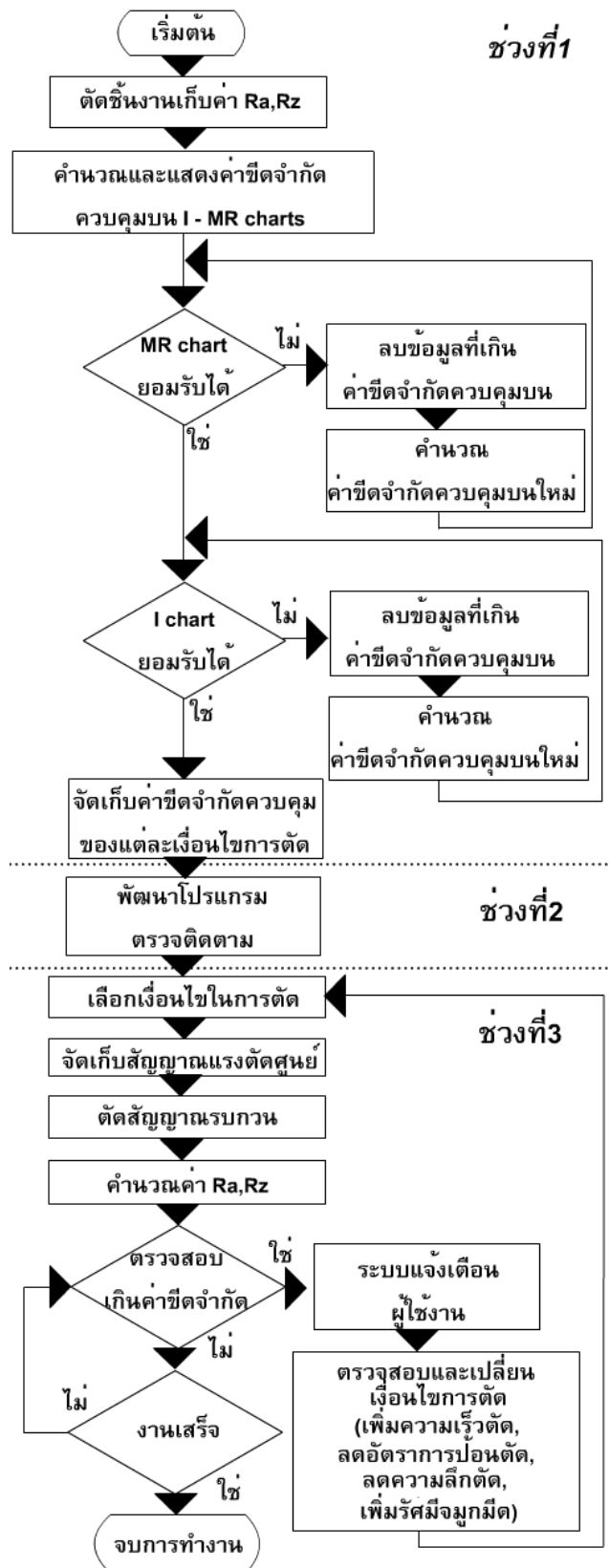
รูปที่ 3.10 เครื่องวัดค่าความขรุขระผิว

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนการดำเนินการออกเป็น 3 ช่วง ดังรูปที่ 3.11 โดยช่วงที่หนึ่งจะเป็นการคำนวณค่าขีดจำกัดควบคุมโดยการทดลองตัดชิ้นงานแบบออฟไลน์เพื่อจัดเก็บค่าความขรุขระผิวชิ้นงานแล้วนำมาคำนวณหาขีดจำกัดควบคุมเก็บลงฐานข้อมูลระบบ

ช่วงที่สองเป็นช่วงการพัฒนาโปรแกรมสำหรับระบบการตรวจติดตามและควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ

ช่วงที่สาม เป็นการควบคุมกระบวนการตัดเชิงสถิติ โดยการใช้สัญญาณแรงตัดมาพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าขีดจำกัดควบคุมที่คำนวณได้ในช่วงที่หนึ่ง เพื่อควบคุมคุณภาพผิวชิ้นงาน



รูปที่ 3.11 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

### 3.3.1 ช่วงการคำนวณค่าขีดจำกัดควบคุม

ในรูปที่ 3.11 ช่วงที่หนึ่งจะเป็นการคำนวณค่าขีดจำกัดควบคุมโดยการทดลองตัดชิ้นงานแบบออฟไลน์เพื่อจับเก็บค่าความขรุขระผิวชิ้นงานแล้วนำมาคำนวณหาค่าขีดจำกัดควบคุมเก็บลงฐานข้อมูลระบบ ซึ่งมีขั้นตอนในการเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณค่าขีดจำกัดควบคุมจะมีวิธีเก็บข้อมูลแต่ละเงื่อนไขดังนี้

1. ทำการตัดชิ้นงานตามเงื่อนไขที่กำหนด จำนวนทั้งหมด 32 เงื่อนไข (ตัวอย่าง 0 - ตัวอย่าง 31) ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขในการทดลอง

ตัวอย่าง	มุมคายเศษโลหะ	รัศมีจุมกมิด (มม.)	ความลึกตัด (มม.)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความเร็วตัด (ม./นาที)
0	-6	0.4	0.4	0.15	150
1	-6	0.4	0.4	0.15	200
2	-6	0.4	0.4	0.20	150
3	-6	0.4	0.4	0.20	200
4	-6	0.4	0.8	0.15	150
5	-6	0.4	0.8	0.15	200
6	-6	0.4	0.8	0.20	150
7	-6	0.4	0.8	0.20	200
8	-6	0.8	0.4	0.15	150
9	-6	0.8	0.4	0.15	200
10	-6	0.8	0.4	0.20	150
11	-6	0.8	0.4	0.20	200
12	-6	0.8	0.8	0.15	150
13	-6	0.8	0.8	0.15	200
14	-6	0.8	0.8	0.20	150
15	-6	0.8	0.8	0.20	200
16	11	0.4	0.4	0.15	150
17	11	0.4	0.4	0.15	200
18	11	0.4	0.4	0.20	150
19	11	0.4	0.4	0.20	200
20	11	0.4	0.8	0.15	150
21	11	0.4	0.8	0.15	200
22	11	0.4	0.8	0.20	150
23	11	0.4	0.8	0.20	200
24	11	0.8	0.4	0.15	150
25	11	0.8	0.4	0.15	200
26	11	0.8	0.4	0.20	150
27	11	0.8	0.4	0.20	200
28	11	0.8	0.8	0.15	150
29	11	0.8	0.8	0.15	200
30	11	0.8	0.8	0.20	150
31	11	0.8	0.8	0.20	200

2. ทำการวัดค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเพื่อนำมาคำนวณค่าความขีดจำกัดควบคุม ซึ่งแต่ละเงื่อนไข ทำการเก็บข้อมูล 20 ตัวอย่าง



รูปที่ 3.12 การวัดความขรุขระชิ้นงาน

3. นำข้อมูลที่ไดจากการวัดมาคำนวณค่าขีดจำกัดควบคุมบน เพื่อใช้ในการตรวจจับค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการตัด

4. ทำการพิจารณาว่า ค่าขีดจำกัดควบคุมบนของ MR-Chart สามารถยอมรับได้หรือไม่ ซึ่งถ้าไม่ จะทำการลบข้อมูลที่เกินค่าขีดจำกัดควบคุมบนที่คำนวณได้ แล้วนำข้อมูลที่เหลือไปคำนวณค่าขีดจำกัดควบคุมบนใหม่แล้วนำมาพิจารณาใหม่

5. ทำการพิจารณาว่า ค่าขีดจำกัดควบคุมบนของ I-Chart สามารถยอมรับได้หรือไม่ ซึ่งถ้าไม่ จะทำการลบข้อมูลที่เกินค่าขีดจำกัดควบคุมบนที่คำนวณได้ แล้วนำข้อมูลที่เหลือไปคำนวณค่าขีดจำกัดควบคุมบนใหม่แล้วนำมาพิจารณาใหม่

6. ทำการจัดเก็บค่าขีดจำกัดควบคุมบนของแต่ละเงื่อนไขลงระบบ

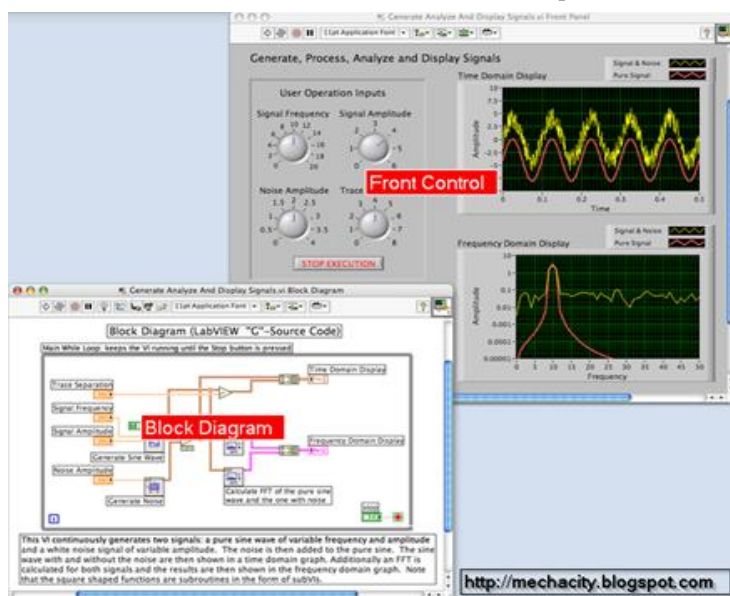
### 3.3.2 ช่วงพัฒนาโปรแกรมสำหรับระบบการตรวจติดตามและควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ

รูปที่ 3.11 ช่วงที่สอง ช่วงพัฒนาโปรแกรมสำหรับระบบการตรวจติดตามและควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ เพื่อรองรับต่อการทำงานของระบบในช่วงที่สาม ซึ่งระบบจะถูกพัฒนาโดยโปรแกรม LabVIEW และใช้หลักการทำงานแบบ State Machine

### 3.3.2.1 LabVIEW

โปรแกรมที่ใช้พัฒนาระบบการตรวจติดตามความชรุขระผิวบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีในงานวิจัยนี้ คือ LabVIEW ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อทำงานด้านเครื่องมือวัด สำหรับงานวิศวกรรม (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) โดยหลักการคล้ายกับ Visual Basic ต่างกันเพียงด้านที่เขียนโปรแกรม ใช้การเขียนโปรแกรมโดยการใช้อุปภาพ โดยคุณสมบัติการทำงานที่ใช้งานมีลักษณะเป็นขั้นส่วน นำมาเชื่อมต่อกันโดยสายข้อมูลเหมือนเป็นการต่อวงจรไฟฟ้า ซึ่งในส่วนของโปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

- Front Control ทำหน้าที่เป็นส่วนติดต่อผู้ใช้ของโปรแกรม
- Block Diagram เป็นส่วนของการจัดการไหลของข้อมูล



รูปที่ 3.13 โปรแกรม LabVIEW

### 3.3.2.2 ออกแบบการทำงานของระบบ

ระบบการตรวจติดตามความชรุขระผิวบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีในงานวิจัยนี้ ต้องรองรับกระบวนการทำงานในช่วงที่ 3 จากรูปที่ 3.11 ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ดังนี้

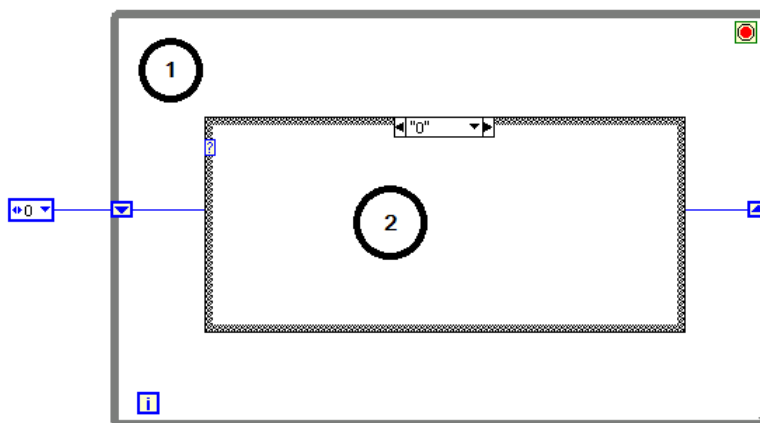
- เลือกเงื่อนไขการตัด
- ดึงค่าขีดจำกัดควบคุมมาใส่ในระบบ
- จัดเก็บแรงตัดศูนย์
- ตัดสัญญาณรบกวน
- คำนวณค่าความชรุขระผิวเฉลี่ยและความชรุขระผิวสูงสุดจากสัญญาณแรงตัด



- เข้ากระบวนการควบคุมเชิงสถิติ โดยสามารถแจ้งเตือนเมื่อค่าความขรุขระผิวที่พยากรณ์ได้มีค่าเกินขีดจำกัดควบคุมบน

### 3.3.2.3 ออกแบบโปรแกรม

เนื่องจากคุณสมบัติของโปรแกรม LabVIEW ที่สามารถทำงานแบบหน้าต่างที่ได้ จึงเหมาะสำหรับการพัฒนาระบบการตรวจติดตามความขรุขระผิวบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี ซึ่งการออกแบบโปรแกรมนี้ใช้หลักการทำงานแบบเครื่องจักรสถานะ ดังรูปที่ 3.14 โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นส่วนสำหรับประกาศตัวแปร, ส่วนการทำงานทั่วไป และส่วนติดต่อผู้ใช้ โดยส่วนที่ 2 เป็นส่วนการทำงานของแต่ละสถานะ



รูปที่ 3.14 โครงสร้างหลักของโปรแกรม

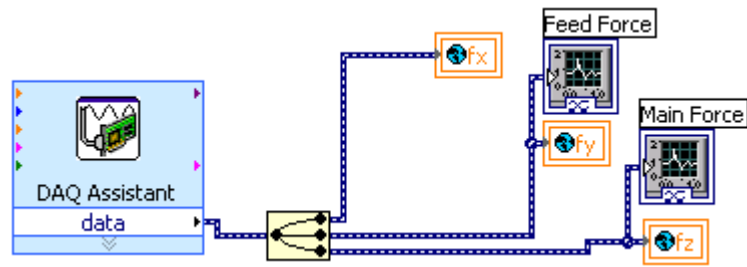
ส่วนที่ 1 จากรูป 3.14 จะประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

- ส่วนดึงสัญญาณแรงตัดจาก Ni-card นำมาเก็บในตัวแปรสัญญาณแรงตัดของแต่ละแกน ซึ่งเชื่อมต่อกับตัวแสดงสัญญาณแรงป้อนตัดและแรงตัดหลักในรูปแบบกราฟ ซึ่งส่วนดึงสัญญาณข้อมูลตั้งค่าความถี่ในการอ่านข้อมูล ปรับตั้งค่าดังนี้

Low-pass filter = 1000 Hz

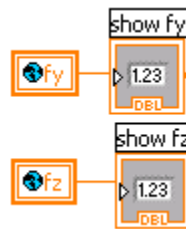
Sampling rate = 100 Hz

Record length = 100



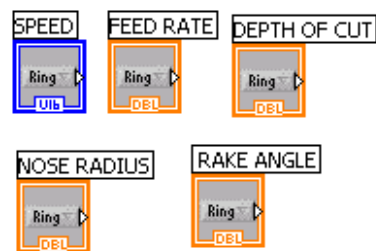
รูปที่ 3.15 ส่วนตัวดึงสัญญาณข้อมูล (Data Acquisition: DAQ)

- ส่วนแสดงค่าสัญญาณแรงตัด



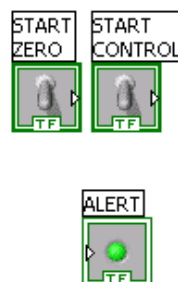
รูปที่ 3.16 ส่วนแสดงสัญญาณแรงตัด

- ส่วนเลือกค่าเงื่อนไขการตัด ทั้ง 5 ปัจจัย



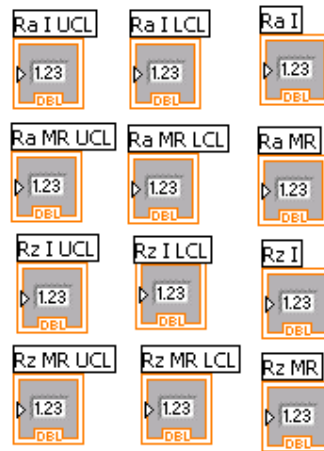
รูปที่ 3.17 ส่วนเลือกค่าเงื่อนไขการตัด

- ส่วนควบคุมสวิตช์เริ่มจัดเก็บแรงตัดศูนย์, สวิตช์เริ่มกระบวนการควบคุมคุณภาพและส่วนแสดงสัญญาณเตือน



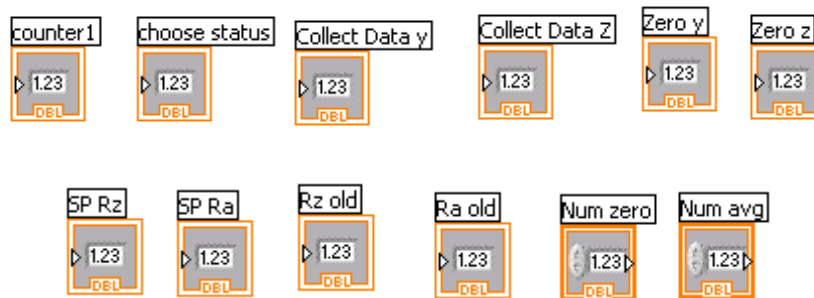
รูปที่ 3.18 ส่วนควบคุมระบบและแสดงสัญญาณเตือน

- ส่วนแสดงค่าขีดจำกัดควบคุมของแต่ละเงื่อนไขการตัด



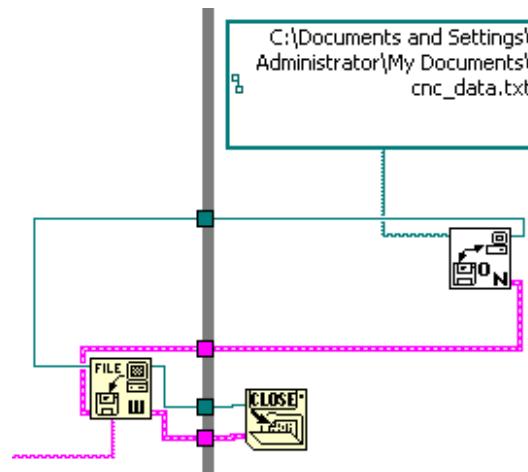
รูปที่ 3.19 ส่วนแสดงค่าขีดจำกัดควบคุม

- ส่วนแสดงตัวแปรสำหรับพักข้อมูลในขั้นตอนต่างๆ



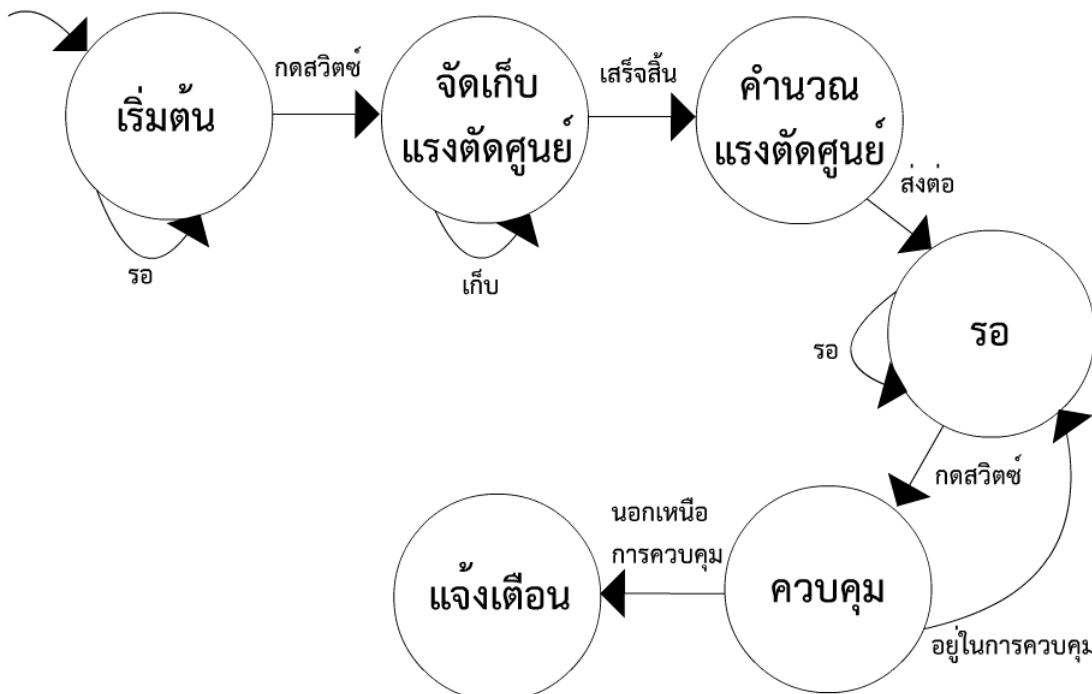
รูปที่ 3.20 ส่วนแสดงตัวแปรสำหรับพักข้อมูล

- ส่วนบันทึกข้อมูล โดยจะทำการบันทึกข้อมูลที่ต้องการลงไฟล์ตามตำแหน่งที่ระบุ



รูปที่ 3.21 ส่วนบันทึกข้อมูล

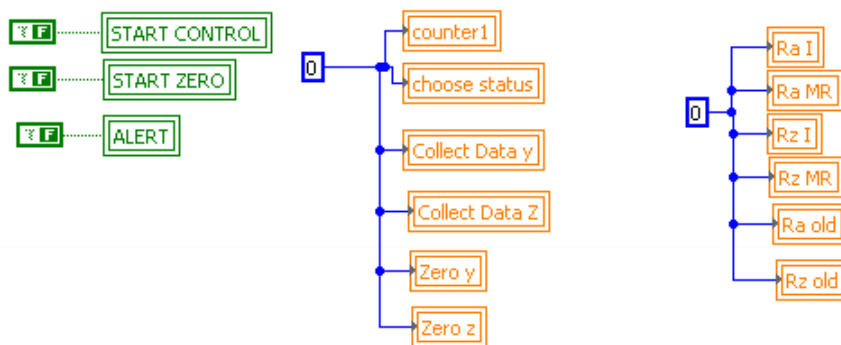
ในส่วนที่ 2 เป็นส่วนการทำงานของระบบตรวจติดตามความขรุขระผิวบนเครื่องกลึงที่เอ็นซีซึ่งทำการแปลงขั้นตอนในช่วงที่ 3 จากรูปที่ 3.11 โดยแบ่งการทำงานเป็น 6 สถานะดังนี้



รูปที่ 3.22 แผนภูมิเครื่องจักรสถานะของระบบการตรวจติดตามความขรุขระผิวบนเครื่องกลึงที่เอ็นซี

I. **สถานะเริ่มต้น(Free,0) :** เป็นสถานะที่เริ่มต้นทุกครั้งที่เปิดระบบ เพื่อรอเริ่มกระบวนการทำงาน ในสถานะนี้จะมีการล้างค่าข้อมูลที่ค้างอยู่ในระบบและทำการคำนวณค่าสมการความขรุขระผิวบางส่วนตามเงื่อนไขการตัดที่ได้เลือกไว้ โดยสถานะนี้จะประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

- ส่วนตั้งค่าเริ่มต้นของการเริ่มระบบทุกครั้ง โดยทำการตั้งค่าอุปกรณ์ควบคุมและสัญญาณเตือนทั้งหมดเป็นเท็จและตั้งค่าตัวแปรต่างๆในระบบเป็น 0 เนื่องจากอาจจะยังมีค่าข้อมูลค้างอยู่ในโปรแกรมก่อนทำการเปิดระบบ



รูปที่ 3.23 ส่วนตั้งค่าเริ่มต้นของระบบ

- ส่วนสำหรับคำนวณสมการค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดบางส่วนจากสมการค่าความขรุขระ [4]

$$R_a = 53.52 \cdot V^{-0.122} \cdot F^{1.6} \cdot R_n^{-0.519} \cdot D^{0.108} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{-0.296} \cdot e^{-0.00187\gamma} \quad (1)$$

$$R_z = 757.48 \cdot V^{-0.263} \cdot F^{1.59} \cdot R_n^{-0.205} \cdot D^{0.163} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{-0.18} \cdot e^{-0.00998\gamma} \quad (2)$$

นำสมการ (1) มาแบ่งเป็นสมการ (3) และ สมการ (4)

$$SP_{Ra} = 53.52 \cdot V^{-0.122} \cdot F^{1.6} \cdot R_n^{-0.519} \cdot D^{0.108} \cdot e^{-0.00187\gamma} \quad (3)$$

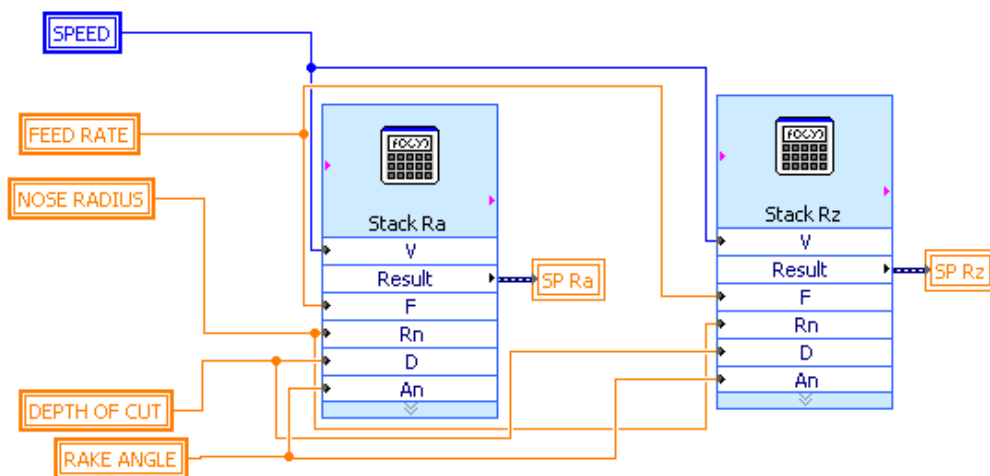
$$R_a = SP_{Ra} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{-0.296} \quad (4)$$

นำสมการ (2) มาแบ่งเป็นสมการ (5) และ สมการ (6)

$$SP_{Rz} = 757.48 \cdot V^{-0.263} \cdot F^{1.59} \cdot R_n^{-0.205} \cdot D^{0.163} \cdot e^{-0.00998\gamma} \quad (5)$$

$$R_z = SP_{Rz} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{-0.18} \quad (6)$$

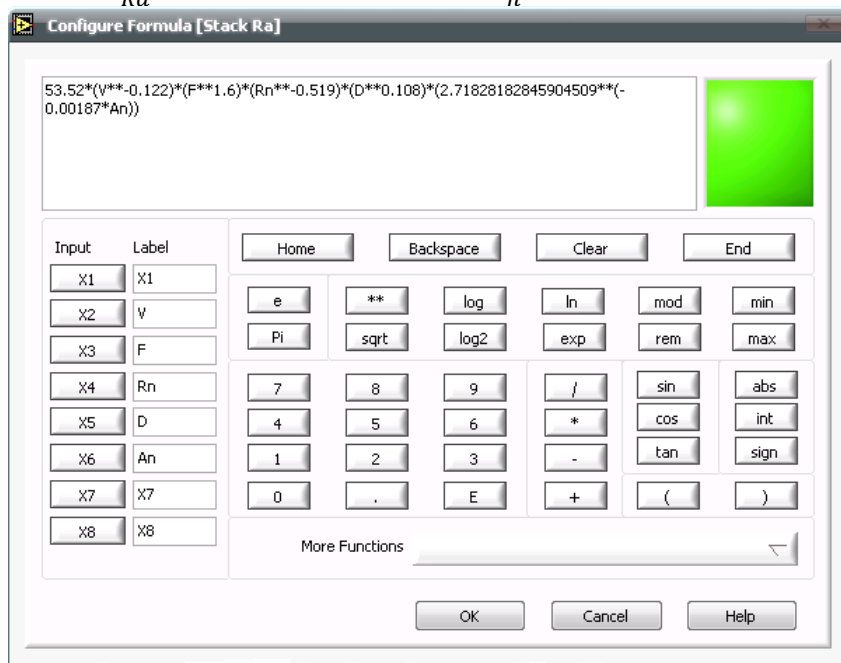
โดยในสถานะนี้ จะทำการคำนวณเฉพาะ สมการ (3) และสมการ (5) ซึ่งเป็นการคำนวณเฉพาะค่าความเร็วตัด, อัตราป้อนตัด, รัศมีจมูกมีด, ความลึกตัดและมุมคายเศษโลหะ โดยไม่ได้คำนวณค่าอัตราส่วนแรงตัด เพื่อลดภาระการทำงานของระบบในช่วงกระบวนการควบคุมเชิงสถิติในสถานะควบคุม เนื่องจากค่าอัตราส่วนแรงตัดเป็นปัจจัยเดียวในสมการที่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการตัด



รูปที่ 3.24 ส่วนคำนวณสมการค่าความขรุขระผิวชิ้นงานบางส่วน

- ส่วนคำนวณสมการค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยบางส่วน จากสมการ (3)

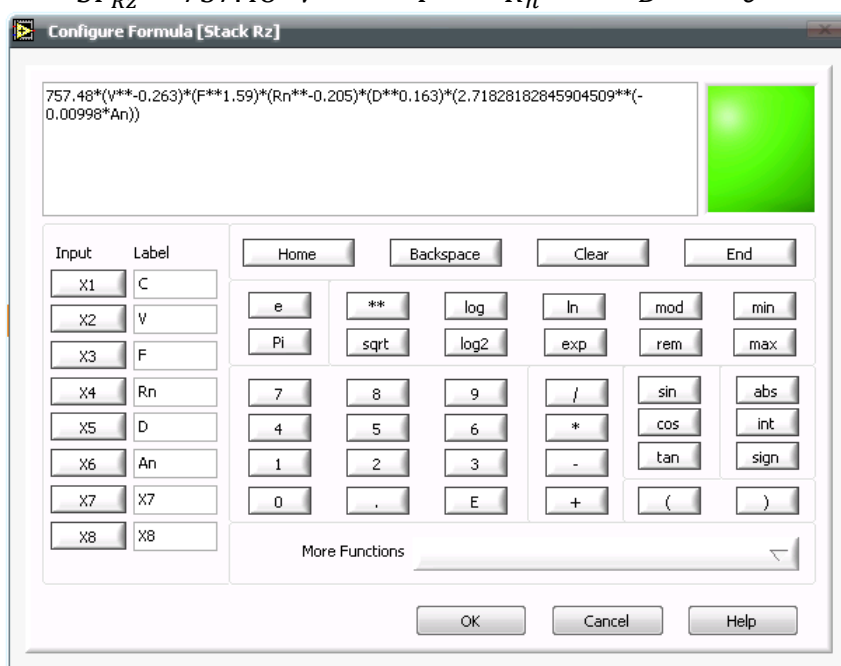
$$SP_{Ra} = 53.52 \cdot V^{-0.122} \cdot F^{1.6} \cdot R_n^{-0.519} \cdot D^{0.108} \cdot e^{-0.00187\gamma} \quad (3)$$



รูปที่ 3.25 ส่วนคำนวณสมการค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยบางส่วน

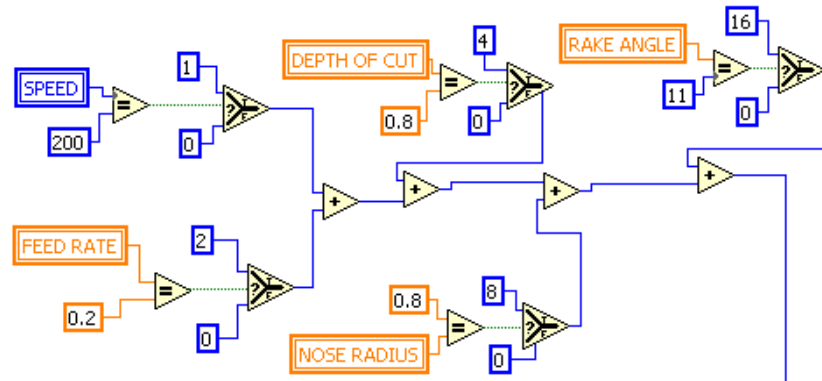
- ส่วนคำนวณสมการค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดบางส่วน จากสมการ (5)

$$SP_{Rz} = 757.48 \cdot V^{-0.263} \cdot F^{1.59} \cdot R_n^{-0.205} \cdot D^{0.163} \cdot e^{-0.00998\gamma} \quad (5)$$



รูปที่ 3.26 ส่วนคำนวณสมการค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดบางส่วน

- ส่วนคำนวณเลือกค่าตัวอย่างการทดลองของระบบ ดังตารางที่ 3.2 เพื่อทำการระบุตำแหน่งของข้อมูลค่าขีดจำกัดควบคุมในระบบ



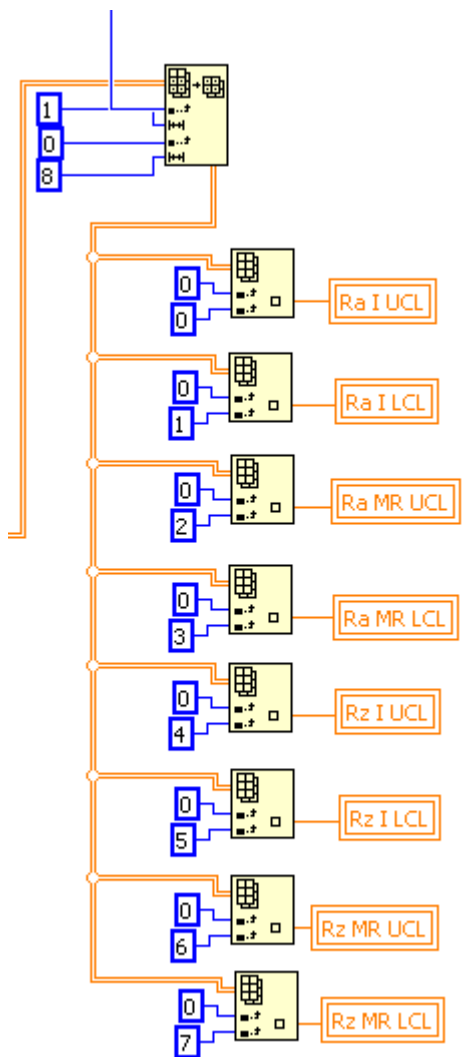
รูปที่ 3.27 ส่วนคำนวณเลือกค่าตัวอย่างการทดลอง

- ส่วนเก็บข้อมูลค่าขีดจำกัดควบคุมที่ได้จากการทดลอง ช่วงที่ 1

0	2.8248	2.3552	0.2886	0	11.8794	10.6733	0.73	0
0	2.7712	2.3618	0.2516	0	9.1542	7.3952	1.0645	0
	4.3118	3.9077	0.2446	0	15.3604	13.913	0.876	0
	3.8829	3.7175	0.1017	0	15.8303	14.8981	0.5642	0
	2.8735	2.6732	0.1213	0	10.6137	9.1191	0.9045	0
	3.1737	1.964	0.7434	0	10.7326	9.2357	0.9059	0
	4.5495	3.951	0.3622	0	18.8993	16.2525	1.6018	0
	3.9993	3.6427	0.2191	0	18.0496	16.2764	1.0731	0
	2.0807	1.7656	0.1907	0	9.0017	7.4664	0.9291	0
	1.5634	1.2337	0.2026	0	6.2999	5.1384	0.7138	0
	2.3945	2.3011	0.0574	0	9.3514	8.526	0.5072	0
	2.3836	2.2333	0.0924	0	9.0341	8.5007	0.3278	0
	1.5566	1.3993	0.0967	0	7.521	6.9581	0.3459	0
	1.5031	1.4208	0.0506	0	6.6038	5.3369	0.7785	0
	2.4363	2.3822	0.0332	0	9.4357	8.9008	0.3287	0
	2.5528	2.1368	0.2556	0	9.6839	7.8931	1.1005	0
	3.0353	2.1131	0.5667	0	11.0992	9.3558	1.0714	0
	2.6794	2.4516	0.14	0	11.5076	8.9382	1.579	0
	3.9137	3.404	0.3132	0	13.8771	13.2625	0.3777	0
	3.8851	3.4022	0.2967	0	13.8879	13.0354	0.5239	0
	2.9046	2.3043	0.3689	0	11.0887	10.4128	0.409	0
	2.7621	2.373	0.2391	0	10.83	9.6341	0.735	0
	4.4159	3.1644	0.769	0	17.306	13.6385	2.2537	0
	4.0541	3.348	0.434	0	18.4369	10.9564	4.5969	0
	1.6663	1.1365	0.3256	0	8.2159	5.6111	1.6006	0
	1.4437	1.3532	0.0556	0	5.9446	5.4836	0.2833	0
	1.5266	1.284	0.1491	0	7.1713	6.6715	0.3072	0
	1.4963	1.3069	0.1164	0	6.606	6.1452	0.2831	0
	1.5744	1.2637	0.1909	0	7.0641	6.7648	0.1839	0
	1.4903	1.321	0.1041	0	6.7107	4.7855	1.183	0
	2.2217	1.5547	0.4037	0	9.0145	5.3218	2.2692	0
	1.9222	1.8446	0.047	0	7.065	6.23	0.5053	0

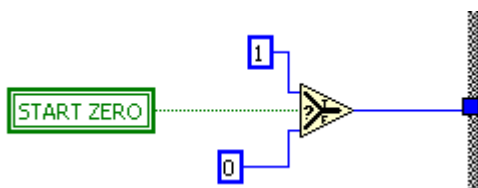
รูปที่ 3.28 ส่วนเก็บข้อมูลค่าขีดจำกัดควบคุม

- ส่วนตั้งค่าขีดจำกัดควบคุมของแต่ละเงื่อนไขในระบบโดย รับค่าตำแหน่งข้อมูลที่ได้จากรูปที่ 3.27 นำมาตั้งข้อมูลค่าขีดจำกัดควบคุม จากส่วนเก็บข้อมูลค่าขีดจำกัดควบคุมใน รูปที่ 3.28



รูปที่ 3.29 ส่วนตั้งค่าขีดจำกัดควบคุมของแต่ละเงื่อนไข

- ส่วนตัดสินใจสถานะต่อไป โดยอ่านค่าจากสวิตช์เริ่มจัดเก็บแรงตัดศูนย์ โดยเริ่มต้นสวิตช์จะมีค่าเป็นเท็จซึ่งทำให้ระบบวนอยู่ที่สถานะเริ่มต้น เพื่อรอคำสั่งเริ่มทำงาน ซึ่งเมื่อทำการสับสวิตช์ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นสถานะจัดเก็บแรงตัดศูนย์

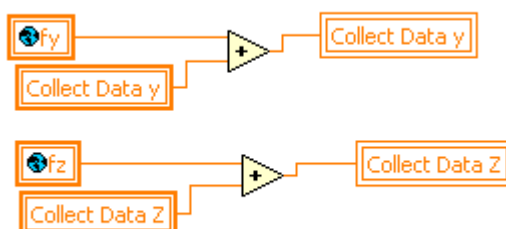


รูปที่ 3.30 ส่วนตัดสินใจสถานะต่อไป



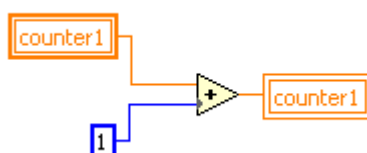
II. สถานะจัดเก็บแรงตัดศูนย์ (Count Zero,1) : เป็นสถานะสำหรับจัดเก็บแรงตัดศูนย์ โดยสถานะนี้จะประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

- ส่วนจัดเก็บสะสมสัญญาณแรงตัดศูนย์ที่ได้จากอุปกรณ์ดึงข้อมูล Ni-card



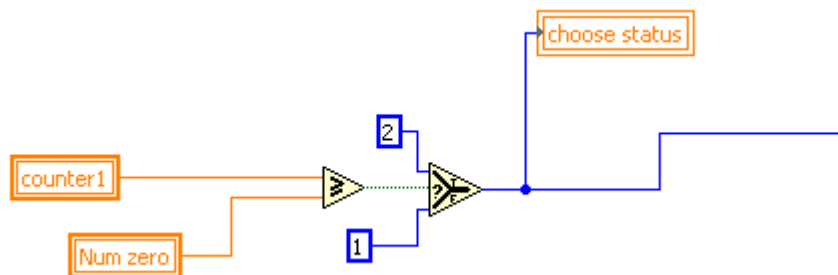
รูปที่ 3.31 ส่วนจัดเก็บสะสมสัญญาณแรงตัดศูนย์

- ส่วนนับจำนวนข้อมูล ซึ่งจะเพิ่มขึ้นทุกครั้งในรอบการทำงาน



รูปที่ 3.32 ส่วนนับจำนวนข้อมูล

- ส่วนตัดสินใจเลือกสถานะต่อไป โดยจะทำการเปลี่ยนสถานะเมื่อได้จำนวนข้อมูลสัญญาณแรงตัดศูนย์ตามที่ตั้งค่าไว้



รูปที่ 3.33 ส่วนตัดสินใจเลือกสถานะต่อไป

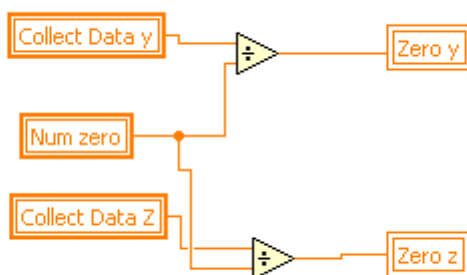
III. สถานะคำนวณแรงตัดศูนย์ (Zero,2) : เป็นสถานะสำหรับตัดสัญญาณรบกวนโดยการนำสัญญาณแรงตัดศูนย์ที่สะสมไว้มาทำการหาค่าเฉลี่ย ซึ่งสถานะนี้จะประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

- ส่วนล่างข้อมูลตัวนับจำนวนข้อมูล



รูปที่ 3.34 ส่วนล่างข้อมูลตัวนับจำนวนข้อมูล

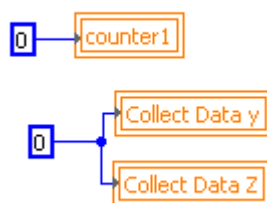
- ส่วนเก็บค่าสำหรับการตัดสัญญาณรบกวน โดยการนำสัญญาณแรงตัดศูนย์ที่สะสมไว้มาทำการหาค่าเฉลี่ยจากการหารด้วยจำนวนชุดข้อมูล



รูปที่ 3.35 ส่วนเก็บค่าสำหรับการตัดสัญญาณรบกวน

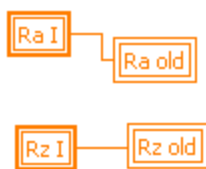
IV. **สถานะรอ (Wait,3)** : เป็นสถานะสำหรับรอการเริ่มกระบวนการควบคุมเชิงสถิติ โดยสถานะนี้จะประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

- ส่วนล่างข้อมูลตัวนับจำนวนข้อมูลและสัญญาณแรงตัดศูนย์ที่สะสมไว้



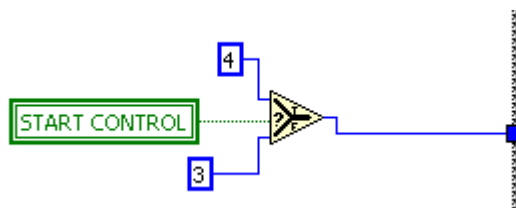
รูปที่ 3.36 ส่วนล่างข้อมูลตัวนับจำนวนข้อมูลและสัญญาณแรงตัดศูนย์สะสม

- ส่วนบันทึกค่าความขรุขระย้อนหลัง 1 รอบการทำงาน เพื่อนำมาคำนวณค่า MR ในการควบคุมเชิงสถิติ



รูปที่ 3.37 ส่วนบันทึกค่าความขรุขระย้อนหลัง

- ส่วนตัดสินใจเลือกสถานะต่อไป โดยอ่านค่าจากสวิตช์เริ่มกระบวนการควบคุม โดยเริ่มต้นสวิตช์จะมีค่าเป็น เท็จซึ่งทำให้ระบบวนอยู่ที่สถานะรอ เพื่อรอคำสั่งเริ่มทำงาน ซึ่งเมื่อทำการสับสวิตช์ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นสถานะควบคุม



รูปที่ 3.38 ส่วนตัดสินใจเลือกสถานะต่อไป

V. **สถานะควบคุม (Control,4)** : เป็นสถานะสำหรับกระบวนการควบคุมเชิงสถิติ โดยสถานะนี้จะประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

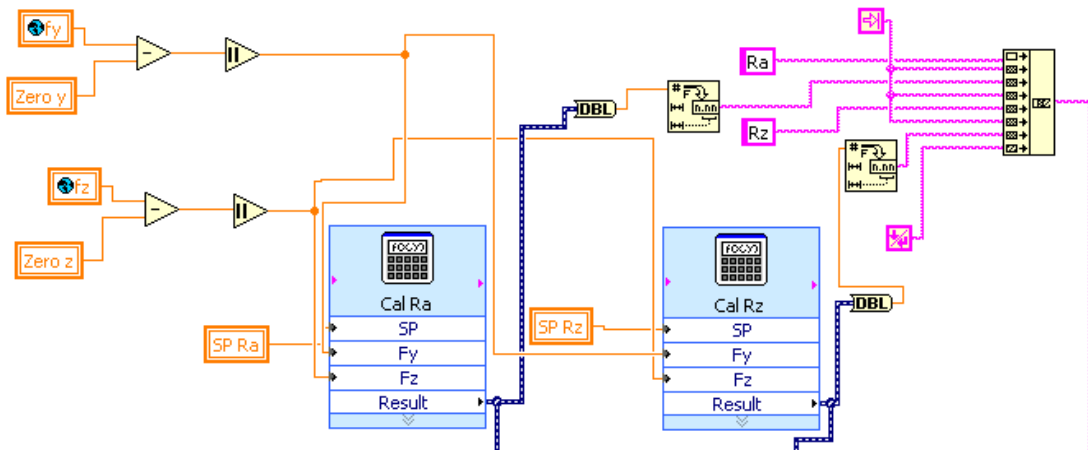
- ส่วนคำนวณค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยการนำค่าสัญญาณที่ผ่านการตัดสัญญาณรบกวนมาคำนวณในสมการ(4) และ สมการ (6) ต่อจากนั้นนำค่าความขรุขระผิวที่ได้จัดเก็บลงไฟล์ที่เตรียมไว้ข้างต้น

$$R_a = SP_{Ra} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{-0.296} \quad (4)$$

$$R_z = SP_{Rz} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{-0.18} \quad (6)$$

ซึ่งข้อมูลจากอุปกรณ์ เพื่อใช้สำหรับการแปลงค่าหน่วยจากโวลต์ที่อ่านค่าได้เป็นสัญญาณแรงตัด ตามค่า Sensitivity ดังนี้

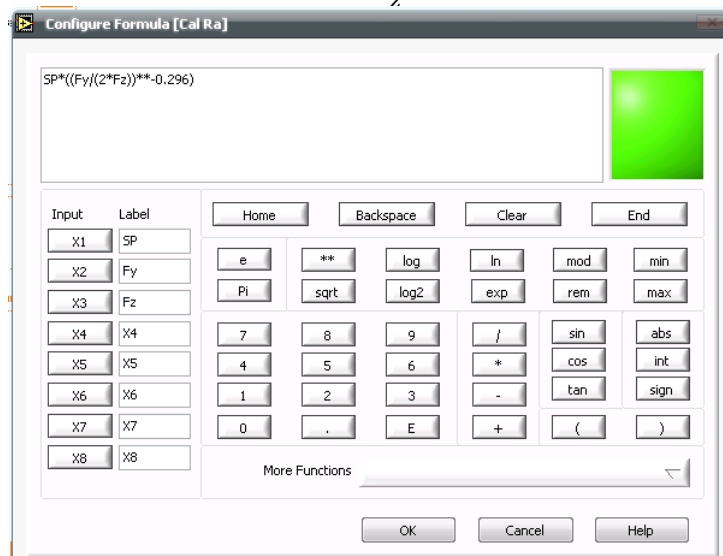
- แรงรัศมี (Radial Force , N) =  $V_x$  (Volt) x 600 (N / Volt)
- แรงป้อนตัด (Feed Force , N) =  $V_y$  (Volt) x 600 (N / Volt)
- แรงตัดหลัก (Main Force , N) =  $V_z$  (Volt) x 1200 (N / Volt)



รูปที่ 3.39 ส่วนคำนวณค่าความขรุขระผิวขี้ในงาน

- ส่วนคำนวณสมการค่าความขรุขระผิวขี้งานเฉลี่ย จากสมการ (4)

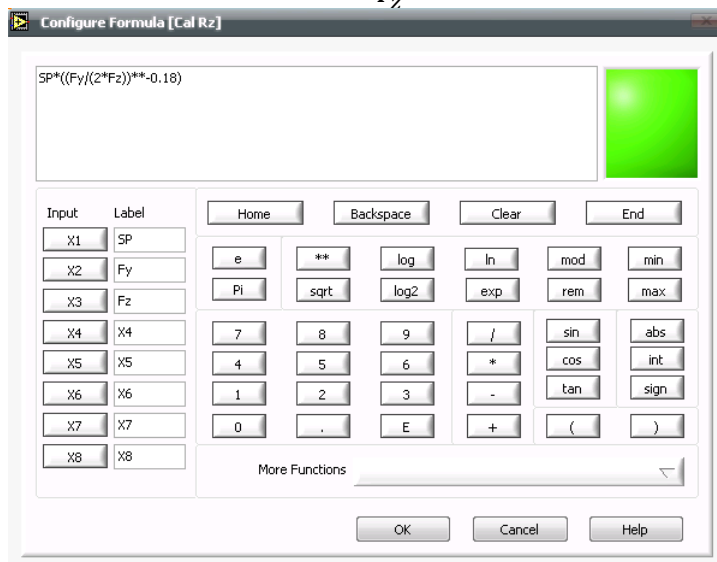
$$R_a = SP_{Ra} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{-0.296} \quad (4)$$



รูปที่ 3.40 ส่วนคำนวณสมการค่าความขรุขระผิวขี้งานเฉลี่ย

- ส่วนคำนวณสมการค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด จากสมการ (6)

$$R_z = SP_{Rz} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{-0.18} \quad (6)$$



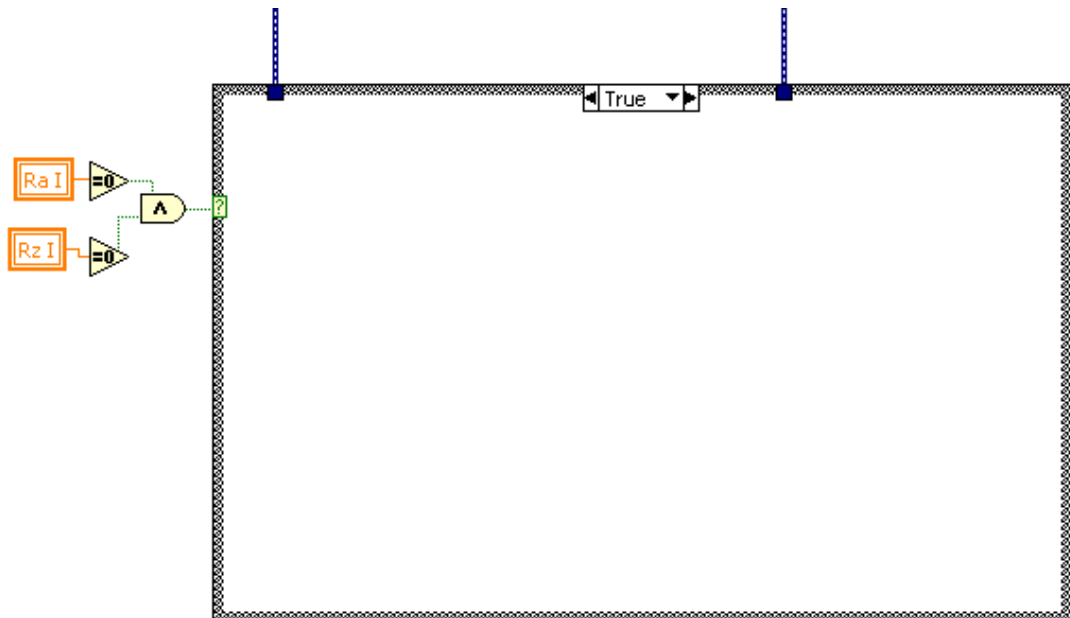
รูปที่ 3.41 ส่วนคำนวณสมการค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด

- ส่วนแสดงกราฟ I chart โดยนำค่าความขรุขระผิวที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับค่าขีดจำกัดควบคุมบนในเงื่อนไขที่กำหนด



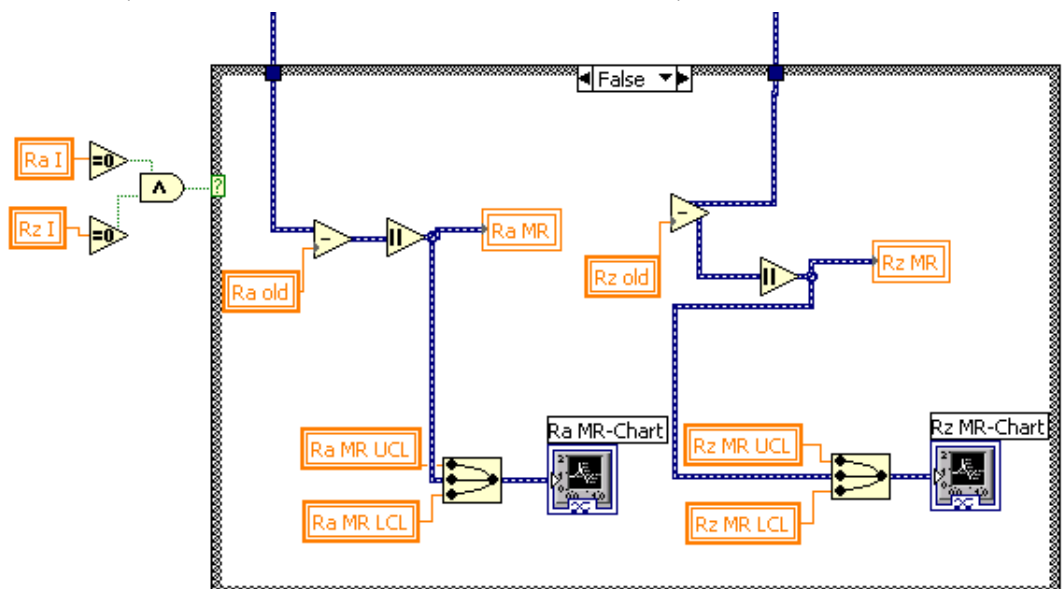
รูปที่ 3.42 ส่วนแสดงกราฟ I chart

- ส่วนแสดงกราฟ MR chart ในการทำงานรอบแรก เนื่องจากการคำนวณค่า MR เกิดจากการเปรียบเทียบค่าความขรุขระ 2 ค่า ซึ่งในการทำงานรอบแรกมีข้อมูลไม่เพียงพอในการทำงานจริงไม่แสดงผล โดยการตรวจสอบค่าความขรุขระเริ่มต้นที่มีค่าเป็น 0



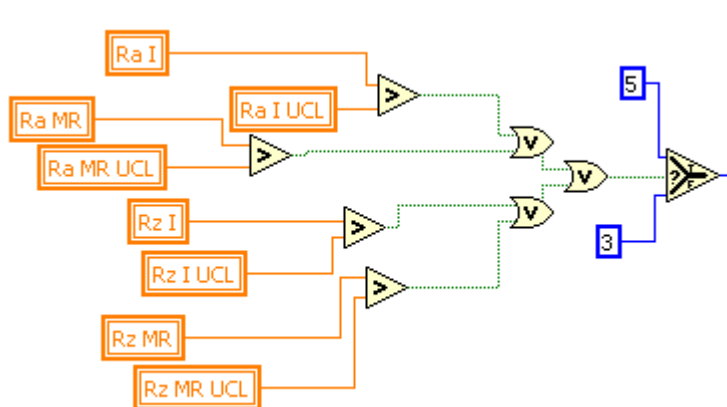
รูปที่ 3.43 ส่วนแสดงกราฟ MR chart ในการทำงานรอบแรก

- ส่วนส่วนแสดงกราฟ MR chart ในการทำงานตั้งแต่รอบที่สอง โดยการนำค่าความขรุขระผิวที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับค่าความขรุขระในรอบการทำงานก่อนหน้านี้



รูปที่ 3.44 ส่วนแสดงกราฟ MR chart ในการทำงานตั้งแต่รอบที่สอง

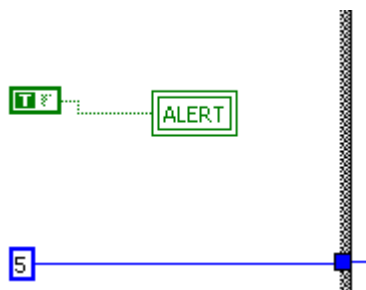
- ส่วนตัดสินใจเลือกสถานะต่อไป โดยจะทำการเปลี่ยนสถานะไปเป็นสถานะแจ้งเตือนเมื่อค่าความขรุขระผิวที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่าขีดจำกัดควบคุมบน หรือกลับไปสู่สถานะรอ เพื่อทำงานต่อ



รูปที่ 3.45 ส่วนตัดสินใจเลือกสถานะต่อไป

VI. **สถานะแจ้งเตือน (Alert,5)** : เป็นสถานะสำหรับแสดงสัญญาณเตือนเพื่อให้ผู้ใช้รับทราบว่ากระบวนการตัดเกิดปัญหา มีชิ้นงานไม่ได้คุณภาพ โดยสถานะนี้จะประกอบด้วย

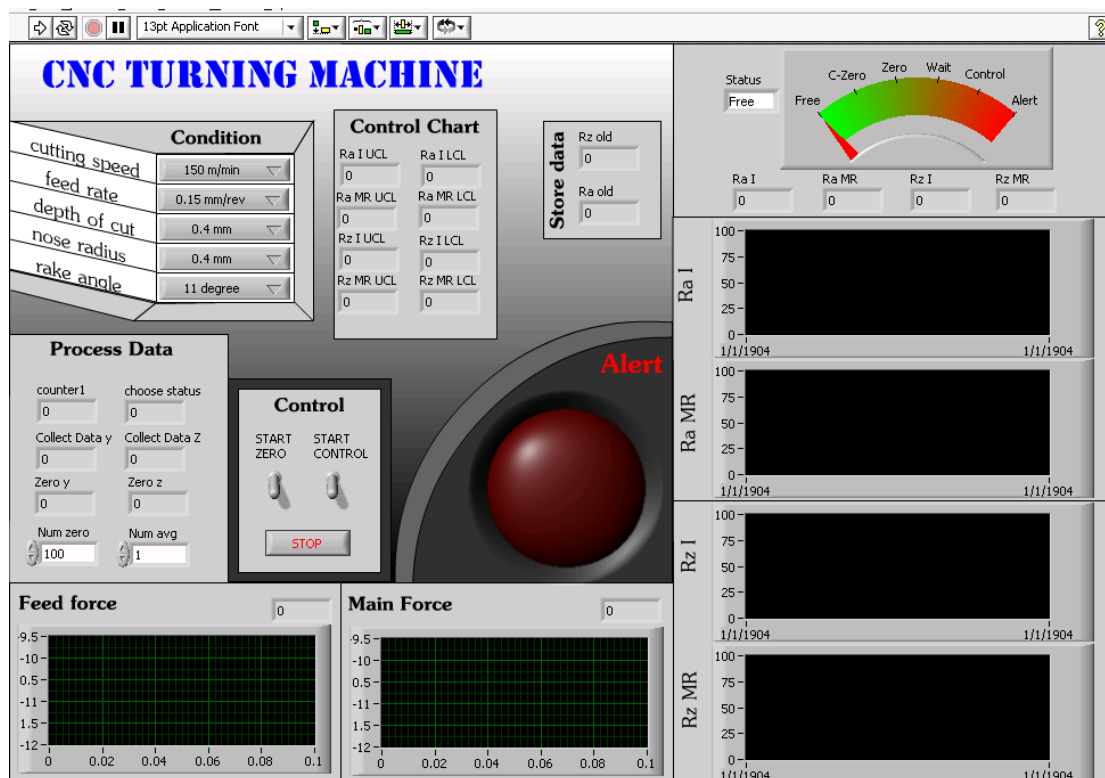
- ส่วนแสดงสัญญาณเตือน เพื่อแจ้งเตือนผู้ใช้งานว่า



รูปที่ 3.46 ส่วนแสดงสัญญาณเตือน

ส่วนติดต่อผู้ใช้ของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อเชื่อมต่อระหว่างระบบการตรวจติดตามและการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติสำหรับความขรุขระผิวชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.47 ประกอบด้วย

- (1): แผงควบคุมสำหรับเลือกเงื่อนไขการตัด
- (2): แผงควบคุมหลัก
- (3): ส่วนแสดงสถานะของโปรแกรม
- (4): ส่วนแสดงสัญญาณแรงป้อนตัดและแรงตัดหลัก
- (5): ส่วนแสดงกราฟ I-MR chart ของความขรุขระผิวเฉลี่ยและความขรุขระผิวสูงสุด
- (6): ส่วนแสดงสัญญาณเตือน เมื่อระบบตรวจจับค่าความขรุขระผิวชิ้นงานอยู่นอกเหนือขีดจำกัด



รูปที่ 3.47 ส่วนติดต่อผู้ใช้

### 3.3.3 ช่วงการควบคุมกระบวนการตัดเชิงสถิติ

รูปที่ 3.11 ช่วงที่สาม เป็นการควบคุมกระบวนการตัดเชิงสถิติ โดยการใช้สัญญาณแรงตัดมาพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าขีดจำกัดควบคุมที่คำนวณได้ในช่วงที่หนึ่ง เพื่อควบคุมคุณภาพผิวชิ้นงาน โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน

ส่วนแรก ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์

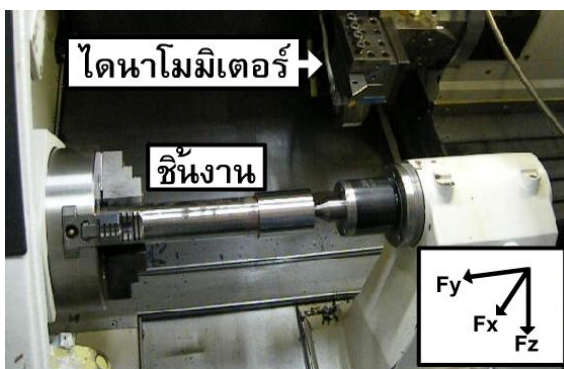
ส่วนสอง ขั้นตอนการเริ่มการทำงาน

#### 3.3.3.1 ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์

- ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง (Dynamometer) เข้ากับชุดป้อมมีด (Turret) ของเครื่องกลึง
- เชื่อมต่อสายสัญญาณจากเซนเซอร์วัดแรงตัดเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier) เพื่อทำการขยายสัญญาณ
- เชื่อมต่อสายสัญญาณที่ได้รับการขยายแล้วเข้ากับอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (Ni-card) เพื่อทำการแปลงสัญญาณจากสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล



- ทำการติดตั้งเม็ดมีดเข้ากับด้ามมีดแล้วนำไปจับยึดเข้ากับชุดจับยึดที่ออกแบบมาเพื่อติดตั้งกับเซนเซอร์วัดแรงตัด
- ทำการขึ้นงาน (Workpiece) เข้ากับแกนหมุน (spindle) แล้วทำการยืนยันศูนย์ขึ้นงานดังรูปที่ 3.48



รูปที่ 3.48 ชิ้นงานและไดนาโมมิเตอร์ที่ติดตั้งในเครื่องกลึงซีเอ็นซี

### 3.3.3.2 ขั้นตอนการเริ่มการงานระบบ

- ทำการเขียนโปรแกรมลงบนเครื่องกลึงตามเงื่อนไขการตัดที่ต้องการ ตามตารางที่ 3.2 (บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี)
- ทำการเปิดระบบตรวจติดตามความขรุขระผิวที่พัฒนาขึ้น (บนเครื่องคอมพิวเตอร์)
- ตั้งค่าเงื่อนไขการตัดลงในระบบ ตามเงื่อนไขการตัดที่บันทึกลงบนเครื่องกลึง (บนเครื่องคอมพิวเตอร์)
- กดสวิทช์เริ่มจับเก็บแรงตัดศูนย์รอจนกระทั่งระบบทำการจับเก็บสัญญาณแรงตัดศูนย์ และจัดการตัดสัญญาณรบกวนเสร็จ (บนเครื่องคอมพิวเตอร์)
- ทำการกลึงปกผิวตามเงื่อนไขการตัด (บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี)
- กดสวิทช์เริ่มกระบวนการควบคุม (บนเครื่องคอมพิวเตอร์) เพื่อให้ระบบเริ่มการคำนวณค่าความขรุขระผิวชิ้นงานแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าขีดจำกัดควบคุม ซึ่งถ้าเกินระบบจะทำการแจ้งเตือนผู้ใช้ เพื่อทำการตรวจสอบและปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด เช่น เพิ่มความเร็วตัด, เพิ่มรัศมีงูมมีด, ลดอัตราการป้อนตัด, ลดความลึกตัดและลดมุมคายเศษโลหะ

โดยความเร็วตัด(V)ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่ออุณหภูมิในขณะตัดทำให้ชิ้นงานเกิดความอ่อนนุ่ม และตัดง่ายจึงได้ความขรุขระที่ดี จากทฤษฎีความขรุขระผิวชิ้นงาน[2] ค่าอัตราการป้อนตัด(F)ที่ลดลง จะส่งผลให้ความขรุขระผิวลดลง และค่ารัศมีจุมุมมีด(Rn)ที่มากขึ้นจะทำให้ค่าความขรุขระผิวมีค่าลดลงด้วย ส่วนค่าความลึกตัด(D)ที่ต่ำจึงให้ค่าความขรุขระผิวที่ดี เนื่องจากแรงตัดแปรผันตรงกับค่าความลึกตัด ทำให้แรงตัด( $\frac{Fy}{Fz}$ )มีผลต่อค่าความขรุขระผิว[4]

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบการตรวจติดตามและควบคุมกระบวนการเชิงสถิติสำหรับความขรุขระผิวชิ้นงานบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีด้วยการใช้เซนเซอร์วัดแรงและแปลงค่าสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้นเป็นค่าความขรุขระผิวชิ้นงานด้วยสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้จากงานวิจัยก่อนหน้านี้[4] ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยต่างๆ ได้แก่ความเร็วตัด, อัตราการป้อนตัด, ความลึกตัด, รัศมีจมูกมีด, มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนแรงตัด เพื่อควบคุมค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่เกิดขึ้น โดยอาศัยหลักการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ I-MR chart ในการควบคุมค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่เกิดขึ้น ซึ่งสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานให้ค่าความแม่นยำของค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดอยู่ที่ 87.94% และ 84.23% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการตัดสามารถนำไปปรับใช้กับเงื่อนไขการตัดอื่นๆได้ ด้านการพัฒนาระบบใช้โปรแกรม LabVIEW ในการพัฒนาซึ่งเป็นโปรแกรมถูกสร้างขึ้นมาเพื่อทำงานด้านเครื่องมือวัด สำหรับงานวิศวกรรม และยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆ เช่น Ni-card , PLC(Programmable Logic Controller) ชนิดต่างๆ จึงเหมาะสมในการนำมาใช้พัฒนาระบบ

#### 4.1 ผลการหาค่าขีดจำกัดควบคุมบน

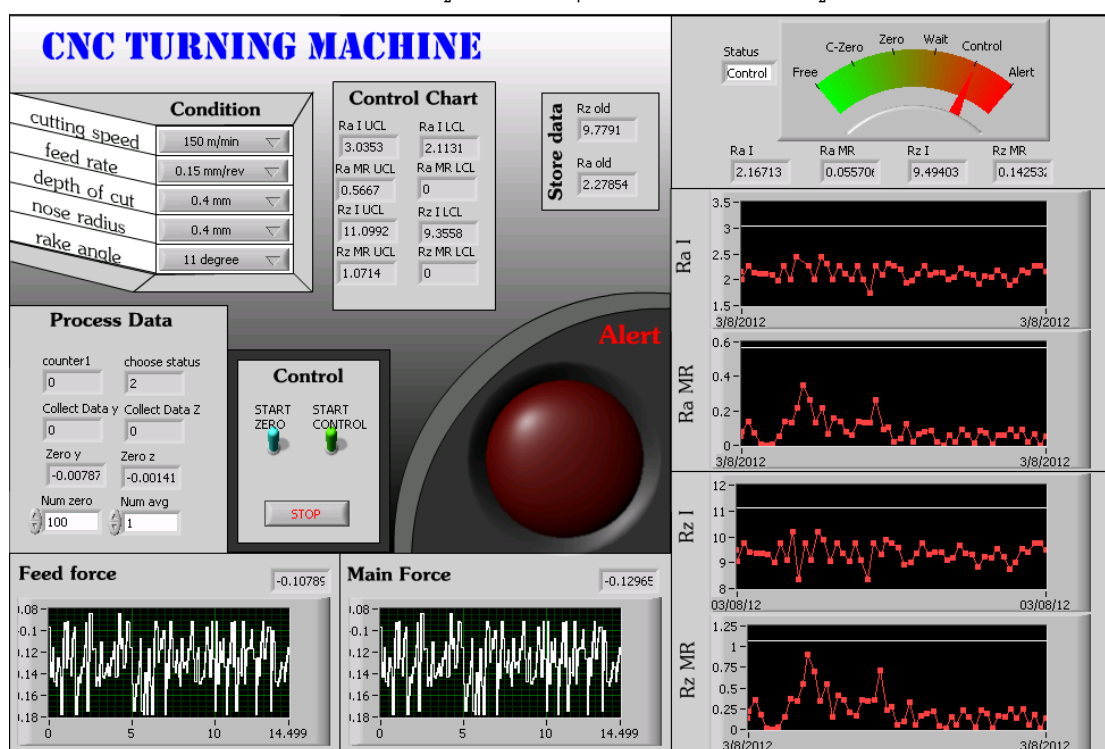
จากการทำการทดลองตัดแบบแห้งทั้ง 32 เงื่อนไขการตัด ซึ่งแต่ละเงื่อนไขการตัดจะทำทั้งหมด 20 ครั้ง ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดจะแสดงอยู่ใน ภาคผนวก ก. เพื่อคำนวณค่าขีดจำกัดควบคุมบนดังตารางที่ 4.1 โดยค่าขีดจำกัดควบคุมบนที่คำนวณได้จากแต่ละเงื่อนไข จะถูกนำไปใช้ในการควบคุมค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการตัดจริง

ตารางที่ 4.1 ค่าขีดจำกัดควบคุมบน

ตัวอย่าง	มุมมอง เศษ โลหะ	รัศมี จุมูกมีด	ความ ลึกตัด	อัตรา ป้อนตัด	ความเร็ว ตัด	ค่าขีดจำกัดควบคุมบน	
						ความขรุขระ ผิวเฉลี่ย	ความขรุขระ ผิวสูงสุด
0	-6	0.4	0.4	0.15	150	2.8248	11.8794
1	-6	0.4	0.4	0.15	200	2.7712	9.1542
2	-6	0.4	0.4	0.2	150	4.3118	15.3604
3	-6	0.4	0.4	0.2	200	3.8829	15.8303
4	-6	0.4	0.8	0.15	150	2.8735	10.6137
5	-6	0.4	0.8	0.15	200	3.1737	10.7326
6	-6	0.4	0.8	0.2	150	4.5495	18.8993
7	-6	0.4	0.8	0.2	200	3.9993	18.0496
8	-6	0.8	0.4	0.15	150	2.0807	9.0017
9	-6	0.8	0.4	0.15	200	1.5634	6.2999
10	-6	0.8	0.4	0.2	150	2.3945	9.3514
11	-6	0.8	0.4	0.2	200	2.3836	9.0341
12	-6	0.8	0.8	0.15	150	1.5566	7.5210
13	-6	0.8	0.8	0.15	200	1.5031	6.6038
14	-6	0.8	0.8	0.2	150	2.4363	9.4357
15	-6	0.8	0.8	0.2	200	2.5528	9.6839
16	11	0.4	0.4	0.15	150	3.0353	11.0992
17	11	0.4	0.4	0.15	200	2.6794	11.5076
18	11	0.4	0.4	0.2	150	3.9137	13.8771
19	11	0.4	0.4	0.2	200	3.8851	13.8879
20	11	0.4	0.8	0.15	150	2.9046	11.0887
21	11	0.4	0.8	0.15	200	2.7621	10.8300
22	11	0.4	0.8	0.2	150	4.4159	17.3060
23	11	0.4	0.8	0.2	200	4.0541	18.4369
24	11	0.8	0.4	0.15	150	1.6663	8.2159
25	11	0.8	0.4	0.15	200	1.4437	5.9446
26	11	0.8	0.4	0.2	150	1.5266	7.1713
27	11	0.8	0.4	0.2	200	1.4963	6.6060
28	11	0.8	0.8	0.15	150	1.5744	7.0641
29	11	0.8	0.8	0.15	200	1.4903	6.7107
30	11	0.8	0.8	0.2	150	2.2217	9.0145
31	11	0.8	0.8	0.2	200	1.9222	7.0650

## 4.2 ผลการทดลอง

การตรวจจับค่าความขรุขระผิวในกระบวนการตัดด้วยกระบวนการเชิงสถิติสำหรับค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด โดยการอ้างอิงกับ ค่าขีดจำกัดควบคุมบนของ I-MR chart ค่าขีดจำกัดควบคุมของ I-MR chart สำหรับค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด เพื่อใช้ในการตรวจจับค่าความขรุขระผิวในกระบวนการตัด ซึ่งถ้าค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดมีค่าเกินค่าขีดจำกัดควบคุมบน ระบบจะส่งสัญญาณเตือน เพื่อให้ผู้ใช้งานปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด เช่น ความเร็วตัด, อัตราการป้อนตัด, ความลึกตัด, รัศมีจุมุมมีดและ มุมคายเศษโลหะ ตามรูปที่ 4.1

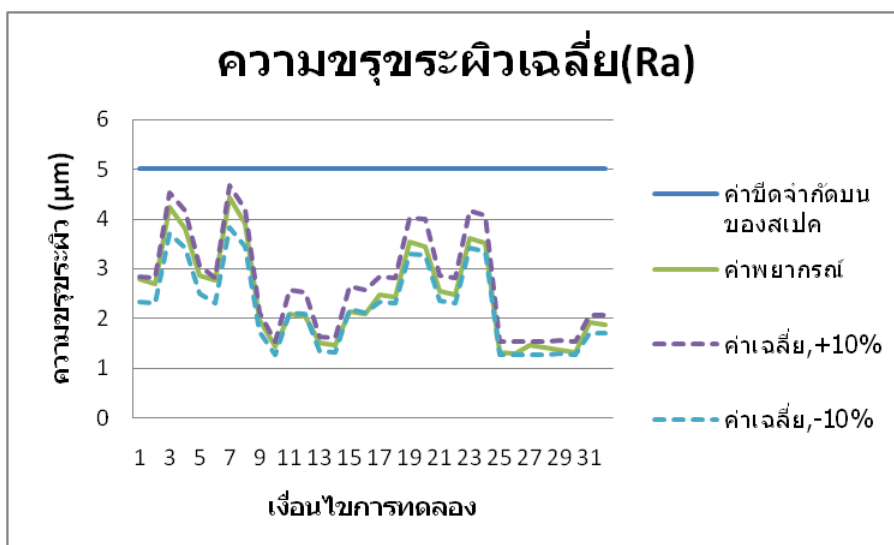


รูปที่ 4.1 ส่วนติดต่อผู้ใช้ของระบบสำหรับความขรุขระผิวชิ้นงานบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี ในตัวอย่างการตัดที่ 16 ความเร็วตัด 150 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มม./รอบ ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

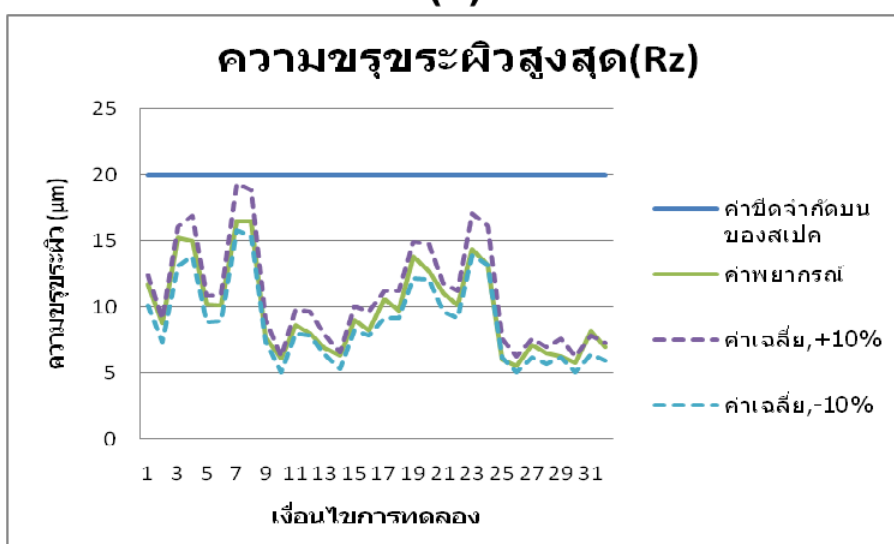
จากรูปที่ 4.1 แสดงผลของการตรวจติดตามค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการตัดจริง โดยแถบ Condition แสดงค่าปัจจัยต่างๆที่ได้ทำการเลือก ซึ่งระบบจะทำการดึงค่าขีดจำกัดควบคุมมาแสดงในแถบ Control Chart ตัวระบบจะถูกควบคุมการทำงานด้วย switchควบคุม ในแถบ Control ซึ่งแถบด้านล่างจะเป็นส่วนแสดงสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด และแถบด้านขวามือจะเป็นส่วนแสดงสถานะการทำงานของระบบ และกราฟควบคุม I-MR Chart ของค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด

#### 4.2.1 ผลการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลอง

ในการพัฒนาระบบการตรวจติดตามความขรุขระผิวชิ้นงานจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบความแม่นยำของสมการที่ใช้ในระบบ ซึ่งจากรูปที่ 4.2 แสดงถึงผลการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด ในกระบวนการตัดที่ได้จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [4] ตกอยู่ในช่วง  $\pm 10\%$  ของผลการวัดค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจากการทดลองทั้งหมด 32 เงื่อนไขดังตารางที่ 3.2 แสดงว่าสมการพยากรณ์สามารถใช้ในการตรวจสอบค่าและทำการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดได้



(a)



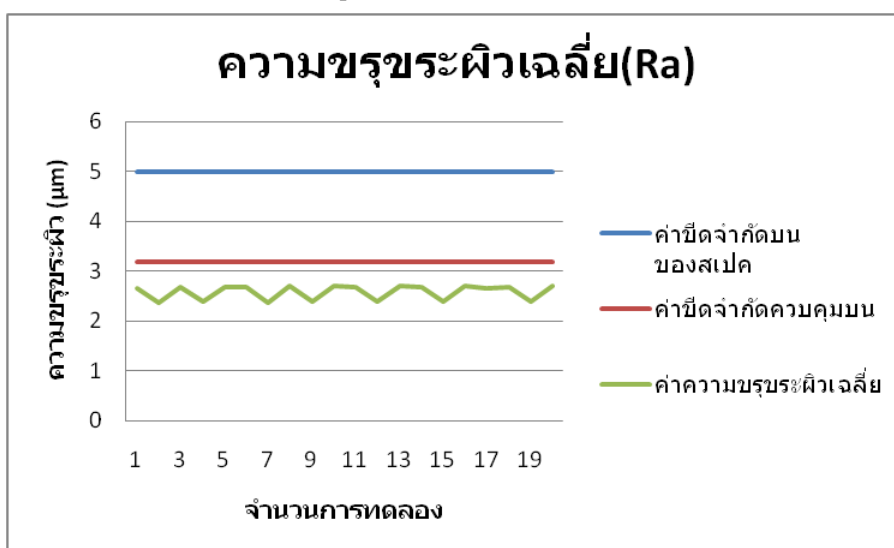
(b)

รูปที่ 4.2 ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยของชิ้นงาน (a) และค่าความขรุขระผิวสูงสุดของชิ้นงาน (b)

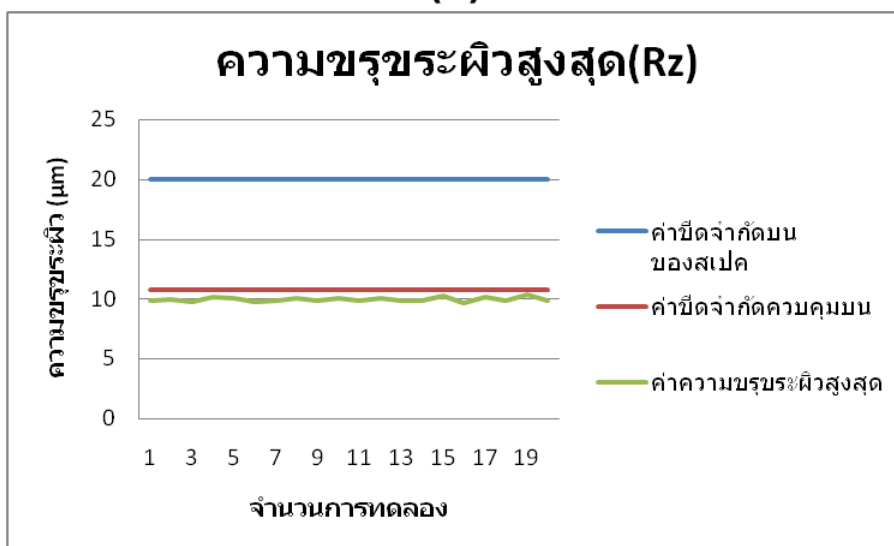
ในแต่ละเงื่อนไขโดยเทียบระหว่างค่าพยากรณ์และค่าเฉลี่ย  $\pm 10\%$

#### 4.2.2 ผลการทดลองของระบบการตรวจติดตาม

ในการควบคุมกระบวนการตัดเชิงสถิติ ค่าขีดจำกัดควบคุมบน(UCL) ที่ใช้ในการควบคุมค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดต้องอยู่ภายใต้ค่ามาตรฐานหรือค่าขีดจำกัดบนของสเปค (USL) โดยที่ค่าขีดจำกัดควบคุมที่คำนวณได้ใน I-MR chart สำหรับค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด เพื่อใช้ในการตรวจจับค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการตัด ดังรูปที่ 4.3



(a)



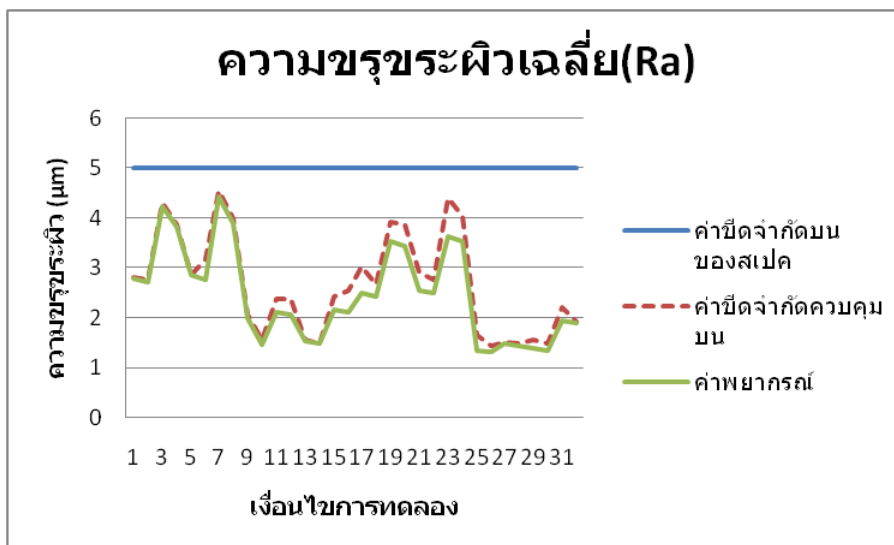
(b)

รูปที่ 4.3 ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยของชิ้นงาน (a) และค่าความขรุขระผิวสูงสุดของชิ้นงาน (b)

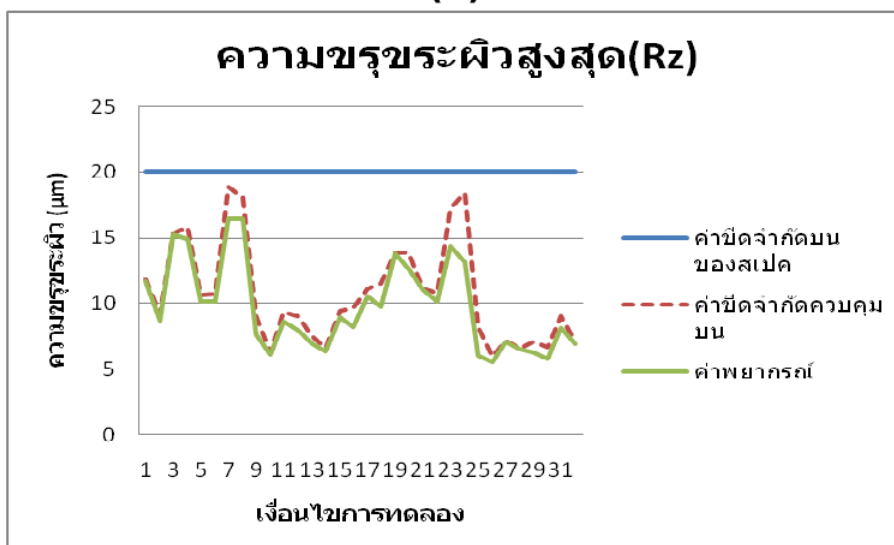
ในตัวอย่างการตัดที่ ความเร็วตัด 200 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มม./รอบ

ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีงมูมิต 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

แสดงถึงผลการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดและค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย ในกระบวนการตัด ตามลำดับ โดยเทียบกับค่าขีดจำกัดควบคุมบนของทั้ง 32 เงื่อนไขจากตารางที่ 4.1 ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดจะแสดงอยู่ใน ภาคผนวก ข. ดังรูปที่ 4.4



(a)



(b)

รูปที่ 4.4 ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยของชิ้นงาน (a) และค่าความขรุขระผิวสูงสุดของชิ้นงาน (b) ในแต่ละเงื่อนไขโดยเทียบระหว่างค่าพยากรณ์และค่าขีดจำกัดควบคุมบน

จากรูปที่ 4.1 แสดงระบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อตรวจติดตามและควบคุมค่าความขรุขระผิวในกระบวนการตัดด้วยกระบวนการเชิงสถิติสำหรับค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด โดยการอ้างอิงจาก ค่าขีดจำกัดควบคุมบนของ I-MR chart ซึ่งถ้าค่าความขรุขระ



ผิวชิ้นงานเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดมีค่าเกินค่าขีดจำกัดควบคุมบน ระบบจะส่งสัญญาณเตือน เพื่อให้ผู้ใช้งานปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด เช่น ความเร็วตัด, อัตราการป้อนตัด, ความลึกตัด, รัศมีจุมุมมีดและ มุมคายเศษโลหะ

จากระบบการตรวจติดตามและการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติที่พัฒนาขึ้นสามารถพิสูจน์ได้ว่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้จะอยู่ในค่าขีดจำกัดบนของสเปคที่กำหนดและอยู่ภายใต้ขีดจำกัดควบคุมบน ทำให้ไม่มีของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการตัดเนื่องจากระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจสอบคุณภาพผิวชิ้นงานได้ในขณะตัดจริง ซึ่งเมื่อค่าความขรุขระผิวที่พยากรณ์ได้ในขณะตัดจริงมีค่าเกินกว่าขีดจำกัดควบคุมบน ระบบสามารถแจ้งเตือนผู้ใช้งาน เพื่อให้ผู้ใช้งานตรวจสอบและปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดได้ ดังรูปที่ 3.11

## บทที่ 5

### สรุปผล และข้อเสนอแนะ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาระบบการตรวจติดตามร่วมกับการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (SPC) สำหรับค่าความขรุขระผิวชิ้นงานบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยใช้อัตราส่วนแรงตัดระหว่างแรงป้อนตัดและแรงตัดหลัก ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการตัดจริง

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบการตรวจติดตามร่วมกับการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติสำหรับความขรุขระผิวชิ้นงานบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี สมการที่ใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานประกอบด้วย ความเร็วตัด, อัตราการป้อนตัด, ความลึกตัด, รัศมีจุมกมีด, มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนแรงตัด ซึ่งอัตราส่วนแรงตัดระหว่างแรงป้อนตัดและแรงตัดหลัก ( $F_y/F_z$ ) ทำให้สมการพยากรณ์ค่าความขรุขระสามารถพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานได้อย่างแม่นยำ แม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนไป

ระบบการตรวจติดตามความขรุขระผิวที่พัฒนาขึ้นมาสามารถตรวจจับและควบคุมค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในระหว่างกระบวนการตัดจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการอ้างอิงจากค่าขีดจำกัดควบคุมบนของ I-MR chart ที่คำนวณได้ซึ่งไม่จำเป็นต้องหยุดเครื่องกลึงซีเอ็นซี และสามารถแจ้งเตือนเมื่อความขรุขระผิวชิ้นงานอยู่นอกเหนือขีดจำกัด ทำให้คุณภาพผิวชิ้นงานที่ดีขึ้น และช่วยให้อัตราการการผลิตดีขึ้น รวมทั้งเป็นการลดต้นทุนในการตัดและลดของเสียแบบทันทีที่อื่นเนื่องมาจากผิวชิ้นงานไม่ได้คุณภาพ

#### 5.2 อภิปรายผลการทดลอง

- 1) การใช้อัตราส่วนแรงตัดระหว่างแรงป้อนตัดและแรงตัดหลัก ( $F_y/F_z$ ) ทำให้ระบบสามารถพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสามารถรองรับเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไปได้
- 2) จากผลการทดลองทำสามารถยืนยันได้ว่าเซนเซอร์วัดสัญญาณแรงตัดไดนามิเมตรที่ใช้ในการทดลองให้สัญญาณแรงตัดที่มีความน่าเชื่อถือสูง เนื่องจากตัวอุปกรณ์ติดตั้งอยู่บนป้อมมีดซึ่งมีความมั่นคงสูง

- 3) เนื่องจากคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดลองงานประสิทธิภาพมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอแก่การคำนวณค่าความขรุขระในกระบวนการด้วยความถี่ที่สูง จึงจำเป็นที่จะต้องลดขนาด sampling rate อยู่ที่ 100 Hz ซึ่งจากการเทียบสัญญาณแรงตัดขนาด sampling rate ที่ 10,000 Hz พบว่าสามารถยอมรับได้ดังที่แสดงอยู่ใน ภาคผนวก ค.
- 4) การทดลองในงานวิจัยเลือกเงื่อนไขการตัดที่ทำให้เกิดค่าความขรุขระผิวชิ้นงานอยู่ภายใต้มาตรฐาน ISO 4287-1997 จึงทำให้ชิ้นงานที่ตัดมีคุณภาพผิวชิ้นงานที่ดีในทางอุตสาหกรรม

### 5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในการวิจัย

- 1) เครื่องกลึงซีเอ็นซีชนิด 4 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น NEXUS 200MY/MSY ไม่สามารถรับคำสั่งการทำงานจากภายนอกได้จึงทำให้กระบวนการปรับเงื่อนไขการตัดหลังจากเกิดสัญญาณจำเป็นต้องแก้ไขด้วยผู้ปฏิบัติงาน
- 2) สมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวที่ใช้ในการพัฒนาระบบตรวจติดตามเป็นสมการที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อประยุกต์ใช้กับเครื่องกลึงซีเอ็นซีในการกลึงวัสดุประเภท Carbon steel เท่านั้น
- 3) การเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผลของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดลองจะทำให้อัตราการส่งข้อมูลในการคำนวณและตรวจติดตามค่าความขรุขระได้ดีขึ้น
- 4) อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองนี้มีราคาสูงและใช้จำนวนการทดลองมากทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง

### 5.4 ข้อเสนอแนะ

- 1) ระบบการตรวจติดตามร่วมกับการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (SPC) สำหรับค่าความขรุขระผิวที่พัฒนาขึ้นมาสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องกัดซีเอ็นซีได้ โดยสมการต้นแบบค่าความขรุขระผิวจะประกอบด้วย อัตราส่วนแรงตัด, ความเร็วตัด, อัตราการป้อน, ความลึกตัด และเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตัด
- 2) เทคโนโลยีการตรวจติดตามร่วมกับการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติสำหรับความขรุขระผิวชิ้นงานบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีถือเป็นเทคโนโลยีใหม่จึงควรศึกษาให้ดีกว่าก่อนนำไปปฏิบัติจริง

## รายการอ้างอิง

- [1] สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, วิศวกรรมการผลิตขั้นสูง. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [2]. Somkiat, T. In-Process Investigation of Turning Process Applied with and without Cutting Fluid. International Journal of Mechanical Engineering. Vol.6 (1) (2009) : 85-102.
- [3]. Moriwaki, T., Shibasaka, T., and Somkiat, T. Development of in-process chip-breaking detection system in turning. Memoirs of graduate school of science and technology Kobe University. Vol. 22(A) (2004) : 1-19.
- [4] Somkiat Tangjitsitcharoen. In-process Monitoring and Prediction of Surface Roughness in CNC Turning Process. Advanced Materials Research. Vols.199-200 (2011) : 1958-1966.
- [5] สมเกียรติ บูรณ์เจริญ, ทฤษฎีและการใช้งาน CNC Computer Numerical Control. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2537.
- [6] Amstead, B.H., Phillip, F.O., and Myron, L.B. Manufacturing Processes. 7th ed. USA: John Wiley & Sons, 1978.
- [7] กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. เทคโนโลยี CNC การใช้โปรแกรมและการใช้งาน สำหรับเครื่องกลึงและเครื่องกัด. กรุงเทพมหานคร : กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2544.
- [8] ชาลี ตระการกุล. เทคโนโลยี CNC TECHNOLOGY. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2550.
- [9] Juneja, L., and Sekhon, G.S. Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools. India : Delhi, 2003.
- [10] Nihon, K.K. JIS Handbook 1989 Tools. Japan : The Association, 1989.
- [11] ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์และคนอื่นๆ. การสีกหอบ ในงานอุตสาหกรรม ความรู้เบื้องต้นและการป้องกัน. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2547.
- [12] อติศักดิ์ พงษ์กุลผลศักดิ์. การควบคุมคุณภาพ QUALITY CONTROL. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพฯ, 2535.
- [13] กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. หลักการการควบคุมคุณภาพ Principles of Quality Control. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2550.

- [14] วรมัน โบริธาณินทร์. Development of Intelligent SPC Software. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549
- [15] Dhar, N.R., Kamruzzaman, M., and Mahiuddin A. Effect of minimum quantity  
lubricant (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel.  
Journal of Materials Processing Technology Vol. 172 (2006) : 299-304.
- [16] Dhar, N.R., Islam, M.W., Mahiuddin, A., and Mithu, H. The influence of minimum  
quantity lubricant (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy  
in turning AISI-1040 steel. Journal of Materials Processing Technology Vol. 171  
(2006) : 93-99.
- [17] Seah, K.H.W., Li, X., and Lee, K.S. The effect of applying coolant on tool wear in  
metal machining. Journal of Materials Processing Technology Vol. 48 (1995) :  
495-501.
- [18] Fnides, B., Aouici, H., and Yallese, M.A. Cutting forces and surface roughness in  
hard turning of hot work steel X38CrMoV5-1 using mixed ceramic. MECHANIKA  
Vol.2(70) (2008) : 73-78.
- [19] Huang, L., and Chen, J.C. A Multiple Regression Model to Predict In-process  
Surface Roughness in Turning Operation Via Accelerometer. Journal of Industrial  
Technology Volume 17(2) (2001) : 2-8.
- [20] Kirby, E.D., Zhang, Z., and Chen, J.C. Development of an Accelerometer-Based  
Surface Roughness Prediction System in Turning Operations Using Multiple  
Regression Techniques Journal of Industrial Technology Volume 20(4) (2004) :  
2-8.
- [21] Ozel, T., Karpat, Y., Figueira, L., Paulo Davim, J. Modelling of surface finish and tool  
flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts. Journal of  
Materials Processing Technology Vol.189 (2007) : 192–198.
- [22] Feng, C.X. and Wang, X.F. Surface roughness predictive modeling: neural networks  
versus regression, IIE Transactions Vol. 35 (2003) : 11-17.

- [23] Somkiat, T. Development of Intelligent Identification of Cutting States by Spectrum Analysis for CNC turning. Journal of Advanced Mechanical Design, System, and Manufacturing Vol.2(3) (2008) : 366-377.
- [24] Moriwaki, T., Somkiat, T., and Shibasaka, T. Development of intelligent monitoring and optimization of cutting process for CNC turning. International Journal of Computer Integrated Manufacturing Vol. 9(5) (2006) : 473-480.
- [25] Moriwaki, T., Shibasaka, T., and Somkiat, T. Development of in-process tool wear monitoring system for CNC turning. International Journal of Japan Society of Mechanical Engineers Vol. 47(3) (2004) : 933-938.
- [26] Tangjitsitcharoen S., Arayaphitaya S., and Thongprasert S. In-Process Monitoring and Prediction of Surface Roughness on CNC Turning by using Response Surface Analysis. Proceeding of the 36th International MATADOR Conference (2010) : 213-216.

ภาคผนวก

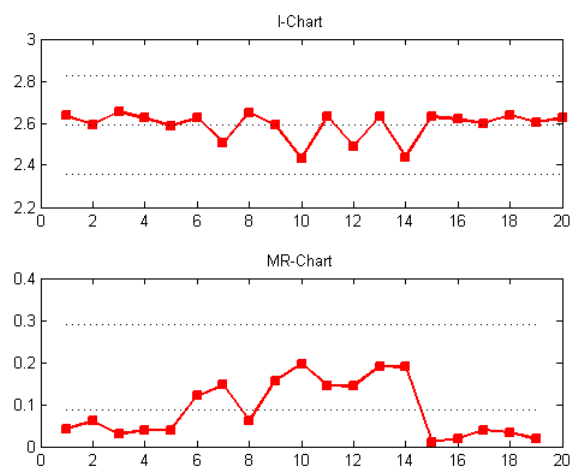
ภาคผนวก ก  
ตารางข้อมูลสำหรับคำนวณค่าขีดจำกัดควบคุม



ภาคผนวก ก เป็นข้อมูลสำหรับการหาค่าขีดจำกัดควบคุมบนของ I-MR Chart เพื่อนำไปใส่ในระบบตรวจติดตามที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับการควบคุมค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการตัดจริง โดยจะนำค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่วัดได้จากเครื่องวัดความขรุขระผิวทั้ง 32 เจ็อนไซดั่งตารางที่ 3.2 โดยใช้เจ็อนไซละ 20 ข้อมูลในการคำนวณหาค่าขีดจำกัดควบคุมบน

ตัวอย่าง 0: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	2.635
2	2.593
3	2.654
4	2.625
5	2.586
6	2.625
7	2.505
8	2.651
9	2.590
10	2.434
11	2.631
12	2.486
13	2.630
14	2.440
15	2.629
16	2.619
17	2.600
18	2.639
19	2.605
20	2.623

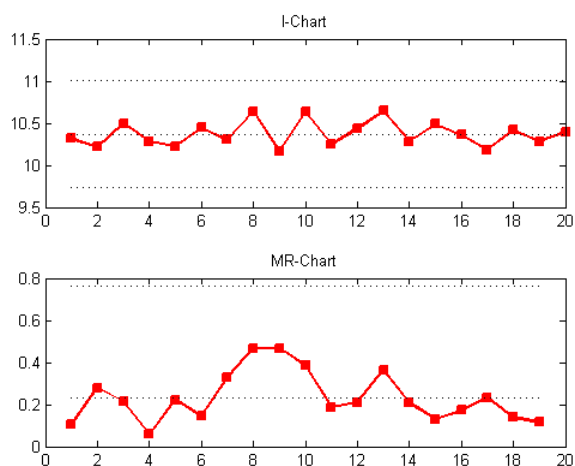


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 2.8248  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.2886  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 0: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	11.181
2	11.395
3	11.115
4	11.530
5	11.319
6	11.181
7	11.297
8	11.258
9	11.332
10	11.063
11	11.179
12	11.345
13	11.218
14	11.543
15	11.300
16	11.146
17	11.387
18	11.123
19	11.530
20	11.085

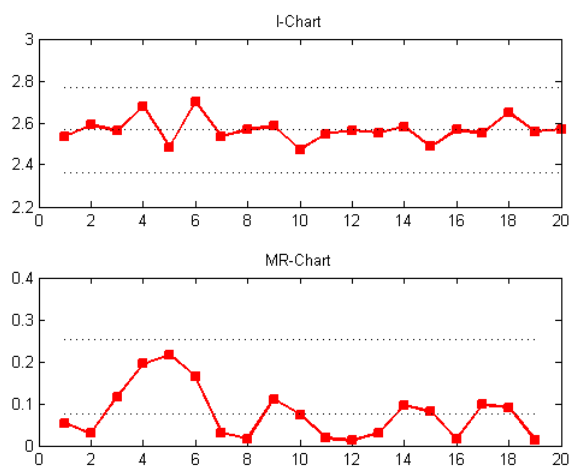


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 11.8794  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.7300  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 1: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	2.536
2	2.590
3	2.561
4	2.678
5	2.483
6	2.700
7	2.536
8	2.567
9	2.583
10	2.472
11	2.546
12	2.564
13	2.552
14	2.582
15	2.486
16	2.567
17	2.550
18	2.648
19	2.558
20	2.571

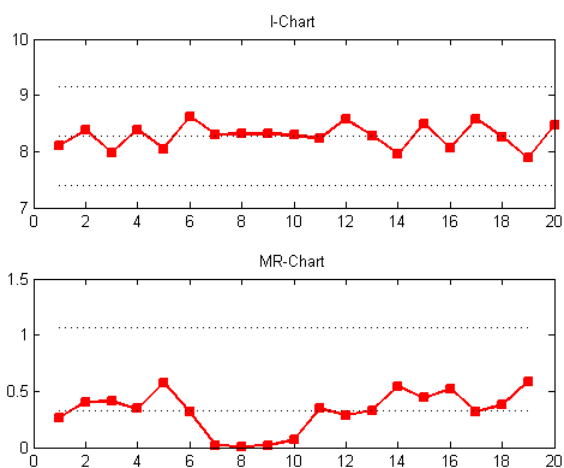


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 2.7712  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.2516  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 1: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	8.114
2	8.378
3	7.974
4	8.385
5	8.042
6	8.617
7	8.298
8	8.317
9	8.310
10	8.293
11	8.226
12	8.573
13	8.284
14	7.952
15	8.498
16	8.054
17	8.578
18	8.258
19	7.880
20	8.463

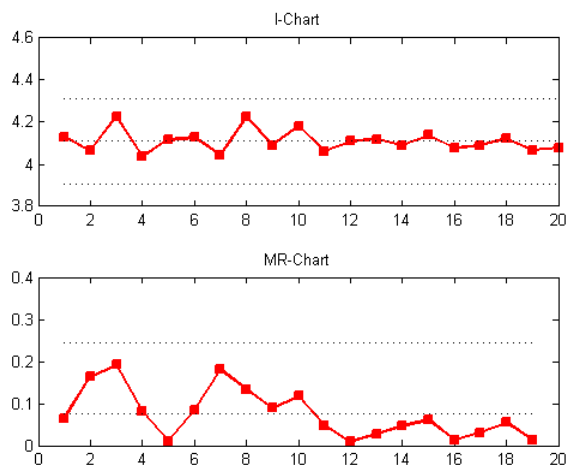


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 9.1542  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 1.0645  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 2: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	4.130
2	4.065
3	4.228
4	4.036
5	4.117
6	4.127
7	4.043
8	4.224
9	4.091
10	4.180
11	4.062
12	4.110
13	4.119
14	4.091
15	4.138
16	4.077
17	4.090
18	4.121
19	4.066
20	4.080

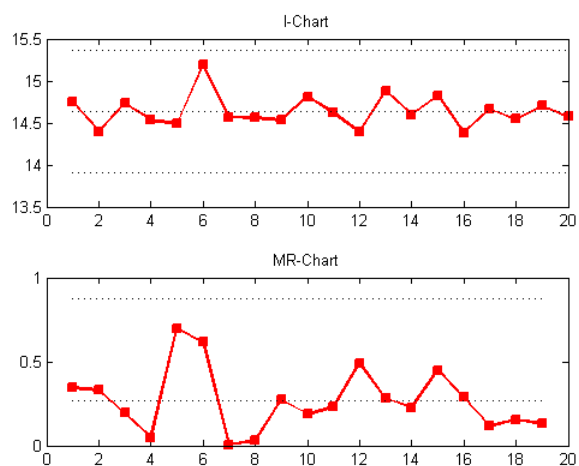


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 4.3118  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.2446  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 2: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	14.745
2	14.399
3	14.729
4	14.535
5	14.487
6	15.186
7	14.571
8	14.564
9	14.535
10	14.808
11	14.619
12	14.390
13	14.880
14	14.598
15	14.825
16	14.378
17	14.664
18	14.547
19	14.702
20	14.572

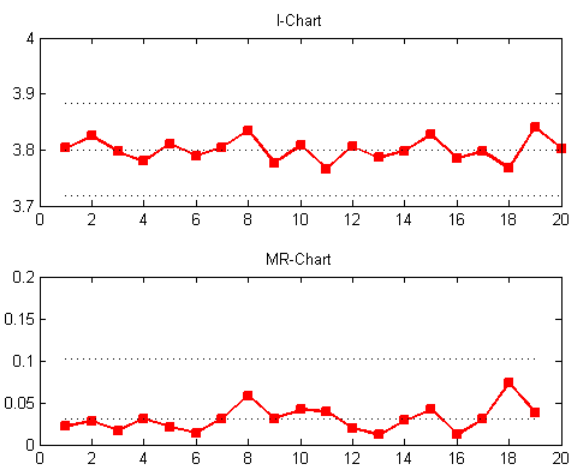


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 15.3604  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.8760  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 3: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	3.803
2	3.825
3	3.797
4	3.780
5	3.811
6	3.790
7	3.804
8	3.835
9	3.777
10	3.808
11	3.766
12	3.806
13	3.786
14	3.798
15	3.827
16	3.785
17	3.797
18	3.767
19	3.840
20	3.802



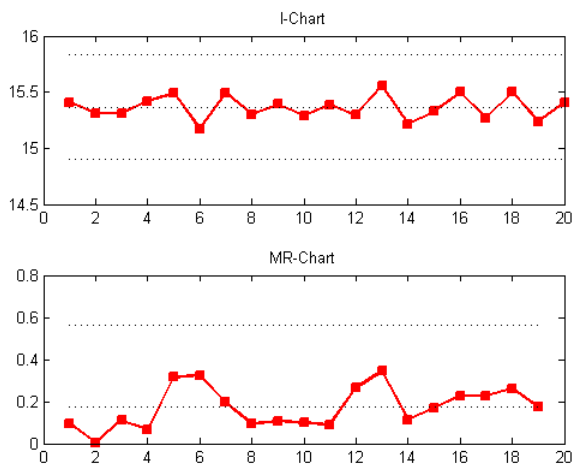
I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 3.8829  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.1017  $\mu\text{m}$



ตัวอย่าง 3: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	15.410
2	15.313
3	15.309
4	15.420
5	15.488
6	15.173
7	15.496
8	15.301
9	15.394
10	15.288
11	15.386
12	15.295
13	15.560
14	15.215
15	15.328
16	15.497
17	15.271
18	15.497
19	15.235
20	15.408

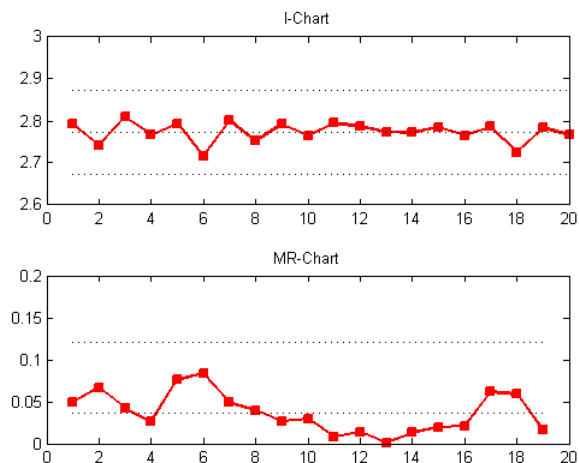


I-Chart                   ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 15.8303 µm

MR-Chart                ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.5642 µm

ตัวอย่าง 4: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	2.792
2	2.742
3	2.809
4	2.767
5	2.793
6	2.717
7	2.801
8	2.752
9	2.792
10	2.765
11	2.795
12	2.787
13	2.773
14	2.772
15	2.785
16	2.765
17	2.786
18	2.724
19	2.783
20	2.767

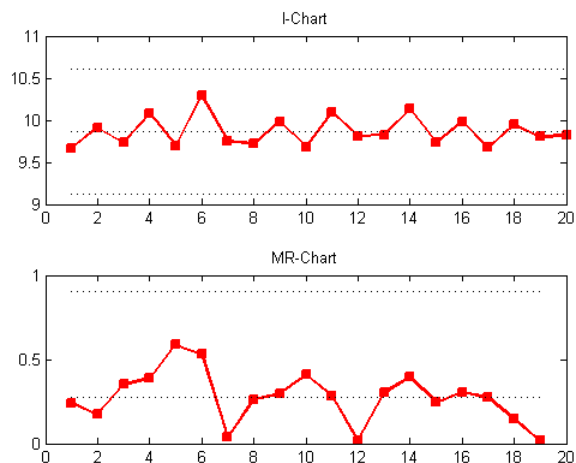


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 2.8735  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.1213  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 4: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	9.665
2	9.907
3	9.733
4	10.085
5	9.698
6	10.287
7	9.757
8	9.718
9	9.980
10	9.684
11	10.092
12	9.810
13	9.827
14	10.129
15	9.734
16	9.979
17	9.674
18	9.948
19	9.803
20	9.818

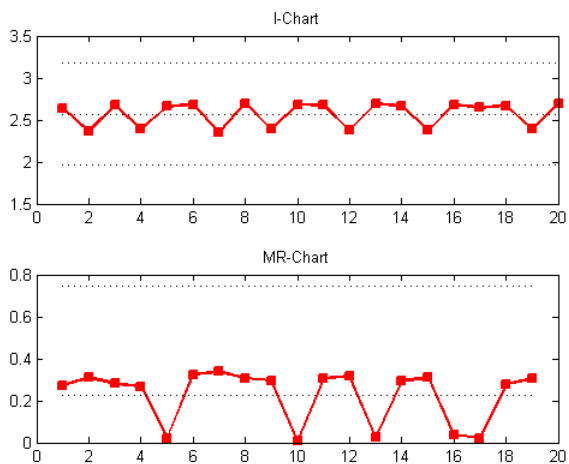


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 10.6137  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.9045  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 5: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	2.635
2	2.362
3	2.672
4	2.391
5	2.659
6	2.681
7	2.356
8	2.694
9	2.388
10	2.684
11	2.676
12	2.373
13	2.692
14	2.667
15	2.373
16	2.683
17	2.644
18	2.666
19	2.388
20	2.693

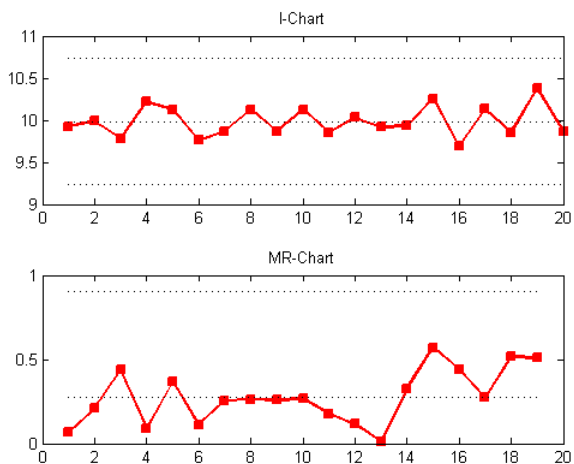


I-Chart                   ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 3.1737  $\mu\text{m}$

MR-Chart               ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.7434  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 5: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	9.922
2	9.988
3	9.779
4	10.218
5	10.126
6	9.761
7	9.871
8	10.127
9	9.863
10	10.123
11	9.856
12	10.033
13	9.917
14	9.930
15	10.257
16	9.688
17	10.129
18	9.857
19	10.373
20	9.865

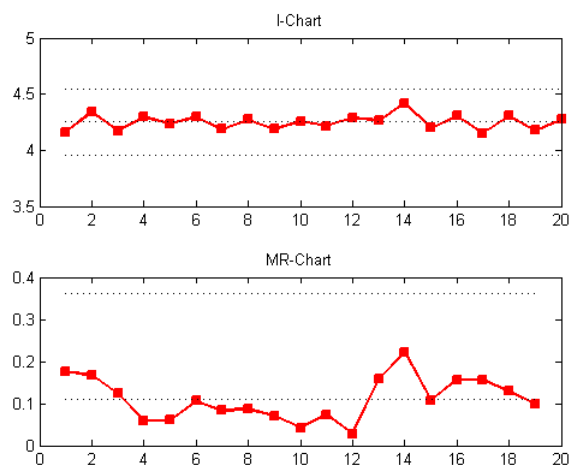


I-Chart                   ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 10.7326  $\mu\text{m}$

MR-Chart               ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.9059  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 6: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	4.163
2	4.339
3	4.172
4	4.295
5	4.236
6	4.296
7	4.190
8	4.274
9	4.187
10	4.258
11	4.216
12	4.290
13	4.262
14	4.420
15	4.198
16	4.305
17	4.148
18	4.305
19	4.176
20	4.275

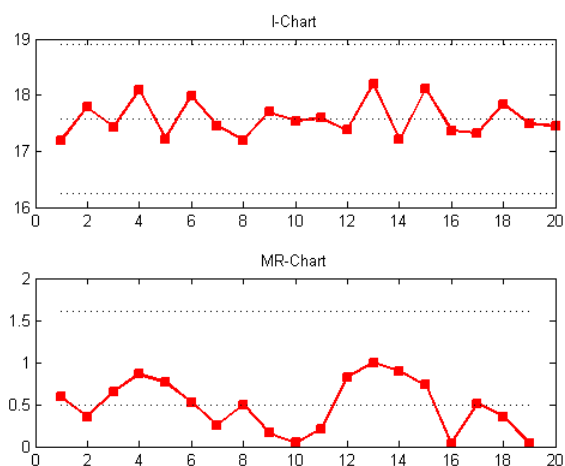


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 4.5495  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.3622  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 6: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	17.194
2	17.781
3	17.429
4	18.081
5	17.221
6	17.983
7	17.455
8	17.200
9	17.698
10	17.540
11	17.589
12	17.376
13	18.201
14	17.204
15	18.101
16	17.367
17	17.325
18	17.839
19	17.485
20	17.449

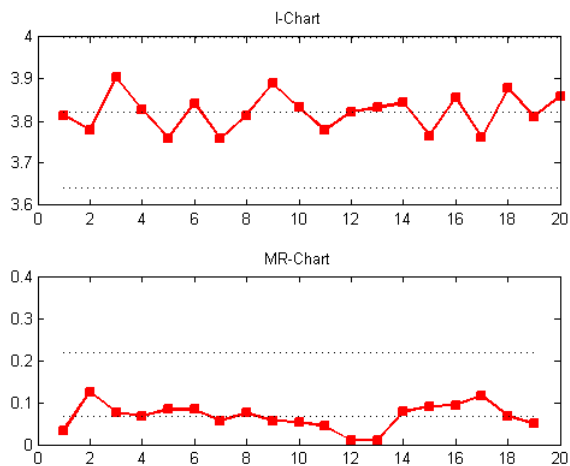


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 18.8993  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 1.6018  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 7: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	3.813
2	3.779
3	3.904
4	3.827
5	3.759
6	3.842
7	3.758
8	3.814
9	3.889
10	3.832
11	3.778
12	3.822
13	3.832
14	3.843
15	3.765
16	3.855
17	3.761
18	3.878
19	3.810
20	3.859



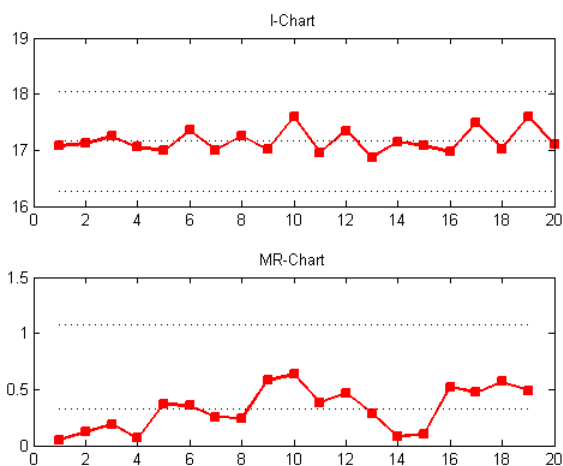
I-Chart                   ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 3.9993  $\mu\text{m}$

MR-Chart               ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.2191  $\mu\text{m}$



ตัวอย่าง 7: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	17.072
2	17.124
3	17.245
4	17.056
5	16.987
6	17.353
7	16.998
8	17.253
9	17.010
10	17.590
11	16.957
12	17.340
13	16.870
14	17.155
15	17.078
16	16.971
17	17.493
18	17.020
19	17.589
20	17.099

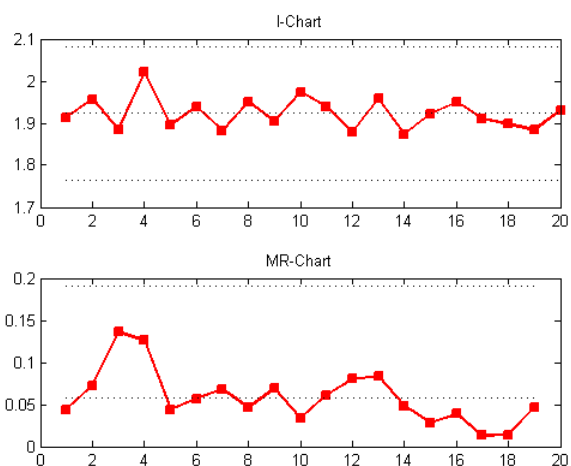


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 18.0496  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 1.0731  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 8: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	1.913
2	1.957
3	1.885
4	2.021
5	1.895
6	1.939
7	1.882
8	1.950
9	1.904
10	1.973
11	1.939
12	1.878
13	1.958
14	1.874
15	1.922
16	1.950
17	1.911
18	1.898
19	1.884
20	1.930

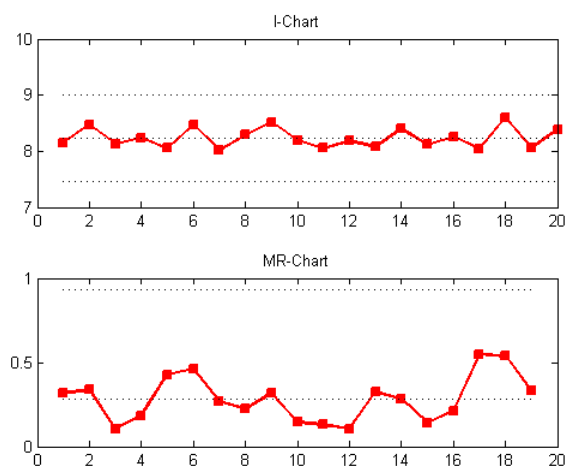


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 2.0807  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.1907  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 8: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	8.152
2	8.469
3	8.130
4	8.236
5	8.051
6	8.478
7	8.016
8	8.287
9	8.511
10	8.195
11	8.050
12	8.181
13	8.076
14	8.398
15	8.115
16	8.255
17	8.044
18	8.593
19	8.056
20	8.388

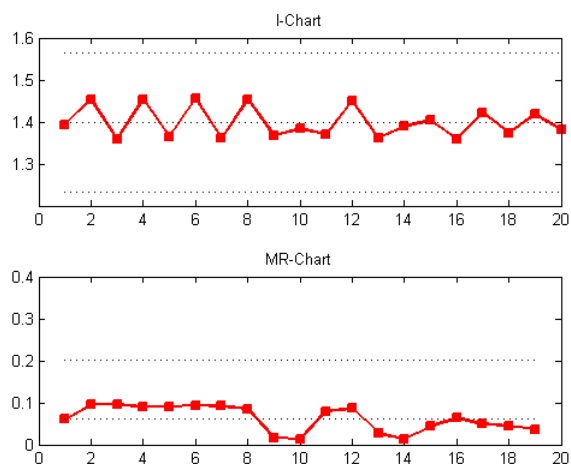


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 9.0017  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.9291  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 9: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	1.393
2	1.454
3	1.359
4	1.454
5	1.364
6	1.455
7	1.361
8	1.453
9	1.368
10	1.384
11	1.370
12	1.449
13	1.362
14	1.389
15	1.403
16	1.359
17	1.422
18	1.373
19	1.418
20	1.381

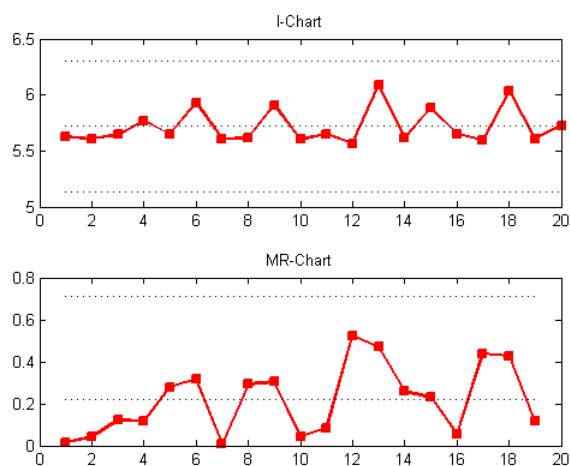


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 1.5634  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.2026  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 9: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	5.623
2	5.606
3	5.647
4	5.768
5	5.648
6	5.927
7	5.608
8	5.616
9	5.910
10	5.605
11	5.650
12	5.567
13	6.092
14	5.621
15	5.879
16	5.649
17	5.596
18	6.036
19	5.610
20	5.725

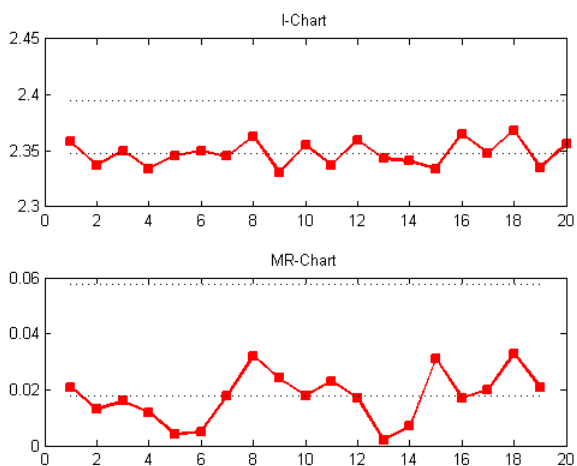


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 6.2999  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.7138  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 10: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	2.358
2	2.337
3	2.350
4	2.334
5	2.346
6	2.350
7	2.345
8	2.363
9	2.331
10	2.355
11	2.337
12	2.360
13	2.343
14	2.341
15	2.334
16	2.365
17	2.348
18	2.368
19	2.335
20	2.356

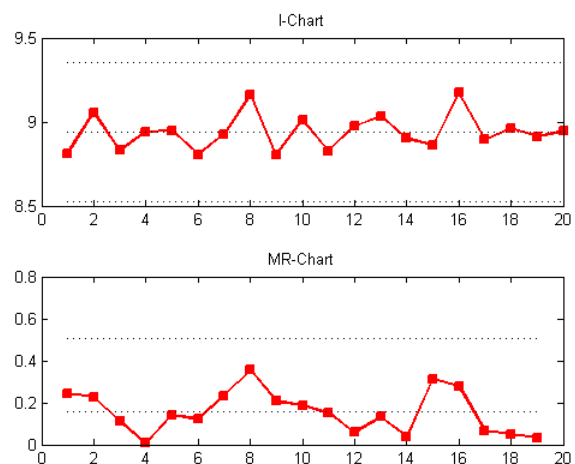


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 2.3945  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.0574  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 10: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	8.813
2	9.057
3	8.831
4	8.941
5	8.947
6	8.805
7	8.927
8	9.159
9	8.804
10	9.011
11	8.824
12	8.975
13	9.033
14	8.901
15	8.861
16	9.173
17	8.895
18	8.961
19	8.912
20	8.944

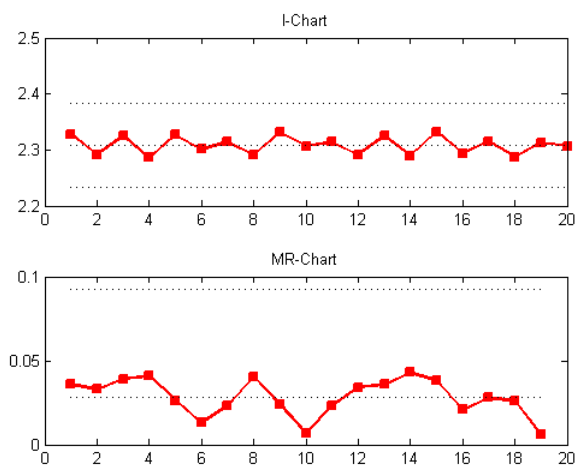


I-Chart      ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 9.3514  $\mu\text{m}$

MR-Chart      ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.5072  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 11: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	2.328
2	2.292
3	2.325
4	2.286
5	2.327
6	2.301
7	2.314
8	2.291
9	2.331
10	2.307
11	2.314
12	2.291
13	2.325
14	2.289
15	2.332
16	2.294
17	2.315
18	2.287
19	2.313
20	2.307



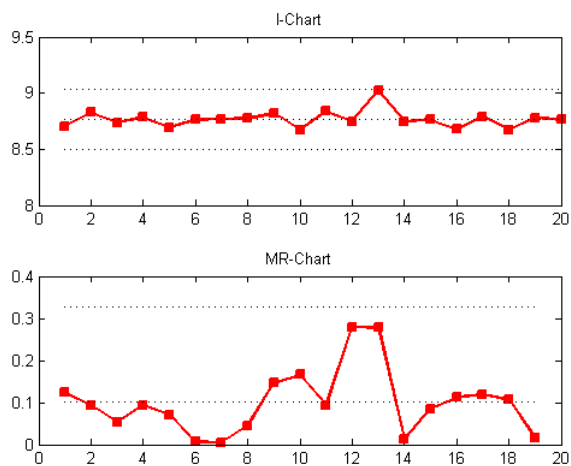
I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 2.3836  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.0924  $\mu\text{m}$



ตัวอย่าง 11: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	8.705
2	8.828
3	8.734
4	8.787
5	8.693
6	8.763
7	8.769
8	8.774
9	8.819
10	8.673
11	8.840
12	8.747
13	9.027
14	8.749
15	8.763
16	8.678
17	8.790
18	8.671
19	8.777
20	8.761

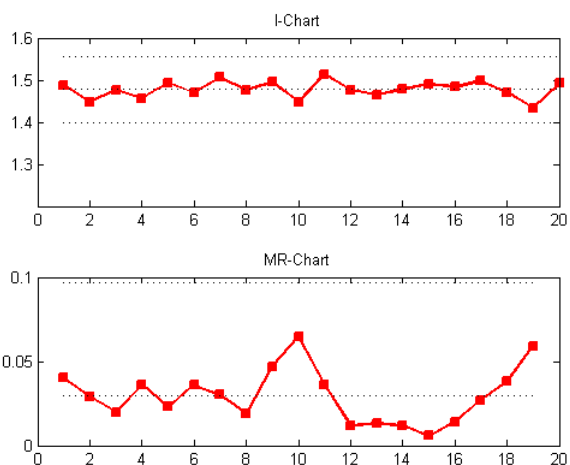


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.9341  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.3278  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 12: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	1.488
2	1.448
3	1.477
4	1.457
5	1.493
6	1.470
7	1.506
8	1.476
9	1.495
10	1.448
11	1.513
12	1.477
13	1.465
14	1.478
15	1.490
16	1.484
17	1.498
18	1.471
19	1.433
20	1.492

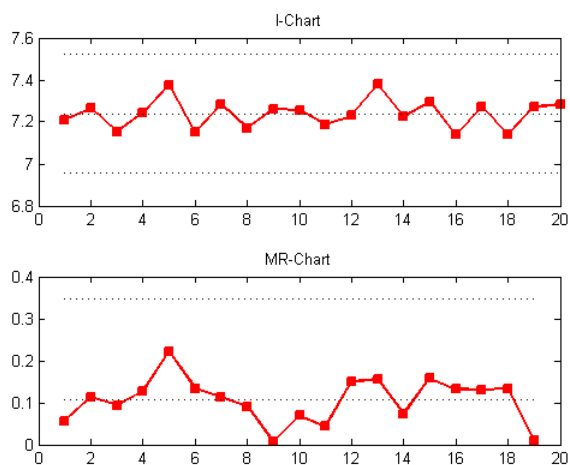


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 1.5566  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.0967  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 12: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	7.209
2	7.265
3	7.151
4	7.245
5	7.372
6	7.151
7	7.285
8	7.171
9	7.262
10	7.256
11	7.187
12	7.231
13	7.380
14	7.224
15	7.297
16	7.139
17	7.271
18	7.140
19	7.273
20	7.282

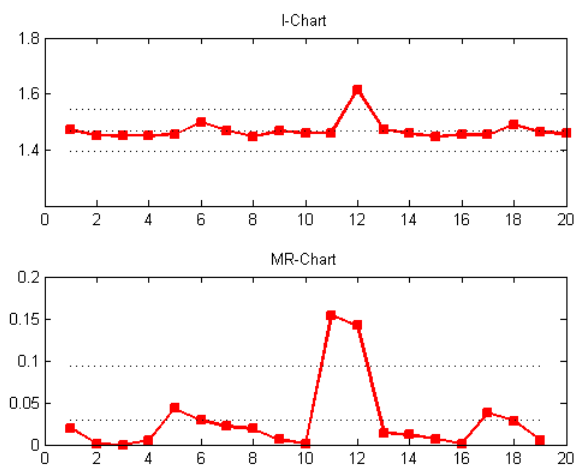


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 7.5210  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.3459  $\mu\text{m}$

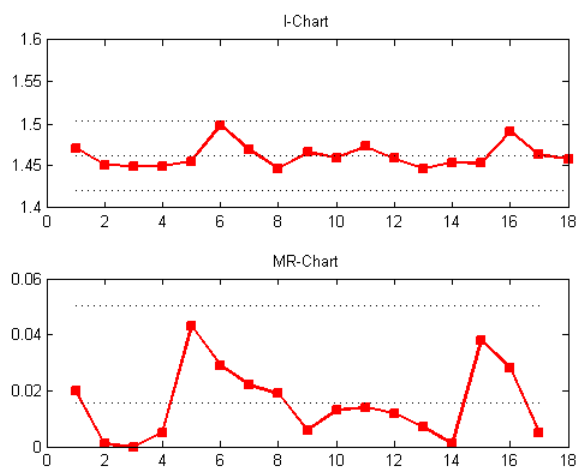
ตัวอย่าง 13: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	1.471
2	1.451
3	1.450
4	1.450
5	1.455
6	1.498
7	1.469
8	1.447
9	1.466
10	1.460
11	1.461
12	1.615
13	1.473
14	1.459
15	1.447
16	1.454
17	1.453
18	1.491
19	1.463
20	1.458



เนื่องจาก จุดที่ 11 และ 12 เกินค่าขีดจำกัดควบคุมควบคุม จึงทำการตัดข้อมูลทิ้ง

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	1.471
2	1.451
3	1.450
4	1.450
5	1.455
6	1.498
7	1.469
8	1.447
9	1.466
10	1.460
11	1.473
12	1.459
13	1.447
14	1.454
15	1.453
16	1.491
17	1.463
18	1.458

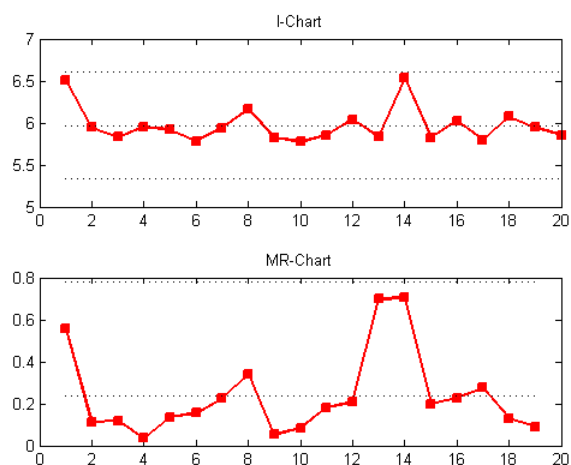


I-Chart      ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 1.5031  $\mu\text{m}$

MR-Chart    ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.0506  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 13: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	6.501
2	5.946
3	5.833
4	5.952
5	5.917
6	5.781
7	5.937
8	6.162
9	5.824
10	5.772
11	5.856
12	6.037
13	5.831
14	6.530
15	5.827
16	6.027
17	5.799
18	6.075
19	5.945
20	5.855

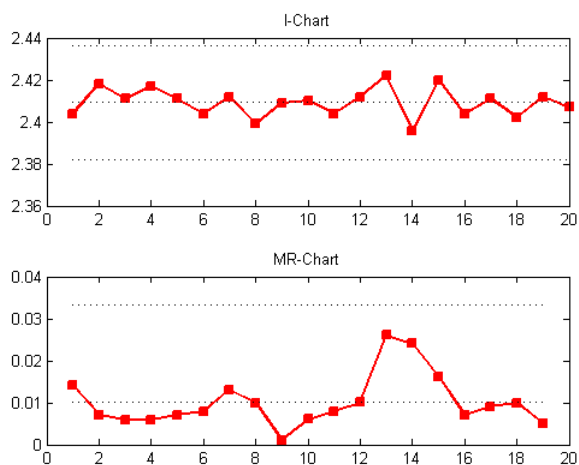


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 6.6038  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.7785  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 14: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	2.404
2	2.418
3	2.411
4	2.417
5	2.411
6	2.404
7	2.412
8	2.399
9	2.409
10	2.410
11	2.404
12	2.412
13	2.422
14	2.396
15	2.420
16	2.404
17	2.411
18	2.402
19	2.412
20	2.407

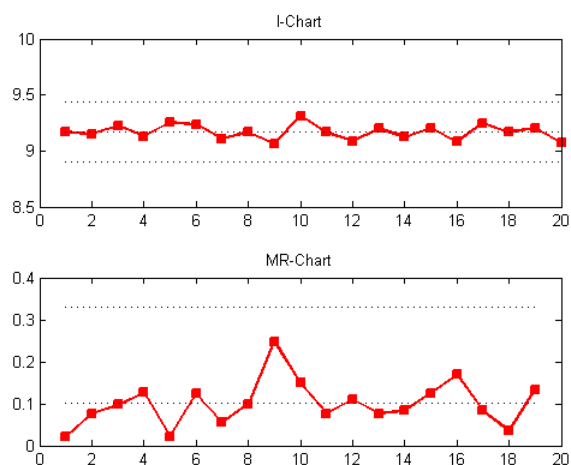


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 2.4363  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.0332  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 14: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	9.169
2	9.149
3	9.226
4	9.128
5	9.255
6	9.234
7	9.110
8	9.165
9	9.066
10	9.314
11	9.165
12	9.089
13	9.199
14	9.122
15	9.206
16	9.081
17	9.250
18	9.167
19	9.202
20	9.068



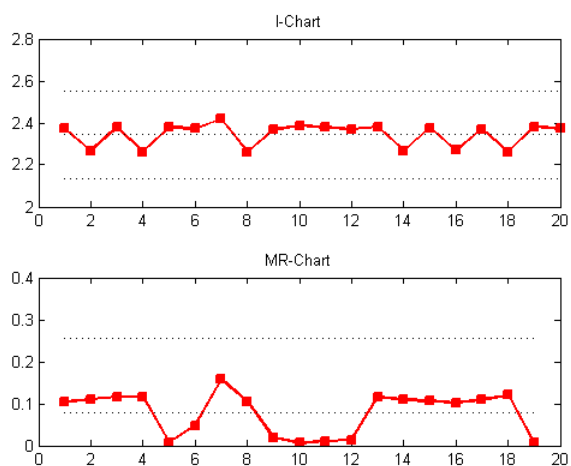
I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 9.4357  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.3287  $\mu\text{m}$



ตัวอย่าง 15: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจมูกมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	2.372
2	2.268
3	2.379
4	2.262
5	2.379
6	2.372
7	2.420
8	2.262
9	2.367
10	2.386
11	2.379
12	2.369
13	2.382
14	2.266
15	2.375
16	2.269
17	2.371
18	2.262
19	2.382
20	2.374

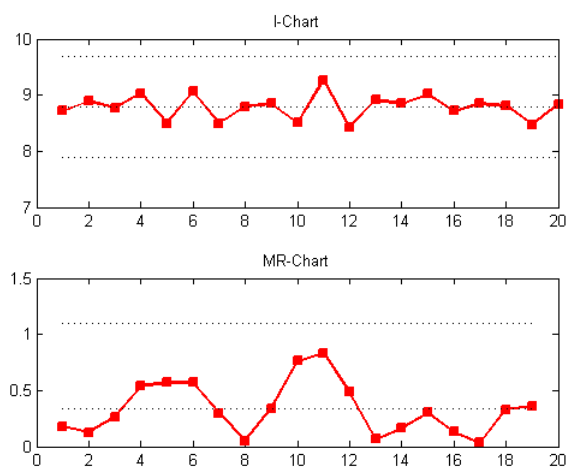


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 2.5528  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.2556  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 15: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	8.717
2	8.896
3	8.768
4	9.032
5	8.495
6	9.065
7	8.494
8	8.792
9	8.843
10	8.503
11	9.264
12	8.433
13	8.917
14	8.852
15	9.016
16	8.715
17	8.844
18	8.809
19	8.478
20	8.837

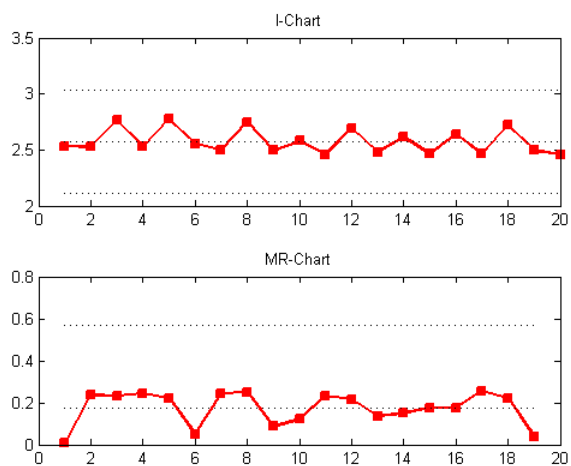


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 9.6839  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 1.1005  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 16: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	2.534
2	2.526
3	2.761
4	2.529
5	2.773
6	2.553
7	2.502
8	2.745
9	2.495
10	2.582
11	2.460
12	2.693
13	2.478
14	2.613
15	2.463
16	2.640
17	2.464
18	2.719
19	2.497
20	2.457

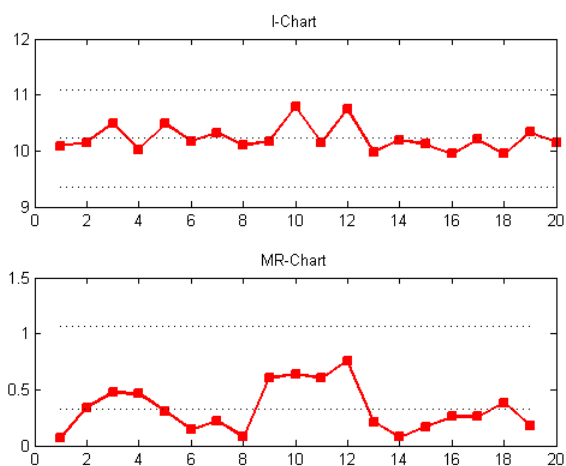


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 3.0353  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.5667  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 16: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	10.091
2	10.156
3	10.495
4	10.019
5	10.483
6	10.177
7	10.320
8	10.099
9	10.177
10	10.779
11	10.138
12	10.739
13	9.982
14	10.195
15	10.116
16	9.949
17	10.207
18	9.947
19	10.329
20	10.152

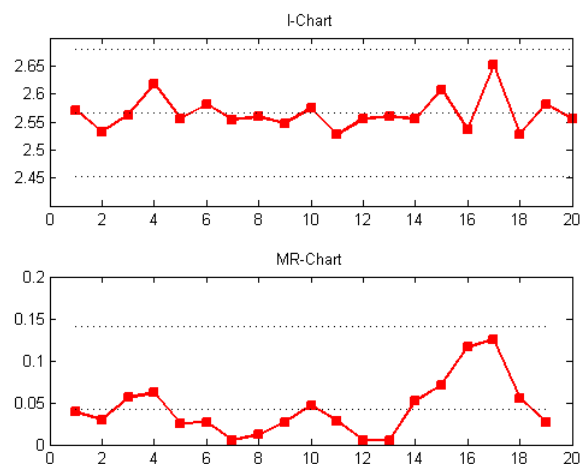


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 11.0992  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 1.0714  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 17: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	2.571
2	2.532
3	2.562
4	2.618
5	2.556
6	2.581
7	2.554
8	2.559
9	2.547
10	2.574
11	2.527
12	2.555
13	2.560
14	2.555
15	2.607
16	2.536
17	2.652
18	2.527
19	2.582
20	2.555

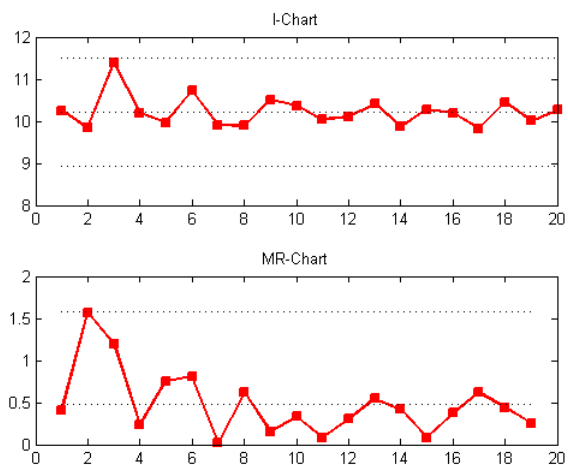


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 2.694  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.1400  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 17: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจมูกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	10.245
2	9.835
3	11.393
4	10.197
5	9.964
6	10.718
7	9.909
8	9.893
9	10.512
10	10.361
11	10.032
12	10.110
13	10.411
14	9.865
15	10.280
16	10.198
17	9.824
18	10.443
19	10.007
20	10.261

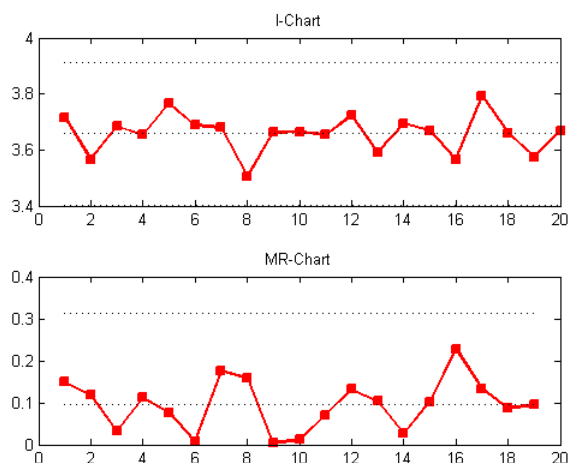


I-Chart      ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 11.5076  $\mu\text{m}$

MR-Chart      ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 1.5790  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 18: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจมูกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	3.716
2	3.567
3	3.685
4	3.653
5	3.765
6	3.688
7	3.680
8	3.504
9	3.662
10	3.665
11	3.653
12	3.723
13	3.591
14	3.694
15	3.668
16	3.566
17	3.794
18	3.660
19	3.574
20	3.669

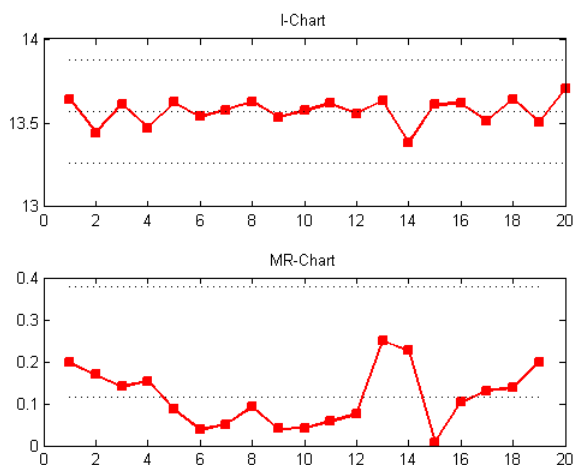


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 3.9137  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.3132  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 18: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	13.640
2	13.442
3	13.611
4	13.470
5	13.623
6	13.537
7	13.575
8	13.625
9	13.533
10	13.573
11	13.615
12	13.557
13	13.632
14	13.382
15	13.609
16	13.615
17	13.511
18	13.641
19	13.503
20	13.702



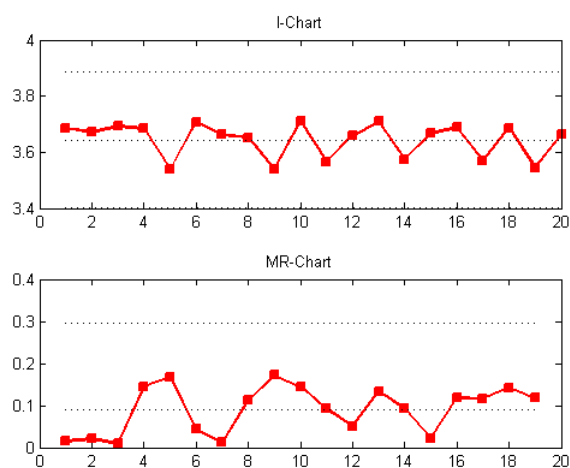
I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 13.8771  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.3777  $\mu\text{m}$



ตัวอย่าง 19: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	3.687
2	3.672
3	3.693
4	3.684
5	3.539
6	3.707
7	3.663
8	3.651
9	3.539
10	3.711
11	3.567
12	3.659
13	3.709
14	3.575
15	3.667
16	3.688
17	3.570
18	3.686
19	3.544
20	3.662

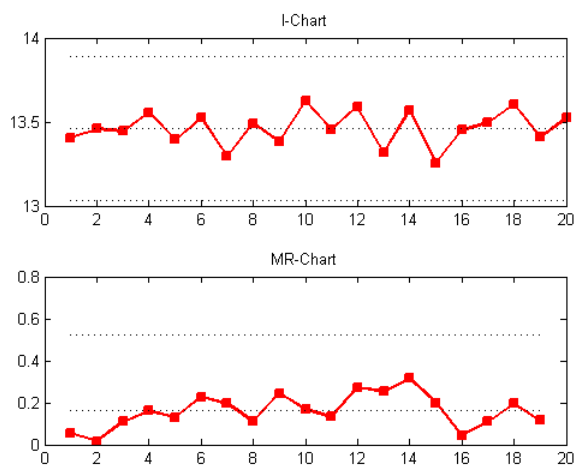


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 3.8851  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.2967  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 19: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	13.405
2	13.460
3	13.444
4	13.554
5	13.393
6	13.522
7	13.295
8	13.491
9	13.381
10	13.624
11	13.457
12	13.589
13	13.317
14	13.569
15	13.253
16	13.451
17	13.494
18	13.603
19	13.408
20	13.523

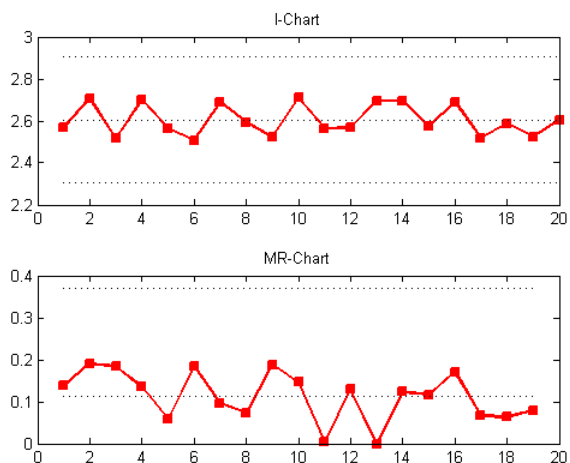


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 13.8879  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.5239  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 20: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	2.568
2	2.706
3	2.516
4	2.699
5	2.564
6	2.506
7	2.690
8	2.594
9	2.521
10	2.709
11	2.563
12	2.567
13	2.696
14	2.696
15	2.573
16	2.690
17	2.519
18	2.586
19	2.523
20	2.603

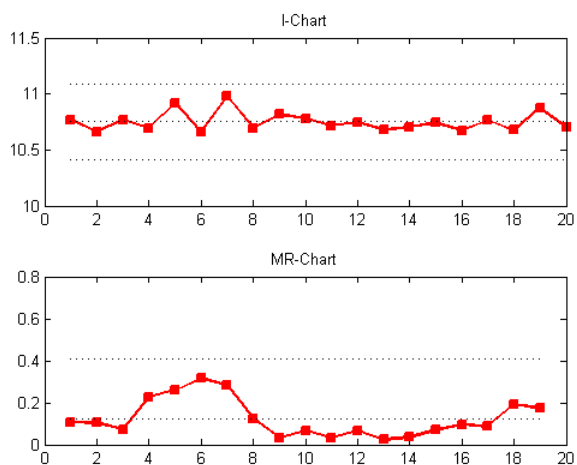


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 2.9046  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.3689  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 20: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	10.771
2	10.663
3	10.767
4	10.694
5	10.921
6	10.661
7	10.977
8	10.692
9	10.816
10	10.782
11	10.715
12	10.747
13	10.679
14	10.704
15	10.740
16	10.671
17	10.766
18	10.678
19	10.872
20	10.699

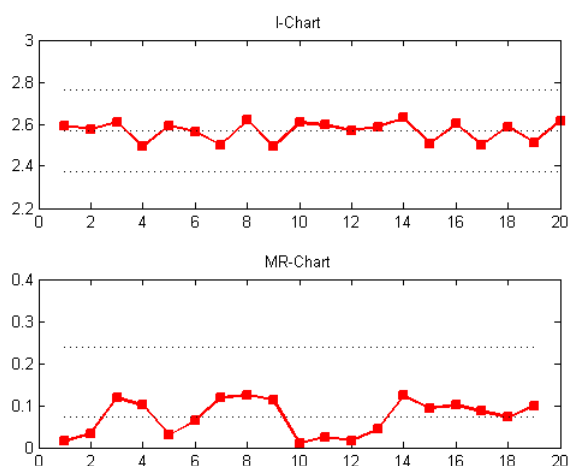


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 11.0887  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.4090  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 21: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจมูกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	2.592
2	2.577
3	2.611
4	2.493
5	2.594
6	2.564
7	2.500
8	2.618
9	2.493
10	2.606
11	2.595
12	2.570
13	2.586
14	2.630
15	2.507
16	2.601
17	2.500
18	2.586
19	2.514
20	2.614

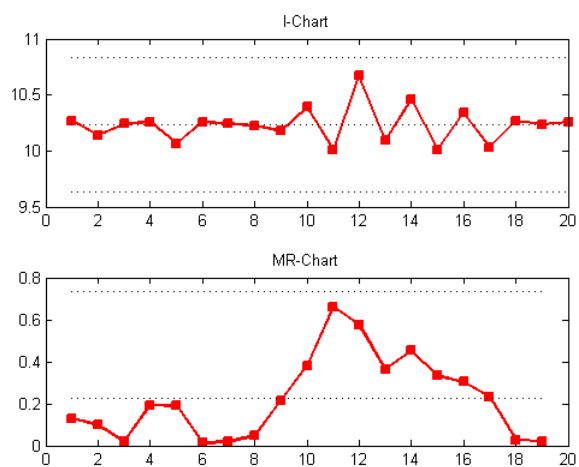


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 2.7621  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.2391  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 21: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	10.270
2	10.141
3	10.240
4	10.259
5	10.066
6	10.256
7	10.242
8	10.224
9	10.176
10	10.390
11	10.010
12	10.671
13	10.094
14	10.458
15	10.006
16	10.338
17	10.035
18	10.267
19	10.239
20	10.259

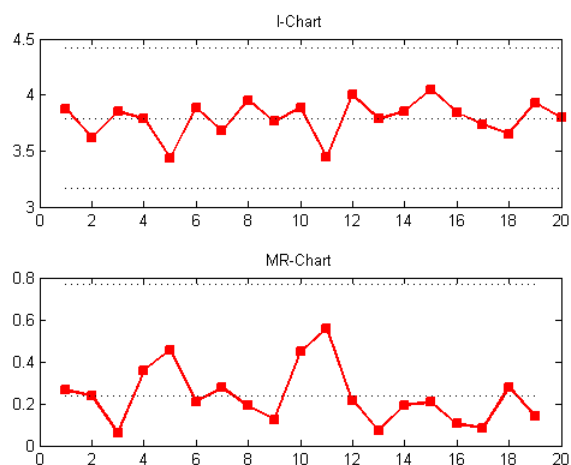


I-Chart      ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 10.8300  $\mu\text{m}$

MR-Chart      ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.7350  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 22: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจมูกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	3.874
2	3.611
3	3.849
4	3.788
5	3.431
6	3.887
7	3.676
8	3.952
9	3.763
10	3.886
11	3.440
12	4.000
13	3.785
14	3.856
15	4.048
16	3.841
17	3.738
18	3.653
19	3.932
20	3.793

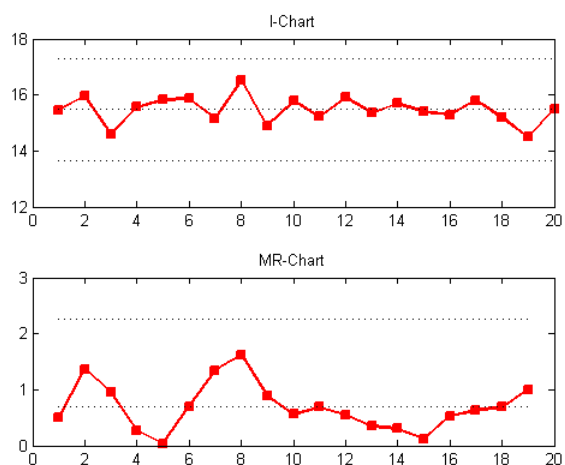


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 4.4159  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.7690  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 22: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	15.456
2	15.964
3	14.599
4	15.558
5	15.825
6	15.863
7	15.162
8	16.509
9	14.891
10	15.778
11	15.220
12	15.906
13	15.355
14	15.706
15	15.400
16	15.279
17	15.808
18	15.181
19	14.494
20	15.491



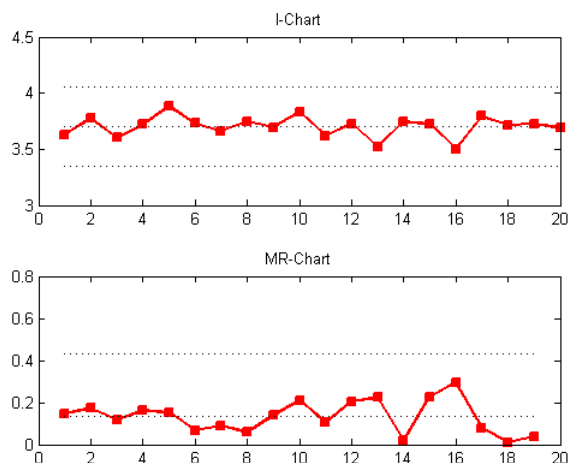
I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 17.3060  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 2.2537  $\mu\text{m}$



ตัวอย่าง 23: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจมูกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	3.629
2	3.775
3	3.601
4	3.721
5	3.882
6	3.729
7	3.661
8	3.750
9	3.691
10	3.830
11	3.619
12	3.724
13	3.520
14	3.744
15	3.725
16	3.499
17	3.794
18	3.715
19	3.726
20	3.686

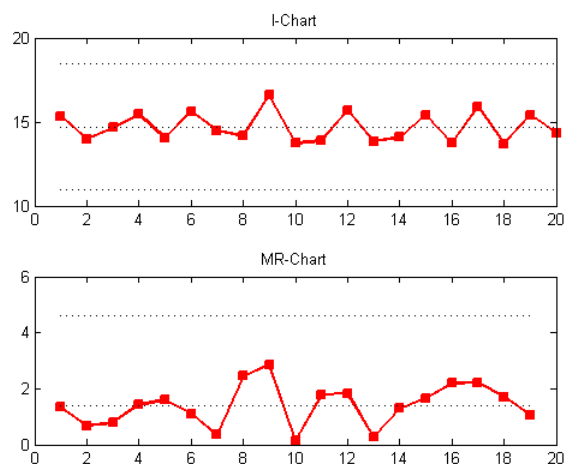


I-Chart      ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 4.0541  $\mu\text{m}$

MR-Chart      ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.4340  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 23: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	15.326
2	13.992
3	14.657
4	15.448
5	14.021
6	15.609
7	14.495
8	14.150
9	16.604
10	13.743
11	13.872
12	15.657
13	13.822
14	14.087
15	15.391
16	13.729
17	15.915
18	13.692
19	15.391
20	14.332

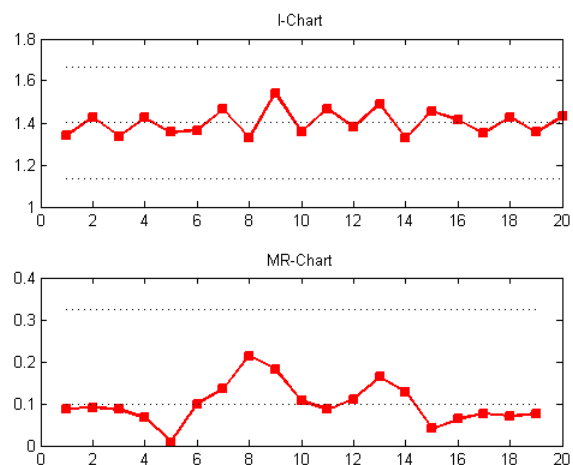


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 18.4369  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 4.5969  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 24: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	1.339
2	1.427
3	1.336
4	1.423
5	1.356
6	1.364
7	1.463
8	1.328
9	1.541
10	1.359
11	1.466
12	1.379
13	1.490
14	1.327
15	1.455
16	1.414
17	1.350
18	1.426
19	1.355
20	1.430

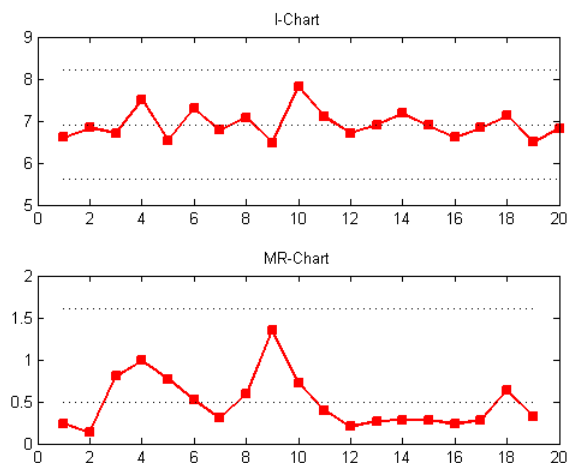


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 1.6663  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.3256  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 24: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	6.604
2	6.840
3	6.710
4	7.512
5	6.526
6	7.292
7	6.773
8	7.073
9	6.478
10	7.823
11	7.096
12	6.704
13	6.906
14	7.172
15	6.887
16	6.605
17	6.838
18	7.123
19	6.492
20	6.816

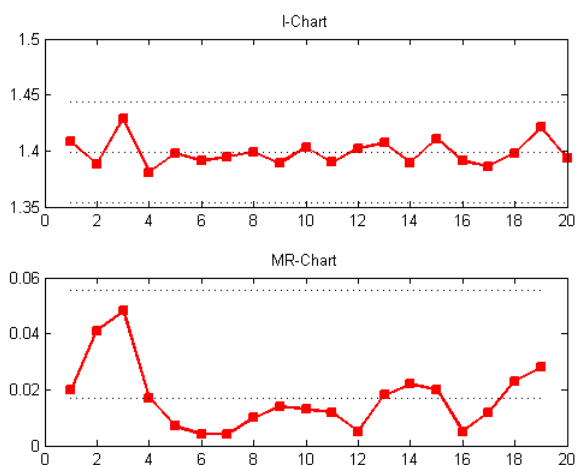


I-Chart                   ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 8.2159  $\mu\text{m}$

MR-Chart               ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 1.6006  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 25: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	1.408
2	1.388
3	1.429
4	1.381
5	1.398
6	1.391
7	1.395
8	1.399
9	1.389
10	1.403
11	1.390
12	1.402
13	1.407
14	1.389
15	1.411
16	1.391
17	1.386
18	1.398
19	1.421
20	1.393

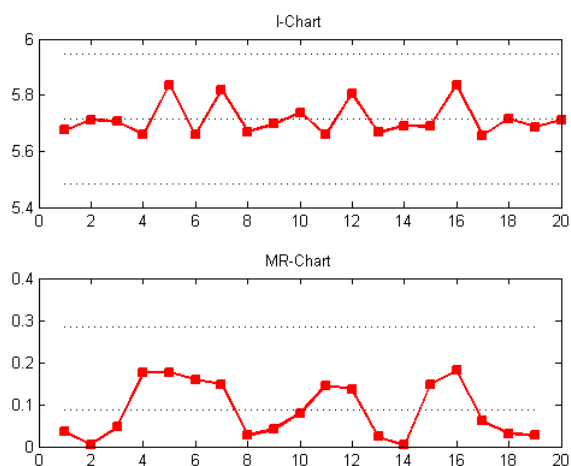


I-Chart      ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 1.4437  $\mu\text{m}$

MR-Chart      ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.0556  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 25: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	5.676
2	5.711
3	5.706
4	5.660
5	5.836
6	5.659
7	5.818
8	5.670
9	5.697
10	5.738
11	5.658
12	5.803
13	5.667
14	5.691
15	5.688
16	5.836
17	5.656
18	5.716
19	5.685
20	5.711

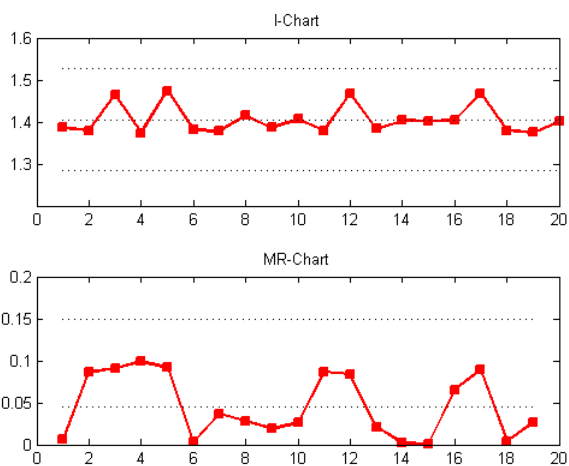


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 5.9446  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.2833  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 26: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	1.386
2	1.379
3	1.465
4	1.374
5	1.473
6	1.381
7	1.378
8	1.415
9	1.387
10	1.406
11	1.380
12	1.467
13	1.383
14	1.404
15	1.402
16	1.403
17	1.468
18	1.379
19	1.375
20	1.401

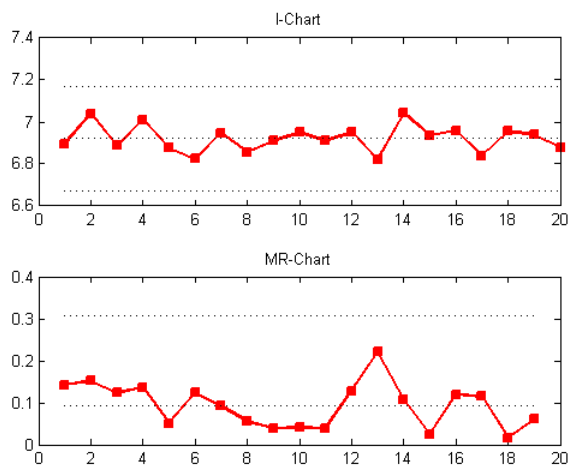


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 1.5266  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.1491  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 26: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	6.897
2	7.039
3	6.887
4	7.011
5	6.875
6	6.824
7	6.948
8	6.856
9	6.911
10	6.951
11	6.910
12	6.949
13	6.821
14	7.042
15	6.935
16	6.959
17	6.840
18	6.955
19	6.939
20	6.879



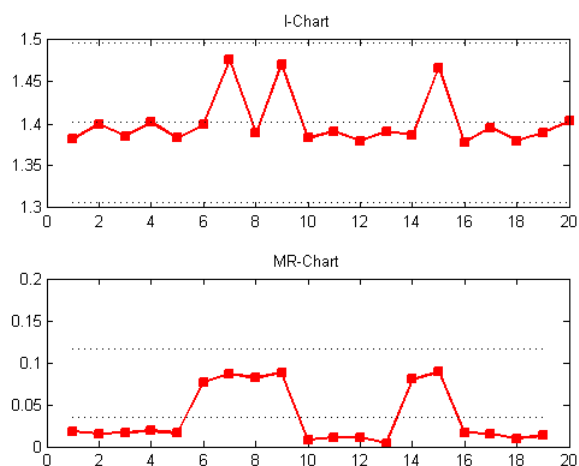
I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 7.1713  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.3072  $\mu\text{m}$



ตัวอย่าง 27: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	1.382
2	1.400
3	1.385
4	1.402
5	1.383
6	1.399
7	1.476
8	1.389
9	1.471
10	1.383
11	1.391
12	1.380
13	1.391
14	1.387
15	1.467
16	1.378
17	1.395
18	1.380
19	1.390
20	1.403

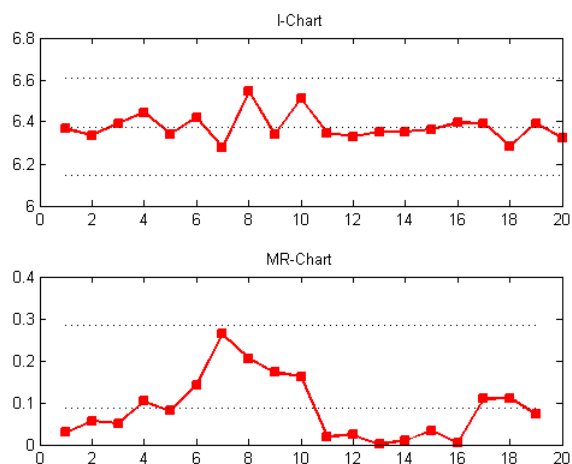


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 1.4963  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.1164  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 27: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	6.366
2	6.337
3	6.393
4	6.444
5	6.341
6	6.422
7	6.280
8	6.543
9	6.338
10	6.510
11	6.348
12	6.329
13	6.353
14	6.354
15	6.364
16	6.397
17	6.393
18	6.284
19	6.394
20	6.322

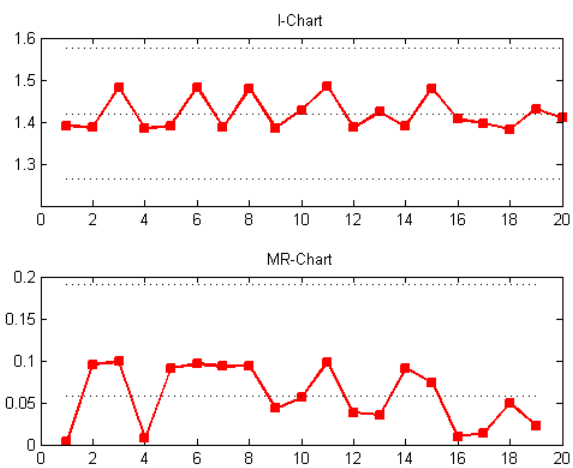


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 6.6060  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.2831  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 28: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	1.391
2	1.387
3	1.482
4	1.383
5	1.391
6	1.482
7	1.386
8	1.479
9	1.385
10	1.428
11	1.484
12	1.386
13	1.424
14	1.389
15	1.480
16	1.406
17	1.396
18	1.382
19	1.431
20	1.409

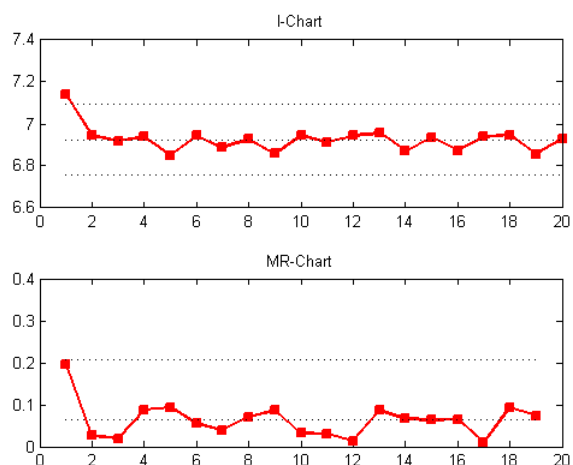


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 1.5744  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.1909  $\mu\text{m}$

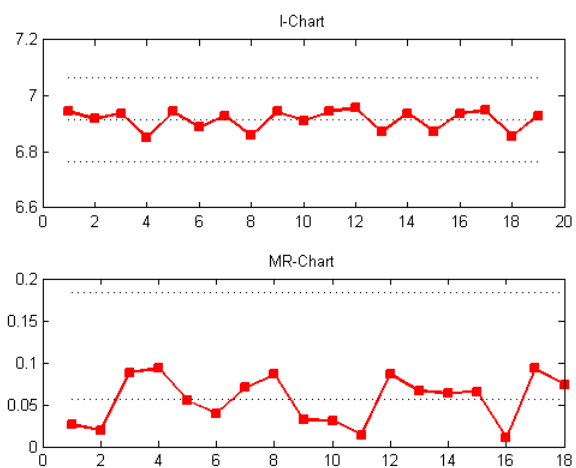
ตัวอย่าง 28: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	7.140
2	6.944
3	6.918
4	6.938
5	6.850
6	6.943
7	6.888
8	6.928
9	6.858
10	6.944
11	6.912
12	6.943
13	6.957
14	6.871
15	6.937
16	6.873
17	6.938
18	6.948
19	6.855
20	6.929



เนื่องจาก จุดที่ 1 เกินค่าขีดจำกัดควบคุมควบคุม จึงทำการตัดข้อมูลทิ้ง

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	6.944
2	6.918
3	6.938
4	6.850
5	6.943
6	6.888
7	6.928
8	6.858
9	6.944
10	6.912
11	6.943
12	6.957
13	6.871
14	6.937
15	6.873
16	6.938
17	6.948
18	6.855
19	6.929

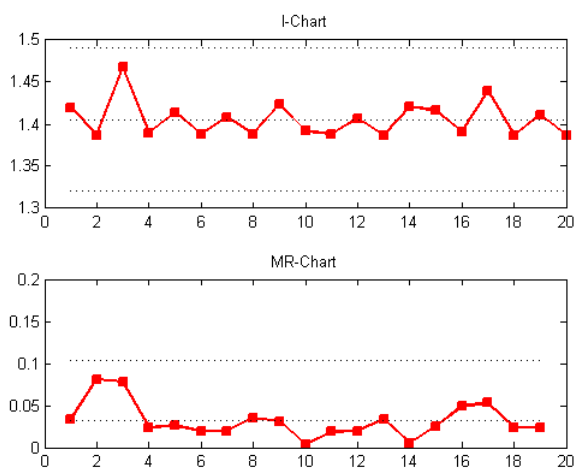


I-Chart      ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 7.0641  $\mu\text{m}$

MR-Chart    ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.1839  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 29: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	1.420
2	1.387
3	1.468
4	1.390
5	1.414
6	1.388
7	1.408
8	1.388
9	1.423
10	1.392
11	1.388
12	1.407
13	1.387
14	1.421
15	1.416
16	1.391
17	1.440
18	1.387
19	1.411
20	1.387

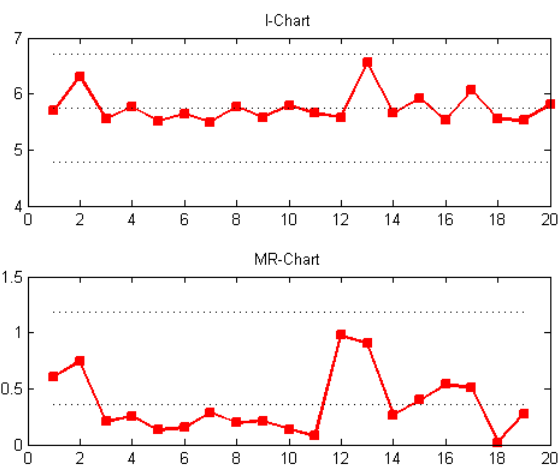


I-Chart      ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 1.4903  $\mu\text{m}$

MR-Chart    ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.1041  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 29: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	5.698
2	6.304
3	5.562
4	5.767
5	5.514
6	5.644
7	5.492
8	5.777
9	5.579
10	5.793
11	5.658
12	5.579
13	6.554
14	5.652
15	5.919
16	5.522
17	6.059
18	5.551
19	5.532
20	5.806

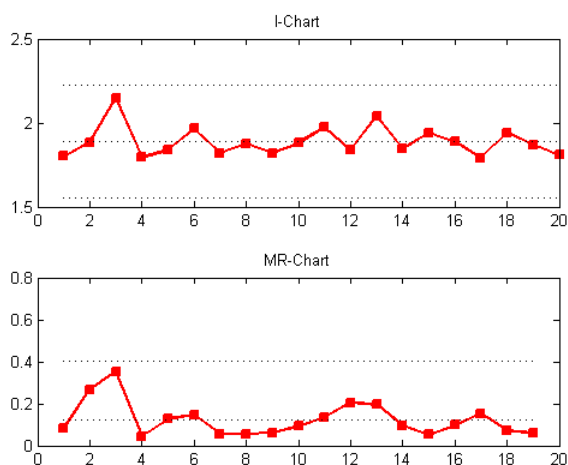


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 6.7107  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 1.1830  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 30: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	1.801
2	1.883
3	2.149
4	1.795
5	1.839
6	1.965
7	1.819
8	1.876
9	1.820
10	1.881
11	1.973
12	1.838
13	2.041
14	1.845
15	1.940
16	1.888
17	1.790
18	1.942
19	1.869
20	1.810



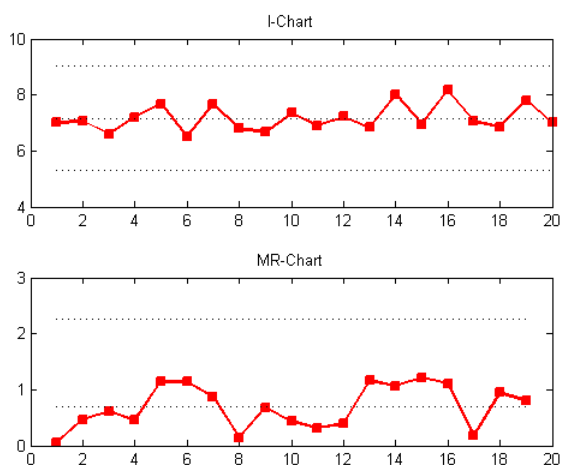
I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 2.2217  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.4037  $\mu\text{m}$



ตัวอย่าง 30: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	7.007
2	7.063
3	6.598
4	7.211
5	7.666
6	6.528
7	7.667
8	6.792
9	6.663
10	7.348
11	6.912
12	7.232
13	6.846
14	8.009
15	6.940
16	8.161
17	7.048
18	6.858
19	7.804
20	7.010

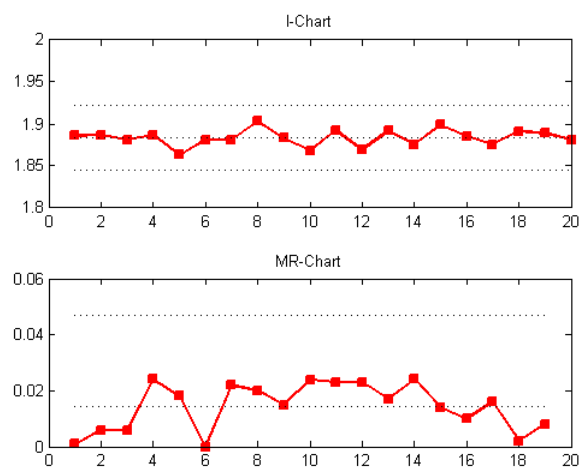


I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 9.0145  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 2.2692  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 31: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย	
1	1.886
2	1.887
3	1.881
4	1.887
5	1.863
6	1.881
7	1.881
8	1.903
9	1.883
10	1.868
11	1.892
12	1.869
13	1.892
14	1.875
15	1.899
16	1.885
17	1.875
18	1.891
19	1.889
20	1.881

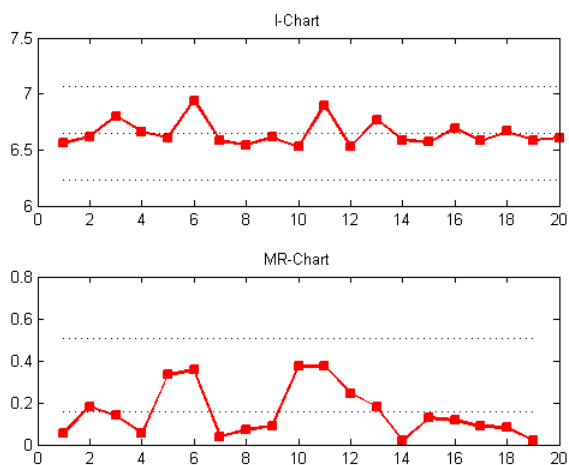


I-Chart      ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 1.9222  $\mu\text{m}$

MR-Chart      ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.0470  $\mu\text{m}$

ตัวอย่าง 31: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจมูกมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

ค่าความขรุขระผิวสูงสุด	
1	6.562
2	6.618
3	6.800
4	6.662
5	6.607
6	6.940
7	6.583
8	6.545
9	6.615
10	6.525
11	6.898
12	6.526
13	6.769
14	6.589
15	6.570
16	6.696
17	6.581
18	6.669
19	6.587
20	6.608



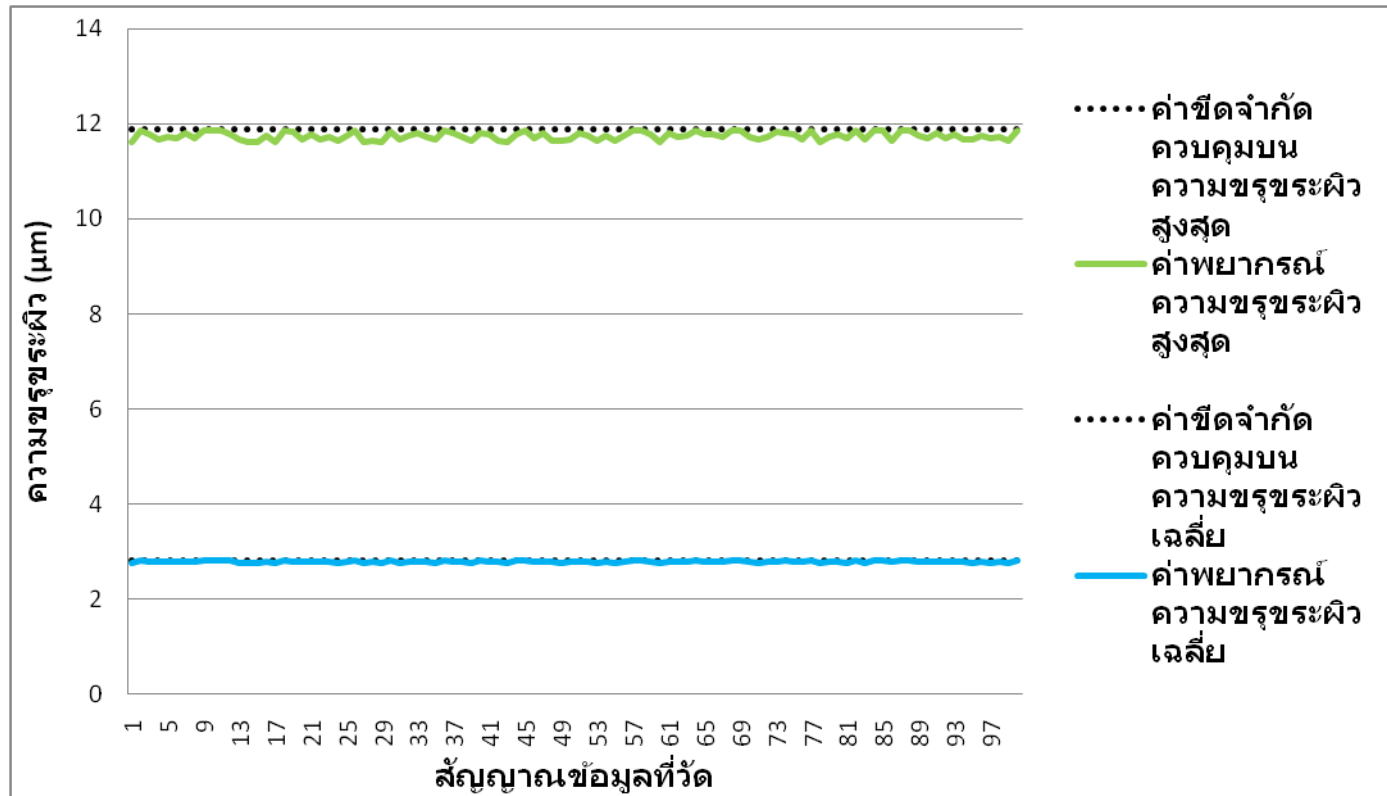
I-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 7.0650  $\mu\text{m}$

MR-Chart ค่าขีดจำกัดควบคุมบน: 0.5053  $\mu\text{m}$

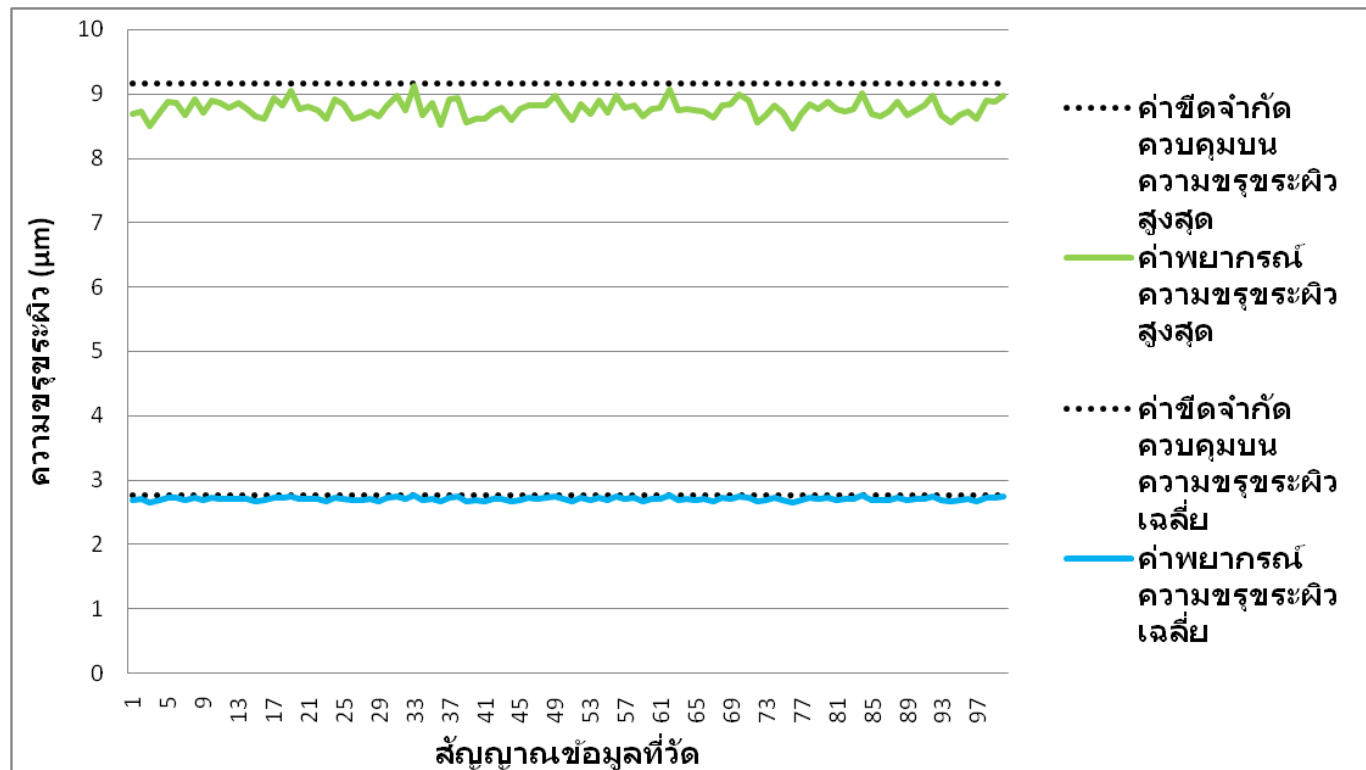
ภาคผนวก ข  
ผลการทดลอง

ภาคผนวก ข เป็นข้อมูลค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดที่ได้จากระบบการตรวจติดตามร่วมกับการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ(SPC) สำหรับค่าความขรุขระผิวชิ้นงานบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี ในขณะที่ตัดจริงทั้ง 32 เงื่อนไขดังตารางที่ 3.2 เงื่อนไขละ 100 สัญญาณข้อมูล โดยทำการการแสดงผลเปรียบเทียบกับ ค่าขีดจำกัดควบคุมบนของทั้ง 32 เงื่อนไขดังตารางที่ 4.1

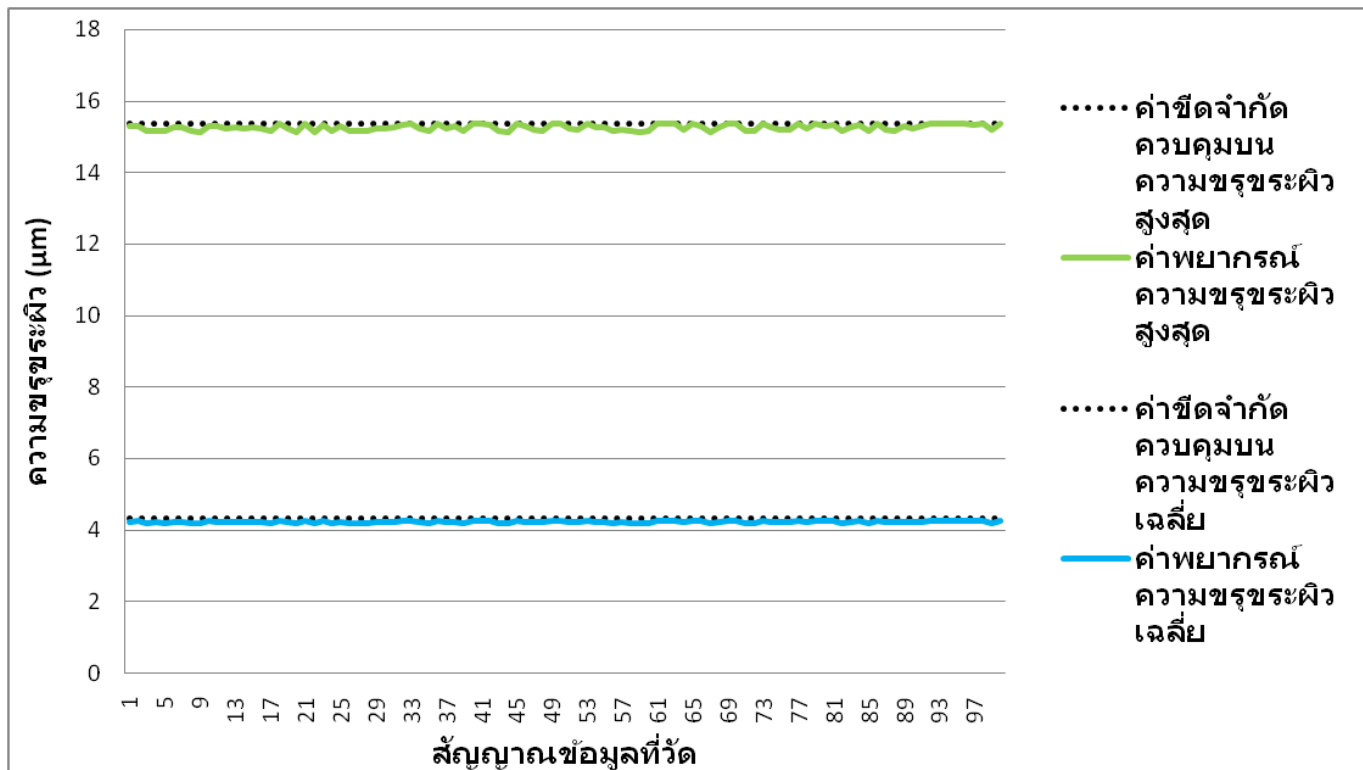
ตัวอย่าง 0: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร  
 วัสดุมีจุมมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



ตัวอย่าง 1: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร  
 รัศมีจุ่มมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

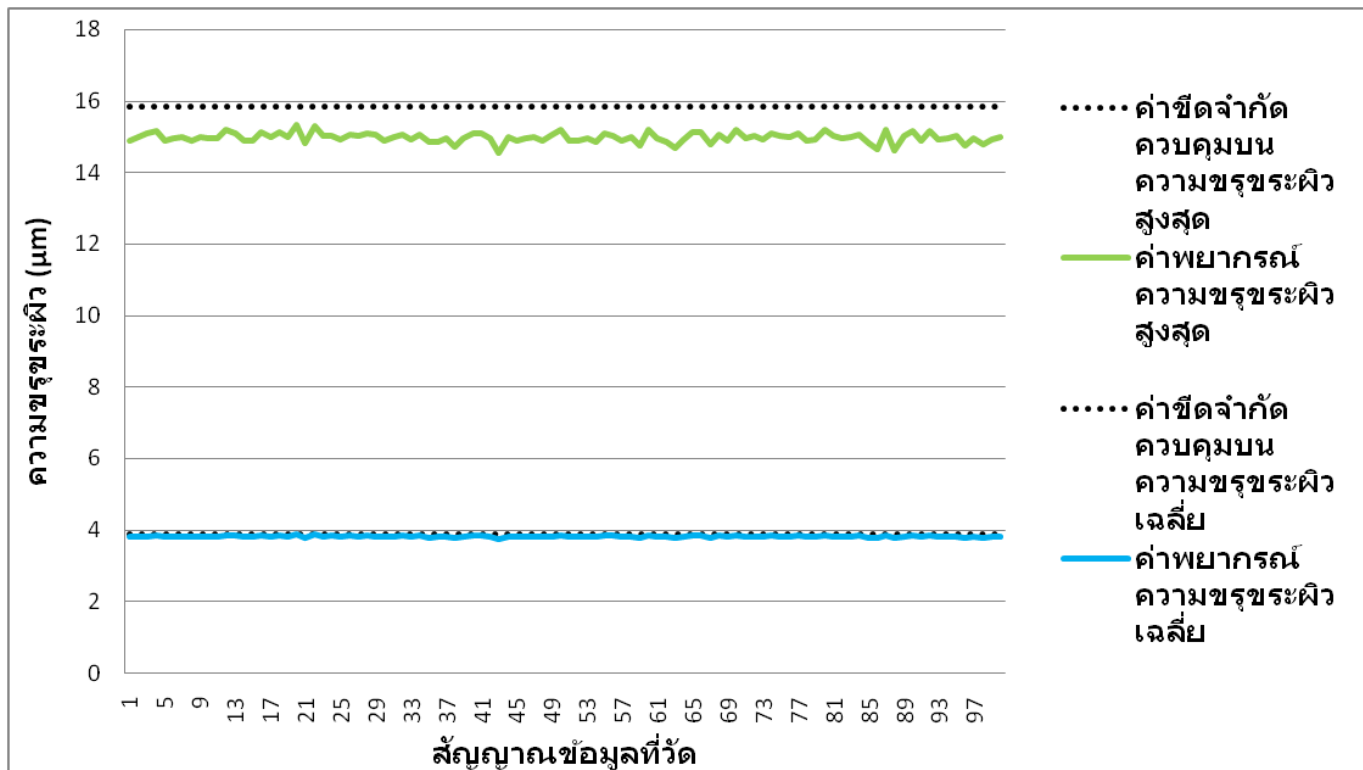


ตัวอย่าง 2: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.4 มิลลิเมตร  
 รัศมีจมูกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

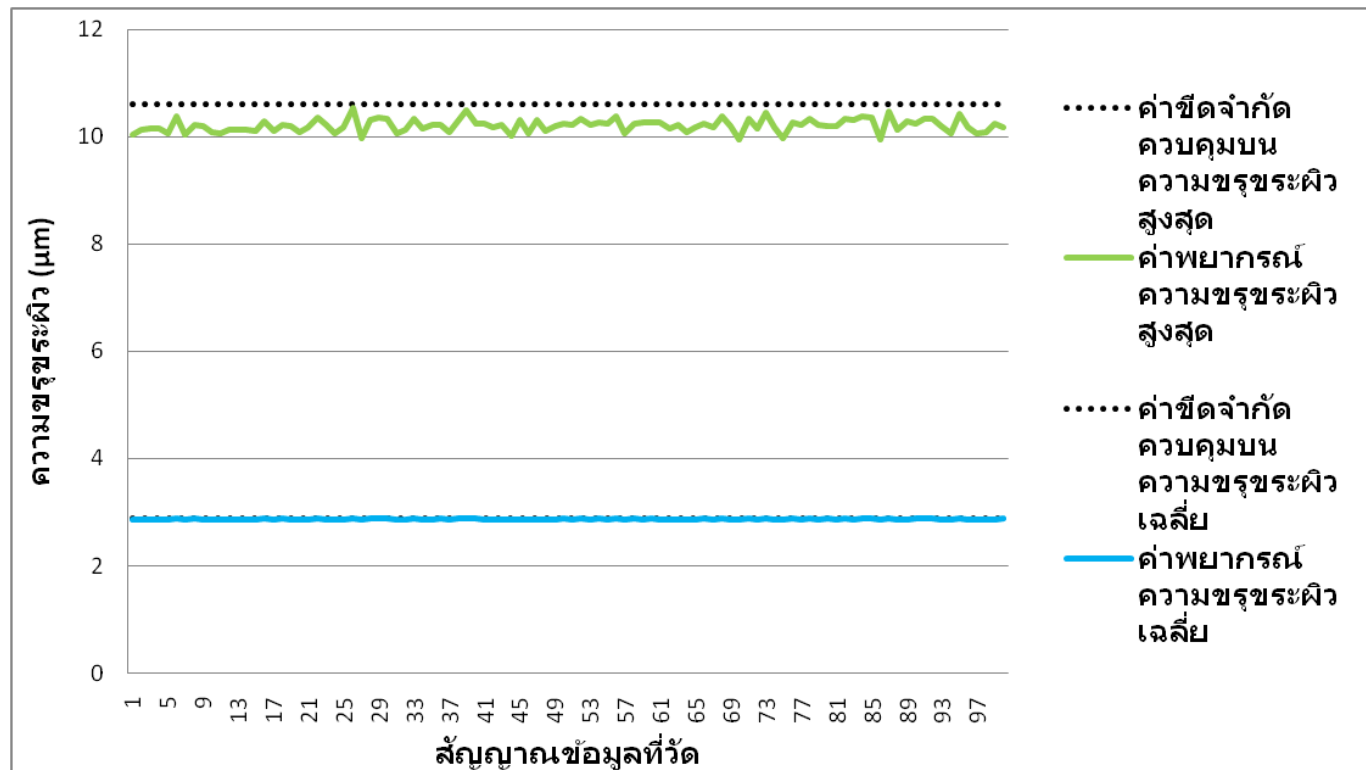




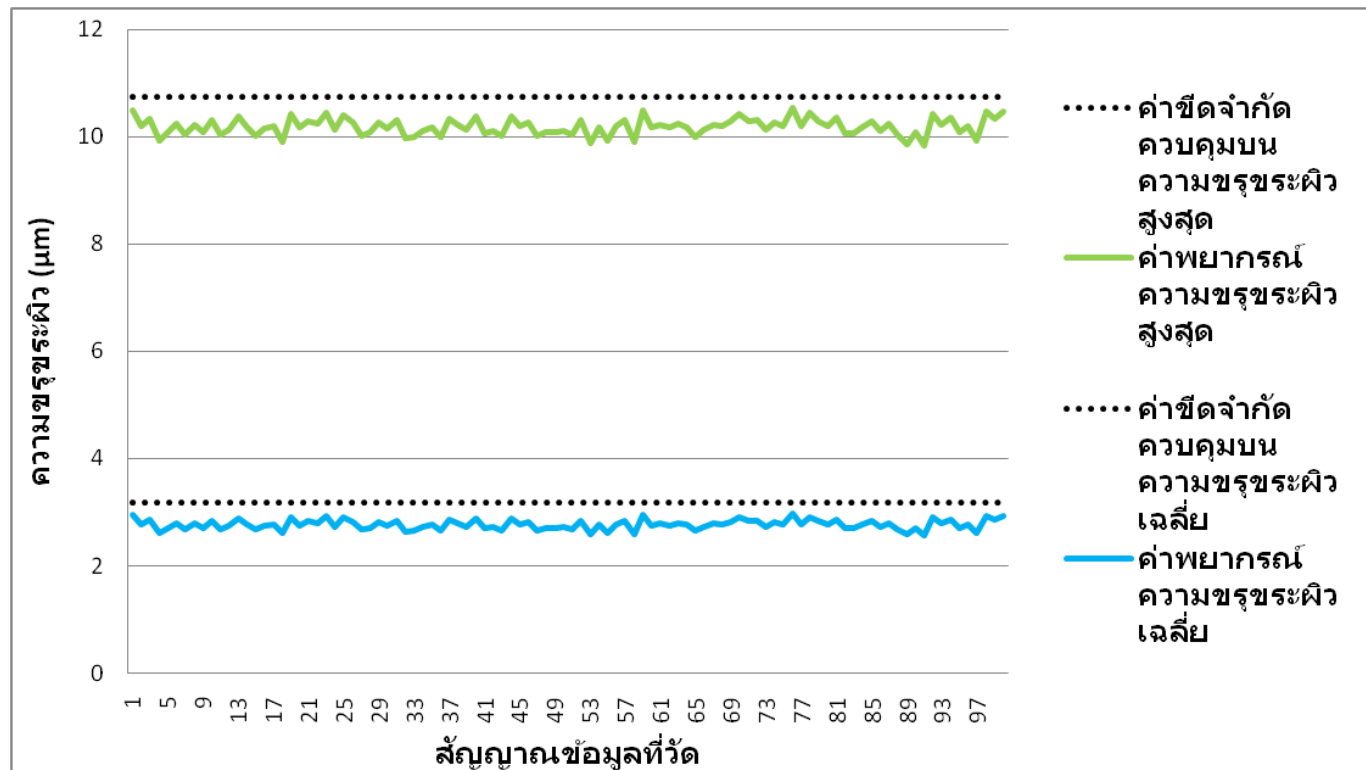
ตัวอย่าง 3: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.4 มิลลิเมตร  
 รัศมีจมูกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



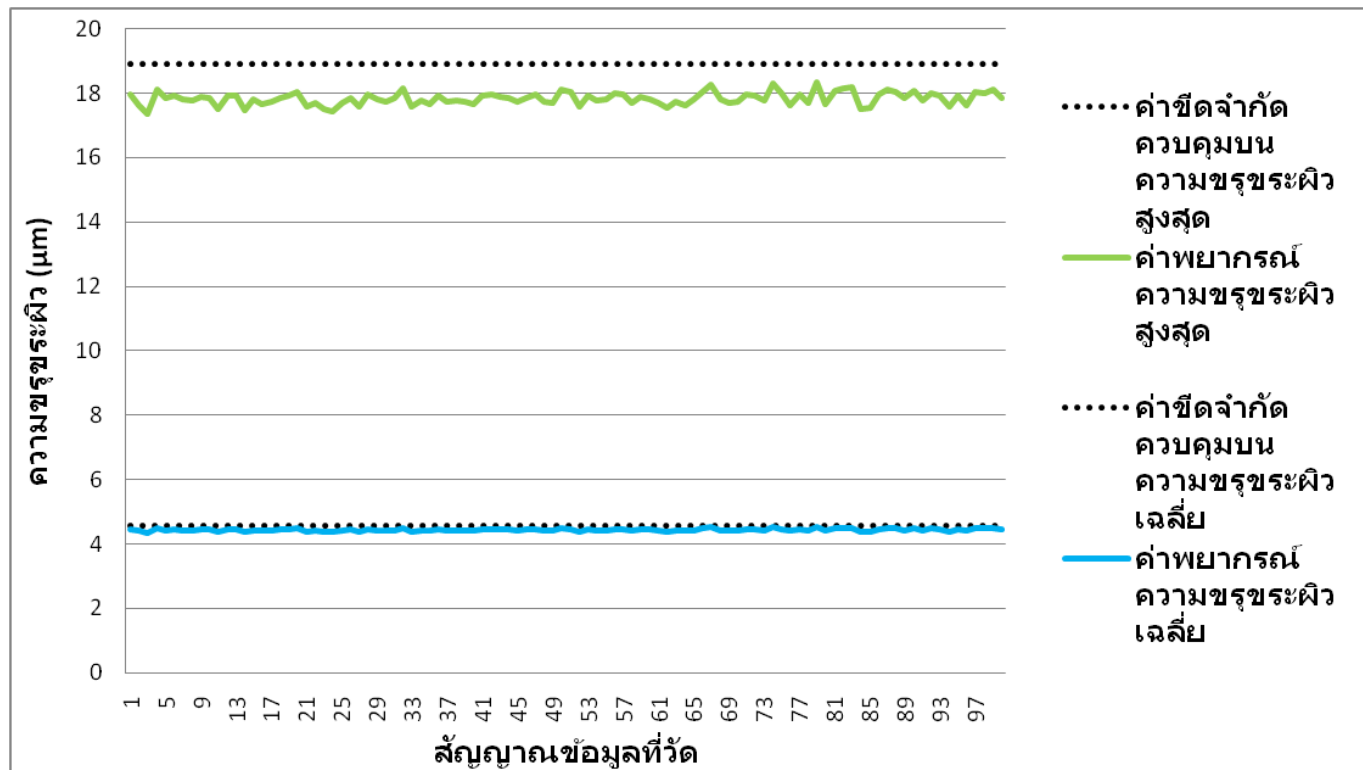
ตัวอย่าง 4: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร  
 รัศมีจุกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



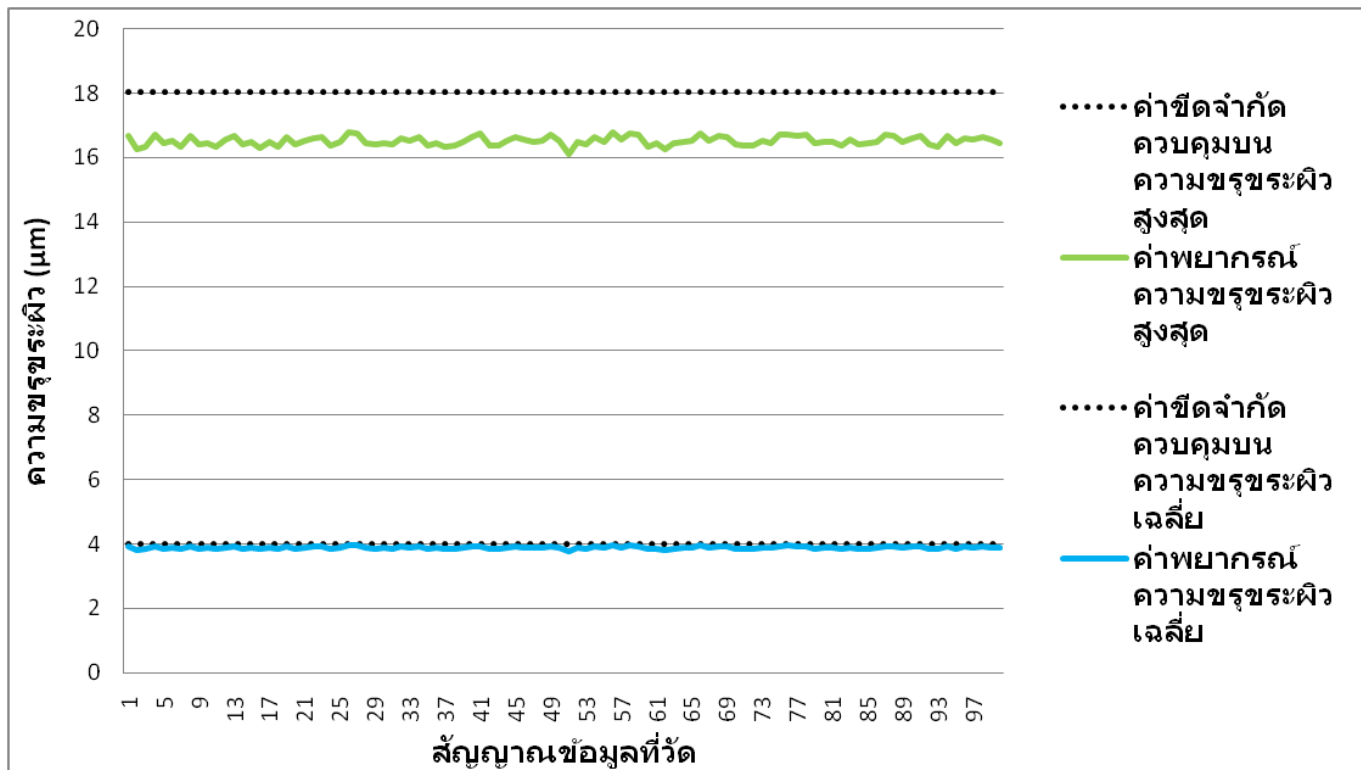
ตัวอย่าง 5: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร  
 รัศมีจุกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



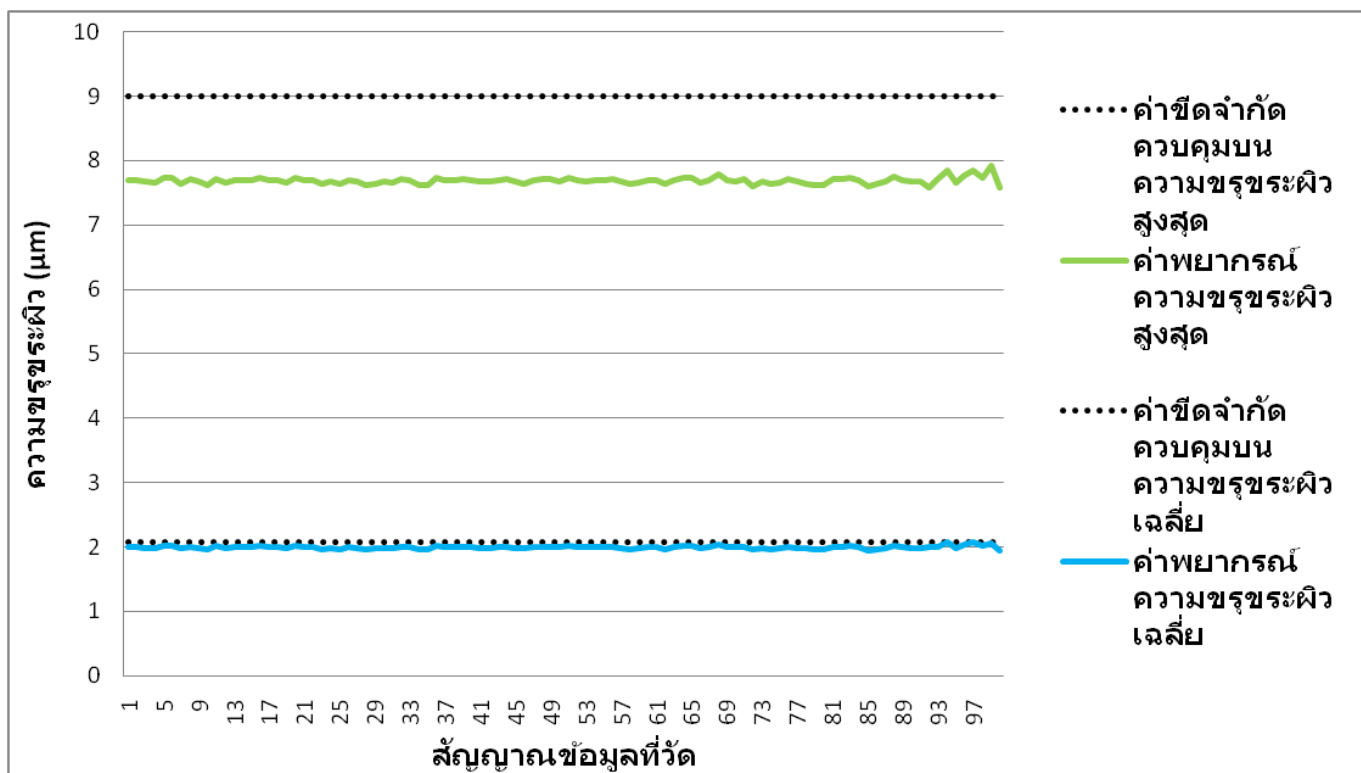
ตัวอย่าง 6: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.8 มิลลิเมตร  
 รัศมีจมูกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



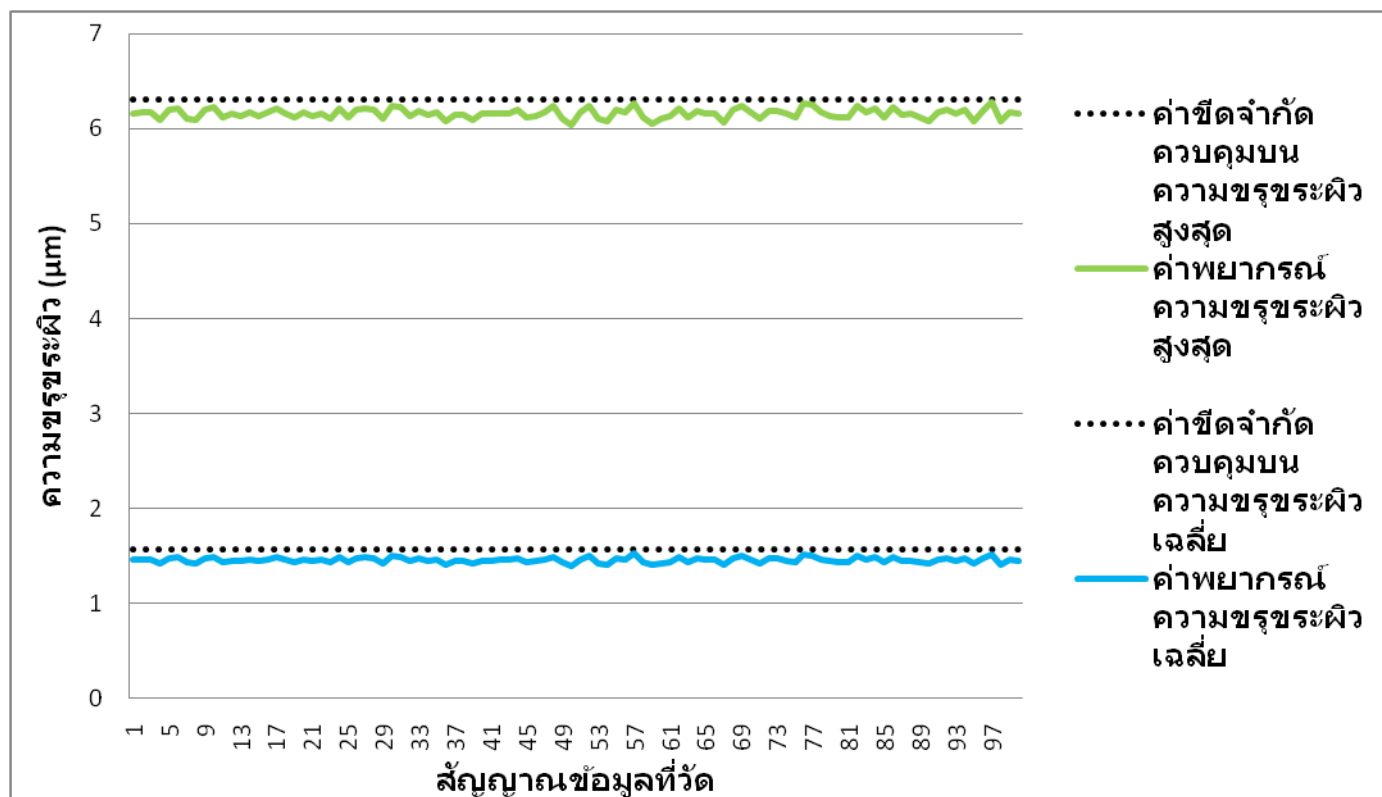
ตัวอย่าง 7: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.8 มิลลิเมตร  
 รัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



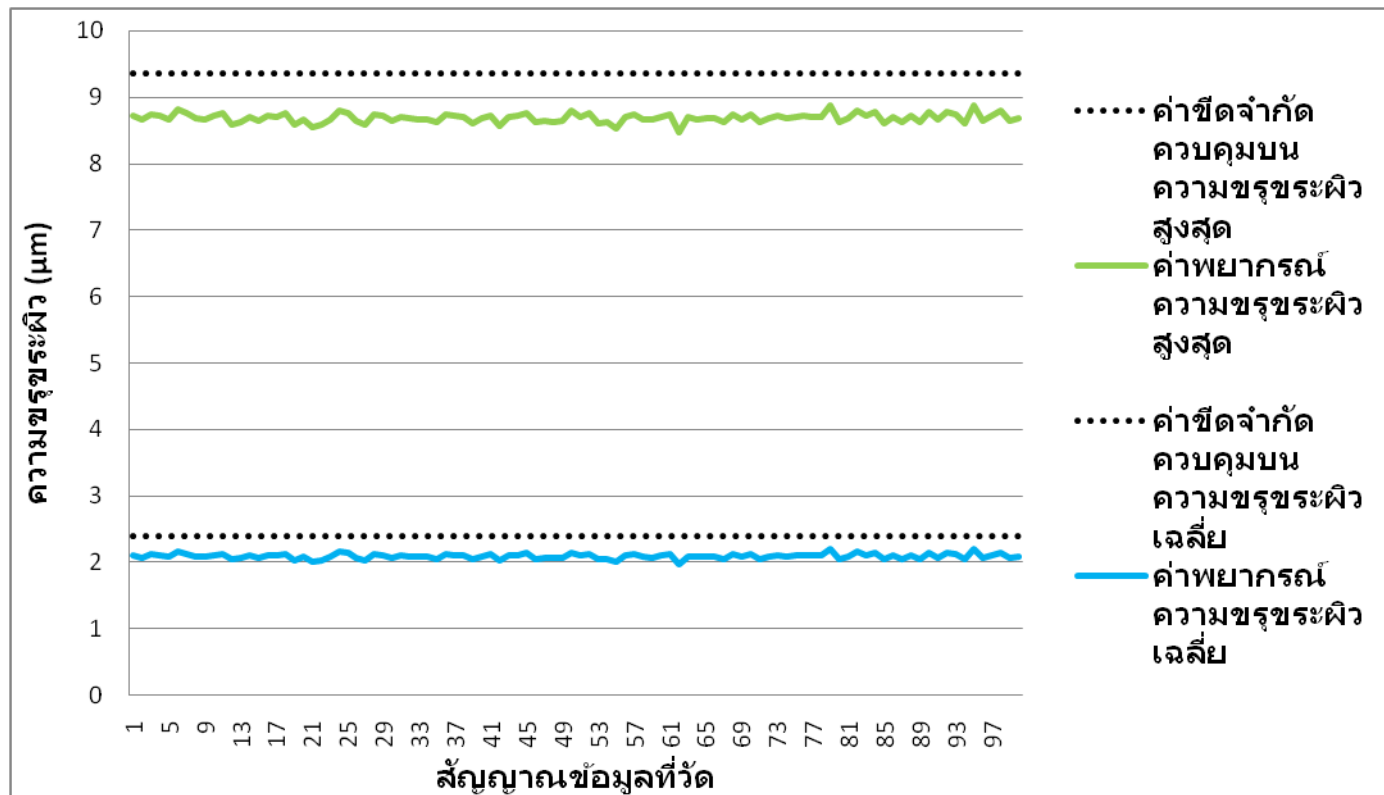
ตัวอย่าง 8: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร  
 รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



ตัวอย่าง 9: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร  
 รัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

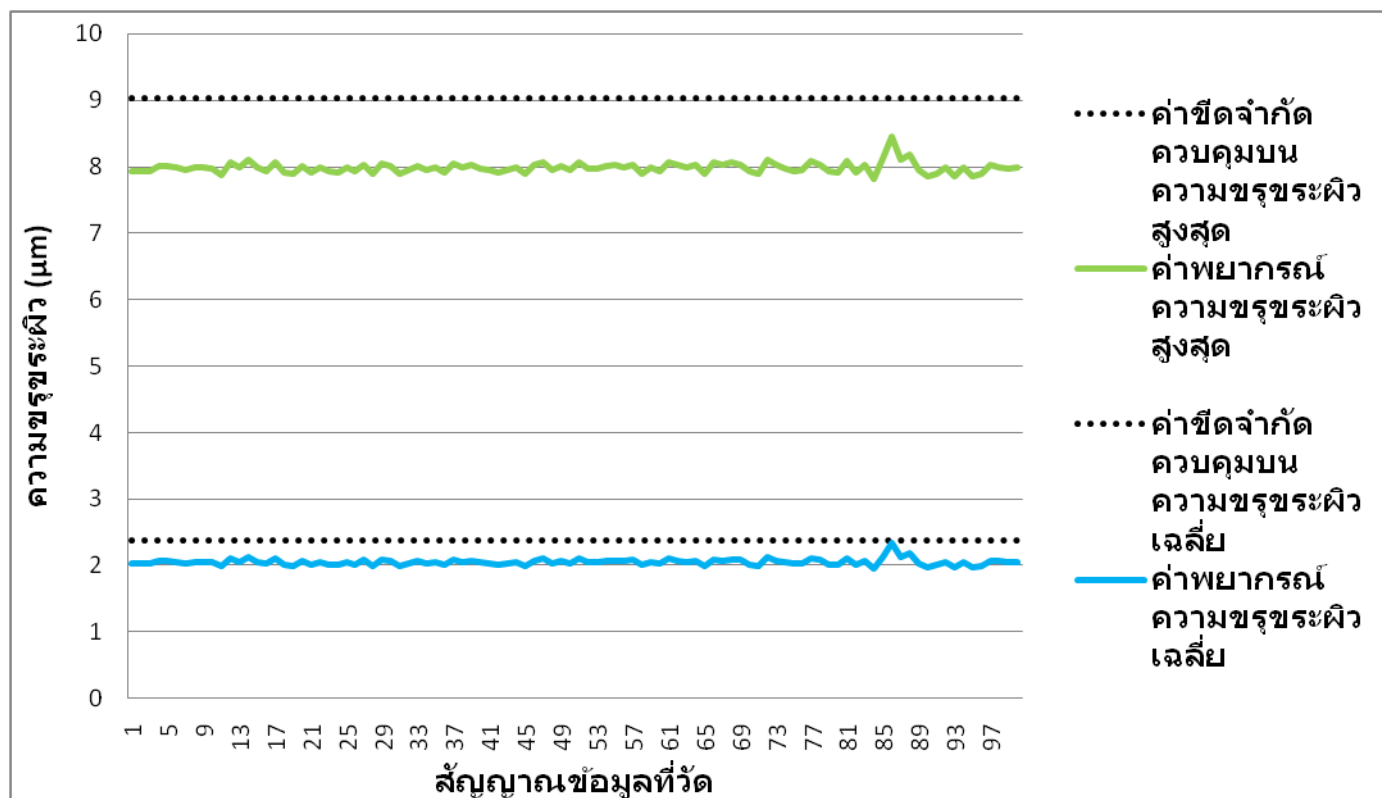


ตัวอย่าง 10: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.4 มิลลิเมตร  
 รัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

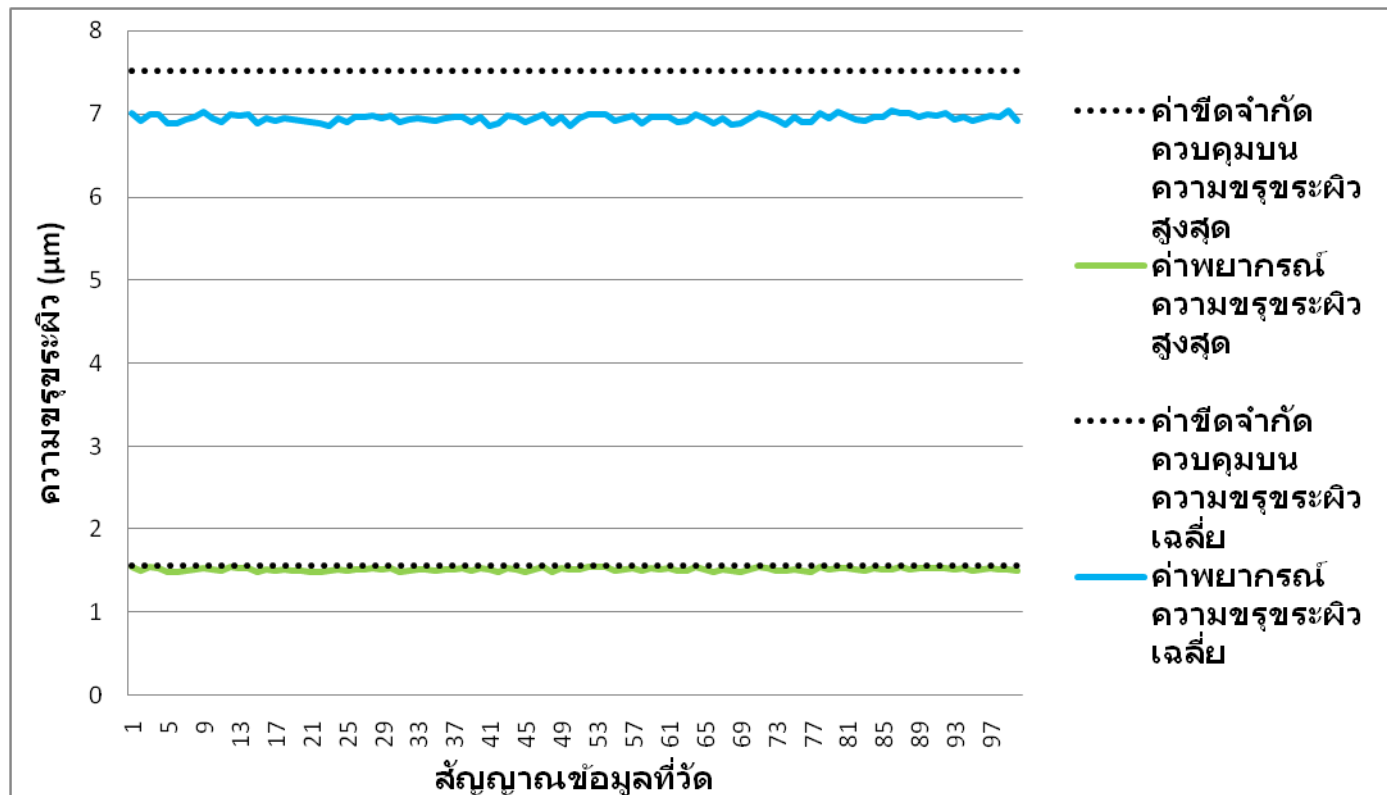




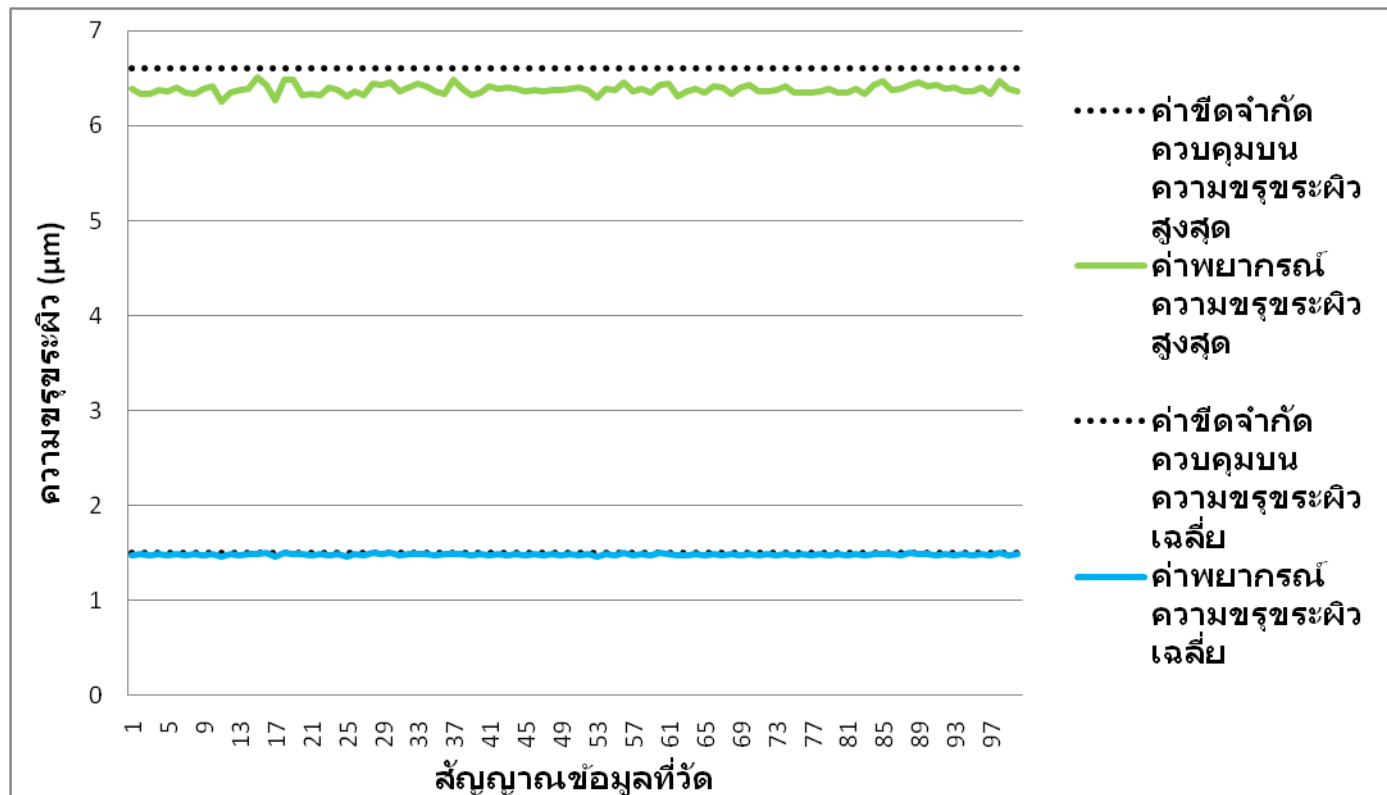
ตัวอย่าง 11: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.4 มิลลิเมตร  
 รัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



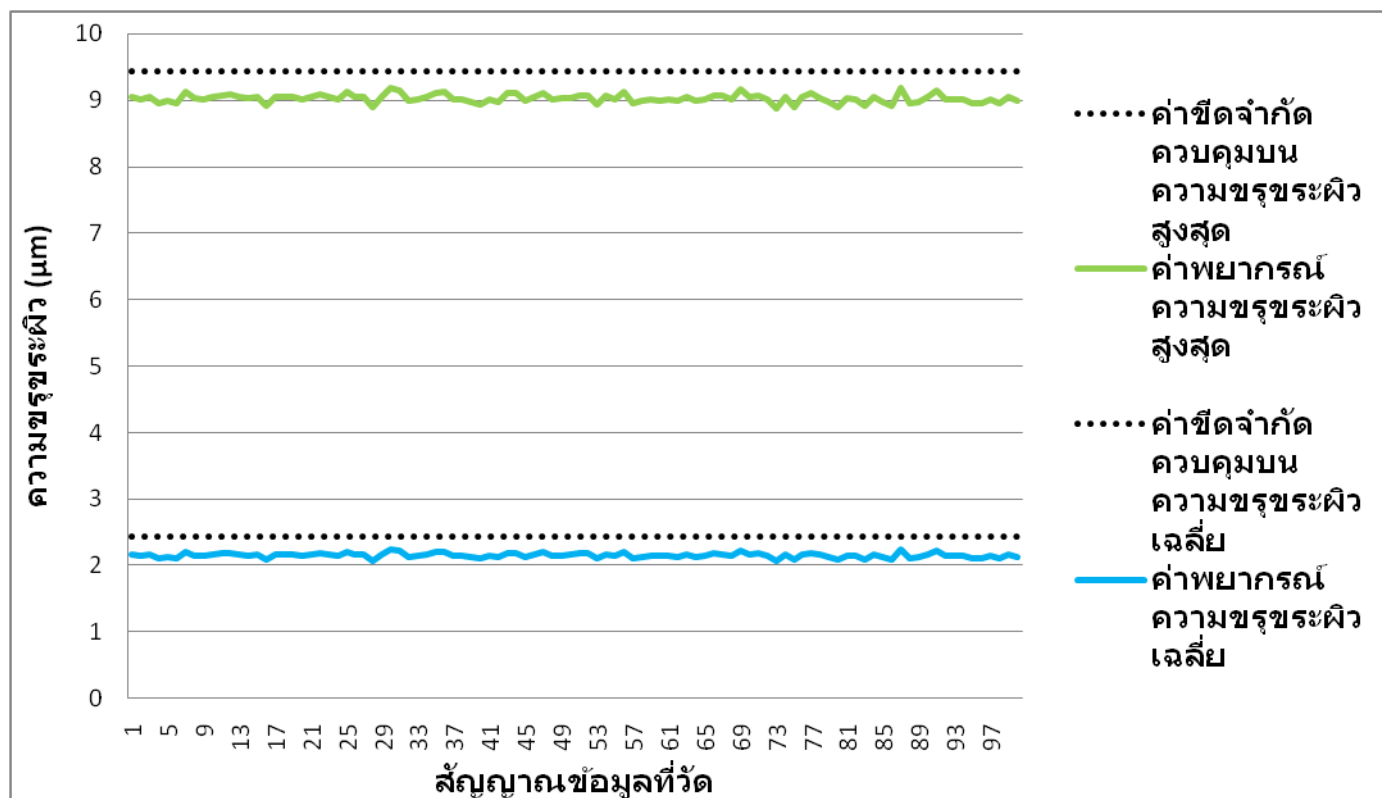
ตัวอย่าง 12: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.8 มิลลิเมตร  
 รัศมีจมูกมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



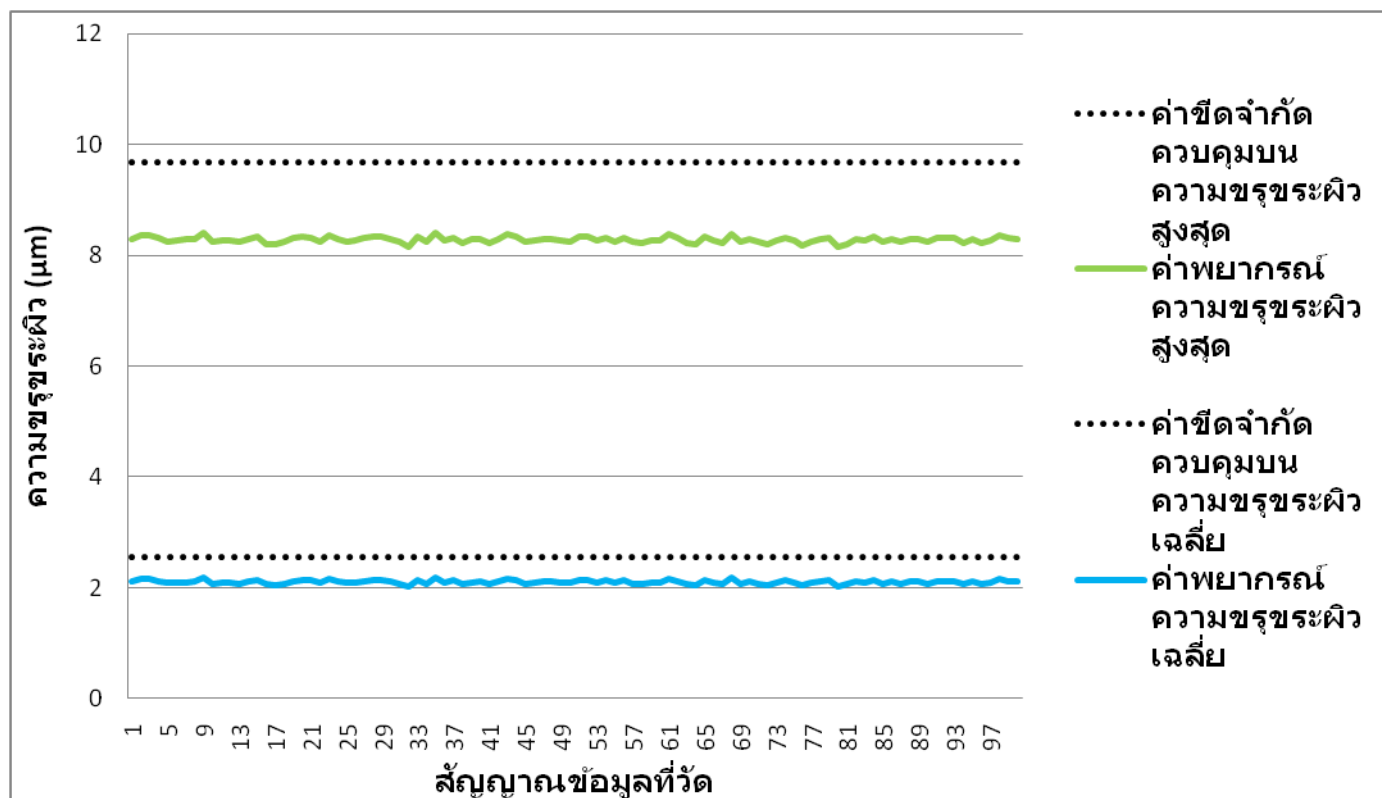
ตัวอย่าง 13: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.8 มิลลิเมตร  
 รัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



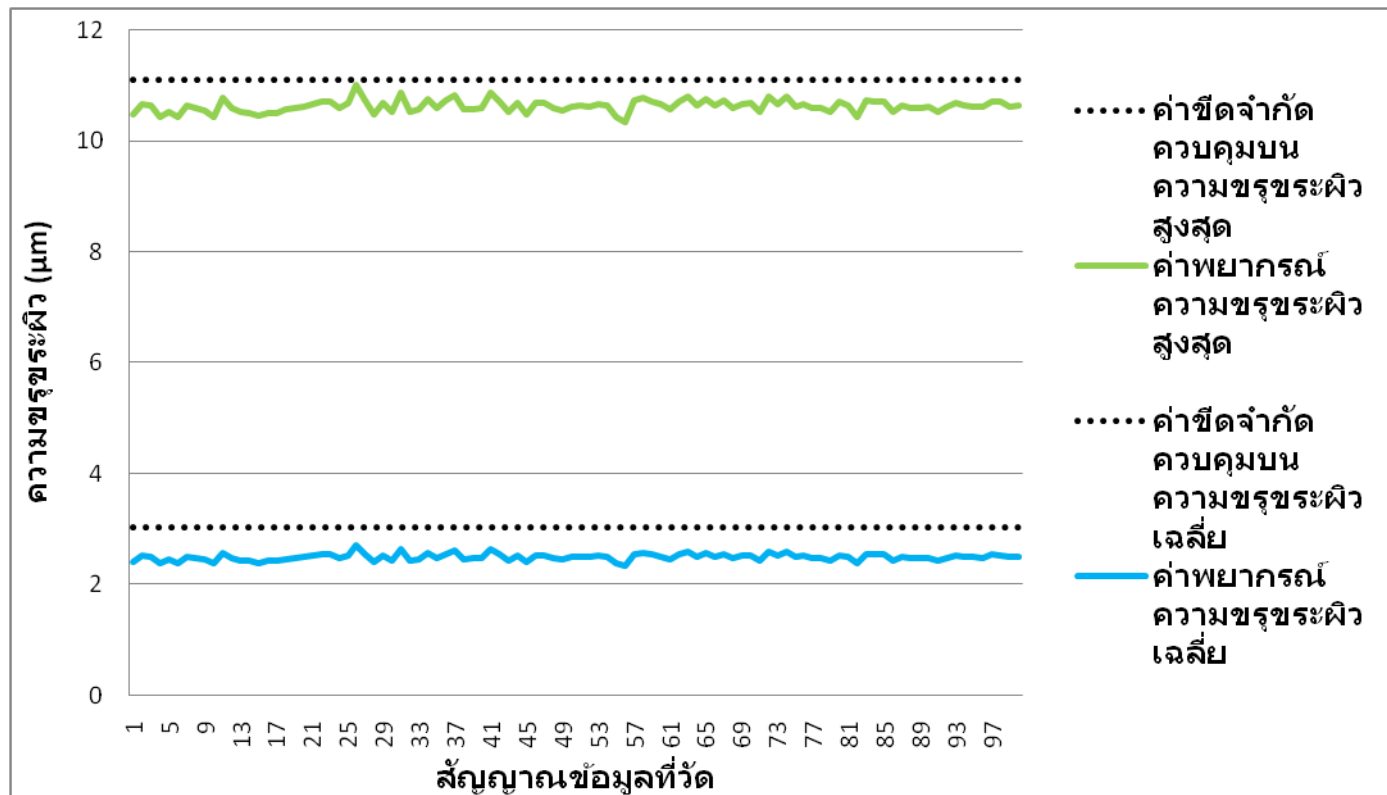
ตัวอย่าง 14: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.8 มิลลิเมตร  
 วัสดุมีจุ่มกมิต 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



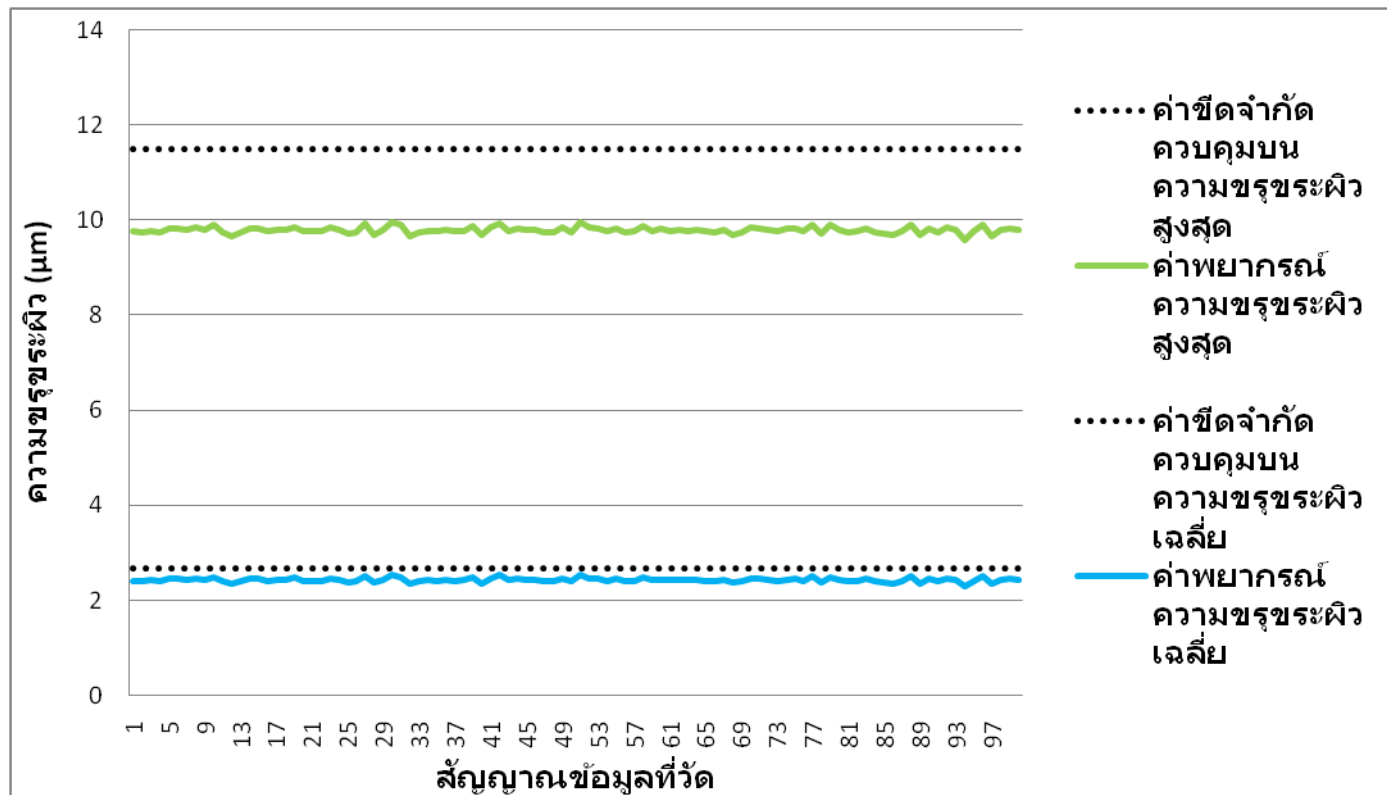
ตัวอย่าง 15: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.8 มิลลิเมตร  
 รัศมีจมูกมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



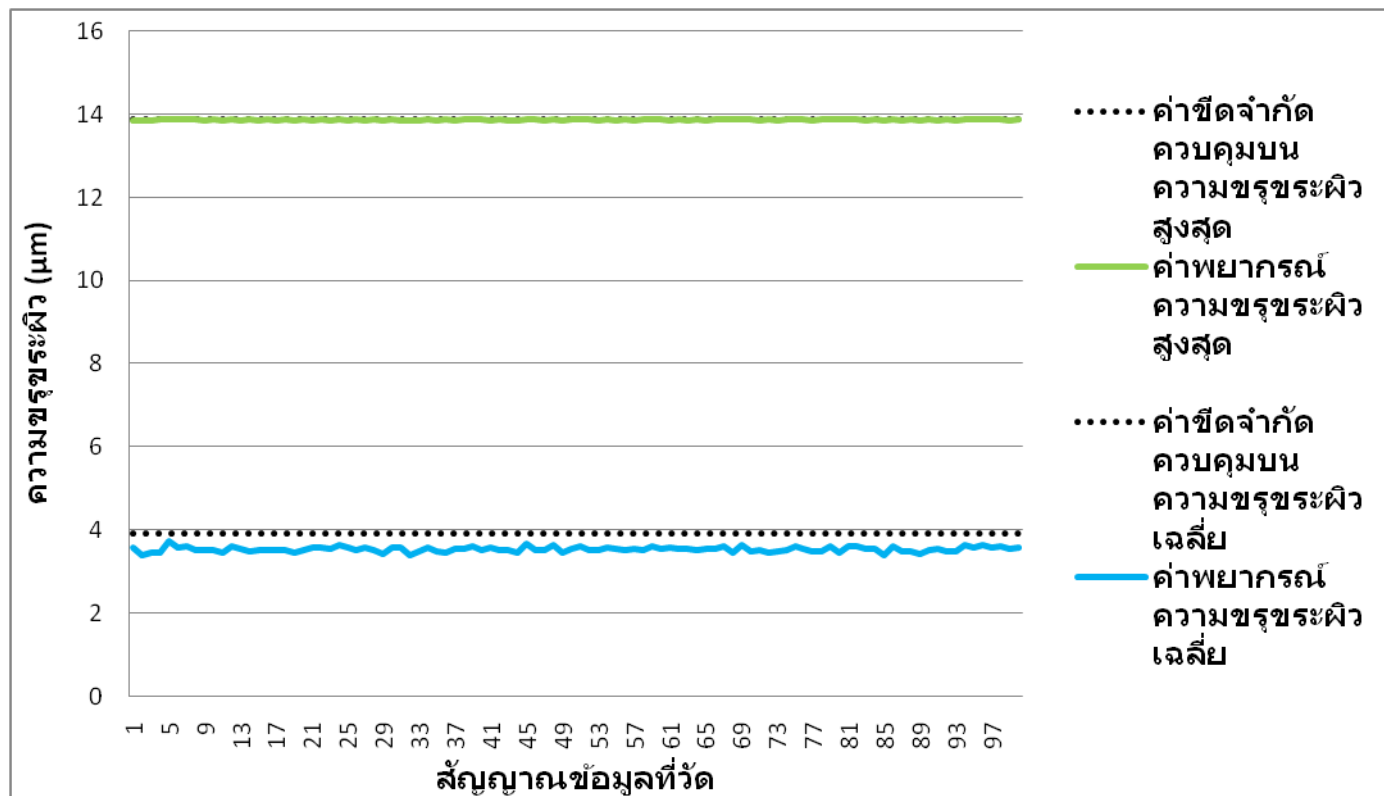
ตัวอย่าง 16: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.4 มิลลิเมตร  
 รัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



ตัวอย่าง 17: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.4 มิลลิเมตร  
 รัศมีจมูกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

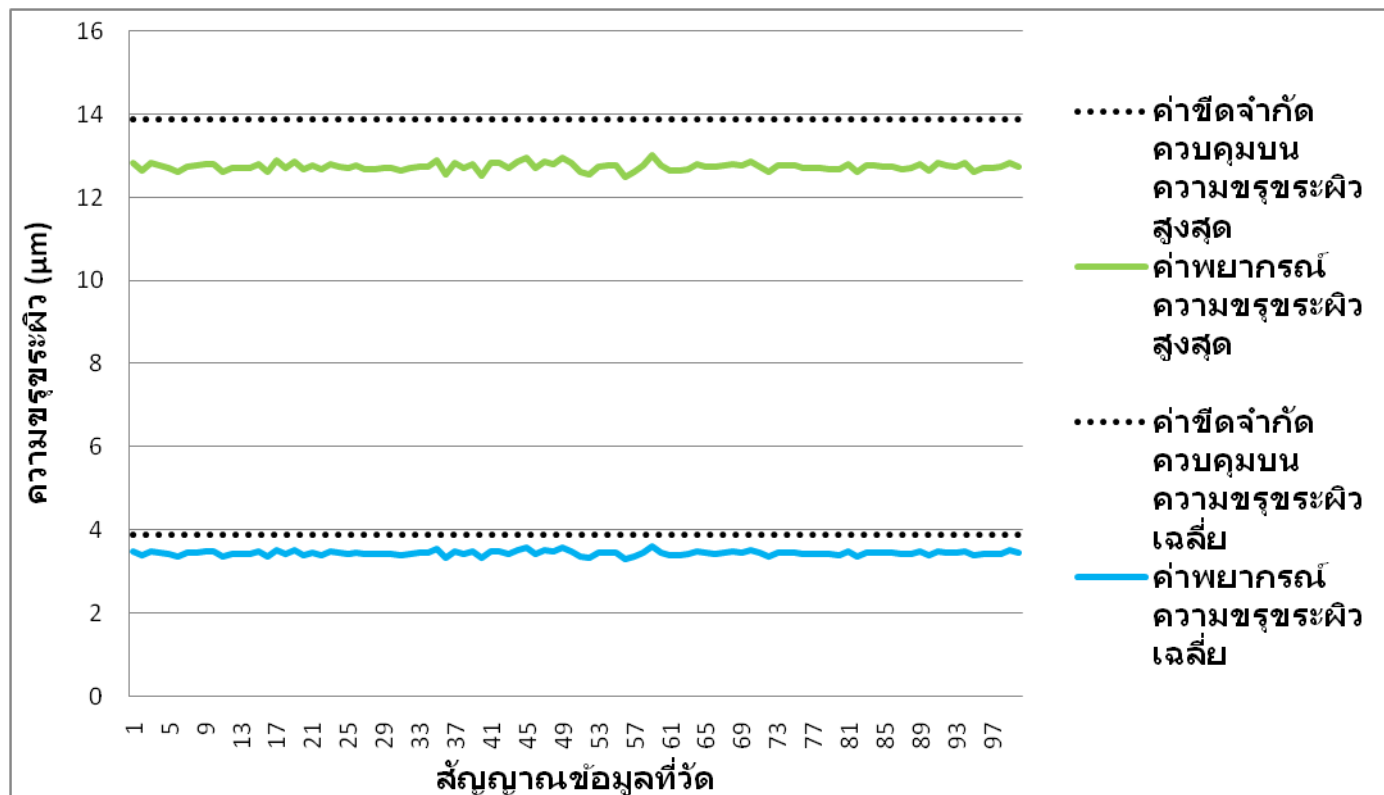


ตัวอย่าง 18: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.4 มิลลิเมตร  
 รัศมีจมูกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

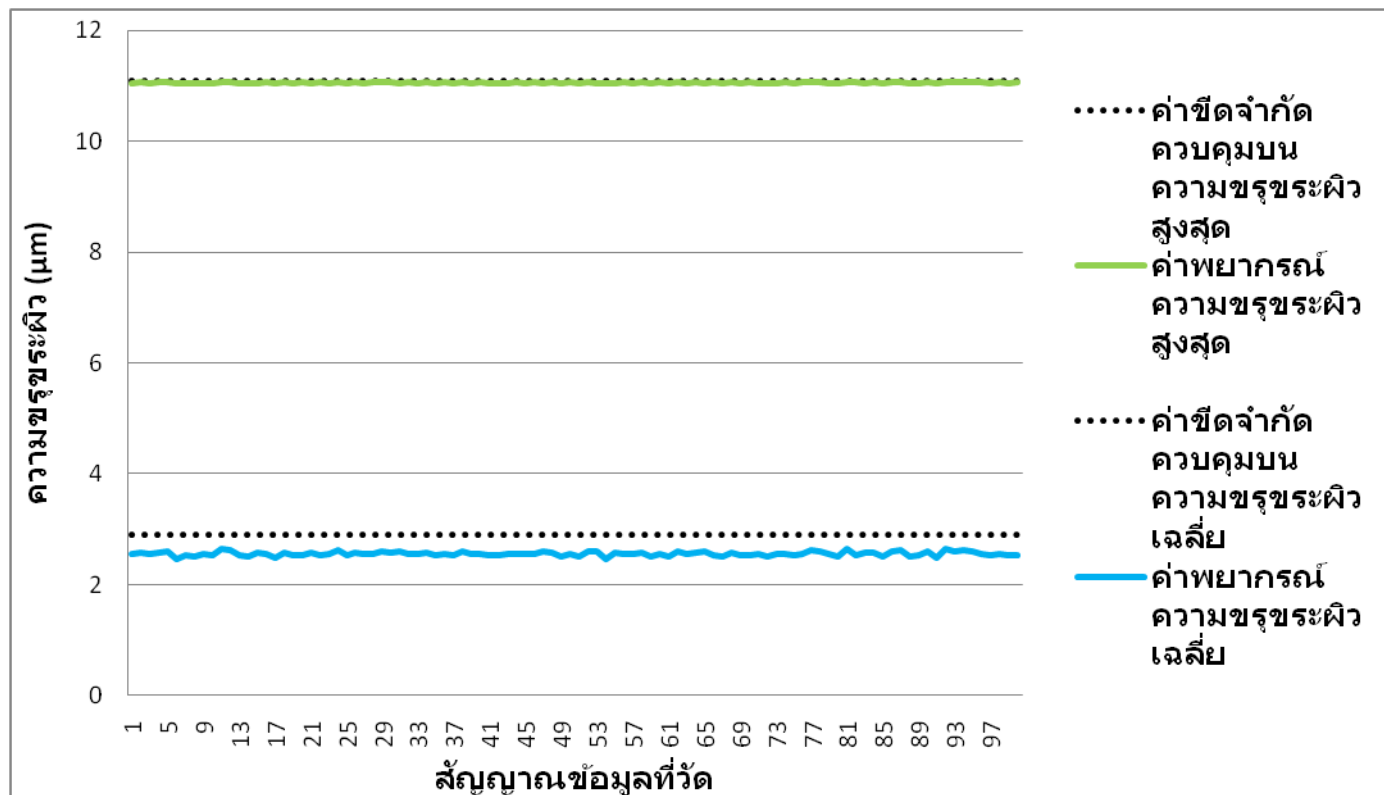




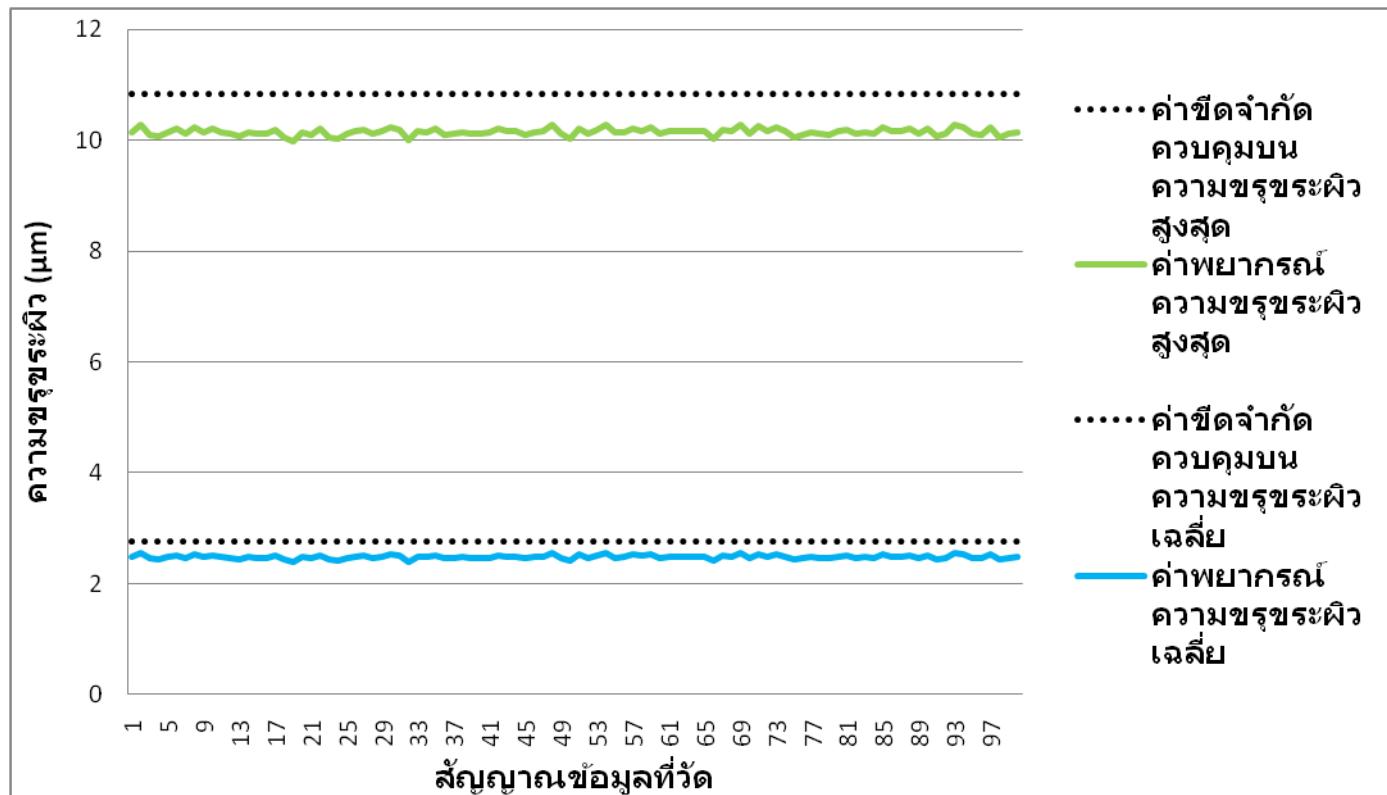
ตัวอย่าง 19: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.4 มิลลิเมตร  
 รัศมีจุกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



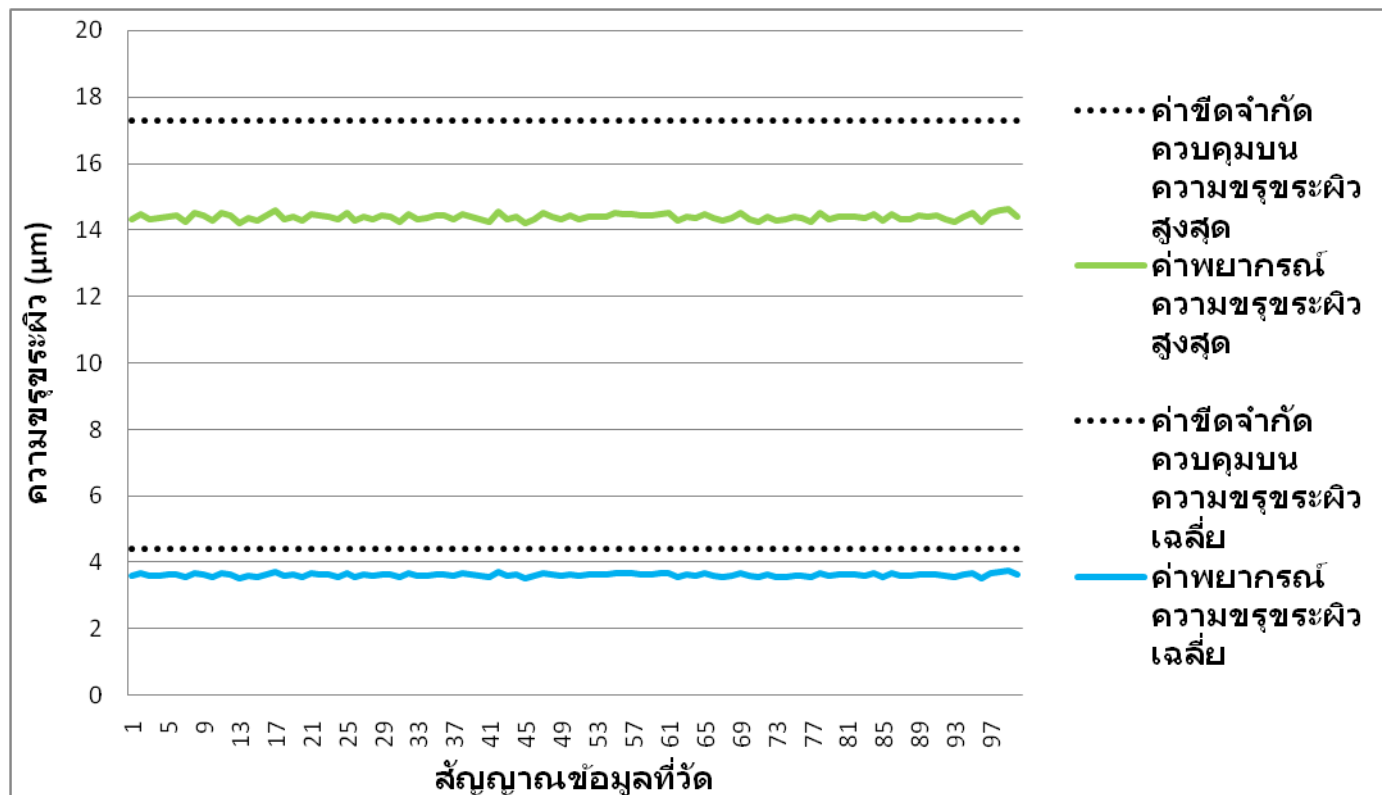
ตัวอย่าง 20: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.8 มิลลิเมตร  
 รัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



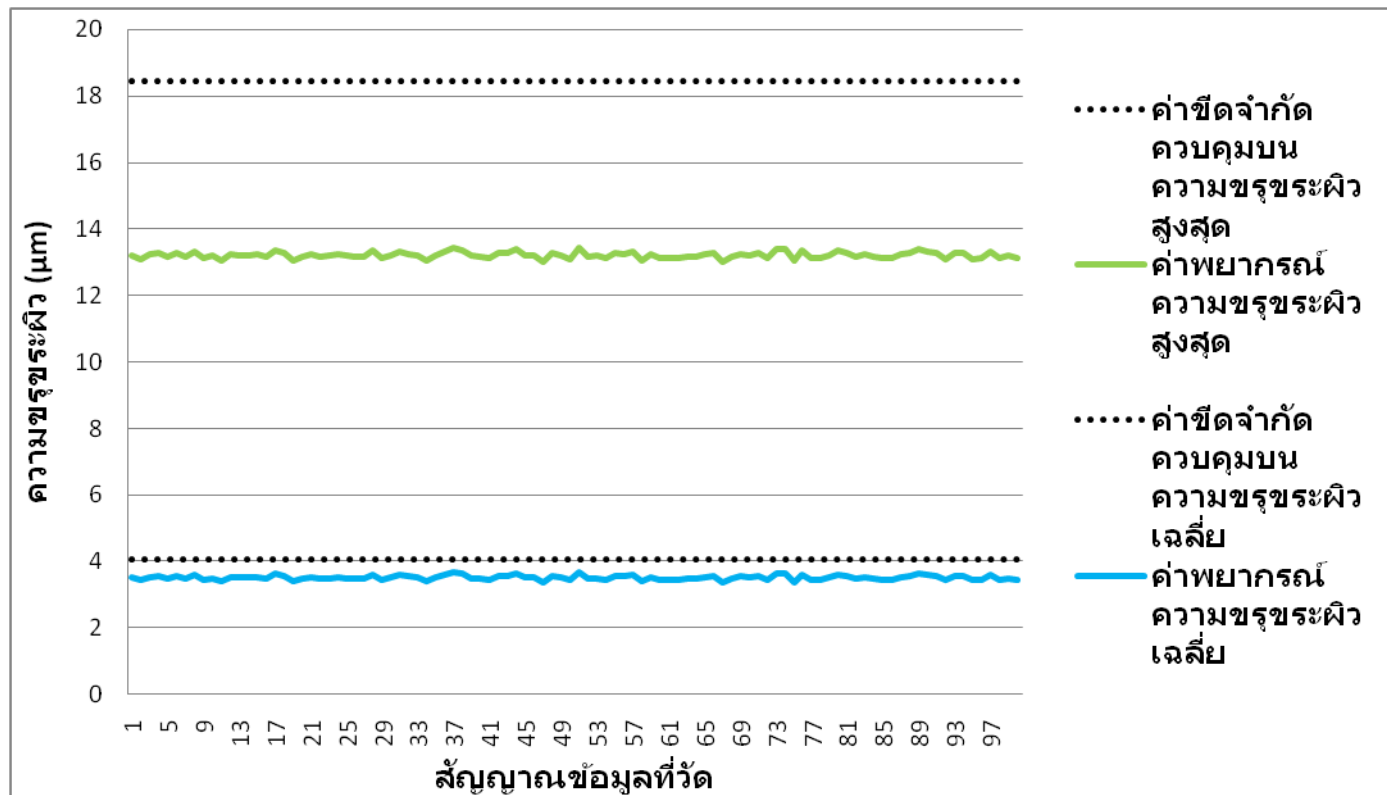
ตัวอย่าง 21: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.8 มิลลิเมตร  
 รัศมีจมูกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



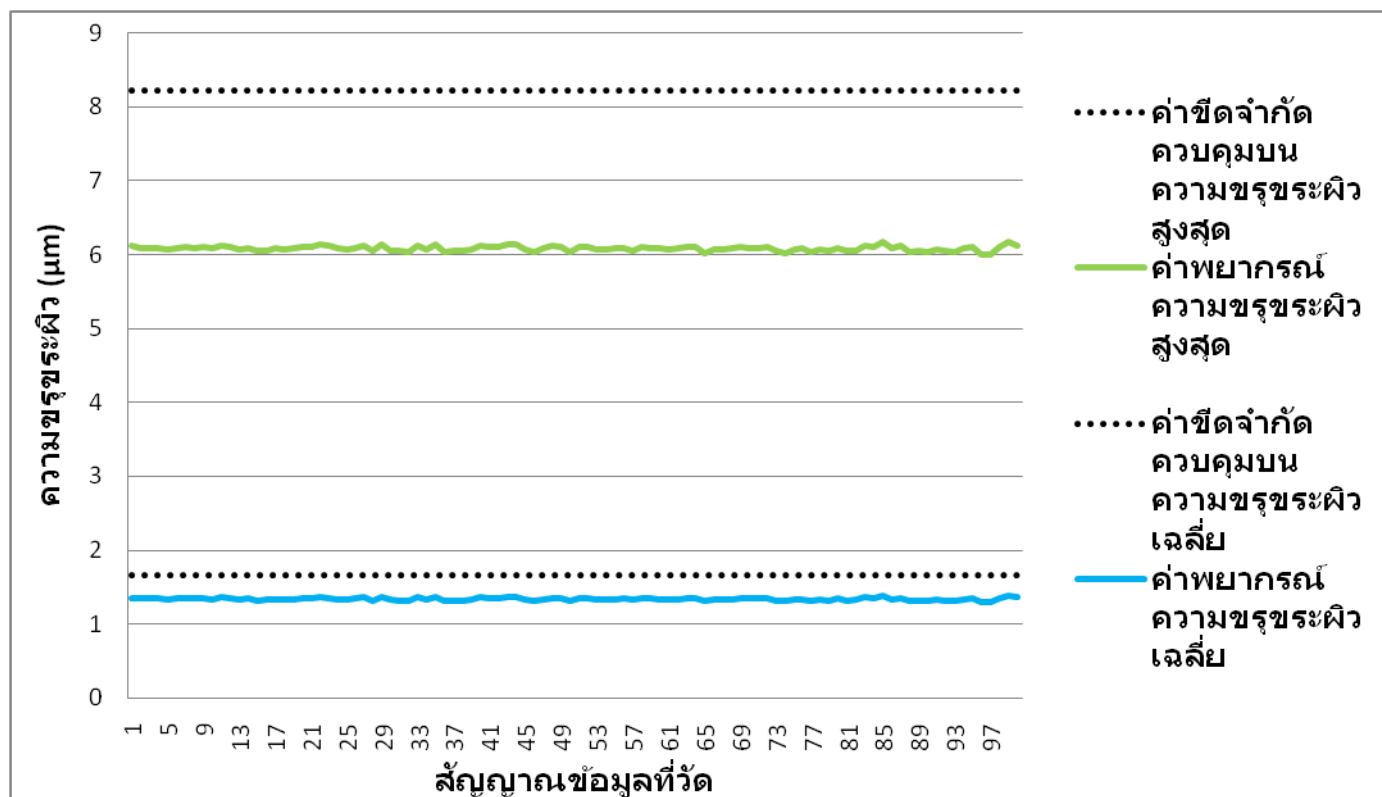
ตัวอย่าง 22: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.8 มิลลิเมตร  
 รัศมีจุ่มมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



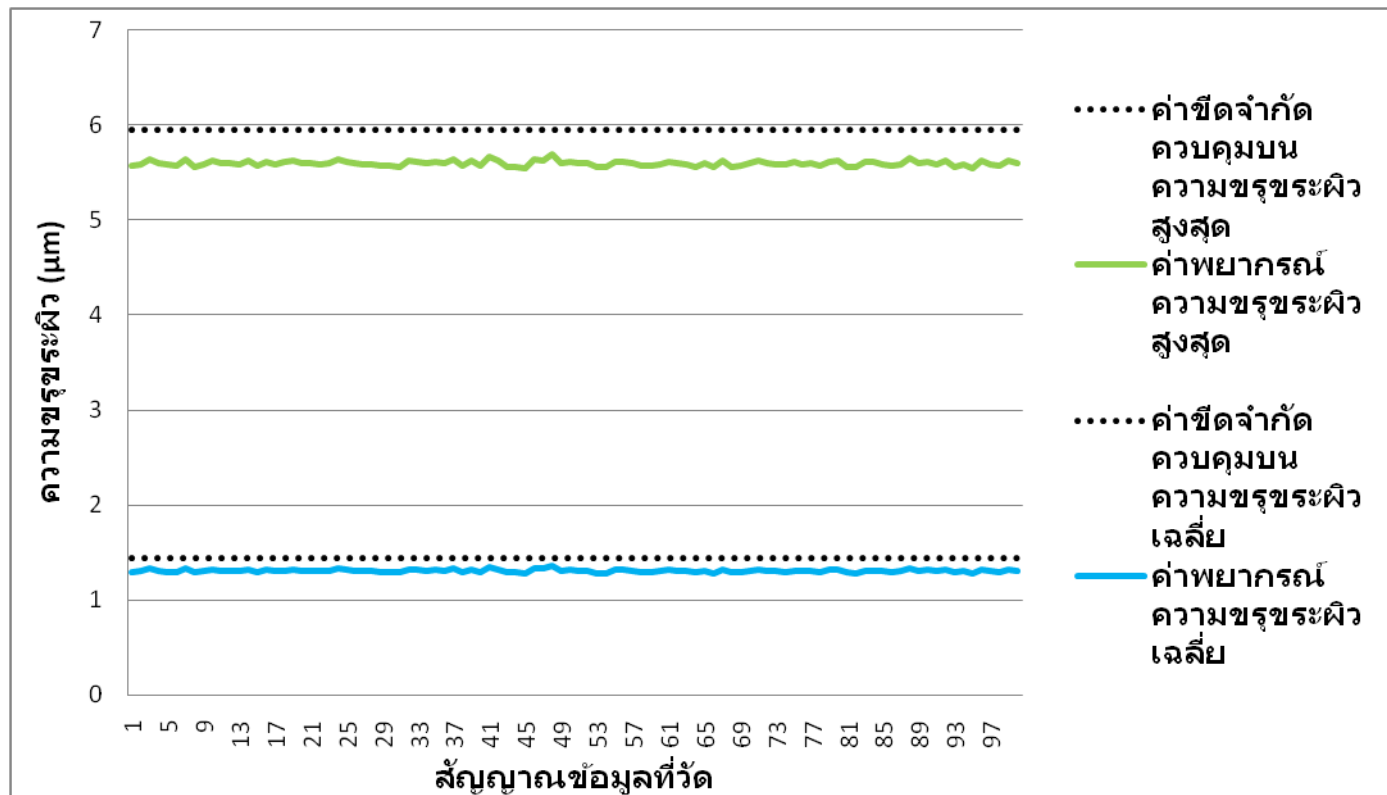
ตัวอย่าง 23: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.8 มิลลิเมตร  
 รัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



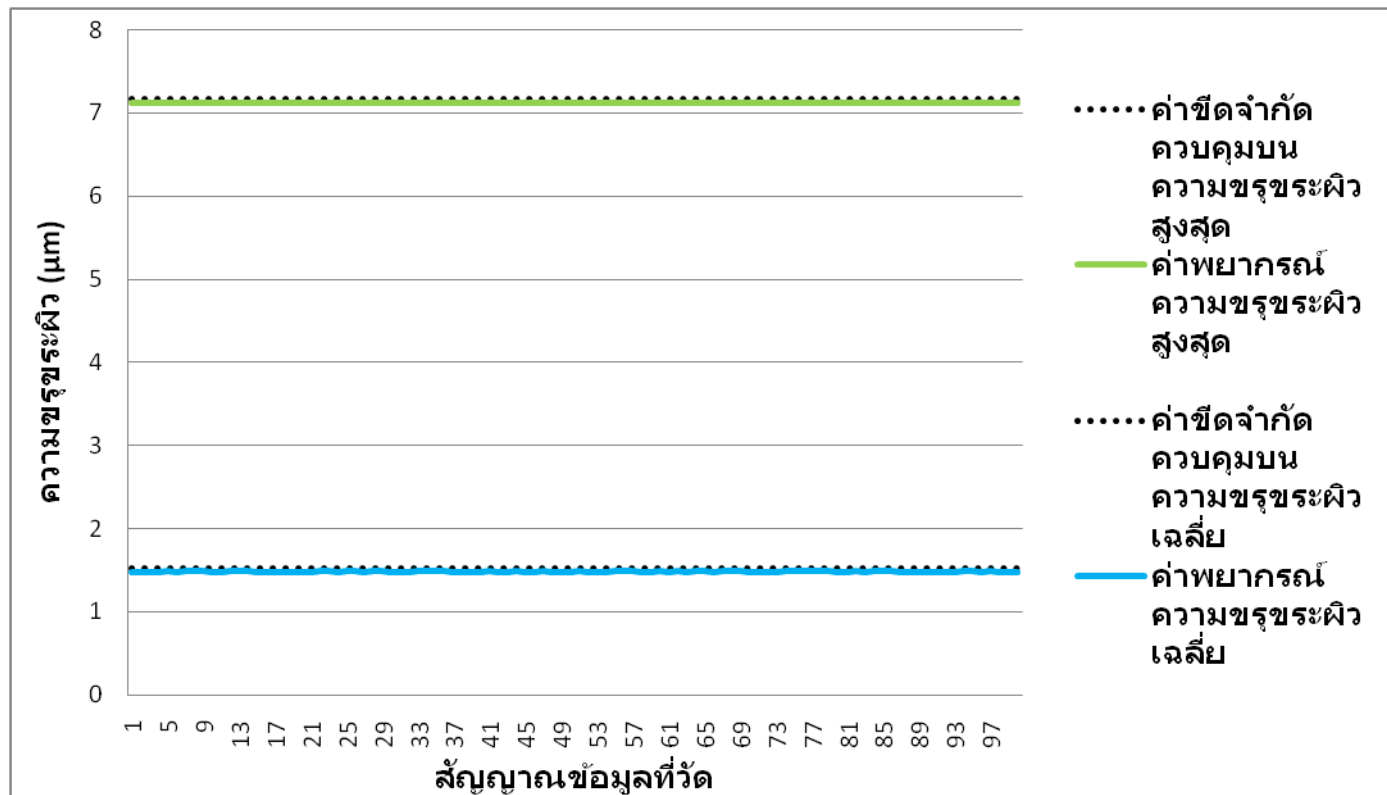
ตัวอย่าง 24: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.4 มิลลิเมตร  
 รัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



ตัวอย่าง 25: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.4 มิลลิเมตร  
 รัศมีจุมมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

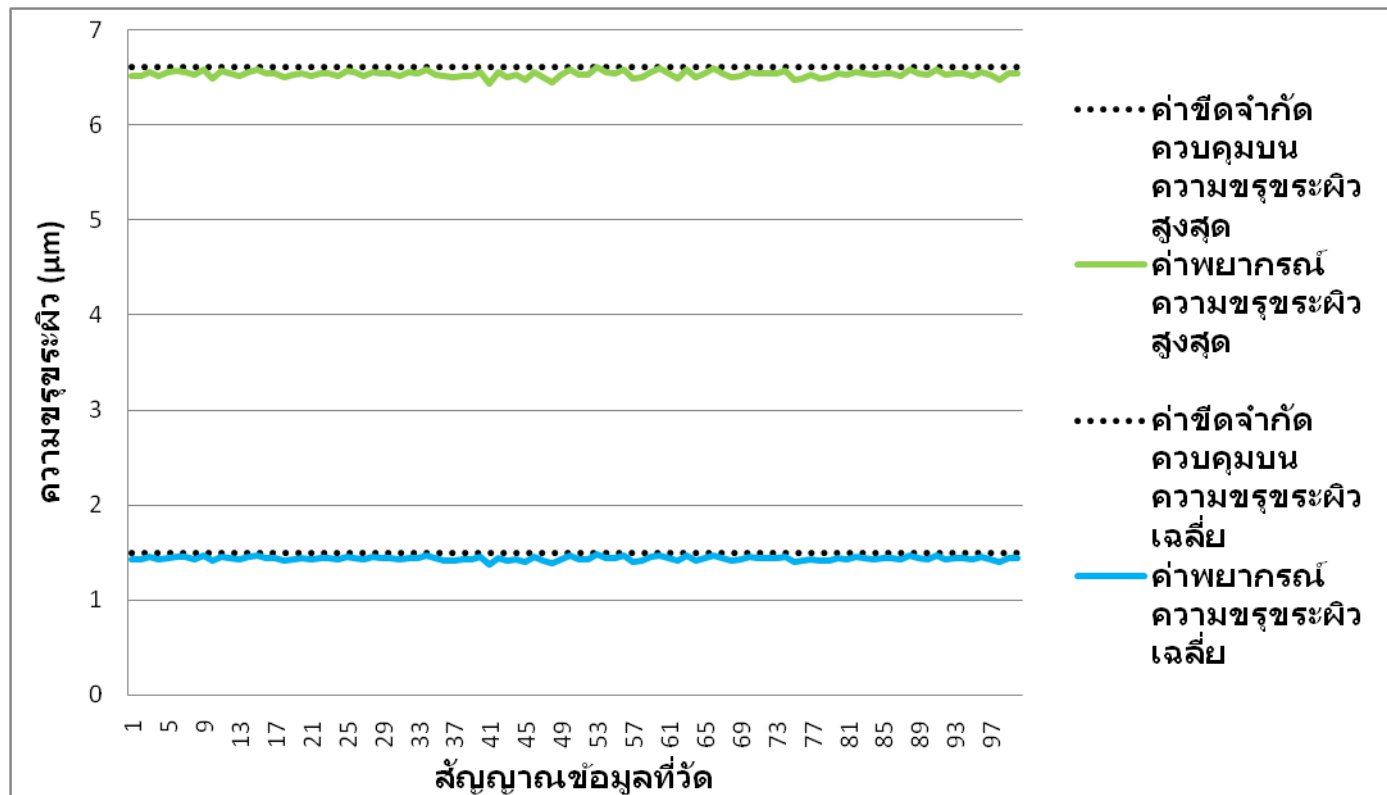


ตัวอย่าง 26: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.4 มิลลิเมตร  
 รัศมีจมูกมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

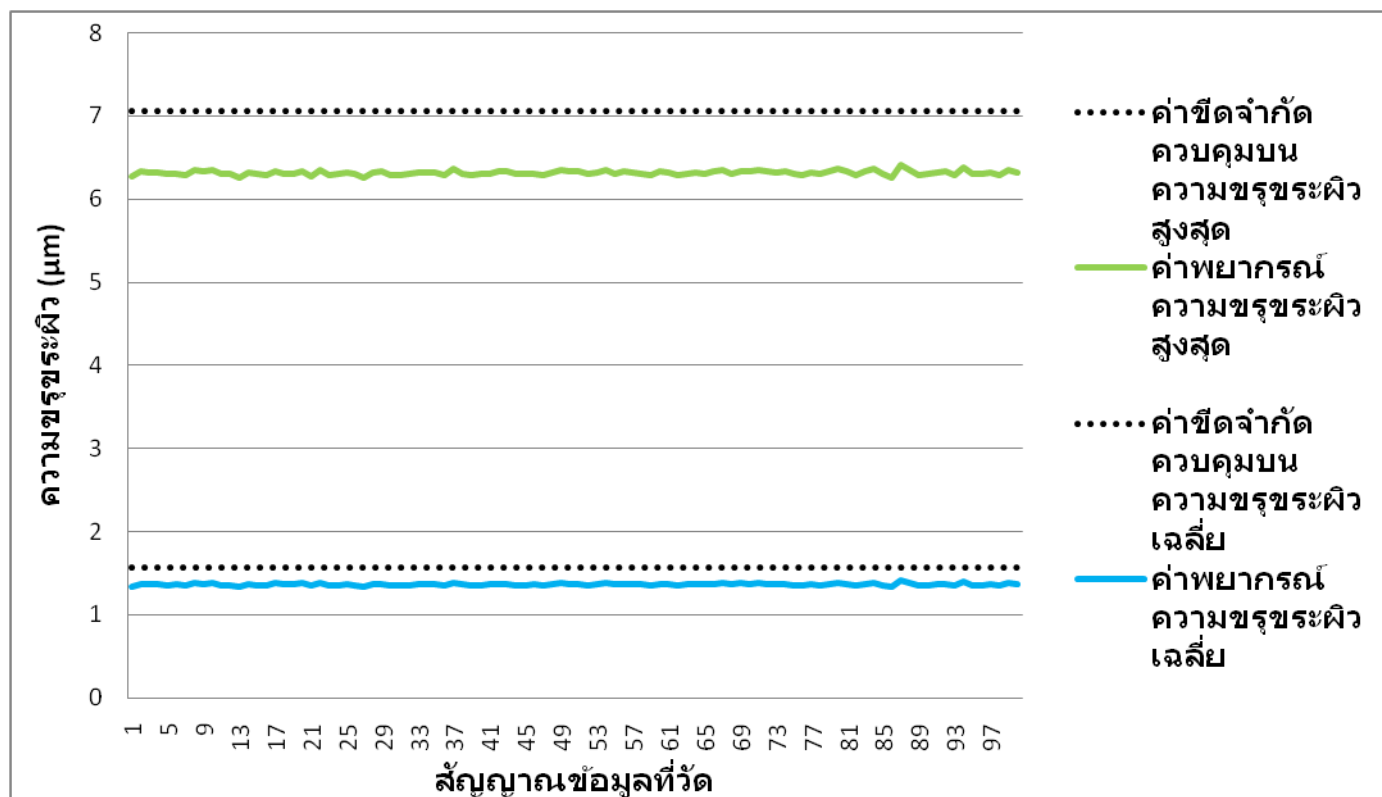




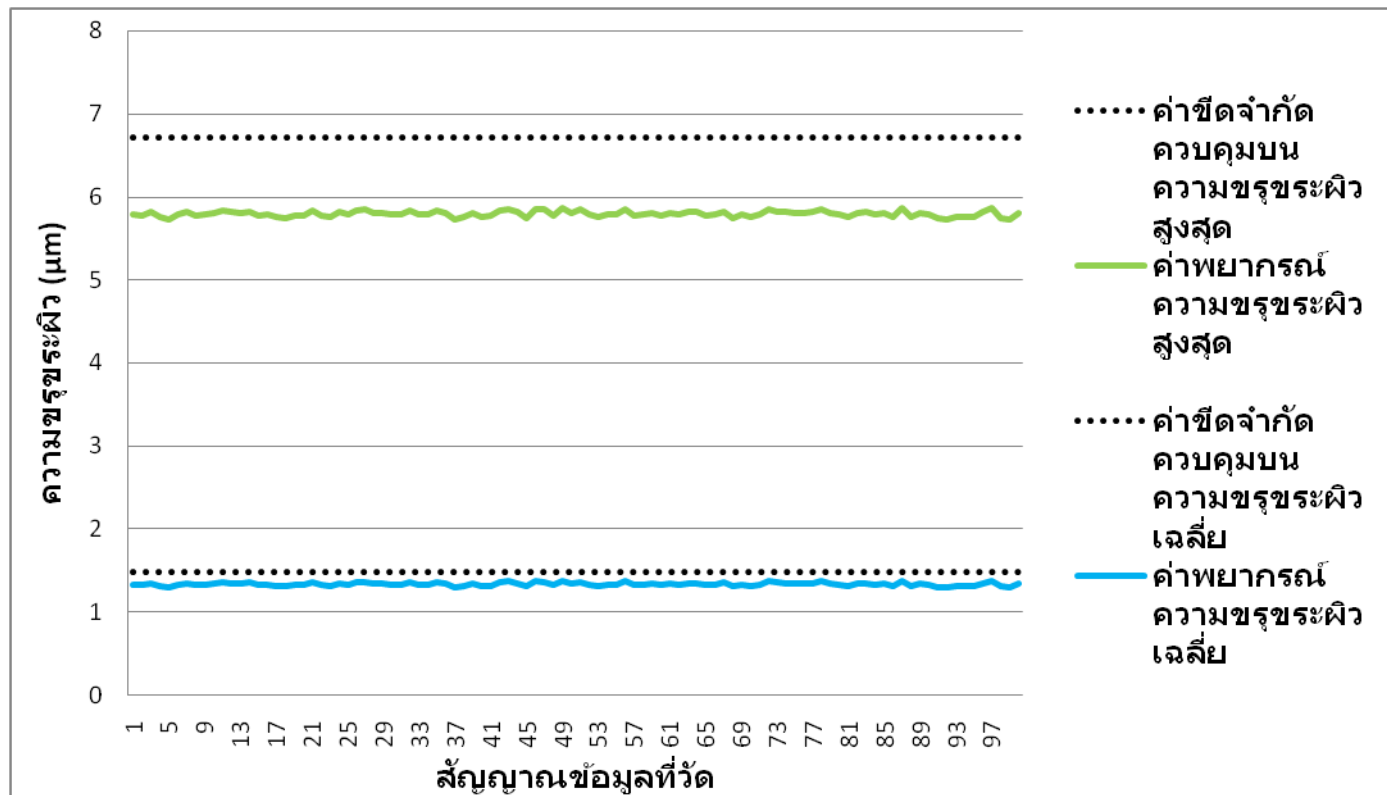
ตัวอย่าง 27: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.4 มิลลิเมตร  
 รัศมีจมูกมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



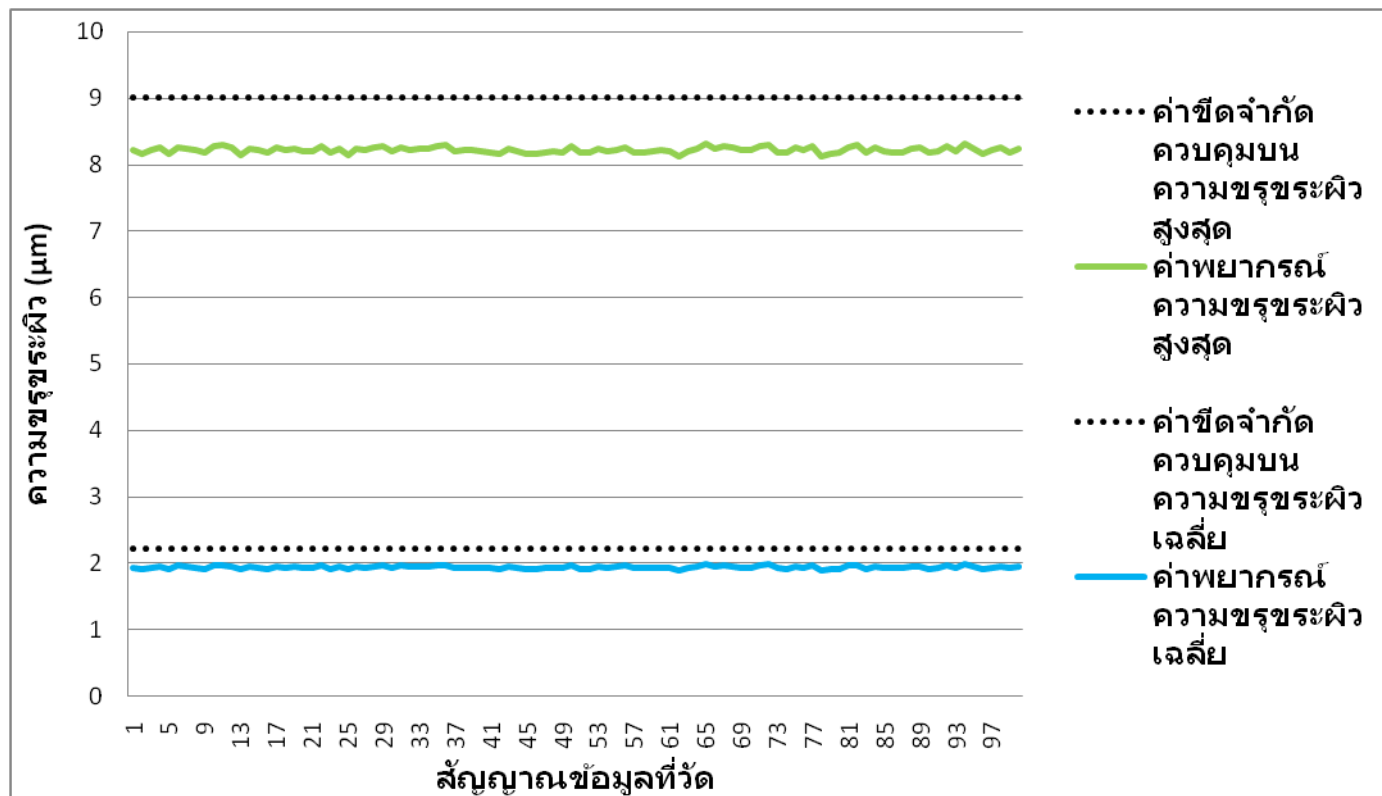
ตัวอย่าง 28: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.8 มิลลิเมตร  
 รัศมีจมูกมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



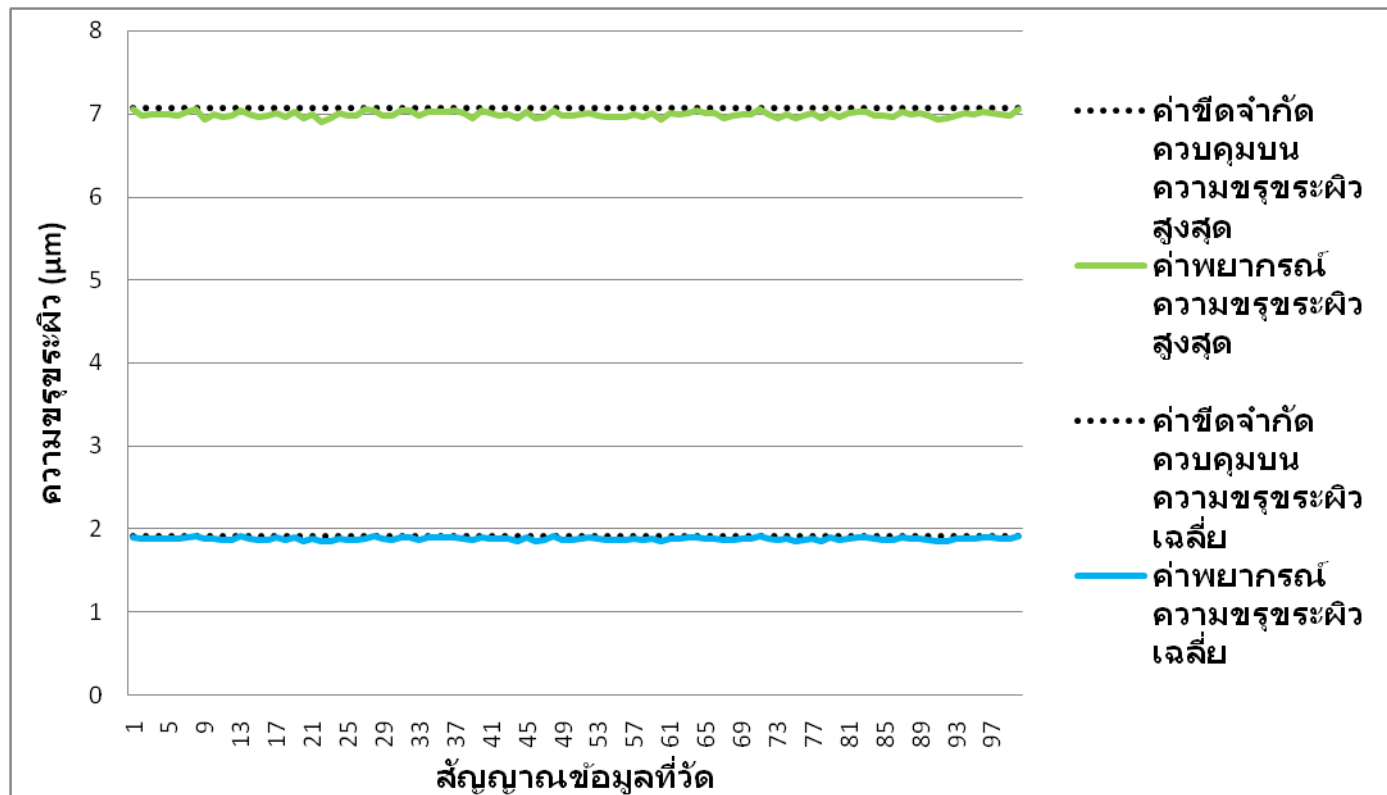
ตัวอย่าง 29: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.8 มิลลิเมตร  
 รัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



ตัวอย่าง 30: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.8 มิลลิเมตร  
 รัศมีจุ่มมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



ตัวอย่าง 31: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกกัด 0.8 มิลลิเมตร  
 รัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



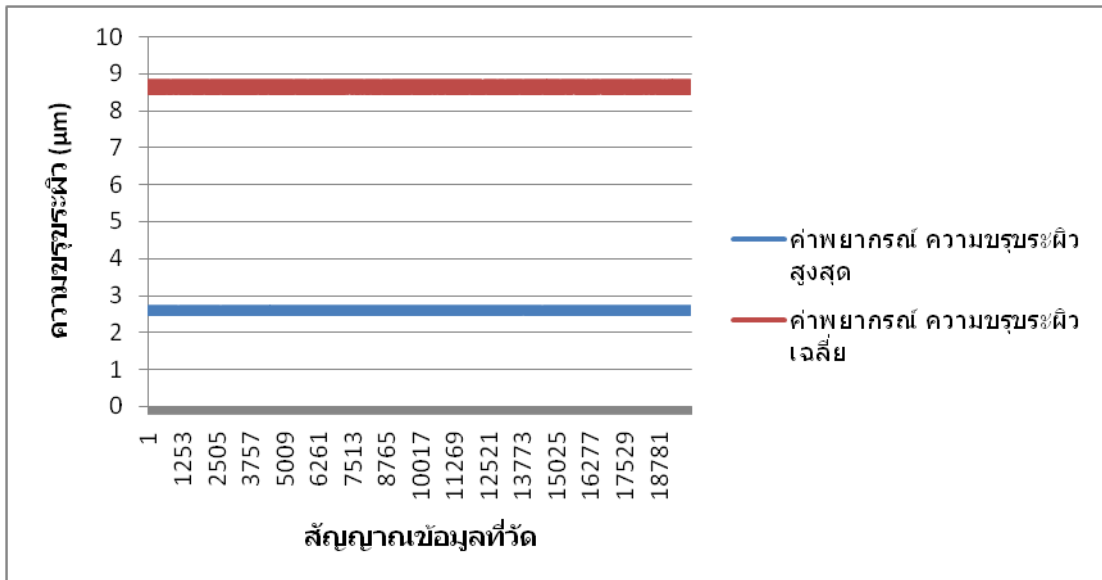
ภาคผนวก ค.

เทียบความแม่นยำระบบตรวจติดตามความขรุขระผิว

ภาคผนวก ค เป็นการเทียบความแม่นยำของข้อมูลโดยการแทนค่าจากสัญญาณแรงที่ได้จากเครื่องออกซิลโลสโคปซึ่งเป็นเครื่องจับเก็บสัญญาณแรงตัดแล้วนำมาพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวเปรียบเทียบกับความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้จากระบบการตรวจติดตามที่พัฒนาขึ้น

ตัวอย่าง 1: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

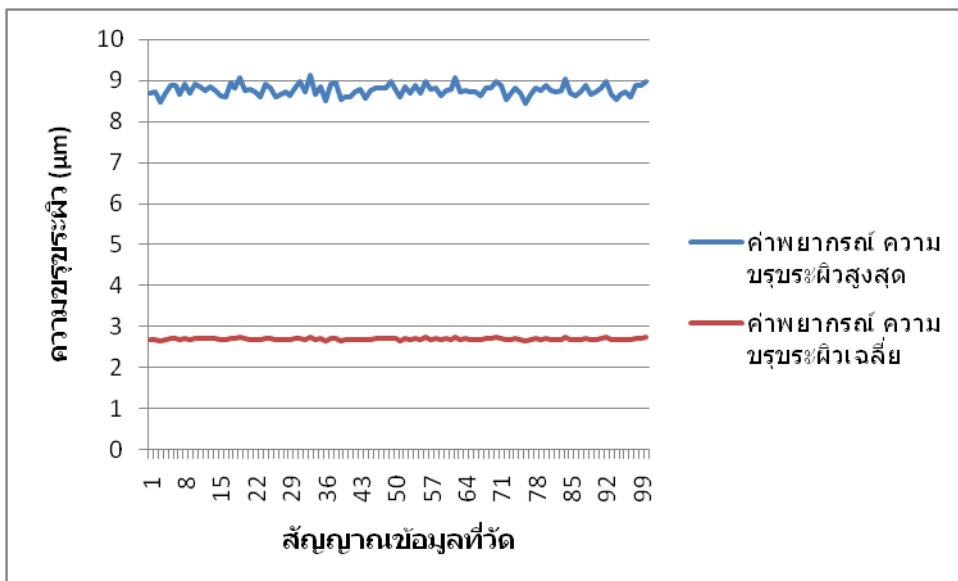
ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวจากสัญญาณแรงตัดที่ได้จากออสซิลโลสโคป



ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวสูงสุด 8.639839 µm

ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวเฉลี่ย 2.592079 µm

ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวจากสัญญาณแรงตัดที่ได้จากระบบตรวจติดตาม



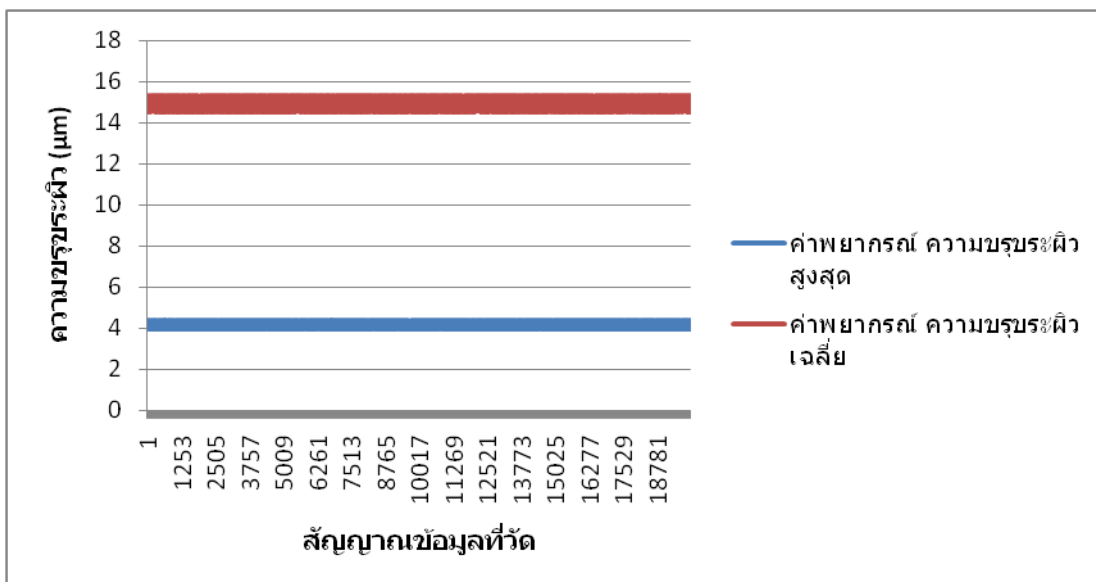
ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวสูงสุด 8.769898 µm

ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวเฉลี่ย 2.704429 µm



ตัวอย่าง 2: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

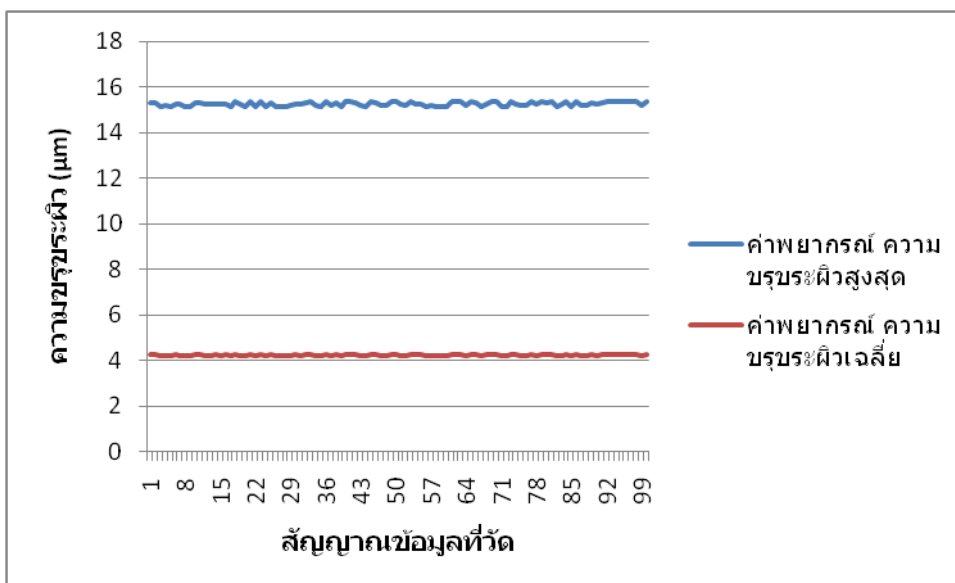
ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวจากสัญญาณแรงตัดที่ได้จากออสซิลโลสโคป



ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวสูงสุด 14.946003 µm

ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวเฉลี่ย 4.151854 µm

ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวจากสัญญาณแรงตัดที่ได้จากระบบตรวจติดตาม

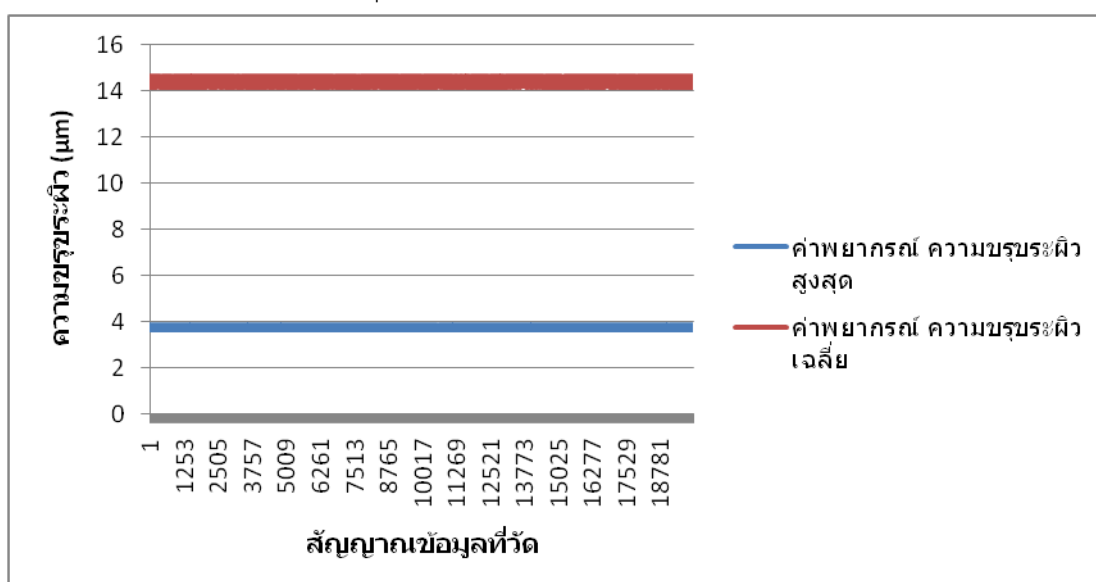


ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวสูงสุด 15.252582 µm

ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวเฉลี่ย 4.239480 µm

ตัวอย่าง 3: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

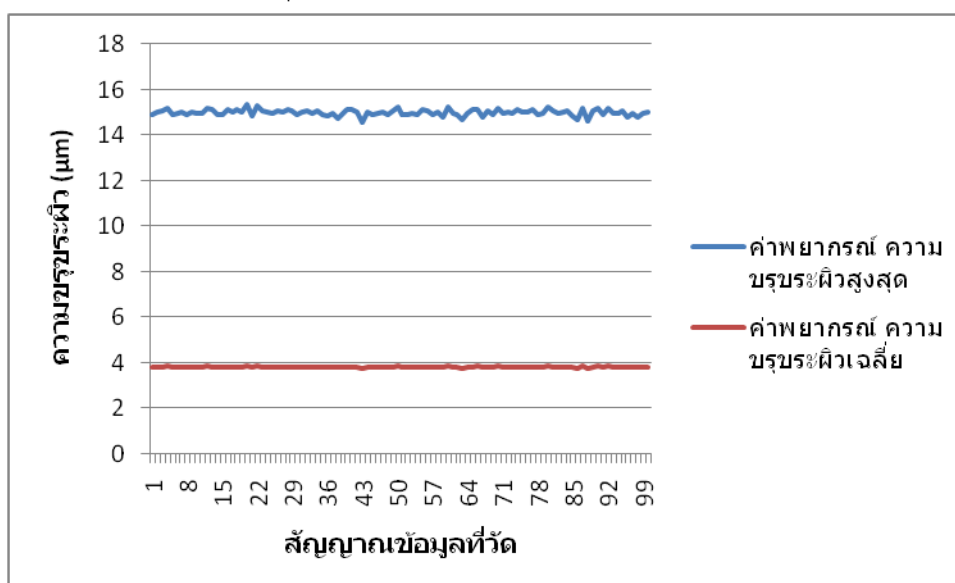
ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวจากสัญญาณแรงตัดที่ได้จากออสซิลโลสโคป



ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวสูงสุด 14.411290 µm

ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวเฉลี่ย 3.756935 µm

ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวจากสัญญาณแรงตัดที่ได้จากระบบตรวจติดตาม

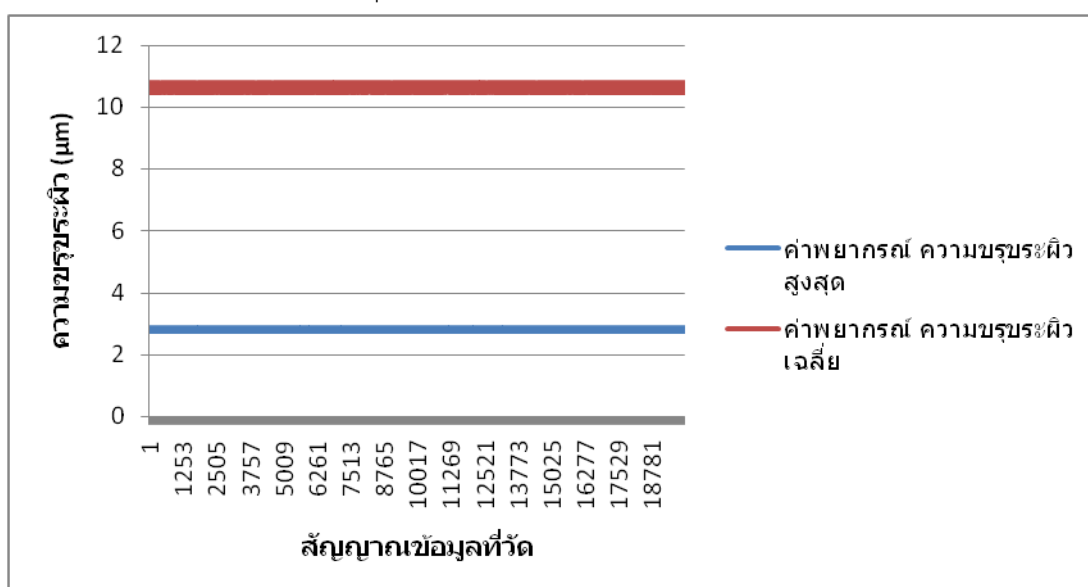


ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวสูงสุด 14.978506 µm

ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวเฉลี่ย 3.815202 µm

ตัวอย่าง 4: ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

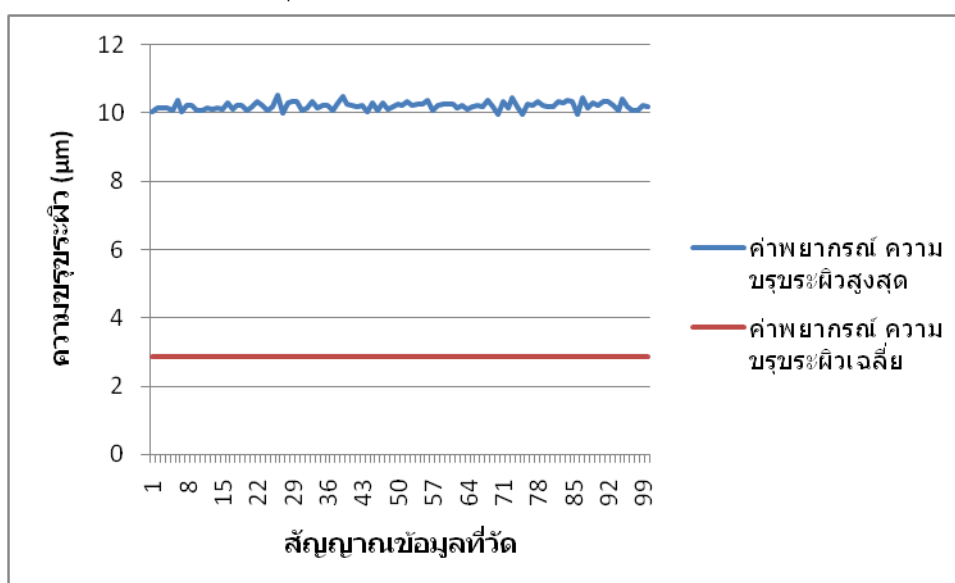
ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวจากสัญญาณแรงตัดที่ได้จากออสซิลโลสโคป



ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวสูงสุด 10.650687 µm

ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวเฉลี่ย 2.796852 µm

ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวจากสัญญาณแรงตัดที่ได้จากระบบตรวจติดตาม

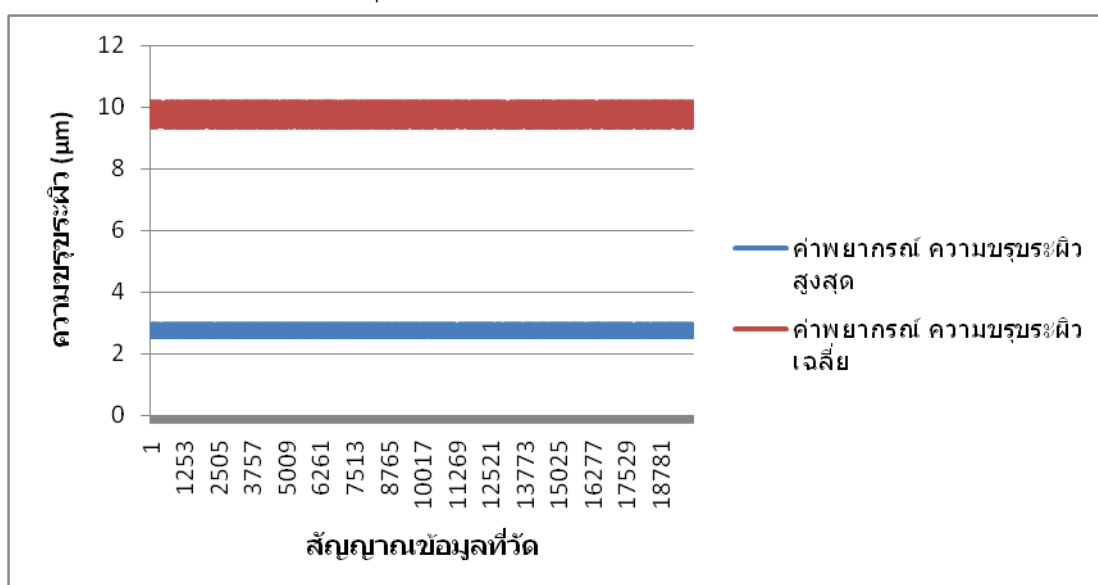


ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวสูงสุด 10.205413 µm

ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวเฉลี่ย 2.861102 µm

ตัวอย่าง 5: ความเร็วตัด 200 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

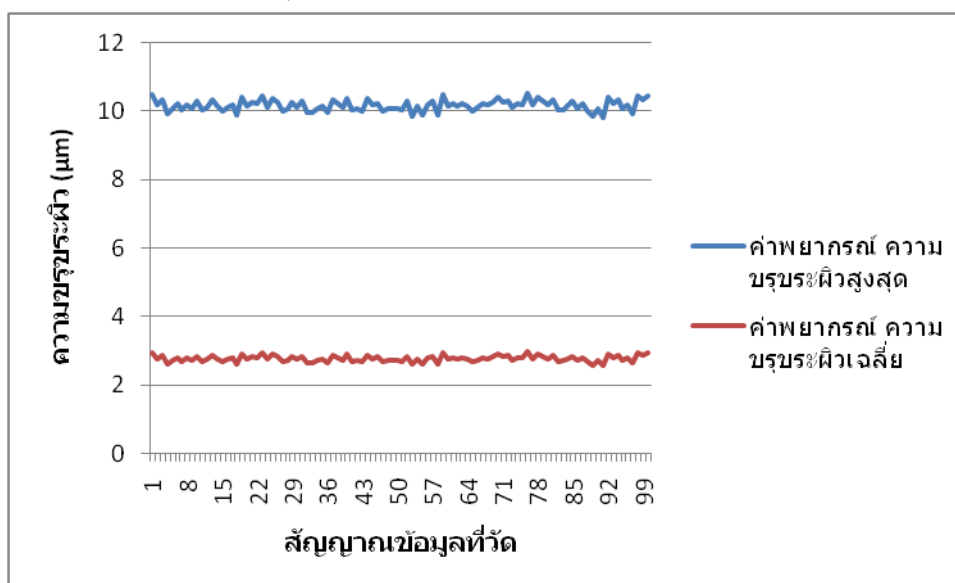
ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวจากสัญญาณแรงตัดที่ได้จากออสซิลโลสโคป



ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวสูงสุด 2.736617 µm

ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวเฉลี่ย 9.801455 µm

ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวจากสัญญาณแรงตัดที่ได้จากระบบตรวจติดตาม



ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวสูงสุด 10.180612 µm

ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวเฉลี่ย 2.768327 µm

	ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวเฉลี่ย		ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวสูงสุด	
	ระบบตรวจติดตาม	ออสซิลโลสโคป	ระบบตรวจติดตาม	ออสซิลโลสโคป
ตัวอย่าง 1	2.704429	2.592079	8.769898	8.639839
ตัวอย่าง 2	4.23948	4.151854	15.252582	14.946003
ตัวอย่าง 3	3.815202	3.756935	14.978506	14.41129
ตัวอย่าง 4	2.861102	2.796852	10.205413	10.650687
ตัวอย่าง 5	2.768327	2.736617	10.180612	9.801455

ระบบตรวจติดตามค่าความขรุขระผิวมีค่าความแม่นยำ 97.25 %

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ศิริพงษ์ ดำรงทวีศักดิ์ เกิดวันที่ 27 สิงหาคม พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2552