



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)

ปริญญา

วิศวกรรมอุตสาหกรรม

สาขา

วิศวกรรมอุตสาหกรรม

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่มีผลมาจาก
การเอียงศูนย์ของมิดตัดเน็อนบอลโนส

A Development of Mathematical Model for Surface Roughness Prediction Affected by
Run-Out of Ballnose Cutting Tools

นามผู้วิจัย นายภัทรพงษ์ นิภากุล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ชนะ รัชศิริ, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์พิรุทธิ์ ชาญเศรษฐิกุล, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน
ที่มีผลมาจากการเอียงศูนย์ของมีดตัดเนื้อบอลโนส

A Development of Mathematical Model for Surface Roughness Prediction
Affected by Run-Out of Ballnose Cutting Tools

โดย

นายภัทรพงษ์ นิภากุล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)
พ.ศ. 2552

ภัทรพงษ์ นิภากุล 2552: การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าความ
หยาบผิวของชิ้นงานที่มีผลมาจากการเอียงศูนย์ของมิดดัดเดียนบอลโนส ปรินญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ) สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ชนะ รักเกียรติ,
D.Eng. 196 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซี โดยได้ศึกษา
ผลกระทบจากการเอียงศูนย์ของมิดดัดเดียนบอลโนส ซึ่งประกอบไปด้วย การเอียงศูนย์ใน
แนวขนาน และการเอียงศูนย์เชิงมุม เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายเส้นทาง
การเคลื่อนที่ของคมมิดดัดเดียนบอลโนส พื้นผิวของชิ้นงานที่ถูกกัดด้วยมิดดัดเดียนบอลโนส
และค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน โดยได้จำลองการกัดชิ้นงานและทดลองกัดขึ้นรูปชิ้นงานที่มีค่า
เอียงศูนย์ในแนวขนานและค่าเอียงศูนย์เชิงมุมแตกต่างกัน และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากผล
การจำลองกัดชิ้นงานและการทดลองกัดชิ้นงาน เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์และแนวโน้มของ
ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น

จากการศึกษาพบว่า เมื่อปรับค่าเอียงศูนย์ในแนวขนาน (ΔR) และค่าเอียงศูนย์เชิงมุม (θ)
แล้ว ค่าความกว้างของแนวกัดในหนึ่งเส้นแนวกัดจะมีขนาดกว้างขึ้นตามขนาดของค่าการเอียง
ศูนย์ที่เพิ่มขึ้น แต่ค่าความสูงสเกลลอป (h) และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) จะมีขนาดลดลงตาม
ขนาดของค่าการเอียงศูนย์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลลัพธ์ทั้งจากการจำลองกัดชิ้นงานและการทดลองกัด
ชิ้นงานมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน แต่ค่าความสูงสเกลลอป (h) และค่าความหยาบผิว
เฉลี่ย (R_a) ที่ได้จากการทดลองกัดชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบ ค่าการเอียงศูนย์เดียวกัน ทั้งกรณี
การเอียงศูนย์ในแนวขนานและการเอียงศูนย์เชิงมุม มีค่าไม่เท่ากันกับค่าที่ได้จากการจำลองกัด
ชิ้นงาน ทั้งนี้เนื่องจากมีข้อจำกัดของการเอียงศูนย์ นั่นคือ ในขณะที่ทำการกัดชิ้นงานด้วยค่าความ
เอียงศูนย์ที่แตกต่างกัน หากกำหนดค่าความเอียงศูนย์ที่มีค่ามาก จะทำให้ลักษณะของการตัดเฉือน
ของคมมิดดัดเดียนบอลโนสมีการตัดเฉือนที่ผิดปกติจนทำให้ประสิทธิภาพการตัดเฉือนลดลง

Pattarapong Nipakul 2009: A Development of Mathematical Model for Surface Roughness Prediction Affected by Run-Out of Ballnose Cutting Tools. Master of Engineering (Industrial Engineering), Major Field: Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering. Thesis Advisor: Mr. Chana Raksiri, D.Eng. 196 pages.

The objective for this research is to study the effect of run out, offset misalignment and angular misalignment, by ballnose cutting tools in CNC milling machine. The mathematical model is developed for prediction cutting paths, milling surface geometry and surface roughness. The experiment to verify offset misalignment variable and angular misalignment variable effect to surface roughness are compared between simulation of milling process and manufactured by CNC milling machine.

The experiment results shown the adjustment of offset misalignment variable (ΔR) and angular misalignment variable (θ), the wide of cutting path is increased by run out adjustment but scallop height (h) and roughness (R_a) is reduced by run out adjustment. The trend of result of simulation of milling process is the same with manufactured by CNC milling machine. But scallop height (h) and roughness (R_a) for each run out adjustment have been different because the constraint of run out distance. The more run out distance the less cutting efficiency.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อ.ดร.ชนะ รักยศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รศ.ดร.พิรุณ ชาญเศรษฐิกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้ความรู้ พร้อมทั้งคำแนะนำและแนวทางในการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ สถาบันค้ำคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDPT) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในด้านเครื่องจักรกัட்சีเอ็นซี

ขอขอบคุณ คุณอนุศักดิ์ กาญจนี คุณเลิศ ทองเจือ และคุณศุภชัย กะทอง ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการเตรียมชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัย การกัட்சีชิ้นงาน ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ในด้านเครื่องกัட்சีเอ็นซี

ขอขอบคุณ คุณกัมปนาท อ่วมกุล ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในด้านเครื่องมือวัดผิวชิ้นงาน

และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจในทุกด้าน ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ภัทรพงษ์ นิภากุล

พฤษภาคม 2552

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	34
อุปกรณ์	34
วิธีการ	34
ผลและวิจารณ์	41
สรุปและข้อเสนอแนะ	97
สรุป	97
ข้อเสนอแนะ	99
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	101
ภาคผนวก	103
ภาคผนวก ก ภาพชิ้นงานที่เกิดจากการกัดเยื้องศูนย์ในแนวนาน	104
ภาคผนวก ข ภาพชิ้นงานที่เกิดจากการกัดเยื้องศูนย์เชิงมุม	117
ภาคผนวก ค ภาพพิกัดพื้นผิวชิ้นงานที่เกิดจากการกัดเยื้องศูนย์ในแนวนาน	130
ภาคผนวก ง ภาพพิกัดพื้นผิวชิ้นงานที่เกิดจากการกัดเยื้องศูนย์เชิงมุม	155
ภาคผนวก จ ค่าความสูงสเกลลอปของชิ้นงานที่มีผลจากการเยื้องศูนย์ใน แนวนาน	180
ภาคผนวก ฉ ค่าความสูงสเกลลอปของชิ้นงานที่มีผลจากการเยื้องศูนย์เชิงมุม	184
ภาคผนวก ช ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงานที่มีผลจากการเยื้องศูนย์ใน แนวนาน	188
ภาคผนวก ซ ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงานที่มีผลจากการเยื้องศูนย์เชิงมุม	192
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	196

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การเปรียบเทียบการทำงานระหว่างเครื่องกัดทั่วไปกับเครื่องกัดซีเอ็นซี	5
2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงสเกลลอปและค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองกัดชิ้นงานที่ค่าเอียงศูนย์ในแนวนานแตกต่างกัน	79
3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงสเกลลอปและค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองกัดชิ้นงานที่ค่าเอียงศูนย์เชิงมุมแตกต่างกัน	85
4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงสเกลลอปและค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองกัดชิ้นงานที่ค่าเอียงศูนย์ในแนวนานแตกต่างกัน	87
5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงสเกลลอปและค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองกัดชิ้นงานที่ค่าเอียงศูนย์เชิงมุมแตกต่างกัน	88
6	การเปรียบเทียบค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการจำลองกัดชิ้นงานกับการทดลองกัดชิ้นงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์ในแนวนาน	89
7	การเปรียบเทียบค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการจำลองกัดชิ้นงานกับการทดลองกัดชิ้นงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์เชิงมุม	91
8	การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองกัดชิ้นงานกับการทดลองกัดชิ้นงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์ในแนวนาน	92
9	การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองกัดชิ้นงานกับการทดลองกัดชิ้นงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์เชิงมุม	94

ตารางผนวกที่

จ1	ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกัดผิวชิ้นงานที่มีค่าเอียงศูนย์ในแนวนานเป็น 0.0 มิลลิเมตร	181
จ2	ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกัดผิวชิ้นงานที่มีค่าเอียงศูนย์ในแนวนานเป็น 0.2 มิลลิเมตร	181
จ3	ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกัดผิวชิ้นงานที่มีค่าเอียงศูนย์ในแนวนานเป็น 0.4 มิลลิเมตร	182

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
จ4 ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกักผิวชั้นงานที่มีค่าเอียงศูนย์ในแนวนาน เป็น 0.6 มิลลิเมตร	182
จ5 ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกักผิวชั้นงานที่มีค่าเอียงศูนย์ในแนวนาน เป็น 0.8 มิลลิเมตร	183
จ6 ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกักผิวชั้นงานที่มีค่าเอียงศูนย์ในแนวนาน เป็น 1.0 มิลลิเมตร	183
ฉ1 ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกักผิวชั้นงานที่มีค่าเอียงศูนย์เชิงมุมเป็น 0.0 องศา	185
ฉ2 ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกักผิวชั้นงานที่มีค่าเอียงศูนย์เชิงมุมเป็น 0.5 องศา	185
ฉ3 ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกักผิวชั้นงานที่มีค่าเอียงศูนย์เชิงมุมเป็น 1.0 องศา	186
ฉ4 ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกักผิวชั้นงานที่มีค่าเอียงศูนย์เชิงมุมเป็น 1.5 องศา	186
ฉ5 ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกักผิวชั้นงานที่มีค่าเอียงศูนย์เชิงมุมเป็น 2.0 องศา	187
ฉ6 ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกักผิวชั้นงานที่มีค่าเอียงศูนย์เชิงมุมเป็น 2.5 องศา	187
ช1 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกักผิวชั้นงานที่มีค่าเอียงศูนย์ในแนวนาน เป็น 0.0 มิลลิเมตร	189
ช2 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกักผิวชั้นงานที่มีค่าเอียงศูนย์ในแนวนาน เป็น 0.2 มิลลิเมตร	189
ช3 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกักผิวชั้นงานที่มีค่าเอียงศูนย์ในแนวนาน เป็น 0.4 มิลลิเมตร	190
ช4 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกักผิวชั้นงานที่มีค่าเอียงศูนย์ในแนวนาน เป็น 0.6 มิลลิเมตร	190

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ช5 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกัดผิวชั้นงานที่มีค่าเยื้องศูนย์ในแนวนอน เป็น 0.8 มิลลิเมตร	191
ช6 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกัดผิวชั้นงานที่มีค่าเยื้องศูนย์ในแนวนอน เป็น 1.0 มิลลิเมตร	191
ช1 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกัดผิวชั้นงานที่มีค่าเยื้องศูนย์เชิงมุมเป็น 0.0 องศา	193
ช2 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกัดผิวชั้นงานที่มีค่าเยื้องศูนย์เชิงมุมเป็น 0.5 องศา	193
ช3 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกัดผิวชั้นงานที่มีค่าเยื้องศูนย์เชิงมุมเป็น 1.0 องศา	194
ช4 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกัดผิวชั้นงานที่มีค่าเยื้องศูนย์เชิงมุมเป็น 1.5 องศา	194
ช5 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกัดผิวชั้นงานที่มีค่าเยื้องศูนย์เชิงมุมเป็น 2.0 องศา	195
ช6 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกัดผิวชั้นงานที่มีค่าเยื้องศูนย์เชิงมุมเป็น 2.5 องศา	195

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	เครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกน รุ่น Chevalier 2040 VMC	4
2	มีดตัดเนื้อบอลโนส	7
3	มีดตัดเนื้อบอลโนสเอ็นคัมิล	7
4	มีดตัดเนื้อโปรไฟล์	8
5	มีดตัดเนื้อชนิดปาดผิวงาน	8
6	มีดตัดเนื้อชนิดกัดผิวสำเร็จ	9
7	มีดตัดเนื้อชนิดกัดผิวหยาบ	9
8	คุณสมบัติของวัสดุมีดตัดเนื้อ	10
9	ความเร็วรอบ อัตราป้อนกัด และความเร็วในการตัดเนื้อ	12
10	รูปแบบการกัดแบบซิกแซ็ก	13
11	รูปแบบการกัดแบบซิก	13
12	รูปแบบการกัดแบบซิกผสมคอนทัวร์	14
13	รูปแบบการกัดแบบรอบวง	14
14	รูปแบบการกัดแบบขอบเขตชิ้นงาน	15
15	รูปแบบการกัดแบบกัดผิวข้าง	15
16	รูปแบบการกัดแบบกัดผิวข้างตามพื้นที่จำกัด	16
17	รูปร่างของมีดตัดเนื้อบอลโนสและลักษณะของคมมีดตัดเนื้อ	17
18	จุดพิกัดตำแหน่งคมมีดที่ผิวบนสุดของชิ้นงาน (จุดพิกัด C1)	17
19	เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมมีดที่ขอบบนสุดของชิ้นงาน	19
20	การเกิดพื้นผิวสเกลลอป (Scallop surface)	20
21	ค่าความสูงสเกลลอป	21
22	ผิวงานแบบคลื่น	22
23	ผิวงานแบบความหยาบ	23
24	ผิวงานแบบมีตำหนิ	23
25	ผิวงานแบบรวมความเบี่ยงเบนทั้งสามประเภท	24

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	การวัดค่าความหยาบผิว R_t	24
27	การวัดค่าความหยาบผิว R_a	25
28	การวัดค่าความหยาบผิว R_z	26
29	อุปกรณ์วัดความหยาบผิวแบบแผ่นเทียบผิว	27
30	เครื่องวัดความหยาบผิวแบบแสดงผลที่หน้าปัด	27
31	เครื่องวัดความหยาบผิวแบบพิมพ์ข้อมูลและกราฟความหยาบผิว	28
32	เครื่องฟอร์ม تراเซอร์ รุ่น Mitutoyo formtracer CS400	28
33	กล้องไมโครสโคป รุ่น TESA Vision 300	29
34	การเอียงศูนย์ในแนวนาน	30
35	การเอียงศูนย์เชิงมุม	30
36	การเอียงศูนย์แบบเคลื่อนตัวไปมา	31
37	รูปแบบขั้นตอนการศึกษาและการทำวิจัย	35
38	ตัวยึดจับมีดตัดเลื่อนแบบปรับค่าเอียงศูนย์ในแนวนานได้	37
39	รูปแบบการกัดผิวสำหรับการทดลองการเอียงศูนย์ในแนวนาน	38
40	อุปกรณ์ลิ้มเสริมที่มีมุมองศาที่แตกต่างกัน	38
41	มีดตัดเลื่อนบอลโนสที่ถูกประกอบด้วยอุปกรณ์ลิ้มเสริม	39
42	รูปแบบการกัดผิวสำหรับการทดลองการเอียงศูนย์เชิงมุม	39
43	ค่าเอียงศูนย์และมุมเริ่มต้นในแต่ละเส้นแนวกัดของการเอียงศูนย์ในแนวนาน	41
44	ค่าเอียงศูนย์และมุมเริ่มต้นในแต่ละเส้นแนวกัดของการเอียงศูนย์เชิงมุม	42
45	ความลึกของการตัดเลื่อนมากที่สุดที่ขึ้นอยู่กับมุมเอียงศูนย์เชิงมุม	43
46	การแปลงค่าความลึกของการตัดเลื่อนเป็นระบบพิกัดทรงกลม	44
47	การพิจารณาการเอียงศูนย์ในพิกัดแกน x และแกน y	45
48	การย้ายพิกัดตำแหน่งเอียงศูนย์จากแนวศูนย์กลางเพลลาหมุนตามช่วงเวลา t	46
49	เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดที่ 1 ของมีดตัดเลื่อนบอลโนส (ไม่มีการเอียงศูนย์)	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
50	เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดที่ 2 ของมีดตัดเฉือนบอลโนส (ไม่มีการเอียงศูนย์)	51
51	เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดคู่ของมีดตัดเฉือนบอลโนส (ไม่มีการเอียงศูนย์)	51
52	เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดที่ 1 ของมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์ในแนวขนาน	52
53	เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดที่ 2 ของมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์ในแนวขนาน	53
54	เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดคู่ของมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์ในแนวขนาน	53
55	เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดที่ 1 ของมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์เชิงมุม	54
56	เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดที่ 2 ของมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์เชิงมุม	55
57	เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดคู่ของมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์เชิงมุม	55
58	พื้นผิวที่ถูกกัดตามแนวแกน x ใน 1 เส้นแนวกัด ที่เกิดจากการเอียงศูนย์ในแนวขนาน	56
59	พื้นผิวที่ถูกกัดตามแนวแกน x ใน 1 เส้นแนวกัด ที่เกิดจากการเอียงศูนย์เชิงมุม	57
60	พื้นผิวสเกลลอปที่เกิดขึ้นจากการเอียงศูนย์ในแนวขนาน	58
61	พื้นผิวสเกลลอปที่เกิดขึ้นจากการเอียงศูนย์เชิงมุม	58
62	การจำลองชิ้นงานสำหรับการกัดผิวด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนส (ไม่เอียงศูนย์)	60
63	การจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดใน 1 เส้นแนวกัดด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนส (ไม่เอียงศูนย์)	60
64	การจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดใน 2 เส้นแนวกัดด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนส (ไม่เอียงศูนย์)	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
65	การจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดตลอดชิ้นงานด้วยมิดตัดเฉือนบอลโนส (ไม่เยื้องศูนย์)	61
66	การวิเคราะห์พิกัดความสูงต่ำของผิวชิ้นงาน (ไม่เยื้องศูนย์)	62
67	การจำลองชิ้นงานสำหรับการกัดผิวที่มีการเยื้องศูนย์ในแนวนาน	63
68	การจำลองการหมุนของมิดตัดเฉือนบอลโนสที่มีการเยื้องศูนย์ในแนวนาน	64
69	การจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดใน 1 เส้นแนวกัดด้วยมิดตัดเฉือนบอลโนสที่มีการเยื้องศูนย์ในแนวนาน	64
70	การจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดใน 2 เส้นแนวกัดด้วยมิดตัดเฉือนบอลโนสที่มีการเยื้องศูนย์ในแนวนาน	65
71	การจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดตลอดชิ้นงานด้วยมิดตัดเฉือนบอลโนสที่มีการเยื้องศูนย์ในแนวนาน	66
72	การวิเคราะห์พิกัดความสูงต่ำของผิวชิ้นงาน (การเยื้องศูนย์ในแนวนาน)	66
73	การจำลองชิ้นงานสำหรับการกัดผิวที่มีการเยื้องศูนย์เชิงมุม	68
74	การจำลองการหมุนของมิดตัดเฉือนบอลโนสที่มีการเยื้องศูนย์เชิงมุม	68
75	การจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดใน 1 เส้นแนวกัดด้วยมิดตัดเฉือนบอลโนสที่มีการเยื้องศูนย์เชิงมุม	69
76	การจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดใน 2 เส้นแนวกัดด้วยมิดตัดเฉือนบอลโนสที่มีการเยื้องศูนย์เชิงมุม	70
77	การจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดตลอดชิ้นงานด้วยมิดตัดเฉือนบอลโนสที่มีการเยื้องศูนย์เชิงมุม	70
78	การวิเคราะห์พิกัดความสูงต่ำของผิวชิ้นงาน (การเยื้องศูนย์เชิงมุม)	71
79	พิกัดความสูงของพื้นผิวในแต่ละช่วงตัวอย่าง	73
80	ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของคมมิดตัดเฉือนบอลโนสคมมีดคู่ที่มีผลจากการเยื้องศูนย์ในแนวนาน	75
81	ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมิดตัดเฉือนบอลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์ในแนวนานเป็น 0.0 มิลลิเมตร	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
82	ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์ใน แนวนานเป็น 0.2 มิลลิเมตร	76
83	ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์ใน แนวนานเป็น 0.4 มิลลิเมตร	77
84	ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์ใน แนวนานเป็น 0.6 มิลลิเมตร	77
85	ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์ใน แนวนานเป็น 0.8 มิลลิเมตร	78
86	ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์ใน แนวนานเป็น 1.0 มิลลิเมตร	78
87	ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของคมมีดตัดเฉือนบอลโนสคมมีดคู่ที่มีผลจาก การเยื้องศูนย์เชิงมุม	80
88	ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์ เชิงมุมเป็น 0.0 องศา	81
89	ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์ เชิงมุมเป็น 0.5 องศา	82
90	ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์ เชิงมุมเป็น 1.0 องศา	82
91	ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์ เชิงมุมเป็น 1.5 องศา	83
92	ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์ เชิงมุมเป็น 2.0 องศา	83
93	ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์ เชิงมุมเป็น 2.5 องศา	84
94	การกัดผิวชิ้นงานด้วยเครื่องกัดตั้งซีเอ็นซีสามแกน รุ่น Chevalier 2040 VMC	86
95	การวัดผิวชิ้นงานด้วยเครื่องฟอร์มทราเซอร์ รุ่น Mitutoyo formtracer CS400	87

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
96	การเปรียบเทียบค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการจำลองกีดขึ้นงานกับการทดลองกีดขึ้นงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์ในแนวนาน	90
97	การเปรียบเทียบค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการจำลองกีดขึ้นงานกับการทดลองกีดขึ้นงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์เชิงมุม	91
98	การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองกีดขึ้นงานกับการทดลองกีดขึ้นงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์ในแนวนาน	93
99	การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองกีดขึ้นงานกับการทดลองกีดขึ้นงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์เชิงมุม	94
100	การทำงานของคมมีดตัดเนื้อที่มีทิศทางการตัดเนื้อที่ผิดปกติ	95
101	การกีดขึ้นงานที่ค่าสัดส่วนของความเร็วย้อนต่ออัตราป้อนกีดน้อย	99
ภาพผนวกที่		
ก1	ชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.0$ มิลลิเมตร	105
ก2	ชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.0$ มิลลิเมตร	105
ก3	ชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.0$ มิลลิเมตร	106
ก4	ชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.0$ มิลลิเมตร	106
ก5	ชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.2$ มิลลิเมตร	107
ก6	ชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.2$ มิลลิเมตร	107
ก7	ชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.2$ มิลลิเมตร	108
ก8	ชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.2$ มิลลิเมตร	108
ก9	ชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.4$ มิลลิเมตร	109
ก10	ชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.4$ มิลลิเมตร	109
ก11	ชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.4$ มิลลิเมตร	110
ก12	ชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.4$ มิลลิเมตร	110

สารบัญภาพ (ต่อ)

[illegible]

[illegible]

[illegible]

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ง18	พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.0$ องศา
ง19	พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.0$ องศา
ง20	พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.0$ องศา
ง21	พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.5$ องศา
ง22	พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.5$ องศา
ง23	พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.5$ องศา
ง24	พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.5$ องศา

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน ที่มีผลมาจากการเยื้องศูนย์ของมีดตัดเฉือนบอลโนส

A Development of Mathematical Model for Surface Roughness Prediction Affected by Run-Out of Ballnose Cutting Tools

คำนำ

อุตสาหกรรมแม่พิมพ์ มีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็น โลหะ พลาสติก แก้ว และโพลีเมอร์ ทั้งนี้เพราะแม่พิมพ์ช่วยให้ผลิตภัณฑ์สามารถมีรูปร่างเหมือนกัน คราวละหลายๆ และยังทำให้ผลิตภัณฑ์มีมาตรฐานระดับเดียวกัน แม่พิมพ์มีหลากหลายประเภทขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะขึ้นรูปและวัสดุที่นำมาผลิตแม่พิมพ์ เช่น แม่พิมพ์โลหะ แม่พิมพ์พลาสติก แม่พิมพ์ยาง แม่พิมพ์แก้ว และอื่นๆ โดยแนวโน้มอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ทั้งในต่างประเทศและในประเทศไทยในปัจจุบันกำลังเริ่มมีบทบาทในวงการอุตสาหกรรมต่างๆ มากขึ้น เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเครื่องมือแพทย์ อุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น

ในสถานการณ์ปัจจุบันอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ได้มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงในหลายๆ ด้าน โดยการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญที่สุดคือ การที่มีความต้องการปรับปรุงคุณภาพของแม่พิมพ์ให้มีคุณภาพสูงขึ้น มีความเที่ยงตรงมากขึ้น เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมาได้มาตรฐานตรงตามเกณฑ์ที่ตั้งไว้ ซึ่งองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญสำหรับแม่พิมพ์ก็คือ ความหยาบของพื้นผิวแม่พิมพ์ โดยปัญหาทั่วไปที่พบก็คือ การขาดเครื่องมือและเครื่องจักรที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวของแม่พิมพ์แบบละเอียด และการขาดองค์ความรู้และความชำนาญที่สูง และนอกจากนี้จะต้องมั่นใจว่าในการผ่านกระบวนการการขึ้นรูปแม่พิมพ์ในแต่ละขั้น แม่พิมพ์จะให้มิติและรูปร่างได้ตามเกณฑ์คงเดิม และให้ค่าความหยาบผิวที่เหมาะสมเพื่อในการปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวในขั้นตอนต่อไป

สำหรับกระบวนการที่จะช่วยให้เกิดความมั่นใจว่า ในการผ่านกระบวนการการขึ้นรูปของแม่พิมพ์ในแต่ละขั้นของแม่พิมพ์นั้นจะยังให้มิติและรูปร่างได้ตามเกณฑ์คงเดิม และได้ค่าความหยาบผิวที่เหมาะสม ก็คือ กระบวนการการทำนายรูปแบบลักษณะพื้นผิวและค่าความหยาบของพื้นผิวแม่พิมพ์ โดยพิจารณาจากผลกระทบของค่าการเยื้องศูนย์ของมีดตัดเฉือน ซึ่งกระบวนการนี้

ได้ศึกษาและพัฒนารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเส้นทางการเคลื่อนที่ และลักษณะการหมุนของมิดดัดเนียน ที่ได้จากผลกระทบของค่าการเอียงศูนย์ของมิดดัดเนียนที่เกิดขึ้นในรูปแบบต่างๆ เพื่อนำไปคำนวณและแสดงผลให้เห็นถึงรูปแบบลักษณะพื้นผิว และค่าความหยาบของพื้นผิวแม่พิมพ์ที่จะเกิดขึ้นก่อนที่จะนำเข้าไปผ่านกระบวนการการขึ้นรูปแม่พิมพ์จริง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเส้นทางการเคลื่อนที่ และลักษณะการหมุนของมิดดัดเนียน ที่ได้จากผลกระทบของค่าการเอียงศูนย์ของมิดดัดเนียนชนิดบอลโนส (Ballnose) ซึ่งมีดัดเนียนชนิดนี้จะให้รูปแบบลักษณะพื้นผิวและค่าความหยาบของพื้นผิวที่แตกต่างกันเมื่อได้รับผลกระทบของค่าการเอียงศูนย์ของมิดดัดเนียนได้อย่างเด่นชัด ทำให้ต้องพิจารณาว่าพื้นผิวที่เกิดขึ้นจากการทำนายดังกล่าว นั้น มีความเหมาะสมกับงานที่จะต้องนำไปใช้จริงหรือไม่

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาลักษณะรูปแบบของการเยื้องศูนย์ของมิดคัตเน็อน
2. เพื่อพัฒนาสมการการเคลื่อนที่ของมิดคัตเน็อนเมื่อมีผลกระทบจากการเยื้องศูนย์
3. เพื่อพัฒนาออกแบบลักษณะพื้นผิวชิ้นงานเมื่อถูกกัดผิวเมื่อมีผลกระทบจากการเยื้องศูนย์
4. เพื่อพัฒนาแบบจำลองในการทำนายค่าความหยาบผิวที่เกิดขึ้นจากการกัดผิวชิ้นงาน

ขอบเขต

1. ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายรูปแบบการเคลื่อนที่ลักษณะพื้นผิวและค่าความหยาบผิวที่เกิดขึ้น จากการกัดชิ้นงานที่มีผลของการเยื้องศูนย์ของมิดคัตเน็อนบอลโนส ทั้งการเยื้องศูนย์ในแนวนอน และการเยื้องศูนย์เชิงมุม
2. ทำการทดลองการกัดชิ้นงานที่มีผลกระทบของการเยื้องศูนย์ของมิดคัตเน็อนบอลโนสที่มีค่าแตกต่างกัน สำหรับกระบวนการกัดชิ้นงานอะลูมิเนียมผิวเรียบ ทั้งการเยื้องศูนย์ในแนวนอน และการเยื้องศูนย์เชิงมุม เพื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิว และค่าความหยาบผิวที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดชิ้นงาน

การตรวจเอกสาร

ทฤษฎี

เครื่องกัดซีเอ็นซี (CNC Milling Machine)

ซีเอ็นซี (CNC) ย่อมาจากคำว่า “Computerized Numerical Control” เป็นระบบที่ควบคุมเครื่องจักรกลด้วยระบบตัวเลขและตัวอักษรด้วยคอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถสูง ทำให้สามารถจัดการกับข้อมูลที่ป้อนเข้าไปในระบบเอ็นซี และประมวลผลข้อมูลเพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกล โดยการเคลื่อนที่ต่างๆ ตลอดจนการทำงานอื่นๆ ของเครื่องจักรกล ได้ถูกควบคุมโดยรหัสคำสั่งที่ประกอบด้วยตัวเลข ตัวอักษร และสัญลักษณ์อื่นๆ ซึ่งจะถูกละเปลี่ยนเป็นคลื่นสัญญาณ (Pulse) ของกระแสไฟฟ้าหรือสัญญาณออกอื่นๆ ที่ได้ไปกระตุ้นมอเตอร์หรืออุปกรณ์อื่นๆ เพื่อให้เครื่องจักรกลทำงานตามขั้นตอนที่ต้องการ

เครื่องกัดซีเอ็นซีที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงได้ดังภาพที่ 1 เป็นเครื่องจักรที่มีการทำงานค่อนข้างกว้าง มีความเที่ยงตรงสูง และมีความยืดหยุ่นต่อการใช้งาน กล่าวคือ นอกจากจะสามารถทำงานกัดเช่นเดียวกับเครื่องกัดแบบควบคุมด้วยมือแล้ว ยังสามารถทำงานอื่นๆ ที่ไม่สามารถทำได้ด้วยเครื่องกัดแบบควบคุมด้วยมือ เช่น การคว้านรู การกัดขึ้นรูปผิวโค้ง รวมถึงการกัดขึ้นรูปที่มีรูปทรงที่ซับซ้อนได้อีกด้วย



ภาพที่ 1 เครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกน รุ่น Chevalier 2040 VMC

เครื่องกัศิเอ็นซีทำงานตามโปรแกรมเท่านั้น ซึ่งโปรแกรกดังกล่าวจะถูกป้อนข้อมูลด้วยระบบตัวเลข และตัวอักษร เรียกว่า จีโค้ดและเอ็มโค้ด (G-M Codes) โดยโปรแกรมที่เขียนขึ้นมานี้จะสามารถกำหนดขั้นตอนการทำงานล่วงหน้าได้อย่างถูกต้องมีความแม่นยำสูง

เครื่องกัศิเอ็นซีกับเครื่องจักรกลทั่วไปแตกต่างกัน โดยเครื่องกัศิเอ็นซีจะทำงานอัตโนมัติด้วยตัวเครื่องจักรกลเอง ตามข้อมูลตัวเลขที่ป้อนให้กับระบบควบคุม มีการตัดสินใจในการกำหนดขั้นตอนการทำงานต่างๆ เพียงครั้งเดียว กล่าวคือ จะกระทำในขั้นตอนการวางแผนและสร้างโปรแกรมสำหรับควบคุมเท่านั้น และจากนั้นโปรแกรมจะถูกนำไปใช้ในการควบคุมการทำงานสำหรับการผลิตชิ้นงานที่ต้องการ ซึ่งสามารถทำการผลิตซ้ำๆ กันก็ครั้งก็ได้ตามที่ต้องการ โดยการเปรียบเทียบการทำงานระหว่างเครื่องกัศิทั่วไปกับเครื่องกัศิเอ็นซีเป็นไปดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบการทำงานระหว่างเครื่องกัศิทั่วไปกับเครื่องกัศิเอ็นซี

ขั้นตอนการทำงาน	เครื่องจักรกัศิทั่วไป	เครื่องกัศิเอ็นซี
การป้อนโปรแกรม	ไม่มี	มี
การจับยึดชิ้นงาน	มือ	มือ
การจับยึดมีดตัดเฉือน	มือ	มือหรือชุดควบคุม
การตั้งจุดอ้างอิง	มือ	มือ
การตั้งความเร็วรอบ	มือ	ระบบควบคุม
การเลื่อนแท่นเลื่อน	มือหมุน	ระบบควบคุม
การเปรียบเทียบระยะ	สายตา	ระบบควบคุม
การตรวจสอบขนาด	เครื่องมือวัด	ใช้เวลาน้อยกว่า

ที่มา: ชาลี (2539)

ข้อดีของเครื่องกัดซีเอ็นซี

1. มีความยืดหยุ่นในการทำงานสูง
2. ความเที่ยงตรง (Accuracy) จะอยู่ระดับเดียวกันตลอดตามที่ป้อนให้กับระบบควบคุม
3. ใช้เวลาในการผลิต (Production Time) สั้นกว่า
4. สามารถใช้ผลิตชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อนได้ง่าย
5. การปรับตั้งค่ากระทำได้ง่าย
6. หลีกเลี่ยงความจำเป็นที่ต้องใช้ช่างควบคุมที่มีทักษะและประสบการณ์สูง
7. ช่างควบคุมมีเวลาวางจากการควบคุมเครื่อง สามารถจัดเตรียมงานอื่นๆ ล่วงหน้าได้
8. การตรวจสอบคุณภาพไม่จำเป็นต้องกระทำทุกขั้นตอนและทุกชิ้น

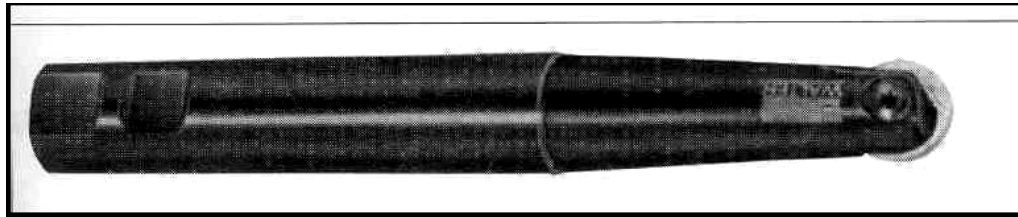
ข้อเสียของเครื่องกัดซีเอ็นซี

1. มีราคาสูง
2. การบำรุงรักษามีความซับซ้อนมาก
3. จำเป็นต้องใช้ช่างเขียนโปรแกรมที่มีทักษะสูง
4. ชิ้นส่วนและอะไหล่จำเป็นต้องสั่งซื้อหรือนำเข้าจากต่างประเทศ
5. การซ่อมบำรุงต้องใช้ช่างที่มีประสบการณ์สูง
6. ราคาของเครื่องมือต่างๆ มีราคาสูง
7. พื้นที่ติดตั้งเครื่องจักร ต้องควบคุมระดับอุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละออง

ในการทำงานของเครื่องกัดซีเอ็นซี จะต้องใช้มีดตัดเฉือน (Cutting Tools) เป็นอุปกรณ์ในการกัดชิ้นงาน โดยโปรแกรมของเครื่องกัดซีเอ็นซีจะบรรจุประเภทของมีดตัดเฉือนไว้มากมาย ซึ่งมีดตัดเฉือนที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม มีรายละเอียดดังนี้

มีดตัดเฉือน (Cutting Tools)

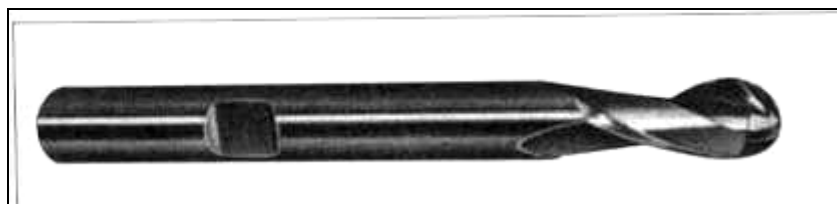
1. มีดตัดเฉือนบอลโนส (Ballnose) เป็นมีดตัดเฉือนที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ สำหรับการกัดผิวที่มีรูปร่างโค้ง เหมาะสำหรับการกัดหยาบและกัดละเอียด บริเวณปลายจะยึดติดกับคมตัด โดยรูปร่างลักษณะของมีดตัดเฉือนชนิดนี้เป็นไปดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 มีดตัดเฉือนบอลโนส

ที่มา: วิทยา (2545)

2. มีดตัดเฉือนบอลโนสเอ็นด์มิล (Ballnose end mill) เป็นมีดตัดเฉือนที่ใช้ในการกัดงานที่มีขนาดเล็กเหมาะสำหรับการกัดละเอียดในบริเวณที่แคบๆ ที่มีดตัดเฉือนขนาดใหญ่กัดเข้าไปไม่ถึง บริเวณปลายจะมีลักษณะโค้งมน โดยรูปร่างลักษณะของมีดตัดเฉือนชนิดนี้เป็นไปดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 มีดตัดเฉือนบอลโนสเอ็นด์มิล

ที่มา: วิทยา (2545)

3. มีดตัดเฉือนโปรไฟล์ (Profile milling) ใช้ในการกัดชิ้นงานที่เป็นหลุม (Pocket) เหมาะสำหรับการกัดหยาบ บริเวณปลายจะยึดติดกับคมตัด โดยรูปร่างลักษณะของมีดตัดเฉือนชนิดนี้เป็นไปดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 มีดตัดเฉือนโปรไฟล์

ที่มา: วิทยา (2545)

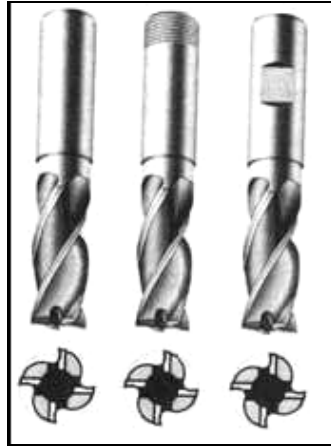
4. มีดตัดเฉือนชนิดปาดผิวงาน (Surface milling) ใช้ในการปาดผิวให้เรียบเพื่อเตรียมผิวในงานขนาดใหญ่ตรงบริเวณปลายจะติดคมตัดรอบๆ เหมาะสำหรับการใช้ผลิตแม่พิมพ์ที่เป็นเหล็กหล่อ โดยรูปร่างลักษณะของมีดตัดเฉือนชนิดนี้เป็นไปดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 มีดตัดเฉือนชนิดปาดผิวงาน

ที่มา: วิทยา (2545)

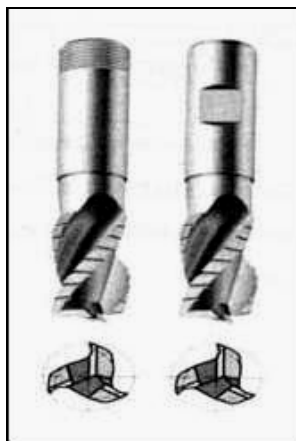
5. มีดตัดเฉือนชนิดกัดผิวสำเร็จ (Finishing end mill) เป็นมีดตัดเฉือนที่เหมาะสมสำหรับใช้กับงานกัดละเอียดกับงานที่มีลักษณะเป็นหลุมงาน โดยมักใช้สำหรับกัดเหล็กหล่อ เหล็กแข็ง เป็นต้น โดยรูปร่างลักษณะของมีดตัดเฉือนชนิดนี้เป็นไปดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 มีดตัดเนื้อชนิดกัดผิวสำเร็จ

ที่มา: วิทยา (2545)

6. มีดตัดเนื้อชนิดกัดผิวหยาบ (Roughing End Mill) เป็นมีดตัดเนื้อที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานกัดหยาบกับงานที่มีลักษณะเป็นหลุมงาน โดยมักใช้สำหรับกัดเหล็กหล่อ โดยรูปร่างลักษณะของมีดตัดเนื้อชนิดนี้เป็นไปดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 มีดตัดเนื้อชนิดกัดผิวหยาบ

ที่มา: วิทยา (2545)

คุณภาพของการกัดชิ้นงาน

หลักการทำงานของเครื่องกัดซีเอ็นซี โดยเครื่องกัดได้ใช้การหมุนของมีดตัดเฉือน ซึ่งถูกขับเคลื่อนด้วยเฟลาหมุนในการกัดชิ้นงาน โดยคุณภาพของการกัดชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบดังนี้

1. ชนิดและรูปร่างของมีดตัดเฉือน

ในการกัดที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะมีอิทธิพลต่อขอบคมตัดของมีดตัดเฉือน (Tools edge) ดังนั้นจึงมักออกแบบใช้ขอบคมตัดที่มีขนาดเล็กและมักใช้ปลายคมตัดแบบหมุนเปลี่ยนได้ เมื่อขอบคมตัดถูกใช้งานไปชั่วระยะเวลาหนึ่ง จะเกิดการสึกหรอขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับมีดตัดเฉือน และถ้ามีความเค้นเกิดขึ้นมากเกินไปก็จะทำให้ส่วนอื่นของมีดตัดเฉือนแตกหักได้ ในปัจจุบันความต้านทานต่อความเค้นที่เกิดขึ้นของมีดตัดเฉือนสามารถเลือกใช้ได้หลายระดับ โดยการใช้วัสดุของมีดตัดเฉือนชนิดต่างๆ กัน ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ผลิตมีดตัดเฉือนเป็นไปดังภาพที่ 8

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

ภาพที่ 8 คุณสมบัติของวัสดุมีดตัดเฉือน

ที่มา: ชาลี (2539)

2. ชนิดและรูปร่างของวัสดุชิ้นงาน (Material)

ในการจัดเตรียมโปรแกรมซีเอ็นซีจากแบบชิ้นงานที่ได้รับ จะต้องรู้ว่าคุณสมบัติประการใดของชิ้นงานที่ต้องการความละเอียดเป็นพิเศษ ซึ่งประกอบด้วย รูปทรงและขนาดของชิ้นงาน ความแข็งแรงของวัสดุชิ้นงาน ความสามารถในการตัดเฉือนของวัสดุชิ้นงาน

3. ชนิดของสารหล่อเย็น (Coolant)

เพื่อให้ได้สภาวะของการตัดเฉือนที่ดีขึ้น จะต้องพิจารณาเลือกใช้สารหล่อเย็นที่เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อระบายความร้อนที่เกิดขึ้นที่จุดปลายของมีดตัดเฉือนและรักษาระดับอุณหภูมิของชิ้นงานให้ต่ำลง ช่วยหล่อลื่นเพื่อลดความฝืดและการสึกหรอของมีดตัดเฉือน และยังช่วยไล่เศษออกจากบริเวณตัดเฉือน โดยชนิดของสารหล่อเย็น ได้แก่ สารผสมน้ำ (Watery solutions) เช่น สารละลายเกลือ อิมัลชัน (Emulsions) และน้ำมันตัด (Cutting oils)

4. ความเร็วรอบของเพลาหมุน (Spindle speed) อัตราป้อนกัท (Feedrate) และความเร็วในการตัดเฉือน (Cutting speed) ซึ่งเป็นไปดังภาพที่ 9

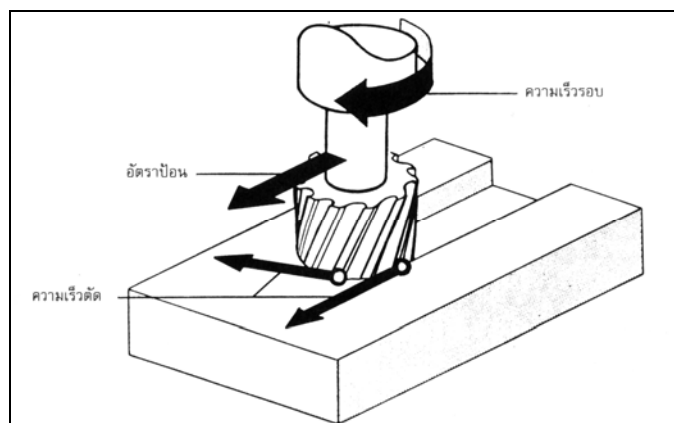
ความเร็วรอบ คือ ค่าความเร็วของเพลาหมุนที่ป้อนในโปรแกรมซีเอ็นซี โดยต้องกำหนดทิศทางการหมุนของเพลางานให้ถูกต้อง นั่นคือ การหมุนตามเข็มนาฬิกา (CW) หรือการหมุนทวนเข็มนาฬิกา (CCW)

อัตราป้อนกัท คือ อัตราการเคลื่อนที่ของมีดตัดเฉือนที่เคลื่อนที่ไปในทิศทางของการตัดเฉือน

ความเร็วในการตัดเฉือน (Cutting speed) คือ ความเร็วที่ขอบคมของมีดตัดเฉือนกระทำกับชิ้นงาน ณ จุดที่เกิดการตัดเฉือน ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ (1)

$$RPM = \frac{CS \times 1,000}{\pi D} \quad (1)$$

เมื่อ RPM = ความเร็วรอบ (Rounds per minutes)
 CS = ความเร็วในการตัดเฉือน (Cutting speed)
 D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของมีดตัดเฉือน (Diameter of cutter)



ภาพที่ 9 ความเร็วรอบ อัตราป้อนกัต และความเร็วในการตัดเฉือน

ที่มา: ชาลี (2539)

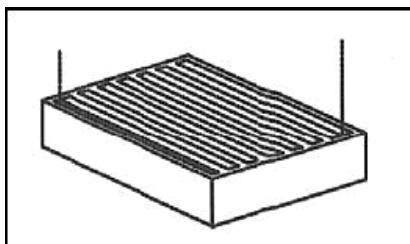
5. ความลึกของการตัดเฉือน (Depth of cut)

คือ ระยะทางที่มีดตัดเฉือนจมลึกเข้าไปในผิวงานในทิศทางป้อนกัต โดยลักษณะของความลึกในการตัดเฉือนจะขึ้นอยู่กับ การเขียน โปรแกรมการเคลื่อนที่ของมีดตัดเฉือน และขนาดและรูปทรงของมีดตัดเฉือน โดยการเลือกค่าความลึกของการกัดเฉือนจะต้องพิจารณาถึงค่าความเร็วในการตัดเฉือนของมีดตัดเฉือนที่ใช้ และขนาดผิวสำเร็จ (Surface finish) ที่ต้องการ

ในการกัดด้วยเครื่องกัดตั้งซีเอ็นซีได้มีวิธีการกัดหลายวิธี โดยขึ้นอยู่กับผู้ควบคุมและลักษณะของงานกัด ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน ผู้ควบคุมต้องพิจารณาว่างานแต่ละชิ้นควรจะใช้วิธีใด เพราะการกัดงานในแต่ละรูปแบบจะเกิดแรงเสียดทานและแรงกระชากไม่เหมือนกัน โดยรูปแบบการกัดแต่ละวิธีจะมีรายละเอียด ดังนี้

รูปแบบของการกัด (Cut method)

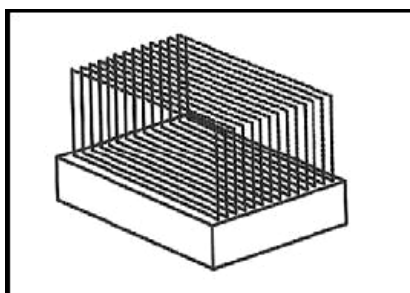
1.แบบซิกแซ็ก (Zigzag) เป็นการกำหนดให้มีดตัดเฉือนเดินกัดขึ้นงานไปและกลับขานากันเป็นเส้นตรง โดยลักษณะของการเดินกัดนั้นเป็นไปดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 รูปแบบการกัดแบบซิกแซ็ก

ที่มา: วิทยา (2545)

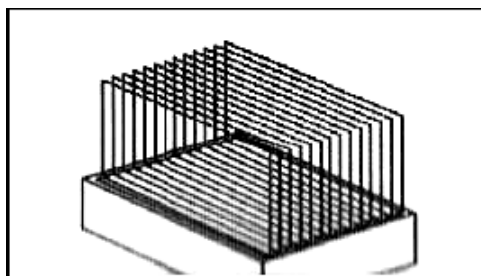
2.แบบซิก (Zig) เป็นการกำหนดให้มีดตัดเฉือนเดินกัดขึ้นงานไปในทิศทางเดียวแล้วก็ยกกลับมาเริ่มกัดในระยะถัดไป โดยลักษณะของการเดินกัดนั้นเป็นไปดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 รูปแบบการกัดแบบซิก

ที่มา: วิทยา (2545)

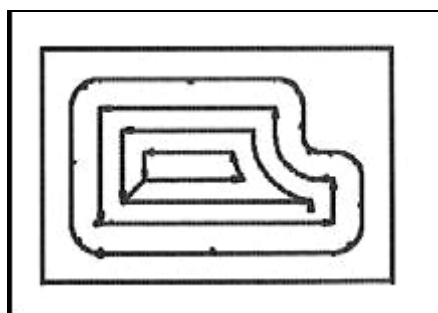
3.แบบซิกแพทคอนทัวร์ (Zig with contour) เป็นการกำหนดให้มีดัดเงื่อนไขเดินกัไปในทิศทางเดียวและจะมีการเก็บรอบใหม่อีกครั้ง โดยลักษณะของการเดินกันั้นเป็นไปดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 รูปแบบการกัแบบซิกแพทคอนทัวร์

ที่มา: วิทยา (2545)

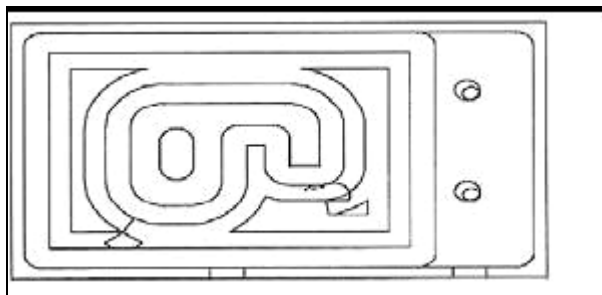
4.แบบรอบวง (Follow periphery) เป็นการกำหนดให้มีดัดเงื่อนไขเดินกัขึ้นงานจากภายในออกไปภายนอก(Outward) และสามารถกำหนดการกัจากภายนอกเข้ามาภายใน (Inward) ตามรอบวงที่ได้กำหนด โดยลักษณะของการเดินกันั้นเป็นไปดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 รูปแบบการกัแบบรอบวง

ที่มา: วิทยา (2545)

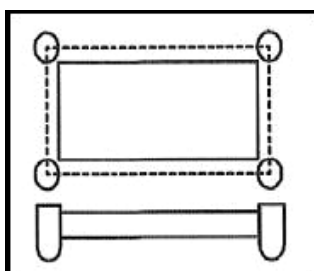
5.แบบขอบเขตชิ้นงาน (Follow part) เป็นการกำหนดให้มีดัดต่อเนื่องเดินกั๊ดชิ้นงานจากภายนอกเข้ามาภายในหรือจากภายในออกไปภายนอกก็ได้ตามรูปร่างของชิ้นงาน วิธีการกั๊ดแบบนี้จะใช้เวลาในการกั๊ดนานมาก แต่ผิวจะละเอียด โดยลักษณะของการเดินกั๊ดนั้นเป็นไปดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 รูปแบบการกั๊ดแบบขอบเขตชิ้นงาน

ที่มา: วิทยา (2545)

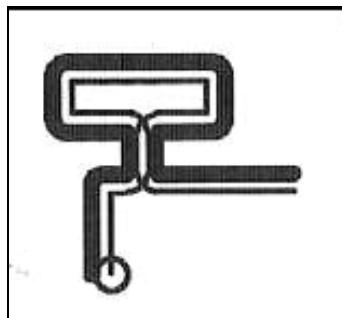
6.แบบกั๊ดผิวข้าง (Profile) เป็นการกำหนดการกั๊ดโดยให้ด้านข้างของมีดตัดต่อเนื่องสัมผัสกับเส้นขอบเขตของมีดตัดจะใช้ในการกั๊ดหยาบและการกั๊ดละเอียด โดยลักษณะของการเดินกั๊ดนั้นเป็นไปดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 รูปแบบการกั๊ดแบบกั๊ดผิวข้าง

ที่มา: วิทยา (2545)

7.แบบกัดผิวข้างตามพื้นที่จำกัด (Standard Drive) ลักษณะการกัดคล้ายกับการกัดแบบกัดผิวข้าง เพียงแต่มีดตัดเฉือนจะเข้าไปกัดในบริเวณที่แคบๆ ได้ และเส้นทางเดินของมีดตัดเฉือนที่ได้จะมีลักษณะตักกัน โดยลักษณะของการเดินกัดนั้นเป็นไปดังภาพที่ 16



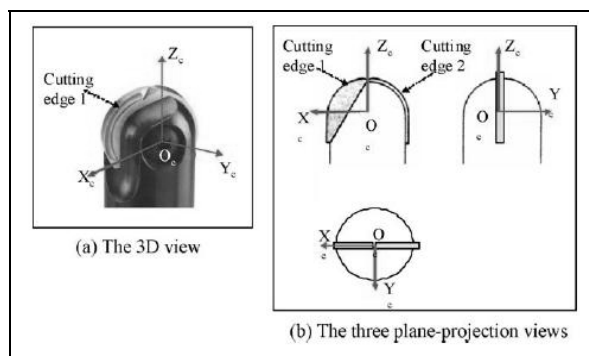
ภาพที่ 16 รูปแบบการกัดแบบกัดผิวข้างตามพื้นที่จำกัด

ที่มา: วิทยา (2545)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกระบวนการกัดชิ้นงานด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซี ด้วยการใช้มีดตัดเฉือนบอลโนสเป็นอุปกรณ์ในการตัดเฉือน ซึ่งมีดตัดเฉือนชนิดนี้ได้ถูกสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการเคลื่อนที่ของมีดตัดเฉือนบอลโนสไว้เรียบร้อยแล้วโดย Chen *et al.* (2005)

มีดตัดเฉือนบอลโนส (Ballnose cutting tools)

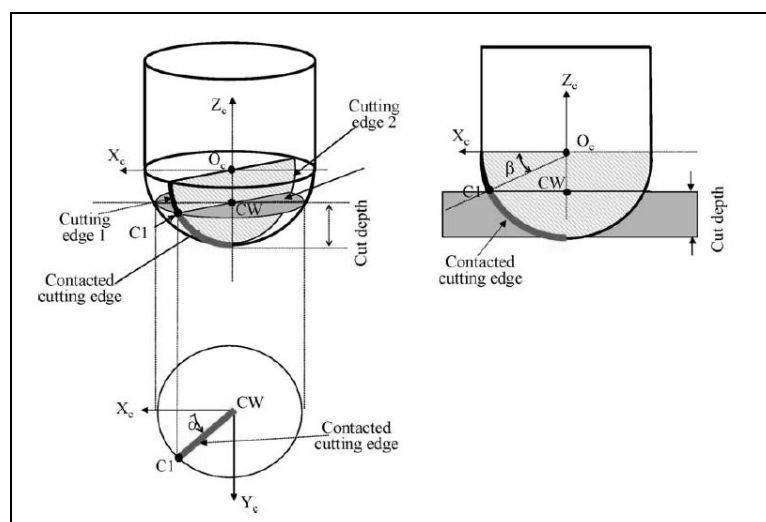
เป็นมีดตัดเฉือนบอลโนสเป็นมีดตัดเฉือนที่มีลักษณะปลายคมตัดกลมมน ใช้สำหรับการกัดชิ้นงานให้มีพื้นผิวโค้ง ซึ่งรูปร่างของมีดตัดเฉือนบอลโนสและลักษณะของคมมีดตัดเฉือนได้ถูกแสดงไว้ดังภาพที่ 17 โดยภาพ (a) เป็นรูปร่างของมีดตัดเฉือนบอลโนสและลักษณะของคมมีดตัดเฉือนในมุมมอง 3 มิติ และ (b) เป็นรูปร่างของมีดตัดเฉือนบอลโนสและลักษณะของคมมีดตัดเฉือนในมุมมองภาพฉาย



ภาพที่ 17 รูปร่างของมิดตัดเนียนบอลโนสและลักษณะของคมมิดตัดเนียน

ที่มา: Chen *et al.* (2005)

โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการเคลื่อนที่ของมิดตัดเนียนบอลโนสตามหลักการของ Chen *et al.* (2005) นั้น เริ่มต้นได้พิจารณาถึงจุดตำแหน่งพิกัดของคมมิดตัดเนียนบอลโนส ณ ตำแหน่งขอบผิวบนสุดของชิ้นงาน ซึ่งกำหนดให้จุดพิกัดดังกล่าวเป็นจุดพิกัด C1 ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 จุดพิกัดตำแหน่งคมมิดที่ผิวบนสุดของชิ้นงาน (จุดพิกัด C1)

ที่มา: Chen *et al.* (2005)

จากภาพที่ 18 ประกอบไปด้วยคมมีด (Cutting edge) ตำแหน่งสัมผัสของคมมีด (Contacted cutting edge) และความลึกของการตัดเฉือน (Cut depth) โดยจุดพิกัด CI ดังกล่าว ได้ถูกอ้างอิงด้วยมุม β ซึ่งเป็นมุมอ้างอิงถึงความลึกของการตัดเฉือนตามระนาบ $x-z$ และมุม α ซึ่งเป็นมุมอ้างอิงถึงตำแหน่งของคมมีดตามระนาบ $x-y$

ซึ่งสามารถคำนวณค่าจุดพิกัด CI ได้จากการแปลงสมการพิกัดทรงกลมเป็นพิกัดฉาก โดยกำหนดให้ค่าพิกัดฉาก $\{S_x, S_y, S_z\}_c$ เป็นค่าพิกัดอ้างอิงตามแนวแกน xyz ของจุดพิกัด CI ดังสมการ (2) ของ Chen *et al.* (2005)

$$\begin{Bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{Bmatrix}_c = \begin{Bmatrix} R \cos \beta \cos \alpha \\ R \cos \beta \sin \alpha \\ R \sin \beta \end{Bmatrix} \quad (2)$$

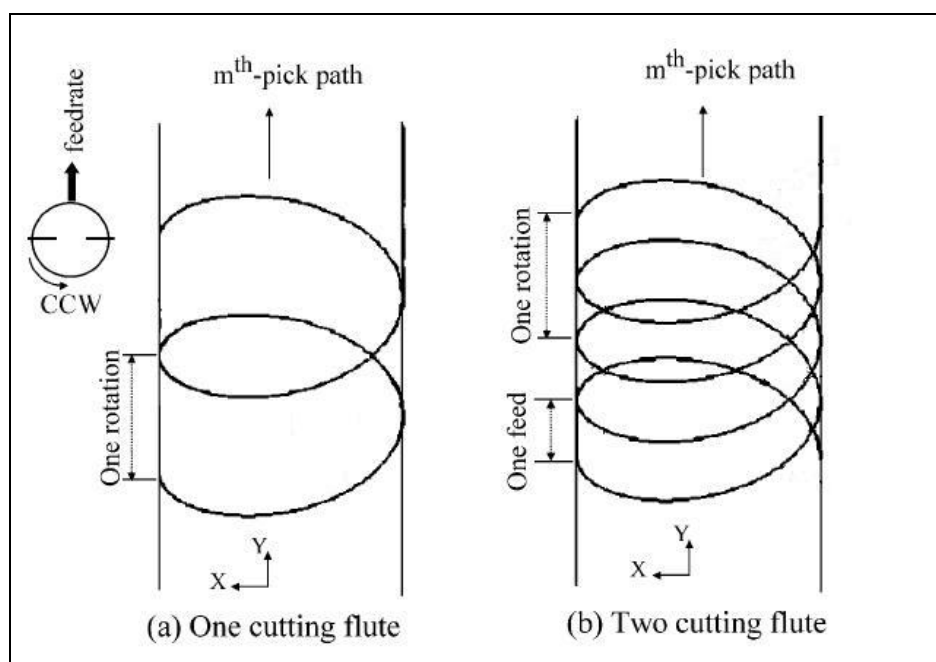
และขณะที่มีดตัดเฉือนบอลโนสมีการเคลื่อนที่เดินกัตามแนวแกน x และย้ายแนวกัที่มีระยะห่างของเส้นแนวกัที่เท่ากันตามแนวแกน y จะได้สมการการเคลื่อนที่เดินกัของจุดพิกัด CI ของมีดตัดเฉือนบอลโนส โดยกำหนดให้ค่าพิกัดฉาก $\{S_x, S_y, S_z\}_w$ เป็นค่าพิกัดอ้างอิงตามแนวแกน xyz ของจุดพิกัด CI ที่เคลื่อนที่เดินกัตามแนวแกน x และเคลื่อนที่หมุนตามความเร็วรอบ ω ดังสมการ (3) ของ Chen *et al.* (2005)

$$\begin{Bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{Bmatrix}_w = \begin{Bmatrix} V_f t + R \cos \beta \cos(\alpha_0 + \omega t) \\ mP + R \cos \beta \sin(\alpha_0 + \omega t) \\ R \sin \beta \end{Bmatrix} \quad (3)$$

- เมื่อ R = รัศมีของมีดตัดเฉือนบอลโนส
 β = มุมอ้างอิงถึงความลึกของการตัดเฉือนตามระนาบ $x-z$
 α = มุมอ้างอิงถึงตำแหน่งของคมมีดตามระนาบ $x-y$
 α_0 = มุมอ้างอิงถึงตำแหน่งของคมมีดเริ่มต้นตามระนาบ $x-y$ ในแต่ละแนวกั
 V_f = ค่าอัตราป้อนกั (Feedrate) ของมีดตัดเฉือนแต่ละเส้นแนวกั
 m = ค่าจำนวนแนวกัที่เพิ่มขึ้นเมื่อย้ายแนวกัตามแนวแกน y

- P = ค่าระยะห่างระหว่างเส้นแนวกัด (Step over)
 ω = ค่าความเร็วรอบของเพลาหมุน (Spindle speed)

เมื่อคำนวณการเคลื่อนที่ของจุดพิกัด CI ตามเวลา ดังสมการ (3) จะสามารถจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของจุดพิกัด CI ได้ดังภาพที่ 19 จากภาพเป็นการเคลื่อนที่ของจุดพิกัด CI ที่เคลื่อนที่เดินกัดตามแนวแกน x และมีการเคลื่อนที่หมุนวนเข็มนาฬิกาตามค่าความเร็วรอบ ω โดยจากภาพประกอบไปด้วย ทิศทางการป้อนกัด (Feedrate) ตำแหน่งร่องแนวกัด (Pick path) รอบของการหมุน (Rotation) และรอบของการกัด (Feed) ซึ่ง (a) เป็นการเคลื่อนที่เดินกัดของมิดตัดเนียนบอล โนสชนิดคมมิดเดี่ยว และ (b) เป็นการเคลื่อนที่เดินกัดของมิดตัดเนียนบอล โนสชนิดคมมิดคู่

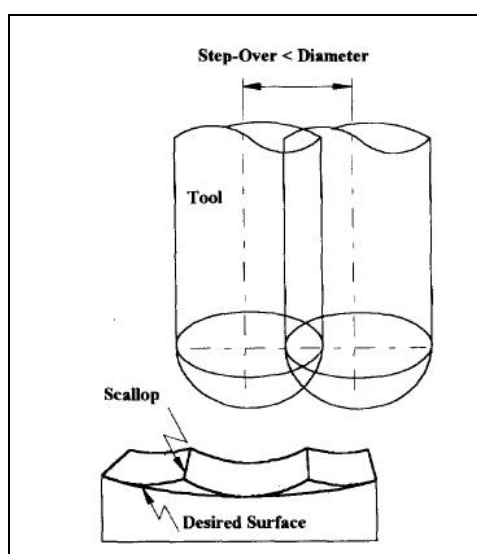


ภาพที่ 19 เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมมิดที่ขอบบนสุดของชิ้นงาน

ที่มา: Chen *et al.* (2005)

เมื่อใช้มิดตัดเนียนบอล โนสเดินกัด สำหรับพื้นผิวเรียบในเส้นแนวกัด (Cutting path) ที่ขนานกัน โดยให้ระยะห่างของเส้นแนวกัด (Step over) ที่เท่ากันในแต่ละร่องแนวกัด จะได้ลักษณะพื้นผิวที่ถูกกัดมีลักษณะเป็นร่องผิวโค้ง และมีลักษณะของปลายยอดแหลมที่เกิดจากการซ้อนทับกัน

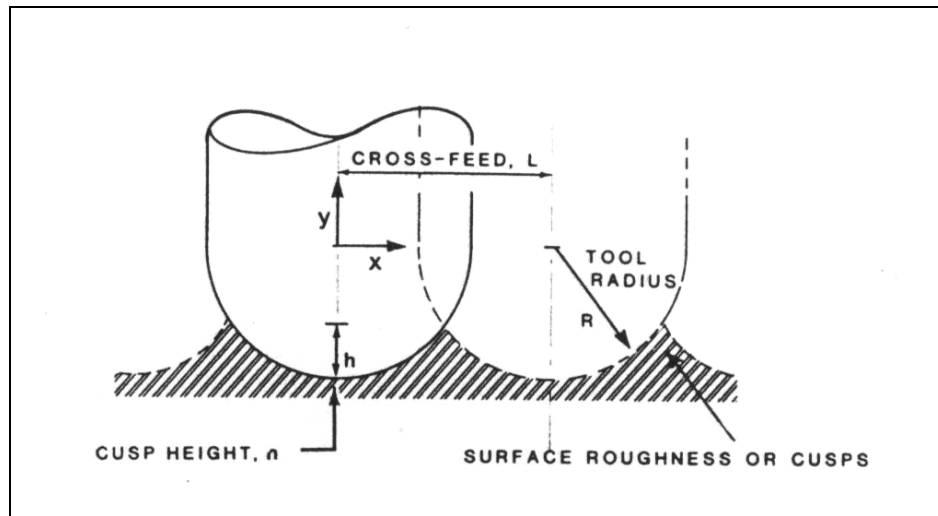
ของเส้นแนวกัด ซึ่งระยะห่างระหว่างเส้นแนวกัดมีขนาดน้อยกว่าขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง (Diameter) บอลโนส จึงเรียกลักษณะพื้นผิวดังกล่าวว่า พื้นผิวสเกลลอป (Scallop Surface) และปลายยอดแหลมดังกล่าว เรียกว่า ยอดปลายสูงสเกลลอป (Scallop height) ดังภาพที่ 20 โดยประกอบไปด้วยลักษณะการซ้อนทับกันของมิดดัดเนียนบอลโนสในแต่ละแนวกัด และลักษณะพื้นผิวที่ถูกกัด ตามลักษณะของการกัดผิวงานที่ถูกกำหนด (Desired Surface)



ภาพที่ 20 การเกิดพื้นผิวสเกลลอป (Scallop surface)

ที่มา: Tsao and Chen (1997)

และเมื่อพิจารณาถึงค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องสำหรับการเกิดพื้นผิวสเกลลอป ซึ่งประกอบไปด้วย ค่ารัศมีของมิดดัดเนียนบอลโนส (Tool radius) และค่าระยะห่างแนวกัด (Cross feed or Step over) โดยแสดงไว้ดังภาพที่ 21 และสามารถคำนวณค่าความสูงสเกลลอป (Scallop height or Cusp height) ได้จากสมการของ Vickers *et al.* (1990) ดังสมการ (4)



ภาพที่ 21 ค่าความสูงสเกลลอป

ที่มา: Vickers *et al.* (1990)

$$L = 2\sqrt{2hR - h^2} \quad (4)$$

เมื่อ L = ค่าระยะห่างระหว่างเส้นแนวกัด (Step over)
 h = ค่าความสูงสเกลลอป (Scallop height)
 R = รัศมีของมีดตัดเฉือนบอลโนส

ค่าความสูงสเกลลอป เป็นค่าชี้วัดชนิดหนึ่งของผิวงาน ในด้านความขรุขระของผิวงาน เรียกว่าค่าความหยาบผิว (Surface roughness) โดยค่าความสูงสเกลลอป มีค่าเป็นความหยาบผิว R_z ซึ่งเป็นค่าความสูงวัดจากจุดต่ำสุดของผิวงานถึงจุดสูงสุดของผิวงาน นั่นคือถ้าค่าความสูงสเกลลอปหรือค่า R_z มีค่ามากแสดงว่าผิวงานดังกล่าวมีความขรุขระของผิวงานมาก

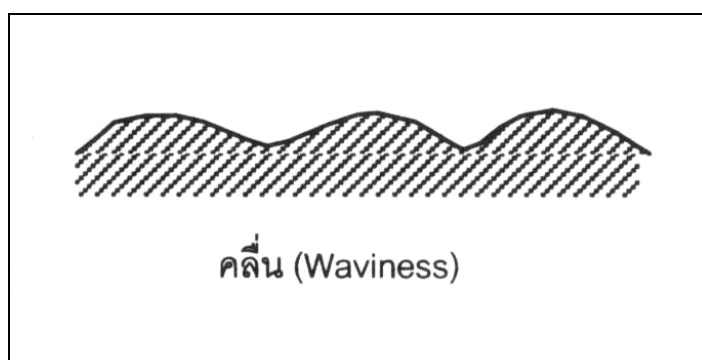
ความหยาบผิว (Roughness)

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการแปรรูปต่างๆ โดยทั่วไปเกิดจากการตกแต่งหรือการปรับผิว ด้วยเครื่องมือกลที่ต่างชนิดกัน ซึ่งทำให้ได้คุณภาพหรือความหยาบของผิวชิ้นงานที่แตกต่างกัน

ความหยาบของผิวชิ้นงานที่มีค่าน้อยๆ มักใช้กับงานที่ต้องการความเที่ยงตรง เช่น ชิ้นงานที่ใช้สำหรับหมุนหรือไถล แต่อย่างไรก็ตามการทำให้ผิวของชิ้นงานมีความหยาบน้อยจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการปรับผิวสูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นผู้ออกแบบจะต้องให้ความสำคัญต่อคุณภาพของชิ้นงานและกำหนดค่าความหยาบให้เหมาะสมกับความต้องการใช้งาน คุณภาพของชิ้นจะสัมพันธ์โดยตรงกับกระบวนการผลิตและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่ต้องการ

ความเบี่ยงเบนของชิ้นงานจริง เมื่อมองจากภาพตัดขวาง (Section) ที่กำลังขยายสูงของผิวชิ้นงาน จะสามารถจำแนกลักษณะผิวชิ้นงานได้ดังนี้

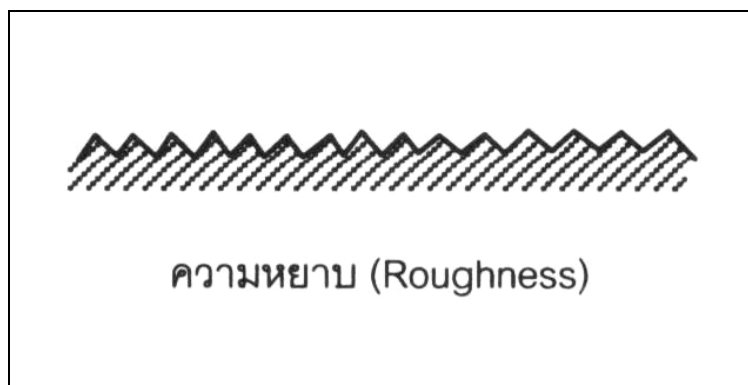
1. ผิวงานแบบคลื่น เป็นลักษณะผิวงานที่ไม่สม่ำเสมอที่เกิดขึ้นโดยมีระยะที่ขยายไปกว้าง อาจเกิดจากการสั่นสะเทือนของมีดตัดเฉือนหรือชิ้นงาน ดีเฟล็กชัน (Deflection) หรือกรรมวิธีทางความร้อน โดยลักษณะผิวงานแบบนี้แสดงดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ผิวงานแบบคลื่น

ที่มา: วิทยา (2545)

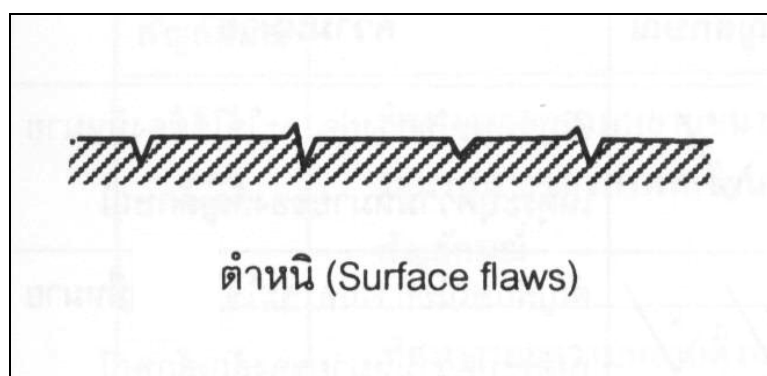
2. ผิวงานแบบความหยาบ เป็นลักษณะผิวงานที่เบี่ยงเบนเป็นร่องแคบๆ เกิดจากคมตัดและอัตราการป้อนกัดของมีดตัดเฉือน โดยลักษณะผิวงานแบบนี้แสดงดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ผิวงานแบบความหยาบ

ที่มา: วิทยา (2545)

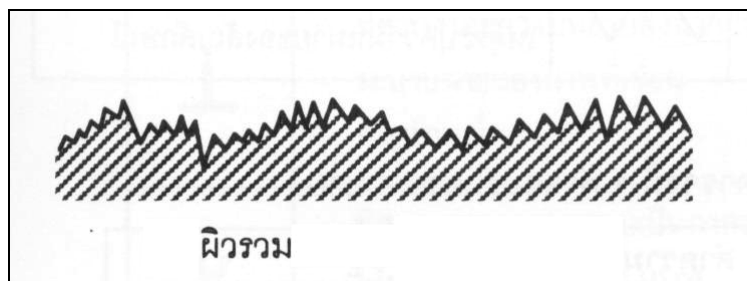
3. ผิวงานแบบมีตำหนิ เป็นลักษณะผิวงานที่เกิดขึ้นที่ช่วงไม่แน่นอน เช่น รอยขีด รอยตรวจสอบ เป็นต้น และมักจะเกิดขึ้นบ่อยๆ จากกระบวนการผลิต โดยลักษณะผิวงานแบบนี้แสดงดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 ผิวงานแบบมีตำหนิ

ที่มา: วิทยา (2545)

4. ผิวงานแบบรวมความเบี่ยงเบนทั้งสามประเภท เป็นลักษณะผิวงานที่มีลักษณะคล้ายภูเขาหลายลูก โดยลักษณะผิวงานแบบนี้แสดงดังภาพที่ 25

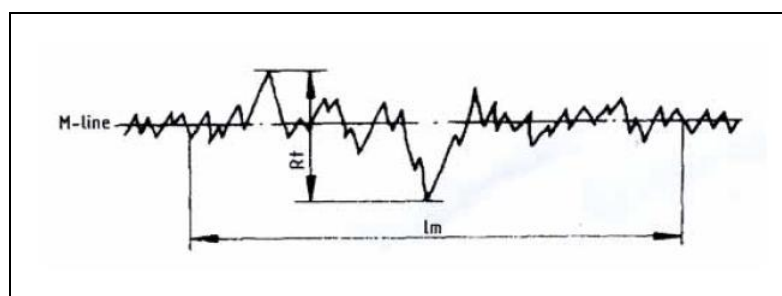


ภาพที่ 25 ผิวงานแบบรวมความเบี่ยงเบนทั้งสามประเภท

ที่มา: วิทยา (2545)

การวัดค่าความหยาบผิวของผิวชิ้นงานจะวัดโดยตามมาตรฐานของ ISO 4287 ซึ่งเป็นการวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการแปรรูปแล้ว โดยจะกล่าวถึงค่าความหยาบ R_a , R_z และ R_{max}

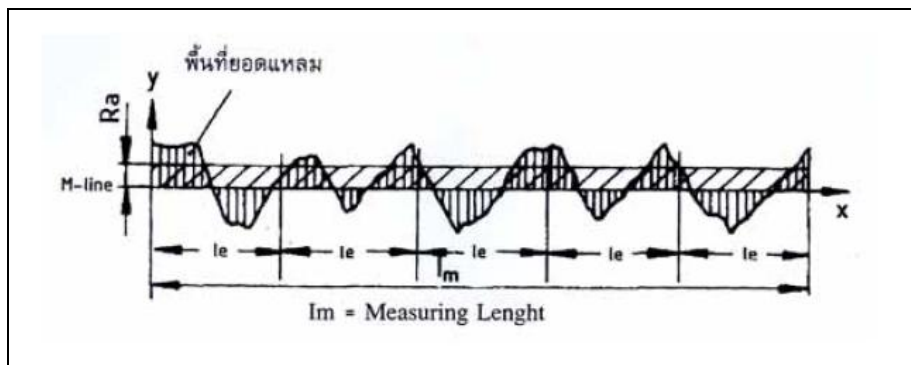
1. ค่าความหยาบ R_t เป็นการวัดค่าความหยาบผิวโดยวัดจากจุดสูงสุดไปยังจุดต่ำสุดของผิวชิ้นงาน มีหน่วยเป็นไมโครเมตร ซึ่งค่าความหยาบผิวชนิดนี้แสดงดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 การวัดค่าความหยาบผิว R_t

ที่มา: นรินาม (2548)

2. ค่าความหยาบผิว R_a เป็นการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย โดยได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง (M-line) กับใต้เส้นกึ่งกลาง และหารด้วยความยาวเฉลี่ย (Measuring Length : l_m) มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร ซึ่งค่าความหยาบผิวชนิดนี้แสดงดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 การวัดค่าความหยาบผิว R_a

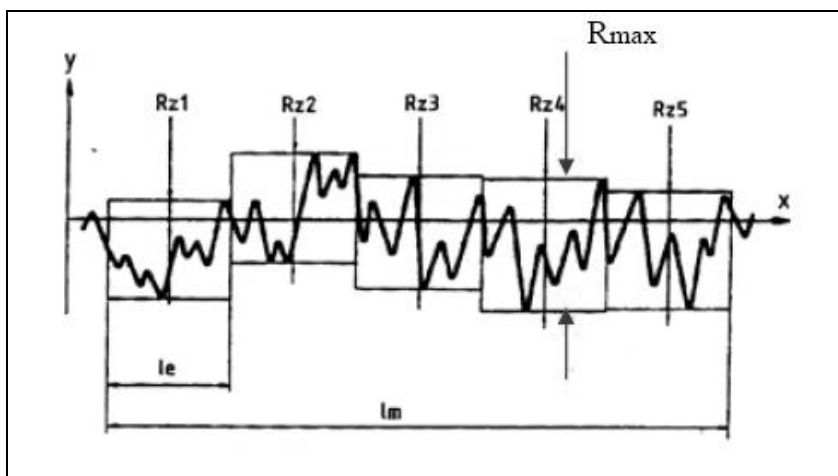
ที่มา: นิรนาม (2548)

นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่าความหยาบผิว R_a ได้ตามมาตรฐาน ISO 4287 โดยสมการของ Çolak *et al.* (2007) ดังสมการ (5)

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (5)$$

เมื่อ R_a = ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย
 L = ช่วงความยาวที่นำมาใช้วัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย
 $\int_0^L |y(x)| dx$ = ฟังก์ชันพื้นที่บริเวณผิวของชิ้นงาน พิจารณา 1 มิติ

3. ค่าความหยาบ R_z เป็นการวัดค่าความหยาบผิวโดยวัดทดสอบเป็นช่วงเท่าๆ กัน (l_e) 5 ช่วง แล้วนำค่าที่ได้มารวมกันหารด้วย 5 มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร ซึ่งค่าความหยาบผิวชนิดนี้แสดงดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 การวัดค่าความหยาบผิว R_z

ที่มา: นิรนาม (2548)

4. ค่าความหยาบผิว R_{max} เป็นการวัดค่าความหยาบผิวโดยวัดความลึกสูงสุดของร่องความหยาบที่มีอยู่ในระยะทดสอบ ซึ่งค่าความหยาบผิวชนิดนี้แสดงดังภาพที่ 28

การวัดค่าความหยาบผิวสามารถวัดได้โดยเครื่องมือวัดค่าความหยาบผิว ดังนี้

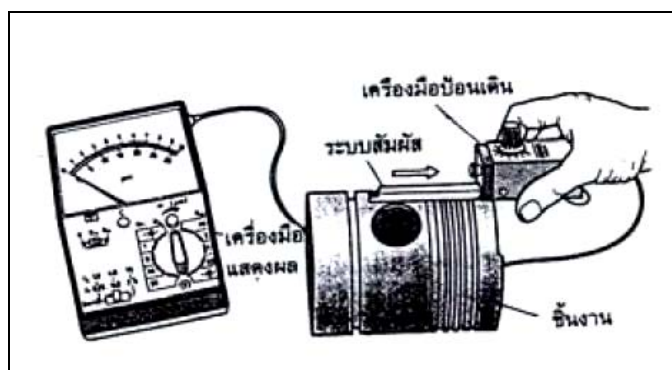
1. แผ่นเทียบผิว มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมวางเรียงกันเป็นชุดตามลำดับความหยาบ และแต่ละแผ่นจะมีสัญลักษณ์บอกระดับความหยาบไว้ เวลาใช้งานต้องนำแผ่นเทียบผิวไปเปรียบเทียบกับผิวชิ้นงาน ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานก็จะสามารถอ่านจากแผ่นเทียบผิวที่มีผิวตรงกับผิวของชิ้นงาน โดยอุปกรณ์วัดแผ่นเทียบผิวเป็นดังภาพที่ 29

R_s μm	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5	25.0	50.0
R_z μm	25	6.3	10	25	40	63	100	160
งานกลึง								
เกรต	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
แถว 2	▽▽▽		▽▽			▽		

ภาพที่ 29 อุปกรณ์วัดความหยาบผิวแบบแผ่นเทียบผิว

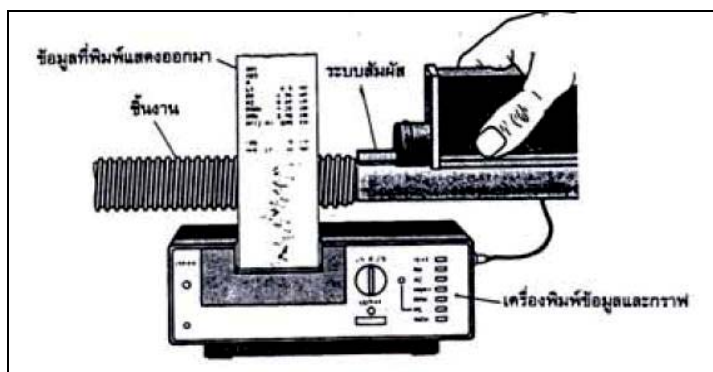
ที่มา: นิรนาม (2548)

2. เครื่องวัดความหยาบผิว เป็นเครื่องมือวัดความหยาบผิวที่ทำงานด้วยระบบไฟฟ้าที่แสดงค่าความหยาบผิวเป็นตัวเลข หรือแสดงเป็นกราฟ ซึ่งสามารถบอกค่าความหยาบเป็น R_a , R_z และ R_{max} โดยอุปกรณ์เครื่องวัดความหยาบผิวเป็นดังภาพที่ 30 และภาพที่ 31



ภาพที่ 30 เครื่องวัดความหยาบผิวแบบแสดงผลที่หน้าปัด

ที่มา: นิรนาม (2548)



ภาพที่ 31 เครื่องวัดความหยาบผิวแบบพิมพ์ข้อมูลและกราฟความหยาบผิว

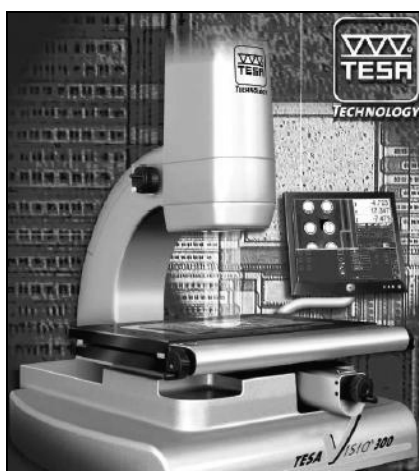
ที่มา: นิรนาม (2548)

3. เครื่องฟอร์มทราเซอร์ (Formtracer) เป็นเครื่องที่สร้างเส้นที่แสดงผิวของชิ้นงานในลักษณะภาพตัดขวาง (Section) โดยหลักการทำงานของเครื่องนี้จะใช้หัวเข็มลากที่ผิวของชิ้นงาน ขณะเดียวกันได้สร้างเส้นที่แสดงถึงความสูงต่ำของผิวชิ้นงานออกมา ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์ความหยาบผิว ลักษณะผิวของชิ้นงานได้ โดยลักษณะของเครื่องฟอร์มทราเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไปดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 เครื่องฟอร์มทราเซอร์ รุ่น Mitutoyo formtracer CS400

4. กล้องไมโครสโคป (Microscope) เป็นเครื่องมือวัดที่ทำงานด้วยการฉายภาพ เป็นเทคโนโลยีการวัดด้วยแสง (Optical Measuring) ด้วยกล้องไมโครสโคปกำลังขยายสูง สามารถวัดชิ้นงานโดยไม่มีการสัมผัสกับชิ้นงาน เป็นการวัดที่มีความมั่นคง มีความแม่นยำ และมีความเที่ยงตรงในการวัดที่สูงมาก โดยการทำงานจะใช้แสงส่องไปที่ผิวของชิ้นงาน และวัดความเข้มของแสงที่สะท้อนออกมา แล้วบันทึกข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์เกี่ยวกับลักษณะของพื้นผิวได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับซอฟต์แวร์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยลักษณะของเครื่องฟอร์มทราเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไปดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 กล้องไมโครสโคป รุ่น TESA Vision 300

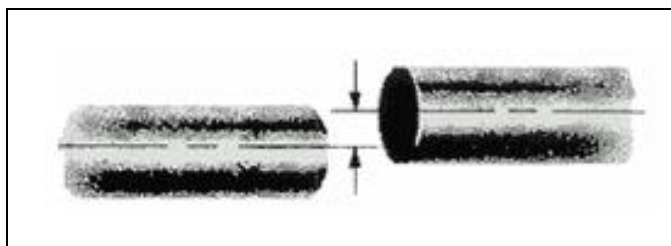
ที่มา: กนต์พัฒน์ (2549)

และเนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการกัดชิ้นงานด้วยมิดตัดเฉือนบอลโนสที่มีผลจากการเอียงศูนย์ ซึ่งลักษณะของการเอียงศูนย์ในแต่ละประเภทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การเอียงศูนย์ (Run out)

การเอียงศูนย์ในที่นี้หมายถึงการเอียงศูนย์ของแกนเพลลาอุปกรณ์ (Shaft Misalignment) ซึ่งสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ

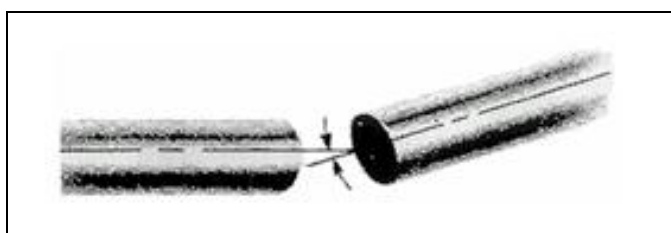
1. การเอียงศูนย์ในแนวนอน (Offset misalignment or Parallel misalignment) คือ การเอียงศูนย์ในแนวนอนหรือการเอียงศูนย์ที่อยู่ห่างจากแนวศูนย์กลาง เกิดจากเส้นแนวศูนย์กลางของเพลลาหมุน 2 เพลลา ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันแต่ขนานกัน เมื่อมีการส่งกำลังหรือการเคลื่อนที่ โดยลักษณะของการเอียงศูนย์ชนิดนี้เป็นดังภาพที่ 34



ภาพที่ 34 การเอียงศูนย์ในแนวนอน

ที่มา: นิรนาม (ม.ป.ป.)

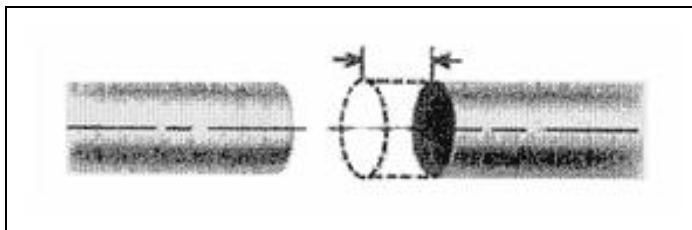
2. การเอียงศูนย์เชิงมุม (Angular misalignment) ซึ่งการเอียงศูนย์ประเภทนี้เกิดจากแนวเส้นศูนย์กลางของเพลลาหมุน 2 เพลลาตัดผ่านกันทำให้เกิดมุมขึ้น เมื่อเกิดการเคลื่อนที่หรือเกิดการส่งผ่านกำลังกัน โดยลักษณะของการเอียงศูนย์ชนิดนี้เป็นดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 การเอียงศูนย์เชิงมุม

ที่มา: นิรนาม (ม.ป.ป.)

3. การเยื้องศูนย์แบบเคลื่อนตัวไปมา (End float) เป็นการเคลื่อนที่ของเพลลาหมุนที่เลื่อนไถลในแนวแกนเข้าหรือออกจากตำแหน่งแรกเริ่ม ในทิศทางภายในเส้นแนวศูนย์กลางของอีกเพลลาหนึ่ง โดยลักษณะของการเยื้องศูนย์ชนิดนี้เป็นดังภาพที่ 36



ภาพที่ 36 การเยื้องศูนย์แบบเคลื่อนตัวไปมา

ที่มา: นิรนาม (ม.ป.ป.)

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่นที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ได้ศึกษากระบวนการกัดชิ้นงานด้วยมิดตัดเนื้อบอลโนส รวมถึงกระบวนการกัดชิ้นงานที่มีผลกระทบที่มีผลจากการเยื้องศูนย์ของมิดตัดเนื้อ โดยมียละเอียดของงานวิจัยดังต่อไปนี้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.แบบจำลองการเคลื่อนที่ของมิดดัดเนียน

Masood *et al.* (2002) ได้ศึกษาและพัฒนาการจำลองเส้นทางของมิดดัดเนียนไปในทิศทางและตำแหน่งที่กำหนด โดยได้ใช้ตัวแปร ได้แก่ รัศมีของมิดดัดเนียน และค่าเผื่อต่างๆ เพื่อนำไปสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของมิดดัดเนียนที่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับภารกิจชิ้นงานด้วยเครื่องซีเอ็นซีได้

Toh (2004) ได้ศึกษาวิจัยถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของมิดดัดเนียนที่มีการเอียงมุมของเพลอาหมุน สำหรับการกัดชิ้นงานรูปทรงอิสระ โดยได้วิจัยผลของลักษณะพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยทิศทางการเคลื่อนที่ของมิดดัดเนียนที่กำหนดด้วยการเอียงมุมของเพลอาหมุนเป็นมุม 75 องศา ซึ่งได้วิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิว และทิศทางการเคลื่อนที่ของมิดดัดเนียนที่ได้กำหนด

Chen *et al.* (2005) ได้ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเส้นทางการเคลื่อนที่ของมิดดัดเนียนบอลโนสที่มีการเอียงมุมของเพลอาหมุน โดยได้ใช้ตัวแปร ได้แก่ รัศมีของมิดดัดเนียน อัตราการป้อนกัด และมุมองศาของเพลอาหมุน ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของมิดดัดเนียนที่มีการเอียงมุมของเพลอาหมุนได้

2.ค่าความสูงสเกลลอป

Tsao and Chen (1997) ได้ศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการกัดผิวของมิดดัดเนียนบอลโนสต่อพื้นผิวแบบสเกลลอป โดยการนำความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีของมิดดัดเนียนและรัศมีผิวโค้งของชิ้นงานที่นำมากัด ซึ่งสามารถสร้างสมการการคำนวณค่าความสูงสเกลลอปสำหรับผิวชิ้นงานลักษณะโค้งเว้าและผิวชิ้นงานลักษณะโค้งนูนได้

3. ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว

Çolak *et al.* (2007) ได้ศึกษาตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความเร็วรอบ อัตราการป้อน และค่าความลึกที่ใช้ในการกัดชิ้นงาน ที่มีผลต่อพื้นผิวของชิ้นงาน เพื่อทำนายค่าความหยาบผิว พบว่าตัวแปรต่างๆ เหล่านี้ล้วนมีผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ

Omar *et al.* (2007) ได้ศึกษาผลจากแรงที่เกิดจากการตัดเฉือนชิ้นงาน พบว่าระหว่างการกัดชิ้นงานนั้น ได้มีแรงจากมีดตัดเฉือนกระทำต่อชิ้นงานทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่ตัวมีดตัดเฉือนชิ้นงาน และตัวยึดชิ้นงาน ซึ่งมีผลต่อค่าความหยาบผิวและคุณภาพผิวของชิ้นงาน

Savas and Ozay (2007) ได้ศึกษาสมรรถภาพการตัดเฉือนของมีดตัดเฉือนเอ็นด์มิล โดยได้วิเคราะห์การตัดเฉือนที่ตำแหน่งคมตัดของมีดตัดเฉือน ในขณะที่การกัดชิ้นงานนั้นกำหนดให้ค่าความเร็วรอบและความเร็วป้อนกัณฑ์ค่าปกติ ซึ่งได้วิเคราะห์ค่าความหยาบผิวที่เกิดขึ้นและเวลาที่ใช้ในการกัด

4. ผลของการเอียงศูนย์

Lee *et al.* (2007) ได้ศึกษาแรงที่ใช้ในการตัดเฉือนเมื่อมีการเอียงศูนย์ในแนวขนานของมีดตัดเฉือนเอ็นด์มิล 4 คมมีด ซึ่งสามารถคำนวณค่ารัศมีของการหมุนรอบแกนเพลลาหมุนของมีดตัดเฉือนในแต่ละคมมีดได้ทั้ง 4 คมมีด

จากทฤษฎีและนิยามที่กล่าวมาข้างต้นนั้น สามารถนำมาใช้ศึกษาและพัฒนาถึงรูปแบบการเคลื่อนที่ของมีดตัดเฉือนบอลโนสที่เกิดขึ้น เมื่อมีผลจากการเอียงศูนย์ รวมถึงการวิเคราะห์และออกแบบการจำลองลักษณะพื้นผิวที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดชิ้นงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์ได้ และท้ายสุดสามารถนำพื้นผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดชิ้นงาน มาคำนวณหาค่าความหยาบผิวได้ นอกจากนี้ยังนำงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องมาศึกษาถึงปัญหาและข้อจำกัด ที่เป็นผลอันนอกเหนือจากขอบเขตงานวิจัยที่ได้กำหนด

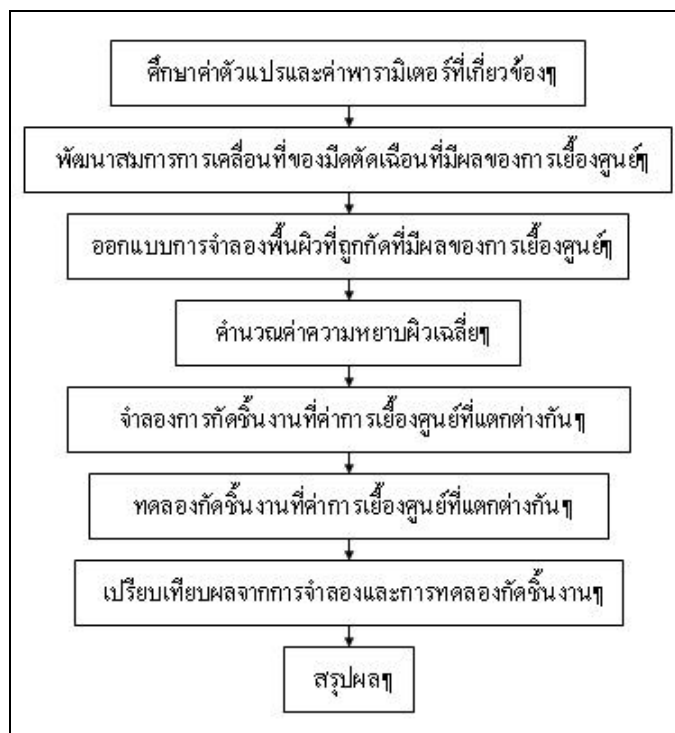
อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องกัดตั้งซีเอ็นซีสามแกน รุ่น Chevalier 2040 VMC
2. ตัวยึดจับมีดตัดเฉือน (Arbor) แบบปรับค่าเชิงศูนย์ในแนวนอนได้
3. อุปกรณ์ลิ้มเสริมที่มีมุมมองที่แตกต่างกัน
4. มีดตัดเฉือนบอลโนสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร
5. เครื่องฟอร์มทราเซอร์ รุ่น Mitutoyo formtracer CS400
6. ชิ้นงานทดลองวัสดุอะลูมิเนียม
7. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
8. โปรแกรมเมทเธมาติกา 6 (Mathematica 6)
9. โปรแกรมยูนิกราฟิกส์ 4 (Unigraphics)

วิธีการ

งานวิจัยนี้มีรูปแบบการศึกษาและการทำวิจัย เป็นไปดังภาพที่ 37 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้



ภาพที่ 37 รูปแบบขั้นตอนการศึกษาและการทำวิจัย

1. การศึกษาคำตัวแปรและค่าพารามิเตอร์สำหรับการกัดผิวชิ้นงานที่มีผลกระทบจากการเยื้องศูนย์

โดยได้ศึกษารูปแบบการหมุนของมิดดัดเดียนบอลโนสที่มีผลกระทบจากการเยื้องศูนย์ในแนวขนาน และการเยื้องศูนย์เชิงมุม เพื่อสามารถนำไปใช้พัฒนาสมการการเคลื่อนที่ของมิดดัดเดียนบอลโนสที่มีผลกระทบจากการเยื้องศูนย์

2. การพัฒนาสมการการเคลื่อนที่ของมิดดัดเดียนบอลโนสที่มีผลจากการเยื้องศูนย์

โดยพัฒนาสมการการเคลื่อนที่ของมิดดัดเดียนบอลโนสจากสมการ (2) และสมการ (3) ของ Chen *et al.* (2005) เพื่อสามารถจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของมิดดัดเดียนบอลโนสที่มีผลจากการเยื้องศูนย์ในแนวขนาน และการเยื้องศูนย์เชิงมุม ซึ่งได้ใช้โปรแกรมเมทเทอมาทิกา 6 เป็นเครื่องมือช่วยในการพัฒนา

3. การออกแบบการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีผลกระทบจากการเอียงศูนย์

โดยศึกษาลักษณะของพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสขณะที่ถูกกัดผิวชิ้นงานด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีผลกระทบจากการเอียงศูนย์ในแนวนานและการเอียงศูนย์เชิงมุม และออกแบบวิธีจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีผลกระทบจากการเอียงศูนย์ในแนวนานและการเอียงศูนย์เชิงมุม ซึ่งได้ใช้โปรแกรมยูนิกราฟิกส์ 4 เป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบ นอกจากนี้ยังได้พัฒนาสมการสำหรับคำนวณค่าความสูงสเกลลอปที่เกิดขึ้นจากการกัดด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีผลกระทบจากการเอียงศูนย์ในแนวนานและการเอียงศูนย์เชิงมุม จากสมการ (4) ของ Vickers *et al.* (1990) เพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ถูกสร้าง

4. การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงาน

โดยศึกษาลักษณะพื้นผิวที่นำมาใช้คำนวณ เพื่อพัฒนาสมการสำหรับคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) ซึ่งมีการคำนวณตามมาตรฐาน ISO 4287 จากสมการ (5) ของ Çolak *et al.* (2007)

5. การจำลองการกัดผิวชิ้นงานด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีผลกระทบจากการเอียงศูนย์

โดยจำลองการกัดผิวชิ้นงานด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีผลกระทบจากการเอียงศูนย์ในแนวนานและการเอียงศูนย์เชิงมุม ซึ่งประกอบด้วย การจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของมีดตัดเฉือนบอลโนส การจำลองพื้นผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้น และการคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงาน ซึ่งกำหนดค่าความลึกของการตัดเฉือน (a) เป็น 1.0 มิลลิเมตร และขนาดรัศมีของมีดตัดเฉือนบอลโนส (R) เป็น 8.0 มิลลิเมตร

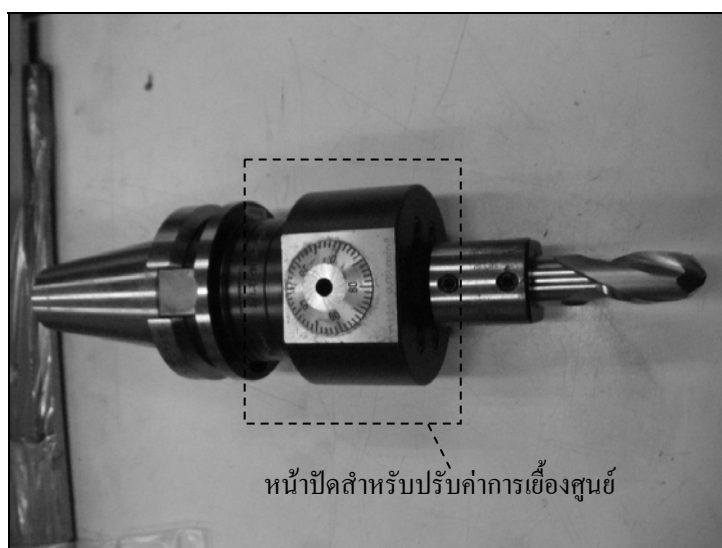
5.1 การเอียงศูนย์ในแนวนาน โดยกำหนดค่าเอียงศูนย์ (ΔR) เป็น 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ ค่าระยะห่างระหว่างเส้นแนวกัด (P) เป็น 2 มิลลิเมตร ตลอดชิ้นงาน

5.2 การเอียงศูนย์เชิงมุม โดยกำหนดค่าเอียงศูนย์เชิงมุม (θ) เป็น 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 องศา ตามลำดับ ค่าระยะห่างระหว่างเส้นแนวกัด (P) เป็น 4 มิลลิเมตร ตลอดชิ้นงาน

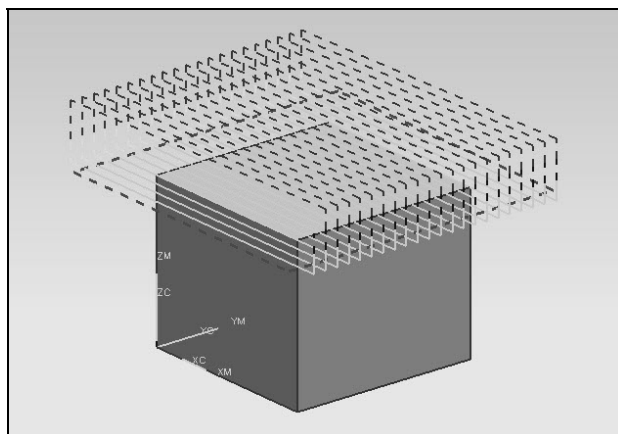
6. การกัดผิวชิ้นงานด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีผลกระทบจากการเอียงศูนย์

ในการกัดผิวชิ้นงานด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสนั้น ได้ใช้เครื่องกัดตั้งซีเอ็นซีสามแกน รุ่น Chevalier 2040 VMC ซึ่งกัดด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์ในแนวนานและการเอียงศูนย์เชิงมุม โดยกำหนดค่าความลึกของการตัดเฉือน (d) เป็น 1.0 มิลลิเมตร ค่าความเร็วรอบของเพลาหมุน (ω) เป็น 6,000 รอบต่อนาที ค่าอัตราป้อนกัต (V) เป็น 100 มิลลิเมตรต่อนาที และขนาดรัศมีของมีดตัดเฉือนบอลโนส (R) เป็น 8.0 มิลลิเมตร สำหรับชิ้นงานวัสดุอะลูมิเนียมที่มีขนาดของชิ้นงาน กว้าง×ยาว×สูง เป็น 30×30×25 มิลลิเมตร

6.1 การเอียงศูนย์ในแนวนาน โดยทำการกัดชิ้นงานที่มีการปรับค่าเอียงศูนย์ค่าละ 4 ชิ้นงาน (4 รอบการทดลอง) ด้วยการใช้ตัวยึดจับมีดตัดเฉือนแบบปรับค่าเอียงศูนย์ในแนวนานได้ ดังภาพที่ 38 โดยสามารถปรับค่าการเอียงศูนย์ในแนวนานได้จากหน้าปัดในพิสัย -1.0 มิลลิเมตร ถึง 1.0 มิลลิเมตร ซึ่งกำหนดให้ค่าเอียงศูนย์ในแนวนาน (ΔR) เป็น 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ ค่าระยะห่างระหว่างเส้นแนวกัต (P) เป็น 2 มิลลิเมตร ด้วยการใช้การกัดผิวแบบซิกตัดตลอดชิ้นงานดังภาพที่ 39



ภาพที่ 38 ตัวยึดจับมีดตัดเฉือนแบบปรับค่าเอียงศูนย์ในแนวนานได้



ภาพที่ 39 รูปแบบการกัดผิวสำหรับการทดลองการเยื้องศูนย์ในแนวนอน

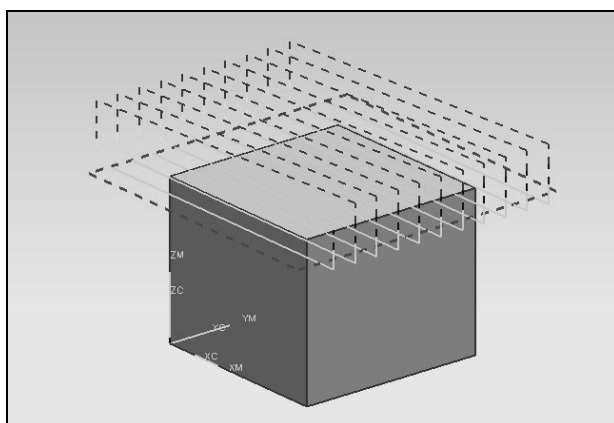
6.2 การเยื้องศูนย์เชิงมุม โดยทำการกัดชิ้นงานที่มีการปรับค่าเยื้องศูนย์เชิงมุม ค่าละ 4 ชิ้นงาน (4 รอบการทดลอง) ด้วยการใช้อุปกรณ์ลิ้มเสริมที่มีมุมองศาที่แตกต่างกันดังภาพที่ 40 มาหมุนให้มีดัดเดือบบอลโนสมีมุมองศาที่แตกต่างกัน โดยได้นำอุปกรณ์ลิ้มเสริมแต่ละตัวที่มีมุมองศาที่แตกต่างกันประกอบเข้ากับมีดัดเดือบบอลโนส ณ ตำแหน่งร่องที่ถูกบากไว้ ดังภาพที่ 41 ซึ่งกำหนดให้ค่าเยื้องศูนย์เชิงมุม (θ) เป็น 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 องศา ตามลำดับ ค่าระยะห่างระหว่างเส้นแนวกัด (P) เป็น 4 มิลลิเมตร ด้วยวิธีการกัดผิวแบบซิกซอลดชิ้นงานดังภาพที่ 42



ภาพที่ 40 อุปกรณ์ลิ้มเสริมที่มีมุมองศาที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 41 มีดตัดเนื้อบอลโนสที่ถูกประกอบด้วยอุปกรณ์ลิ้มเสริม



ภาพที่ 42 รูปแบบการกั้วผิวสำหรับการทดลองการเยื้องศูนย์เชิงมุม

หลังจากกั้วผิวชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว ได้ใช้เครื่องฟอร์มแทรเซอร์ รุ่น Mitutoyo formtracer CS400 สำหรับวัดพิกัดสูงต่ำของพื้นผิวชิ้นงาน โดยวัดชิ้นงานละ 4 ตำแหน่ง แล้วบันทึกข้อมูล

7. การเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการกั้วชิ้นงาน

เพื่อประเมินผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการวัดชิ้นงาน ด้วยเครื่องฟอร์มแทรเซอร์ ว่ามีผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันหรือไม่ และได้ใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์

เอ็กเซล (MS Excel) สร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ผิวจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับพื้นที่ผิวที่ได้จากการวัดชิ้นงานด้วยเครื่องฟอร์ม تراเซอร์

8. สรุปผล

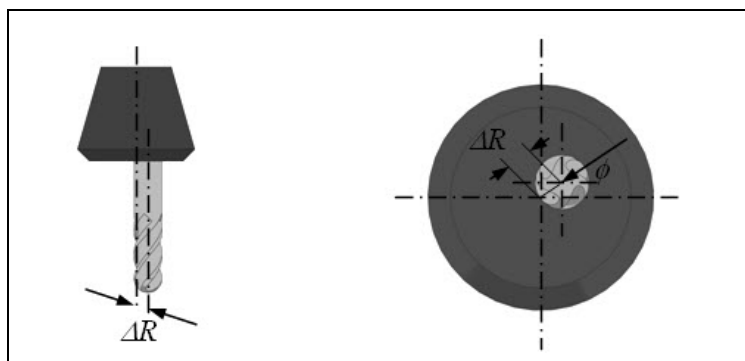
โดยได้สรุปผลของข้อมูลที่ได้จากการจำลองการกัดชิ้นงานและการทดลองกัดชิ้นงาน เมื่อปรับค่าของการเอียงศูนย์ที่แตกต่างกัน

ผลและวิจารณ์

1. การกำหนดตัวแปรและค่าพารามิเตอร์สำหรับการกีดผิวชิ้นงานที่มีผลกระทบจากการเอียงศูนย์

จากการศึกษารูปแบบการหมุนของมิดตัดเฉือนบอลโนสที่มีผลกระทบจากการเอียงศูนย์ในแนวขนาน และการเอียงศูนย์เชิงมุม จะได้ค่าตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องดังนี้

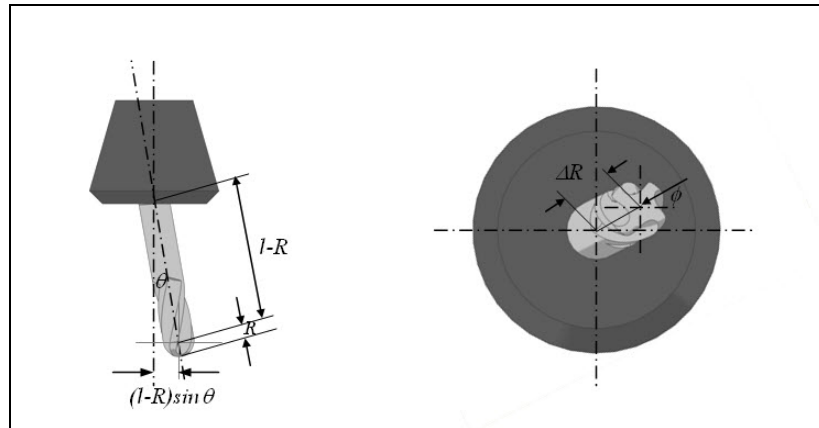
1.1 การเอียงศูนย์ในแนวขนาน โดยพิจารณาจากเส้นแนวศูนย์กลางของมิดตัดเฉือนไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันกับเส้นแนวศูนย์กลางของเพลลาหมุน เมื่อลากเส้นแนวศูนย์กลางของมิดตัดเฉือนและเพลลาหมุน พบว่าเส้นแนวศูนย์กลางทั้งสองเส้นจะขนานกันเสมอ เรียกว่าการเอียงศูนย์ในแนวขนาน และการเอียงศูนย์ชนิดนี้มีผลแค่ในระนาบ $x-y$ เท่านั้น แต่ไม่มีผลกับแนวแกน z ดังภาพที่ 43 ซึ่งกำหนดให้ค่าเอียงศูนย์ในแนวขนานเป็น ΔR และกำหนดให้มุม ϕ เป็นมุมเริ่มต้นของการเอียงศูนย์ในแต่ละเส้นแนวกัด



ภาพที่ 43 ค่าเอียงศูนย์และมุมเริ่มต้นในแต่ละเส้นแนวกัดของการเอียงศูนย์ในแนวขนาน

1.2 การเอียงศูนย์เชิงมุม โดยพิจารณาจากเส้นแนวศูนย์กลางของมิดตัดเฉือนไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันกับเส้นแนวศูนย์กลางของเพลลาหมุน เมื่อลากเส้นแนวศูนย์กลางของมิดตัดเฉือนและเพลลาหมุน พบว่าเส้นแนวศูนย์กลางทั้งสองเส้นจะตัดผ่านกันทำให้เกิดมุมขึ้น เรียกว่าการเอียงศูนย์เชิงมุม จะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดการเอียงศูนย์เชิงมุม ระยะความสูงในแนวแกน z ของมิดตัดเฉือนบอลโนสจะเปลี่ยนแปลงไปโดยขึ้นกับมุมเอียงศูนย์ที่เกิดขึ้น แต่ในทางปฏิบัติได้นำตำแหน่งจุดต่ำสุดของมิดตัดเฉือนบอลโนสแต่ละกับชิ้นงาน เพื่อเป็นจุดอ้างอิงในการทำงาน ทำให้ไม่มีผลตาม

แนวแกน z แต่มีผลแค่ในระนาบ $x-y$ เท่านั้น ดังภาพที่ 44 ซึ่งกำหนดให้ค่าเอียงศูนย์เชิงมุมมีขนาดมุม θ ทำให้เกิดเป็นค่าเอียงศูนย์ในแนวขนาน ΔR และกำหนดให้มุม ϕ เป็นมุมเริ่มต้นของการเอียงศูนย์ในแต่ละเส้นแนวกัก



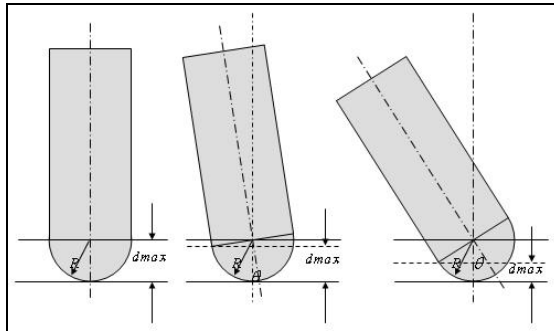
ภาพที่ 44 ค่าเอียงศูนย์และมุมเริ่มต้นในแต่ละเส้นแนวกักของการเอียงศูนย์เชิงมุม

โดยการเอียงศูนย์เชิงมุมนี้ ค่าเอียงศูนย์ในแนวขนาน (ΔR) ที่เบี่ยงเบนไปจะขึ้นอยู่กับค่าเอียงศูนย์เชิงมุม (θ) และค่าความยาวของมิดตัดเนียนบอลโนส (l) โดยวิธีการแปลงค่าการเอียงศูนย์เชิงมุม (θ) เป็นค่าเอียงศูนย์ในแนวขนาน (ΔR) เป็นไปดังสมการ (6)

$$\Delta R = (l - R)\sin\theta \quad (6)$$

เมื่อ ΔR = ค่าเอียงศูนย์ในแนวขนาน
 l = ความยาวของมิดตัดเนียนบอลโนส
 R = รัศมีของมิดตัดเนียนบอลโนส
 θ = มุมเอียงศูนย์เชิงมุม

ในการกักชิ้นงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์เชิงมุม ได้มีข้อจำกัดอย่างหนึ่ง นั่นคือ ความลึกของการตัดเฉือนมากที่สุด (d_{max}) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับมุมเอียงศูนย์ θ เพื่อให้ได้ลักษณะของคมมิดตัดเฉือนบอลโนสที่นำไปกักชิ้นงาน ยังคงรูปเป็นส่วนโค้งของทรงกลมอยู่เช่นเดิม ดังภาพที่ 45 และค่าความลึกของการตัดเฉือนมากที่สุด d_{max} สามารถคำนวณได้ดังสมการ (7)



ภาพที่ 45 ความลึกของการตัดเฉือนมากที่สุดที่ขึ้นอยู่กับมุมเอียงศูนย์เชิงมุม

จาก
$$d_{\max} = R - R \sin \theta$$

จะได้ว่า
$$d_{\max} = R(1 - \sin \theta) \quad (7)$$

เมื่อ $d_{\max}$ = ค่าความลึกของการตัดเฉือนมากที่สุด
 R = รัศมีของมีดตัดเฉือนบอลโนส
 θ = มุมเอียงศูนย์เชิงมุม

1.3 ความลึกของการตัดเฉือน (Dept of cut) เนื่องจากสมการการเคลื่อนที่ของมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีผลจากการเอียงศูนย์ จะถูกพัฒนาจากสมการการเคลื่อนที่ของมีดตัดเฉือนบอลโนสของ Chen *et al.* (2005) โดยค่าความลึกของการตัดเฉือนที่ได้อ้างอิงตำแหน่งของคมมีดที่ผิวบนสุดของชิ้นงาน (จุดพิทัก CI) ถูกอ้างอิงตามค่ามุม β แต่ในทางปฏิบัติ เมื่อทำการกัดชิ้นงานจะกำหนดค่าความลึกของการตัดเฉือนเป็นค่าระยะความลึก d ดังภาพที่ 46 ดังนั้นจึงต้องแปลงค่าระยะความลึก d ให้เป็นมุมอ้างอิงถึงความลึกของการตัดเฉือน β ตามระนาบ $x-z$ ซึ่งเป็นไปดังสมการ (8)

จาก
$$d = R - R \sin \beta$$

$$d = R(1 - \sin \beta)$$

$$\frac{d}{R} = 1 - \sin \beta$$

$$\sin \beta = 1 - \frac{d}{R}$$

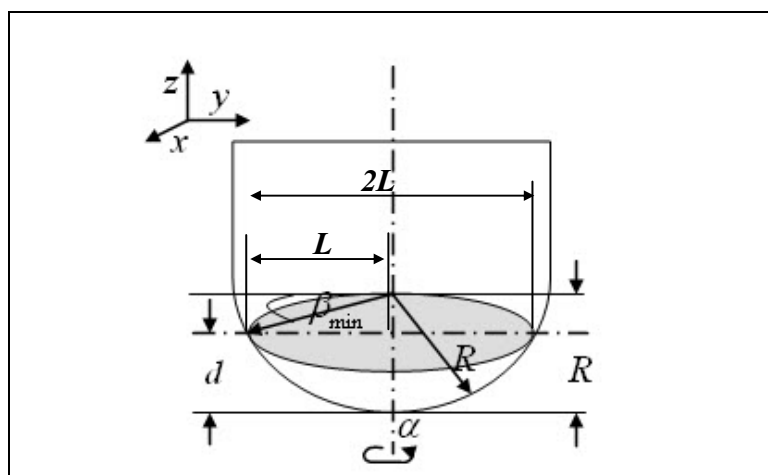
จะได้ว่า

$$\beta = \arcsin \left(1 - \left(\frac{d}{R} \right) \right) \quad (8)$$

นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่าระยะจากคมมีดที่ผิวบนสุดของชิ้นงานถึงแนวแกนศูนย์กลางของเพลลาหมุน (L) ดังภาพที่ 46 ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ (9) และจะได้ว่าความกว้างของร่องผิวที่ถูกกัดใน 1 เส้นแนวกัด จะมีขนาดเป็นสองเท่าของค่าระยะดังกล่าว

$$L = R \cos \beta \quad (9)$$

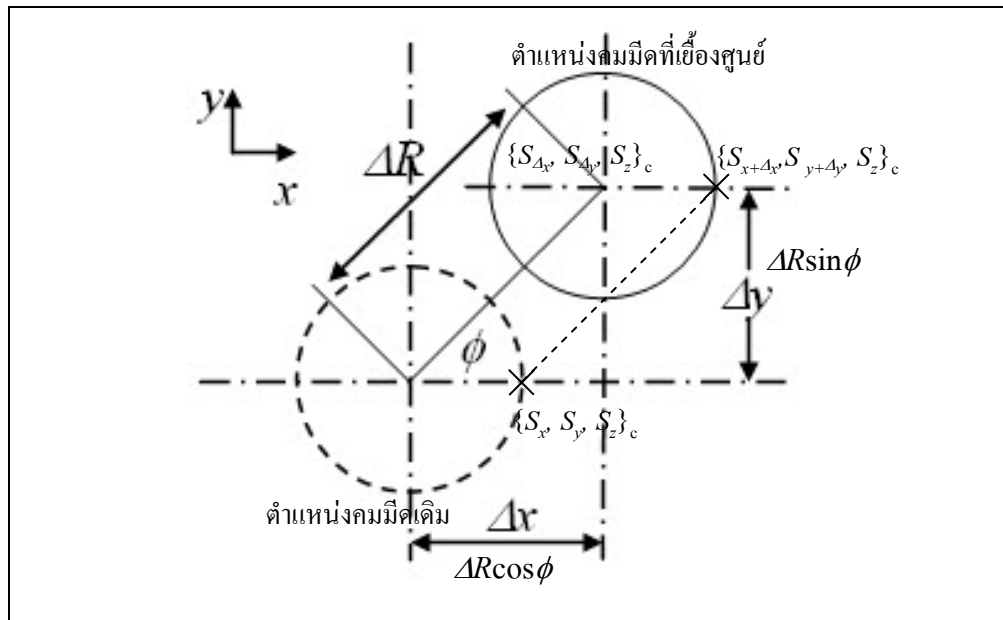
- เมื่อ
- d = ค่าความลึกของการตัดเฉือน
 - R = รัศมีของมีดตัดเฉือนบอลโนส
 - L = ค่าระยะจากคมมีดที่ผิวบนสุดของชิ้นงานถึงแนวแกนศูนย์กลางของเพลลาหมุน
 - β = มุมอ้างอิงถึงความลึกของการตัดเฉือนตามระนาบ x - z



ภาพที่ 46 การแปลงค่าความลึกของการตัดเฉือนเป็นระบบพิกัดทรงกลม

2. วิธีการพัฒนาสมการการเคลื่อนที่ของมิดดัดเนียนบอลโนสที่มีผลจากการเอียงศูนย์

เนื่องจากการเอียงศูนย์ในแนวนอนและการเอียงศูนย์เชิงมุม มีผลของการเอียงศูนย์ที่เกิดขึ้นแค่ในระนาบ x - y เท่านั้น ไม่มีผลในแนวแกน z เมื่อพิจารณาถึงพิกัดตำแหน่งของคมมิดดัดเนียนบอลโนสที่ตำแหน่งผิวบนสุดของชิ้นงาน พบว่าพิกัดตำแหน่งของคมมิดทั้งหมดจะเอียงศูนย์ออกไปเป็นค่า ΔR ในทุกจุดของคมมิดดังภาพที่ 47 ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งพิกัดเอียงศูนย์จากแนวแกนศูนย์กลางเพลลาหมุน $\{S_{Ax}, S_{Ay}, S_z\}_c$ ตำแหน่งพิกัดของคมมิดเดิม $\{S_x, S_y, S_z\}_c$ และตำแหน่งพิกัดของคมมิดที่เอียงศูนย์ $\{S_{x+\Delta x}, S_{y+\Delta y}, S_z\}_c$

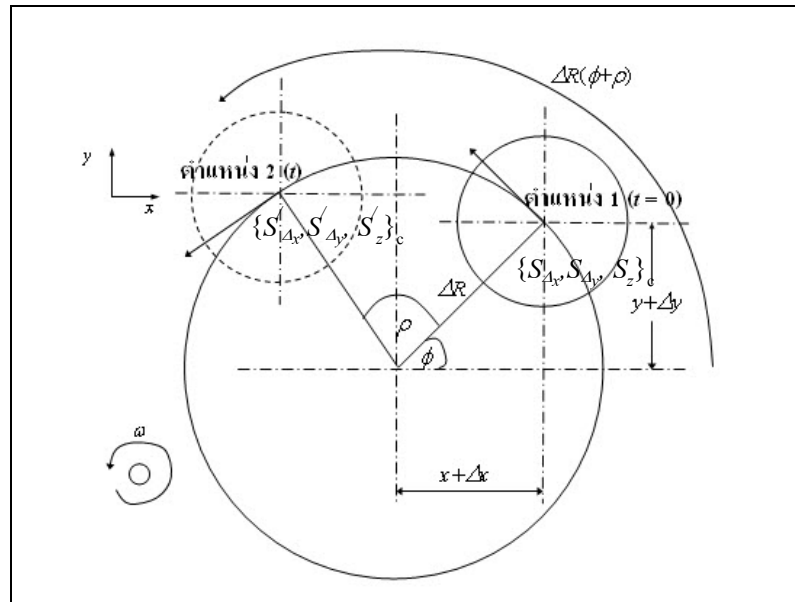


ภาพที่ 47 การพิจารณาการเอียงศูนย์ในพิกัดแกน x และแกน y

โดยค่าของการเอียงศูนย์นี้สามารถพิจารณาออกเป็นตำแหน่งพิกัดจากตามแนวแกน x และแนวแกน y ซึ่งกำหนดให้พิกัด $\{S_{Ax}, S_{Ay}, S_z\}_c$ เป็นสมการพิกัดตำแหน่งเอียงศูนย์จากแนวศูนย์กลางเพลลาหมุน ดังสมการ (10)

$$\begin{Bmatrix} S_{\Delta x} \\ S_{\Delta y} \\ S_0 \end{Bmatrix}_c = \begin{Bmatrix} \Delta R \cos \phi \\ \Delta R \sin \phi \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

และเมื่อนำพิกัดตำแหน่งเชิงศูนย์กลางจากแนวศูนย์กลางเพลลาหมุน $\{S_{\Delta x}, S_{\Delta y}, S_z\}_c$ เคลื่อนที่รอบแนวศูนย์กลางเพลลาหมุนด้วยความเร็วรอบ ω ในช่วงเวลา t ใดๆ จะได้ว่าพิกัด $\{S_{\Delta x}, S_{\Delta y}, S_z\}_c$ ได้ถูกย้ายจากพิกัดตำแหน่งเดิม ไปยังพิกัดตำแหน่งใหม่ $\{S'_{\Delta x}, S'_{\Delta y}, S'_z\}_c$ ดังภาพที่ 48



ภาพที่ 48 การย้ายพิกัดตำแหน่งเชิงศูนย์กลางจากแนวศูนย์กลางเพลลาหมุนตามช่วงเวลา t

จะได้ว่าพิกัดตำแหน่งใหม่ $\{S'_{\Delta x}, S'_{\Delta y}, S'_z\}_c$ ที่เกิดขึ้นจากการหมุนรอบแนวศูนย์กลางของเพลลาหมุนด้วยความเร็วรอบ ω ในช่วงเวลา t ใดๆ ดังนั้นจึงกำหนดให้พิกัดตำแหน่ง $\{S_{\Delta x}, S_{\Delta y}, S_0\}_w$ เป็นสมการพิกัดตำแหน่งหมุนเชิงศูนย์กลางโดยฟังก์ชันของเวลา ดังสมการ (11)

จาก

$$\omega = \frac{\rho}{t}$$

จะได้ว่า

$$\rho = \omega t$$

เมื่อพิจารณาพิกัดตำแหน่งที่เปลี่ยนไป $\{S'_{Ax}, S'_{Ay}, S'_z\}_c$ จากตำแหน่งพิกัดเชิงศูนย์กลางจากแนวศูนย์กลางของเพลลาหมุนเดิม $\{S_{Ax}, S_{Ay}, S_z\}_c$ ที่ช่วงเวลา $t = 0$

จาก

$$\begin{Bmatrix} S'_{Ax} \\ S'_{Ay} \\ S'_z \end{Bmatrix}_c = \begin{Bmatrix} \Delta R \cos(\phi + \rho) \\ \Delta R \sin(\phi + \rho) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

จะได้ว่า

$$\begin{Bmatrix} S_{Ax} \\ S_{Ay} \\ S_z \end{Bmatrix}_w = \begin{Bmatrix} \Delta R \cos(\phi + \omega t) \\ \Delta R \sin(\phi + \omega t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

ซึ่งเมื่อได้สมการพิกัดเชิงศูนย์กลางจากแนวศูนย์กลางของเพลลาหมุน $\{S_{Ax}, S_{Ay}, S_z\}_c$ ดังสมการ (10) และสมการพิกัดตำแหน่งหมุนเชิงศูนย์กลางโดยฟังก์ชันของเวลา $\{S_{Ax}, S_{Ay}, S_z\}_w$ ดังสมการ (11) ก็สามารถนำทั้งสองสมการข้างต้นนี้ นำไปใช้พัฒนาสมการพิกัดตำแหน่งใดๆ ของคมมีดตัดเฉือนบอลโนสที่ผิวบนสุดของชิ้นงาน $\{S_x, S_y, S_z\}_c$ ของ Chen *et al.* (2005) และสมการการเคลื่อนที่ของคมมีดตัดเฉือนบอลโนสที่ผิวบนสุดของชิ้นงาน $\{S_x, S_y, S_z\}_w$ ของ Chen *et al.* (2005) ทั้งกรณีการหมุนกั๊ดชิ้นงานของมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีผลจากการเอียงศูนย์กลางในแนวขนาน และกรณีการหมุนกั๊ดชิ้นงานของมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีผลจากการเอียงศูนย์กลางเชิงมุมได้

2.1 การเอียงศูนย์กลางในแนวขนาน โดยได้พิจารณาพิกัดตำแหน่งใดๆ ของคมมีดตัดเฉือนบอลโนสที่ผิวบนสุดของชิ้นงาน $\{S_x, S_y, S_z\}_c$ ที่ถูกเอียงศูนย์กลางออกจากพิกัดตำแหน่งใดๆ ของคมมีดตัดเฉือนบอลโนสเดิม ด้วยพิกัดตำแหน่งเชิงศูนย์กลางจากแนวศูนย์กลางของเพลลาหมุน $\{S_{Ax}, S_{Ay}, S_z\}_c$ เกิดเป็นพิกัดตำแหน่งใดๆ เอียงศูนย์กลางของคมมีดตัดเฉือนบอลโนส $\{S_{x+Ax}, S_{y+Ay}, S_z\}_c$ ดังภาพที่ 47 ซึ่งสามารถคำนวณค่าพิกัดตำแหน่งใดๆ เอียงศูนย์กลางของคมมีดตัดเฉือนบอลโนส $\{S_{x+Ax}, S_{y+Ay}, S_z\}_c$ ได้ดังสมการ (12)

จาก

$$\begin{Bmatrix} S_{x+\Delta x} \\ S_{y+\Delta y} \\ S_z \end{Bmatrix}_c = \begin{Bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{Bmatrix}_c + \begin{Bmatrix} S_{\Delta x} \\ S_{\Delta y} \\ S_0 \end{Bmatrix}_c$$

$$\begin{Bmatrix} S_{x+\Delta x} \\ S_{y+\Delta y} \\ S_z \end{Bmatrix}_c = \begin{Bmatrix} R \cos \beta \cos \alpha \\ R \cos \beta \sin \alpha \\ R \sin \beta \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \Delta R \cos \phi \\ \Delta R \sin \phi \\ 0 \end{Bmatrix}$$

จะได้ว่า

$$\begin{Bmatrix} S_{x+\Delta x} \\ S_{y+\Delta y} \\ S_z \end{Bmatrix}_c = \begin{Bmatrix} R \cos \beta \cos \alpha + \Delta R \cos \phi \\ R \cos \beta \sin \alpha + \Delta R \sin \phi \\ R \sin \beta \end{Bmatrix} \quad (12)$$

และในขณะที่มีดัดเน็บบอลโนสมีการเคลื่อนที่เดินกัฒในแนวแกน x และย้ายแนวกัฒที่มีระยะห่างของเส้นแนวกัฒที่เท่ากันในแนวแกน y เมื่อมีดัดเน็บบอลโนสมีการเขื่องศูนย์ทำให้สมการการเคลื่อนที่ของคมมีดัดเน็บบอลโนส $\{S_x, S_y, S_z\}_w$ ของ Chen *et al.* (2005) ถูกพัฒนาด้วยการเพิ่มในส่วนของสมการพิกัดตำแหน่งหมุนเขื่องศูนย์โดยฟังก์ชันเวลา $\{S_{\Delta x}, S_{\Delta y}, S_0\}_w$ เกิดเป็นสมการการเคลื่อนที่เดินกัฒเขื่องศูนย์ของคมมีดัดเน็บบอลโนส $\{S_{x+\Delta x}, S_{y+\Delta y}, S_z\}_w$ ดังสมการ (13)

จาก

$$\begin{Bmatrix} S_{x+\Delta x} \\ S_{y+\Delta y} \\ S_z \end{Bmatrix}_w = \begin{Bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{Bmatrix}_w + \begin{Bmatrix} S_{\Delta x} \\ S_{\Delta y} \\ S_0 \end{Bmatrix}_w$$

$$\begin{Bmatrix} S_{x+\Delta x} \\ S_{y+\Delta y} \\ S_z \end{Bmatrix}_w = \begin{Bmatrix} V_f t + R \cos \beta \cos(\alpha_0 + \omega t) \\ mP + R \cos \beta \sin(\alpha_0 + \omega t) \\ R \sin \beta \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \Delta R \cos(\phi + \omega t) \\ \Delta R \sin(\phi + \omega t) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

จะได้ว่า

$$\begin{Bmatrix} S_{x+\Delta x} \\ S_{y+\Delta y} \\ S_z \end{Bmatrix}_w = \begin{Bmatrix} Vt + R \cos \beta \cos(\alpha_0 + \omega t) + \Delta R \cos(\phi + \omega t) \\ mP + R \cos \beta \sin(\alpha_0 + \omega t) + \Delta R \sin(\phi + \omega t) \\ R \sin \beta \end{Bmatrix} \quad (13)$$

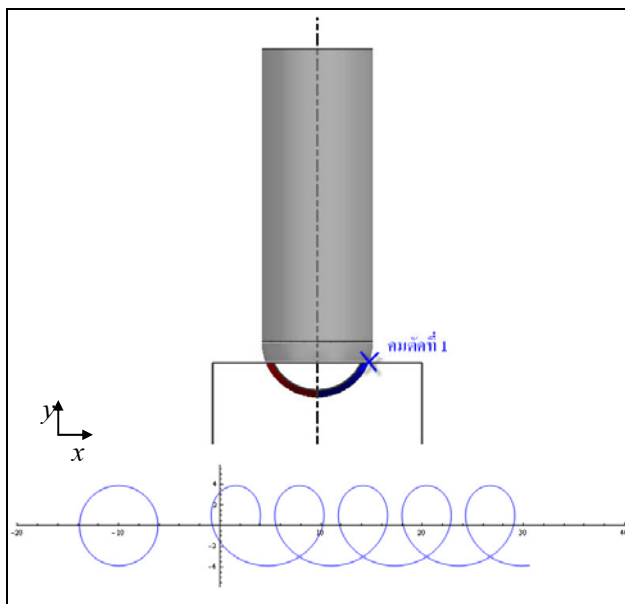
- เมื่อ
- R = รัศมีของมิดตัดเฉือนบอลโนส
 - ΔR = ค่าเยื้องศูนย์ในแนวขนาน
 - ϕ = มุมเริ่มต้นของการเยื้องศูนย์ในแต่ละเส้นแนวกัด
 - β = มุมอ้างอิงถึงความลึกของการตัดเฉือนตามระนาบ x-z
 - α = มุมอ้างอิงถึงตำแหน่งของคมมิดตามระนาบ x-y
 - α_0 = มุมอ้างอิงถึงตำแหน่งของคมมิดเริ่มต้นตามระนาบ x-y ในแต่ละแนวกัด
 - V_f = ค่าอัตราป้อนกัด (Feedrate) ของมิดตัดเฉือนแต่ละเส้นแนวกัด
 - m = ค่าจำนวนแนวกัดที่เพิ่มขึ้นเมื่อย้ายแนวกัดตามแนวแกน y
 - P = ค่าระยะห่างระหว่างเส้นแนวกัด (Step over)
 - ω = ค่าความเร็วรอบของเพลาหมุน (Spindle speed)

2.2 การเยื้องศูนย์เชิงมุม โดยจะต้องแปลงค่าการเยื้องศูนย์เชิงมุม (θ) ให้เป็นค่าเยื้องศูนย์ในแนวขนาน (ΔR) ก่อนด้วยสมการ (6) จากนั้นจึงนำค่าเยื้องศูนย์ในแนวขนาน (ΔR) ที่ถูกแปลงแล้วมาใช้คำนวณค่าพิกัดตำแหน่งใดๆ เยื้องศูนย์ของคมมิดตัดเฉือนบอลโนส $\{S_{x+\Delta x}, S_{y+\Delta y}, S_z\}_c$ ดังสมการ (12) และนำมาใช้คำนวณสมการการเคลื่อนที่เดินกัดเยื้องศูนย์ของคมมิดตัดเฉือนบอลโนส $\{S_{x+\Delta x}, S_{y+\Delta y}, S_z\}_w$ ดังสมการ (13)

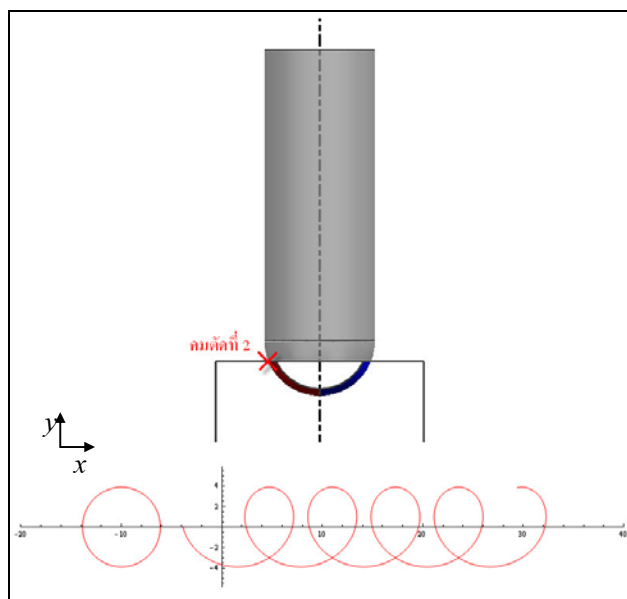
3. วิธีการจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของมิดตัดเฉือนบอลโนสตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

โดยสามารถจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของมิดตัดเฉือนบอลโนสที่มีการเยื้องศูนย์ได้จากสมการการเคลื่อนที่เดินกัดเยื้องศูนย์ของคมมิดตัดเฉือนบอลโนส $\{S_{x+\Delta x}, S_{y+\Delta y}, S_z\}_w$ ดังสมการ (13) ซึ่งได้พิจารณา ณ ตำแหน่งคมตัดคู่ของมิดตัดเฉือนบอลโนส ด้วยโปรแกรมเมทเธมاتيคา 6

3.1 ไม่มีการเยื้องศูนย์ ซึ่งได้จำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดทั้งสองของมิดคัตต่อเนื่องบอลโนสที่ตำแหน่งผิวบนสุดของชิ้นงาน ในพิกัดตำแหน่งแกน x และแกน y ด้วยฟังก์ชันของเวลา (t) โดยคมตัดที่ 1 ดังภาพที่ 49 และคมตัดที่ 2 ดังภาพที่ 50

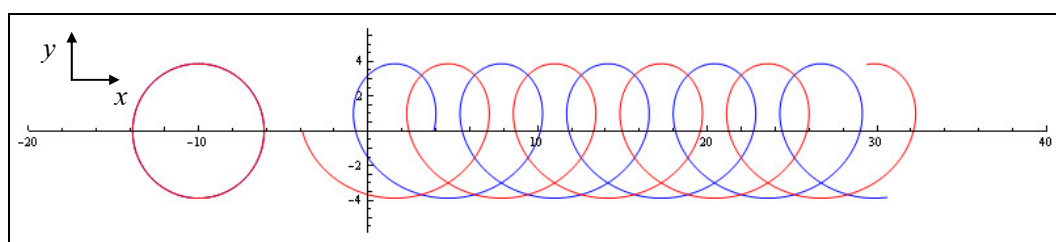


ภาพที่ 49 เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดที่ 1 ของมิดคัตต่อเนื่องบอลโนส (ไม่มีการเยื้องศูนย์)



ภาพที่ 50 เส้นทางการเคลื่อนที่ของกมตัดที่ 2 ของมิดตัดเนียนบอลโนส (ไม่มีการเอียงศูนย์)

และเมื่อรวมเส้นทางการเคลื่อนที่ของกมตัดทั้งสองของมิดตัดเนียนบอลโนสเข้าด้วยกัน จะได้เส้นทางการเคลื่อนที่ของกมตัดทั้งสองดังภาพที่ 51



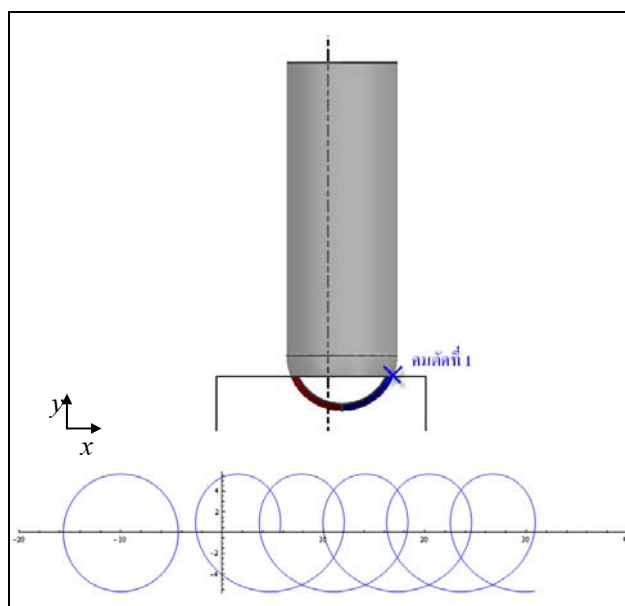
ภาพที่ 51 เส้นทางการเคลื่อนที่ของกมตัดคู่ของมิดตัดเนียนบอลโนส (ไม่มีการเอียงศูนย์)

ซึ่งจากการเคลื่อนที่ของกมตัดเนียนบอลโนสทั้งสองกมตัด ณ เวลา t ใดๆ พบว่าค่าระยะห่างจากศูนย์กลางเพลมาถึงกมตัดที่ผิวบนสุดของกมตัดที่ 1 (L_1) มีค่าเท่ากับค่าระยะห่างจากศูนย์กลางเพลมาถึงกมตัดที่ผิวบนสุดของกมตัดที่ 2 (L_2)

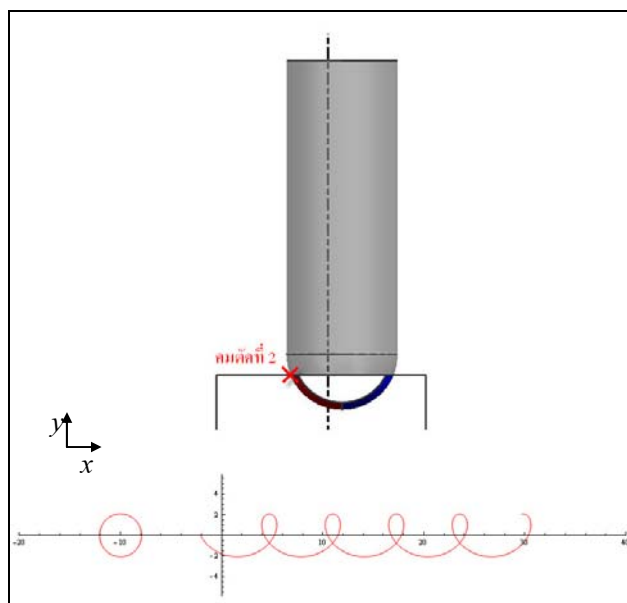
นั่นคือ

$$L_1 = L_2 = R \cos \beta$$

3.2 การเอียงศูนย์กลางในแนวนอน ซึ่งได้จำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดทั้งสองของมิดดัดเนียนบอลโนสที่ตำแหน่งผิวบนสุดของชิ้นงาน ในพิกัดตำแหน่งแกน x และแกน y ด้วยฟังก์ชันของเวลา (t) โดยกำหนดให้คมตัดที่ 1 ดังภาพที่ 52 อยู่ห่างจากแนวศูนย์กลางเพลามากกว่าคมตัดที่ 2 ดังภาพที่ 53

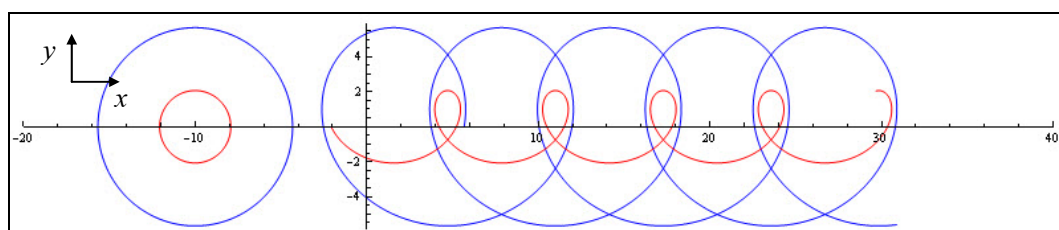


ภาพที่ 52 เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดที่ 1 ของมิดดัดเนียนบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์กลางในแนวนอน



ภาพที่ 53 เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดที่ 2 ของมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์ในแนวนอน

และเมื่อรวมเส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดทั้งสองของมีดตัดเฉือนบอลโนสเข้าด้วยกัน จะได้เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดทั้งสองดังภาพที่ 54



ภาพที่ 54 เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดคู่ของมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์ในแนวนอน

ซึ่งจากการเคลื่อนที่ของมีดตัดเฉือนบอลโนสทั้งสองคมตัด ณ เวลา t ใดๆ พบว่าค่าระยะห่างจากศูนย์กลางเพลตถึงคมมีดกัณฑ์ผิวบนสุดของคมตัดที่ 1 (L_1) มีค่ามากกว่าค่าระยะห่างจากศูนย์กลางเพลตถึงคมมีดกัณฑ์ผิวบนสุดของคมตัดที่ 2 (L_2)

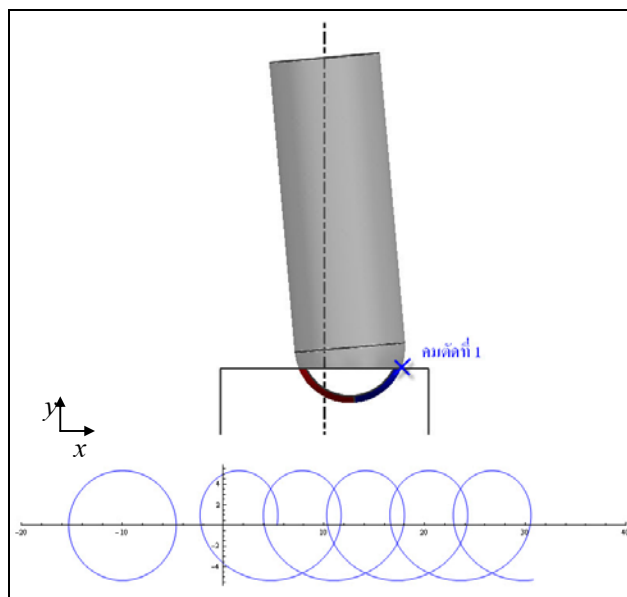
นั่นคือ

$$L_1 = R \cos \beta + \Delta R$$

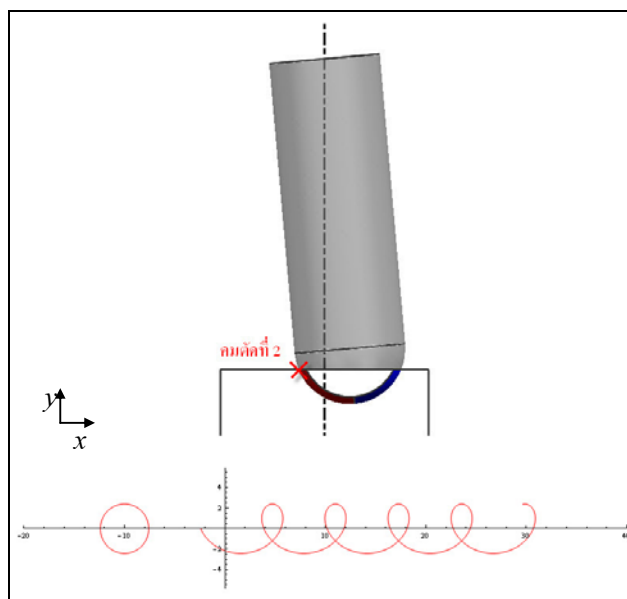
และ

$$L_2 = R \cos \beta - \Delta R$$

3.3 การเอียงศูนย์เชิงมุม ซึ่งได้จำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดทั้งสองของมีดตัดเหี้ยนบอลโนสที่ตำแหน่งผิวบนสุดของชิ้นงาน ในพิกัดตำแหน่งแกน x และแกน y ด้วยฟังก์ชันของเวลา (t) โดยกำหนดให้คมตัดที่ 1 ดังภาพที่ 55 อยู่ห่างจากแนวศูนย์กลางเพลามากกว่าคมตัดที่ 2 ดังภาพที่ 56

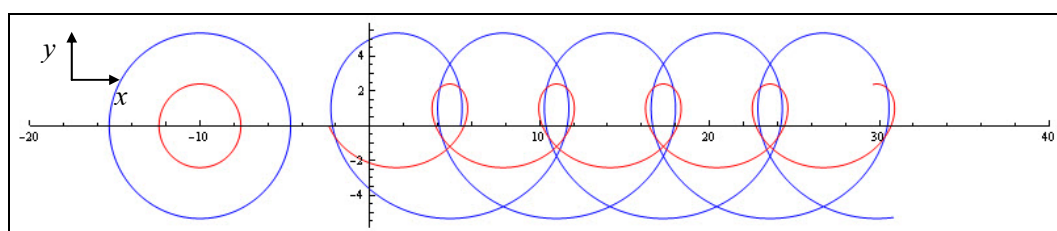


ภาพที่ 55 เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดที่ 1 ของมีดตัดเหี้ยนบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์เชิงมุม



ภาพที่ 56 เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดที่ 2 ของมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์เชิงมุม

และเมื่อรวมเส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดทั้งสองของมีดตัดเฉือนบอลโนสเข้าด้วยกัน จะได้เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดทั้งสองดังภาพที่ 57



ภาพที่ 57 เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดคู่ของมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์เชิงมุม

ซึ่งจากการเคลื่อนที่ของมีดตัดเฉือนบอลโนสทั้งสองคมตัด ณ เวลา t ใดๆ พบว่าค่าระยะห่างจากศูนย์กลางเพลตถึงคมมีดกัดที่ผิวบนสุดของคมตัดที่ 1 (L_1) มีค่ามากกว่าค่าระยะห่างจากศูนย์กลางเพลตถึงคมมีดกัดที่ผิวบนสุดของคมตัดที่ 2 (L_2) โดยแปลงค่าเอียงศูนย์เชิงมุม (θ) เป็นค่าเอียงศูนย์ในแนวขนาน (ΔR) ด้วยสมการ (6) ก่อน

นั่นคือ

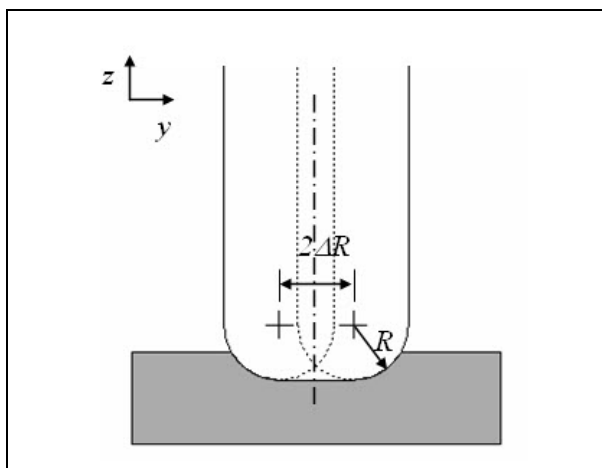
$$L_1 = R \cos \beta + \Delta R$$

และ

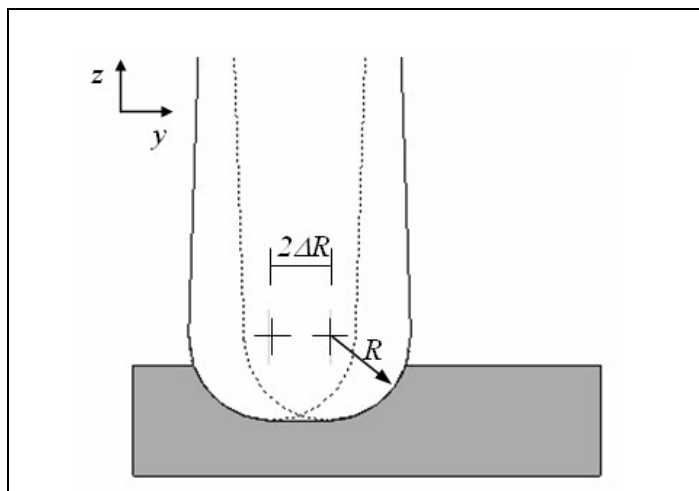
$$L_2 = R \cos \beta - \Delta R$$

4. วิธีการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมิดตัดเชื่อมบอลโนสที่มีผลกระทบจากการเอียงศูนย์

เมื่อมีการกัดผิวตามแนวแกน x ซึ่งได้พิจารณาจากเส้นแนวกัดเพียง 1 เส้นแนวกัด จะได้ว่า ร่องผิวที่ถูกกัดประกอบไปด้วยพื้นผิวส่วนโค้งตามรัศมีของมิดตัดเชื่อมชนิดบอลโนส และพื้นผิวเรียบที่เกิดจากการหมุนเอียงศูนย์รอบแกนเพลลาหมุน โดยพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมิดตัดเชื่อมบอลโนสที่มีผลของการเอียงศูนย์ในแนวนอนใน 1 เส้นแนวกัด เป็นไปดังภาพที่ 58 และพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมิดตัดเชื่อมบอลโนสที่มีผลของการเอียงศูนย์เชิงมุมใน 1 เส้นแนวกัด เป็นไปดังภาพที่ 59



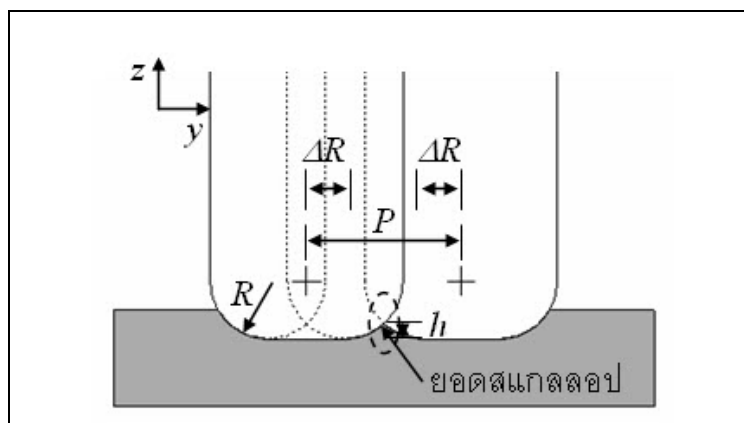
ภาพที่ 58 พื้นผิวที่ถูกกัดตามแนวแกน x ใน 1 เส้นแนวกัด ที่เกิดจากการเอียงศูนย์ในแนวนอน



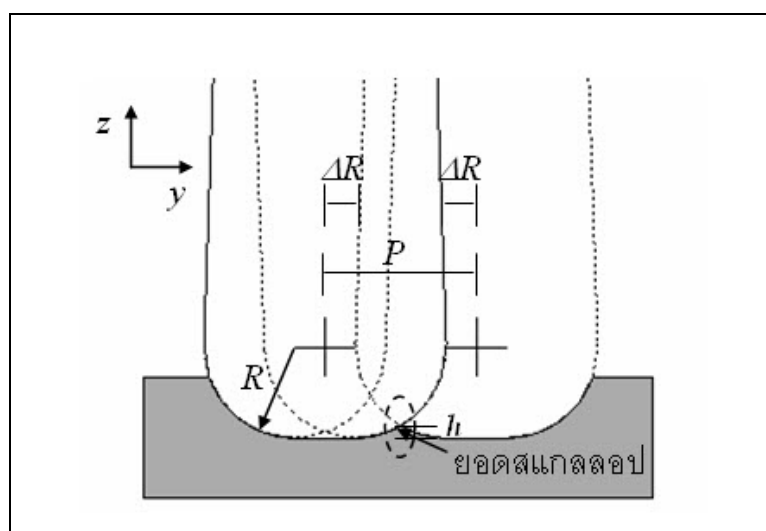
ภาพที่ 59 พื้นผิวที่ถูกกัดตามแนวแกน x ใน 1 เส้นแนวกัด ที่เกิดจากการเอียงศูนย์เชิงมุม

โดยพื้นผิวส่วนเรียบนั้นมีขนาดความกว้างเป็นสองเท่าของค่าการเอียงศูนย์ในแนวนาน (ΔR) แต่สำหรับการเอียงศูนย์เชิงมุม ต้องแปลงค่าเอียงศูนย์เชิงมุม (θ) เป็นค่าเอียงศูนย์ในแนวนาน (ΔR) ด้วยสมการ (6) ก่อน

และขณะที่กัดผิวตามแนวแกน x อีก 1 เส้นแนวกัด และย้ายแนวกัดตามแนวแกน y จะปรากฏพื้นผิวแบบสเกลลอป แต่จะมีค่าความสูงสเกลลอปที่ต่างจากค่าความสูงสเกลลอปของ Vickers *et al.* (1990) ทั้งนี้เพราะการตัดกันของส่วนโค้งในแต่ละเส้นแนวกัดจะถูกเลื่อนเข้าหากัน ซึ่งระยะที่ถูกเลื่อนเข้าหากันของแต่ละเส้นแนวกัดมีค่าเท่ากับระยะเอียงศูนย์ในแนวนาน (ΔR) โดยพื้นผิวสเกลลอปที่ถูกกัดด้วยมิดตัดเฉือนบอลโนสที่มีผลของการเอียงศูนย์ในแนวนาน เป็นไปดังภาพที่ 60 และพื้นผิวสเกลลอปที่ถูกกัดด้วยมิดตัดเฉือนบอลโนสที่มีผลของการเอียงศูนย์เชิงมุม เป็นไปดังภาพที่ 61



ภาพที่ 60 พื้นผิวสเกลลอปที่เกิดขึ้นจากการเยื้องศูนย์ในแนวนอน



ภาพที่ 61 พื้นผิวสเกลลอปที่เกิดขึ้นจากการเยื้องศูนย์เชิงมุม

จากภาพที่ 60 และภาพที่ 61 เห็นได้ว่าค่าความสูงสเกลลอปที่เกิดขึ้นนั้น เป็นผลจากการเลื่อนเข้าหากันของส่วนโค้งในระหว่างสองแนวกัด โดยค่าที่เลื่อนเข้าหากันนั้นเป็นค่าเยื้องศูนย์ในแนวนอน (ΔR) ของทั้งสองแนวกัด ทำให้สมการคำนวณค่าความสูงสเกลลอปของ Vickers *et al.* (1990) จากสมการ (4) ซึ่งได้นำค่าระยะห่างระหว่างแนวกัด (P) ลบด้วยค่าเยื้องศูนย์ในแนวนอน (ΔR) ของทั้งสองแนวกัด เปลี่ยนเป็นสมการคำนวณค่าความสูงสเกลลอป ดังสมการ (14)

$$P - (2\Delta R) = 2\sqrt{2hR - h^2} \quad (14)$$

เมื่อ	R	=	รัศมีของมิดตัดเดือนบอลโนส
	ΔR	=	ค่าเยื้องศูนย์
	P	=	ค่าระยะห่างระหว่างเส้นแนวกัด (Step over)
	h	=	ค่าความสูงสเกลลอป (Scallop height)

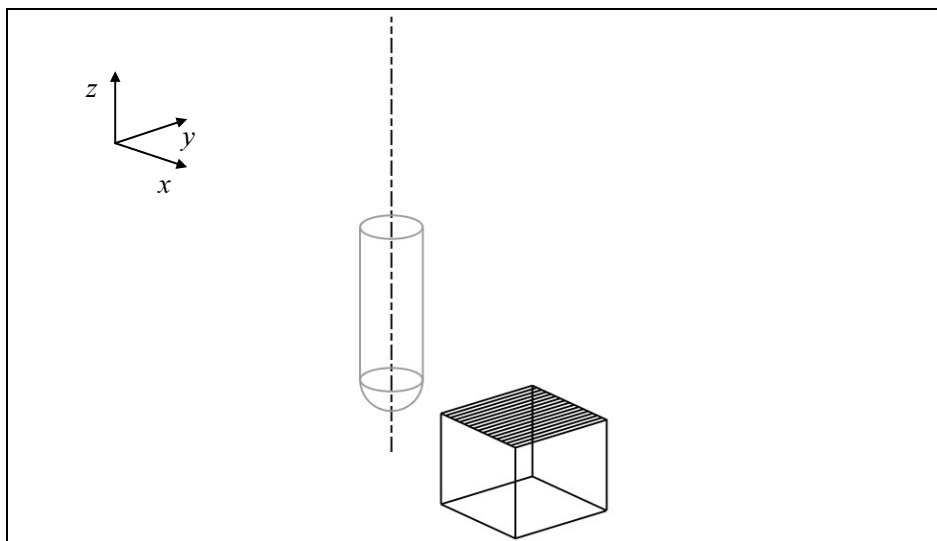
จากสมการ (14) เมื่อค่าการเยื้องศูนย์ในแนวนอน (ΔR) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าระยะห่างระหว่างแนวกัด (P) จะได้ว่า ค่าความสูงสเกลลอปที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นศูนย์ ทั้งนี้ เพราะเกิดการหมุนกัดเยื้องศูนย์รอบแกนเพลลาหมุนของทั้งสองแนวกัดบรรจบกันพอดี หรือเกิดการหมุนกัดเยื้องศูนย์รอบแกนเพลลาหมุนซ้อนทับกันระหว่างสองแนวกัด

สำหรับการเยื้องศูนย์เชิงมุม การคำนวณค่าความสูงสเกลลอป จะต้องแปลงค่าเยื้องศูนย์เชิงมุม (θ) เป็นค่าเยื้องศูนย์ในแนวนอน (ΔR) ด้วยสมการ (6) ก่อน

ในการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมิดตัดเดือนบอลโนส ได้ใช้โปรแกรมยูนิกราฟิกส์ (Unigraphics) เป็นเครื่องมือช่วยในการจำลองสำหรับลักษณะพื้นผิวที่ได้กล่าวไว้ในขั้นต้น

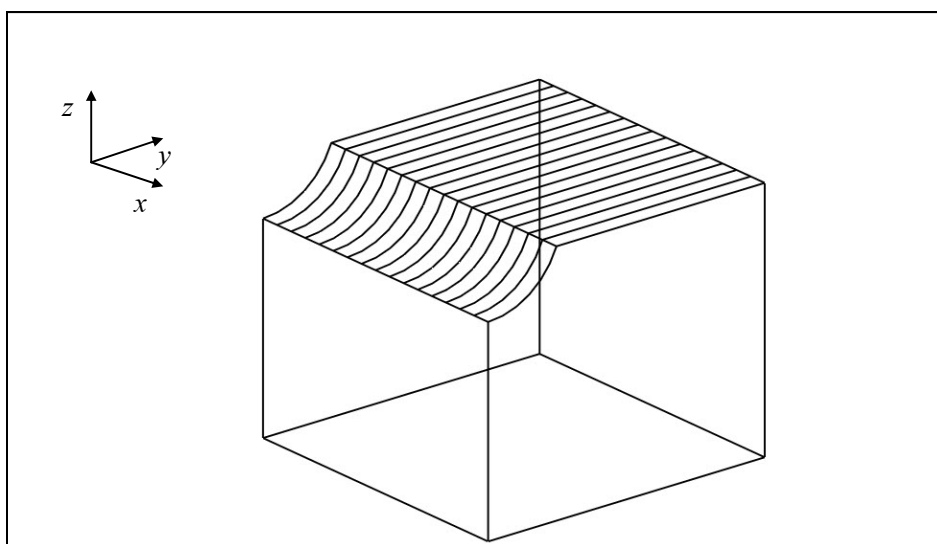
4.1 ไม่มีการเยื้องศูนย์ ซึ่งได้จำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมิดตัดเดือนบอลโนสที่มีรัศมี (R) เป็น 8 มิลลิเมตร ค่าความลึกของการตัดเดือน (d) เป็น 5 มิลลิเมตร ค่าระยะห่างระหว่างเส้นแนวกัด (P) เป็น 10 มิลลิเมตร โดยได้จำลองการกัดผิวตามขั้นตอนดังนี้

4.1.1 จำลองชิ้นงานที่ใช้ในการกัด ดังภาพที่ 62



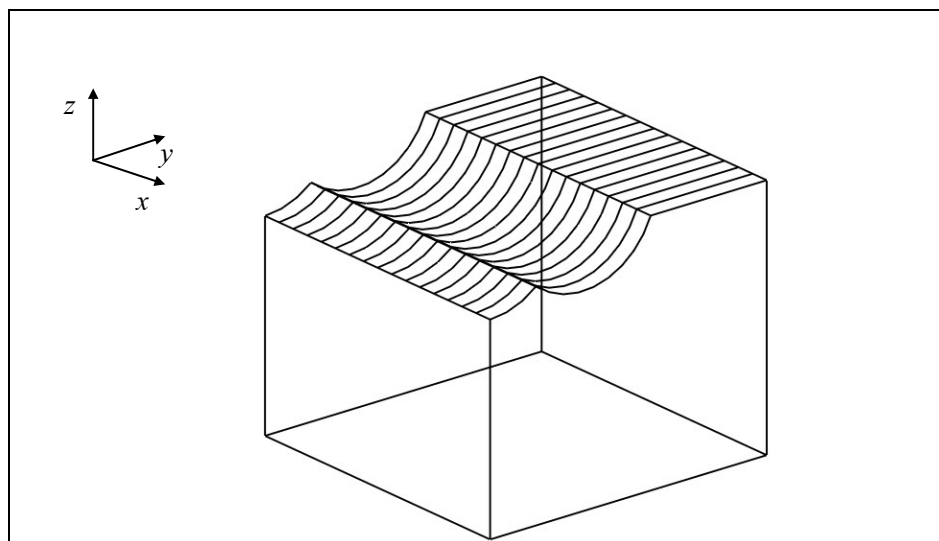
ภาพที่ 62 การจำลองชิ้นงานสำหรับการกัดผิวด้วยมิดตัดเนื้อบอลโนส (ไม่เยื้องศูนย์)

4.1.2 ให้มิดตัดเนื้อบอลโนสเดินกัดใน 1 เส้นแนวกัด ในแนวแกน x ดังภาพที่ 63



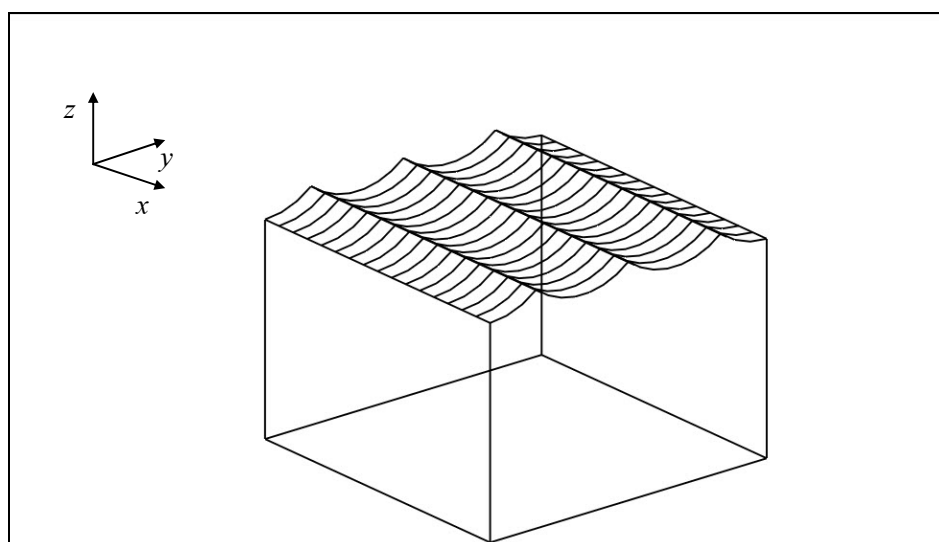
ภาพที่ 63 การจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดใน 1 เส้นแนวกัดด้วยมิดตัดเนื้อบอลโนส (ไม่เยื้องศูนย์)

4.1.3 ให้มีดตัดเงื่อนไขบอลโนสเดินกัลดใน 2 เส้นแนวกัลด โดยย้ายแนวกัลดในแนวแกน y
 ดังภาพที่ 64



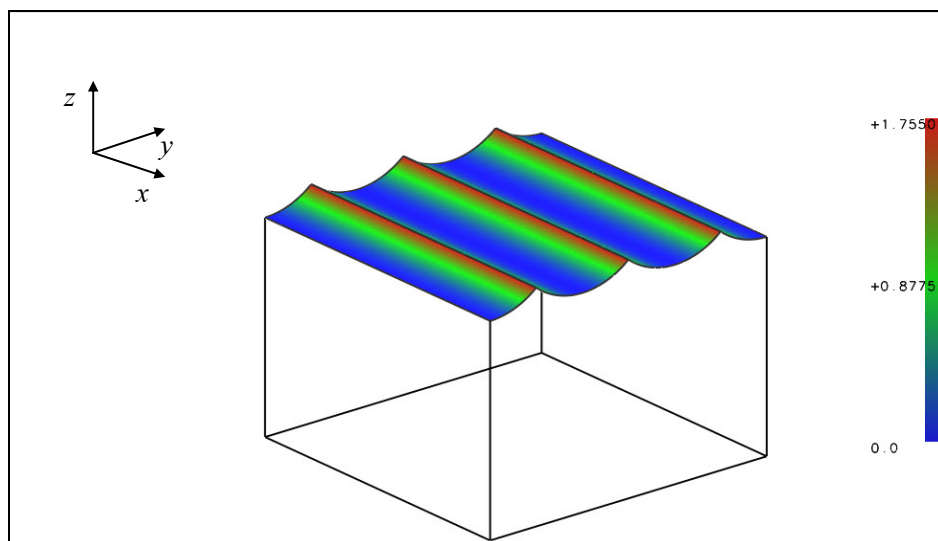
ภาพที่ 64 การจำลองพื้นผิวที่ถูกกัลดใน 2 เส้นแนวกัลดด้วยมีดตัดเงื่อนไขบอลโนส (ไม่เยื้องศูนย์)

4.1.4 ให้มีดตัดเงื่อนไขบอลโนสเดินกัลดตลอดชิ้นงาน ดังภาพที่ 65



ภาพที่ 65 การจำลองพื้นผิวที่ถูกกัลดตลอดชิ้นงานด้วยมีดตัดเงื่อนไขบอลโนส (ไม่เยื้องศูนย์)

4.1.5 วิเคราะห์ผิวของชิ้นงานด้วยการวิเคราะห์พิกัดความสูงต่ำของผิวชิ้นงาน โดยการกำหนดจุดอ้างอิงที่พิกัดต่ำสุดของพื้นผิวที่ถูกกัด (ปลายคมตัดต่ำสุดของมิดตัดเน็บบอลโนส) ดังภาพที่ 66



ภาพที่ 66 การวิเคราะห์พิกัดความสูงต่ำของผิวชิ้นงาน (ไม่เยื้องศูนย์)

ซึ่งจากการจำลองจะได้ค่าความสูงสเกลลอป (h) เป็น 1.7550 มิลลิเมตร

4.1.6 ตรวจสอบค่าความสูงสเกลลอปจากการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัด กับสมการค่าความสูงสเกลลอปที่เกิดจากการเยื้องศูนย์ จากสมการ (14) เพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องของพื้นผิวจำลองที่ถูกสร้างขึ้น

โดยเมื่อแทนค่ารัศมีของมิดตัดเน็บบอล (R) เป็น 8 มิลลิเมตร ค่าการเยื้องศูนย์ (ΔR) เป็น 0 มิลลิเมตร ค่าความลึกของการตัดเน็บบอล (d) เป็น 5 มิลลิเมตร ค่าระยะห่างระหว่างเส้นแนวกัด (P) เป็น 10 มิลลิเมตร ในสมการ (14)

$$\text{จาก} \quad P - (2\Delta R) = 2\sqrt{2hR - h^2} \quad (14)$$

$$10 - (2(0)) = 2\sqrt{2h(8) - h^2}$$

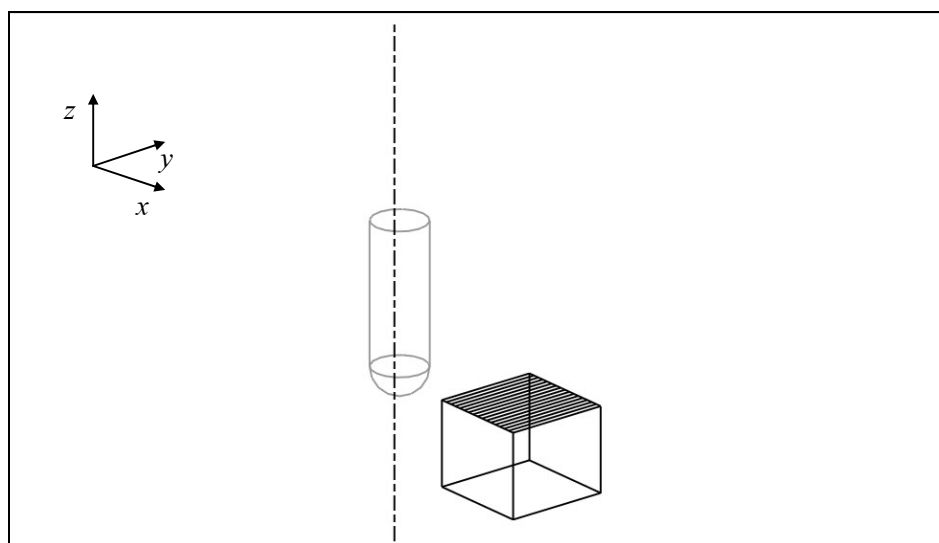
จะได้ว่า

$$h = 1.7550 \text{ มิลลิเมตร}$$

ซึ่งค่าความสูงสเกลลอปรจากการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดมีขนาดเท่ากับค่าความสูงสเกลลอปรที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการค่าความสูงสเกลลอปรที่เกิดจากการเอียงศูนย์ ดังสมการ (14)

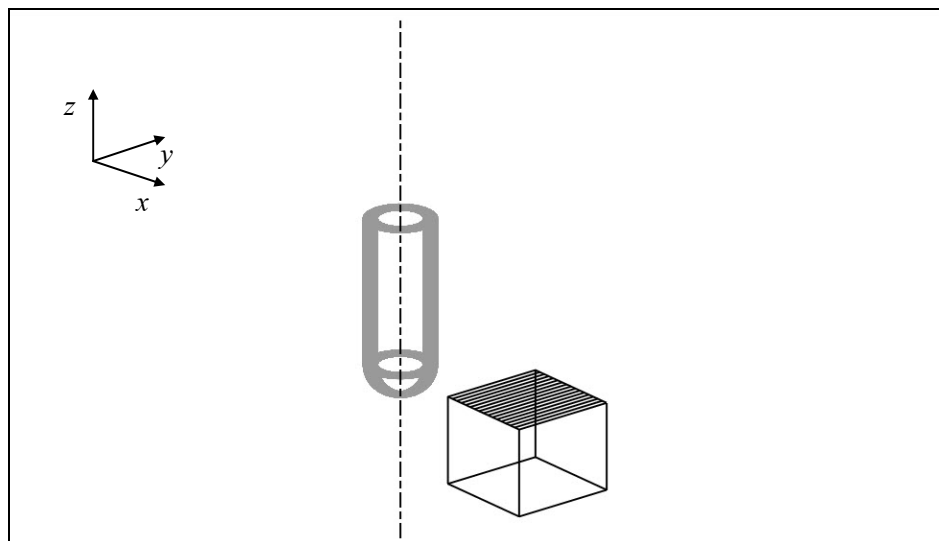
4.2 การเอียงศูนย์ในแนวนอน ซึ่งได้จำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมิดตัดเฉียงบอลโนสที่มีรัศมี (R) เป็น 8 มิลลิเมตร ค่าการเอียงศูนย์ในแนวนอน (ΔR) เป็น 1.8 มิลลิเมตร ค่าความลึกของการตัดเฉียง (d) เป็น 5 มิลลิเมตร ค่าระยะห่างระหว่างเส้นแนวกัด (P) เป็น 10 มิลลิเมตร โดยได้จำลองการกัดผิวตามขั้นตอนดังนี้

4.2.1 จำลองชิ้นงานที่ใช้ในการกัด ดังภาพที่ 67



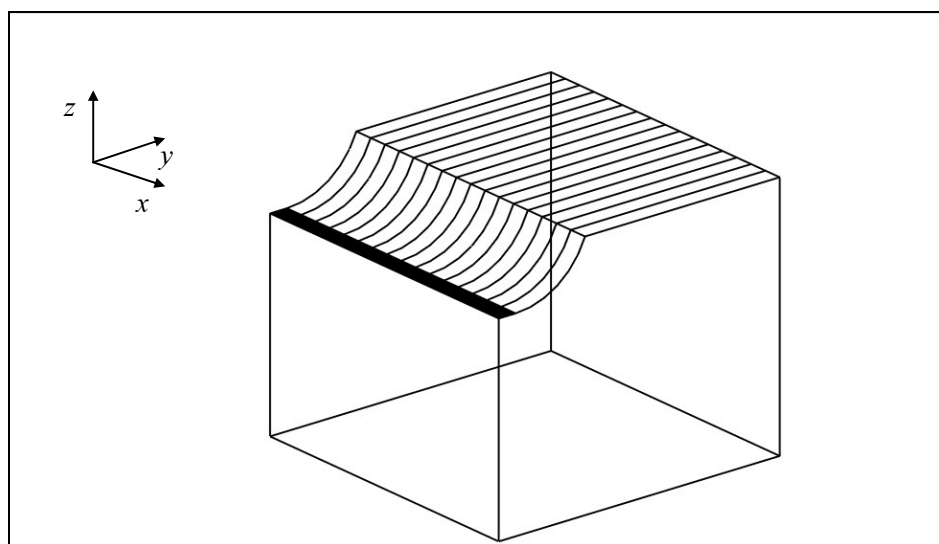
ภาพที่ 67 การจำลองชิ้นงานสำหรับการกัดผิวที่มีการเอียงศูนย์ในแนวนอน

4.2.2 จำลองการหมุนของมิดตัดเฉียงบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์ในแนวนอน ดังภาพที่ 68



ภาพที่ 68 การจำลองการหมุนของมิดตัดเนียนบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์ในแนวนาน

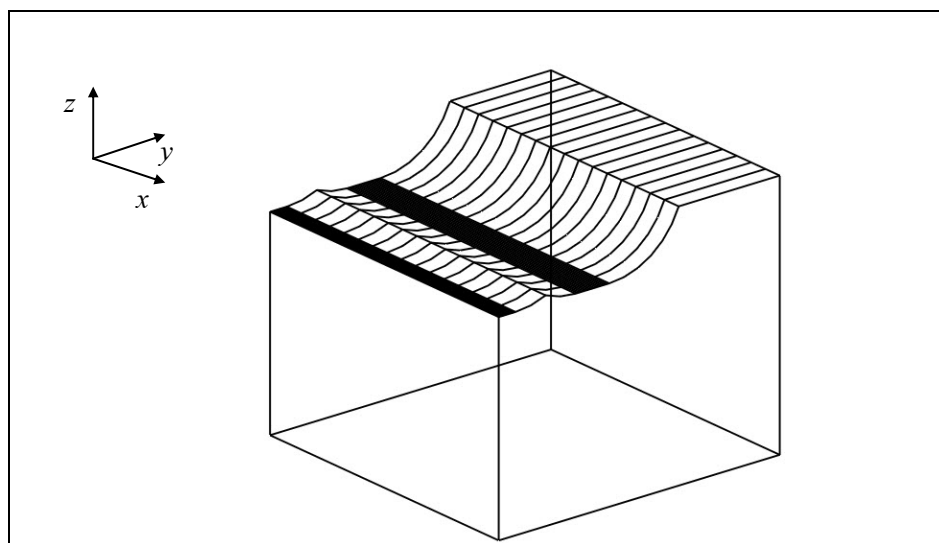
4.2.3 ให้มิดตัดเนียนบอลโนสเดินกักใน 1 เส้นแนวกักในแนวแกน x ดังภาพที่ 69



ภาพที่ 69 การจำลองพื้นผิวที่ถูกกักใน 1 เส้นแนวกักด้วยมิดตัดเนียนบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์ในแนวนาน

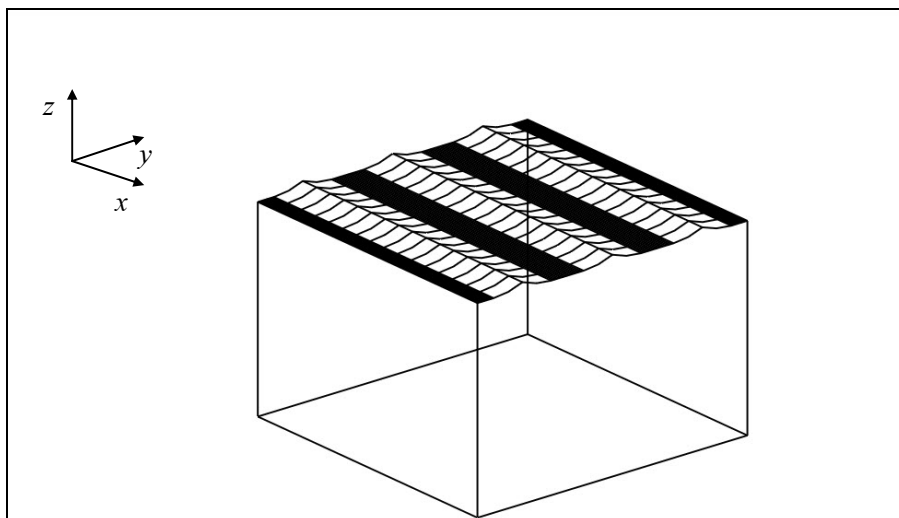
จะเห็นว่าพื้นผิวประกอบไปด้วยพื้นผิวส่วนโค้งซึ่งเกิดจากรัศมีของมิดตัดเหนือ และพื้นผิวส่วนเรียบที่เกิดจากการเอียงศูนย์

4.2.4 ให้มิดตัดเหนือบอลโนสเดินกักใน 2 เส้นแนวกัก โดยย้ายแนวกักในแนวแกน y ดังภาพที่ 70



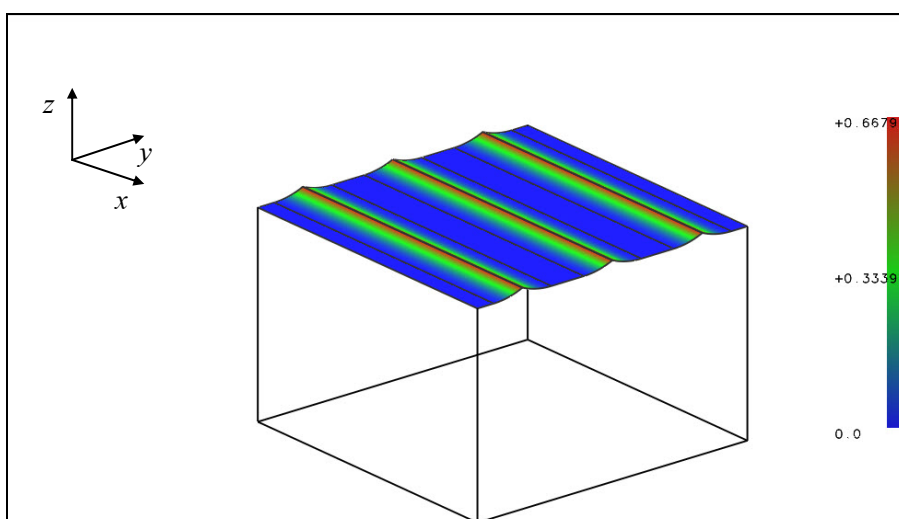
ภาพที่ 70 การจำลองพื้นผิวที่ถูกกักใน 2 เส้นแนวกักด้วยมิดตัดเหนือบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์ในแนวขนาน

4.2.5 ให้มิดตัดเหนือบอลโนสเดินกักตลอดชิ้นงาน ดังภาพที่ 71



ภาพที่ 71 การจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดตลอดชิ้นงานด้วยมิดตัดเฉียงบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์ในแนวขนาน

4.2.6 วิเคราะห์ผิวของชิ้นงานด้วยการวิเคราะห์พิกัดความสูงต่ำของผิวชิ้นงาน โดย การกำหนดจุดอ้างอิงที่พิกัดต่ำสุดของพื้นผิวที่ถูกกัด (ปลายคมตัดต่ำสุดของมิดตัดเฉียงบอลโนส) ดังภาพที่ 72



ภาพที่ 72 การวิเคราะห์พิกัดความสูงต่ำของผิวชิ้นงาน (การเอียงศูนย์ในแนวขนาน)

ซึ่งจากการจำลองจะได้ค่าความสูงสเกลลอป (h) เป็น 0.6679 มิลลิเมตร

4.2.7 ตรวจสอบค่าความสูงสเกลลอปจากการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัด กับสมการค่าความสูงสเกลลอปที่เกิดจากการเอียงศูนย์ จากสมการ (14) เพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องของพื้นผิวจำลองที่ถูกสร้างขึ้น

โดยเมื่อแทนค่ารัศมีของมิดตัดเฉือน (R) เป็น 8 มิลลิเมตร ค่าการเอียงศูนย์ในแนวนาน (AR) เป็น 1.8 มิลลิเมตร ค่าความลึกของการตัดเฉือน (d) เป็น 5 มิลลิเมตร ค่าระยะห่างระหว่างเส้นแนวกัด (P) เป็น 10 มิลลิเมตร ในสมการ (14)

$$\text{จาก} \quad P - (2AR) = 2\sqrt{2hR - h^2} \quad (14)$$

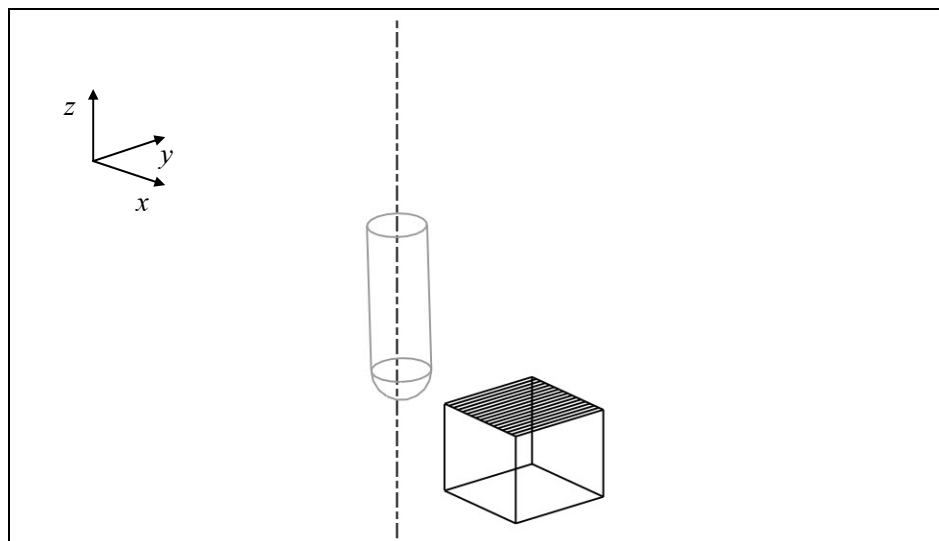
$$10 - (2(1.8)) = 2\sqrt{2h(8) - h^2}$$

$$\text{จะได้ว่า} \quad h = 0.6679 \text{ มิลลิเมตร}$$

ซึ่งค่าความสูงสเกลลอปจากการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดมีขนาดเท่ากับค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการค่าความสูงสเกลลอปที่เกิดจากการเอียงศูนย์ ดังสมการ (14)

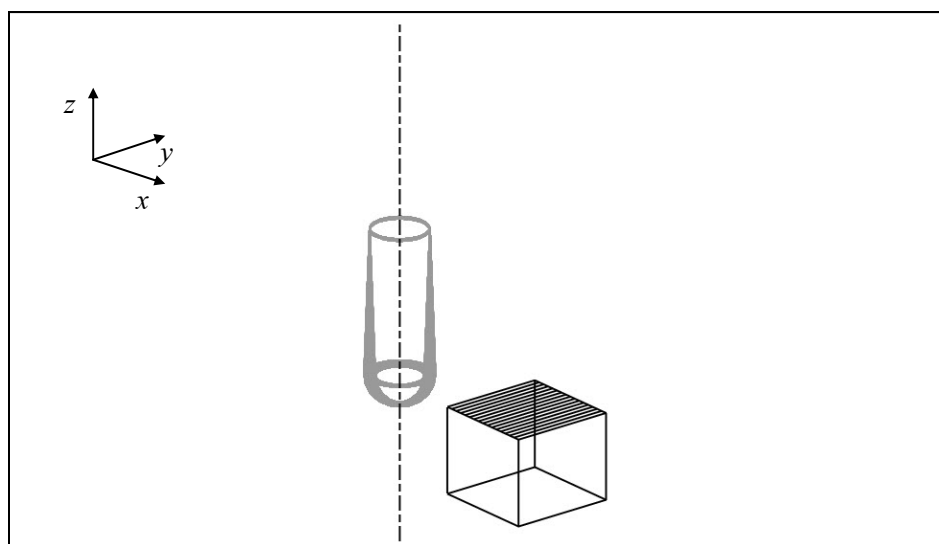
4.3 การเอียงศูนย์เชิงมุม ซึ่งได้จำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมิดตัดเฉือนบอลโนสที่มีรัศมี (R) เป็น 8 มิลลิเมตร ค่าการเอียงศูนย์เชิงมุม (θ) เป็น 2 องศา ค่าความยาวของมิดตัดเฉือนบอลโนส (l) เป็น 50 มิลลิเมตร ค่าความลึกของการตัดเฉือน (d) เป็น 5 มิลลิเมตร ค่าระยะห่างระหว่างเส้นแนวกัด (P) เป็น 10 มิลลิเมตร โดยได้จำลองการกัดผิวตามขั้นตอนดังนี้

4.3.1 จำลองชิ้นงานที่ใช้ในการกัด ดังภาพที่ 73



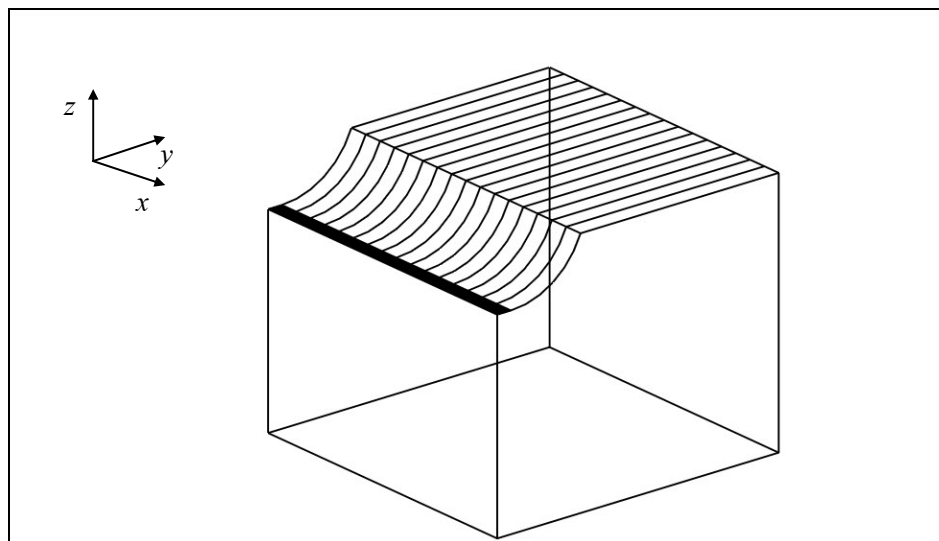
ภาพที่ 73 การจำลองชิ้นงานสำหรับการกัดผิวที่มีการเอียงศูนย์เชิงมุม

4.3.2 จำลองการหมุนของมิดตัดเลือนบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์เชิงมุม ดังภาพที่ 74



ภาพที่ 74 การจำลองการหมุนของมิดตัดเลือนบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์เชิงมุม

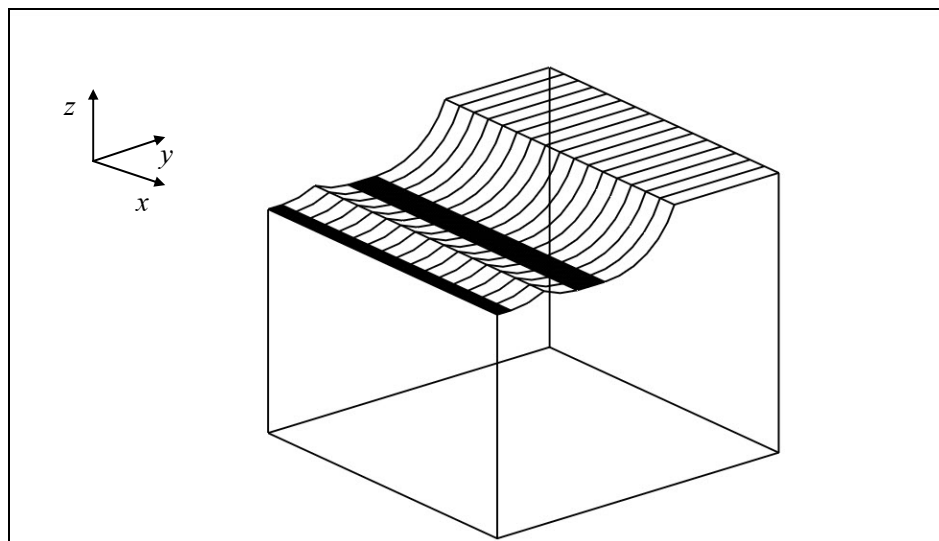
4.3.3 ให้มิดตัดเลือนบอลโนสเดินกัดใน 1 เส้นแนวกัดในแนวแกน x ดังภาพที่ 75



ภาพที่ 75 การจำลองพื้นผิวที่ถูกกักใน 1 เส้นแนวกัด้วยมิดตัดเนียนบอลโนสที่มีการเอียงศูนย์
เชิงมุม

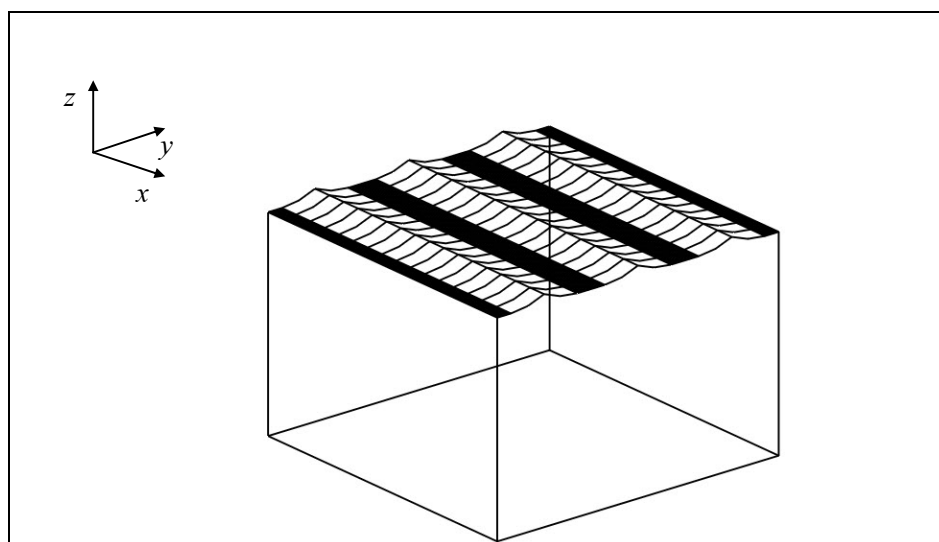
จะเห็นว่าพื้นผิวประกอบไปด้วยพื้นผิวส่วนโค้งซึ่งเกิดจากรัศมีของมิดตัดเนียน
และพื้นผิวส่วนเรียบที่เกิดจากการเอียงศูนย์

4.3.4 ให้มิดตัดเนียนบอลโนสเดินกักใน 2 เส้นแนวกัก โดยย้ายแนวกักในแนวแกน y
ดังภาพที่ 76



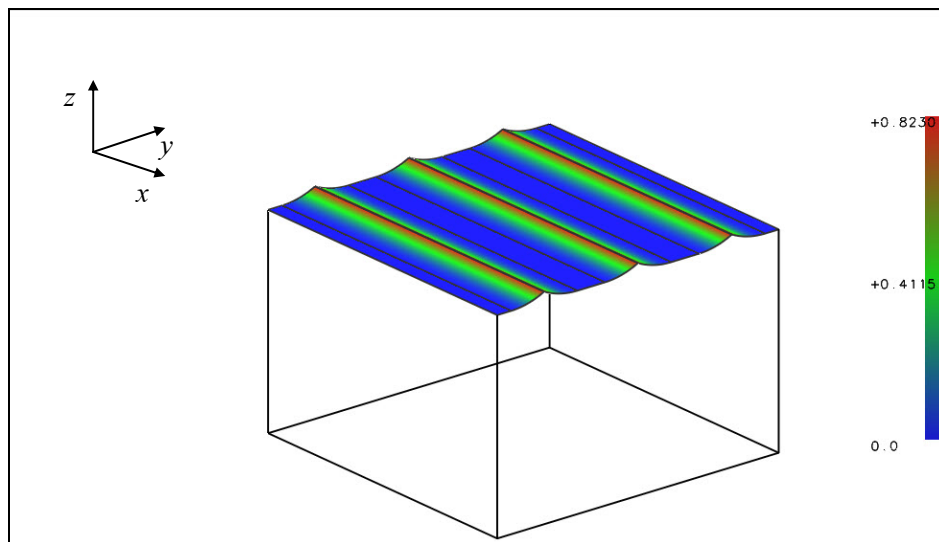
ภาพที่ 76 การจำลองพื้นผิวที่ถูกกักใน 2 เส้นแนวด้วยมีดตัดเนื้อบอลโนสที่มีการเยื้องศูนย์เชิงมุม

4.3.5 ให้มีดตัดเนื้อบอลโนสเดินกัลดตลอดชิ้นงาน ดังภาพที่ 77



ภาพที่ 77 การจำลองพื้นผิวที่ถูกกัลดตลอดชิ้นงานด้วยมีดตัดเนื้อบอลโนสที่มีการเยื้องศูนย์เชิงมุม

4.3.6 วิเคราะห์ผิวของชิ้นงานด้วยการวิเคราะห์พิกัดความสูงต่ำของผิวชิ้นงาน โดยการกำหนดจุดอ้างอิงที่พิกัดต่ำสุดของพื้นผิวที่ถูกกัด (ปลายคมตัดต่ำสุดของมิดตัดเหนือบอลโนส) ดังภาพที่ 78



ภาพที่ 78 การวิเคราะห์พิกัดความสูงต่ำของผิวชิ้นงาน (การเยื้องศูนย์เชิงมุม)

ซึ่งจากการจำลองจะได้ค่าความสูงสเกลลอป (h) เป็น 0.8230 มิลลิเมตร

4.3.7 ตรวจสอบค่าความสูงสเกลลอปจากการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัด กับสมการค่าความสูงสเกลลอปที่เกิดจากการเยื้องศูนย์ จากสมการ (14) เพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องของพื้นผิวจำลองที่ถูกสร้างขึ้น

ซึ่งต้องแปลงค่าการเยื้องศูนย์เชิงมุม (θ) ให้เป็นค่าการเยื้องศูนย์ (ΔR) ก่อน ด้วยสมการ (6) ที่ค่ารัศมีของมิดตัดเหนือ (R) เป็น 8 มิลลิเมตร ค่าเยื้องศูนย์เชิงมุม (θ) เป็น 2 องศา และค่าความยาวของมิดตัดเหนือบอลโนส (l) เป็น 50 มิลลิเมตร

$$\Delta R = (l - R) \sin \theta \quad (6)$$

$$\Delta R = (50 - 8) \sin(2^\circ)$$

$$\Delta R = 1.4658 \text{ มิลลิเมตร}$$

และเมื่อแทนค่ารัศมีของมิดตัดเลื่อน (R) เป็น 8 มิลลิเมตร ค่าการเยื้องศูนย์ (ΔR) เป็น 1.4658 มิลลิเมตร ค่าความลึกของการตัดเลื่อน (d) เป็น 5 มิลลิเมตร ค่าระยะห่างระหว่างเส้นแนวกัด (P) เป็น 10 มิลลิเมตร ในสมการ (14)

$$\text{จาก} \quad P - (2\Delta R) = 2\sqrt{2hR - h^2} \quad (14)$$

$$10 - (2(1.4658)) = 2\sqrt{2h(8) - h^2}$$

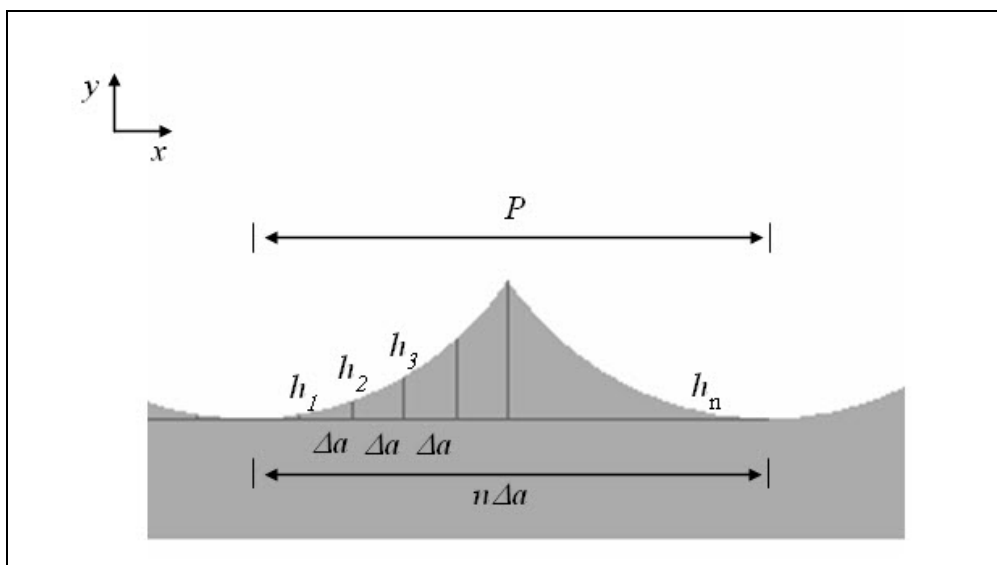
$$\text{จะได้ว่า} \quad h = 0.8230 \text{ มิลลิเมตร}$$

ซึ่งค่าความสูงสเกลลอปปจากการจำลองพื้นผิวที่ถูกกั้ดมีขนาดเท่ากับค่าความสูงสเกลลอปปที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการค่าความสูงสเกลลอปปที่เกิดจากการเยื้องศูนย์ ดังสมการ (14)

5. วิธีการคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงาน

ทั้งนี้เพื่อนำมาใช้พิจารณาว่าผิวชิ้นงานที่ถูกกั้ดด้วยมิดตัดเลื่อนบอลโนสที่มีการเยื้องศูนย์จะให้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานมีแนวโน้มเป็นอย่างไร โดยได้ใช้วิธีคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) ซึ่งมีการคำนวณตามมาตรฐาน ISO 4287 โดย Çolak *et al.* (2007) จากสมการ (5)

เนื่องจากผิวชิ้นงานมีลักษณะเป็นรูปคลื่นที่มีขนาดเท่ากันตลอดชิ้นงานดังภาพที่ 79 ในการคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ย สามารถคำนวณได้ด้วยพื้นที่ภายใต้ฟังก์ชันของผิวชิ้นงาน โดยได้ขอบเขตของการพิจารณาตั้งแต่ตำแหน่งที่ค่า $i = 1$ (ตำแหน่งศูนย์กลางของเพลลาในเส้นแนวกัดที่เริ่มพิจารณา) จนถึงตำแหน่งที่ค่า $i = n$ (ตำแหน่งศูนย์กลางของเพลลาในเส้นแนวกัดถัดไป) นั่นคือช่วงความยาวที่นำมาใช้วัดค่าความหยาบที่เกิดขึ้น (L) มีค่าเท่ากับระยะห่างระหว่างแนวกัด (P) หรือมีค่าเท่ากับช่วงระยะสั้นๆ ที่เท่ากัน (Δa) คูณกับจำนวน n



ภาพที่ 79 พิกัดความสูงของพื้นผิวในแต่ละช่วงตัวอย่าง

และพื้นที่ภายใต้กราฟพื้นผิวขึ้นงานที่เกิดขึ้น ได้จากผลรวมของค่าพิกัดความสูงภายในผิวขึ้นงาน (h_i) คูณกับช่วงระยะสั้นๆ ที่เท่ากัน (Δa) ในแต่ละตำแหน่ง i ตั้งแต่ตำแหน่งที่ค่า $i = 1$ (ตำแหน่งศูนย์กลางของเพลานในเส้นแนวกัดที่เริ่มพิจารณา) จนถึงตำแหน่งที่ค่า $i = n$ (ตำแหน่งศูนย์กลางของเพลานในเส้นแนวกัดถัดไป) ซึ่งเมื่อแทนค่าตัวแปรทั้งหมดในสมการของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของ Çolak *et al.* (2007) แล้ว จะได้ว่าสมการของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยจะเปลี่ยนไปดังสมการ (15)

จาก
$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (5)$$

$$R_a \approx \frac{1}{n\Delta a} \sum_{i=1}^n h_i \Delta a$$

$$R_a \approx \frac{1}{n\Delta a_i} \Delta a \sum_{i=1}^n h_i$$

จะได้ว่า

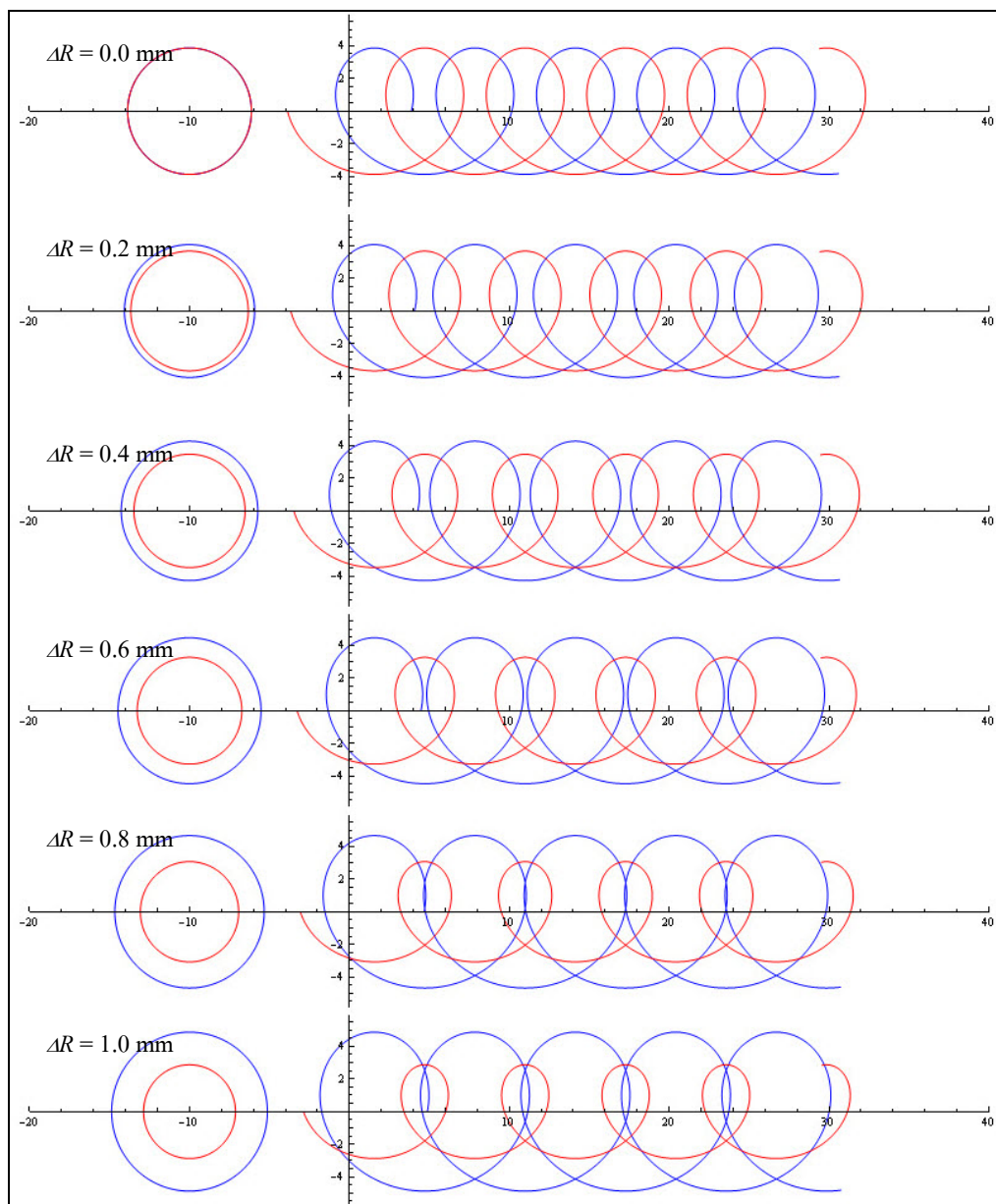
$$R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad (15)$$

เมื่อ	R_a	=	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย
	L	=	ช่วงความยาวที่นำมาใช้วัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย
	$\int_0^L y(x) dx$	=	ฟังก์ชันพื้นที่บริเวณผิวของชิ้นงาน พิจารณา 1 มิติ
	h_i	=	ค่าพิสัยความสูงภายในผิวชิ้นงานแต่ละช่วง i
	Δa	=	ช่วงระยะสั้นๆ ที่เท่ากัน
	n	=	จำนวนทั้งหมดของช่วงระยะสั้นๆ ที่เท่ากัน

6. การจำลองการกัดผิวชิ้นงานด้วยมิดตัดเลื่อนบอลโนสที่มีผลกระทบจากการเอียงศูนย์

โดยจำลองการกัดผิวชิ้นงานด้วยมิดตัดเลื่อนบอลโนสที่มีผลกระทบจากการเอียงศูนย์ในแนวขนานและการเอียงศูนย์เชิงมุม ซึ่งประกอบด้วย การจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของมิดตัดเลื่อนบอลโนส การจำลองพื้นผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้น และการคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงาน ซึ่งกำหนดค่าความลึกของการตัดเลื่อน (d) เป็น 1.0 มิลลิเมตร และขนาดรัศมีของมิดตัดเลื่อนบอลโนส (R) เป็น 8.0 มิลลิเมตร

6.1 การเอียงศูนย์ในแนวขนาน ค่าระยะห่างระหว่างเส้นแนวกัด (P) เป็น 2 มิลลิเมตร ตลอดชิ้นงาน ซึ่งมีเส้นทางการเคลื่อนที่ของคมมิดตัดเลื่อนคมมิดคู่ในแต่ละค่าการเอียงศูนย์ในแนวขนาน (ΔR) ที่แตกต่างกันดังภาพที่ 80

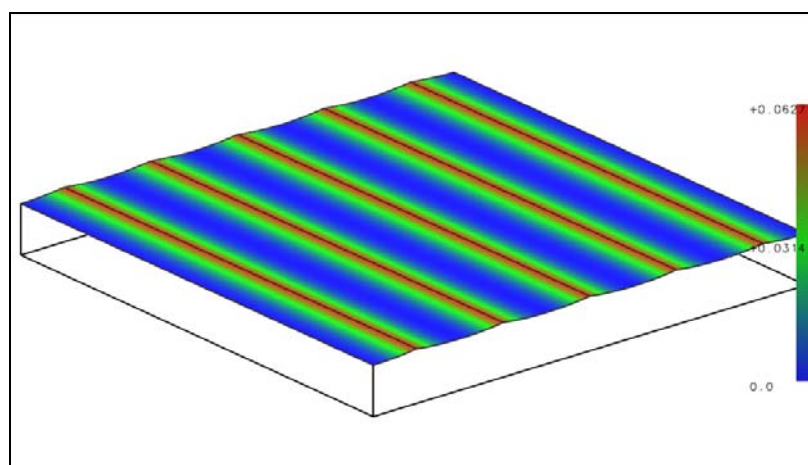


ภาพที่ 80 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของคมมีดตัดเนื้อมัดบนบอลโนสคมมีดคู่ที่มีผลจากการเอียงศูนย์กลางในแนวนอน

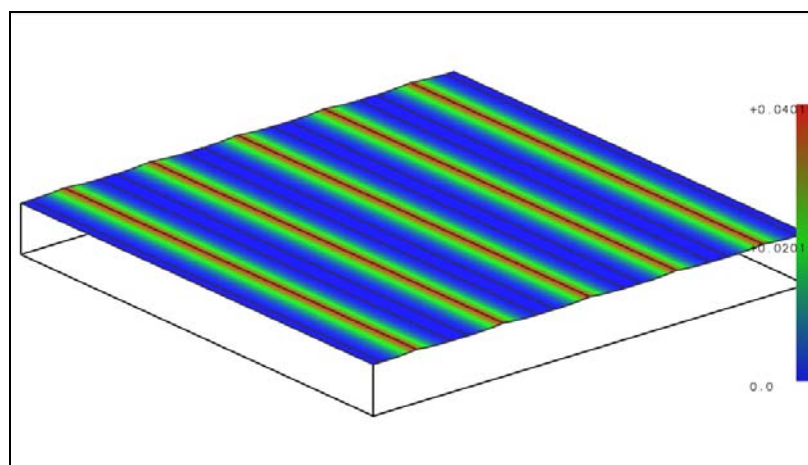
จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มค่าเอียงศูนย์กลางในแนวนอน (ΔR) มากขึ้นเรื่อยๆ ค่าระยะห่างจากศูนย์กลางเพลมาถึงคมมีดกัดที่ผิวบนสุดของคมตัดที่ 1 (L_1) จะเริ่มมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ ตามค่าการเอียง

ศูนย์ในแนวนอน (ΔR) ที่เปลี่ยนไป และค่าระยะห่างจากศูนย์กลางเพลาดึงถึงกมิดกัณฑ์ที่ผิวบนสุดของกมิดกัณฑ์ 2 (L_2) จะเริ่มมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามค่าการเอียงศูนย์ในแนวนอน (ΔR) ที่เปลี่ยนไป

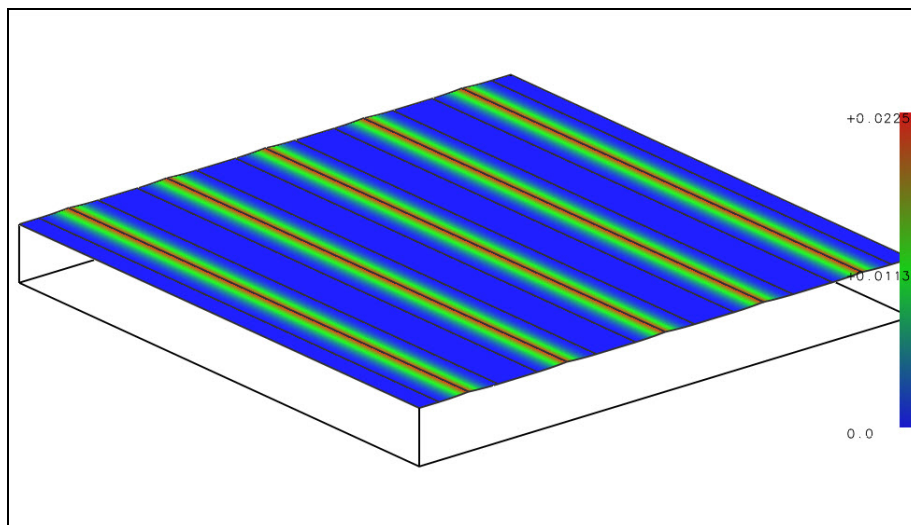
และเมื่อจำลองการกัดผิวชิ้นงานจะได้พื้นผิวที่ถูกกัด และค่าความสูงสเกลอปเป็นดังภาพที่ 81 ถึงภาพที่ 86 ในแต่ละค่าการเอียงศูนย์ในแนวนอน (ΔR) ที่เปลี่ยนไป



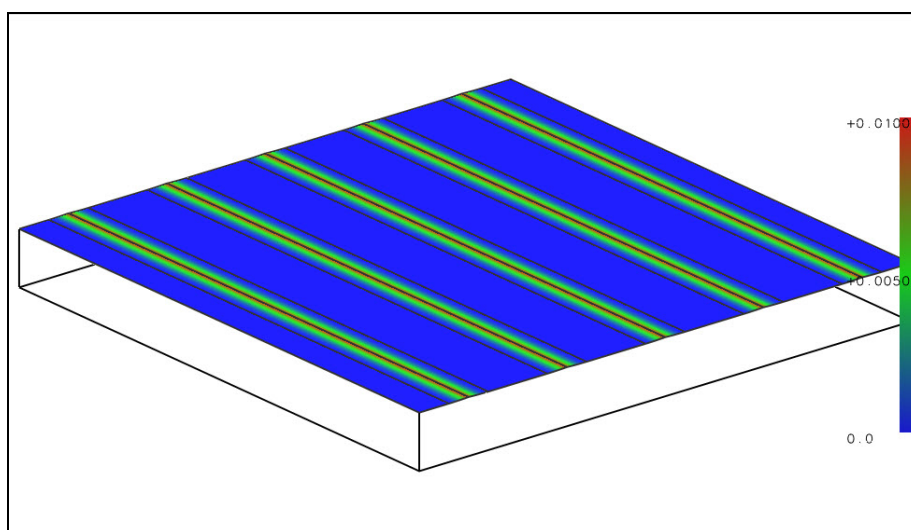
ภาพที่ 81 ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมิดดัดเนียบอลโนสที่มีค่าการเอียงศูนย์ในแนวนอนเป็น 0.0 มิลลิเมตร



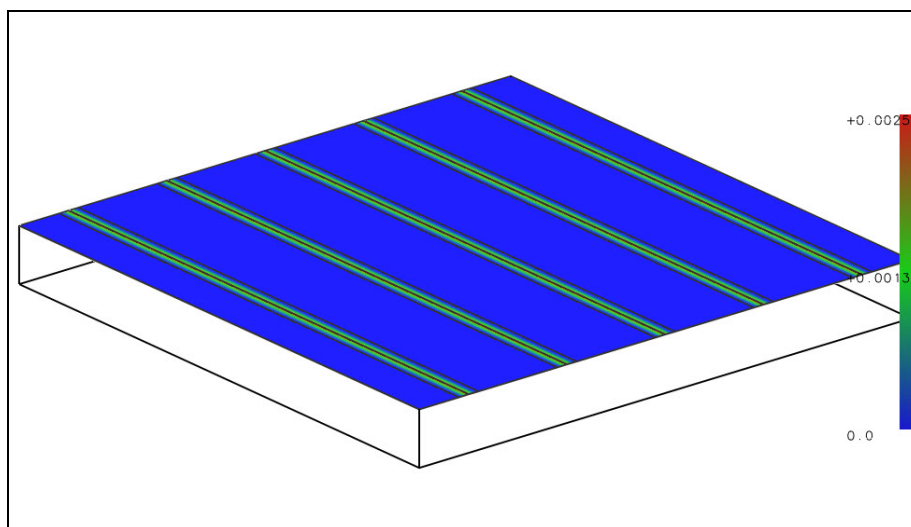
ภาพที่ 82 ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมิดดัดเนียบอลโนสที่มีค่าการเอียงศูนย์ในแนวนอนเป็น 0.2 มิลลิเมตร



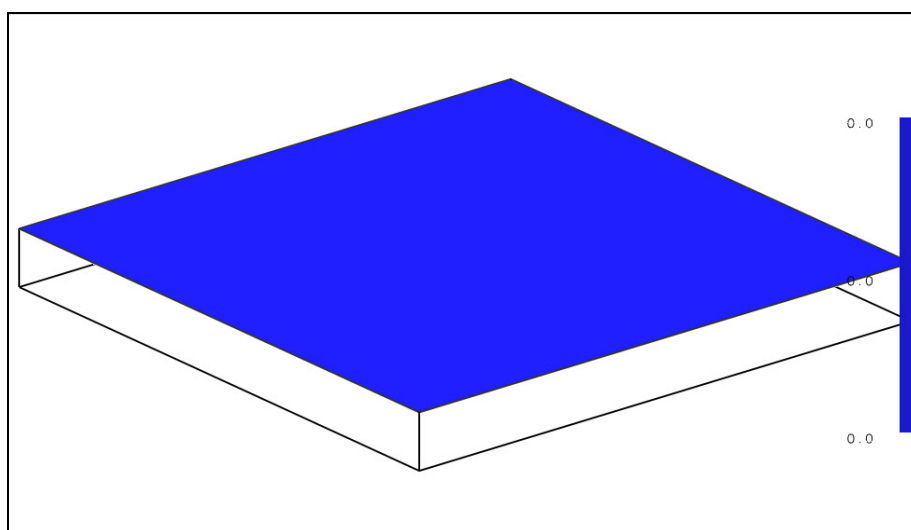
ภาพที่ 83 ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกีดด้วยมิดตัดเหนือบอลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์ในแนวนอน เป็น 0.4 มิลลิเมตร



ภาพที่ 84 ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกีดด้วยมิดตัดเหนือบอลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์ในแนวนอน เป็น 0.6 มิลลิเมตร



ภาพที่ 85 ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกักด้วยมิดดัดเนียนบอลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์กลางในแนวนอน เป็น 0.8 มิลลิเมตร



ภาพที่ 86 ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกักด้วยมิดดัดเนียนบอลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์กลางในแนวนอน เป็น 1.0 มิลลิเมตร

จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มค่าเยื้องศูนย์กลางในแนวนอน (ΔR) มากขึ้นเรื่อยๆ ค่าความกว้างของผิวเรียบที่มีขนาดความกว้างเป็นสองเท่าของค่าเยื้องศูนย์กลางในแนวนอน (ΔR) ก็จะมีขนาดกว้างขึ้น

เรื่อยๆ แต่ค่าความสูงสเกลลอป (h) จะมีขนาดความสูงลดลงเรื่อยๆ และในขณะที่สองเท่าของค่าเอียงศูนย์ในแนวนาน (ΔR) มีค่าเท่ากับค่าระยะห่างระหว่างแนวกัด (P) ค่าความสูงสเกลลอป (h) จะมีขนาดเป็นศูนย์ ทั้งนี้เพราะเกิดการหมุนกั้ดเอียงศูนย์รอบแกนเพลาหมุนของทั้งสองแนวกัดบรรจบกันพอดี

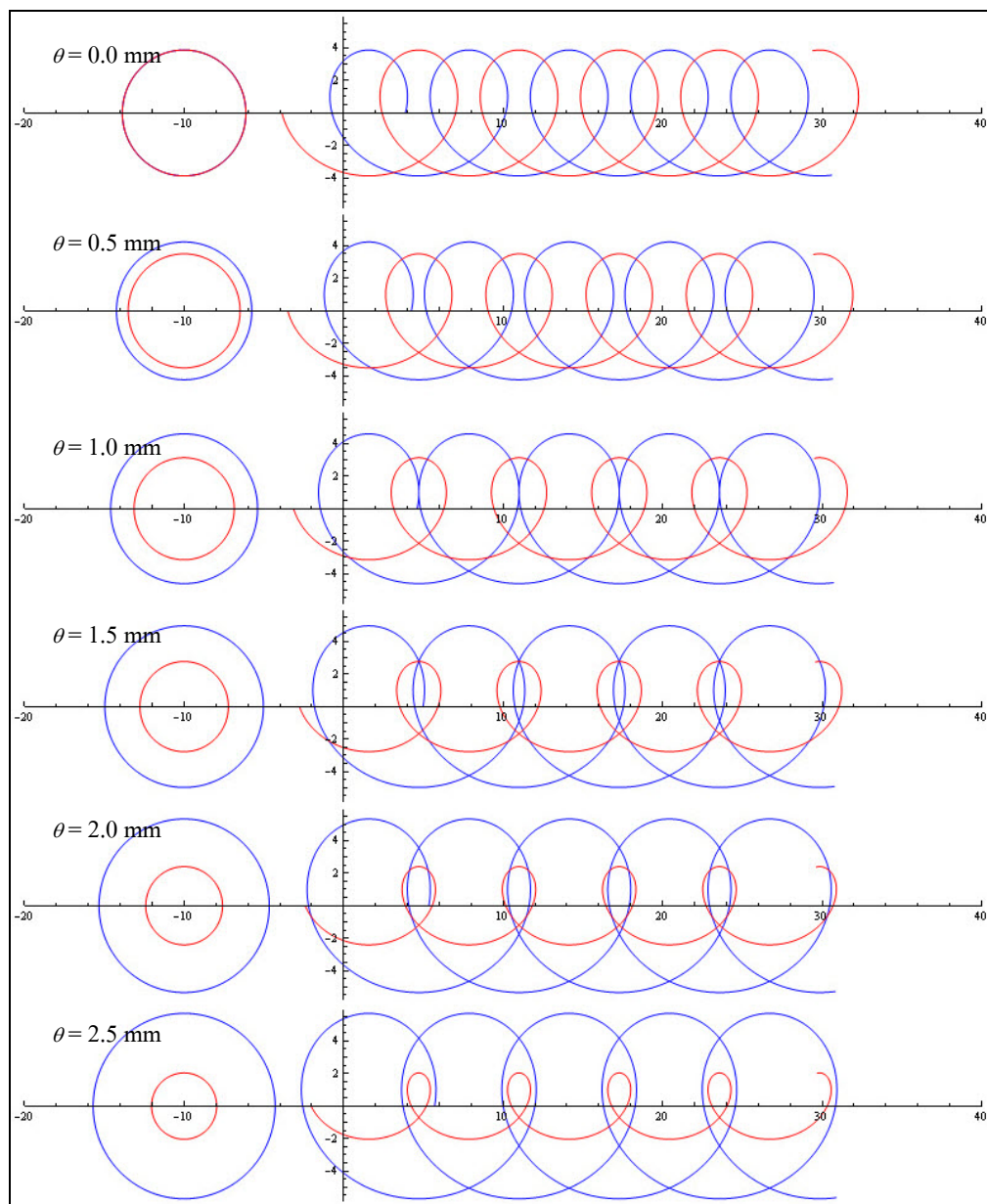
โดยผลของค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการจำลองการกั้ดและจากการคำนวณด้วยสมการค่าความสูงสเกลลอปที่เกิดจากการเอียงศูนย์ดังสมการ (14) และค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้คำนวณขึ้นด้วยสมการค่าความหยาบผิวเฉลี่ยดังสมการ (15) ได้แสดงผลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงสเกลลอปและค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองกั้ดขึ้นงานที่ค่าเอียงศูนย์ในแนวนานแตกต่างกัน

ค่าเอียงศูนย์ในแนวนาน (ΔR) (หน่วย: มิลลิเมตร)	ค่าความสูงสเกลลอป (h) (หน่วย: มิลลิเมตร)	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) (หน่วย: ไมโครเมตร)
0.0	0.0627	20.999
0.2	0.0401	10.776
0.4	0.0225	4.574
0.6	0.0100	1.381
0.8	0.0025	0.191
1.0	0.0000	0.000

จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มค่าเอียงศูนย์ในแนวนาน (ΔR) มากขึ้นเรื่อยๆ ทั้งค่าความสูงสเกลลอป (h) และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) จะมีขนาดลดลงเรื่อยๆ จนถึงตำแหน่งสองเท่าของค่าเอียงศูนย์ในแนวนาน (ΔR) มีค่าเท่ากับค่าระยะห่างระหว่างแนวกัด (P) ทั้งค่าความสูงสเกลลอป (h) และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) จะมีขนาดเป็นศูนย์

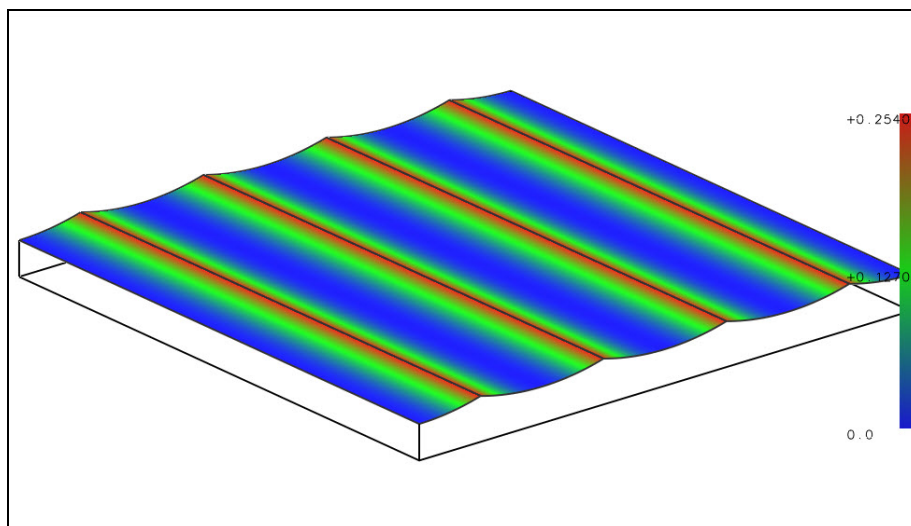
6.2 การเอียงศูนย์เชิงมุม ค่าระยะห่างระหว่างเส้นแนวกัด (P) เป็น 4 มิลลิเมตร ตลอด
 ชิ้นงาน ซึ่งมีเส้นทางการเคลื่อนที่ของคมมีดตัดเนื้อคมมีดคู่ในแต่ละค่าการเอียงศูนย์เชิงมุม (θ) ที่
 แตกต่างกันดังภาพที่ 87



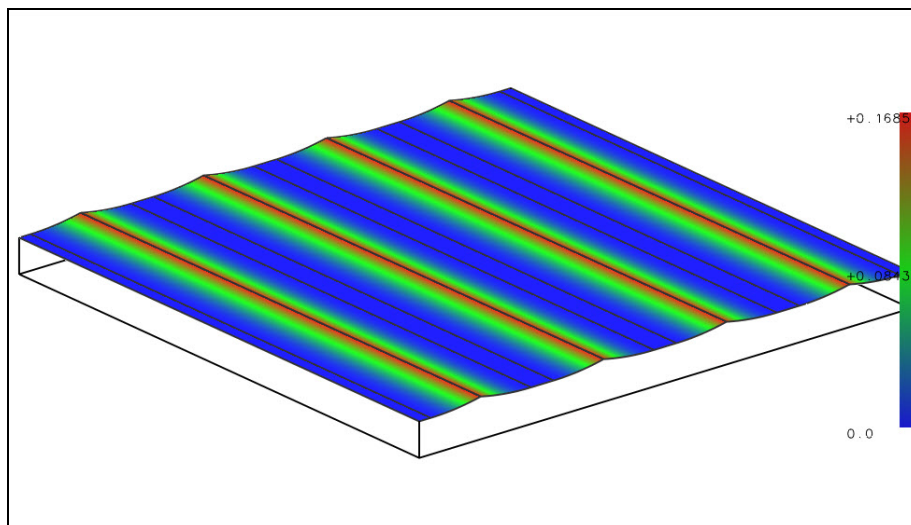
ภาพที่ 87 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของคมมีดตัดเนื้อบอลโนสคมมีดคู่ที่มีผลจากการเอียง
 ศูนย์เชิงมุม

จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มค่าเชิงศูนย์เชิงมุม (θ) มากขึ้นเรื่อยๆ ค่าระยะห่างจากศูนย์กลางเพลาดึงคมมีดกัดที่ผิวบนสุดของคมตัดที่ 1 (L_1) จะเริ่มมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ ตามค่าการเอียงศูนย์ (ΔR) ที่ถูกแปลงจากค่าการเอียงศูนย์เชิงมุม (θ) ที่เปลี่ยนไปด้วยสมการ (6) และค่าระยะห่างจากศูนย์กลางเพลาดึงคมมีดกัดที่ผิวบนสุดของคมตัดที่ 2 (L_2) จะเริ่มมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามค่าการเอียงศูนย์ (ΔR) ที่ถูกแปลงจากค่าการเอียงศูนย์เชิงมุม (θ) ที่เปลี่ยนไปด้วยสมการ (6)

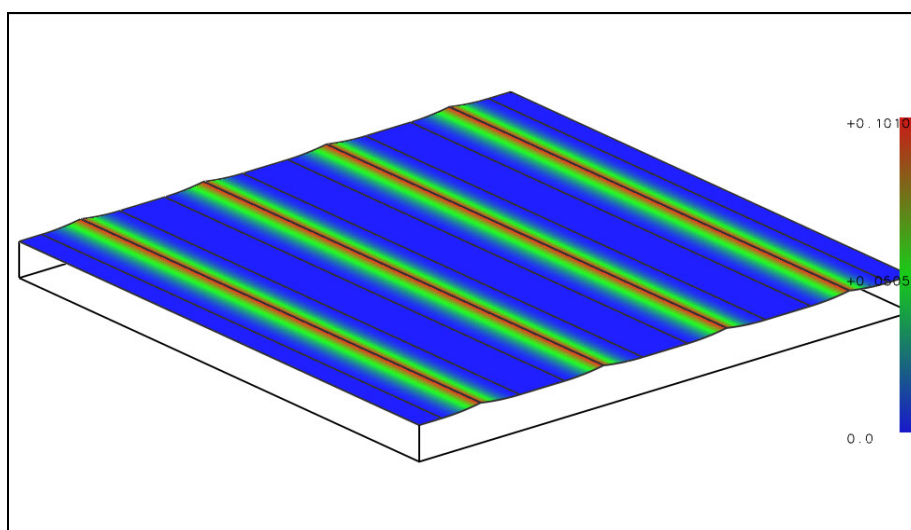
และเมื่อจำลองการกัดผิวชิ้นงานจะได้พื้นผิวที่ถูกกัด และค่าความสูงสเกลอปเป็นดังภาพที่ 88 ถึงภาพที่ 93 ในแต่ละค่าการเอียงศูนย์เชิงมุม (θ) ที่เปลี่ยนไป



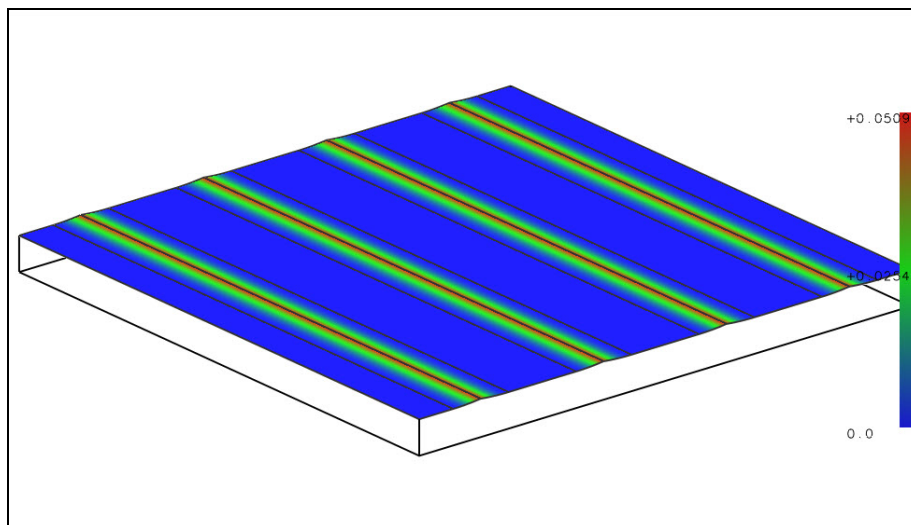
ภาพที่ 88 ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยมีดตัดเน็บบอลโนสที่มีค่าการเอียงศูนย์เชิงมุมเป็น 0.0 องศา



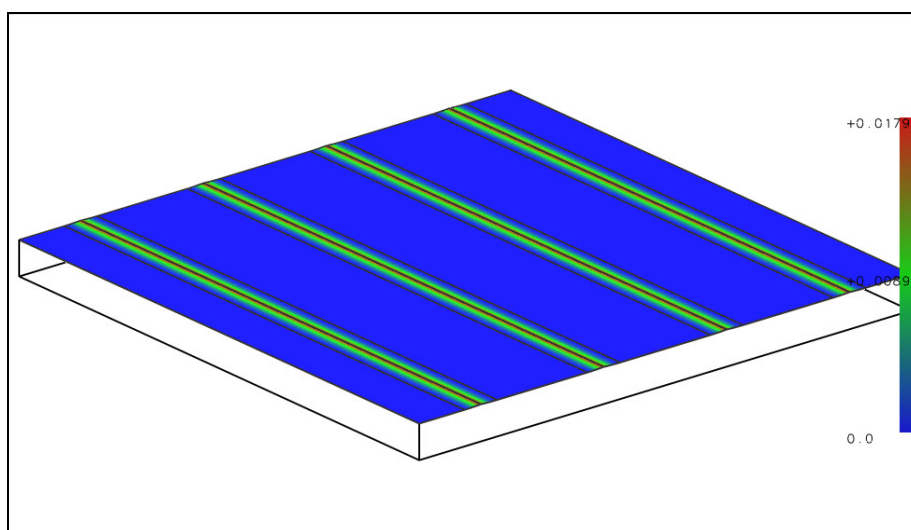
ภาพที่ 89 ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกักด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์เชิงมุมเป็น 0.5 องศา



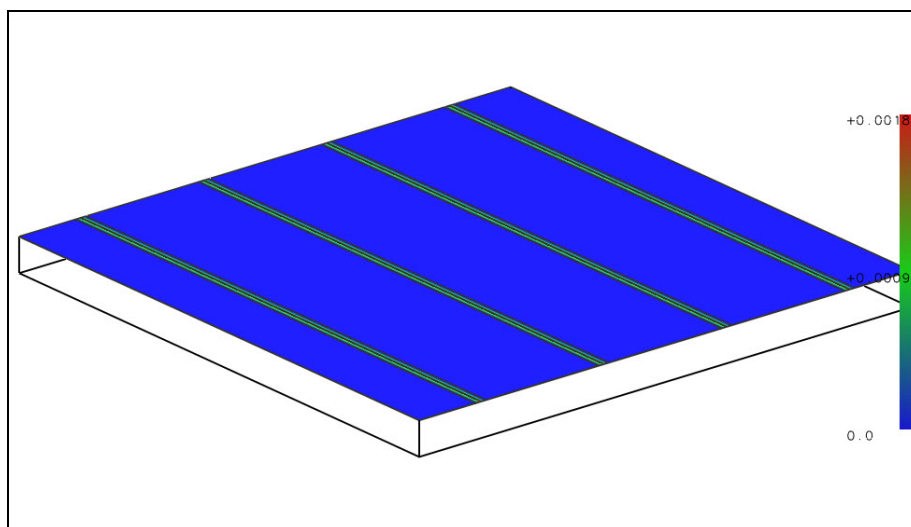
ภาพที่ 90 ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกักด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์เชิงมุมเป็น 1.0 องศา



ภาพที่ 91 ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกดด้วยมีดตัดเนื้อมวลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์เชิงมุมเป็น 1.5 องศา



ภาพที่ 92 ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกดด้วยมีดตัดเนื้อมวลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์เชิงมุมเป็น 2.0 องศา



ภาพที่ 93 ผลการจำลองพื้นผิวที่ถูกกดด้วยมีดตัดเนื้อมอลโนสที่มีค่าการเยื้องศูนย์เชิงมุมเป็น 2.5 องศา

จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มค่าเยื้องศูนย์เชิงมุม (θ) มากขึ้นเรื่อยๆ ค่าความกว้างของผิวเรียบที่มีขนาดความกว้างเป็นสองเท่าของค่าเยื้องศูนย์ ($2R$) ที่ถูกแปลงจากค่าการเยื้องศูนย์เชิงมุม (θ) ด้วยสมการ (6) ก็จะมีขนาดกว้างขึ้นเรื่อยๆ แต่ค่าความสูงสเกลลอป (h) จะมีขนาดความสูงลดลงเรื่อยๆ

โดยผลของค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการจำลองการกดและการคำนวณด้วยสมการค่าความสูงสเกลลอปที่เกิดจากการเยื้องศูนย์ดังสมการ (14) และค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้คำนวณขึ้นด้วยสมการค่าความหยาบผิวเฉลี่ยดังสมการ (15) ได้แสดงผลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงสเกลลอปและค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองกัดชิ้นงานที่ค่าเชิงศูนย์เชิงมุมแตกต่างกัน

ค่าเชิงศูนย์เชิงมุม (θ) (หน่วย: องศา)	ค่าความสูงสเกลลอป (h) (หน่วย: มิลลิเมตร)	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) (หน่วย: ไมโครเมตร)
0.0	0.2540	84.246
0.5	0.1685	45.782
1.0	0.1010	21.337
1.5	0.0509	7.673
2.0	0.0179	1.618
2.5	0.0018	0.059

จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มค่าเชิงศูนย์เชิงมุม (θ) มากขึ้นเรื่อยๆ ทั้งค่าความสูงสเกลลอป (h) และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) จะมีขนาดลดลงเรื่อยๆ

7. การกัดผิวชิ้นงานด้วยมีดตัดเฉือนบอลโนสที่มีผลกระทบจากการเยื้องศูนย์

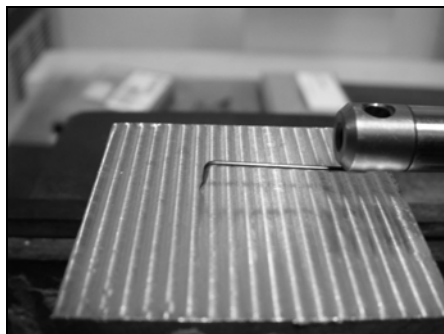
โดยเมื่อกัดชิ้นงานด้วยเครื่องกัดเครื่องกัดตั้งซีเอ็นซีสามแกน รุ่น Chevalier 2040 VMC ดังภาพที่ 94 จะได้ชิ้นงานที่เกิดจากการกัดเยื้องศูนย์ในแนวขนานของมีดตัดเฉือนบอลโนส ดังภาพผนวก ก และได้ชิ้นงานที่เกิดจากการกัดเยื้องศูนย์เชิงมุมของมีดตัดเฉือนบอลโนส ดังภาพผนวก ข



ภาพที่ 94 การกัดผิวชิ้นงานด้วยเครื่องกัดตั้งซีเอ็นซีสามแกน รุ่น Chevalier 2040 VMC

หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้จากการกัดผิวชิ้นงาน มาวัดค่าพิทช์สูงต่ำของพื้นผิวด้วยเครื่องฟอร์มทราเซอร์ รุ่น Mitutoyo formtracer CS400 ดังภาพที่ 95 โดยในแต่ละชิ้นงานได้สุ่มเลือกวัดค่าพิทช์สูงต่ำของพื้นผิว 4 ตำแหน่ง

ซึ่งได้พิทช์สูงต่ำของพื้นผิวชิ้นงานเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองการกัดผิวชิ้นงานด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกิดจากการกัดเยื้องศูนย์ในแนวขนานของมีดตัดเฉือนบอลโนส ดังภาคผนวก ก และได้พิทช์สูงต่ำของพื้นผิวชิ้นงานเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองการกัดผิวชิ้นงานด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกิดจากการกัดเยื้องศูนย์เชิงมุมของมีดตัดเฉือนบอลโนส ดังภาคผนวก ง



ภาพที่ 95 การวัดผิวชิ้นงานด้วยเครื่องฟอร์ม تراเซอร์ รุ่น Mitutoyo formtracer CS400
ซึ่งค่าที่วัดได้จากเครื่องฟอร์ม تراเซอร์ รุ่น Mitutoyo formtracer CS400 เป็นดังนี้

7.1 การเยื้องศูนย์ในแนวนาน

โดยได้นำค่าความสูงสเกลลอป (h) ดังภาคผนวก จ และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) ดังภาคผนวก ข ที่ได้ในแต่ละตำแหน่งของการวัดจากเครื่องฟอร์ม تراเซอร์ ในแต่ละรอบการทดลอง สำหรับขนาดของค่าการเยื้องศูนย์ในแนวนาน (ΔR) ในแต่ละค่ามาเฉลี่ยกัน ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงสเกลลอปและค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองก่อดชิ้นงานที่ค่าเยื้องศูนย์ในแนวนานแตกต่างกัน

ค่าเยื้องศูนย์ในแนวนาน (ΔR) (หน่วย: มิลลิเมตร)	ค่าความสูงสเกลลอป (h) (หน่วย: มิลลิเมตร)	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) (หน่วย: ไมโครเมตร)
0.0	0.0642	21.928
0.2	0.0467	11.865
0.4	0.0265	7.208
0.6	0.0181	4.745
0.8	0.0192	4.456
1.0	0.0112	3.605

7.2 การเอียงศูนย์เชิงมุม

โดยได้นำค่าความสูงสเกลลอป (h) ดังภาคผนวก จ และค่าความหยابผิวเฉลี่ย (R_a) ดังภาคผนวก ข ที่ได้ในแต่ละตำแหน่งของการวัดจากเครื่องฟอร์มทราเซอร์ ในแต่ละรอบการทดลอง สำหรับขนาดของค่าการเอียงศูนย์เชิงมุม (θ) ในแต่ละค่ามาเฉลี่ยกัน ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงสเกลลอปและค่าความหยابผิวเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองกัดชิ้นงานที่ค่าเอียงศูนย์เชิงมุมแตกต่างกัน

ค่าเอียงศูนย์เชิงมุม (θ) (หน่วย: องศา)	ค่าความสูงสเกลลอป (h) (หน่วย: มิลลิเมตร)	ค่าความหยابผิวเฉลี่ย (R_a) (หน่วย: ไมโครเมตร)
0.0	0.1829	60.373
0.5	0.1525	42.135
1.0	0.0814	16.252
1.5	0.0101	2.789
2.0	0.0120	3.874
2.5	0.0091	2.894

8. การเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการกัดชิ้นงาน

โดยนำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองกัดชิ้นงานกับการทดลองกัดชิ้นงานมาเปรียบเทียบกัน เพื่อประเมินผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น ว่ามีผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันหรือไม่ และมีแนวโน้มเป็นอย่างไร

8.1 ค่าความสูงสเกลลอป

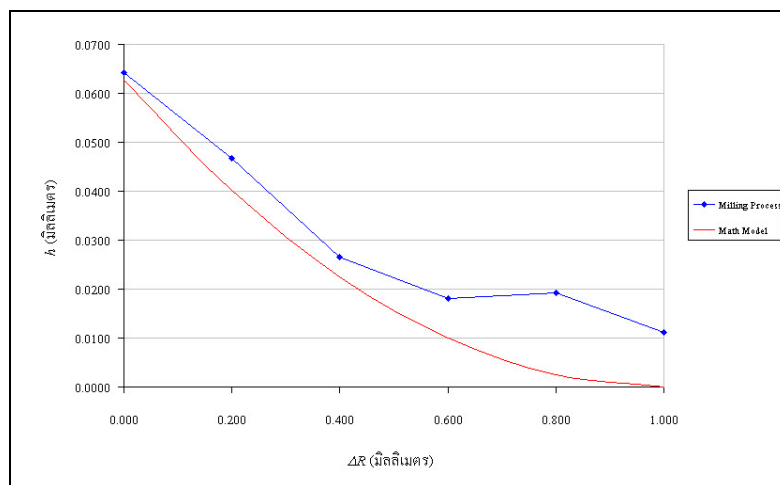
8.1.1 การเอียงศูนย์ในแนวนอน โดยได้แสดงผลของค่าความสูงสเกลลอป (h) ของการจำลองกัดชิ้นงานเปรียบเทียบกับผลการทดลองกัดชิ้นงาน ดังตารางที่ 6 และแสดงแผนภูมิเพื่อเปรียบเทียบดังภาพที่ 96 โดยกำหนดให้เส้นกราฟสีน้ำเงินแสดงถึงค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จาก

การทดลองกัดชิ้นงาน (Milling process) และเส้นกราฟสีแดงแสดงถึงค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการจำลองกัดชิ้นงาน (Math model)

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการจำลองกัดชิ้นงานกับการทดลองกัดชิ้นงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์ในแนวนอน

(หน่วย:มิลลิเมตร)

ค่าเอียงศูนย์ในแนวนอน (ΔR) (หน่วย:มิลลิเมตร)	ค่าความสูงสเกลลอป (h)	
	จากการจำลองกัดชิ้นงาน	จากการทดลองกัดชิ้นงาน
0.0	0.0627	0.0642
0.2	0.0401	0.0467
0.4	0.0225	0.0265
0.6	0.0100	0.0181
0.8	0.0025	0.0192
1.0	0.0000	0.0112



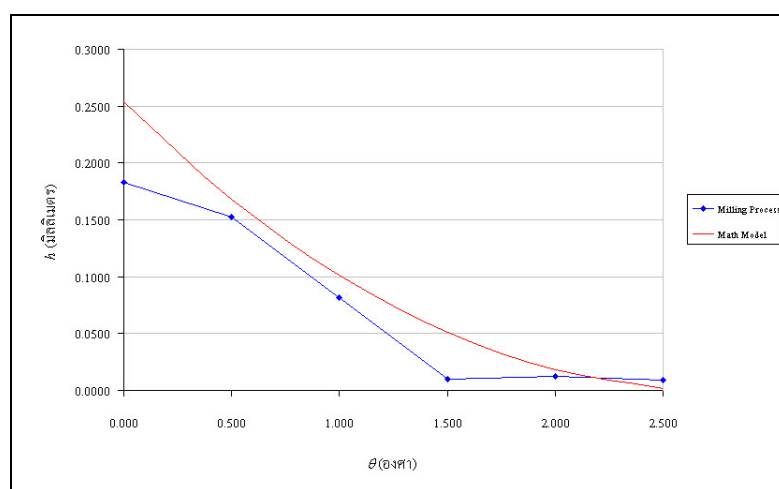
ภาพที่ 96 การเปรียบเทียบค่าความสูงสเกลดอปที่ได้จากการจำลองกัดชิ้นงานกับการทดลองกัดชิ้นงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์ในแนวขนาน

8.1.2 การเอียงศูนย์เชิงมุม โดยได้แสดงผลของค่าความสูงสเกลดอป (h) ของการจำลองกัดชิ้นงานเปรียบเทียบกับ การทดลองกัดชิ้นงาน ดังตารางที่ 7 และแสดงแผนภูมิเพื่อเปรียบเทียบดังภาพที่ 97 โดยกำหนดให้เส้นกราฟสีน้ำเงินแสดงถึงค่าความสูงสเกลดอปที่ได้จากการทดลองกัดชิ้นงาน (Milling process) และเส้นกราฟสีแดงแสดงถึงค่าความสูงสเกลดอปที่ได้จากการจำลองกัดชิ้นงาน (Math model)

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการจำลองกัฒซึนงานกับการทดลองกัฒซึนงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์เชิงมุม

(หน่วย:มิลลิเมตร)

ค่าเอียงศูนย์เชิงมุม (θ) (หน่วย:องศา)	ค่าความสูงสเกลลอป (h)	
	จากการจำลองกัฒซึนงาน	จากการทดลองกัฒซึนงาน
0.0	0.2540	0.1829
0.5	0.1685	0.1525
1.0	0.1010	0.0814
1.5	0.0509	0.0101
2.0	0.0179	0.0120
2.5	0.0018	0.0091



ภาพที่ 97 การเปรียบเทียบค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการจำลองกัฒซึนงานกับการทดลองกัฒซึนงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์เชิงมุม

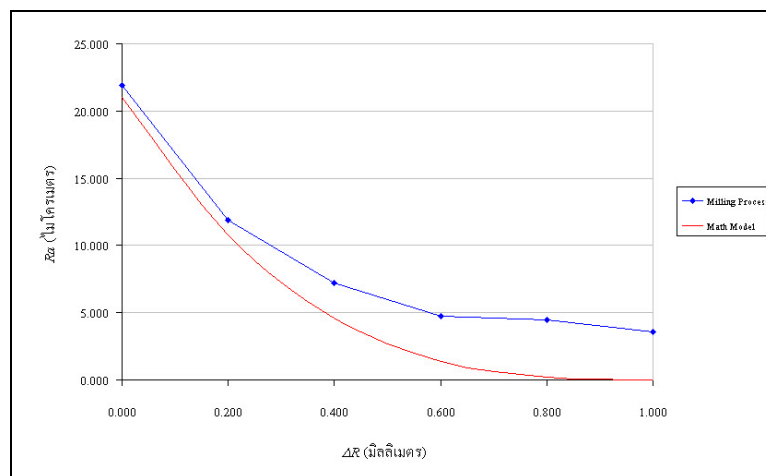
8.2 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย

8.2.1 การเยื้องศูนย์ในแนวนอน โดยได้แสดงผลของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) ของการจำลองกัดชิ้นงานเปรียบเทียบกับผลการทดลองกัดชิ้นงาน ดังตารางที่ 8 และแสดงแผนภูมิเพื่อเปรียบเทียบดังภาพที่ 98 โดยกำหนดให้เส้นกราฟสีน้ำเงินแสดงถึงค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการทดลองกัดชิ้นงาน (Milling process) และเส้นกราฟสีแดงแสดงถึงค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการจำลองกัดชิ้นงาน (Math model)

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองกัดชิ้นงานกับการทดลองกัดชิ้นงานที่มีผลจากการเยื้องศูนย์ในแนวนอน

(หน่วย: ไมโครเมตร)

ค่าเยื้องศูนย์ในแนวนอน (ΔR) (หน่วย: มิลลิเมตร)	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a)	
	จากการจำลองกัดชิ้นงาน	จากการทดลองกัดชิ้นงาน
0.0	20.999	21.928
0.2	10.776	11.865
0.4	4.574	7.208
0.6	1.381	4.745
0.8	0.191	4.456
1.0	0.000	3.605



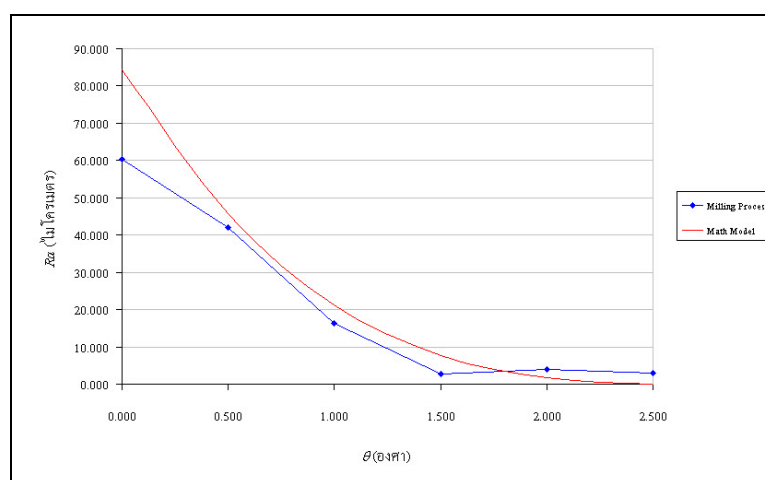
ภาพที่ 98 การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองกัดชิ้นงานกับการทดลองกัดชิ้นงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์ในแนวขนาน

8.2.2 การเอียงศูนย์เชิงมุม โดยได้แสดงผลของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) ของการจำลองกัดชิ้นงานเปรียบเทียบกับ การทดลองกัดชิ้นงาน ดังตารางที่ 9 และแสดงแผนภูมิเพื่อเปรียบเทียบดังภาพที่ 99 โดยกำหนดให้เส้นกราฟสีน้ำเงินแสดงถึงค่าความสูงสเกลลออปที่ได้จากการทดลองกัดชิ้นงาน (Milling process) และเส้นกราฟสีแดงแสดงถึงค่าความสูงสเกลลออปที่ได้จากการจำลองกัดชิ้นงาน (Math model)

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองกั้ดขึ้นงานกับการทดลองกั้ดขึ้นงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์เชิงมุม

(หน่วย: ไมโครเมตร)

ค่าเอียงศูนย์เชิงมุม (θ) (หน่วย: องศา)	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a)	
	จากการจำลองกั้ดขึ้นงาน	จากการทดลองกั้ดขึ้นงาน
0.0	84.246	60.373
0.5	45.782	42.135
1.0	21.337	16.252
1.5	7.673	2.789
2.0	1.618	3.874
2.5	0.059	2.894

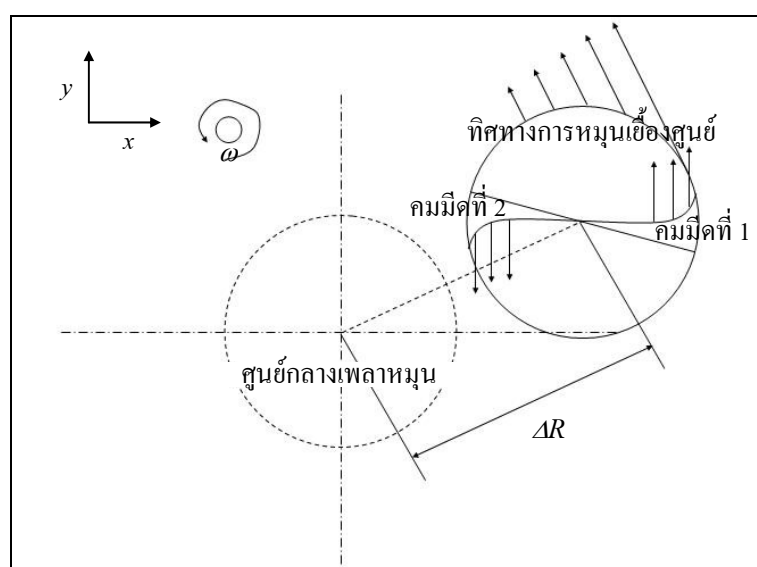


ภาพที่ 99 การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองกั้ดขึ้นงานกับการทดลองกั้ดขึ้นงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์เชิงมุม

จากการทดลองข้างต้นนี้เมื่อเพิ่มค่าเอียงศูนย์ ทั้งกรณีการเอียงศูนย์ในแนวนานและการเอียงศูนย์เชิงมุม ค่าความสูงสเกลลอป (h) จะมีแนวโน้มลดลงทั้งจากการจำลองกีดกันงานและการทดลองกีดกันงาน

และเมื่อเพิ่มค่าเอียงศูนย์ ทั้งกรณีการเอียงศูนย์ในแนวนานและการเอียงศูนย์เชิงมุม ค่าความความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) จะมีแนวโน้มลดลงทั้งจากการจำลองกีดกันงานและการทดลองกีดกันงาน

แต่ค่าความสูงสเกลลอป (h) และค่าความความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) ที่ได้จากการทดลองกีดกันงาน เมื่อเปรียบเทียบ ณ ค่าการเอียงศูนย์เดียวกัน ทั้งกรณีการเอียงศูนย์ในแนวนานและการเอียงศูนย์เชิงมุม มีค่าไม่เท่ากันกับค่าที่ได้จากการจำลองกีดกันงาน ทั้งนี้เนื่องจากยังมีข้อจำกัดของการเอียงศูนย์ นั่นคือ ในขณะที่ทำการกีดกันงานด้วยค่าความเอียงศูนย์ที่ต่างกัน หากกำหนดค่าความเอียงศูนย์ที่มีค่ามาก จะทำให้ลักษณะของการตัดเฉือนของคมมีดตัดเฉือนบอลโนสมีการตัดเฉือนที่ผิดปกติได้ ผลก็คือ แทนที่จะเป็นการตัดเฉือน (Cutting) แต่กลับเป็นลักษณะของการไส (Planing) แทน ดังภาพที่ 100 ซึ่งจากภาพจะเห็นได้ว่าทิศทางการตัดเฉือนของคมมีดที่ 2 นั้น มีทิศทางการเคลื่อนที่ของคมมีดที่ตรงข้ามกับทิศทางการตัดเฉือน เป็นผลให้เกิดการสึกหรอของคมมีดตัดเฉือนบอลโนสได้



ภาพที่ 100 การทำงานของคมมีดตัดเฉือนที่มีทิศทางการตัดเฉือนที่ผิดปกติ

โดยผลที่เกิดขึ้นจากปัญหานี้ทำให้ผิวหนังที่ถูกกัดด้วยมีดตัดเฉือนนั้นมีลักษณะความมันวาวลดลง และมีลักษณะของพื้นผิวแบบมีตำหนิ ดังลักษณะของพื้นผิวที่เกิดขึ้นจากการทดลองกัดชิ้นงานในภาคผนวก ก และภาคผนวก ง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการกักขังงานที่มีการเอียงศูนย์ โดยการเอียงศูนย์ที่ได้นำมาศึกษานั้น ประกอบไปด้วยการเอียงศูนย์ในแนวนาน (Offset misalignment) และการเอียงศูนย์เชิงมุม (Angular misalignment) ซึ่งกำหนดให้ตัวแปรของค่าการเอียงศูนย์ในแนวนานเป็น (ΔR) และตัวแปรของค่าการเอียงศูนย์เชิงมุมเป็น (θ) และพบว่าผลการเอียงศูนย์ทั้งสองลักษณะนี้ จะมีผลเฉพาะระนาบ $x-y$ เท่านั้น กล่าวคือไม่มีผลของการเอียงศูนย์ตามแนวแกน z

จากการศึกษารูปแบบของการเอียงศูนย์ทั้งสองลักษณะ ทำให้สามารถสร้างสมการพิกัดเอียงศูนย์ และสมการพิกัดหมุนเอียงศูนย์ได้ ซึ่งทั้งสองสมการนี้ได้ถูกนำไปพัฒนาเป็นสมการพิกัดตำแหน่งใดๆ เอียงศูนย์ และสมการการเคลื่อนที่เดินกักเอียงศูนย์ ณ เวลาใดๆ ของมิดดัดเนียนบอลโนส นอกจากนี้ยังได้สมการคำนวณค่าระยะห่างจากศูนย์กลางเพลลาหมุนถึงตำแหน่งมิดกักที่ผิวบนสุด เพื่อสามารถคำนวณถึงความกว้างของการเดินกักได้

ในการกักผิวชิ้นงานด้วยบอลโนสตั้งแต่ 2 แนวกักขึ้นไป จะเกิดค่าความสูงของพื้นผิวเรียกว่า ค่าความสูงสเกลลอป (h) อันเกิดจากการซ้อนทับกันของส่วนโค้งตามขนาดของรัศมีมิดดัดเนียนบอลโนส ซึ่งเป็นพิกัดที่มีขนาดสูงสุดของพื้นผิวที่ถูกดัดเนียน แต่เนื่องจากผลของการเอียงศูนย์ ทำให้ค่าความสูงสเกลลอปมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากผลของการเลื่อนเข้าหากันของส่วนโค้งในระหว่างสองแนวกัก โดยค่าที่เลื่อนเข้าหากันนั้นเป็นค่าเอียงศูนย์ในแนวนาน (ΔR) ของทั้งสองแนวกัก

นอกจากนี้ในแต่ละแนวกักจะประกอบไปด้วยพื้นผิวที่เป็นส่วนโค้งของรัศมีบอลโนสกับพื้นผิวที่เป็นส่วนเรียบ อันเกิดจากการหมุนกักเอียงศูนย์ซึ่งมีขนาดของความกว้างเป็นสองเท่าของขนาดของค่าเอียงศูนย์ ($2\Delta R$) และเมื่อค่าการเอียงศูนย์ในแนวนาน (ΔR) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าระยะห่างระหว่างแนวกัก (P) จะได้ว่า ค่าความสูงสเกลลอปที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นศูนย์ ทั้งนี้เพราะเกิดการหมุนกักเอียงศูนย์รอบแกนเพลลาหมุนของทั้งสองแนวกักบรรจบกันพอดี หรือเกิดการหมุนกักเอียงศูนย์รอบแกนเพลลาหมุนซ้อนทับกันระหว่างสองแนวกัก

เมื่อจำลองกัดชิ้นงานโดยมีการปรับค่าของการเอียงศูนย์ในแนวนาน (ΔR) พบว่าเมื่อเพิ่มค่าการเอียงศูนย์ในแนวนานมากขึ้น ค่าระยะห่างจากศูนย์กลางเพลลาหมุนถึงตำแหน่งคมมีดกัดที่ผิวบนสุดจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของค่าการเอียงศูนย์ในแนวนาน (ΔR) ที่เปลี่ยนไป แต่ค่าความสูงสเกลลอป (h) และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) จะลดลงตามค่าการเอียงศูนย์ในแนวนาน (ΔR) ที่เปลี่ยนไป

และเมื่อจำลองกัดชิ้นงานโดยมีการปรับค่าของการเอียงศูนย์เชิงมุม (θ) พบว่าเมื่อเพิ่มค่าการเอียงศูนย์เชิงมุมมากขึ้น ค่าระยะห่างจากศูนย์กลางเพลลาหมุนถึงตำแหน่งคมมีดกัดที่ผิวบนสุดจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของค่าการเอียงศูนย์ (ΔR) ที่ถูกแปลงจากค่าการเอียงศูนย์เชิงมุม (θ) ที่เปลี่ยนไป แต่ค่าความสูงสเกลลอป (h) และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) จะลดลงตามค่าการเอียงศูนย์เชิงมุม (θ) ที่เปลี่ยนไป

ท้ายสุดเมื่อทำการทดลองกัดชิ้นงานจริง โดยทำการทดลองกัดชิ้นงานตามรูปแบบของการจำลองการกัดชิ้นงานทั้งกรณีการเอียงศูนย์ในแนวนานและการเอียงศูนย์เชิงมุม พบว่าค่าความสูงสเกลลอป (h) และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) จะมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับการจำลองกัดชิ้นงาน

แต่ค่าความสูงสเกลลอป (h) และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) ที่ได้จากการทดลองกัดชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบ ณ ค่าการเอียงศูนย์เดียวกัน ทั้งกรณีการเอียงศูนย์ในแนวนานและการเอียงศูนย์เชิงมุม มีค่าไม่เท่ากันกับค่าที่ได้จากการจำลองกัดชิ้นงาน ทั้งนี้เนื่องจากยังมีข้อจำกัดของการเอียงศูนย์ นั่นคือ ในขณะที่ทำการกัดชิ้นงานด้วยค่าความเอียงศูนย์ที่แตกต่างกัน หากกำหนดค่าความเอียงศูนย์ที่มีค่ามาก จะทำให้ลักษณะของการตัดเฉือนของคมมีดตัดเฉือนบอลโนสมีการตัดเฉือนที่ผิดปกติได้ ผลก็คือ แทนที่จะเป็นการตัดเฉือน (Cutting) แต่กลับเป็นลักษณะของการไส (Shaving) แทน ซึ่งผิวของชิ้นงานมีลักษณะถูกขูดด้วยคมมีดตัดเฉือน และเป็นผลให้เกิดการสึกหรอของคมมีดตัดเฉือนบอลโนสได้

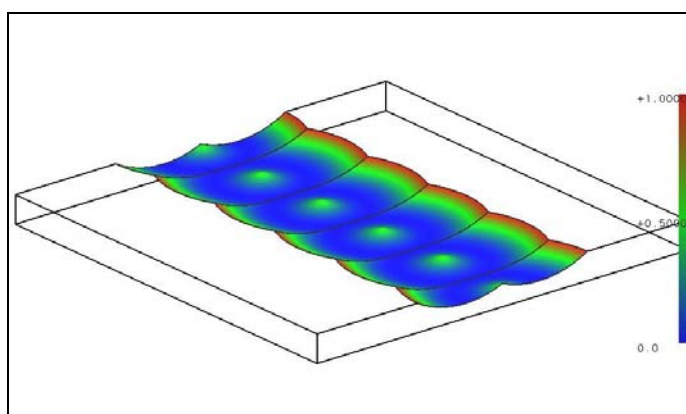
ข้อเสนอแนะ

ในการจำลองกััดขึ้นงานนั้นเป็นการจำลองสภาพของการกััดขึ้นงานในเชิงอุดมคติ (มีการตัดเฉือนอย่างสมบูรณ์) ดังนั้นในการกััดขึ้นงานจริงยังต้องนำปัจจัยอื่นๆ มาพิจารณา ซึ่งจะทำให้ค่าที่ได้จากการจำลองกััดขึ้นงานมีค่าเข้าใกล้กับค่าที่ได้จากการกััดขึ้นงานจริง

โดยปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวที่ได้จากการกััดขึ้นงาน ได้แก่

1. ความเหนียวของวัสดุที่นำมาทดลอง เพราะเนื่องจากวัสดุโลหะที่นำมาใช้ทดลองกััด เป็นวัสดุอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นวัสดุโลหะที่มีความเหนียวของวัสดุมากกว่าวัสดุโลหะชนิดอื่น ทำให้เกิดกระบวนการดีเฟล็กชัน (Deflection) หรือกรรมวิธีทางความร้อนง่ายกว่าวัสดุโลหะชนิดอื่น ดังเช่น เหล็กกล้า เหล็กไร้สนิม (Stainless) เป็นต้น ทำให้ลักษณะผิวงานที่ถูกตัดเฉือนมีความขรุขระมากกว่าวัสดุโลหะที่มีความเหนียวของวัสดุน้อยกว่า

2. ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วรอบ (ω) กับอัตราการป้อนกััด (V_p) ทั้งนี้เพราะ หากค่าความเร็วรอบ (ω) นั้น มีสัดส่วนน้อยกว่าอัตราการป้อนกััด (V_p) มาก เมื่อมีการกััดขึ้นงานที่มีผลกระทบจากการเอียงศูนย์ ขณะที่อัตราป้อนกััด (V_p) มาก แต่ค่าความเร็วรอบ (ω) น้อย ทำให้ในเส้นแนวกััดนั้น เกิดเป็นพื้นผิวสเกลลอปในเส้นแนวกััดเอง ดังภาพที่ 101 โดยจากภาพจะเห็นผิวลักษณะแบบสเกลลอปในแนวศูนย์กลางของร่องผิวที่ถูกกััด



ภาพที่ 101 การกััดขึ้นงานที่ค่าสัดส่วนของความเร็วรอบต่ออัตราป้อนกััดน้อย

3. แรงที่เกิดจากการเอียงศูนย์ของมีดตัดเฉือน อันเนื่องจากการเอียงศูนย์ที่เกิดขึ้นทำให้ ศูนย์กลางมวลของอุปกรณ์ตัดเฉือนเปลี่ยนไปด้วย เป็นผลให้เกิดการสั่นสะเทือนในระหว่างเวลา หมุนทำงาน

โดยสามารถทำการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment:DOE) สำหรับวิเคราะห์ ถึงปัจจัยดังกล่าวข้างต้นว่ามีผลต่อการก่อกำเนิดงานอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ เพื่อสามารถนำไปพัฒนา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความสามารถทำนายค่าความสูงสเกลลอป (h) และค่าความหยาบ ผิวเฉลี่ย (R_a) ได้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

และนอกจากนี้ยังสามารถนำปัญหาการเอียงศูนย์ที่เกิดขึ้นไปวิจัยและพัฒนา สำหรับการก่อกำเนิดงานที่มีผลทั้งการเอียงศูนย์ในแนวนอนและการเอียงศูนย์เชิงมุมได้ หรือการก่อกำเนิดงานใน ลักษณะอื่น เช่น ชิ้นงานที่มีผิวลักษณะ โคงหรือชิ้นงานที่มีผิวซับซ้อนได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

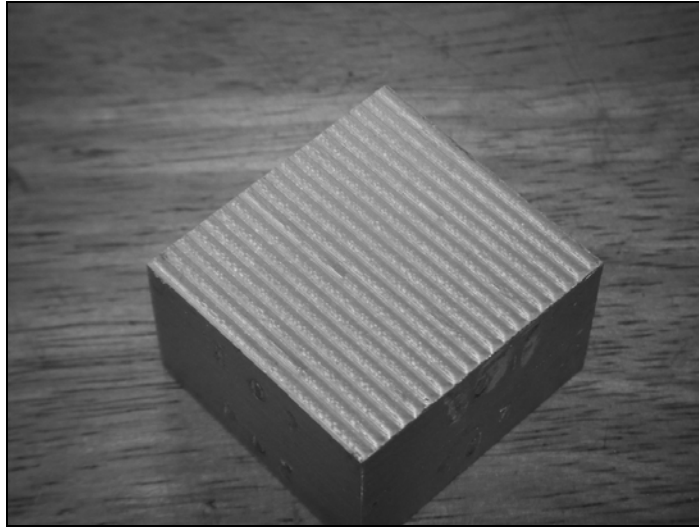
- กันตพัฒน์ นัตรวิชัยกุล. 2549. **Measurement** เทคโนโลยีการโดยการฉายภาพ. แหล่งที่มา: <http://www.factorymax.co.th/technical/viewinformation.php?id=111>. 15 สิงหาคม 2551.
- ชาติ ตระการกุล. 2539. **เทคโนโลยีซีเอ็นซี**. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.
- นิรนาม. 2548. **วิชาเขียนแบบเทคนิคเบื้องต้น**. สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา, กรุงเทพฯ. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)
- _____. ม.ป.ป. ประเภทของการเอียงศูนย์มีอะไรบ้าง (Type of Misalignment). **หน้าที่หลักของคัปปลิงคืออะไร**. แหล่งที่มา: <http://www.palawatr.co.th/content/view/89/68/>. 9 กรกฎาคม 2550.
- วิทยา สงวนวรรณ. 2545. **เทคโนโลยีการออกแบบชิ้นส่วนและการสร้างแม่พิมพ์ขั้นสูง Unigraphics CAD/CAM**. สำนักพิมพ์ เอส.พี.ซี. บุ๊คส์, กรุงเทพฯ.
- Chen, J.S., Y.K. Huang and M.S. Chen. 2005. A study of the surface scallop generating mechanism in the ball-end milling process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 45: 1077-1084.
- Çolak, O., C. Kurbanoğlu and M. Cengiz Kayacan. 2007. Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods. **Materials and Design** 28: 657-666.
- Lee, K.Y., H.M. Kim and S.S. Park. 2007. A run-out measuring method using modeling and simulation in four-fluted end milling. **Journal of Materials Processing Technology** 187-188: 207-211.

- Masood, S.H., V.K. Bagam and P. Chantanabubpha. 2002. A computerised minimum distance algorithm for machining of sculptured surfaces. **Computers & Industrial Engineering** 42: 291-297.
- Omar, O.E.E.K., T. El-Wardany, E. Ng and M.A. Elbestawi. 2007. An improved cutting force and surface topography prediction model in end milling. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 47: 1263-1275.
- Savas, V. and C. Ozay. 2007. Analysis of the surface roughness of tangential turn-milling for machining with end milling cutter. **Journal of Materials Processing Technology** 186: 279-283.
- Toh, C.K. 2004. Surface topography analysis in high speed finish milling inclined hardened steel. **Precision Engineering** 28: 386-398.
- Tsao, C.C. and W.C. Chen. 1997. Effects of cutting parameters on the scallop size during the milling process. **Journal of Materials Processing Technology** 72: 208-213.
- Vickers, G.W., M.H. Ly and R.G. Oetter. 1990. **Numerically Controlled Machine Tools**. Ellis Horwood Limited, England.

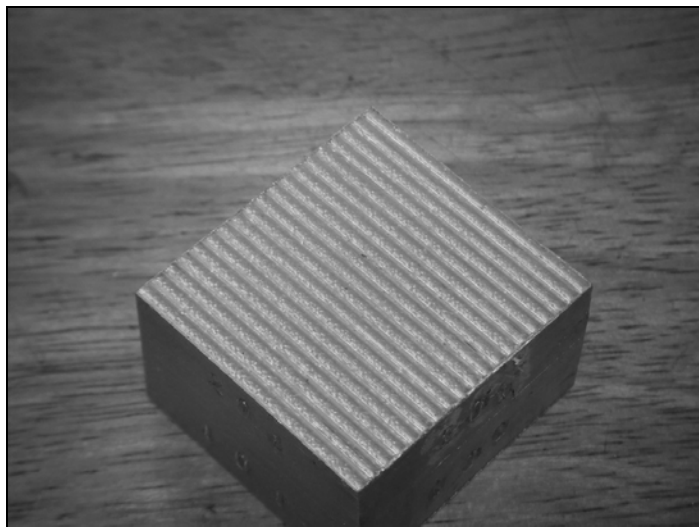
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

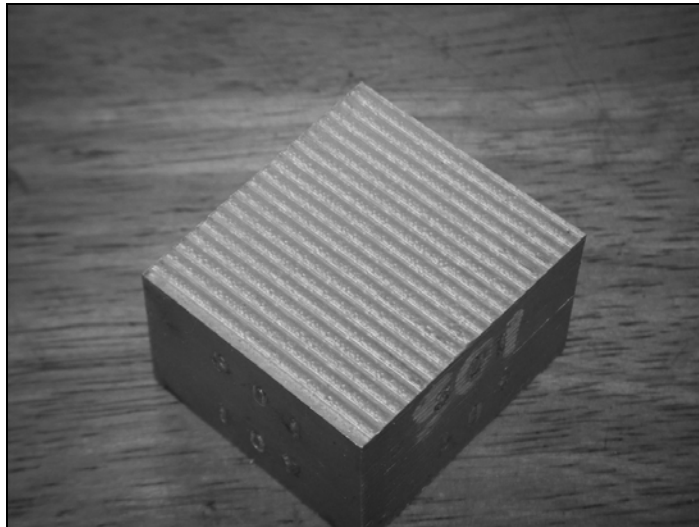
ภาพชิ้นงานที่เกิดจากการกัดเอื้องศูนย์ในแนวนอน



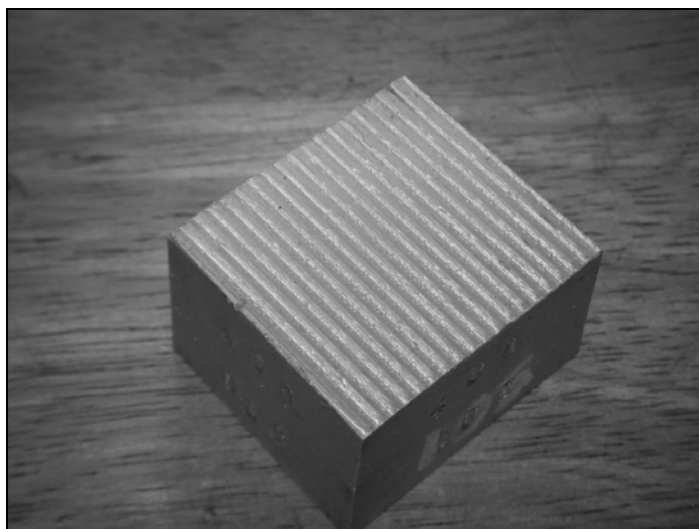
ภาพผนวกที่ ก1 ชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.0$ มิลลิเมตร



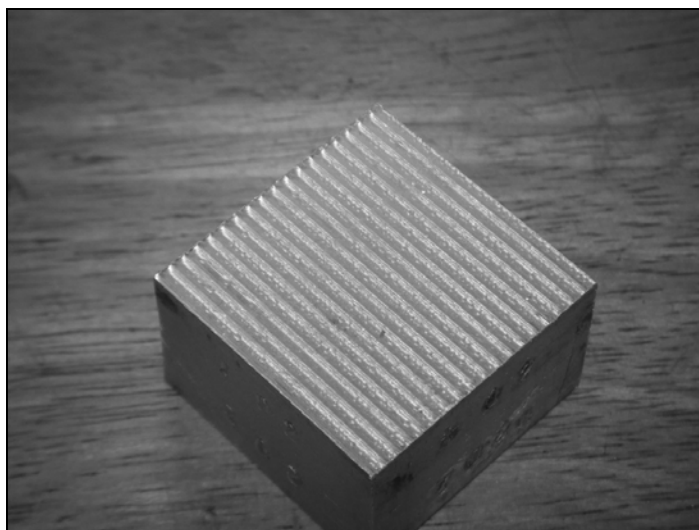
ภาพผนวกที่ ก2 ชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.0$ มิลลิเมตร



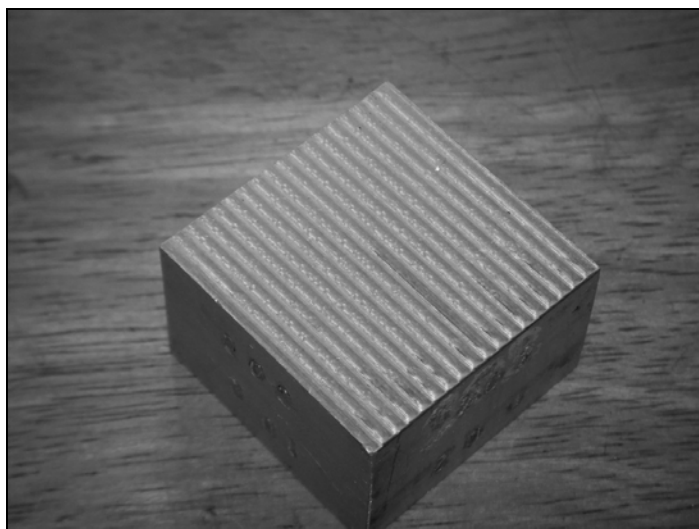
ภาพผนวกที่ ก3 ชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.0$ มิลลิเมตร



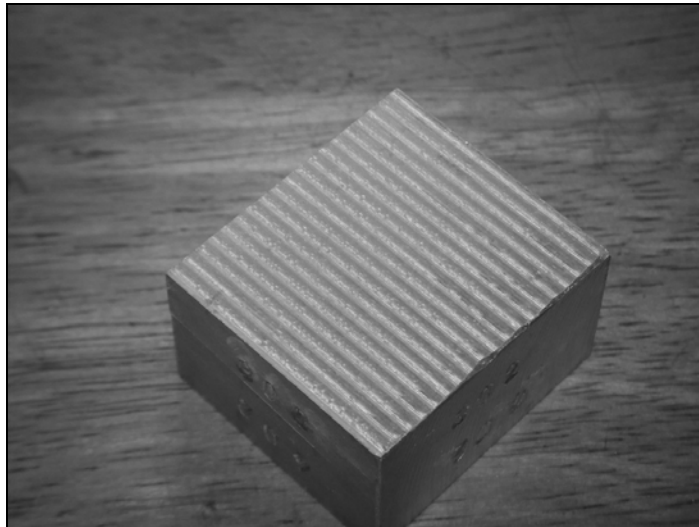
ภาพผนวกที่ ก4 ชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.0$ มิลลิเมตร



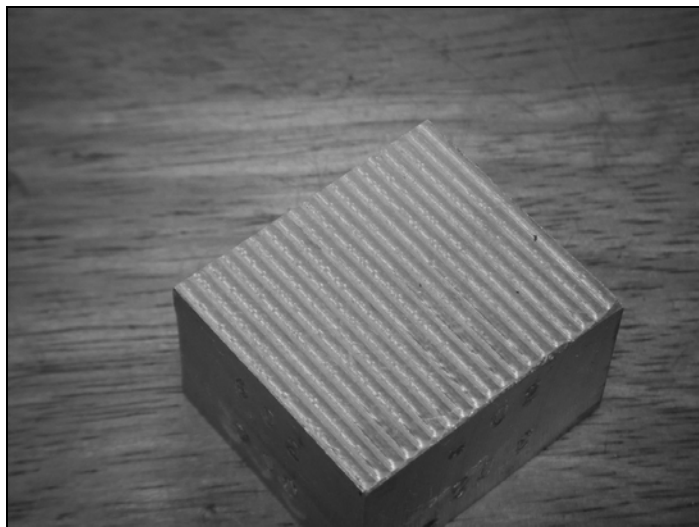
ภาพผนวกที่ ก5 ชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.2$ มิลลิเมตร



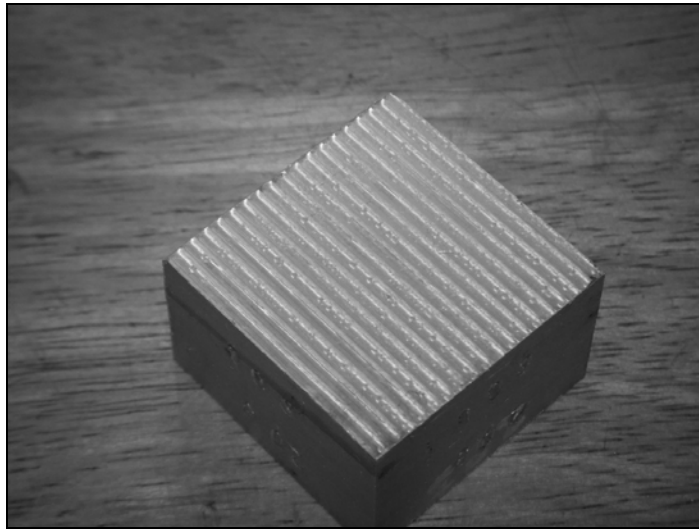
ภาพผนวกที่ ก6 ชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.2$ มิลลิเมตร



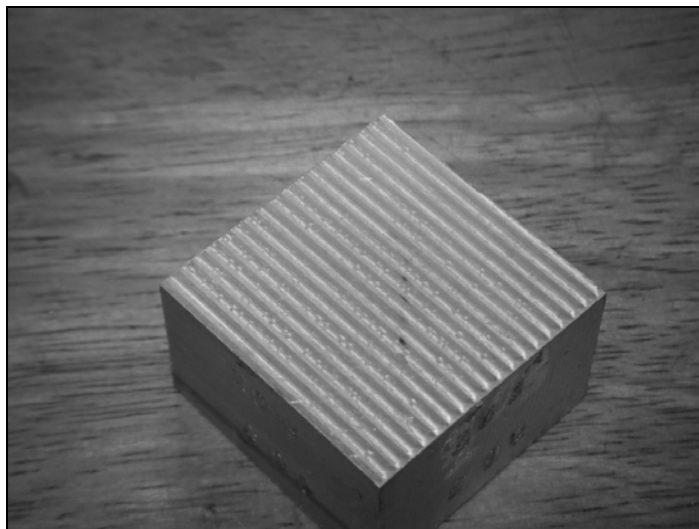
ภาพผนวกที่ ก7 ชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.2$ มิลลิเมตร



ภาพผนวกที่ ก8 ชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.2$ มิลลิเมตร



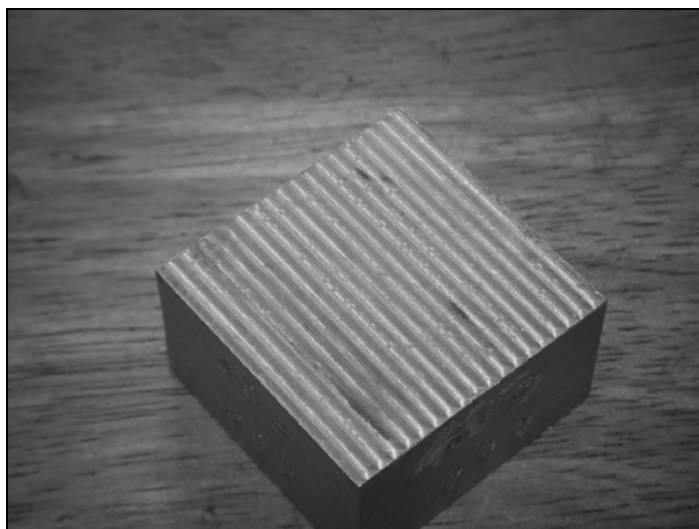
ภาพผนวกที่ ก9 ชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.4$ มิลลิเมตร



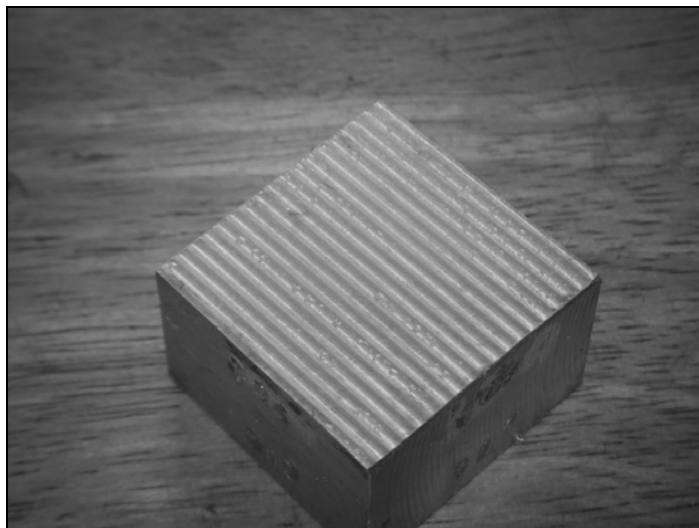
ภาพผนวกที่ ก10 ชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.4$ มิลลิเมตร



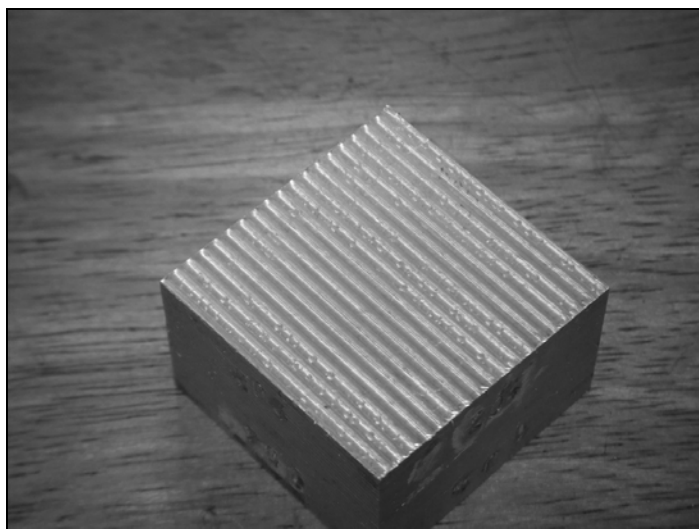
ภาพผนวกที่ ก11 ชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.4$ มิลลิเมตร



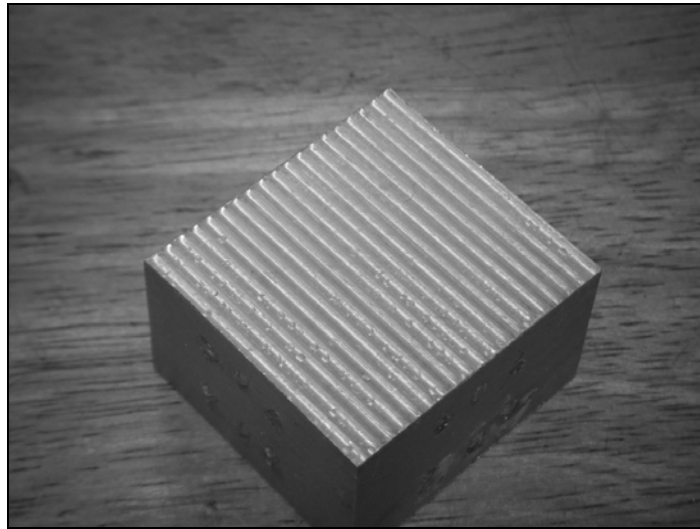
ภาพผนวกที่ ก12 ชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.4$ มิลลิเมตร



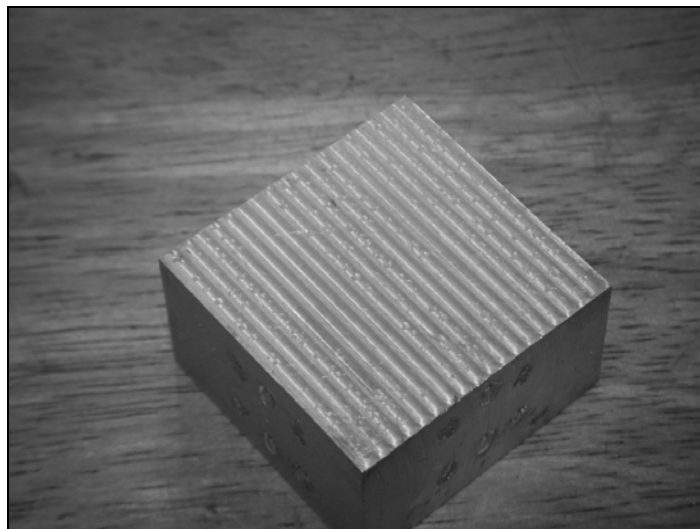
ภาพผนวกที่ ก13 ชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.6$ มิลลิเมตร



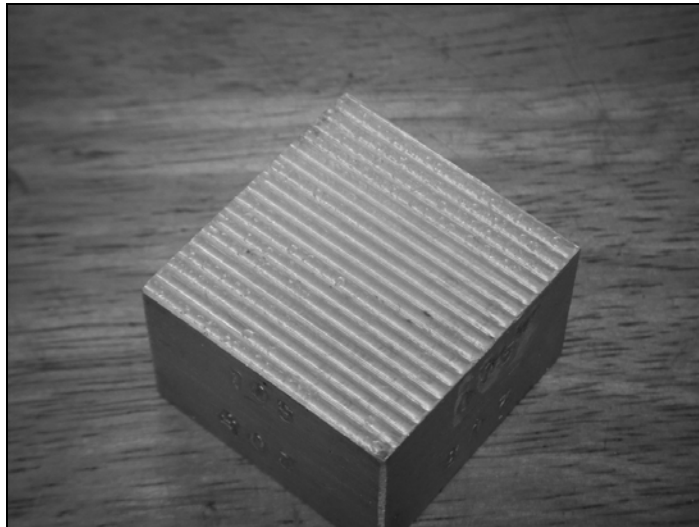
ภาพผนวกที่ ก14 ชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.6$ มิลลิเมตร



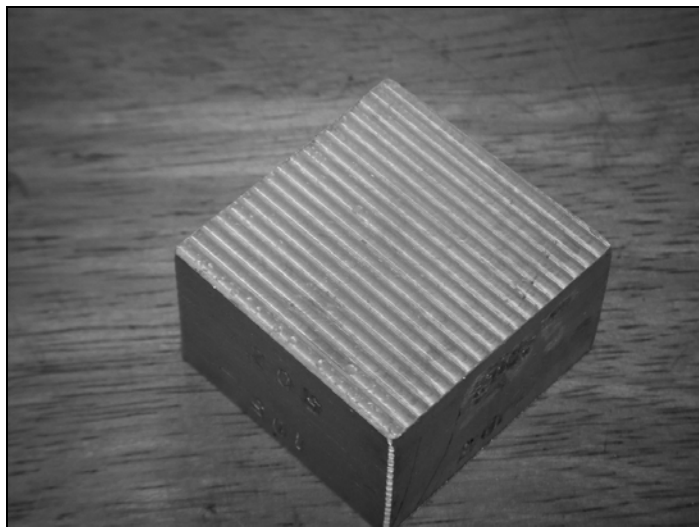
ภาพผนวกที่ ก15 ชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.6$ มิลลิเมตร



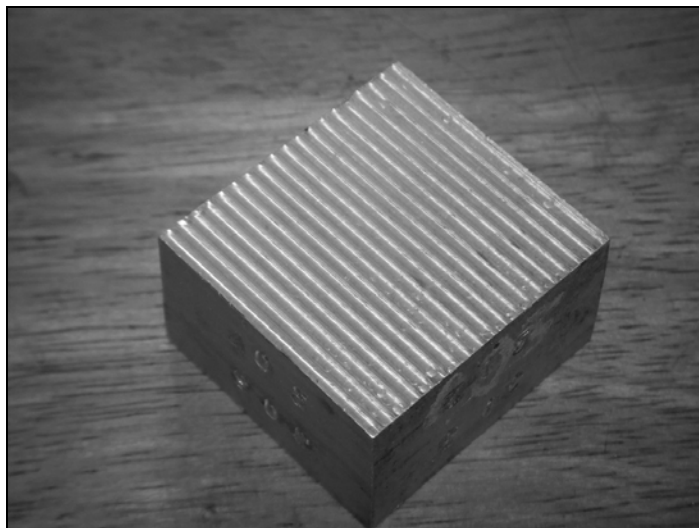
ภาพผนวกที่ ก16 ชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.6$ มิลลิเมตร



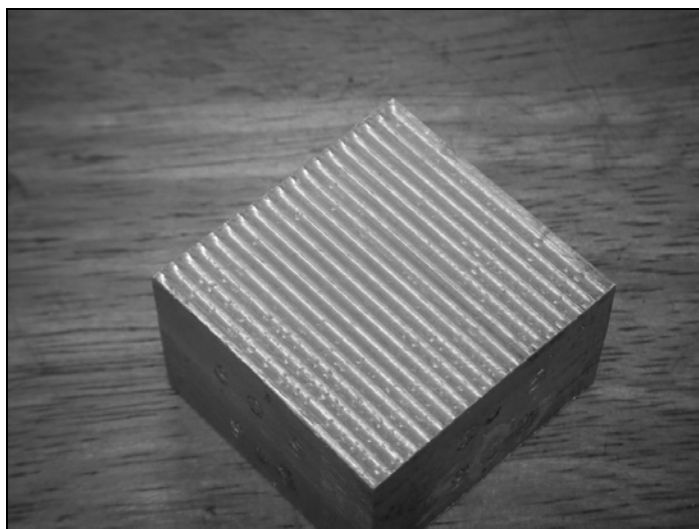
ภาพผนวกที่ ก17 ชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.8$ มิลลิเมตร



ภาพผนวกที่ ก18 ชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.8$ มิลลิเมตร



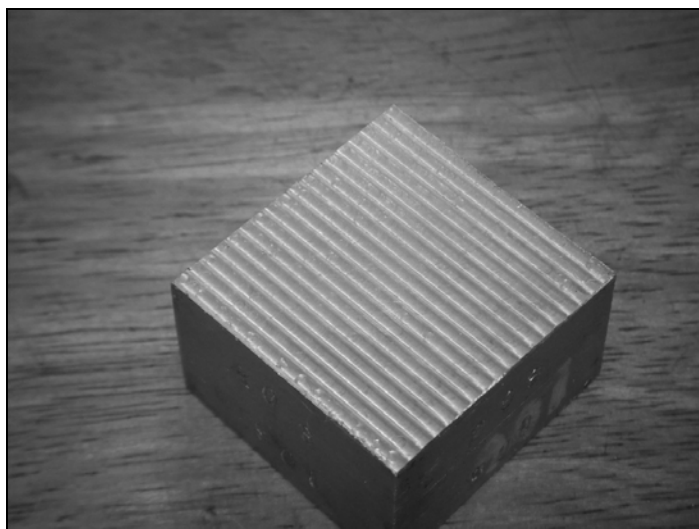
ภาพผนวกที่ ก19 ชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.8$ มิลลิเมตร



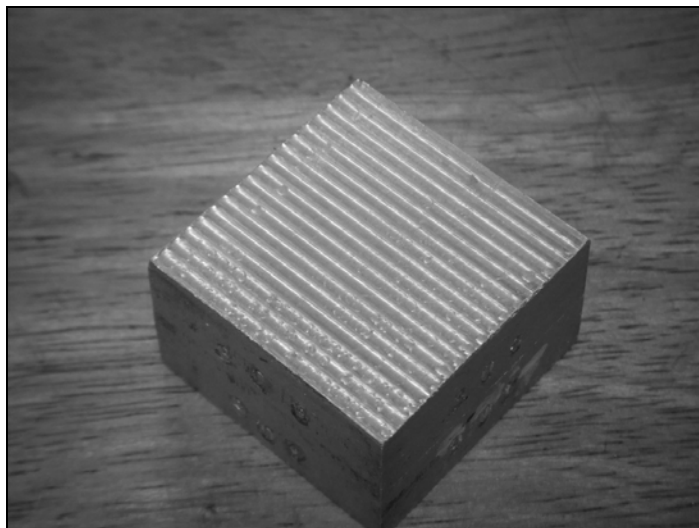
ภาพผนวกที่ ก20 ชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.8$ มิลลิเมตร



ภาพผนวกที่ ก21 ชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 1.0$ มิลลิเมตร



ภาพผนวกที่ ก22 ชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 1.0$ มิลลิเมตร



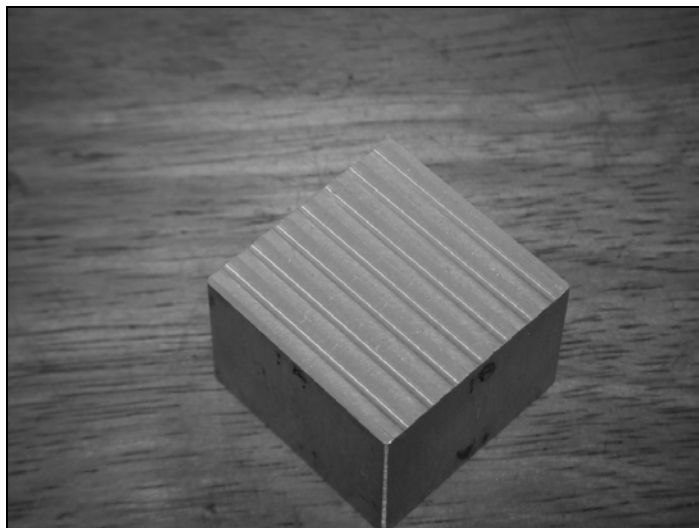
ภาพผนวกที่ ก23 ชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 1.0$ มิลลิเมตร



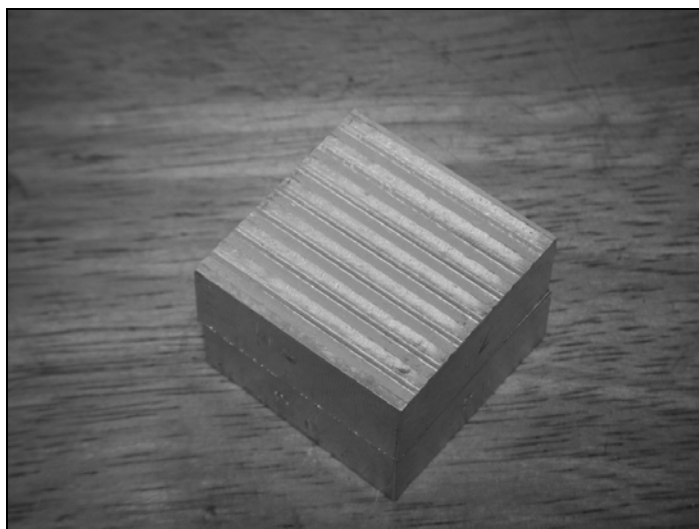
ภาพผนวกที่ ก24 ชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 1.0$ มิลลิเมตร

ภาคผนวก ข

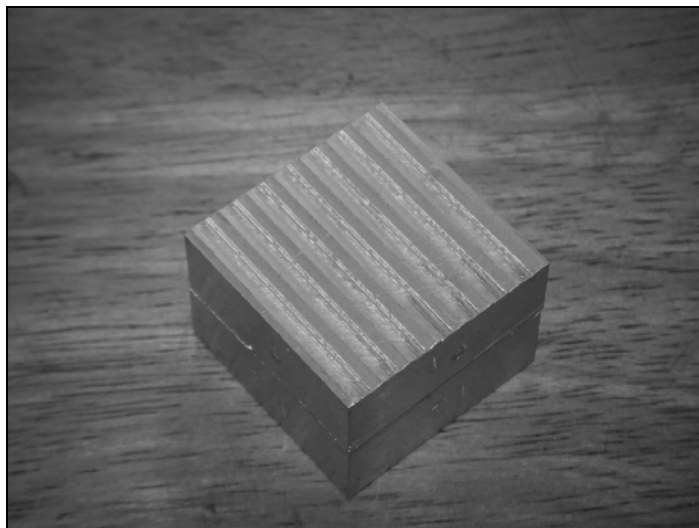
ภาพชิ้นงานที่เกิดจากการคัดเยื้องศูนย์เชิงมุม



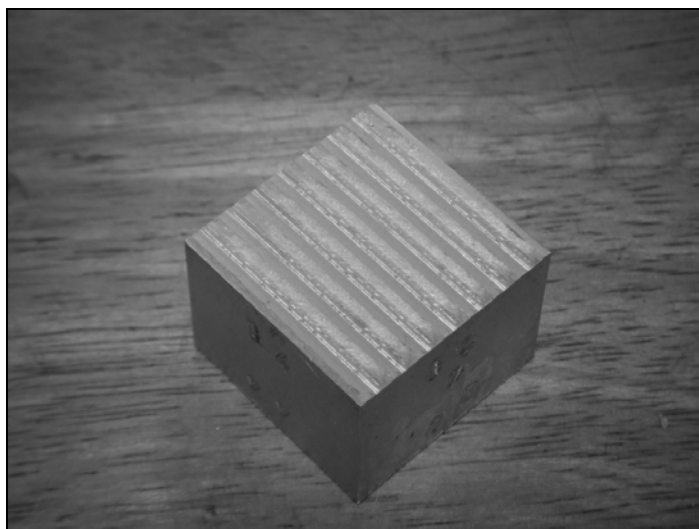
ภาพผนวกที่ ข1 ชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 0.0$ องศา



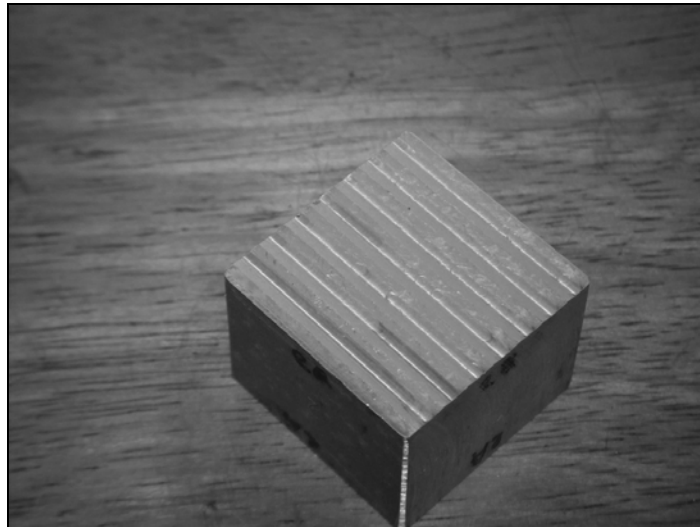
ภาพผนวกที่ ข2 ชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 0.0$ องศา



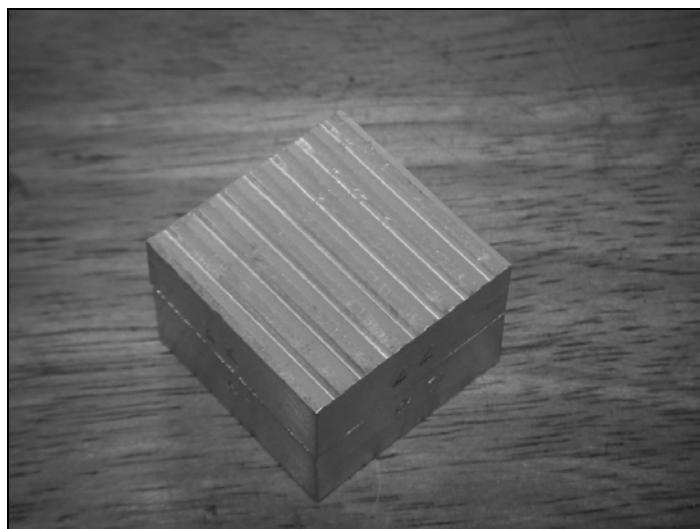
ภาพผนวกที่ ข3 ชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 0.0$ องศา



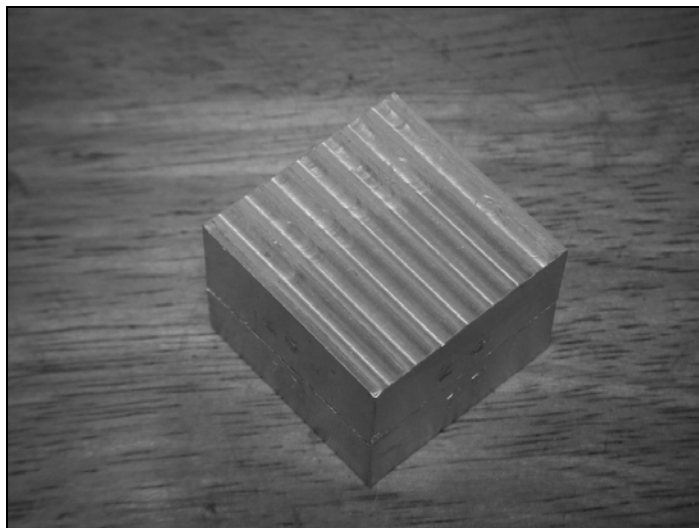
ภาพผนวกที่ ข4 ชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 0.0$ องศา



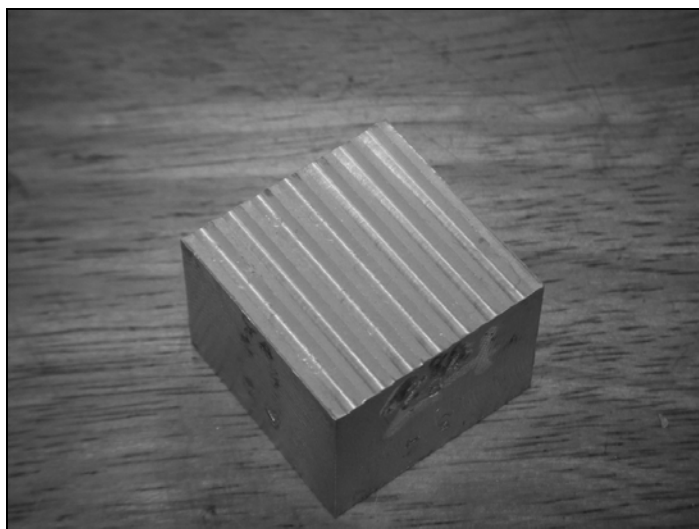
ภาพผนวกที่ ข5 ชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 0.5$ องศา



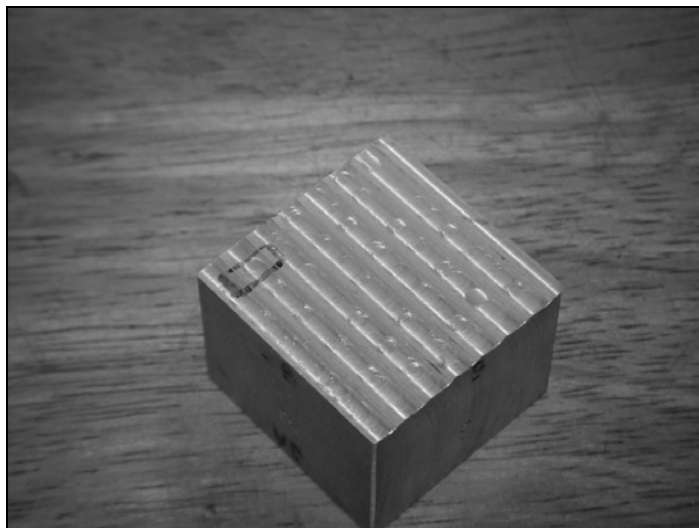
ภาพผนวกที่ ข6 ชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 0.5$ องศา



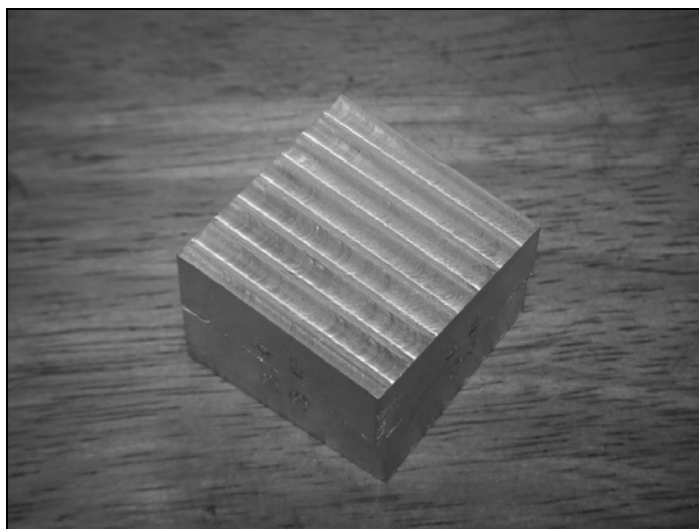
ภาพผนวกที่ ข7 ชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 0.5$ องศา



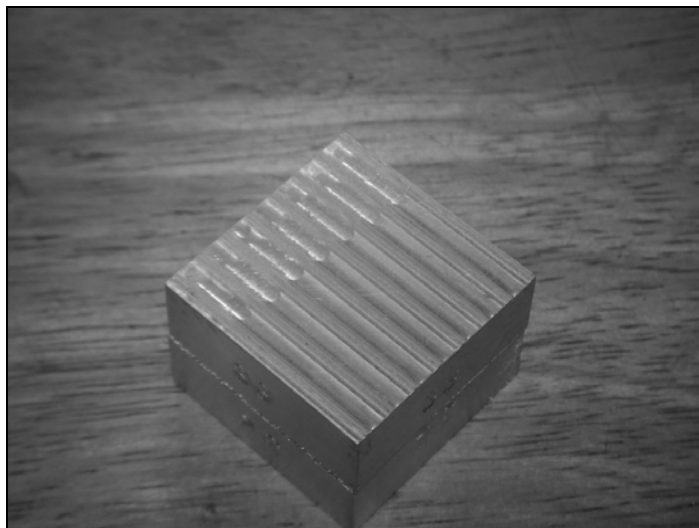
ภาพผนวกที่ ข8 ชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 0.5$ องศา



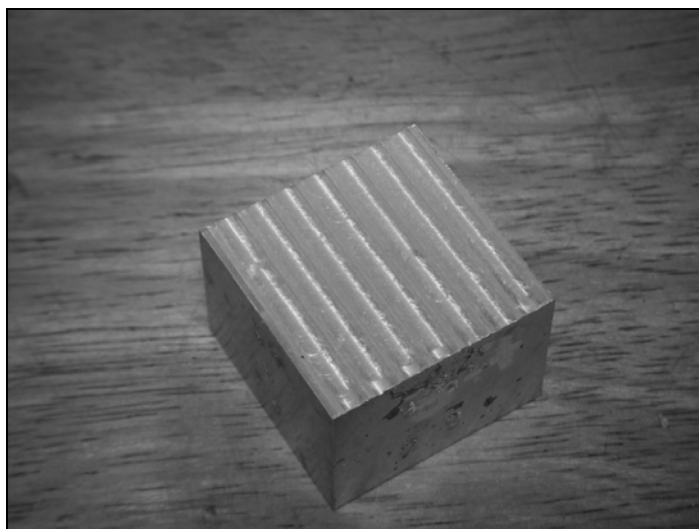
ภาพผนวกที่ ข9 ชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 1.0$ องศา



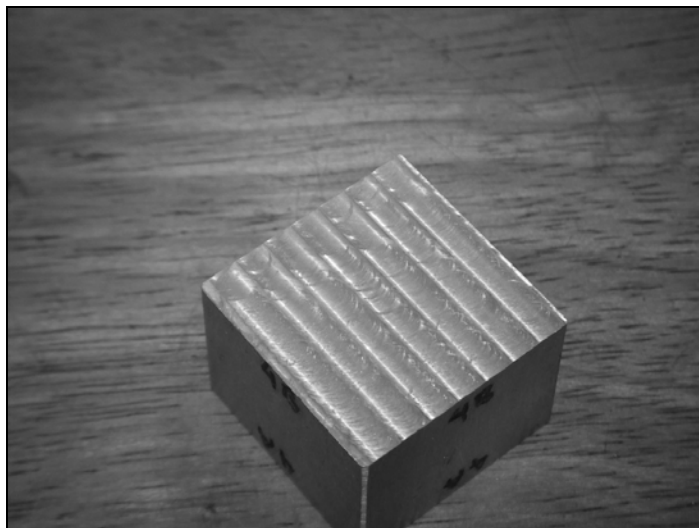
ภาพผนวกที่ ข10 ชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 1.0$ องศา



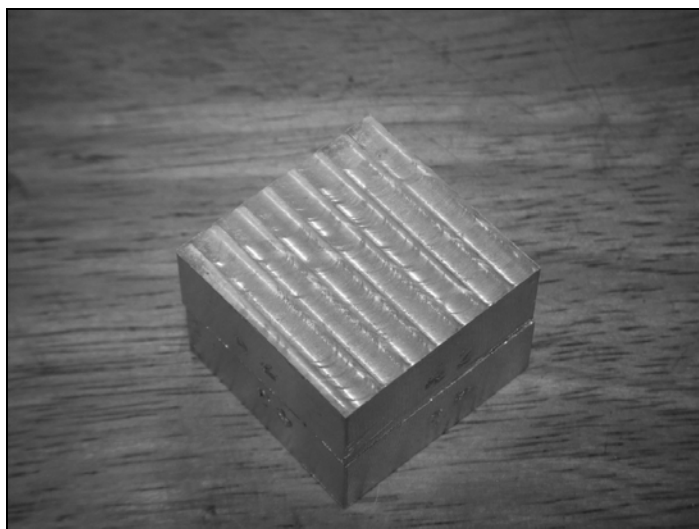
ภาพผนวกที่ ข11 ชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 1.0$ องศา



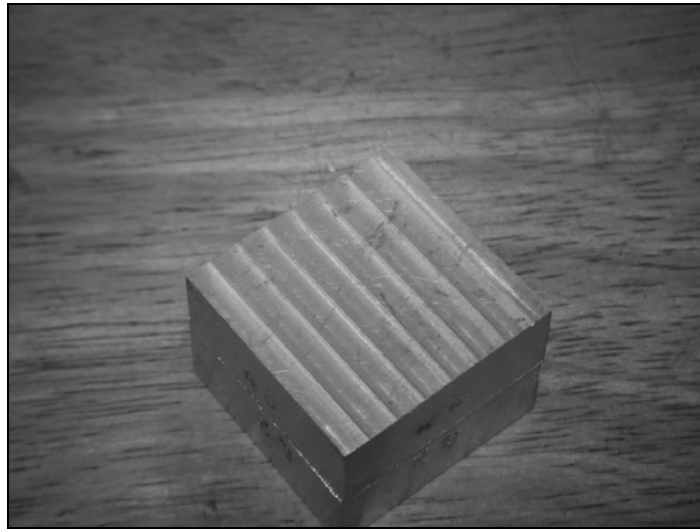
ภาพผนวกที่ ข12 ชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 1.0$ องศา



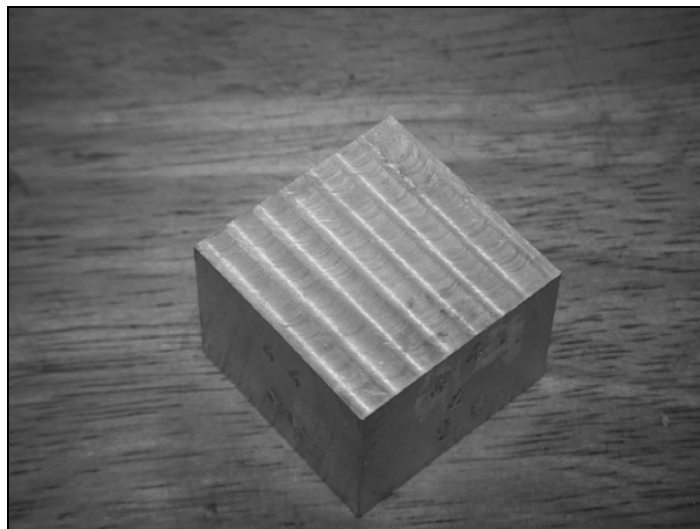
ภาพผนวกที่ ข13 ชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 1.5$ องศา



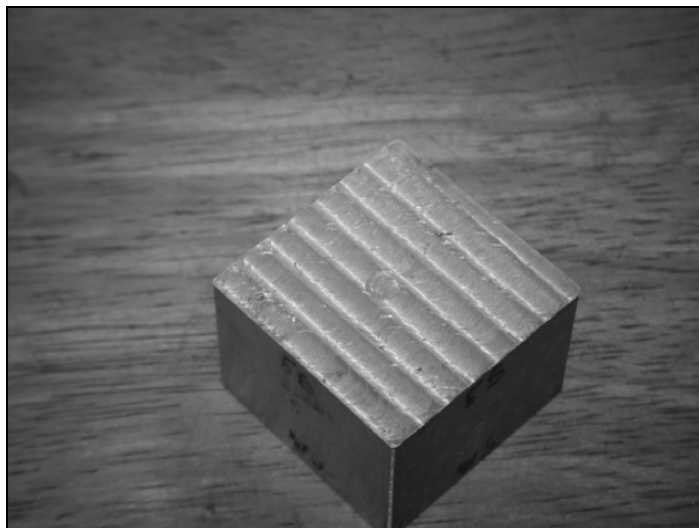
ภาพผนวกที่ ข14 ชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 1.5$ องศา



ภาพผนวกที่ ข15 ชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 1.5$ องศา



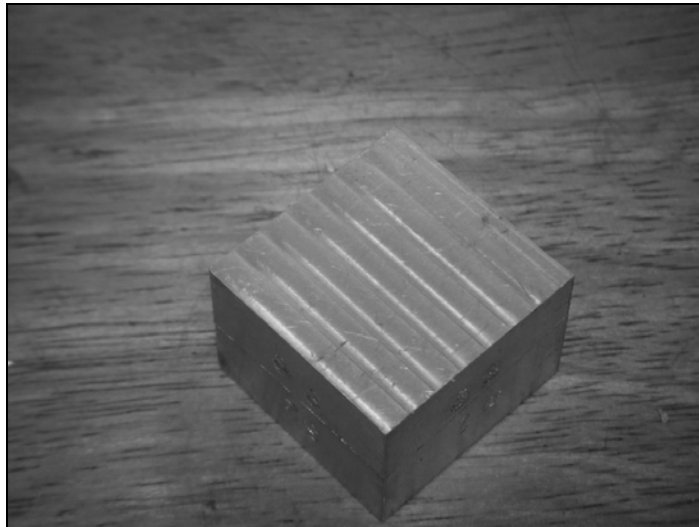
ภาพผนวกที่ ข16 ชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 1.5$ องศา



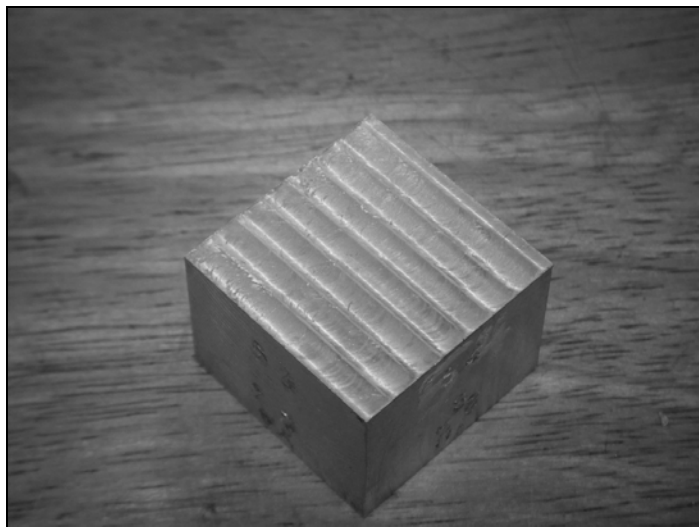
ภาพผนวกที่ ข17 ชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.0$ องศา



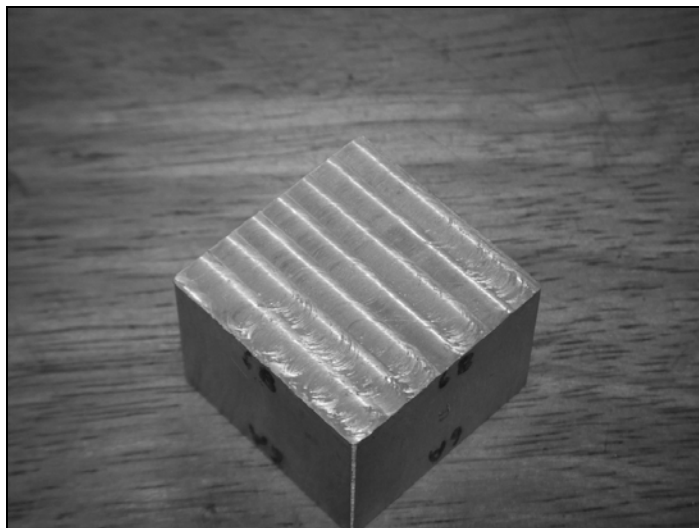
ภาพผนวกที่ ข18 ชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.0$ องศา



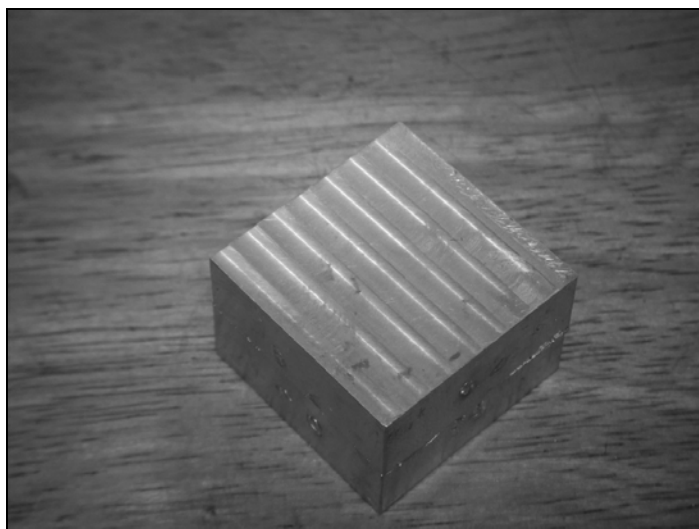
ภาพผนวกที่ ข19 ชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.0$ องศา



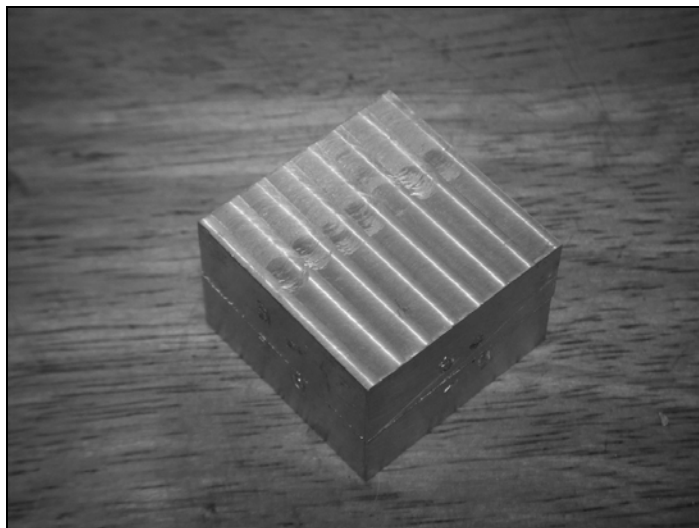
ภาพผนวกที่ ข20 ชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.0$ องศา



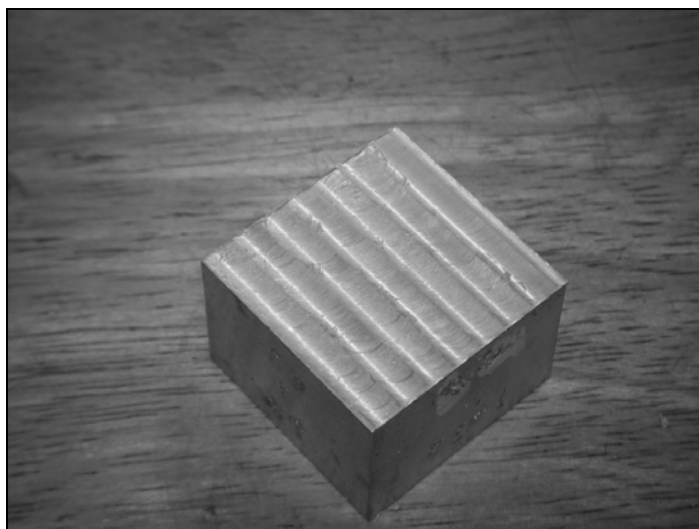
ภาพผนวกที่ ข21 ชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.5$ องศา



ภาพผนวกที่ ข22 ชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.5$ องศา



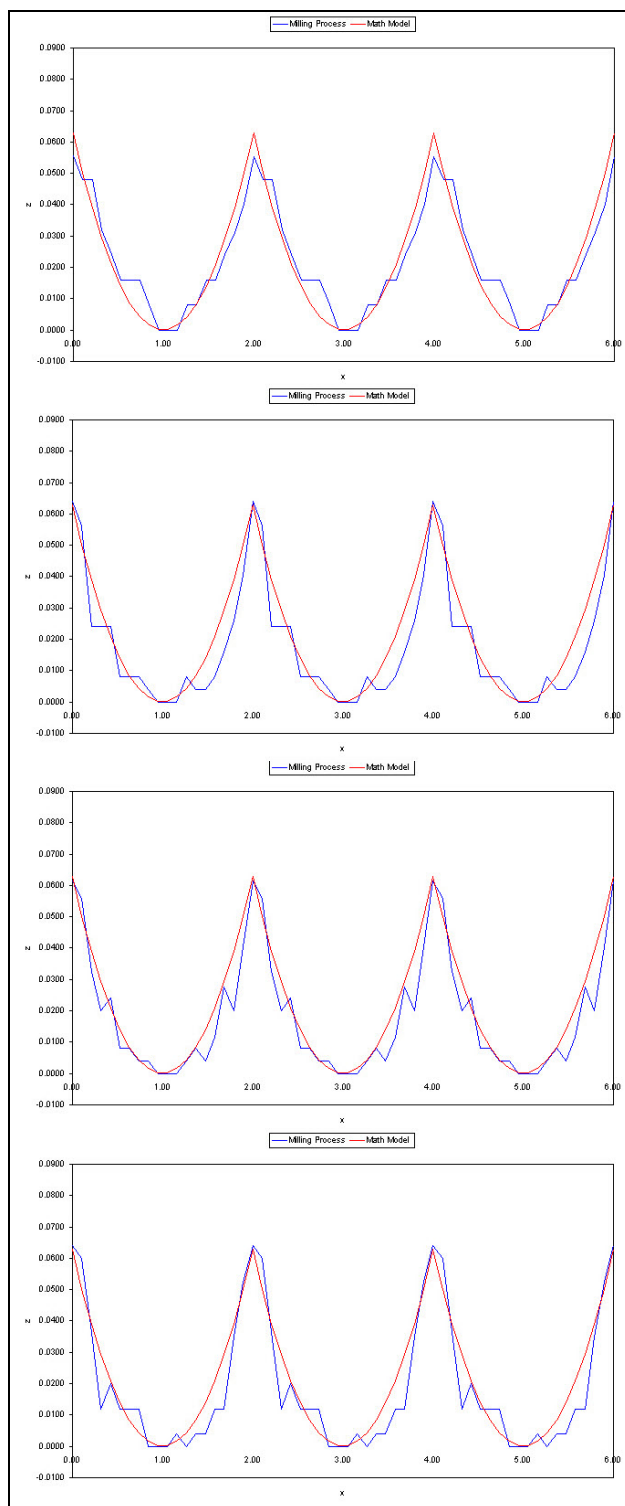
ภาพผนวกที่ ข23 ชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.5$ องศา



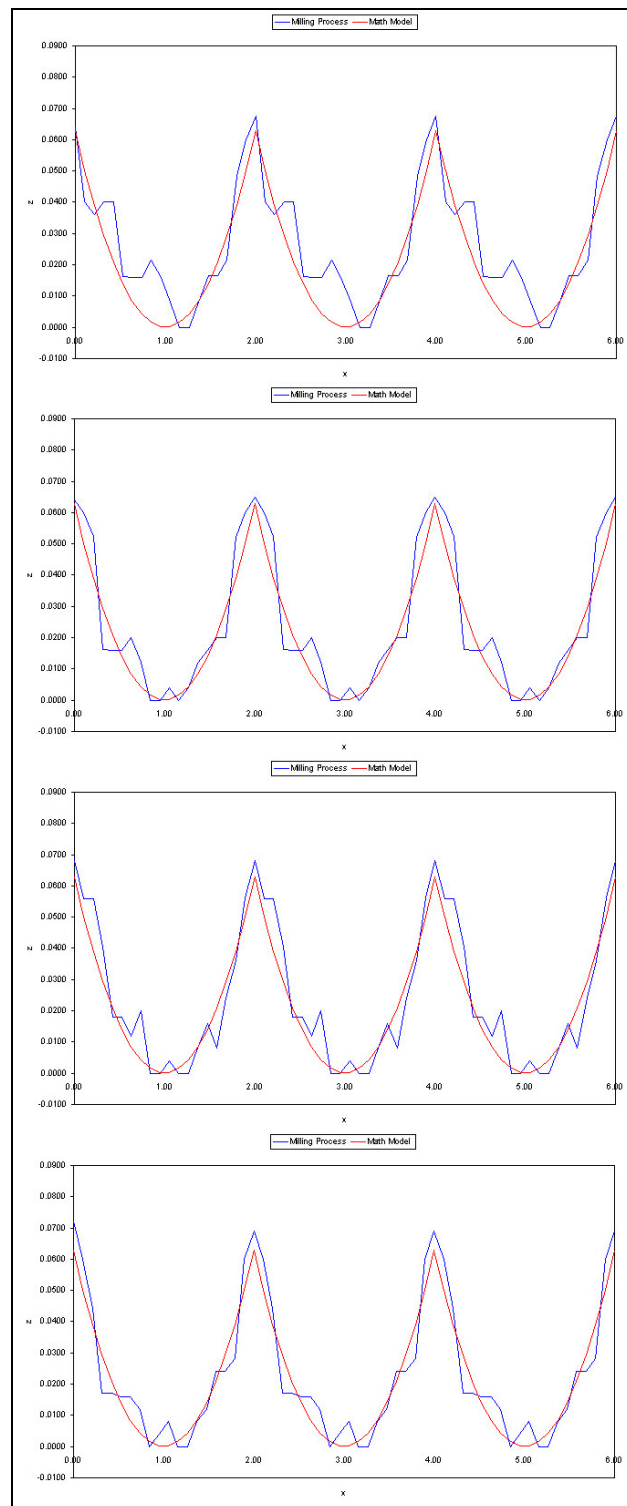
ภาพผนวกที่ ข24 ชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.5$ องศา

ภาคผนวก ค

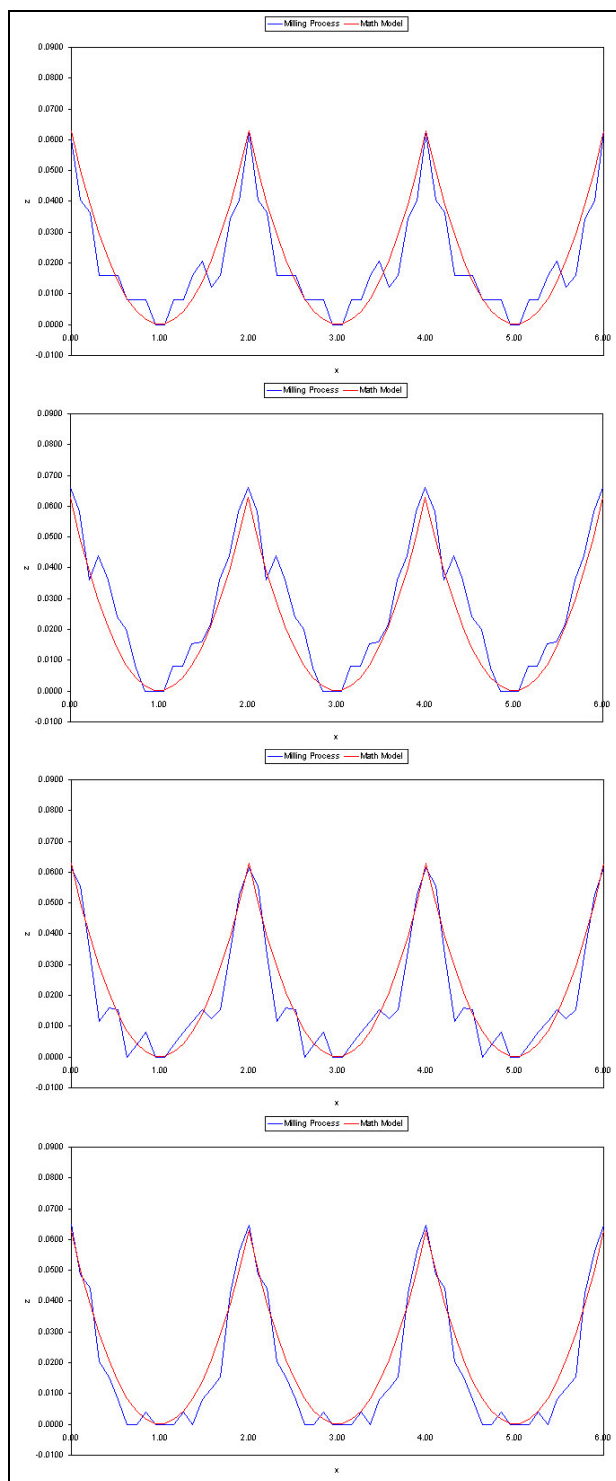
ภาพฝึกฝนฝีมืองานที่เกิดจากการัดเยื้องศูนย์ในแนวนอน



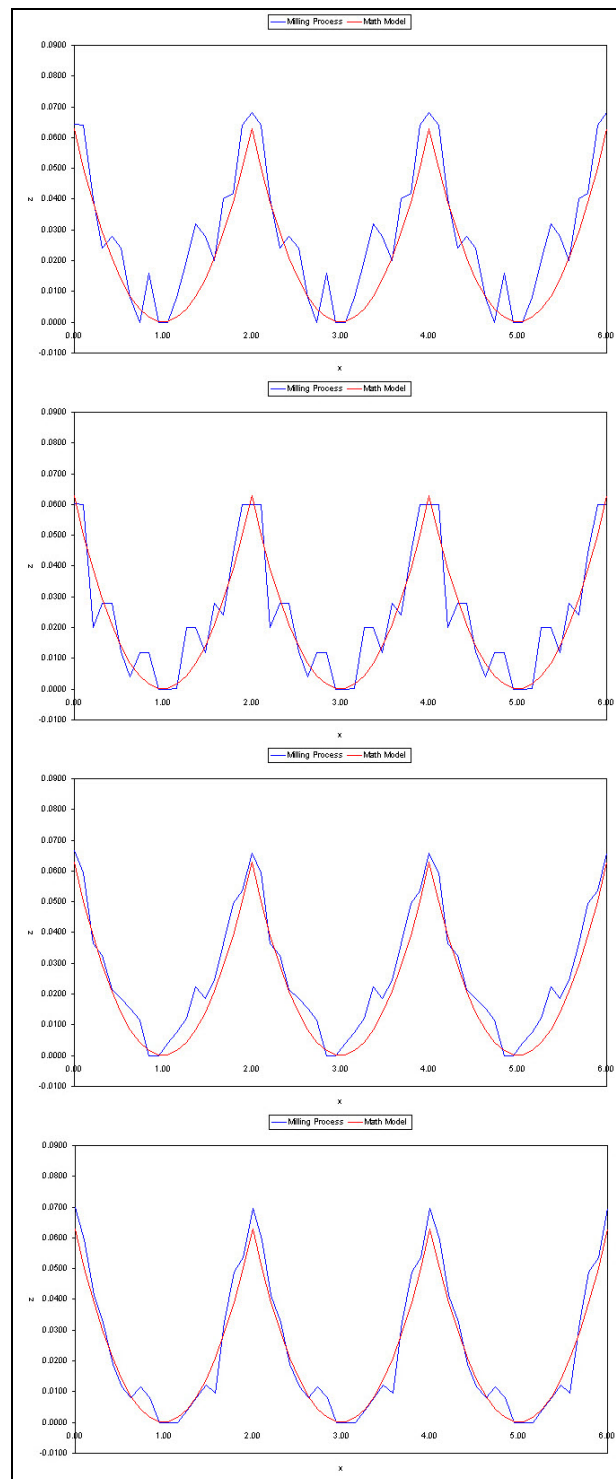
ภาพผนวกที่ ค1 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.0$ มิลลิเมตร



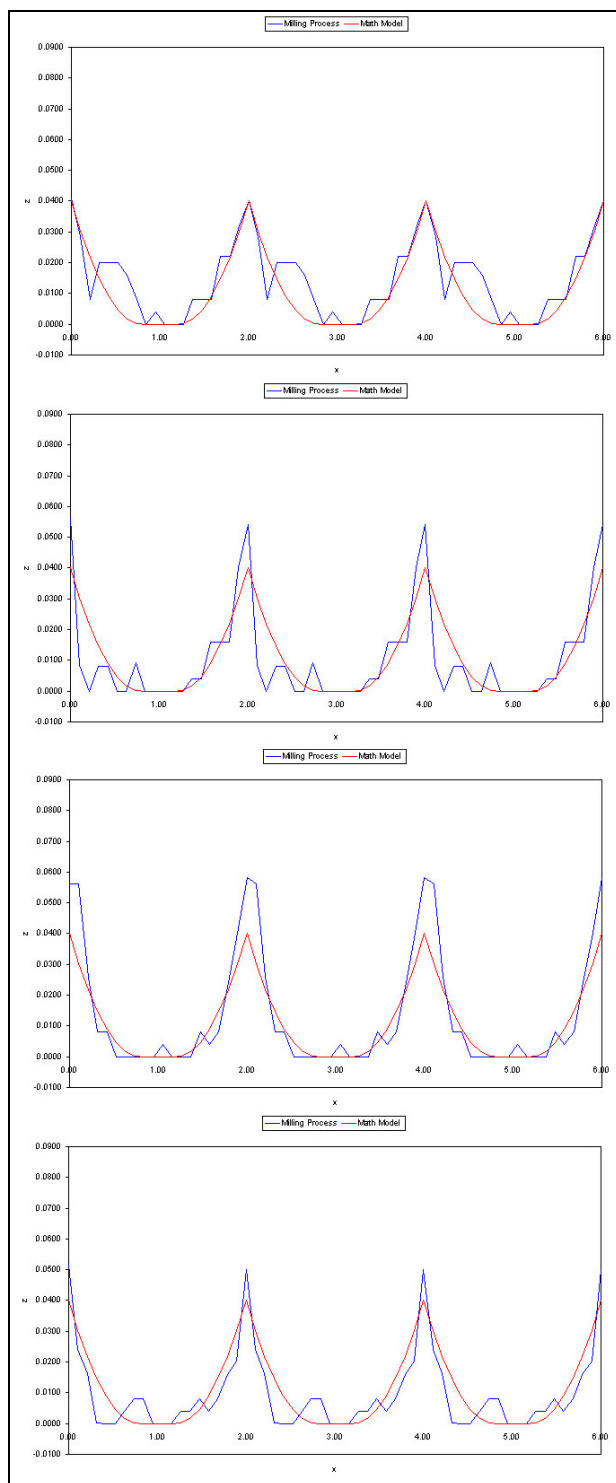
ภาพผนวกที่ ค2 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.0$ มิลลิเมตร



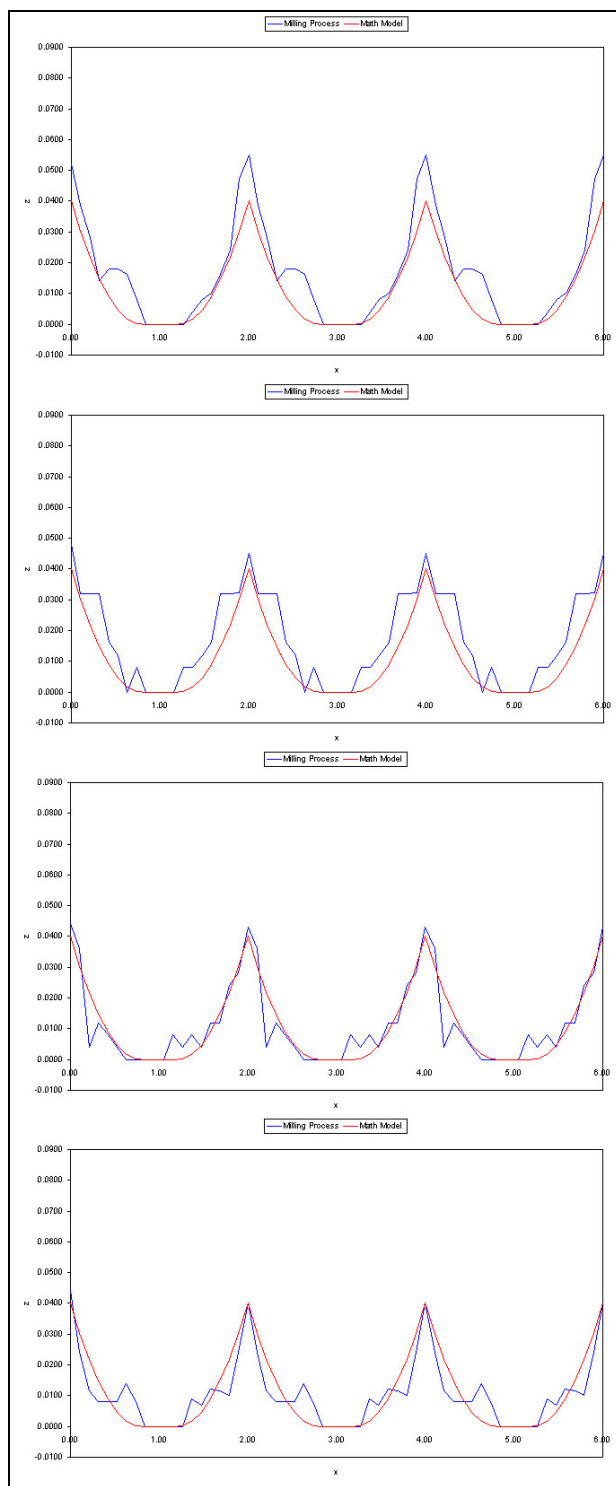
ภาพผนวกที่ ค3 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.0$ มิลลิเมตร



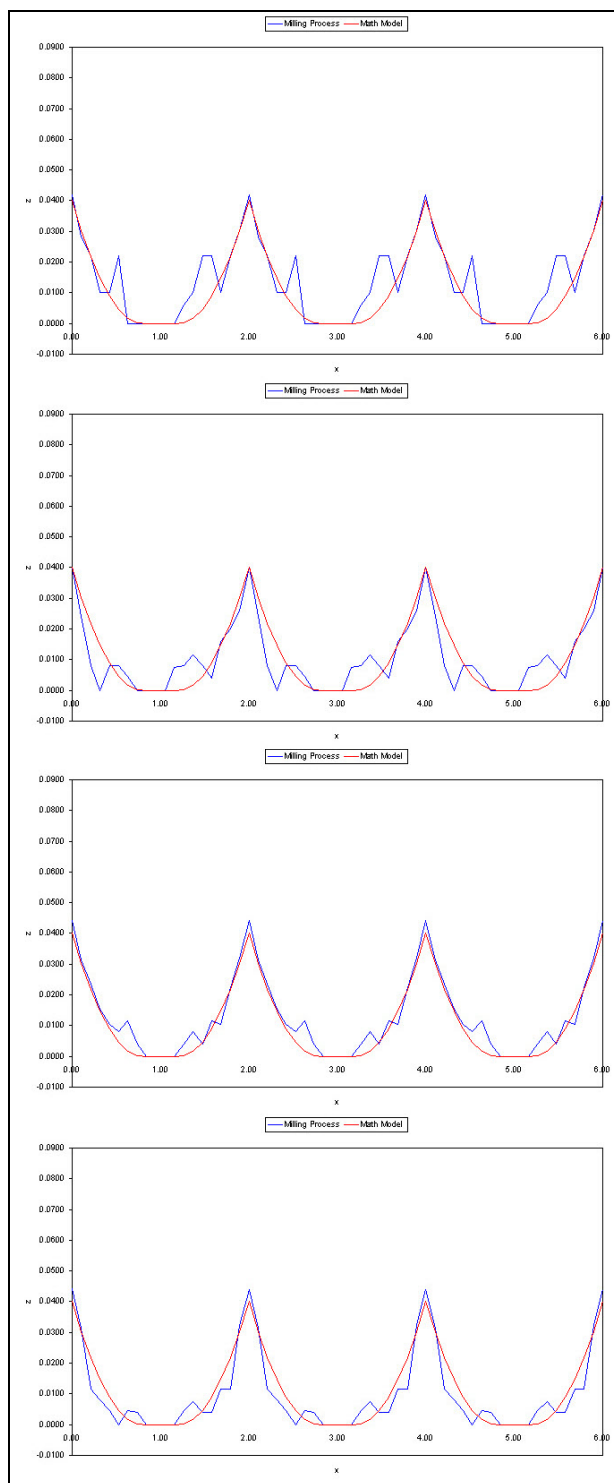
ภาพผนวกที่ ค4 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.0$ มิลลิเมตร



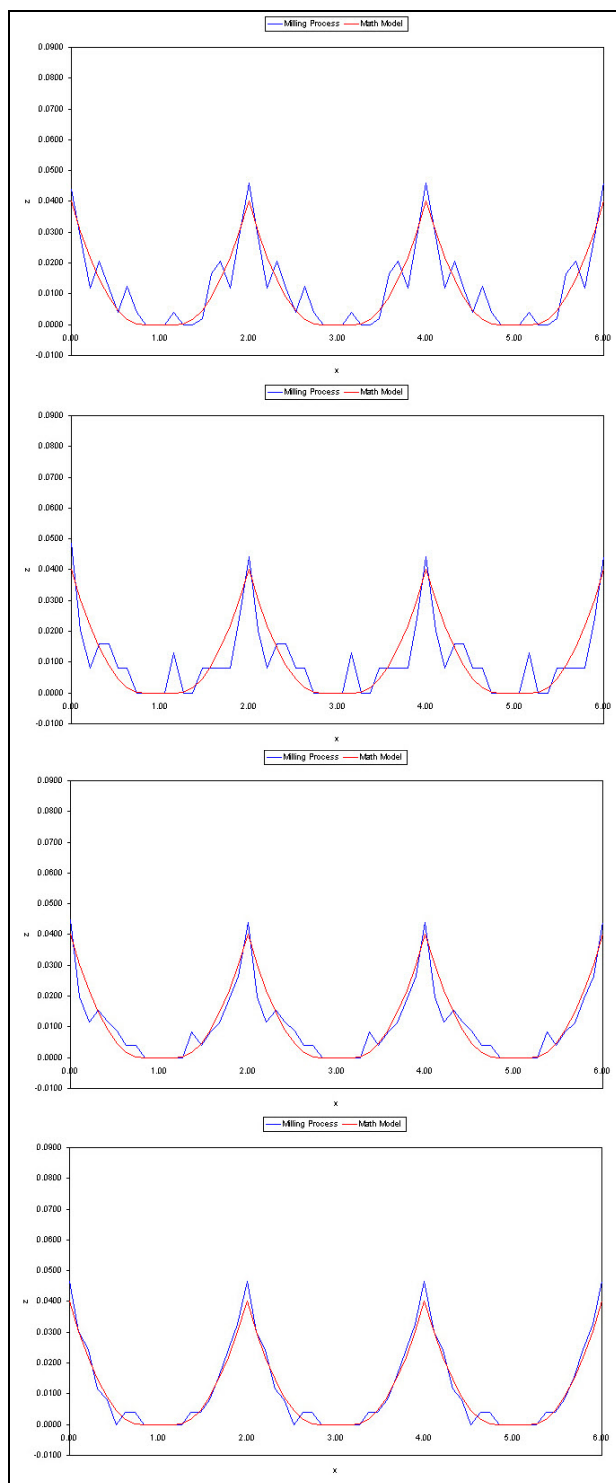
ภาพผนวกที่ ค5 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.2$ มิลลิเมตร



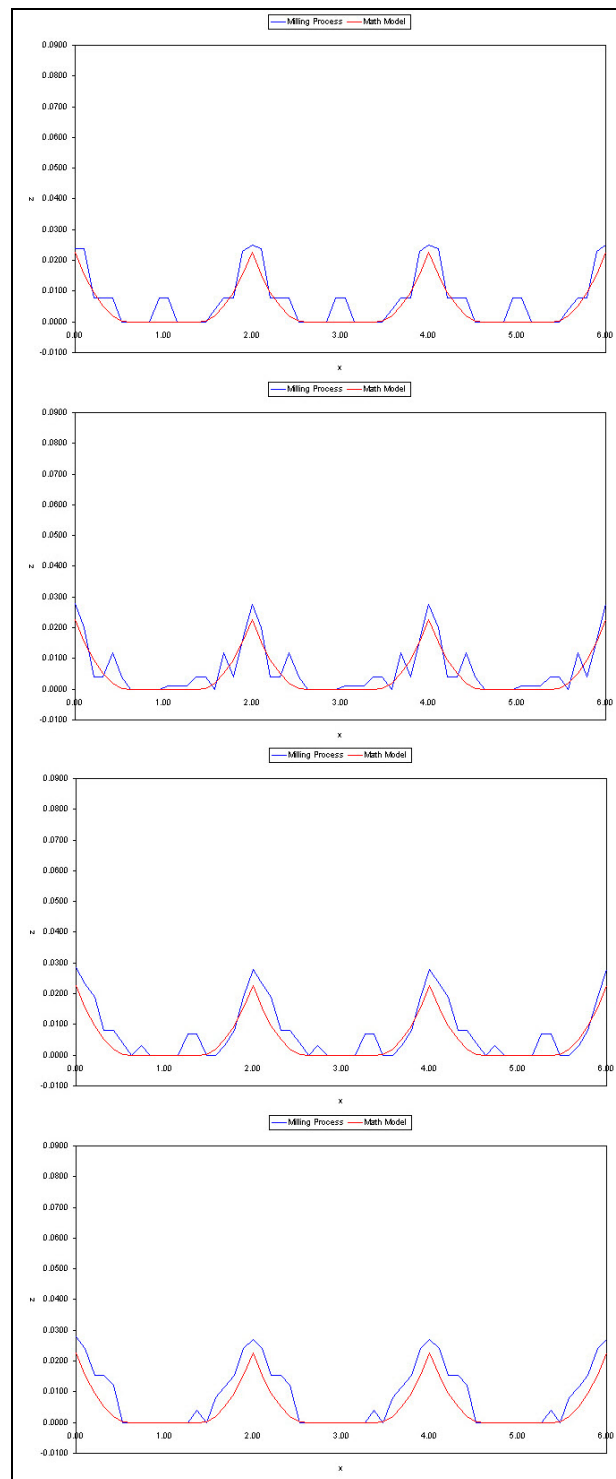
ภาพผนวกที่ ค6 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.2$ มิลลิเมตร



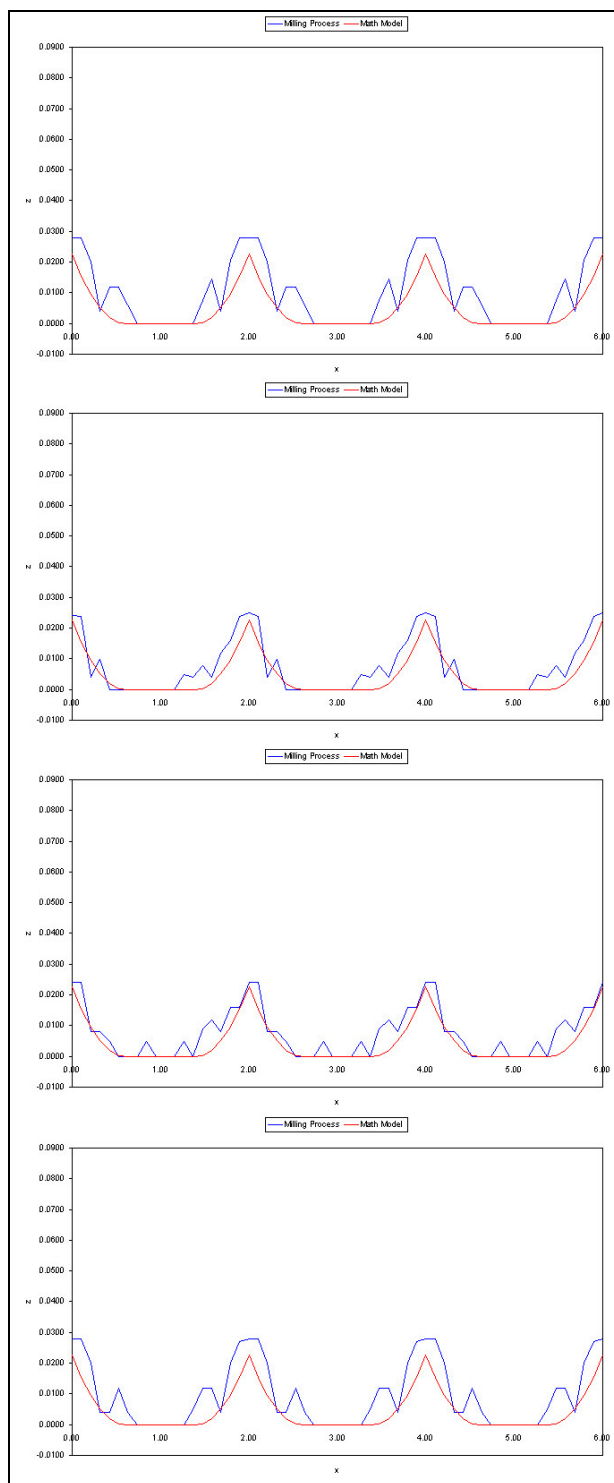
ภาพผนวกที่ ค7 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.2$ มิลลิเมตร



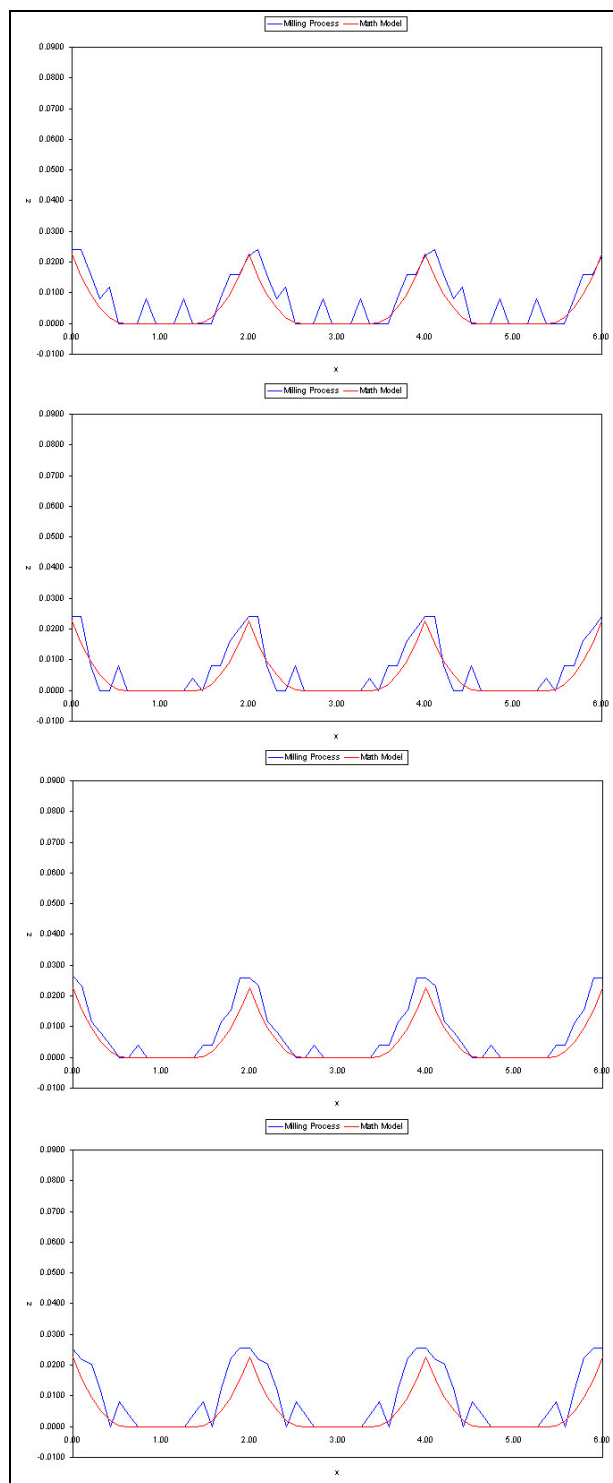
ภาพผนวกที่ ค8 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.2$ มิลลิเมตร



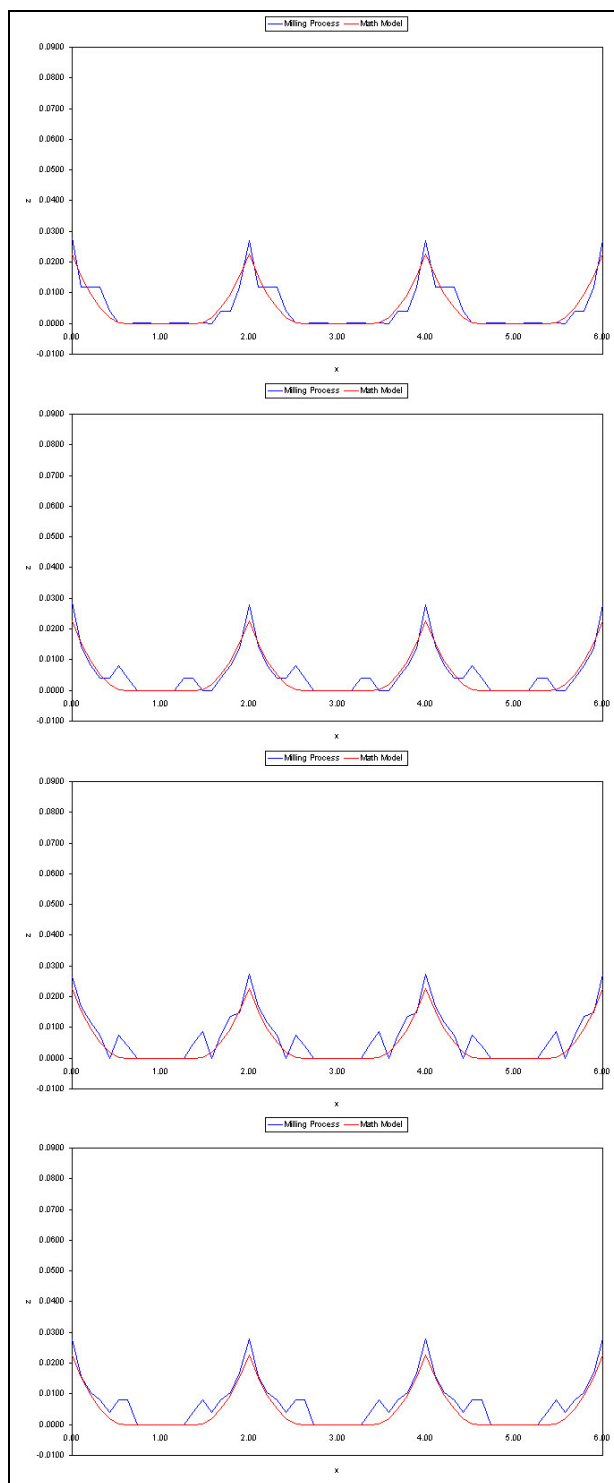
ภาพผนวกที่ ๙ พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.4$ มิลลิเมตร



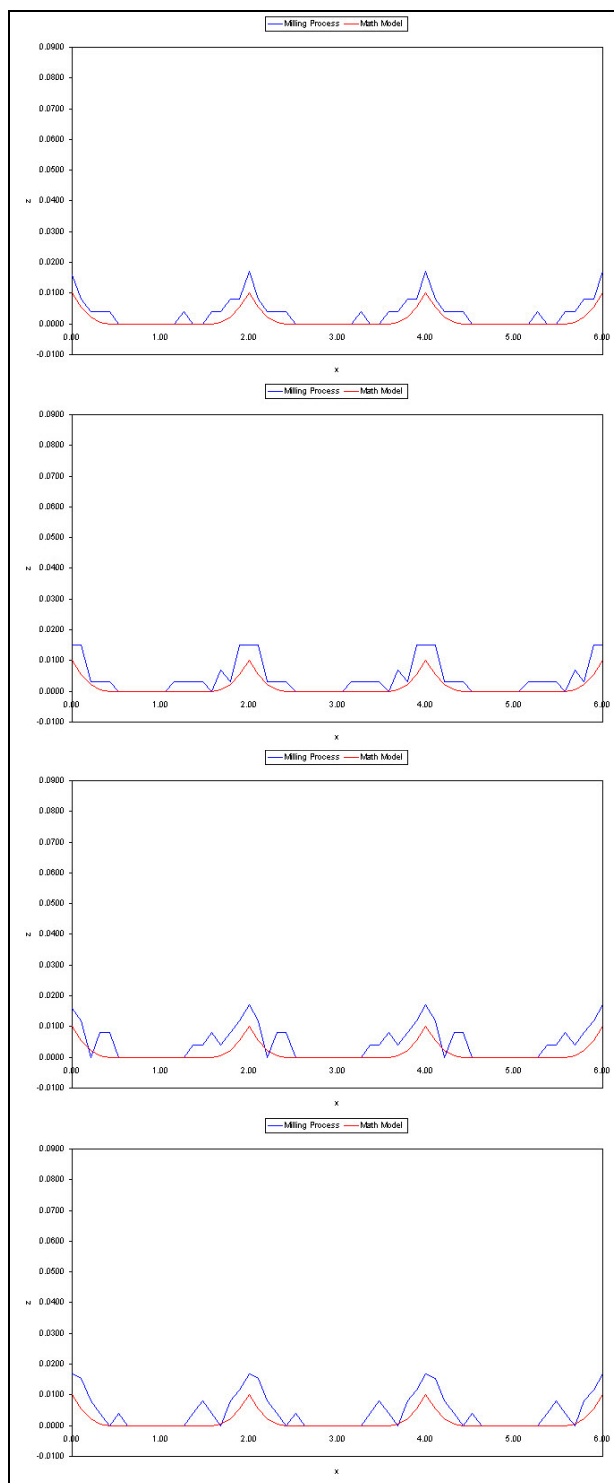
ภาพผนวกที่ ค10 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.4$ มิลลิเมตร



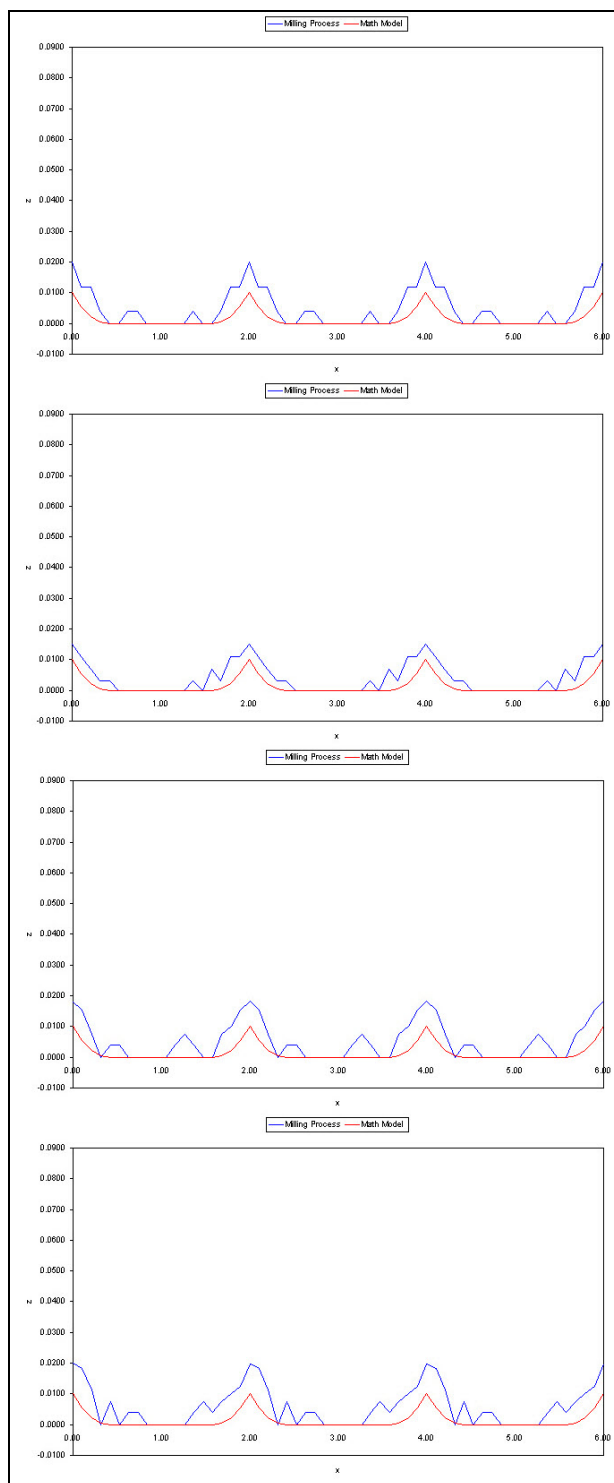
ภาพผนวกที่ ค11 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.4$ มิลลิเมตร



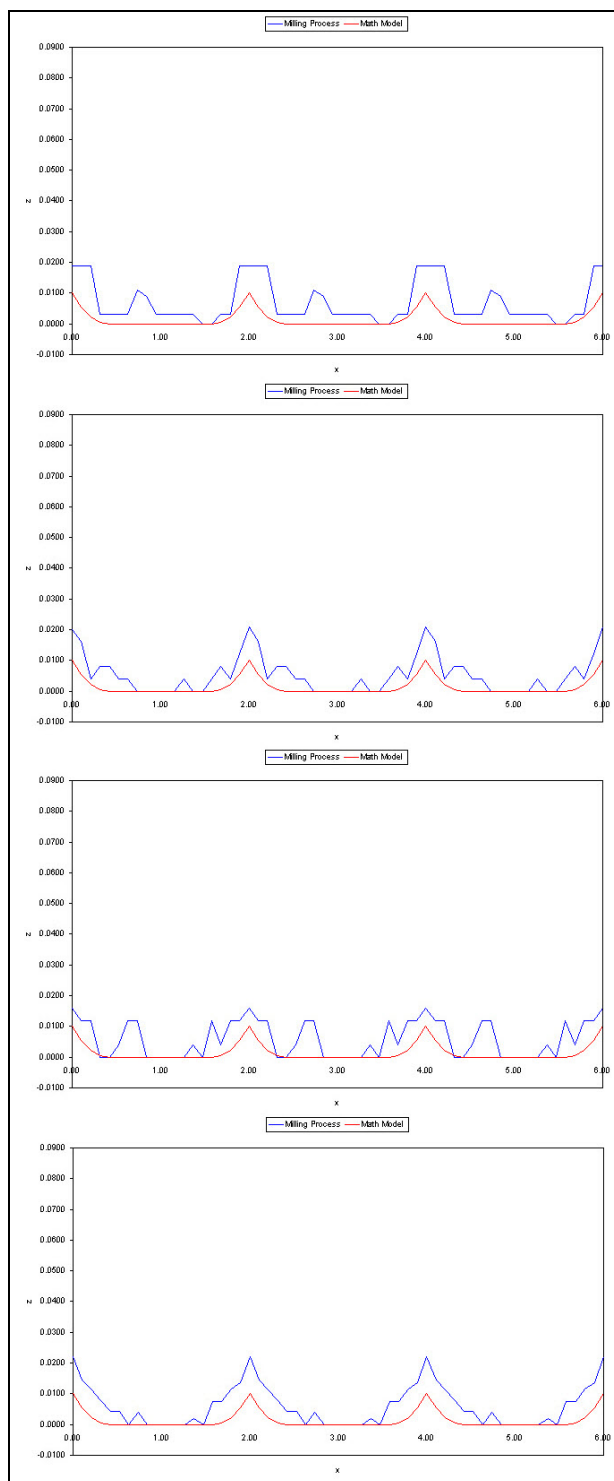
ภาพผนวกที่ ค12 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.4$ มิลลิเมตร



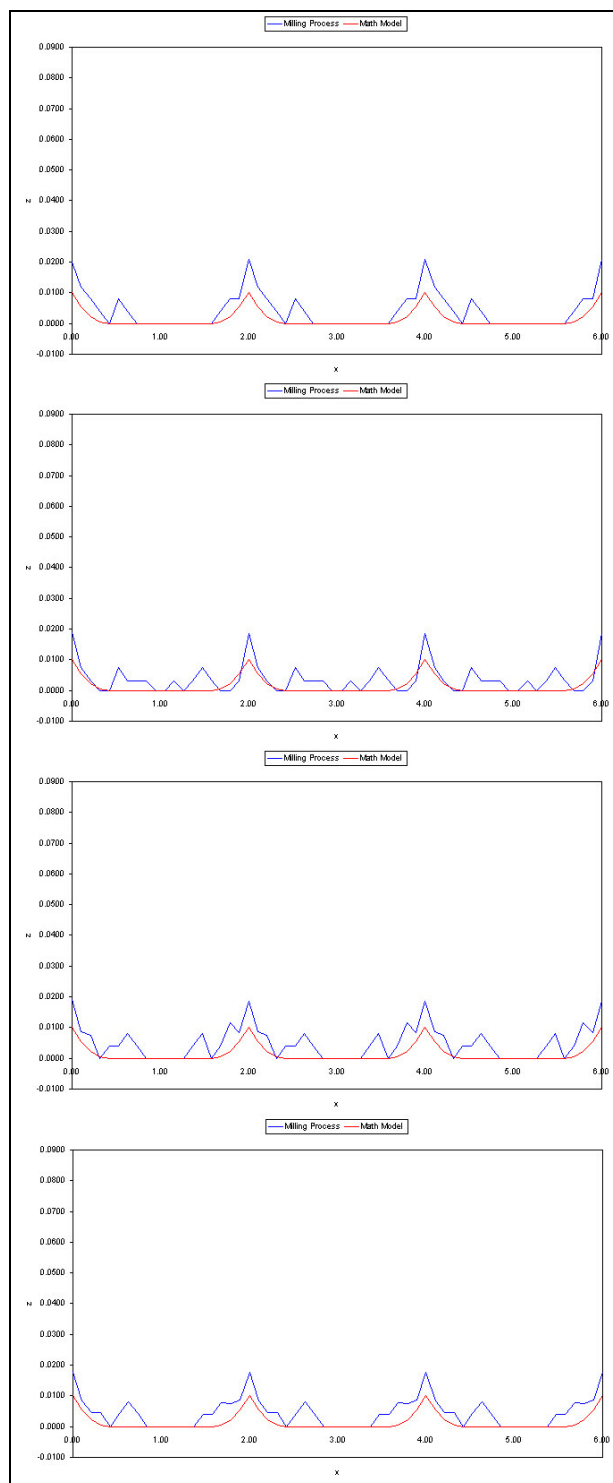
ภาพผนวกที่ ค13 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.6$ มิลลิเมตร



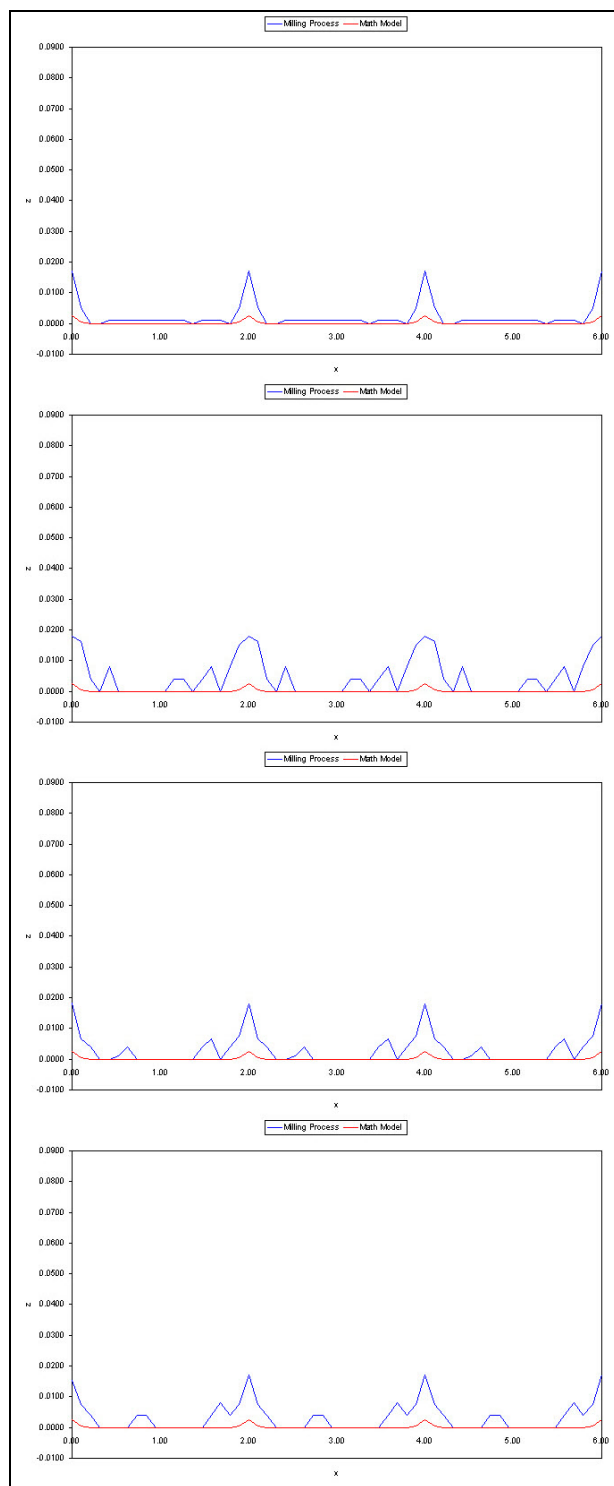
ภาพผนวกที่ ค14 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.6$ มิลลิเมตร



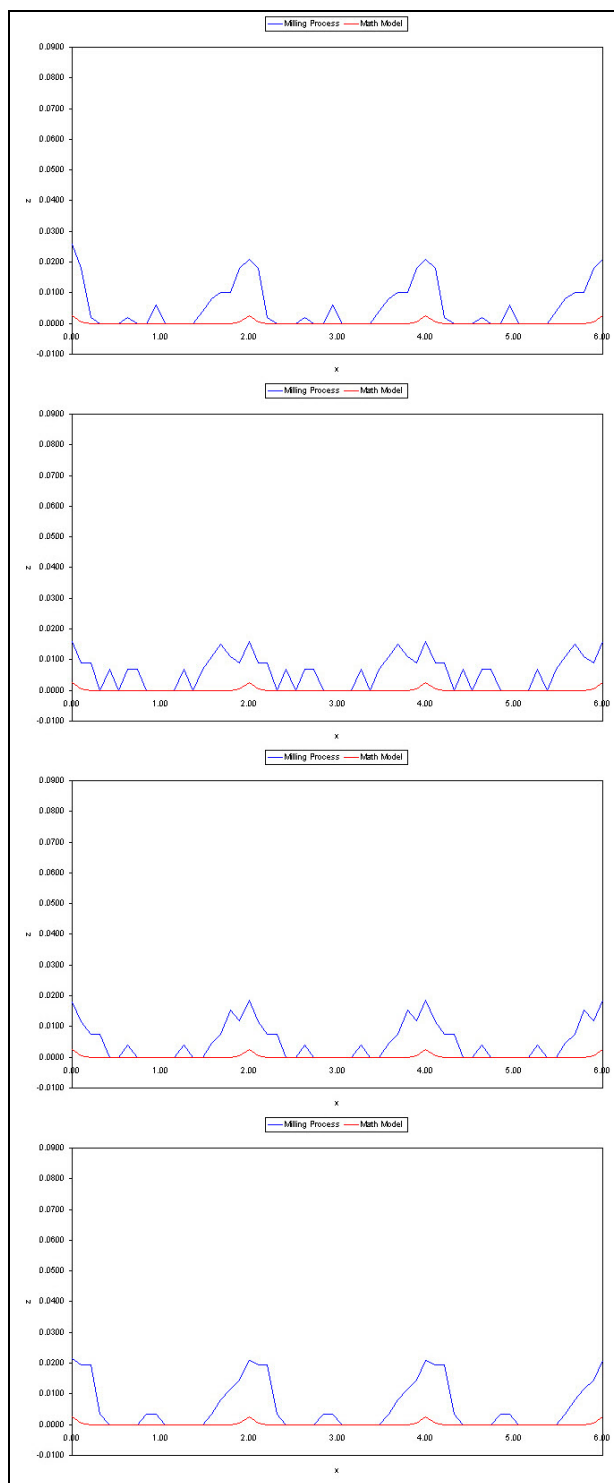
ภาพผนวกที่ ค15 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.6$ มิลลิเมตร



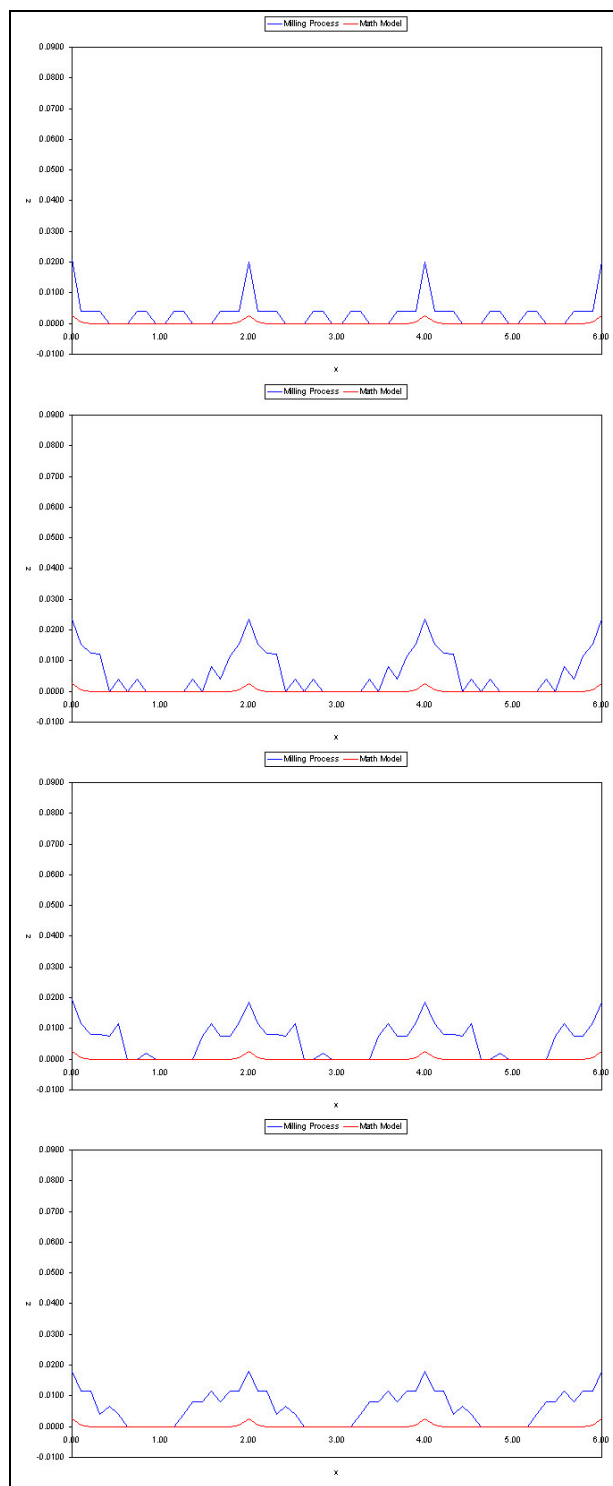
ภาพผนวกที่ ค16 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.6$ มิลลิเมตร



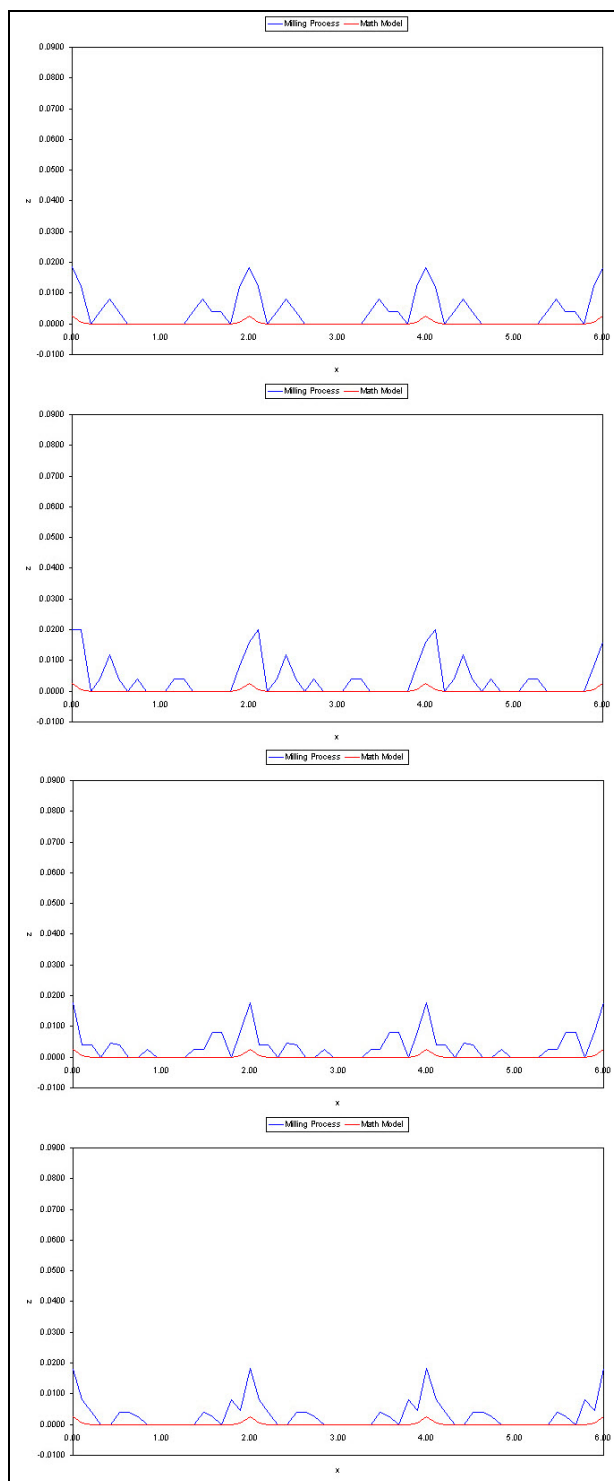
ภาพผนวกที่ ค17 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.8$ มิลลิเมตร



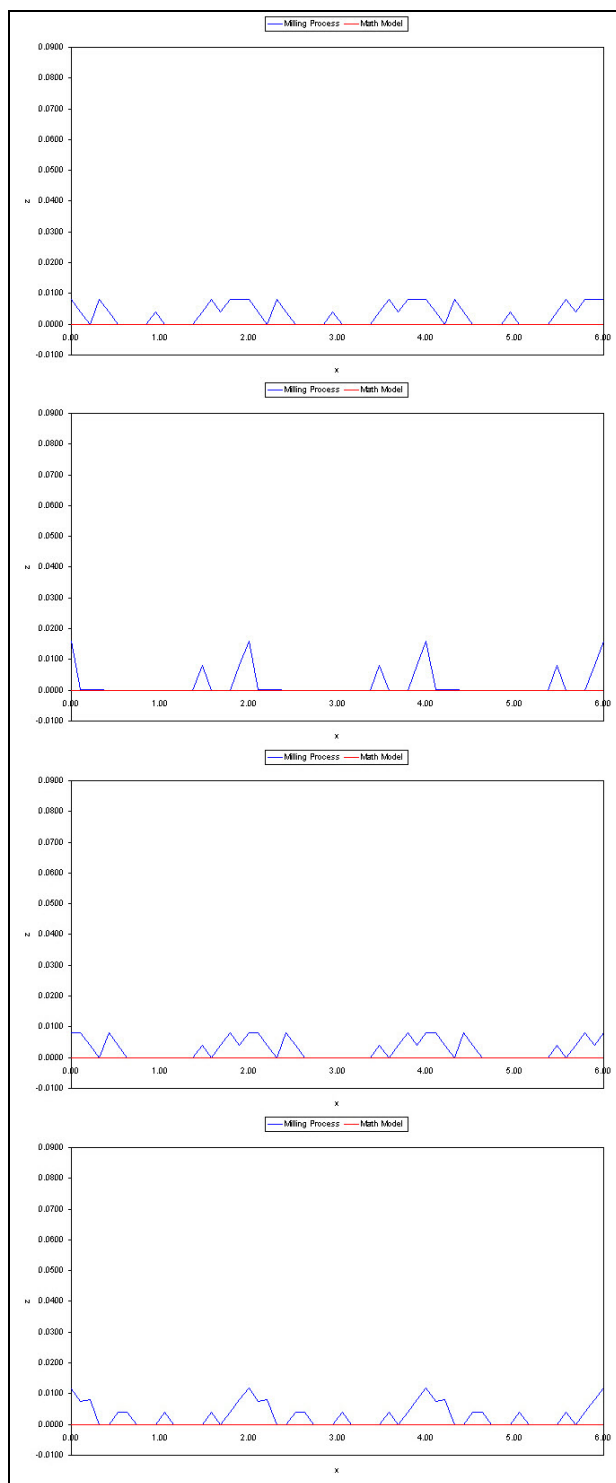
ภาพผนวกที่ ค18 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.8$ มิลลิเมตร



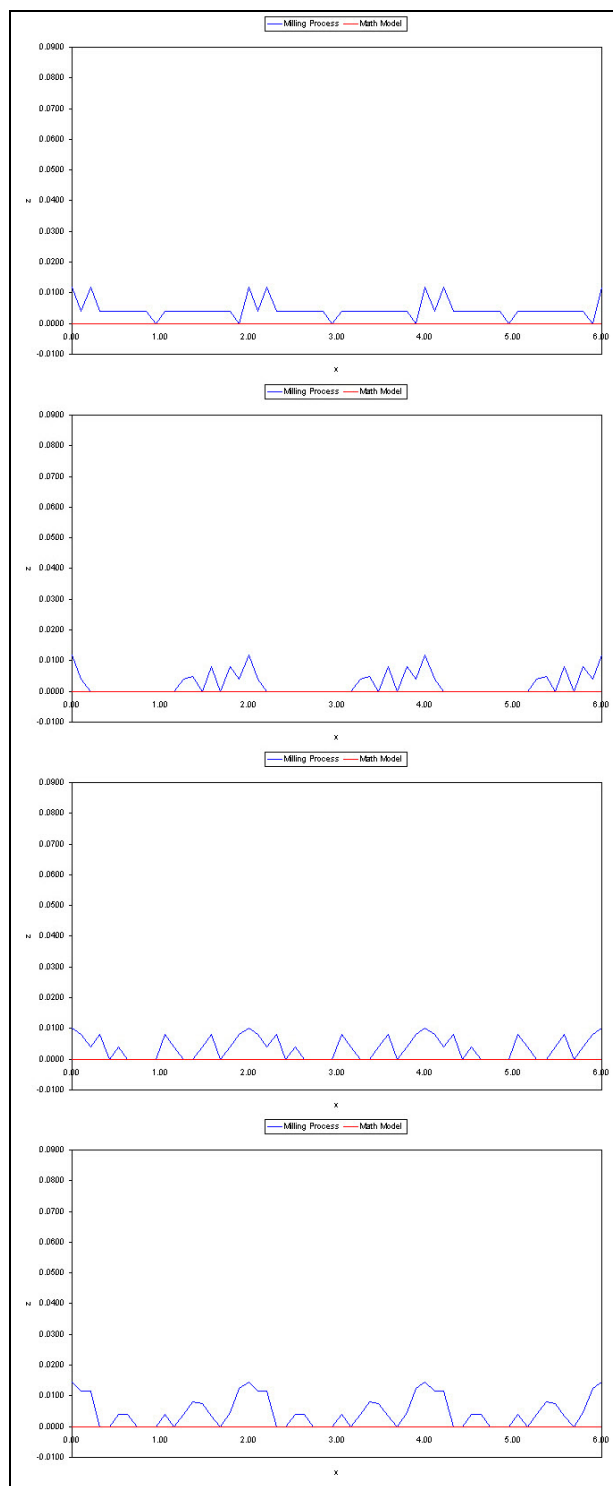
ภาพผนวกที่ ค19 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.8$ มิลลิเมตร



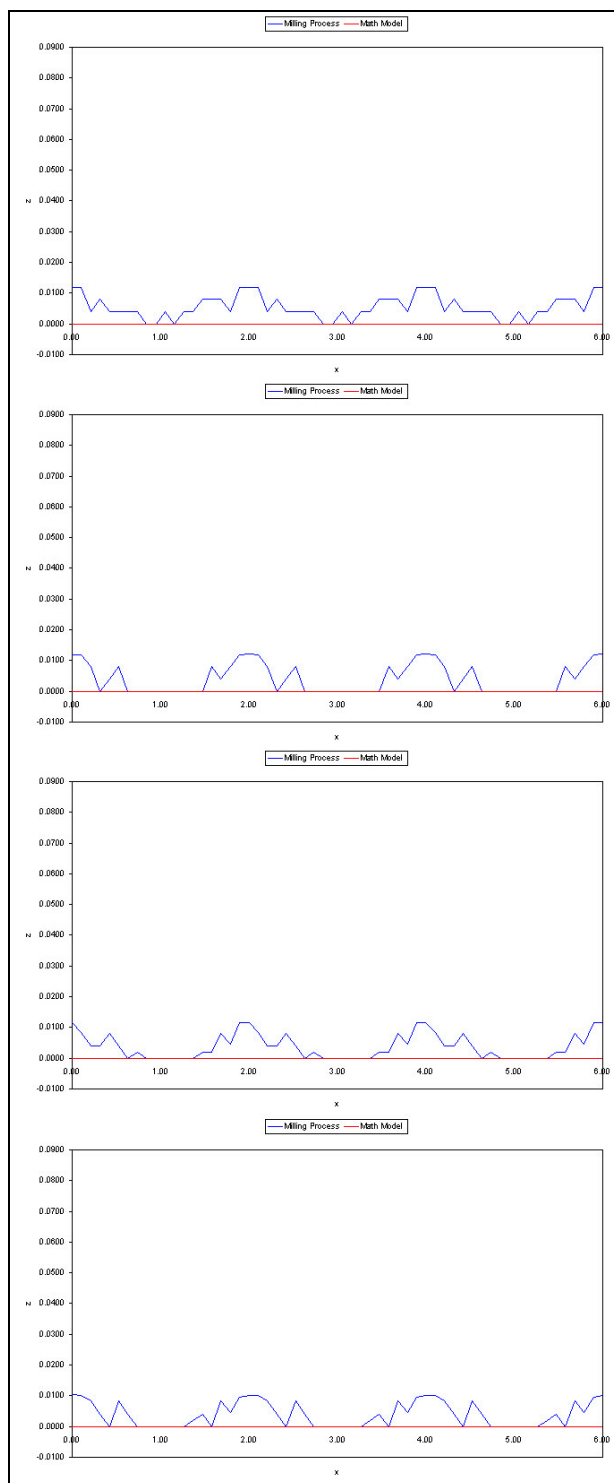
ภาพผนวกที่ ค20 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 0.8$ มิลลิเมตร



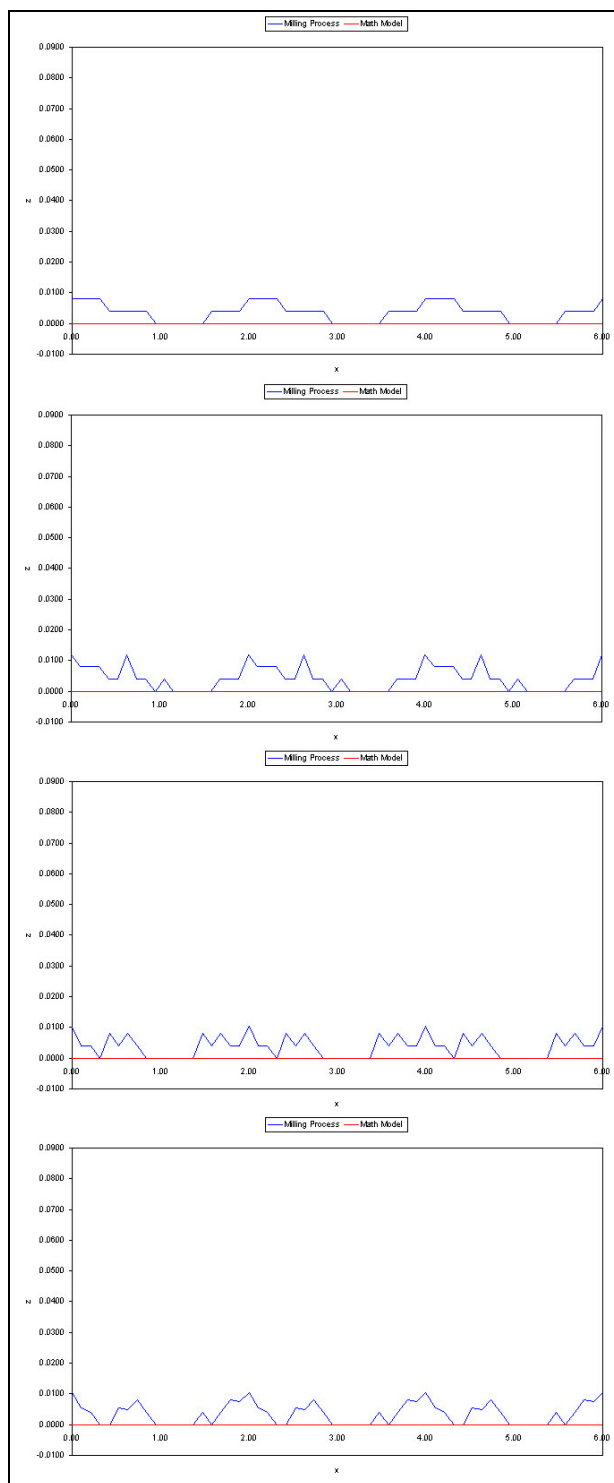
ภาพผนวกที่ ค21 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 1.0$ มิลลิเมตร



ภาพผนวกที่ ค22 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 1.0$ มิลลิเมตร



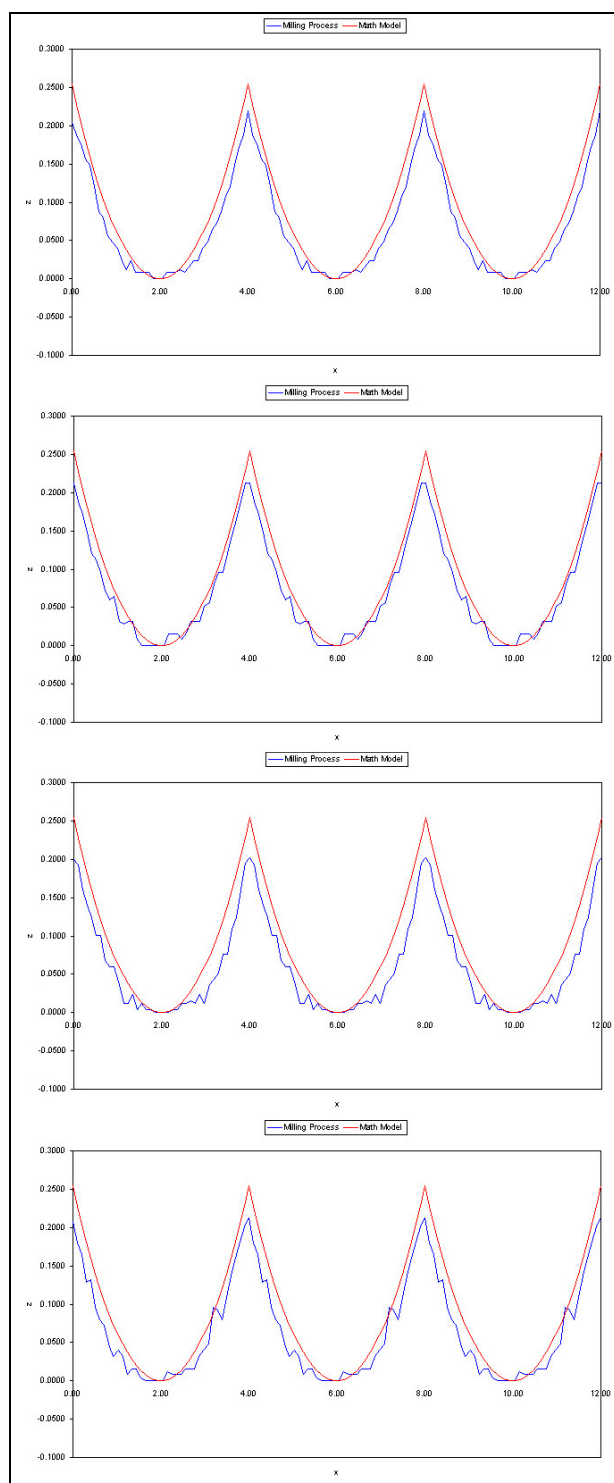
ภาพผนวกที่ ค23 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 1.0$ มิลลิเมตร



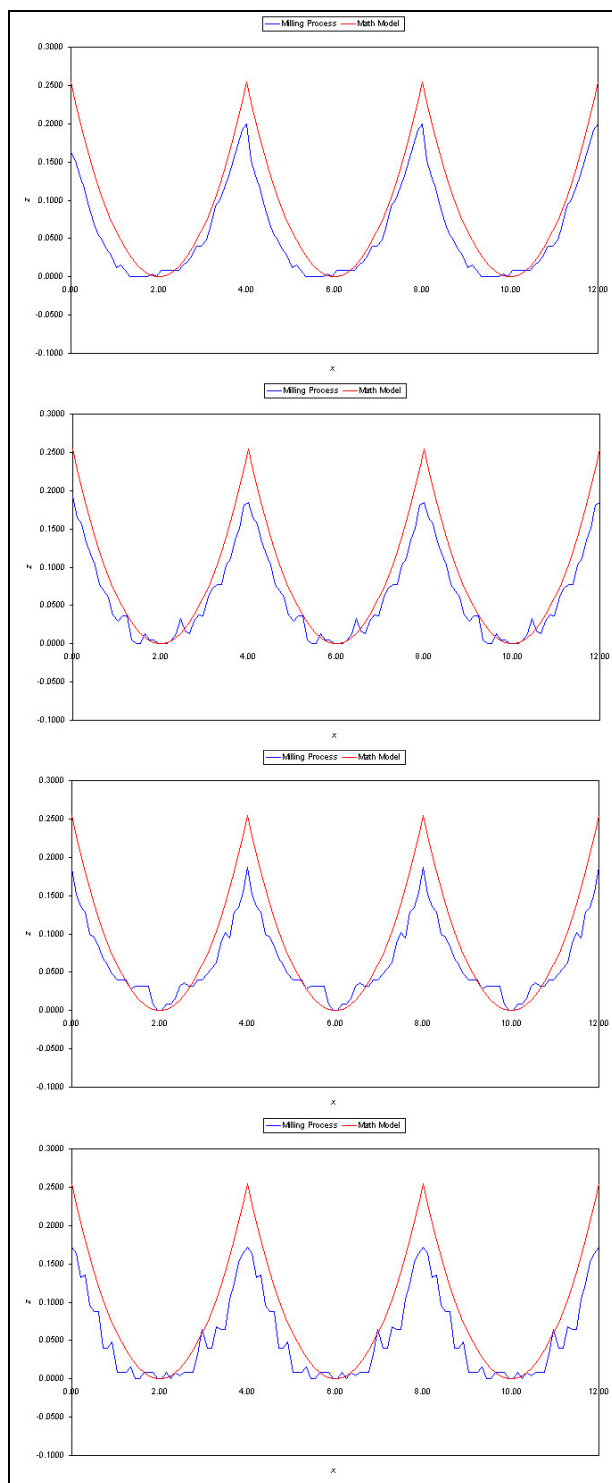
ภาพผนวกที่ ค24 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\Delta R = 1.0$ มิลลิเมตร

ภาคผนวก ง

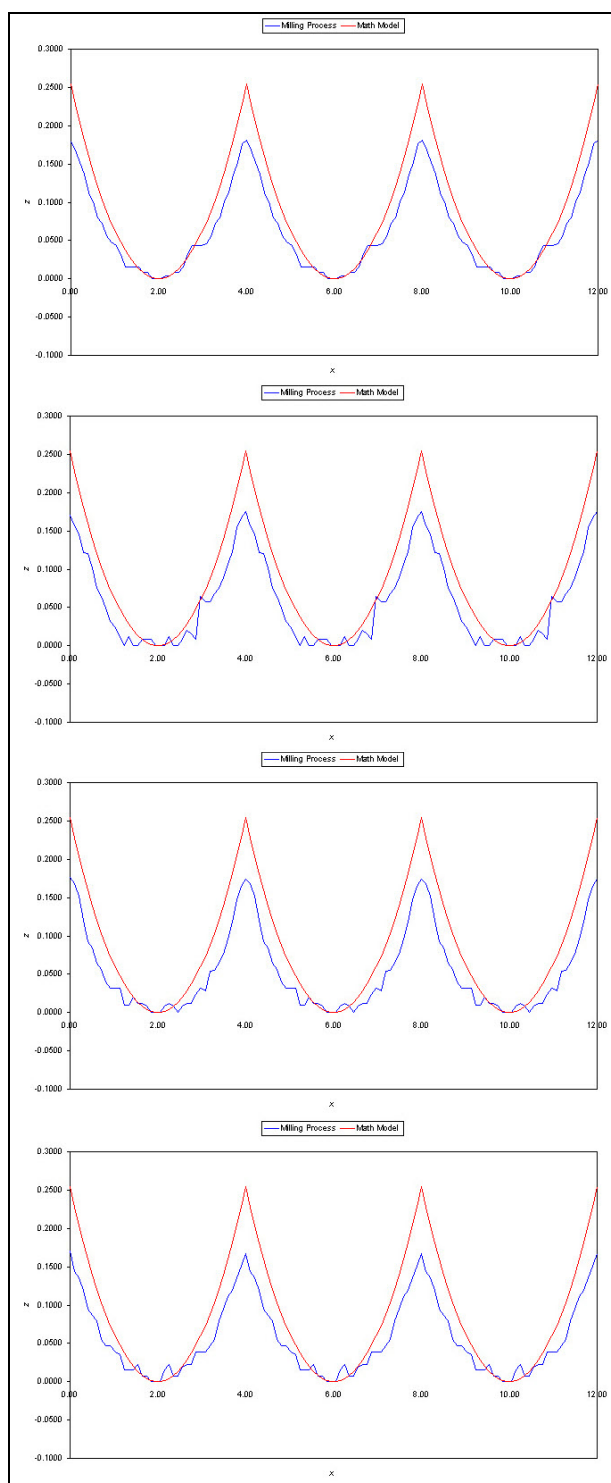
ภาพพิศดพื้นผิวชั้นงานที่เกิดจากการกัดเยื่องศูนย์เชิงมุม



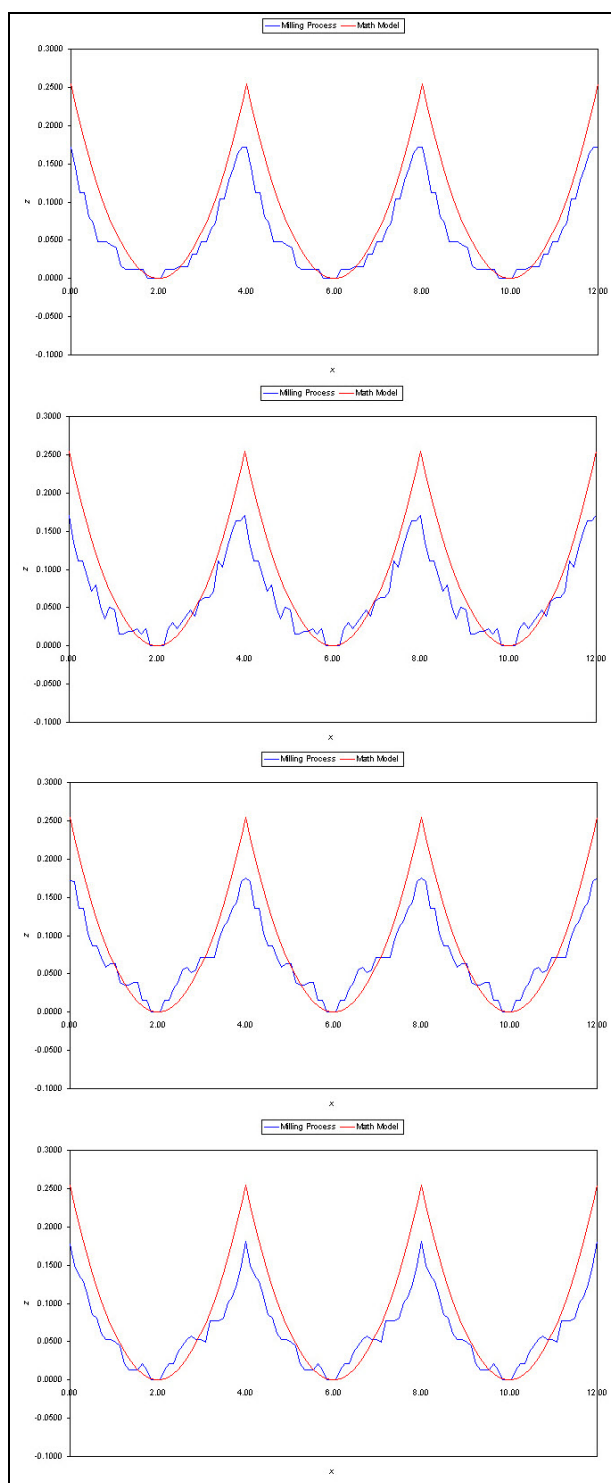
ภาพผนวกที่ ง1 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 0.0$ องศา



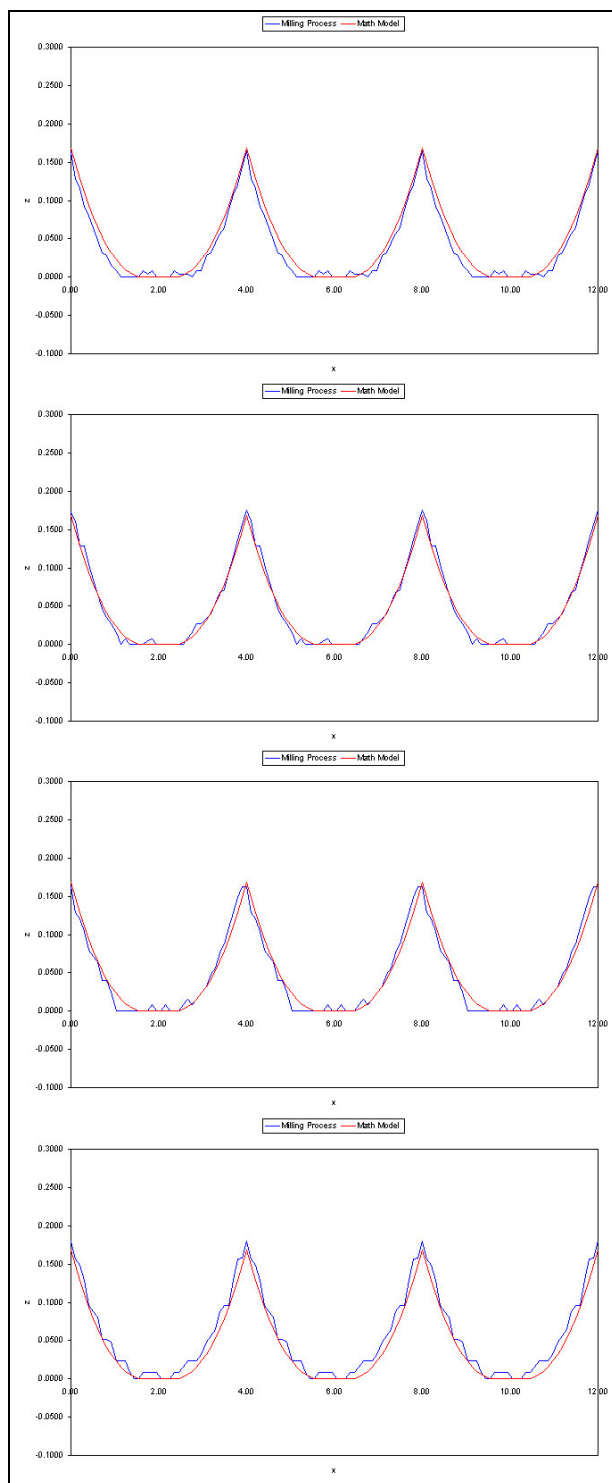
ภาพผนวกที่ ง2 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 0.0$ องศา



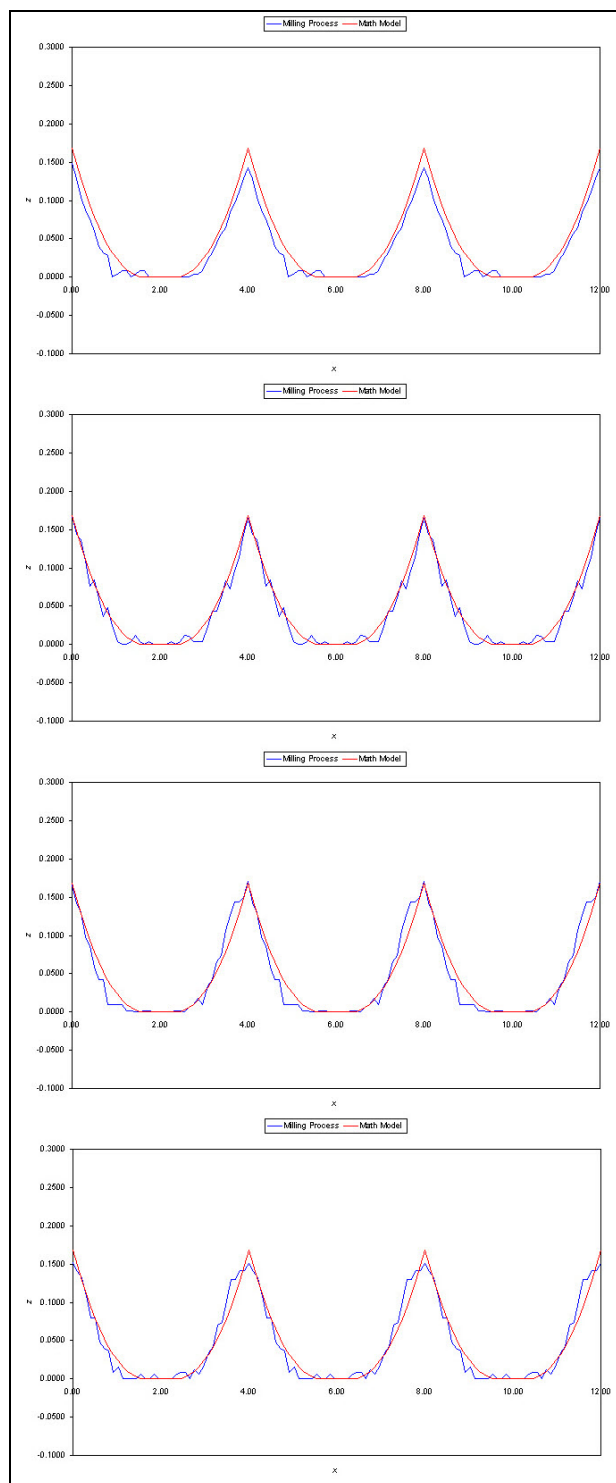
ภาพผนวกที่ ง3 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 0.0$ องศา



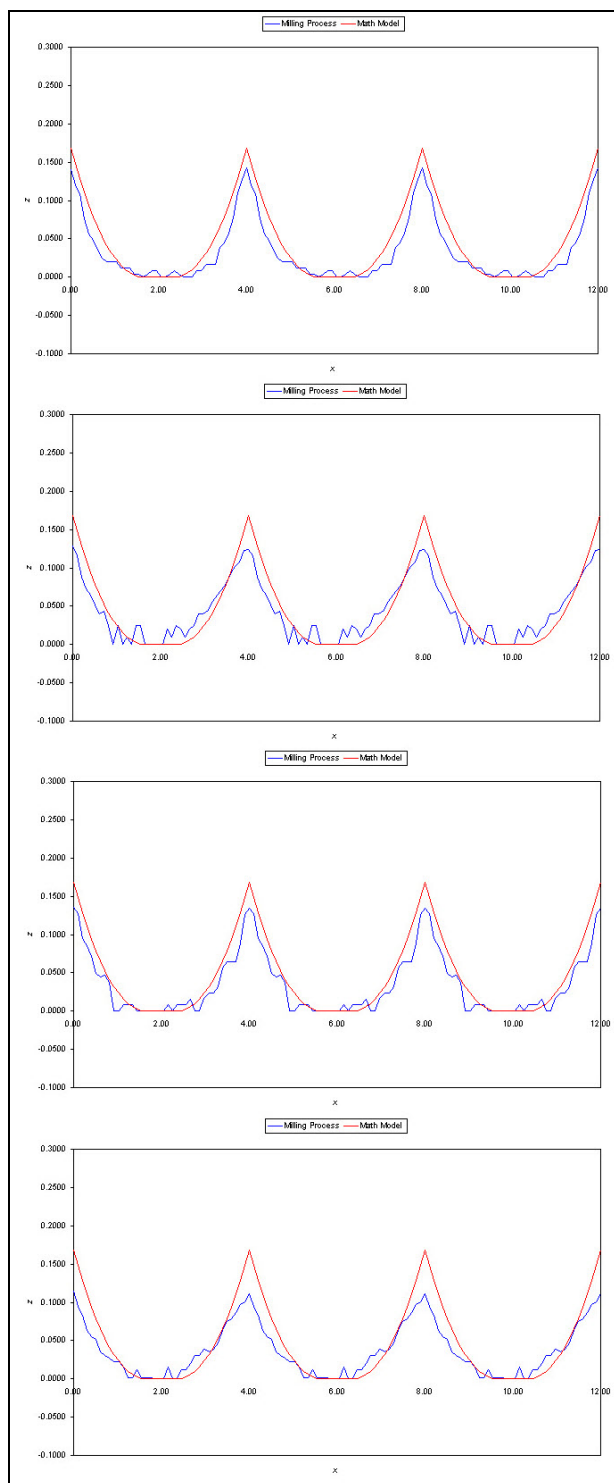
ภาพผนวกที่ ง4 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 0.0$ องศา



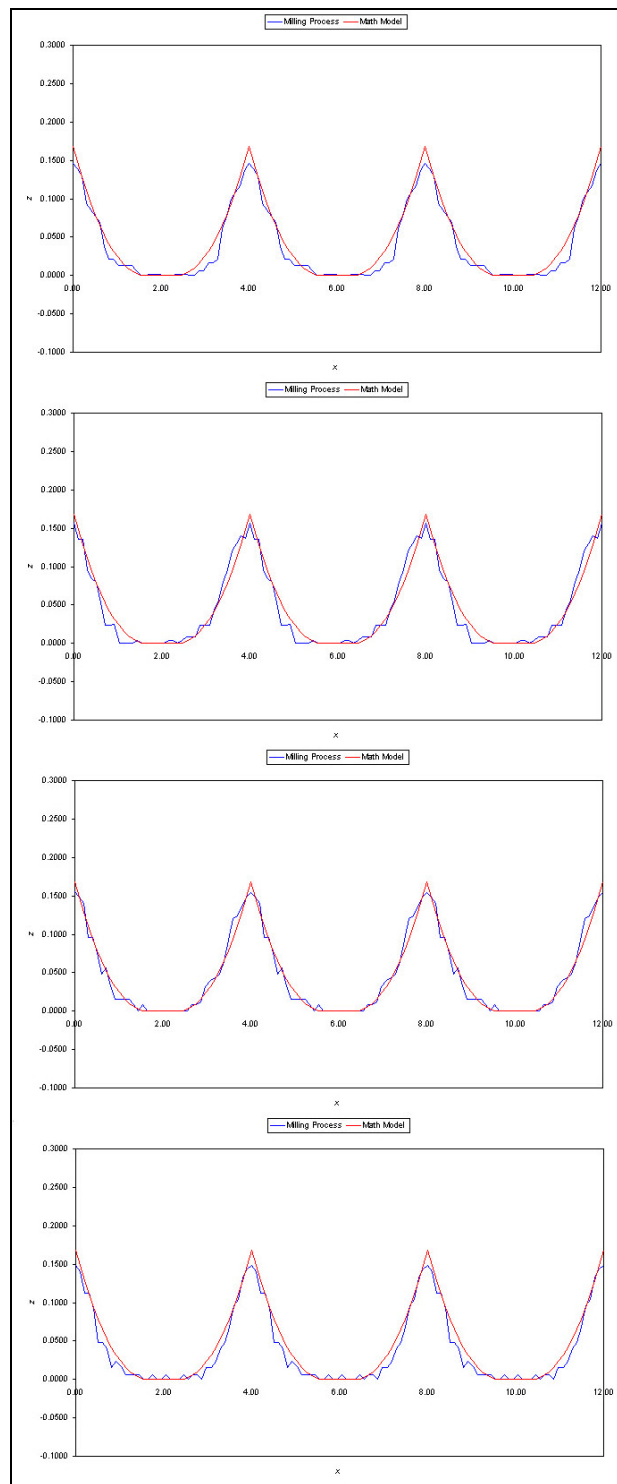
ภาพผนวกที่ ๖5 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 0.5$ องศา



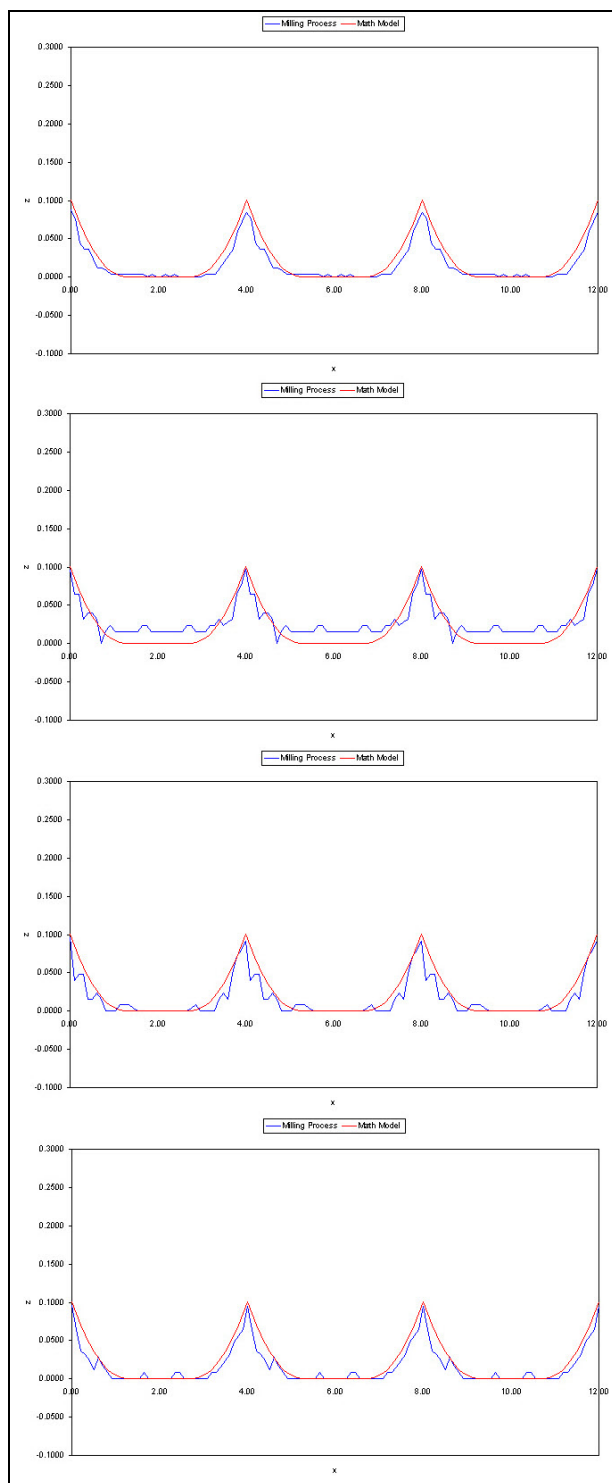
ภาพผนวกที่ ๖6 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 0.5$ องศา



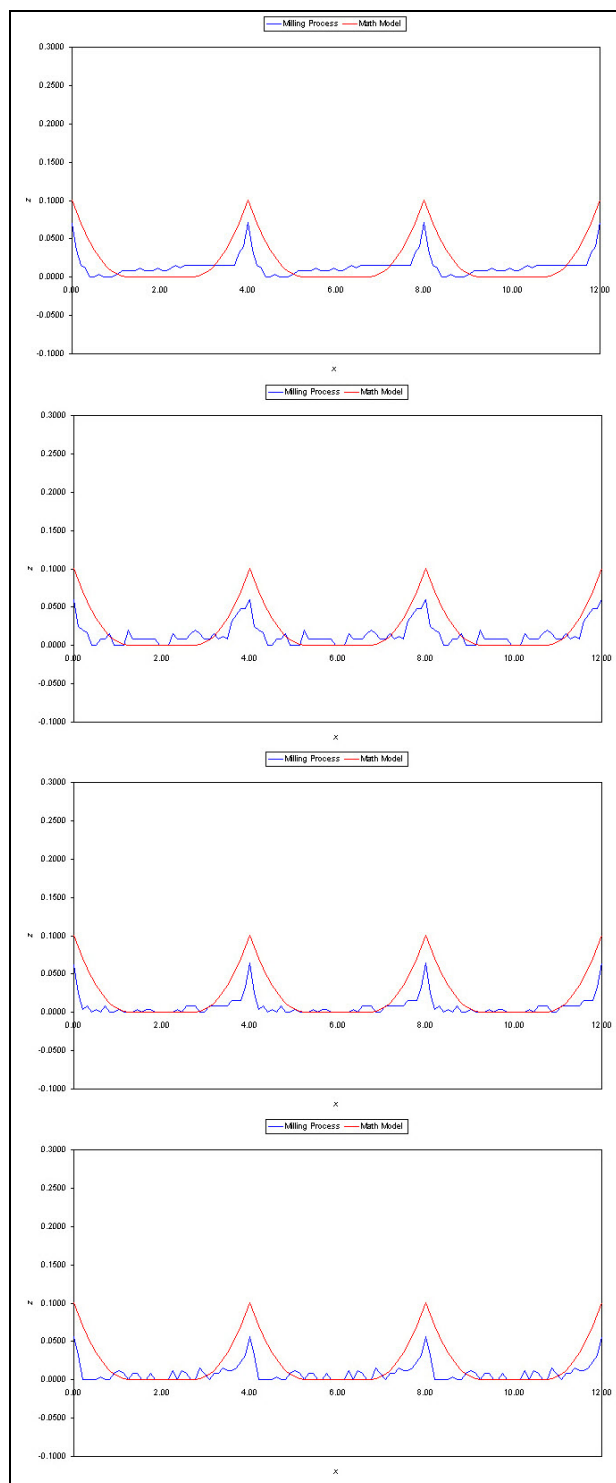
ภาพผนวกที่ ๗7 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 0.5$ องศา



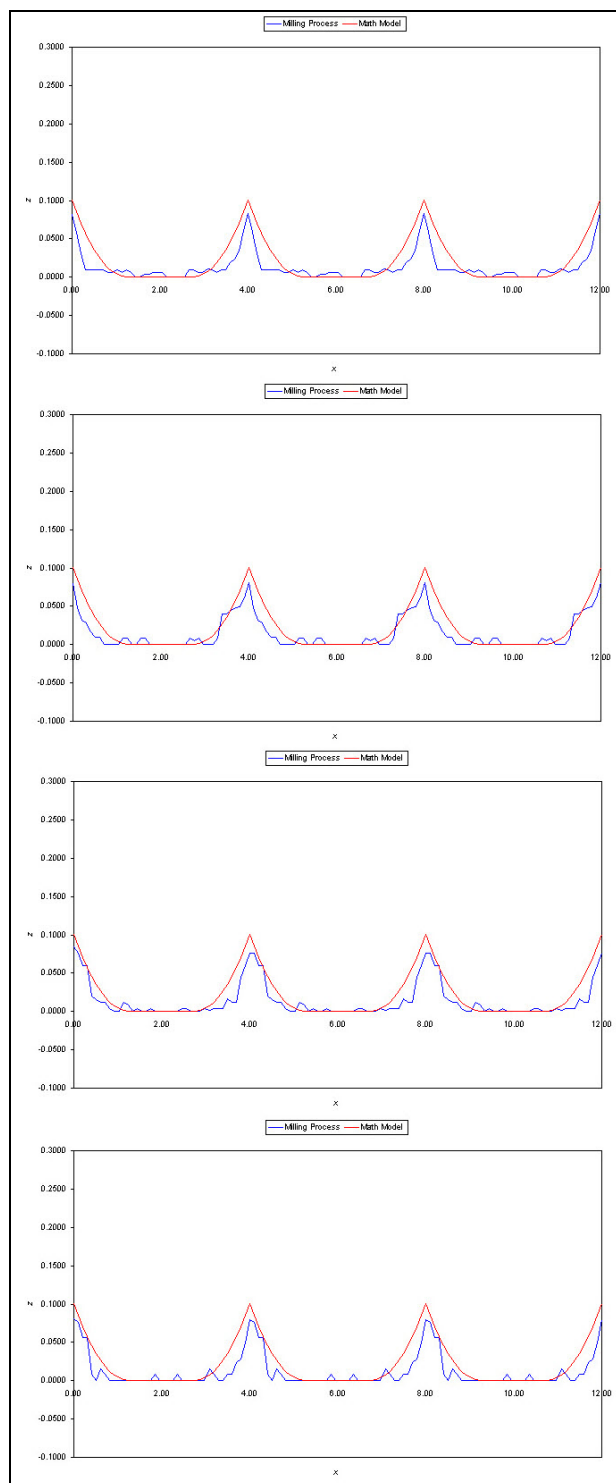
ภาพผนวกที่ ๖8 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 0.5$ องศา



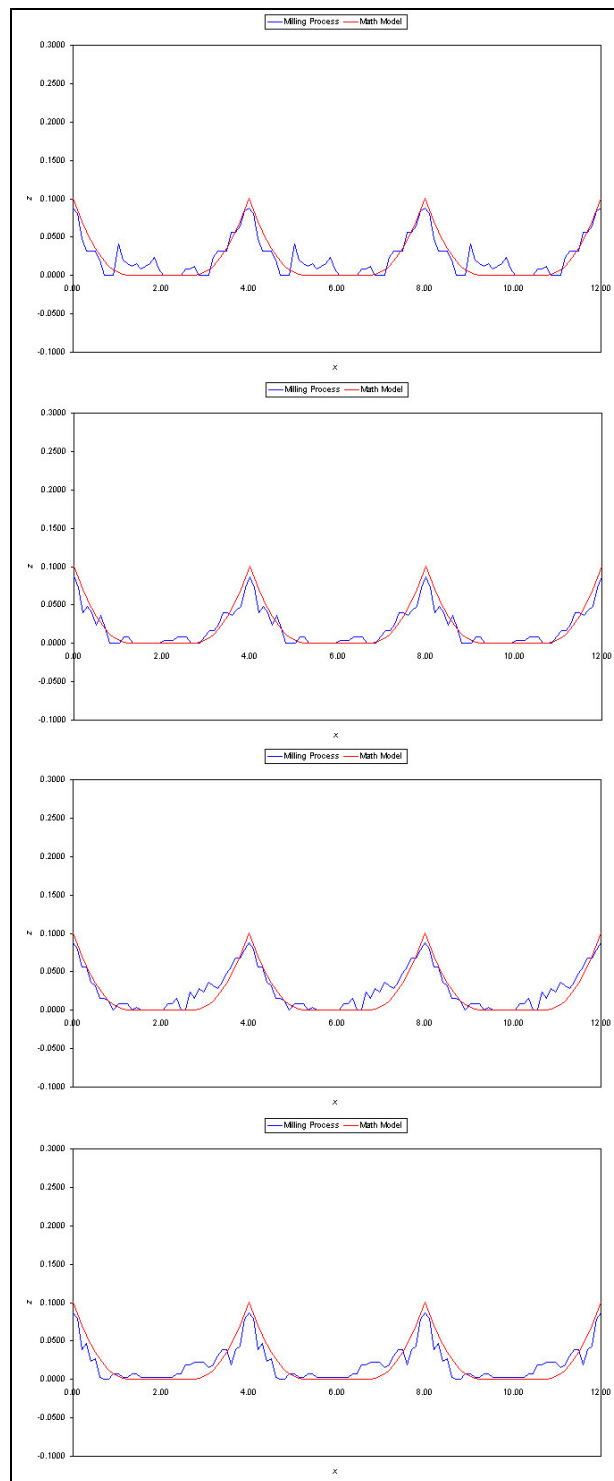
ภาพผนวกที่ ง9 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 1.0$ องศา



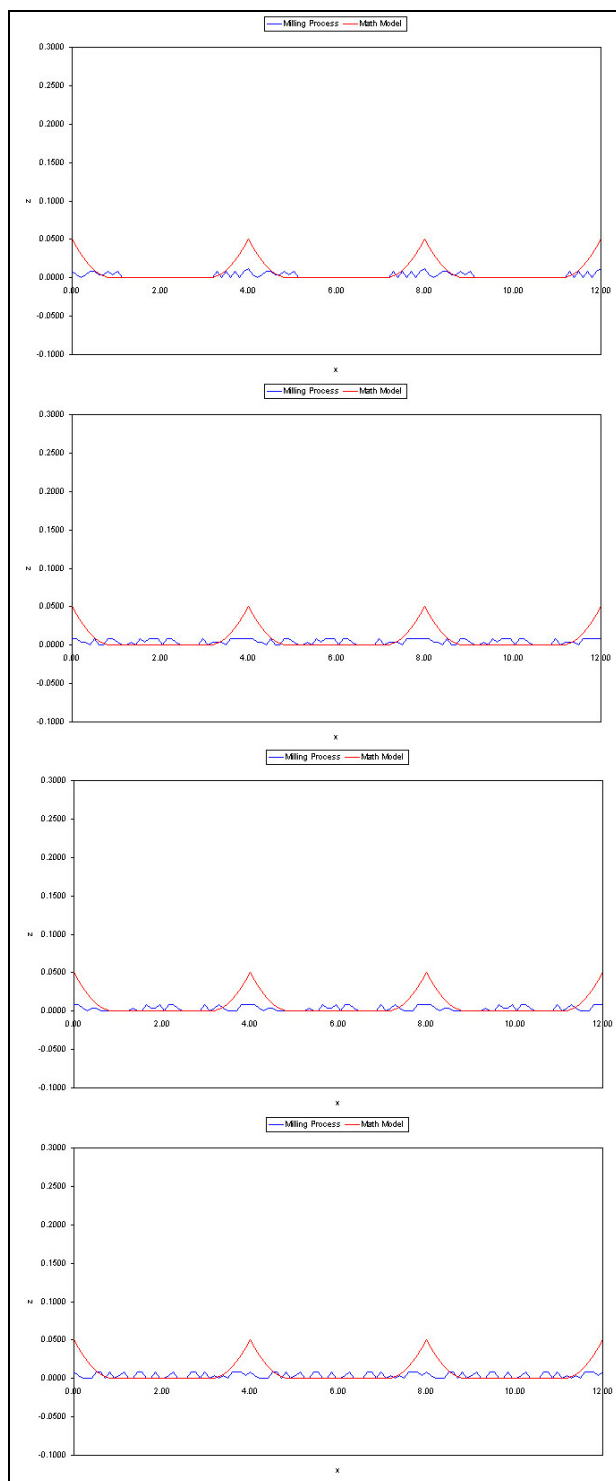
ภาพผนวกที่ ง10 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 1.0$ องศา



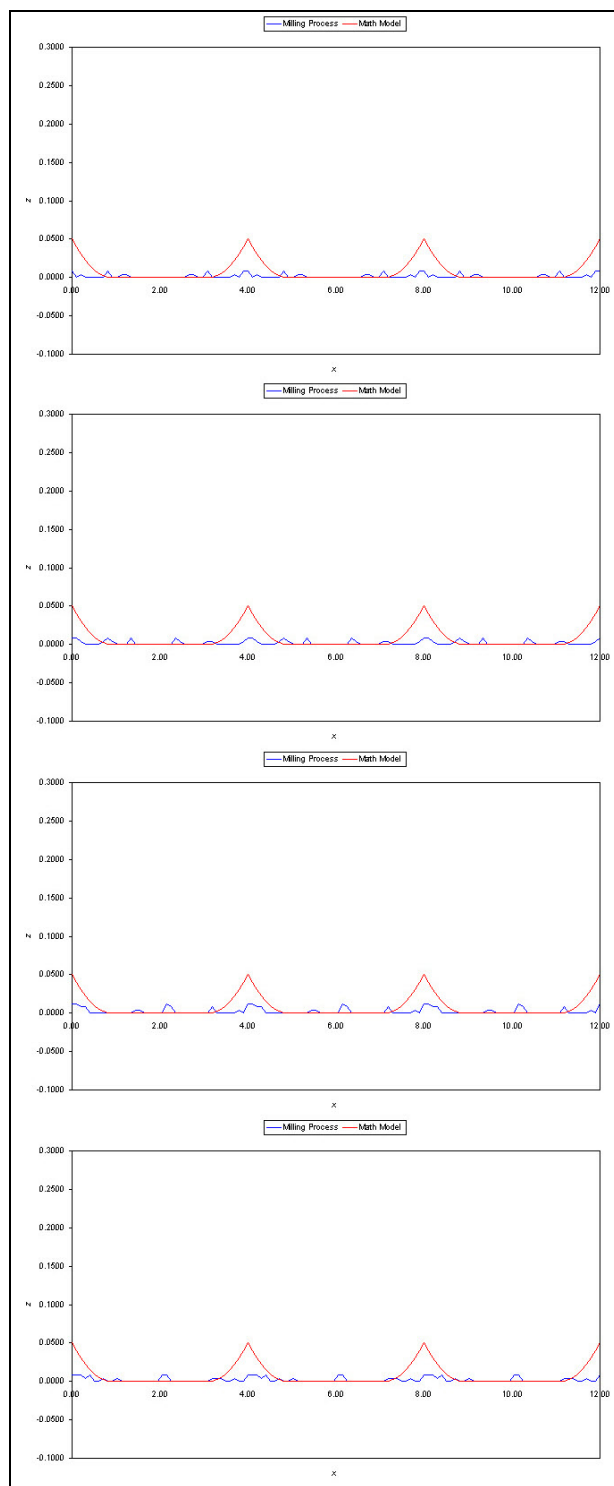
ภาพผนวกที่ ง11 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 1.0$ องศา



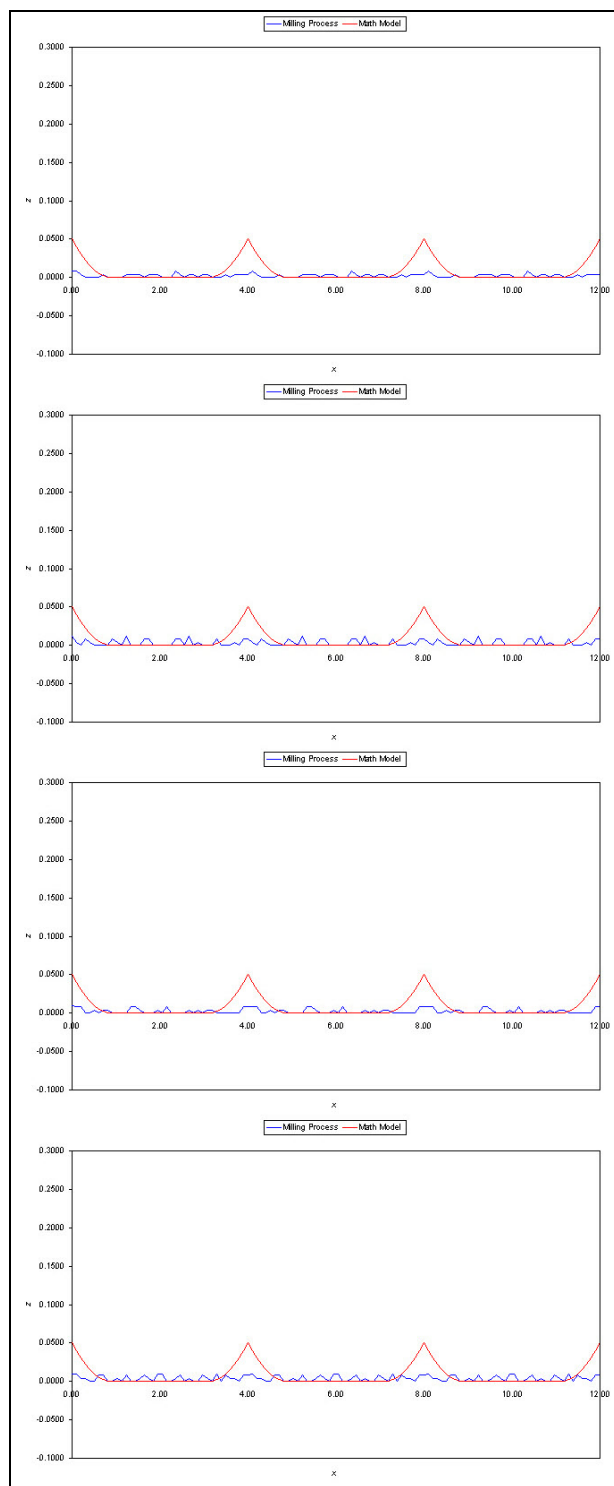
ภาพผนวกที่ 12 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 1.0$ องศา



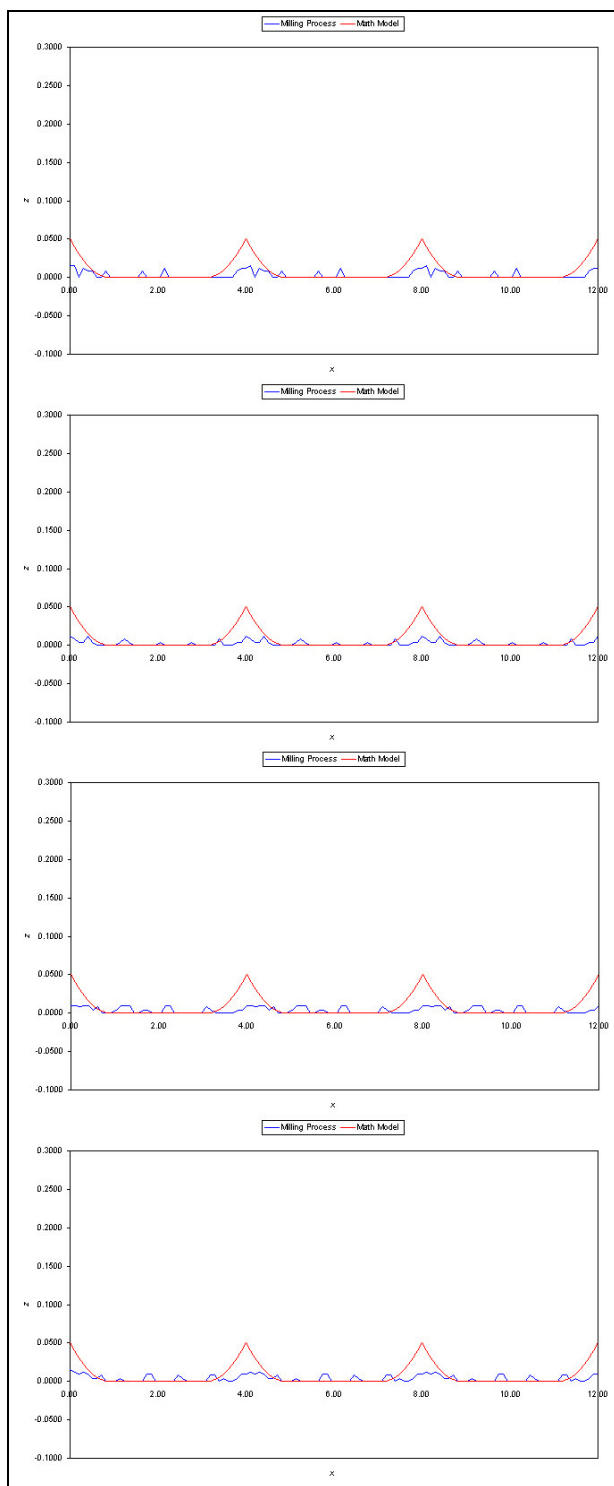
ภาพผนวกที่ 13 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 1.5$ องศา



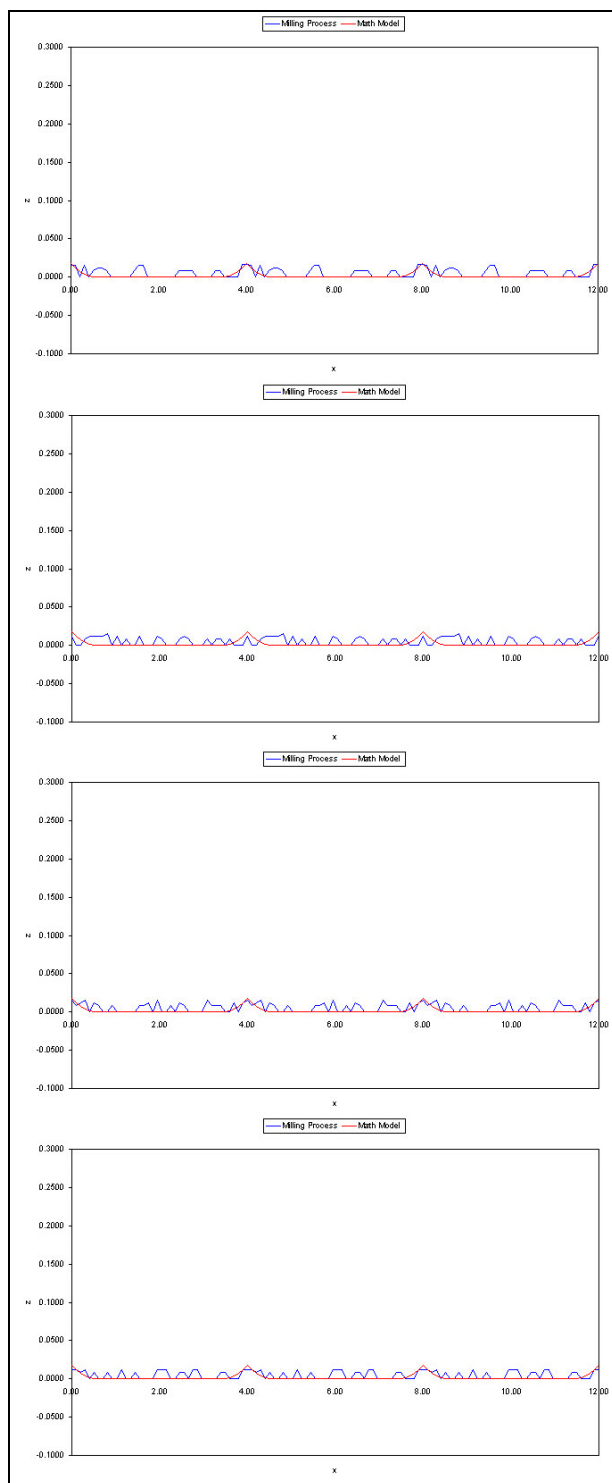
ภาพผนวกที่ ง14 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 1.5$ องศา



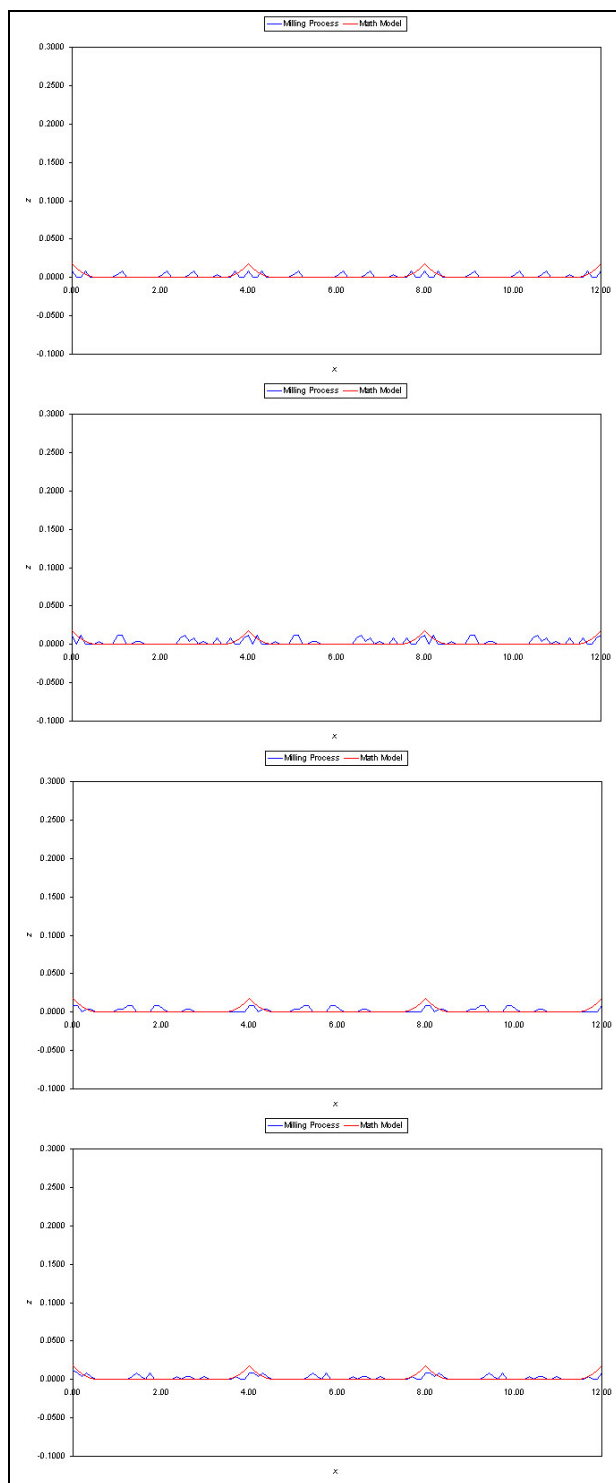
ภาพผนวกที่ 15 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 1.5$ องศา



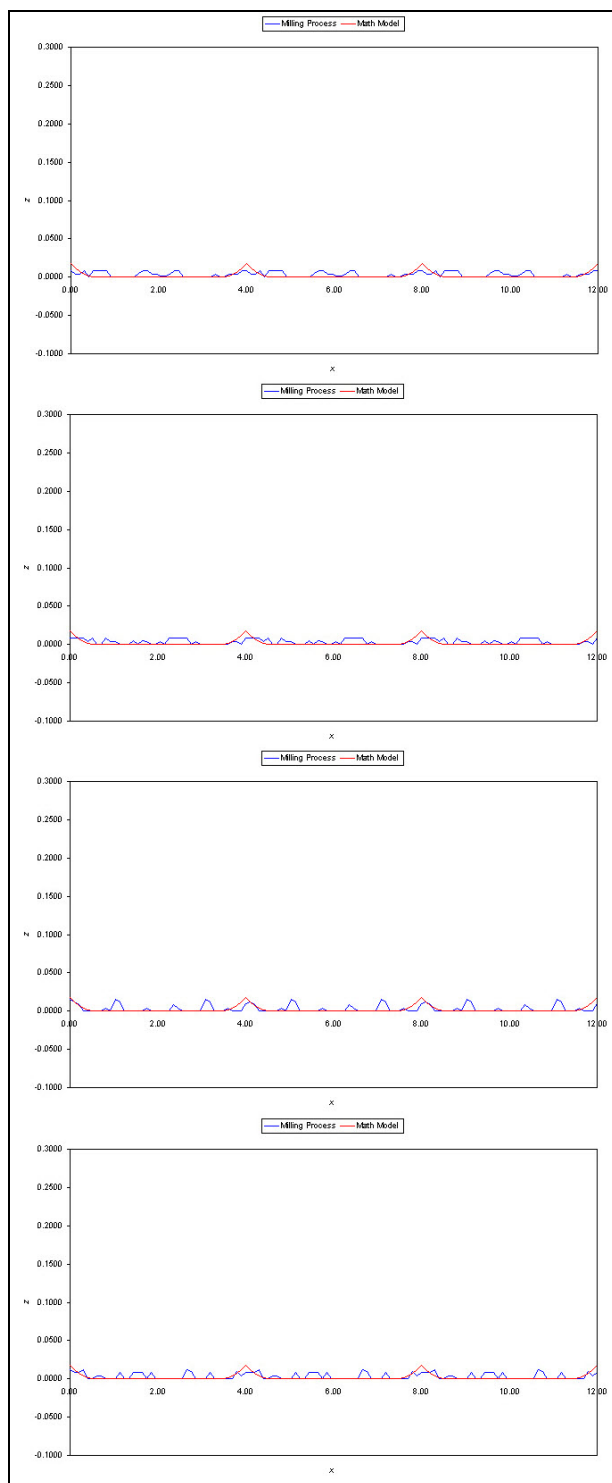
ภาพผนวกที่ ง16 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 1.5$ องศา



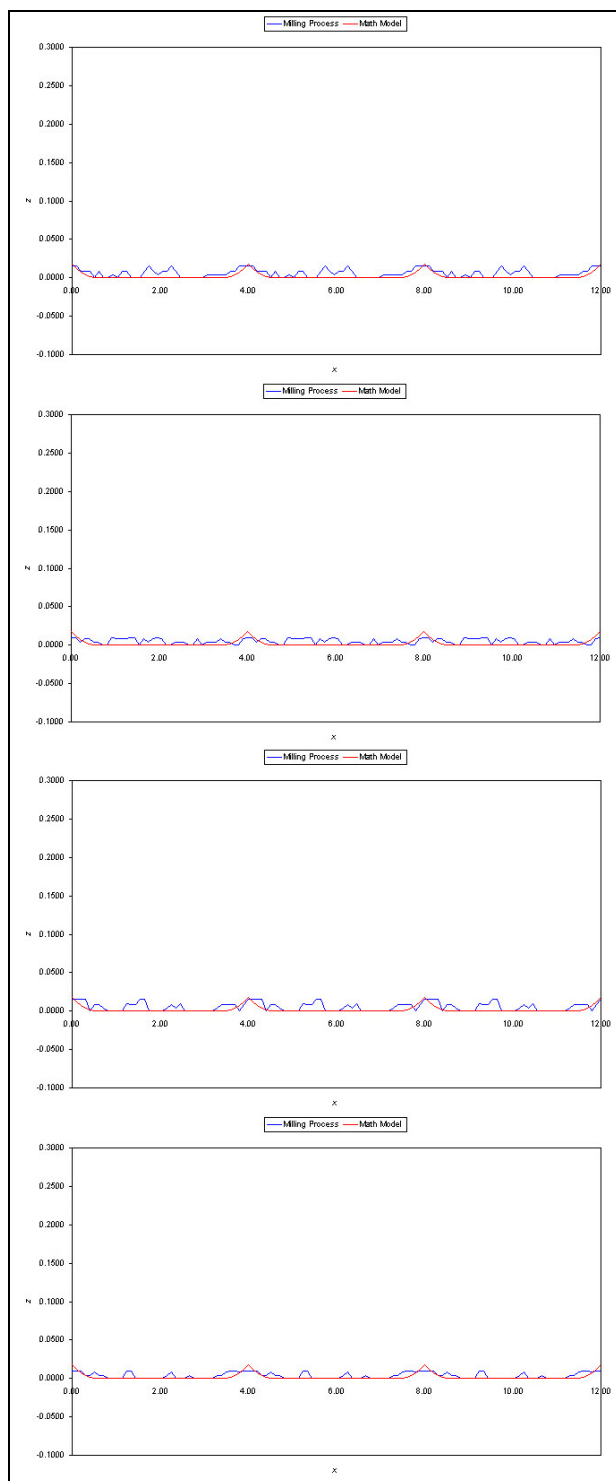
ภาพผนวกที่ ง17 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.0$ องศา



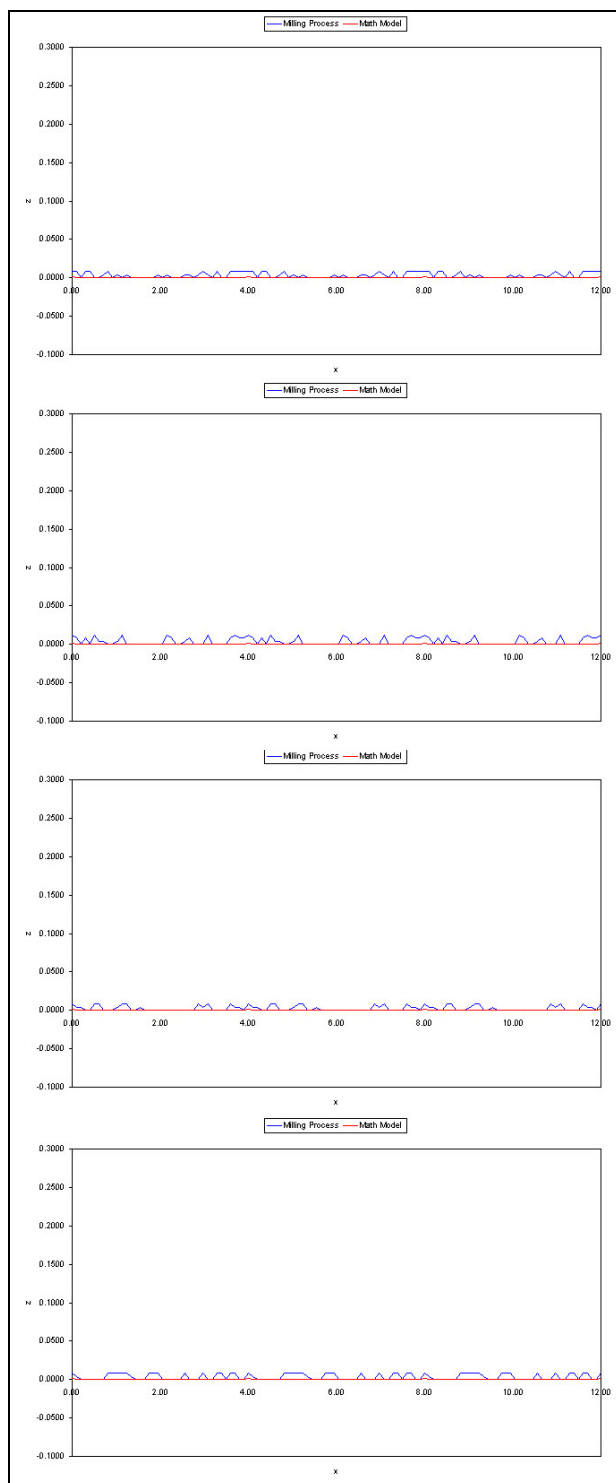
ภาพผนวกที่ 18 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.0$ องศา



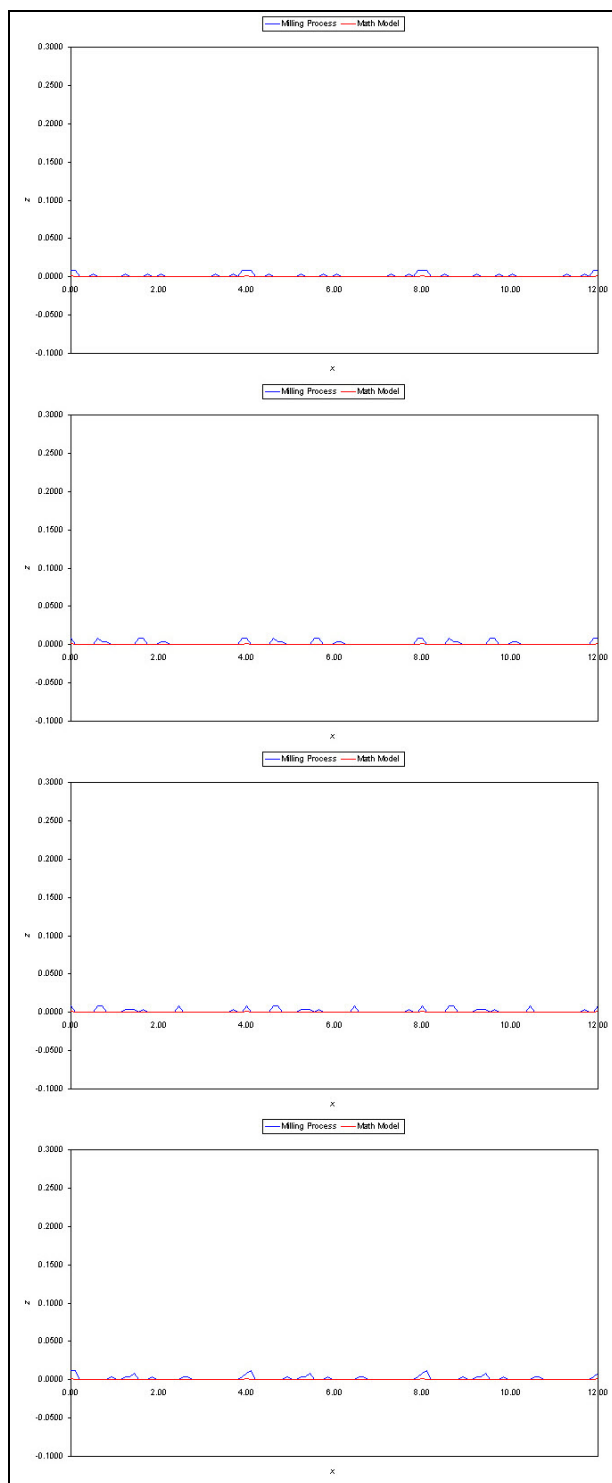
ภาพผนวกที่ 19 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.0$ องศา



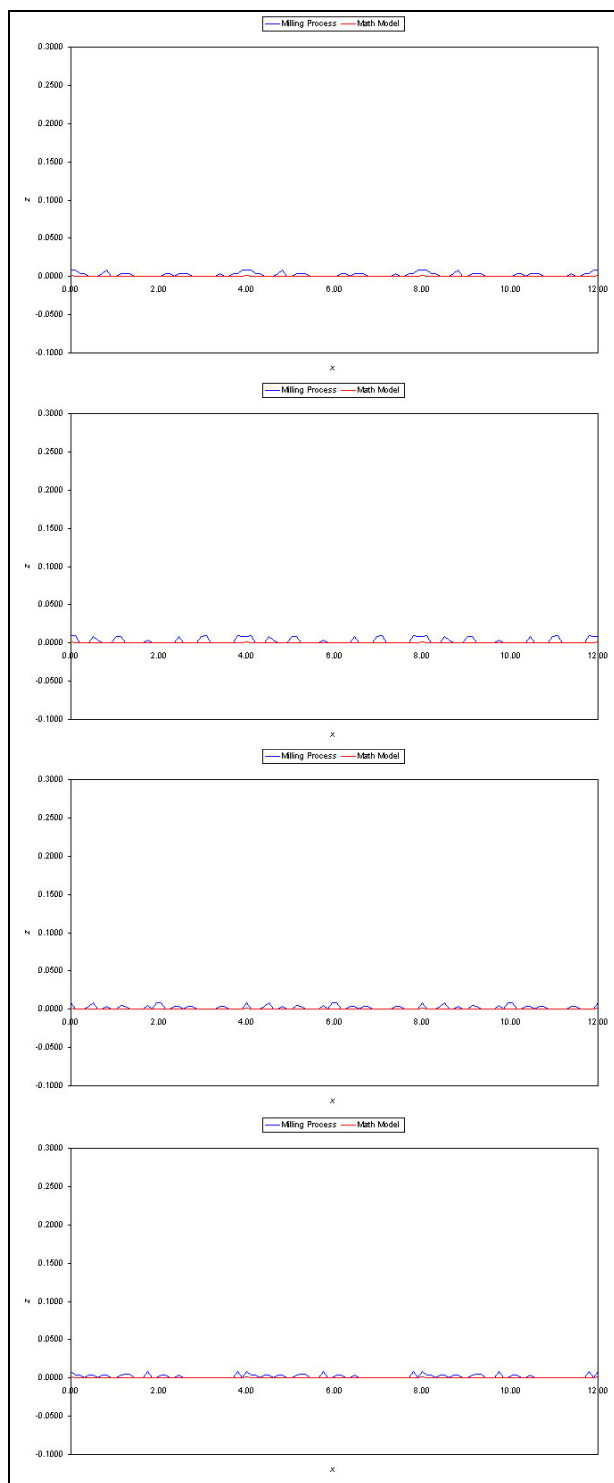
ภาพผนวกที่ 20 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.0$ องศา



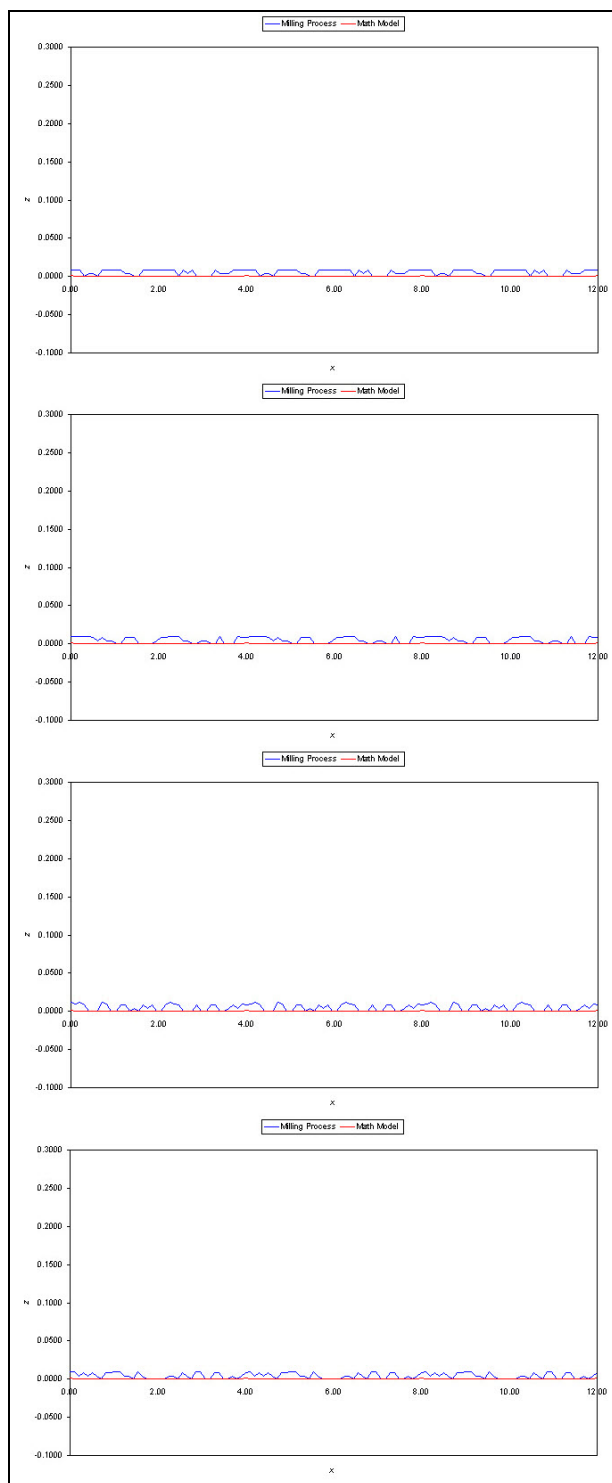
ภาพผนวกที่ ง21 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.5$ องศา



ภาพผนวกที่ ง22 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.5$ องศา



ภาพผนวกที่ ง23 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 3 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.5$ องศา



ภาพผนวกที่ ง24 พิกัดสูงต่ำของชิ้นงานที่ 4 ที่ผ่านกระบวนการกัด ด้วยค่า $\theta = 2.5$ องศา

ภาคผนวก จ

ค่าความสูงสเกลลอของชิ้นงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์ในแนวนาน

ตารางผนวกที่ จ1 ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกัศพิวชั้นงานที่มีค่าเอียงศูนย์ในแนวนอน
เป็น 0.0 มิลลิเมตร

(หน่วย:มิลลิเมตร)

ชั้นงานที่	วัดชั้นงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	0.0556	0.0640	0.0615	0.0640	0.0613	0.0040
2	0.0641	0.0640	0.0680	0.0721	0.0671	0.0038
3	0.0600	0.0660	0.0610	0.0650	0.0630	0.0029
4	0.0642	0.0604	0.0668	0.0698	0.0653	0.0040
เฉลี่ยรวม					0.0642	0.0040

ตารางผนวกที่ จ2 ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกัศพิวชั้นงานที่มีค่าเอียงศูนย์ในแนวนอน
เป็น 0.2 มิลลิเมตร

(หน่วย:มิลลิเมตร)

ชั้นงานที่	วัดชั้นงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	0.0411	0.0561	0.0563	0.0515	0.0513	0.0071
2	0.0521	0.0480	0.0441	0.0441	0.0471	0.0038
3	0.0420	0.0400	0.0441	0.0442	0.0426	0.0020
4	0.0440	0.0485	0.0447	0.0465	0.0459	0.0020
เฉลี่ยรวม					0.0467	0.0050

ตารางผนวกที่ จ3 ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกักผิวชั้นงานที่มีค่าเยื้องศูนย์ในแนวนอน
เป็น 0.4 มิลลิเมตร

(หน่วย:มิลลิเมตร)

ชั้นงานที่	วัดชั้นงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	0.0239	0.0280	0.0285	0.0280	0.0271	0.0021
2	0.0280	0.0240	0.0240	0.0280	0.0260	0.0023
3	0.0240	0.0241	0.0265	0.0254	0.0250	0.0012
4	0.0280	0.0289	0.0265	0.0279	0.0278	0.0010
เฉลี่ยรวม					0.0265	0.0019

ตารางผนวกที่ จ4 ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกักผิวชั้นงานที่มีค่าเยื้องศูนย์ในแนวนอน
เป็น 0.6 มิลลิเมตร

(หน่วย:มิลลิเมตร)

ชั้นงานที่	วัดชั้นงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	0.0160	0.0151	0.0160	0.0168	0.0160	0.0007
2	0.0200	0.0150	0.0180	0.0200	0.0183	0.0024
3	0.0190	0.0200	0.0160	0.0221	0.0193	0.0025
4	0.0200	0.0188	0.0191	0.0176	0.0189	0.0010
เฉลี่ยรวม					0.0181	0.0021

ตารางผนวกที่ จ5 ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกัดผิวชิ้นงานที่มีค่าเยื้องศูนย์ในแนวนอน
เป็น 0.8 มิลลิเมตร

(หน่วย:มิลลิเมตร)

ชิ้นงานที่	วัดชิ้นงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	0.0170	0.0180	0.0183	0.0155	0.0172	0.0013
2	0.0260	0.0160	0.0180	0.0215	0.0204	0.0044
3	0.0210	0.0235	0.0195	0.0180	0.0205	0.0023
4	0.0185	0.0201	0.0176	0.0180	0.0186	0.0011
เฉลี่ยรวม					0.0192	0.0027

ตารางผนวกที่ จ6 ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกัดผิวชิ้นงานที่มีค่าเยื้องศูนย์ในแนวนอน
เป็น 1.0 มิลลิเมตร

(หน่วย:มิลลิเมตร)

ชิ้นงานที่	วัดชิ้นงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	0.0080	0.0160	0.0080	0.0115	0.0109	0.0038
2	0.0120	0.0120	0.0100	0.0144	0.0121	0.0018
3	0.0120	0.0120	0.0115	0.0105	0.0115	0.0007
4	0.0080	0.0120	0.0100	0.0105	0.0101	0.0017
เฉลี่ยรวม					0.0112	0.0022

ภาคผนวก จ

ค่าความสูงสเกลลอของชิ้นงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์เชิงมุม

ตารางผนวกที่ จ1 ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกัศพิวชันงานที่มีค่าเชิงศูนย์เชิงมุมเป็น 0.0 องศา

(หน่วย:มิลลิเมตร)

ชันงานที่	วัดชันงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	0.2040	0.2120	0.2001	0.2080	0.2060	0.0051
2	0.1640	0.1930	0.1845	0.1722	0.1784	0.0129
3	0.1785	0.1705	0.1768	0.1710	0.1742	0.0040
4	0.1720	0.1710	0.1712	0.1770	0.1728	0.0028
เฉลี่ยรวม					0.1829	0.0154

ตารางผนวกที่ จ2 ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกัศพิวชันงานที่มีค่าเชิงศูนย์เชิงมุมเป็น 0.5 องศา

(หน่วย:มิลลิเมตร)

ชันงานที่	วัดชันงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	0.1640	0.1725	0.1641	0.1800	0.1702	0.0077
2	0.1481	0.1682	0.1661	0.1519	0.1586	0.0101
3	0.1405	0.1280	0.1354	0.1150	0.1297	0.0111
4	0.1465	0.1567	0.1550	0.1481	0.1516	0.0050
เฉลี่ยรวม					0.1525	0.0171

ตารางผนวกที่ ๓ ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกัศพัวชันงานที่มีค่าเชิงศูนย์เชิงมุมเป็น 1.0 องศา

(หน่วย:มิลลิเมตร)

ชันงานที่	วัดชันงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	0.0880	0.0960	0.0960	0.0960	0.0940	0.0040
2	0.0705	0.0600	0.0620	0.0559	0.0621	0.0061
3	0.0820	0.0801	0.0840	0.0802	0.0816	0.0018
4	0.0880	0.0880	0.0880	0.0870	0.0878	0.0005
เฉลี่ยรวม					0.0814	0.0128

ตารางผนวกที่ ๔ ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกัศพัวชันงานที่มีค่าเชิงศูนย์เชิงมุมเป็น 1.5 องศา

(หน่วย:มิลลิเมตร)

ชันงานที่	วัดชันงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	0.0080	0.0080	0.0080	0.0080	0.0080	0.0000
2	0.0080	0.0080	0.0120	0.0080	0.0090	0.0020
3	0.0080	0.0120	0.0100	0.0100	0.0100	0.0016
4	0.0160	0.0120	0.0100	0.0160	0.0135	0.0030
เฉลี่ยรวม					0.0101	0.0028

ตารางผนวกที่ ๓5 ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกัศผิวชิ้นงานที่มีค่าเชิงศูนย์เชิงมุมเป็น 2.0 องศา

(หน่วย:มิลลิเมตร)

ชิ้นงานที่	วัดชิ้นงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	0.0160	0.0120	0.0160	0.0120	0.0140	0.0023
2	0.0080	0.0120	0.0080	0.0120	0.0100	0.0023
3	0.0080	0.0080	0.0160	0.0120	0.0110	0.0038
4	0.0160	0.0100	0.0160	0.0100	0.0130	0.0035
เฉลี่ยรวม					0.0120	0.0032

ตารางผนวกที่ ๓6 ค่าความสูงสเกลลอปที่ได้จากการกัศผิวชิ้นงานที่มีค่าเชิงศูนย์เชิงมุมเป็น 2.5 องศา

(หน่วย:มิลลิเมตร)

ชิ้นงานที่	วัดชิ้นงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	0.0080	0.0120	0.0080	0.0080	0.0090	0.0020
2	0.0080	0.0080	0.0080	0.0120	0.0090	0.0020
3	0.0080	0.0100	0.0080	0.0080	0.0085	0.0010
4	0.0080	0.0100	0.0120	0.0100	0.0100	0.0016
เฉลี่ยรวม					0.0091	0.0016

ภาคผนวก ข

ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชั้นงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์ในแนวนาน

ตารางผนวกที่ ข1 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกัดผิวชั้นงานที่มีค่าเฉลี่ยศูนย์ในแนวนอน
เป็น 0.0 มิลลิเมตร

(หน่วย:ไมโครเมตร)

ชั้นงานที่	วัดชั้นงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	21.405	17.195	17.558	18.505	18.666	1.908
2	25.516	23.421	23.195	22.253	23.596	1.376
3	19.168	26.279	18.874	18.084	20.601	3.813
4	27.526	23.426	25.821	22.616	24.847	2.245
เฉลี่ยรวม					21.928	3.368

ตารางผนวกที่ ข2 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกัดผิวชั้นงานที่มีค่าเฉลี่ยศูนย์ในแนวนอน
เป็น 0.2 มิลลิเมตร

(หน่วย:ไมโครเมตร)

ชั้นงานที่	วัดชั้นงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	13.984	9.779	12.784	9.274	11.455	2.290
2	15.932	16.868	10.984	10.500	13.571	3.295
3	13.489	10.195	12.684	9.663	11.508	1.865
4	11.653	10.205	10.400	11.437	10.924	0.727
เฉลี่ยรวม					11.864	2.261

ตารางผนวกที่ ข3 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกัดผิวชั้นงานที่มีค่าเชิงศูนย์กลางในแนวนอน
เป็น 0.4 มิลลิเมตร

(หน่วย:ไมโครเมตร)

ชั้นงานที่	วัดชั้นงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	6.837	6.058	7.242	8.321	7.114	0.943
2	9.721	7.058	7.368	9.484	8.408	1.389
3	7.368	6.326	7.279	8.600	7.393	0.932
4	4.668	5.521	6.479	7.005	5.918	1.035
เฉลี่ยรวม					7.208	1.338

ตารางผนวกที่ ข4 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกัดผิวชั้นงานที่มีค่าเชิงศูนย์กลางในแนวนอน
เป็น 0.6 มิลลิเมตร

(หน่วย:ไมโครเมตร)

ชั้นงานที่	วัดชั้นงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	3.379	4.005	4.421	4.411	4.054	0.490
2	4.632	3.895	5.132	5.821	4.870	0.813
3	6.789	5.063	5.895	5.800	5.887	0.707
4	4.005	3.463	4.800	4.411	4.170	0.572
เฉลี่ยรวม					4.745	0.955

ตารางผนวกที่ ข5 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกัดผิวชั้นงานที่มีค่าเชิงศูนย์กลางในแนวนอน
เป็น 0.8 มิลลิเมตร

(หน่วย:ไมโครเมตร)

ชั้นงานที่	วัดชั้นงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	2.058	4.689	2.937	3.079	3.191	1.096
2	5.484	6.053	4.842	5.711	5.522	0.510
3	3.226	6.042	6.000	6.211	5.370	1.432
4	4.142	4.216	3.479	3.132	3.742	0.525
เฉลี่ยรวม					4.456	1.359

ตารางผนวกที่ ข6 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกัดผิวชั้นงานที่มีค่าเชิงศูนย์กลางในแนวนอน
เป็น 1.0 มิลลิเมตร

(หน่วย:ไมโครเมตร)

ชั้นงานที่	วัดชั้นงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	3.158	1.700	2.737	2.895	2.622	0.639
2	4.421	2.379	3.684	4.705	3.797	1.039
3	5.474	4.005	3.684	3.895	4.264	0.817
4	3.579	4.211	3.684	3.474	3.737	0.327
เฉลี่ยรวม					3.605	0.917

ภาคผนวก ข

ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชั้นงานที่มีผลจากการเอียงศูนย์เชิงมุม

ตารางผนวกที่ ข1 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกัดผิวชั้นงานที่มีค่าเชิงศูนย์เชิงมุมเป็น 0.0 องศา

(หน่วย: ไมโครเมตร)

ชั้นงานที่	วัดชั้นงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	65.728	70.662	58.503	64.549	64.860	4.998
2	56.279	61.492	62.846	52.0154	58.158	4.979
3	61.403	54.790	52.344	55.433	55.992	3.845
4	56.269	61.228	70.321	62.115	62.483	5.824
เฉลี่ยรวม					60.374	5.716

ตารางผนวกที่ ข2 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกัดผิวชั้นงานที่มีค่าเชิงศูนย์เชิงมุมเป็น 0.5 องศา

(หน่วย: ไมโครเมตร)

ชั้นงานที่	วัดชั้นงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	38.928	47.126	45.451	55.615	46.780	6.870
2	35.936	45.085	44.836	45.485	42.835	4.607
3	32.697	42.679	33.931	36.487	36.449	4.444
4	39.777	44.297	46.290	39.533	42.474	3.357
เฉลี่ยรวม					42.135	5.867

ตารางผนวกที่ ข3 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกัดผิวชั้นงานที่มีค่าเฉลี่ยศูนย์เชิงมุมเป็น 1.0 องศา

(หน่วย: ไมโครเมตร)

ชั้นงานที่	วัดชั้นงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	15.928	27.723	15.372	15.326	18.587	6.097
2	13.890	13.862	7.051	8.364	10.792	3.601
3	12.997	14.551	13.921	11.756	13.306	1.214
4	23.436	19.600	25.538	20.713	22.322	2.682
เฉลี่ยรวม					16.252	5.771

ตารางผนวกที่ ข4 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกัดผิวชั้นงานที่มีค่าเฉลี่ยศูนย์เชิงมุมเป็น 1.5 องศา

(หน่วย: ไมโครเมตร)

ชั้นงานที่	วัดชั้นงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	2.359	4.205	2.974	3.692	3.308	0.809
2	1.436	1.744	2.051	1.949	1.795	0.271
3	2.462	3.077	2.410	3.949	2.974	0.717
4	2.769	2.154	3.641	3.744	3.077	0.755
เฉลี่ยรวม					2.789	0.854

ตารางผนวกที่ ข5 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกัดผิวชั้นงานที่มีค่าเฉลี่ยศูนย์เชิงมุมเป็น 2.0 องศา

(หน่วย: ไมโครเมตร)

ชั้นงานที่	วัดชั้นงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	4.936	5.026	5.538	4.718	5.054	0.348
2	1.641	3.077	1.949	2.051	2.179	0.623
3	3.359	3.333	2.974	3.385	3.263	0.193
4	5.846	5.026	5.436	3.692	5.000	0.934
เฉลี่ยรวม					3.874	1.363

ตารางผนวกที่ ข6 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้จากการกัดผิวชั้นงานที่มีค่าเฉลี่ยศูนย์เชิงมุมเป็น 2.5 องศา

(หน่วย: ไมโครเมตร)

ชั้นงานที่	วัดชั้นงานตำแหน่งที่				เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2	3	4		
1	3.179	3.692	2.359	3.282	3.128	0.559
2	1.231	1.436	1.333	1.538	1.385	0.132
3	2.256	2.462	2.000	1.897	2.154	0.255
4	5.333	5.026	4.923	4.359	4.910	0.407
เฉลี่ยรวม					2.894	1.402

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นายภัทรพงษ์ นิภากุล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	14 มกราคม 2525
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นิสิตปริญญาโท
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ภาควิชากรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์