

การปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดบนพื้นฐานการตัดเฉือนเสมือนจริงและระบบควบคุมพีไอดี
บนเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก

กานต์ วัฒนวิจิตร

TNI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ปีการศึกษา 2562

IMPROVEMENT OF NC PROGRAM QUALITY BASED ON VIRTUAL MACHINING AND PID
CONTROL OF MINI 5-AXIS CNC MACHINE TOOLS

Karn Wattanawichit

TNI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
For The Degree of Master Engineering Program in Engineering Technology

Graduate School
Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2019

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดบนพื้นฐานการตัดเฉือน
เสมือนจริงและระบบควบคุมพีไอไดบนเครื่องกัดซีเอ็นซี 5
แกนขนาดเล็ก

โดย

กานต์ วัฒนวิจิตร

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิโรช ทศนะ

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชิต สุขเจริญพงษ์)

วันที่ เดือน พ.ศ.

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. วรากร ศรีเชวงทรัพย์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรชัย นิเวศน์รังสรรค์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิโรช ทศนะ)

กานต์ วัฒนวิจิตร : การปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดบนพื้นฐานการตัดเฉือนเสมือนจริงและระบบควบคุมพีไอตึบนเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก, อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิโรช ทศนะ, 69 หน้า.

การตัดเฉือนชิ้นส่วนที่ซับซ้อนนั้นใช้เครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนที่ใช้โปรแกรม CAM ในระบบเสมือนจริงก่อนการตัดเฉือนจริงเพื่อลดจำนวนการทดลองและข้อผิดพลาด เครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็กทำงานโดยใช้เอ็นซีโค้ด อย่างไรก็ตามเอ็นซีโค้ดยังไม่มีความถูกต้องแม่นยำและเที่ยงตรงเพียงพอเนื่องจากยังมีคุณภาพต่ำ การวิจัยครั้งนี้วัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของเอ็นซีโค้ดสำหรับการกัดเอส-เซฟด้วยวิธีการหาค่าความเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่แบบคิเนเมติกส์และรูปร่างเรขาคณิตของเอ็นมิลรวมถึงตัวแปรการตัดเฉือนตามการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก การปรับปรุงเอ็นซีโค้ดดำเนินการรับไฟล์เอ็นซีโค้ดเก่าจาก CAM จากนั้นสร้างเอ็นซีโค้ดใหม่ เอ็นซีโค้ดใหม่จะได้รับการตรวจสอบความถูกต้องเที่ยงตรงและแม่นยำโดยการตัดเฉือนเอส-เซฟจริงบนเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็กและวัดขนาดข้อผิดพลาดด้วยเครื่อง CMM และจำลองการปรับปรุงเอ็นซีโค้ดด้วยระบบพีไอตึแบบปิดบนโปรแกรมซิมูลิงค์ ผลการทดลองพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยหลังการปรับปรุงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของแกนเคลื่อนที่เชิงเส้นแกน X ลดลง 79.153% แกน Y ลดลง 94.827% แกนเคลื่อนที่เชิงมุมแกน A ลดลง 82.351% และแกน B ลดลง 68.618%

บัณฑิตวิทยาลัย

สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

KARN WATTANAWICHIT: IMPROVEMENT OF NC PROGRAM QUALITY BASED ON VIRTUAL MACHINING AND PID CONTROL OF MINI 5-AXIS CNC MACHINE TOOLS, ADVISOR: WIROJ THASANA, 69 PP.

The machining of complicated parts using 5-axis CNC machine tools has been applied by CAM in virtual machining systems before real machining to reduce the number of trials and errors. The machine tools still operated by NC-code. However, these NC-codes are not yet sufficiently accurate nor precise due to low quality of Nc-codes that communicated to the machine. The objective of this research is to improve the quality of NC-codes for machining the S-shape with the method of determining kinematic motion deviations and the end mill geometric including machining parameters based on shape generation motion of mini 5-axis machine tools. The NC-code improvement is performed by receiving old NC-codes file from CAM and then creating new NC-codes. New NC-codes will be verified for accuracy and precision by machining of S-shape on a mini 5-axis CNC machine tools and measuring the before and after error dimension with the CMM and simulated the improvement of NC-codes with closed PID system on Simulink program. The results showed that the average standard deviation of the X-axis linear motion decreased 79.153%, the Y-axis decreased 94.827%, the A-axis angular motion decreased 82.351% and B-axis decreased 68.618%

TNI

Graduate School

Field of Engineering of Technology

Academic Year 2019

Student's Signature.....

Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับคำปรึกษาและคำแนะนำจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิโรช ทัศนะ อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ ประธานกรรมการสอบจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รองศาสตราจารย์ ดร. วรากร ศรีเชวงทรัพย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรชัย นิเวศน์รังสรรค์ คณะกรรมการสอบ รวมถึงอาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนาม

สุดท้ายนี้งานวิจัยนี้ขอขอบคุณครอบครัวและเพื่อนทุกท่านที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และสนับสนุนในการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

กานต์ วัฒนวิจิตร

TNI

THAI - JAPAN
INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ.....	1
ความสำคัญของการวิจัย.....	2
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
แผนงานและระยะเวลาดำเนินการ.....	3
คำอธิบายศัพท์.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
ระบบการตัดเฉือนเสมือนจริง.....	5
อนุกรมวิธานของเครื่องมือกลและการตัดเฉือนเสมือนจริง.....	5
กระบวนการตัดเฉือน.....	7
โมเดลแรงตัดเฉือนของเอ็นมิล.....	9
การจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการกัด.....	11
โมเดลการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่.....	12
จุดพิกัดไฮโมจีเนียส.....	14
การแปลงรูปพิกัด.....	15

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
2	ไฮโมจีเนียสทรานสฟอร์มเมชันเมทริกซ์ของความคลาดเคลื่อน	
	การหมุนและการเคลื่อนที่.....	16
	การปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดด้วยโปรแกรมภาษาไพธอน.....	17
	ทฤษฎีการควบคุมพีไอดี.....	19
	การควบคุมแบบสัดส่วน.....	20
	การควบคุมแบบรวมสัญญาณ.....	21
	การควบคุมแบบอนุพันธ์.....	22
	การจำลองการควบคุมพีไอดีด้วยโปรแกรมแมทแล็บซิมูลิงค์.....	23
	การทบทวนวรรณกรรม.....	23
3	วิธีการดำเนินงาน.....	26
	กระบวนการดำเนินการวิจัย.....	26
	การสร้างโมเดล CAD/CAM จากโปรแกรม Fusion 360.....	28
	การสร้างโมเดล CAD จากโปรแกรม Fusion 360.....	28
	การสร้างโปรแกรม CAM จากโปรแกรม Fusion 360.....	31
	การสร้างโมเดลการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของกระบวนการกัด.....	32
	โมเดลการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของกระบวนการกัดเครื่องกัด	
	ซีเอ็นซี 5 แกน.....	32
	โมเดลแรงการตัดเฉือนของเอ็นมิล.....	37
	โมเดลการโค้งงอของเอ็นมิล.....	37
	การปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดด้วยโปรแกรมภาษาไพธอน.....	37
	วิธีการตัดเฉือนในกระบวนการกัด.....	40
	กำหนดตำแหน่งศูนย์เครื่องกัด.....	40
	กำหนดตำแหน่งชิ้นงาน.....	41
	การตัดเฉือนจริง.....	42
	การวัดค่าความผิดพลาดด้วย CMM และการเปรียบเทียบผล.....	42
	การจำลองการปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดด้วยระบบควบคุมพีไอดีแบบปิด.....	44

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล..... 46
	วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการตัดเฉือนจริง..... 46
	วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการตัดเฉือนจริง
	หลังปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ด..... 48
	วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการตัดเฉือนจริง
	กับการจำลองด้วยระบบควบคุมพีไอดีแบบปิด..... 50
	วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหลังการปรับปรุง
	คุณภาพเอ็นซีโค้ดรวมกับการจำลองด้วยระบบควบคุมพีไอดีแบบปิด..... 52
5	บทสรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 54
	สรุปผลการทดลอง 54
	อภิปรายผล 55
	ข้อเสนอแนะ 55
	บรรณานุกรม 56
	ภาคผนวก..... 60
	ภาคผนวก ก. ตำแหน่งพิกัดการวัดชิ้นงานปกติ..... 62
	ภาคผนวก ข. ค่าพิกัดของชิ้นงานจริงก่อนการปรับปรุงคุณภาพ..... 64
	ภาคผนวก ค. ค่าพิกัดของชิ้นงานจริงหลังการปรับปรุงคุณภาพ..... 66
	ภาคผนวก ง. ค่าพิกัดของชิ้นงานหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยพีไอดี..... 68
	ประวัติย่อผู้วิจัย 69

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1	แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินงานปี พ.ศ. 2561 – 2563.....3
2.1	แสดงเมทริกซ์การเคลื่อนที่แนวเส้นตรงและการเคลื่อนที่แบบหมุน.....17
2.2	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 24
3.1	พิกัดจุดเส้นโค้งควมคุม P และ M..... 29
3.2	พิกัดจุดเส้นโค้งควมคุม Q และ N..... 30
5.1	ตารางเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย..... 54
ก.1	ตำแหน่งพิกัดการวัดชิ้นงานปกติ..... 61
ข.1	ค่าพิกัดของชิ้นงานจริงก่อนการปรับปรุงคุณภาพ..... 63
ค.1	ค่าพิกัดของชิ้นงานจริงหลังการปรับปรุงคุณภาพ..... 65
ง.1	ค่าพิกัดของชิ้นงานหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยพีไอดี..... 67

TNI

TAH - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญรูป

รูป		หน้า
2.1	โครงสร้างลำดับชั้นของระบบ VMT และ VMach.....	6
2.2	แสดงรูปแบบเรขาคณิตของเอ็นมิล.....	8
2.3	เรขาคณิตของกระบวนการกัด	8
2.4	องค์ประกอบของระบบการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการกัด	12
2.5	ปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของการกัดชิ้นงาน	12
2.6	รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักร.....	13
2.7	แสดงแผนภาพกลไกเชื่อมต่อแบบลูกโซ่ของการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่	14
2.8	ขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดด้วยโปรแกรมภาษาไพธอน.....	19
2.9	การควบคุมพีไอดี	20
2.10	กราฟผลกระทบของการเพิ่มค่า K_p (เมื่อค่า K_i และ K_d คงที่)	21
2.11	กราฟผลกระทบของการเพิ่มค่า K_i (เมื่อค่า K_p และ K_d คงที่)	22
2.12	กราฟผลกระทบของการเพิ่มค่า K_d (เมื่อค่า K_p และ K_i คงที่)	22
2.13	โมเดลจำลองที่เป็นสภาพแวดล้อมแบบบล็อกไดอะแกรม.....	23
3.1	ลำดับขั้นตอนการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ด.....	27
3.2	พิกัดจุดเส้นโค้งควบคุม P และ M.....	28
3.3	พิกัดจุดเส้นโค้งควบคุม Q และ N.....	28
3.4	เอส-เซฟหลังจากใช้ฟังก์ชันลอฟท์ด้วยโปรแกรม Fusion360.....	29
3.5	CAD ของเอส-เซฟที่ใช้ในการวิจัย.....	30
3.6	การกำหนดตัวแปรการกัด.....	31
3.7	ขั้นตอนการจำลองการกัดและเอ็นซีโค้ด.....	32
3.8	แผนผังการเคลื่อนที่หลัก (Main Motion) และการเคลื่อนที่แนวป้อน (Feed Motion).....	33
3.9	ขนาดระยะการเคลื่อนที่แต่ละคู่แกน.....	33
3.10	แผนผังการพิจารณาค่าความผิดพลาดของเครื่องซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก.....	36
3.11	ตัวอย่างโปรแกรมปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ด.....	38
3.12	โปรแกรมเอ็นซีโค้ดก่อนและหลังปรับปรุง.....	39
3.13	ระยะทางจากศูนย์การเคลื่อนที่แกน B ถึงศูนย์การเคลื่อนที่แกน A.....	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
3.14	ตำแหน่งการวางชิ้นงานในโปรแกรม Fusion 360.....41
3.15	ภาพก่อนและหลังการตัดเฉือนจริงด้วยเครื่องซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก.....41
3.16	a) ตำแหน่งพิกัดการวัดของชิ้นงานปกติระนาบ $Z = 0$42
3.16	b) ตำแหน่งพิกัดการวัดของชิ้นงานปกติระนาบ $Z = -12$42
3.17	a) ขั้นตอนการติดตั้งและการวัดชิ้นงาน..... 43
3.17	b) ภาพหน้าจอแสดงผลโปรแกรม GEOPAK..... 43
3.18	ฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ของสเต็ปมอเตอร์..... 44
3.19	ฟังก์ชันสัมพันธ์ตัวเลขจากการแจกแจงปกติของค่าความผิดพลาดที่วัดได้จริง..... 44
3.20	ระบบควบคุมพีไอดีแบบปิด..... 45
4.1	a) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงเส้นของแกน X..... 47
4.1	b) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงเส้นของแกน Y..... 47
4.1	c) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงมุมของแกน A..... 47
4.1	d) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงมุมของแกน B..... 47
4.2	a) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงเส้นของแกน X..... 49
4.2	b) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงเส้นของแกน Y..... 49
4.2	c) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงมุมของแกน A..... 49
4.2	d) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงมุมของแกน B..... 49
4.3	a) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงเส้นของแกน X..... 51
4.3	b) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงเส้นของแกน Y..... 51
4.3	c) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงมุมของแกน A..... 51
4.3	d) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงมุมของแกน B..... 51
4.4	a) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงเส้นของแกน X..... 53
4.4	b) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงเส้นของแกน Y..... 53
4.4	c) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงมุมของแกน A..... 53
4.4	d) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงมุมของแกน B..... 53

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในประเทศไทยมีอัตราการผลิตทั้งภายในประเทศและส่งออกต่างประเทศมากขึ้น 15.1% [1] ซึ่งคาดว่าอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ในปี พ.ศ. 2561-2563 จะเติบโตเฉลี่ย 8-12% ต่อปี โดยความต้องการชิ้นส่วนยานยนต์ในประเทศจะขยายตัวดี โดยเฉพาะชิ้นส่วนเพื่อประกอบยานยนต์ (OEM) ตามปริมาณการผลิตรถยนต์และรถจักรยานยนต์ที่เติบโตต่อเนื่อง โดยประเทศไทยมีผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ซึ่งส่วนมากจะเป็นผู้ประกอบการขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMEs) ซึ่งมีมากกว่า 1,100 ราย ที่อยู่ในระดับ Tier-2 และ Tier-3 [2] แต่อย่างไรก็ตามในการผลิตของ SMEs ก็ยังมีปัญหาด้านคุณภาพ ความถูกต้องแม่นยำและความเที่ยงตรง ทำให้เสียความน่าเชื่อถือ ความพึงพอใจจากลูกค้า และเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าในเรื่องกระบวนการผลิต ดังนั้นการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์จึงต้องตรวจสอบและตรวจวัดขนาดหลังจากการผลิตเสร็จสิ้น และมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น ทำให้ต้องมาแก้ไขและทดลองซ้ำ ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นซ้ำๆ จนกว่าจะได้ชิ้นส่วนที่มีความถูกต้องแม่นยำและเที่ยงตรง การผลิตแบบนี้ นอกจากจะเสียบุคคล เครื่องจักรและวัตถุดิบแล้ว ยังต้องเสียสิ่งที่สำคัญคือ “เวลา” อาจจะไม่ทันต่อความต้องการของลูกค้าทำให้ผลิตผล (Output) มีมูลค่าน้อยลงและผลิตภาพ (Productivity) ต่ำ

ปัจจุบันได้มีการเร่งพัฒนากระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์โดยคำนึงถึงคุณภาพทางด้านกายภาพให้สูงขึ้นเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงการผลิตในยุคอุตสาหกรรม 4.0 ซึ่งเครื่องจักรการผลิตแบบสมัยใหม่ของโรงงานอุตสาหกรรมได้มีการผนวกกับระบบทางกายภาพที่ต้องการจำลองการผลิตจาก “จริง” ไป “เสมือนจริง” ที่ใช้ระบบการผลิตแบบเสมือนจริง (Virtual machining system: VMS) โดยความช่วยเหลือของคอมพิวเตอร์ทางด้านเทคนิคการจำลองทางกายภาพของระบบการผลิตเสมือนจริงและเลียนแบบพฤติกรรมของระบบการผลิตก่อนที่จะไปทำการผลิตจริงเพื่อลดจำนวนของการทดสอบและทดลองในโรงฝึกปฏิบัติงาน [3-5] ซึ่งกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่มีความซับซ้อนได้มีการนำเครื่องจักรกลซีเอ็นซี 5 แกนมาผลิตชิ้นส่วนยานยนต์โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบและผลิต (Computer-Aided Design: CAD, Computer-Aided Manufacturing: CAM) ในวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (Small and Medium Enterprises: SMEs) มากขึ้นแต่ก็ยังพบปัญหาด้านผลิตภาพที่ต่ำ ผลผลิตที่มีปริมาณหรือมูลค่าน้อยอยู่ เนื่องจากโปรแกรมเอ็นซีโค้ดที่ส่งให้เครื่องจักรยังมีความถูกต้องแม่นยำและเที่ยงตรงไม่เพียงพอ ต้องแก้ไขและทดลองซ้ำอยู่เสมอทำให้เสียเวลาในกระบวนการผลิต

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นผู้วิจัยจึงมีแนวทางการปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดบนพื้นฐานการตัดเฉือนเสมือนจริงและระบบควบคุมพีโอทีบนเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก เพื่อแก้ไขปัญหาความถูกต้องแม่นยำและเที่ยงตรงของเอ็นซีโค้ดจาก CAD/CAM เพื่อเพิ่มผลผลิตของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ด้านเวลา

1.2 ความสำคัญของการวิจัย

1.2.1 ปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดจากโปรแกรม CAD/CAM

1.2.2 ลดความผิดพลาดและซ้ำซ้อนของกระบวนการผลิต

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดบนพื้นฐานการตัดเฉือนเสมือนจริงของกระบวนการกัดรูปร่างเอส-เชฟ (S-Shape) ด้วยวิธีพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ พิกัดรูปร่างเรขาคณิต การโค้งงอของเอ็นมิล (End Mill) และวิธีควบคุมพีโอทีแบบปิดบนเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดบนพื้นฐานการตัดเฉือนเสมือนจริงและระบบควบคุมพีโอทีแบบปิดบนเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก ซึ่งผู้วิจัยได้จำกัดขอบเขตการศึกษาไว้ดังนี้

1.4.1 การปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดบนพื้นฐานการตัดเฉือนเสมือนจริงของกระบวนการกัดรูปร่างเอส-เชฟตามมาตรฐาน ISO 10791-7: 2014/DAM 1 บนเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก ยี่ห้อ PocketNC แบบรุ่น V2-10

1.4.2 การตัดเฉือนเสมือนจริงพิจารณาบนพื้นฐานการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์แบบโฮโมจีเนียสทรานสฟอร์มเมชันเมตริกซ์ (Homogeneous Transformation Metrics: HTM) พิกัดรูปร่างเรขาคณิตและการโค้งงอของดอกเอ็นมิลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม.

1.4.3 การปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดเขียนด้วยโปรแกรมภาษาไพธอน (Python Language Program) โดยพิจารณาบนพื้นฐานการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์แบบโฮโมจีเนียสทรานสฟอร์มเมชันเมตริกซ์

1.4.4 การยืนยันผลการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงเปรียบเทียบโดยผลการตัดเฉือนจริงจากเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก โดยใช้วัสดุอะลูมิเนียมเกรด 7075 ขนาด 50x50x50 มม.

1.4.5 ระบบควบคุมพีโอทีแบบปิดจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink

ตารางที่ 1.1 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินงานปี พ.ศ. 2562 – 2563 (ต่อ)

ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน		ระยะเวลาดำเนินงาน															
		พ.ศ. 2562												พ.ศ. 2563			
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	
8	เขียนโปรแกรมควบคุมพีไอดีระบบปิด																
9	ทดลองและเก็บข้อมูล																
10	วิเคราะห์และยืนยันผลการทดลอง																
11	นำเสนอผลงาน																
12	สรุปผลและจัดทำวิทยานิพนธ์																
13	สอบวิทยานิพนธ์																

1.7 คำอธิบายศัพท์

1.7.1 เครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก (Mini pocket CNC 5-axis) หมายถึง เครื่องกัดขนาดเล็กที่ควบคุมเชิงตัวเลขด้วยระบบคอมพิวเตอร์ โดยมีแกนเคลื่อนที่ทั้งหมด 5 แกน คือ X Y Z เป็นแกนเคลื่อนที่เชิงเส้น และแกน A และ B เป็นแกนเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน X และ Y ตามลำดับ

1.7.2 การตัดเฉือนเสมือนจริง (Virtual Machining: VM) หมายถึง การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการใช้เครื่องมือเครื่องจักรสำหรับการผลิตชิ้นส่วนโดยจำลองพฤติกรรมและข้อผิดพลาดของสภาพแวดล้อมจริงในระบบเสมือนจริงเพื่อควบคุมและลดข้อผิดพลาดโดยไม่ต้องทดสอบทางกายภาพทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลง [6-7]

1.7.3 การควบคุมพีไอดี (PID Controller) หมายถึง การควบคุมแบบสัดส่วนมีการป้อนกลับที่ใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรม โดยนำค่าความผิดพลาด (Error) กลับมาคำนวณในกระบวนการที่มีตัวแปรที่ถูกปรับแต่ง (Manipulated Variables) เพื่อลดค่าความผิดพลาดให้น้อยที่สุด

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดบนพื้นฐานการตัดเฉือนเสมือนจริงและระบบควบคุมพีไอดีบนเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็กมีทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

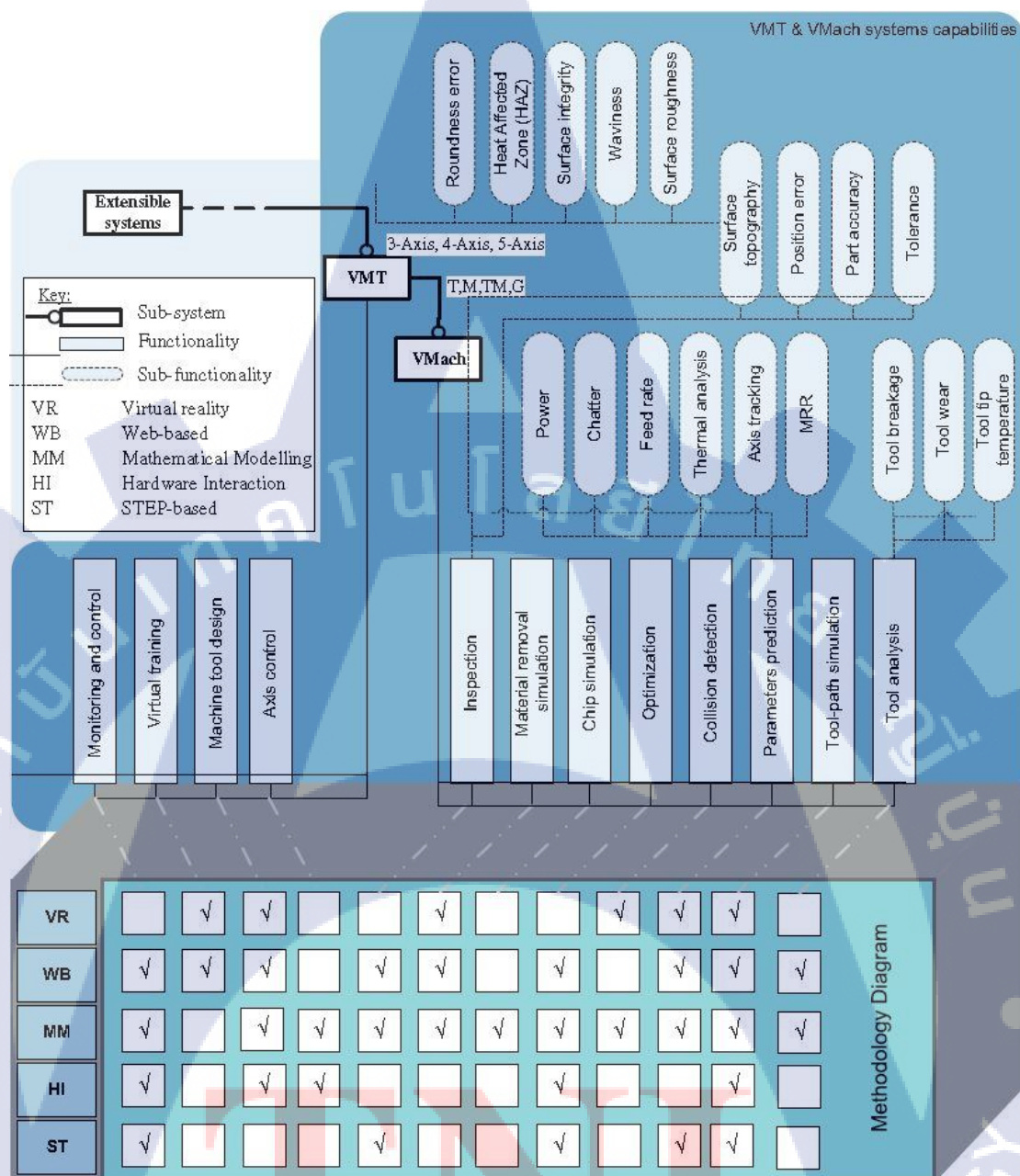
- ระบบการตัดเฉือนเสมือนจริง
- อนุกรมวิธานของเครื่องมือกลและการตัดเฉือนเสมือนจริง
- กระบวนการตัดเฉือน
- การจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการกัด
- โมเดลการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่
- การปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดด้วยโปรแกรมภาษาไพธอน
- ทฤษฎีการควบคุมพีไอดี
- การจำลองการควบคุมพีไอดีด้วยโปรแกรมแมทแล็บซิมูลิงค์
- การทบทวนวรรณกรรม

2.1 ระบบการตัดเฉือนเสมือนจริง [3]

ระบบการตัดเฉือนเสมือนจริง คือระบบที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองพฤติกรรมและข้อผิดพลาดของสภาพแวดล้อมการตัดเฉือนจริงของการผลิตในระบบการตัดเฉือนเสมือนจริง เพื่อให้การผลิต “ถูกต้องในครั้งแรก” โดยไม่จำเป็นต้องทดสอบทางกายภาพบนพื้นที่ทำงานจริง โดยการผลิตเสมือนจริง (Virtual manufacturing: VMfg) เครื่องมือกลเสมือนจริง (Virtual machine tool: VMT) การประกอบเสมือนจริง (Virtual Assembly: VA) เครื่องมือเสมือนจริง (Virtual Tooling: VTo) และต้นแบบเสมือนจริง (Virtual Prototype: VP) ได้ถูกพัฒนาเพื่อรองรับการตัดเฉือนเสมือนจริง

2.2 อนุกรมวิธานของเครื่องมือกลเสมือนจริงและการตัดเฉือนเสมือนจริง [3]

ในขอบเขตของสภาพแวดล้อมสำหรับการตัดเฉือนเสมือนจริงสามารถแบ่งหมวดหมู่บนพื้นฐานแมทริกซ์ระบบย่อยได้ โดยมุ่งเน้นไปที่เครื่องมือกลเสมือนจริงและการตัดเฉือนเสมือนจริง ซึ่งทั้งสองส่วนสามารถต่อไปถึงการผลิตเสมือนจริง การประกอบเสมือนจริงและต้นแบบเสมือนจริงได้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างลำดับชั้นของระบบ VMT และ VMach [3]

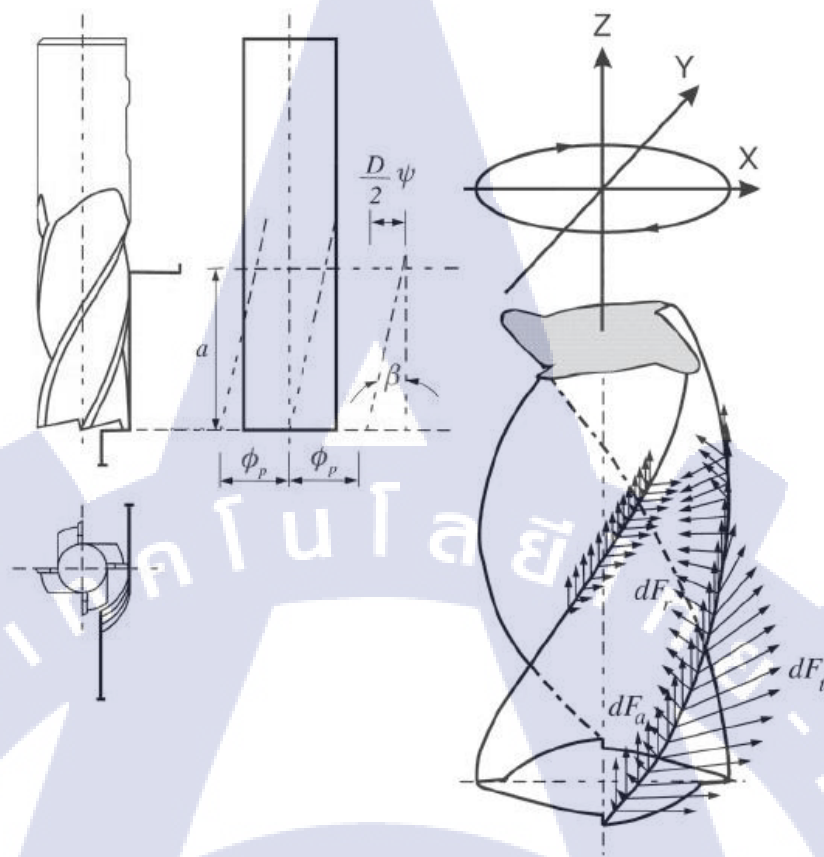
จากรูปที่ 2-1 เป็นการแสดงอนุกรมวิธานแบ่งการผลิตเสมือนจริงเป็น 3 ส่วนที่เกี่ยวข้อง คือ ส่วนระบบย่อย (Sub-system) ฟังก์ชัน (Functionality) และฟังก์ชันย่อย (Sub-functionality) โดยส่วนระบบย่อย ประกอบด้วยระบบเสมือนที่หลากหลาย เช่น เครื่องมือกลเสมือนจริง การผลิตเสมือนจริง (Virtual machining: VMach) เป็นต้น ส่วนฟังก์ชัน หมายถึง ฟังก์ชันการทำงานที่เป็นไปได้ของระบบซึ่งอาจจะมีส่วนฟังก์ชันย่อยอยู่ด้วย แต่ละระบบย่อยมีการทำงานตามลำดับของขอบเขตหลักและ

คุณลักษณะที่แตกต่างกัน ขอบเขตเครื่องมือกลเสมือนจริงจะรวมถึงการจำลองเครื่องมือกลในชุดควบคุมซีเอ็นซี (Computer Numerical Controller: CNC) ในทางกลับกัน ขอบเขตการตัดเฉือนเสมือนจริงมุ่งเน้นบนการวิเคราะห์กระบวนการผลิตตัวอย่างเช่น การกัด (Milling) การกลึง (Turning) การเจียรไน (Grinding) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ เช่น การประมาณค่าแรงกระทำ (force estimation) อัตราขจัดเนื้อวัสดุ (Material Removal Rate: MRR) ค่าความคลาดเคลื่อนของการตัดเฉือน (Machining Error,) เวลาในการตัดเฉือน (Machining Time) อัตราป้อน (Feed) อุณหภูมิ (Temperature) เป็นต้น

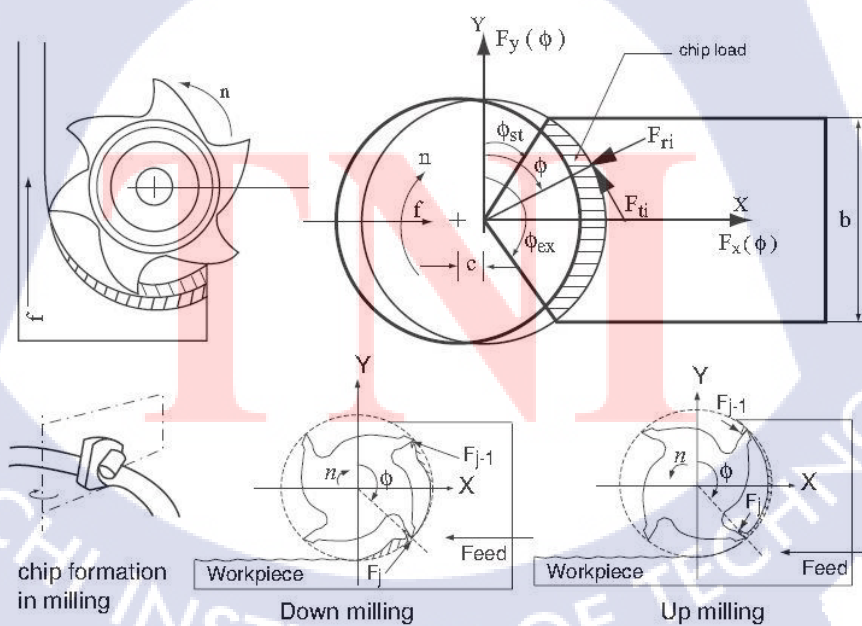
2.3 กระบวนการตัดเฉือน (Machining processes) [8]

กระบวนการตัดเฉือน คือ การสร้างรูปร่างของชิ้นงานโดยการตัดเฉือนเนื้อวัสดุออกโดยไม่มี การเปลี่ยนโครงสร้างภายใน (Microstructure) ซึ่งใช้เครื่องมือตัด (Cutting Tool) รูปทรงต่าง ๆ โดยมี องค์ประกอบสำคัญที่เกี่ยวข้องในกระบวนการตัดเฉือน คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้วยแรงเฉือน (Shear Deformation) เศษตัด (Chip) และเกิดผิวชิ้นงานใหม่ ซึ่งกระบวนการตัดเฉือนใช้ในการผลิต ชิ้นงานโลหะให้มีรูปร่างต่าง ๆ ซึ่งสามารถจำแนกประเภทการตัดเฉือนได้ 3 แบบ คือ การกลึง (Turning Processes) เช่น การกลึงปอก การกลึงปาดหน้า การกลึงเกลียวทั้งเกลียวในและเกลียวนอก การคว้าน ขึ้นรูป เป็นต้น และการกัด (Milling Processes) เช่น การกัดผิวหน้า (Face Milling) การกัดบ่า (Shoulder Milling) การกัดร่อง (Slot Milling) การกัดตามรูปร่าง เป็นต้น และกระบวนการตัดเฉือน อื่น ๆ เช่น การขัดผิวรูด้านใน (Honing) การแทงขึ้นรูป (Broaching) การทำฟันเฟือง (Gear Cutting) เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยนี้เน้นไปที่กระบวนการตัดเฉือนของงานกัด

งานกัด คือ กระบวนการตัดเฉือนซึ่งดำเนินการด้วยเครื่องมือตัดแบบหมุน (Rotary cutter) ที่มีคมตัดหลาย ๆ คมจัดเรียงบนขอบของเครื่องมือตัด กระบวนการนี้ใช้เพื่อสร้างพื้นผิวเรียบหรือส่วน โค้งและรูปร่างที่ซับซ้อนอื่น ๆ อีกมากมาย [9-10] เมื่อเกิดการตัดเฉือนเครื่องมือตัดแบบหมุนมีลักษณะ เรขาคณิตของการสร้างเศษ (Chip Formation) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบเรขาคณิตของเอ็นมิล



รูปที่ 2.3 เรขาคณิตของกระบวนการกัด

จากรูปที่ 2-3 การกัดแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ การกัดผิวหน้า (Face Milling) การกัดลง (Down Milling) และการกัดขึ้น (Up Milling) และเครื่องมือตัดนี้ใช้ร่วมกับเครื่องกัด ซึ่งเครื่องกัดมีสองประเภทใหญ่ ๆ คือ เครื่องกัดแนวนอน (Horizontal Milling Machine) เครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machines) และเครื่องกัดเอนกประสงค์ (Universal Milling Machines) โดยงานวิจัยนี้เน้นไปที่กระบวนการกัดผิวด้านข้างแบบกัดลงด้วยเครื่องมือตัดชนิดเอ็นมิล (End Mill) บนเครื่องจักรกลซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก เป็นเครื่องกัดเอนกประสงค์ที่สามารถใช้ในการปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดด้วยการตัดเฉือนเสมือนจริง ซึ่งในกระบวนการตัดเฉือนเสมือนจริงนี้จะต้องพิจารณาแรงในการตัดเฉือนที่ส่งผลต่อการโก่งของของเอ็นมิล

2.3.1 โมเดลแรงการตัดเฉือนของเอ็นมิล [8]

แรงการตัดเฉือนของเอ็นมิลประกอบไปด้วยแรง 3 แรง คือ แรงตามแนวสัมผัส (Tangential Cutting Forces: dF_t) แรงตามแนวรัศมี (Radial Cutting Forces: dF_r) และแรงตามแนวแกน (Axial Cutting Forces: dF_a) ดังแสดงในรูป 2.2 โดยแรงตัดเฉือนประมาณได้จากความหนาเศษที่เกิดขึ้นจากการตัดเฉือน ซึ่งความหนาเศษมีสมการดังนี้

$$h(\phi) = c \sin(\phi) \quad (2.1)$$

โดยที่ h คือ ความหนาเศษ
 ϕ คือ มุมแช่ (Immersion angle)
 c คือ อัตราป้อน (feed rate)

$$\begin{aligned} F_t(\phi) &= K_{tc}ah(\phi) + K_{tea} \\ F_r(\phi) &= K_{rc}ah(\phi) + K_{rea} \\ F_a(\phi) &= K_{ac}ah(\phi) + K_{aea} \end{aligned} \quad (2.2)$$

โดยที่ K_{tc} , K_{rc} , K_{ac} คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงตัดที่เกิดจากแรงตัดในทิศทางสัมผัส ทิศทางรัศมี และทิศทางแกนตามลำดับ K_{te} , K_{re} , K_{ae} คือ ค่าคงที่และในกรณีทีรัศมีจมูกของเอ็นมิล (Nose Radius) และมุมเข้างาน (Approach Angle) มีค่าเท่ากับศูนย์ แรงตามแนวแกนจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ($F_a = 0$)

หน้าที่หลักของเอ็นมิล คือ การกัดที่ผนังของชิ้นงานเพื่อให้ได้พื้นผิวชิ้นงานใหม่ตามเป้าหมาย โดยเพื่อลดความแปรปรวนของพื้นผิวชิ้นงานที่เกิดจากแรงกัดและใช้เมื่อความลึกของการตัด (Depth of Cut) มีขนาดใหญ่แต่ความกว้างของการตัด (Width of Cut) มีขนาดเล็ก เอ็นมิลทั่วไปมีร่องฟันคมตัด (Flute) และมุมเลี้ยว (Helix Angle) โดยแรงที่เกิดที่มุมเลี้ยวจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามร่องฟันคมตัด เมื่อความลึกของการตัดมีขนาดใหญ่ความกว้างของการตัดจะต้องมีขนาดเล็กมาก เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดของผิวชิ้นงานจากแรงที่เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาคิเนเมติกส์และคุณสมบัติบางอย่างของการกัดจึงสามารถวิเคราะห์แรงการตัดเฉือนได้ดังสมการที่ 2.2 และแรงในการตัดเฉือนที่เกิดจากการตัดเฉือนอธิบายได้ดังสมการที่ 2.4

$$\phi_j(z) = \phi + j\phi_p - k\beta z \quad (2.3)$$

โดยที่ $\phi_j(z)$ คือ มุมแช่ (Immersion angle) ของความลึกของการตัดที่ z
 ϕ คือ มุมแช่
 $j\phi_p$ คือ มุมพิทช์ (Pitch angle) ที่ตำแหน่งร่องฟันคมตัด j
 $k\beta z$ คือ มุมล่าหลัง (Lag angle)

$$\begin{aligned} dF_{t,j}(\phi, z) &= [K_{tc}h_j(\phi_j(z)) + K_{te}]dz, \\ dF_{r,j}(\phi, z) &= [K_{rc}h_j(\phi_j(z)) + K_{re}]dz, \\ dF_{a,j}(\phi, z) &= [K_{ac}h_j(\phi_j(z)) + K_{ae}]dz, \end{aligned} \quad (2.4)$$

ที่ความหนาเศษเท่ากับ

$$h_j(\phi, z) = c \sin \phi_j(z). \quad (2.5)$$

ทิศทางของแรงตัดเฉือนถูกจัดวางให้อยู่ในแนวของแกนเอ็นมิล โดยแรงตามแนวสัมผัส แรงตามแนวรัศมีและแรงตามแนวแกนถูกจัดให้อยู่ในชื่อและแนวแกนว่า แรงป้อน (Feed Forces) จัดให้อยู่ในแนวแกน X แรงตั้งฉาก (Normal Forces) จัดให้อยู่ในทิศทางแกน Y และแรงทิศทางแกน (Axial Forces) จัดให้อยู่ในทิศทางแกน Z โดยใช้สมการที่ 2.6

$$\begin{aligned}
 dF_{xj}(\phi_j(z)) &= -dF_{tj} \cos \phi_j(z) - dF_{rj} \sin \phi_j(z), \\
 dF_{yj}(\phi_j(z)) &= +dF_{tj} \sin \phi_j(z) - dF_{rj} \cos \phi_j(z), \\
 dF_{zj}(\phi_j(z)) &= +dF_{aj}
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

และแรงตัดเฉือนลัพท์ที่เกิดขึ้นกับเอ็นมิลสามารถแสดงได้ในสมการที่ (2.7)

$$F(\phi) = \sqrt{F_x(\phi)^2 + F_y(\phi)^2 + F_z(\phi)^2} \tag{2.7}$$

แรงลัพท์ที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการโก่งงอจึงทำให้เกิดความผิดพลาดตามแนวแกน X, Y และ Z ดังแสดงในสมการที่ 2.8

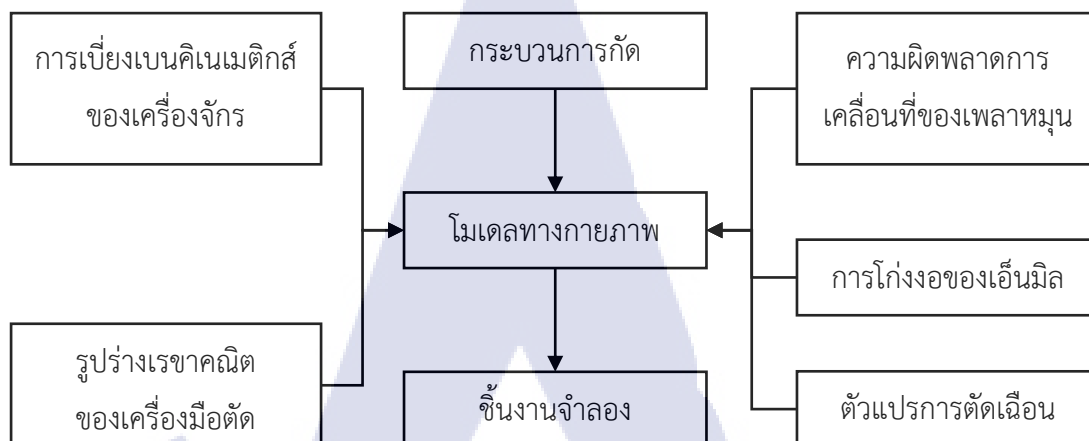
$$A = \frac{F(\phi)}{3EI} (L-0.5a)^3 \tag{2.8}$$

โดยที่ $F(\phi)$ คือ แรงตัดเฉือนลัพท์
 E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น
 I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย
 L คือ ความยาวของดอกกัด (mm)
 A คือ ความลึกการกัดในแนวแกน (mm)

เมื่อได้แรงลัพท์จากการคำนวณและเพื่อให้การการตัดเฉือนเสมือนจริงมีความแม่นยำมากขึ้น จึงต้องพิจารณาการโก่งงอของเอ็นมิลต่อไป

2.4 การจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการกัด [11]

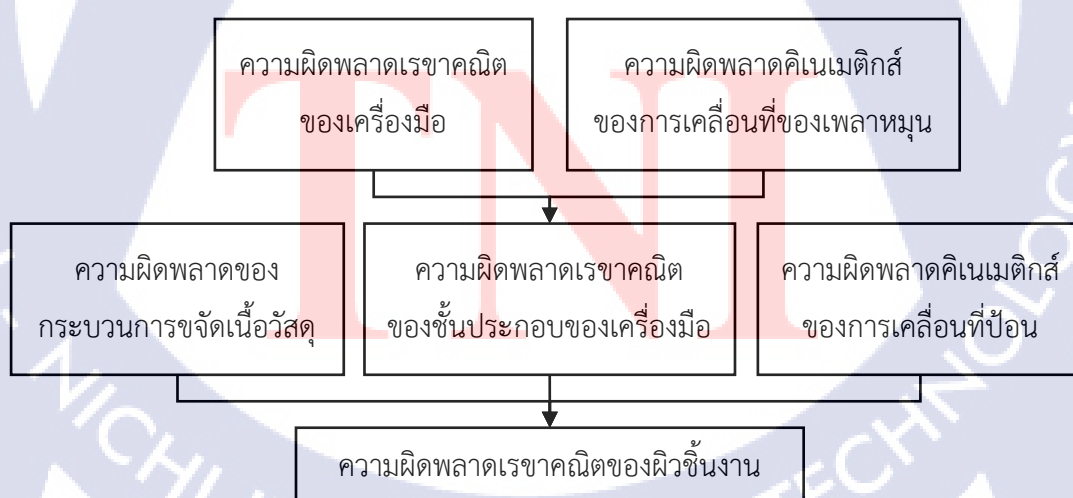
การจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริง คือ การพิจารณาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อชิ้นงานจำลอง โดยปัจจัยดังกล่าวคือ การเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ของเครื่องจักร รูปร่างเรขาคณิตของเครื่องมือตัด การกัด ความผิดพลาดการเคลื่อนที่ของเพลหาหมุน การโก่งงอของเอ็นมิลและตัวแปรการตัดเฉือนมาสร้างโมเดล ทางกายภาพเพื่อสร้างชิ้นงานจำลองต่อไปดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยชิ้นงานจำลองจะถูกนำมาตัดเฉือนจริงด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็กและพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่อไป



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบของระบบการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการกัด

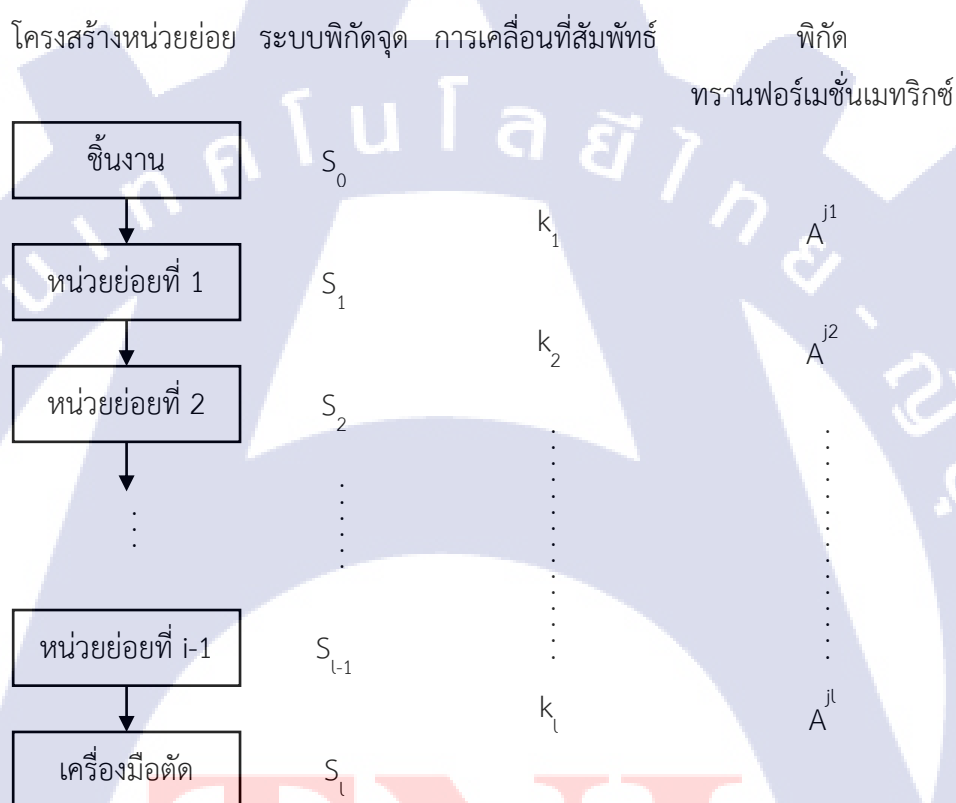
2.5 โมเดลการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่ (Shape Generation Motions) [11]

ความผิดพลาดเรขาคณิตของผิวชิ้นงานเกิดจากความผิดพลาดของกระบวนการจัดเนื้อวัสดุ ความผิดพลาดเรขาคณิตของชิ้นประกอบของเครื่องมือและความผิดพลาดคิเนเมติกส์ของการเคลื่อนที่ป้อน ซึ่งความผิดพลาดเรขาคณิตของชิ้นประกอบของเครื่องมือตัดเกิดจากความผิดพลาดเรขาคณิตของเครื่องมือและความผิดพลาดคิเนเมติกส์ของเพลาการเคลื่อนที่ของเพลาหมุนดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของชิ้นงานและความสัมพันธ์จากมุมมองของกระบวนการสร้างรูปร่างจากเครื่องจักรกล ซึ่งแต่ละปัจจัยมีความซับซ้อนและไม่มีความชัดเจน ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความผิดพลาดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างเครื่องจักรและชิ้นงาน



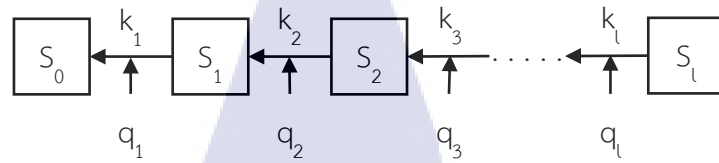
รูปที่ 2.5 ปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของการกัดชิ้นงาน

กระบวนการสร้างรูปร่างของเครื่องจักรโดยทั่วไปนำเสนอด้วยวิธีการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่ และรูปร่างเรขาคณิตของเครื่องมือ การสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่เป็นการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างเครื่องมือกับชิ้นงานที่กระทำด้วยชุดของส่วนประกอบแข็งเกร็ง (Rigid Components) ของเครื่องมือ ซึ่งรูปที่ 2.6 แสดงภาพประกอบอธิบายส่วนประกอบแข็งเกร็งที่เรียกว่าหน่วยย่อย (Unit Element) และการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่ระหว่างแต่ละหน่วย



รูปที่ 2.6 รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักร

การสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่ที่กำหนดให้สัญลักษณ์ $S_0, S_1, \dots, S_l$ แทนระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian Coordinate) ที่เชื่อมต่อกับหน่วยย่อย โดยที่ S_0 คือ ชิ้นงาน S_l คือ เครื่องมือตัด และ $S_1, \dots, S_{l-1}$ คือ ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนที่เชื่อมต่อกับหน่วยย่อยถัดไป และ $q_0, q_1, \dots, q_l$ คือตัวแปรการเคลื่อนที่ของหน่วยส่วนประกอบ และ $k_1, k_2, \dots, k_l$ คือ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของหน่วยส่วนประกอบดังแสดงที่รูป 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพกลไกเชื่อมต่อแบบลูกโซ่ของการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่

2.5.1 จุดพิกัดโฮโมจีเนียส (Homogeneous Coordinate) [8]

จุดพิกัดโฮโมจีเนียสคือเวกเตอร์ลำดับที่สี่ในพิกัด 3 มิติ ซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ เวกเตอร์เจาะจง (Eigenvectors) และเวกเตอร์ไม่เจาะจง (Non-Eigenvectors) โดยจุดพิกัดของเวกเตอร์ตำแหน่ง (Position Vector) จะเป็นของเวกเตอร์เจาะจง ส่วนเวกเตอร์ที่หาได้ด้วยวิธีอนุพันธ์หรือการแปลงรูปของเวกเตอร์ตำแหน่งจะเป็นของส่วนเวกเตอร์ไม่เจาะจง พิกัดของเวกเตอร์ลำดับที่สี่ เรียกว่า พิกัดโฮโมจีเนียส โดยเวกเตอร์เจาะจงจะมีอยู่สี่พิกัดโฮโมจีเนียสซึ่งเท่ากับเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit Vector) และเวกเตอร์ไม่เจาะจงจะมีอยู่สี่พิกัดโฮโมจีเนียสที่เท่ากับศูนย์

จุดของเวกเตอร์ตำแหน่งพิกัดคาร์ทีเซียน x, y, z เขียนในรูปแบบหลักของเวกเตอร์ลำดับที่สี่ได้ดังนี้

$$r = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

เพื่อให้ประหยัดพื้นที่ในการเขียน สามารถเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปแบบแถวได้ดังนี้

$$r = (x, y, z, 1)^T \quad (2.10)$$

โดยที่ T คือ สัญลักษณ์ของทรานสโพสเมทริกซ์และเวกเตอร์ r สามารถแสดงได้ดังนี้

$$r = xe^1 + ye^2 + ze^3 + 1e^4 \quad (2.11)$$

โดย e^1, e^2, e^3 คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วย ส่วน e^4 คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของพิกัด

$$e^4 = (0,0,0,1)^T \quad (2.12)$$

2.5.2 การแปลงรูปพิกัด (Transformation of Coordinate)

การแปลงรูปพิกัดสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$X_0 = A_{ij}(q_1, q_2, \dots, q_l)X_i \quad (2.13)$$

โดยที่ X_i คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของจุดพิกัดบนเครื่องมือตัดในระบบพิกัด

X_0 คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของจุดในระบบพิกัดของชิ้นงาน

A_{ij} คือ เมทริกซ์ 4x4 ที่มีโครงสร้างดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

เมทริกซ์ที่ด้านบนซ้ายขนาด 3x3 คือ ระบบการหมุน S_i และสัมพันธ์กับพิกัดเริ่มต้น O_i ซึ่งเมทริกซ์นี้แสดงในรูปเมทริกซ์ตั้งฉาก (Orthogonal Matrix) เช่น ที่ $i, j, k = 1, 2$ และ 3

$$\sum_{j=1}^3 a_{ij} a_{kj} = \sum_{j=1}^3 a_{ji} a_{jk} = \begin{cases} 0, & \text{if } i \neq k, \\ 1, & \text{if } i = k, \end{cases} \quad (2.15)$$

และนอกจากนี้ดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์ คือ

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = 1 \quad (2.16)$$

ระบบ S_{i-1} และ S_i จะผูกกับสองกลไกเชื่อมโยงการสร้างรูปร่าง โดยที่การเคลื่อนที่สัมพันธ์ของกลไกเชื่อมโยงจำกัดอยู่ที่หการเชื่อมโยงสามารถแสดงได้ดังนี้

$$a_{ij}(q_1, q_2, \dots, q_l) = \prod_{i=1}^l A_{vi}^{\alpha_i}(\beta_i) \quad (2.17)$$

โดยที่ $A_{\gamma_i}^{\alpha_i}(\beta_i)$ คือ เมทริกซ์ 4×4 ที่แสดงการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และตำแหน่งเคลื่อนที่ $\alpha(1,2,...,6)$ คือ แสดงทิศทางของการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และตำแหน่งเคลื่อนที่หมายเลข 1, 2 และ 3 หมายถึงการเคลื่อนที่แบบเส้นและทิศทางตามแกน X, Y และ Z หมายเลข 4, 5 และ 6 การเคลื่อนที่แบบหมุนและตำแหน่งรอบแกน X, Y และ Z

β คือ แสดงค่าการการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และตำแหน่งเคลื่อนที่

γ คือ แสดงค่าระบบพิกัด

การเคลื่อนที่สัมพันธ์แสดงด้วย A^α คือ การเคลื่อนที่ที่ตามแนวแกน X, Y และ Z หรือการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกน X, Y และ Z ซึ่งสามารถแสดงเมทริกซ์ได้ดังตารางที่ 2.1

2.5.3 โฮโมจีเนียสทรานสฟอร์มเมชันเมทริกซ์ของความคลาดเคลื่อนการหมุนและการเคลื่อนที่ (Homogeneous Transformation Matrix of Rotation and Translation: HTM) [8]

การศึกษาความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรนั้น สามารถจัดรูปแบบคิเนเมติกส์ของเครื่องจักรให้อยู่ในรูปของ HTM และสามารถวิเคราะห์ได้โดยการหาความคลาดเคลื่อนที่ส่งผลต่อความแม่นยำของตำแหน่งจุดตัดโดยพิจารณาจากจุดพิกัดบนชิ้นงาน ตัวแปรของความคลาดเคลื่อนสามารถแสดงด้วย HTM ได้ดังสมการที่ 2.18

$$E_{N'N} = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_z & \epsilon_y & \delta_x \\ \epsilon_z & 1 & -\epsilon_x & \delta_y \\ -\epsilon_y & \epsilon_x & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

โดยที่ δ_x คือ ความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นในทิศทางแกน X

δ_y คือ ความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นในทิศทางแกน Y

δ_z คือ ความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นในทิศทางแกน Z

ϵ_x คือ ความคลาดเคลื่อนเชิงมุมของแกน X (Pitch movement)

ϵ_y คือ ความคลาดเคลื่อนเชิงมุมของแกน Y (Roll movement)

ϵ_z คือ ความคลาดเคลื่อนเชิงมุมของแกน Z (Yaw movement)

ตารางที่ 2.1 แสดงเมทริกซ์การเคลื่อนที่แนวเส้นตรงและการเคลื่อนที่แบบหมุน

ประเภทการเคลื่อนที่	แกน	การเคลื่อนที่สัมพัทธ์	ทรานสฟอร์มเมชันเมทริกซ์
การเคลื่อนที่เชิงเส้น (translation motion)	X	1	$A^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	Y	2	$A^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	Z	3	$A^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
การเคลื่อนที่เชิงมุม (rotary motion)	A	4	$A^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	B	5	$A^5 = \begin{bmatrix} \cos\psi & 0 & \sin\psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\psi & 0 & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	C	6	$A^6 = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

2.6 การปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดด้วยโปรแกรมภาษาไพธอน [12]

ปัจจุบันเทคโนโลยีและนวัตกรรมพัฒนาอย่างรวดเร็ว มีความล้ำหน้าโดยเฉพาะงานทางด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) เช่น บริษัท ดีพมายด์ (DeepMind) ได้พัฒนาระบบ

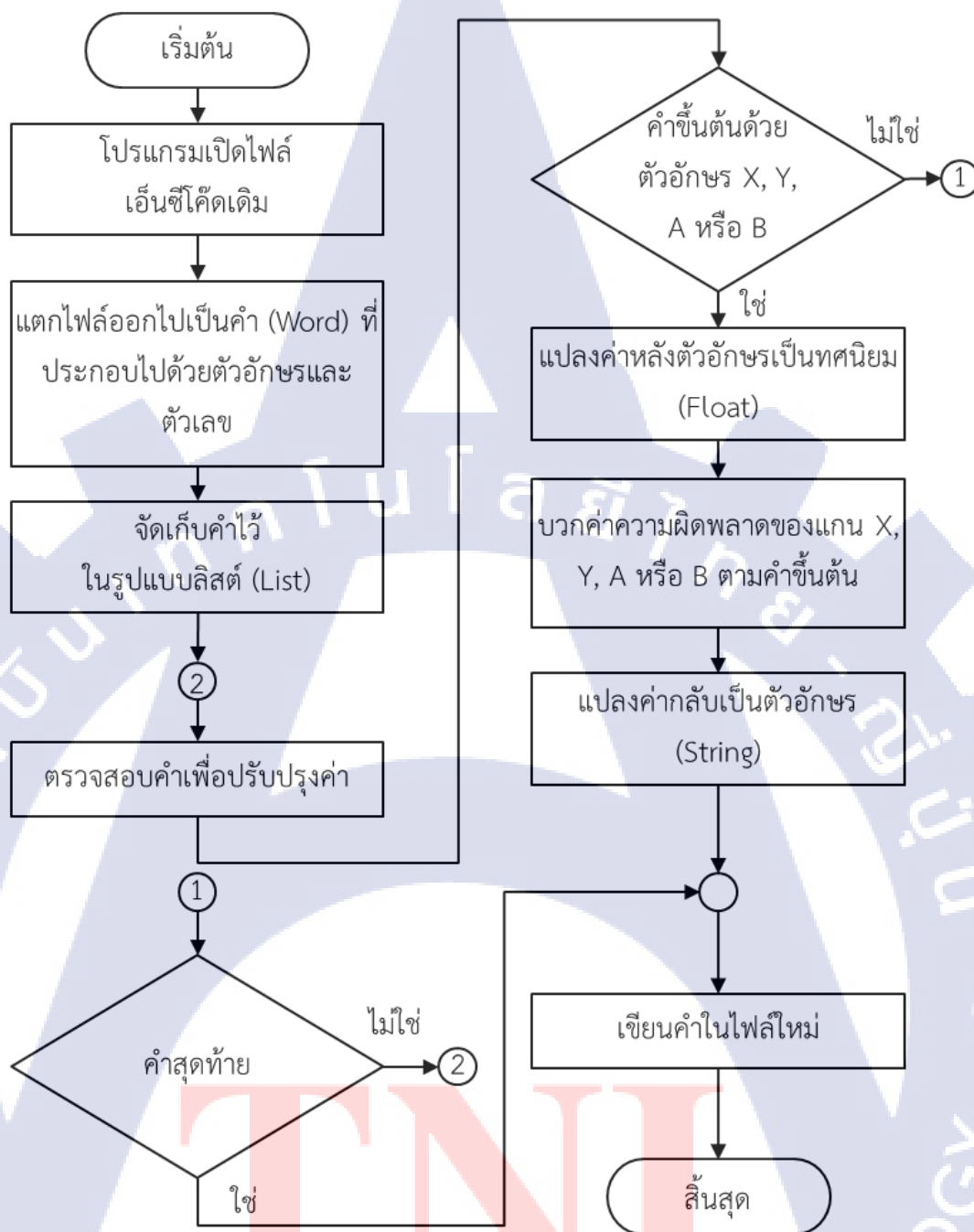
คอมพิวเตอร์อัลฟาโกะ (Alpha Go) ที่สามารถแข่งขันหมากล้อมชนะแชมป์โลกได้ รวมถึงหุ่นยนต์คอมพิวเตอร์ที่จะสามารถทำงานทดแทนมนุษย์ได้ในอนาคต แต่สาเหตุที่คอมพิวเตอร์สามารถทำงานได้ก็เพราะ “โปรแกรม” ที่คอยทำงานอยู่เบื้องหลัง ซึ่งเป็นชุดคำสั่งที่มีการกำหนดขั้นตอนที่ชัดเจนโดยมนุษย์เป็นคนเขียนขึ้นด้วยภาษาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ระดับสูง (High-level Programming Language)

ภาษาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ระดับสูงเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม เช่น Java, C/C++, C#, Ruby และ Python เป็นต้น โดยภาษาโปรแกรมถูกออกแบบมาสำหรับมนุษย์ในการแปลงความคิดออกมาเป็นลำดับขั้นตอนต่าง ๆ อย่างชัดเจนให้อยู่ในรูปแบบของชุดคำสั่ง (Source Code) ที่เขียนด้วยภาษาที่ใกล้เคียงมนุษย์ (Natural Language) และแปลงชุดคำสั่งด้วยคอมไพเลอร์ (Compiler) หรืออินเตอร์พรีเตอร์ (Interpreter) ให้เป็นภาษาเครื่องจักร (Machine Language) เพื่อให้คอมพิวเตอร์ทำงานตามที่เราต้องการ

ไพธอน (Python) เป็นภาษาเขียนโปรแกรมระดับสูงที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการเขียนโปรแกรม ภาษาไพธอนถูกสร้างและถูกเผยแพร่ครั้งแรกในปี 1991 โดย กิโด ฟาน รอสซัม (Guido Van Rossum) โครงสร้างของภาษาถูกออกแบบให้เขียนโค้ด (Code) ได้ง่ายและทำให้โปรแกรมเมอร์แม้ว่าจะเป็นมือใหม่ก็สามารถเข้าใจการเขียนโค้ดโดยใช้บรรทัดที่น้อยกว่าภาษาอื่นได้

งานวิจัยนี้เลือกใช้ภาษาไพธอนในการเขียนโปรแกรมปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีไค้ด เนื่องจากเป็นภาษาที่ได้รับความนิยม โดยมีหลักการ คือนำค่าความผิดพลาดที่ได้จากการวัดผลการตัดเงื่อนไขจริงมาเป็นค่าปรับปรุงในแต่ละคำสั่งการเคลื่อนที่ของเอ็นซีไค้ด โดยเขียนโปรแกรมให้มีขั้นตอนในการทำงานหลังจากเปิดใช้โปรแกรกดังรูปที่ 2.8

TNI

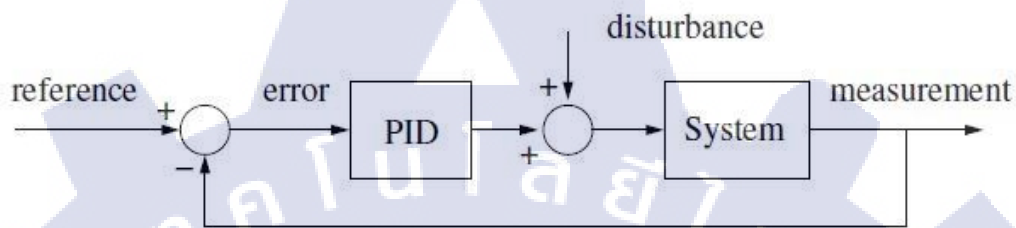


รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดด้วยโปรแกรมภาษาไพธอน

2.7 ทฤษฎีการควบคุมพีเอตี [13-16]

การควบคุมพีเอตี คือ การควบคุมแบบสัดส่วนมีการป้อนกลับที่ใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรม โดยนำค่าความผิดพลาด (Error) กลับมาคำนวณในกระบวนการที่มีตัวแปรที่ถูกปรับแต่ง (Manipulated Variables) เพื่อลดค่าความผิดพลาดให้น้อยที่สุด

การควบคุมพีไอดีเกี่ยวข้องกับการควบคุมตัวแปรคงที่ 3 ตัว เรียกการควบคุมตัวแปรแต่ละตัวว่า แบบสัดส่วน (Proportional: P) แบบรวมสัญญาณ (Integral: I) และแบบอนุพันธ์ (Derivative: D) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยการควบคุมแบบสัดส่วนขึ้นอยู่กับค่าความผิดพลาดปัจจุบัน แบบอินทิกรัลขึ้นอยู่กับผลรวมค่าความผิดพลาดในอดีตและแบบอนุพันธ์พยากรณ์ค่าความผิดพลาดในอนาคต ทั้งนี้ ตั้งอยู่บนพื้นฐานอัตราการเปลี่ยนแปลงในปัจจุบัน



รูปที่ 2.9 การควบคุมพีไอดี

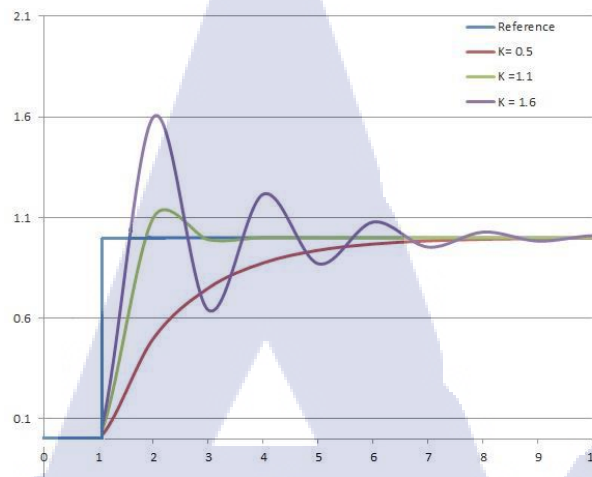
2.7.1 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control)

การควบคุมแบบสัดส่วน คือ การสร้างเอาต์พุตที่เป็นสัดส่วนกับค่าความผิดพลาดในปัจจุบัน โดยสามารถปรับได้โดยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่ K_p ที่เรียกว่า ค่าคงที่อัตราขยายตามสัดส่วน

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (2.19)$$

การควบคุมแบบสัดส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าผิดพลาดอย่างมากแต่หากอัตราขยายมากเกินไประบบอาจไม่เสถียรมีค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว (Steady-State Error) หรือที่เรียกว่า ออฟเซต (Offset) ในทางตรงกันข้ามอัตราขยายน้อยจะส่งผลให้เกิดการตอบสนองช้าลงดังแสดงตัวอย่างที่รูป 2.10 ที่แสดงผลกระทบของการตั้งค่า K_p ที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 2.10 ค่า K_p มีผลต่อเวลาในการเข้าสู่จุดกำหนด (Setpoint) โดยเมื่อกำหนดค่าต่ำ (กราฟสีแดง $K_p = 0.5$) จะใช้เวลานานที่สุด แต่เมื่อกำหนดค่าสูง (กราฟสีม่วง $K_p = 1.6$) จะทำให้เกิดการพุ่งเกิน (Overshoot) ดังนั้นจากกราฟนี้การกำหนดค่า $K_p = 1.1$ จะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด



รูปที่ 2.10 กราฟผลกระทบของการเพิ่มค่า K_p (เมื่อค่า K_i และ K_d คงที่)

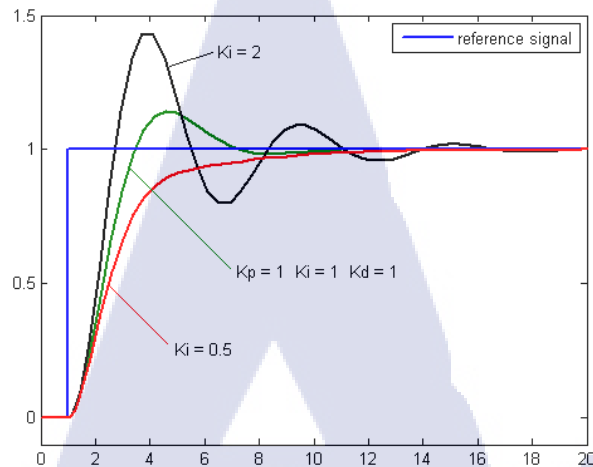
2.6.2 การควบคุมแบบรวมสัญญาณ (Integral Control)

การควบคุมแบบรวมสัญญาณ คือ การรวมกันของค่าความผิดพลาดและระยะเวลาของค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการควบคุมแบบสัดส่วนและนำค่าความผิดพลาดสะสมที่ผ่านมาทั้งหมดนั้น มาชดเชยให้ถูกต้องโดยการคูณด้วยค่าคงที่ K_i ดังสมการ

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.20)$$

การควบคุมแบบรวมสัญญาณจะเร่งการเคลื่อนที่ไปยังจุดกำหนดและกำจัดค่าความผิดพลาดตกค้างที่เหลืออยู่ระหว่างสภาวะอยู่ตัวที่เกิดขึ้นหากควบคุมแบบสัดส่วนเพียงอย่างเดียว

จากรูปที่ 2.11 ค่า K_i มีผลต่อเวลาในการเข้าสู่ค่าเป้าหมาย (Setpoint) โดยเมื่อกำหนดค่าต่ำ (กราฟสีแดง $K_i = 0.5$) จะไม่เกิดการพุ่งเกินแต่ใช้เวลานาน แต่เมื่อกำหนดค่าสูง (กราฟสีดำ $K_i = 2$) จะเกิดการพุ่งเกิน ดังนั้นจากกราฟนี้การกำหนดค่า $K_i = 1$ จะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด



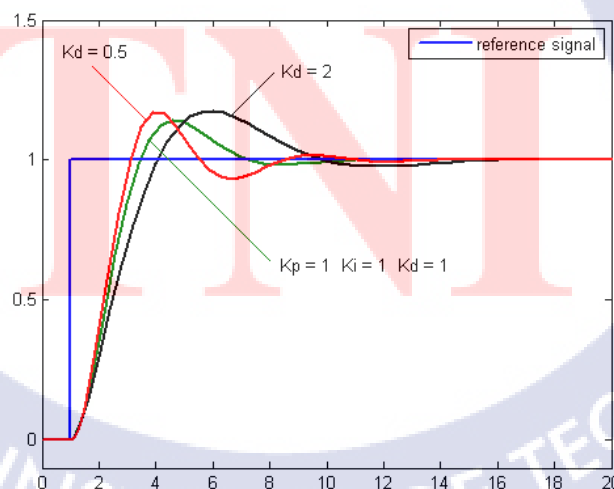
รูปที่ 2.11 กราฟผลกระทบของการเพิ่มค่า K_i (เมื่อค่า K_p และ K_d คงที่)

2.6.3 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)

การควบคุมแบบอนุพันธ์ คือ การควบคุมโดยการกำหนดความชันของค่าความผิดพลาดเมื่อเวลาผ่านไปและคูณด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงดังสมการนี้

$$D_{OUT} = K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.21)$$

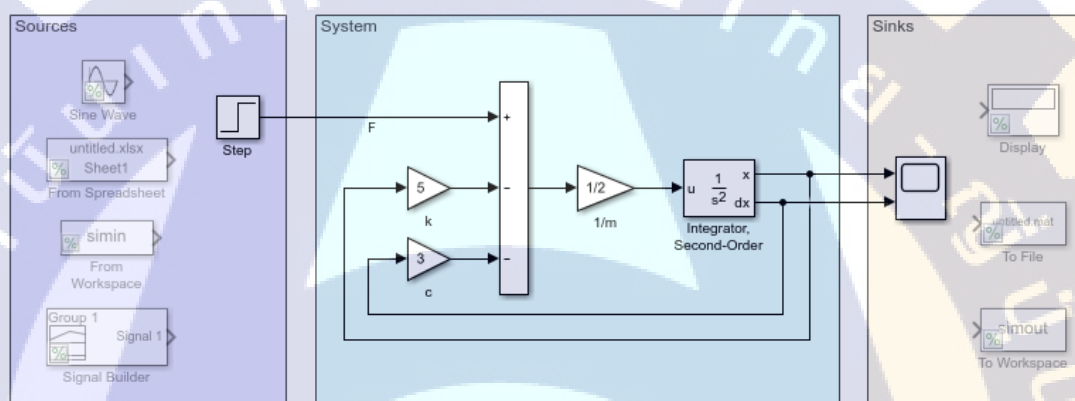
การควบคุมแบบอนุพันธ์สามารถทำให้พฤติกรรมของระบบ เวลาและเสถียรภาพของระบบดีขึ้นดังแสดงที่รูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กราฟผลกระทบของการเพิ่มค่า K_d (เมื่อค่า K_p และ K_i คงที่)

2.8 การจำลองการควบคุมพีไอดีด้วยโปรแกรมแมทแลปซิมูลิงค์ (MATLAB Simulink) [17]

ซิมูลิงค์ คือ โปรแกรมจำลองที่เป็นสภาพแวดล้อมแบบบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram Environment) สำหรับการจำลองหลายโดเมนและการออกแบบแบบจำลองดังรูปที่ 2.13 ที่รองรับการออกแบบระบบระดับ (System-Level Design) การสร้างรหัสอัตโนมัติ (Automatic Code Generation) การทดสอบอย่างต่อเนื่อง (Continuous Test) และการตรวจสอบระบบฝังตัว (Embedded Systems) รวมถึงการควบคุมพีไอดี (PID Controller) มีเครื่องมือแก้ไขกราฟิกไลบรารีบล็อกที่ปรับแต่งได้และเครื่องมือแก้ปัญหาสำหรับการสร้างแบบจำลอง (Modeling) และจำลองระบบไดนามิก (Dynamics System Simulation) อีกทั้งสามารถรวมอัลกอริทึมแมทแลปเข้ากับโมเดลและส่งผลลัพธ์การจำลองไปยังแมทแลปเพื่อการวิเคราะห์เพิ่มเติม



รูปที่ 2.13 โมเดลจำลองที่เป็นสภาพแวดล้อมแบบบล็อกไดอะแกรม

ด้วยความสามารถของโปรแกรมในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ผล ผู้วิจัยจึงได้ใช้การจำลองการควบคุมพีไอดีด้วยแมทแลปซิมูลิงค์

2.9 การทบทวนวรรณกรรม

ผู้วิจัยได้ทำการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้วยการหาข้อมูลในฐานข้อมูลมาตรฐานต่าง ๆ อาทิเช่น จากเว็บไซต์ www.sciencedirect.com พร้อมทั้งหาบทความเพิ่มเติมที่เกี่ยวข้องกับงานการตัดเนื้องานเสมือนจริง การหาค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก โดยได้พบงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังสรุปในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลำดับที่	ผู้เขียน	ปีที่ตีพิมพ์	หัวข้องานวิจัยที่น่าสนใจ
1	S. Ibaraki et al. [18]	2010	การทดสอบการตัดเฉือนเพื่อระบุความคลาดเคลื่อน คิเนเมติกส์บนเครื่องมือกล 5 แกน
2	M. Soori et al. [6]	2013	มิติและความคลาดเคลื่อนของเครื่องกัดซีเอ็นซีสาม แกนในระบบการตัดเฉือนเสมือนจริง
3	A. Takahashi et al [19]	2014	การวิเคราะห์การเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ ของเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์บนพื้นฐาน ความคลาด เคลื่อนเรขาคณิต
4	M. Soori et al. [7]	2014	การตัดเฉือนเสมือนจริงโดยพิจารณาความผิดพลาด มิติ เรขาคณิตและการโก่งงอของเครื่องมือตัดใน เครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน
5	Y. Altintas [20]	2016	การตัดเฉือนเสมือนจริงประสิทธิภาพสูง
6	A. M. Ahmed Mohamed et al. [14]	2016	การควบคุมระบบเซอร์โวของเครื่องจักรซีเอ็นซีด้วย พีไอดี
7	วิโรช ทัศนะ และดอน แก้วดก [5]	2017	การตัดเฉือนเสมือนจริงของกระบวนการกลึงด้วย วิธีการพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ การสึกหรอ เครื่องมือตัด และการโก่งงอของชิ้นงาน
8	G. Phanomchoeng and R. Chanchaoen [16]	2017	การควบคุมแบบปรับตัวสำหรับระบบตำแหน่ง 2 แกนและโครงสร้างแบบตัวเอช
9	R. Sato et al. [21]	2018	อิทธิพลของคุณภาพโปรแกรม NC และความคลาด เคลื่อนทางเรขาคณิตของแกนหมุนที่มีต่อความ แม่นยำในการทดสอบการขึ้นรูปเอส-เซฟ
10	W. Thasana and S. Chianrabutra [22]	2019	การเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดลอง การตัดเฉือนเสมือนจริงในเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดย พิจารณาจากความเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ การสึกหรอ และการโก่งงอของชิ้นงาน

จากตารางที่ 2.2 A. Takahashi และคณะ [19] ได้ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของเครื่องมือกลและความคลาดเคลื่อนเรขาคณิตด้วยการจำลองรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ 5 แกน สามชนิด คือ Workpiece Rotation Type, Tool & Workpiece Rotation Type และ Tool Rotation Type จากการศึกษาพบว่า การเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของเครื่องซีเอ็นซี แมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ 5 แกน ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนเรขาคณิตของแต่ละตำแหน่งบนชุดการเคลื่อนที่ให้ผลที่แตกต่างกัน แต่ก็ยังไม่ได้พิจารณาการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ที่ปลายของดอกกัดเอ็นมิลและตัวแปรของการตัดเฉือนแบบพื้นผิวหน้าเพื่อนำมาประมาณค่าการตัดเฉือนเสมือนจริง

วิโรช ทศนะ และดอน แก้วดก [5] ได้ศึกษาการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงเทียบกับผลการตัดเฉือนจริงของกระบวนการกลึงขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ การสึกหรอเครื่องมือตัด และการโก่งงอของชิ้นงานบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อประมาณค่าความเป็นทรงกระบอกของชิ้นงานเสมือนจริง ผลการศึกษาพบว่าความเป็นทรงกระบอกจากการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงและจากชิ้นงานจริงแตกต่างกันที่ 4.055 % อย่างไรก็ตามผู้วิจัยดังกล่าวยังไม่ได้วัดค่าเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์จริงของเครื่องกลึงซีเอ็นซีด้วยวิธีดับเบิลบอลบาร์ (Double ball bar: DBB) และวัดแรงการตัดเฉือนจากเซนเซอร์วัดแรง รวมถึงค่าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงด้วย

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นจะเห็นได้ว่าการศึกษาและทำการวิจัยเกี่ยวข้องกับการตัดเฉือนเสมือนจริงด้วยวิธีการพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาปัจจัยการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์แบบเคลื่อนที่และยังไม่มีการควบคุมแบบฟีดแบ็ค ดังนั้นงานนี้จึงเลือกศึกษาการปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดบนพื้นฐานการตัดเฉือนเสมือนจริงและระบบควบคุมฟีดแบ็คบนเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

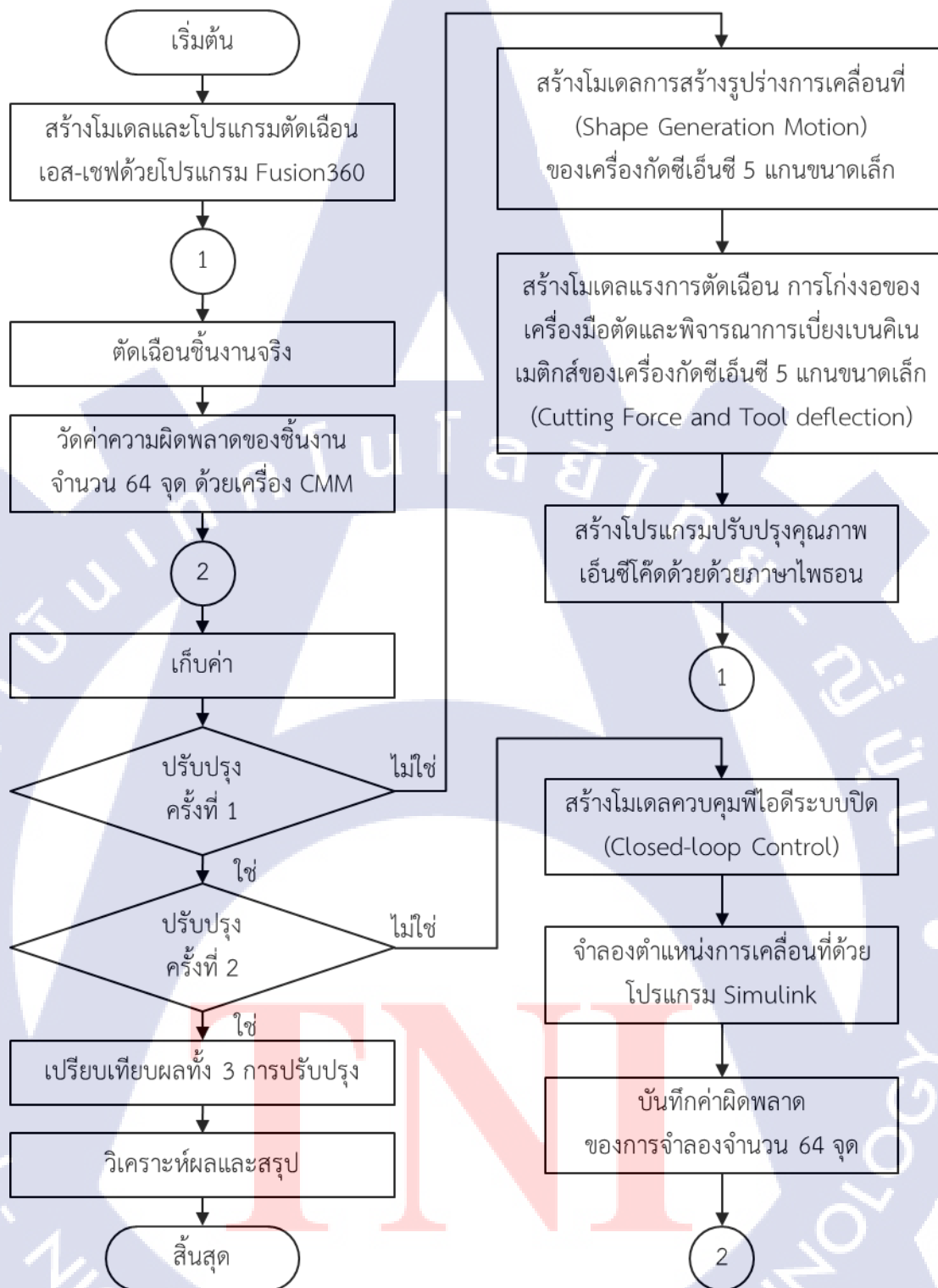
วิธีการดำเนินงานในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ใช้ระเบียบวิธีวิจัยเชิงทดลอง เพื่อให้งานวิจัยบรรลุผลและ
เป็นไปตามวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยจึงได้กำหนดวิธีดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- กระบวนการดำเนินการวิจัย
- การสร้างโมเดล CAD/CAM จากโปรแกรม Fusion 360
- การสร้างโมเดลการเคลื่อนที่คิเนแมติกส์ของกระบวนการกัด
- การปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดด้วยโปรแกรมภาษาไพธอน
- วิธีการตัดเฉือนจริงในกระบวนการกัด
- การวัดค่าความผิดพลาดด้วย CMM และการเปรียบเทียบผล
- การจำลองการปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดด้วยระบบควบคุมพีไอดีแบบปิด

3.1 กระบวนการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดบนพื้นฐานการตัดเฉือนเสมือนจริงของ
กระบวนการกัดพื้นผิวรูปร่างเอส-เชฟด้วยวิธีพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนแมติกส์ พิกัดรูปร่างเรขาคณิต
การโค้งงอของเอ็นมิลและวิธีควบคุมพีไอดีแบบปิดบนเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก และสร้าง
โมเดลรูปร่างการเคลื่อนที่บนพื้นฐานการจำลองโมเดลคณิตศาสตร์แบบไฮโมจีเนียสทราสפורเมชัน
เมทริกซ์ 4X4 หลังจากนั้นเขียนโปรแกรมชดเชยความผิดพลาดด้วยภาษาไพธอนก่อนนำไปทดสอบผล
และจำลองการควบคุมด้วยพีไอดีระบบปิด ดังรูปที่ 3.1 ได้ดังนี้

TNI



รูปที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ด

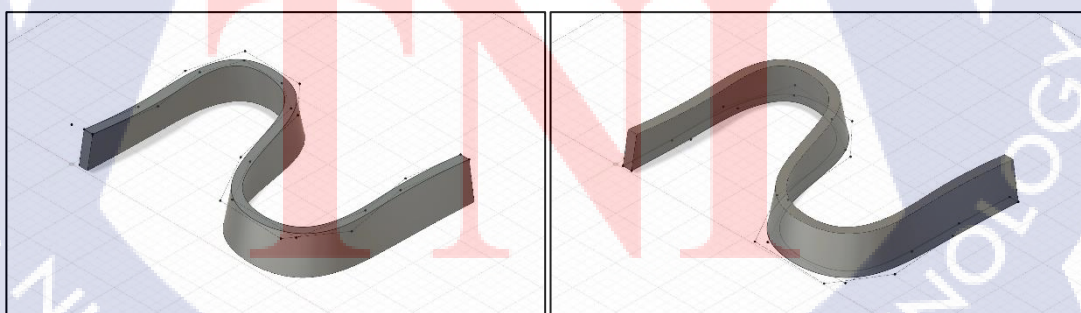
จากรูปที่ 3.1 มีระเบียบวิธีการวิจัยดังต่อไปนี้

- 1) สร้างโมเดลและโปรแกรมตัดเฉือนเอส-เซฟด้วยโปรแกรม Fusion360 อ้างอิงการสร้างโมเดลตามมาตรฐาน ISO 10791
- 2) วัดค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชิ้นงานด้วยเครื่อง CMM อ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 230-1
- 3) สร้างโมเดลการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก
- 4) สร้างโมเดลแรงการตัดเฉือน การโค้งงอของเครื่องมือตัดและพิจารณาการเบี่ยงเบนคินเมติกส์ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก
- 5) สร้างโปรแกรมปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดด้วยโปรแกรมภาษาไพธอน
- 6) สร้างโมเดลควบคุมพีไอดีระบบปิด
- 7) ยืนยันผลการจำลองเปรียบเทียบการตัดเฉือนจริง

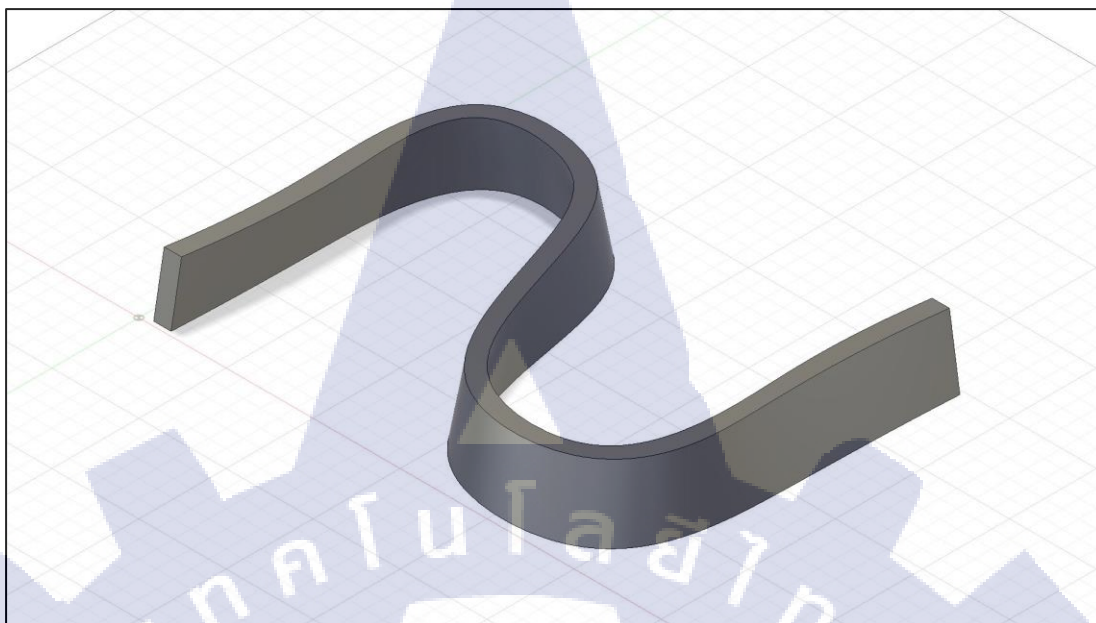
3.2 การสร้างโมเดล CAD/CAM จากโปรแกรม Fusion 360

3.2.1 การสร้างโมเดล CAD จากโปรแกรม Fusion 360

เอส-เซฟถูกเสนอให้เป็นรูปร่างที่ใช้สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกัด 5 แกนตามมาตรฐาน ISO 10791-7 [23] ประกอบไปด้วยส่วนเส้นโค้ง 4 เส้นที่มีจุดควบคุม 12 จุด [24] ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งเส้นโค้งทั้ง 4 เส้นถูกนำมาสร้างเป็นรูปร่างโดยการจับคู่ 2 คู่ เส้นโค้งควบคุม P และ M ถูกนำมาสร้างผิวด้านบนของเอส-เซฟ ส่วนเส้นโค้งควบคุม Q และ N ถูกนำมาสร้างผิวด้านล่างของเอส-เซฟ ดังแสดงที่รูป 3.2 และ 3.3 เมื่อใช้ฟังก์ชันลอฟท์ (Loft) ของโปรแกรม Fusion360 จะได้เอส-เซฟดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.2 พิกัดจุดเส้นโค้งควบคุม P และ M รูปที่ 3.3 พิกัดจุดเส้นโค้งควบคุม Q และ N



รูปที่ 3.4 เอส-เชฟหลังจากใช้ฟังก์ชันลอฟต์ด้วยโปรแกรม Fusion360

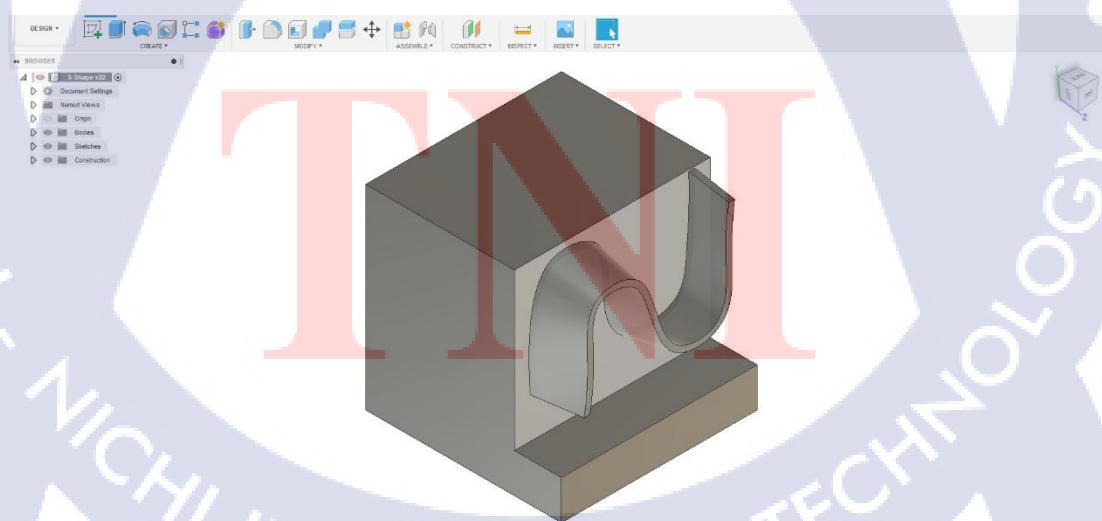
ตารางที่ 3.1 พิกัดจุดเส้นโค้งควบคุม P และ M

P	X	Y	Z	M	X	Y	Z
P0	12	2.5	40	M0	22	2.5	40
P1	21	57	40	M1	32	69	40
P2	12	121	40	M2	22	128	40
P3	27	176	40	M3	36	166	40
P4	92	175	40	M4	81	165	40
P5	123	142	40	M5	112	145	40
P6	142	67	40	M6	132	66	40
P7	170	18	40	M7	164	10	40
P8	246	17	40	M8	238	7	40
P9	259	85	40	M9	272	56	40
P10	250	141	40	M10	259	126	40
P11	258	197.5	40	M11	268	197.5	40

ตารางที่ 3.2 พิกัดจุดเส้นโค้งควบคุม Q และ N

Q	X	Y	Z	N	X	Y	Z
Q0	6	2.5	0	N0	16	2.5	0
Q1	9	57	0	N1	19	69	0
Q2	5	121	0	N2	15	128	0
Q3	25	185	0	N3	35	174	0
Q4	95	182	0	N4	81	172	0
Q5	130	145	0	N5	120	149	0
Q6	137	65	0	N6	126	63	0
Q7	168	10	0	N7	160	3	0
Q8	255	14	0	N8	243	1	0
Q9	262	85	0	N9	275	52	0
Q10	261	141	0	N10	270	125	0
Q11	264	197.5	0	N11	274	197.5	0

เนื่องจากเอส-เซฟที่ได้จากจุดพิกัดส่วนโค้งมีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่ทำงาน (Workspace) ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก ผู้วิจัยจึงลดขนาดลงเหลือ 15% จากขนาดที่ได้จากจุดพิกัดของเอส-เซฟเพื่อให้อยู่ในขอบเขตของการและเมื่อรวมกับการจับยึดแล้วจะได้รูปร่างดังรูปที่ 3.5

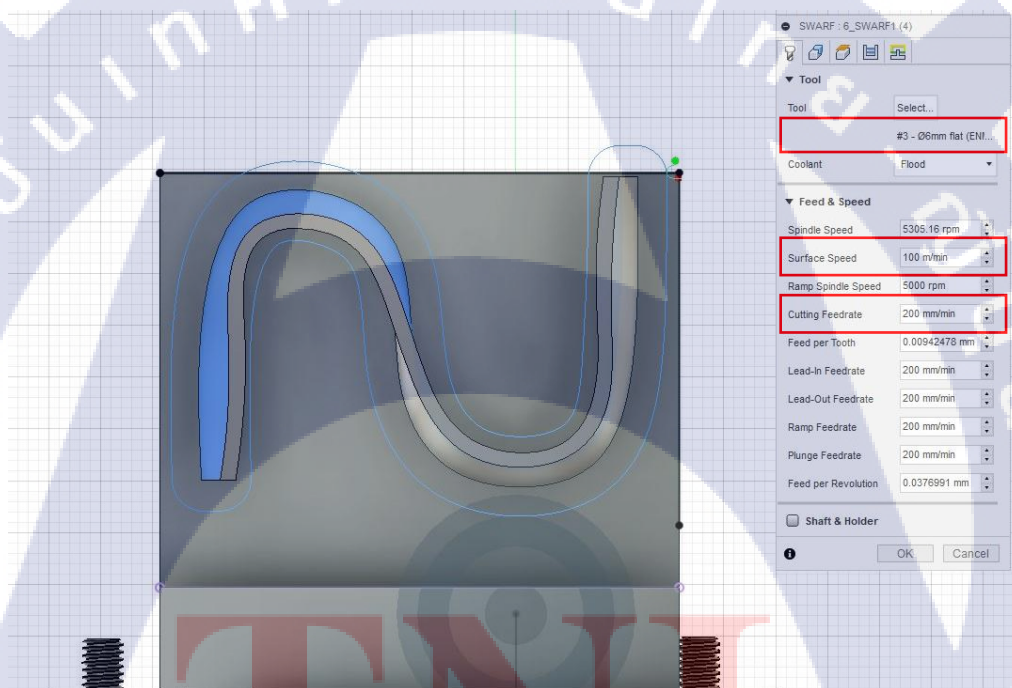


รูปที่ 3.5 CAD ของเอส-เซฟที่ใช้ในการวิจัย

3.2.2 การสร้างโปรแกรม CAM จากโปรแกรม Fusion 360

โปรแกรม Fusion 360 มีส่วนของ CAM ชื่อว่าแมนูแฟกเจอร์ (Manufacture) ซึ่งมีรูปแบบการตัดเฉือนสำหรับงานหลายแกน (Multi-Axis) สำหรับการกัดเอส-เซฟเป็นการกัดแบบใช้ด้านข้างของเอ็นมิล (Peripheral Machining) ซึ่งตรงกับรูปแบบที่ชื่อว่า สวาร์ฟ (Swarf)

ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้เอ็นมิลเหล็กกล้ารอบสูง (HSS) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. จำนวน 4 คมตัด (4 Flute) มุมเลี้ยว 30 องศา (Helix Angle) กำหนดตัวแปรการกัดไว้ดังนี้ ความเร็วตัด (V_c) = 100 ม./นาที อัตราป้อน 200 มม./นาที ความลึกการกัด (Depth of Cut) = -13 มม. จากผิวชิ้นงาน เป็นการกัดแบบเดินกัดครั้งเดียว (Single Passes) ดังรูปที่ 3.6 ที่แสดงการกำหนดตัวแปรการกัด จากนั้นจำลองการกัด (Simulation) และสร้างเอ็นซีโค้ดเพื่อนำไปตัดเฉือนจริงต่อไปดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 การกำหนดตัวแปรการกัด



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการจำลองการกัดและเอ็นซีโค้ด

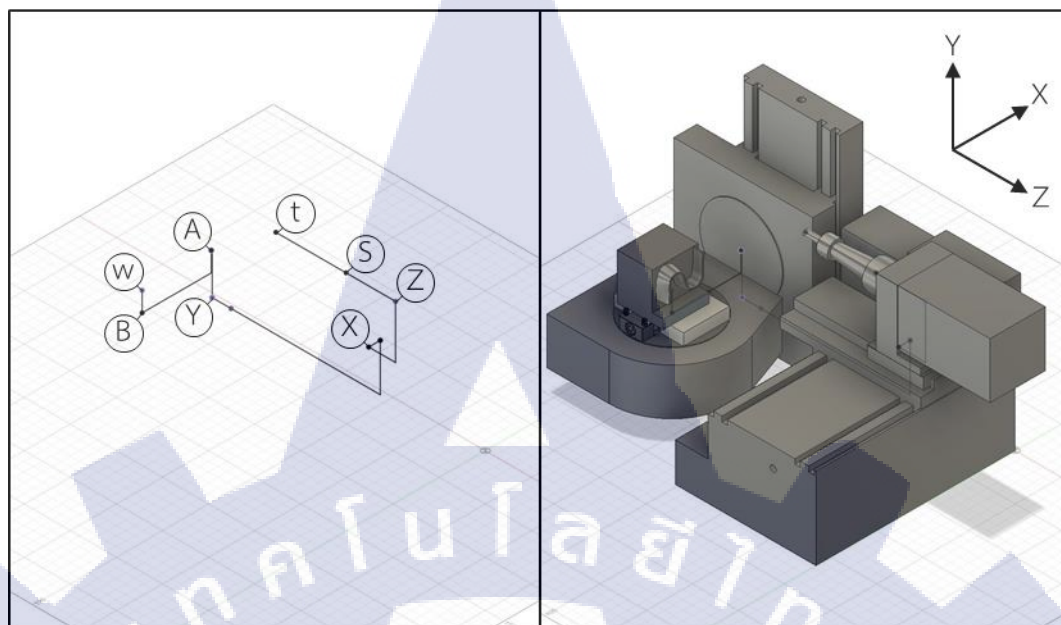
3.3 การสร้างโมเดลการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของกระบวนการกัด

3.2.1 โมเดลการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของกระบวนการกัดเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกน

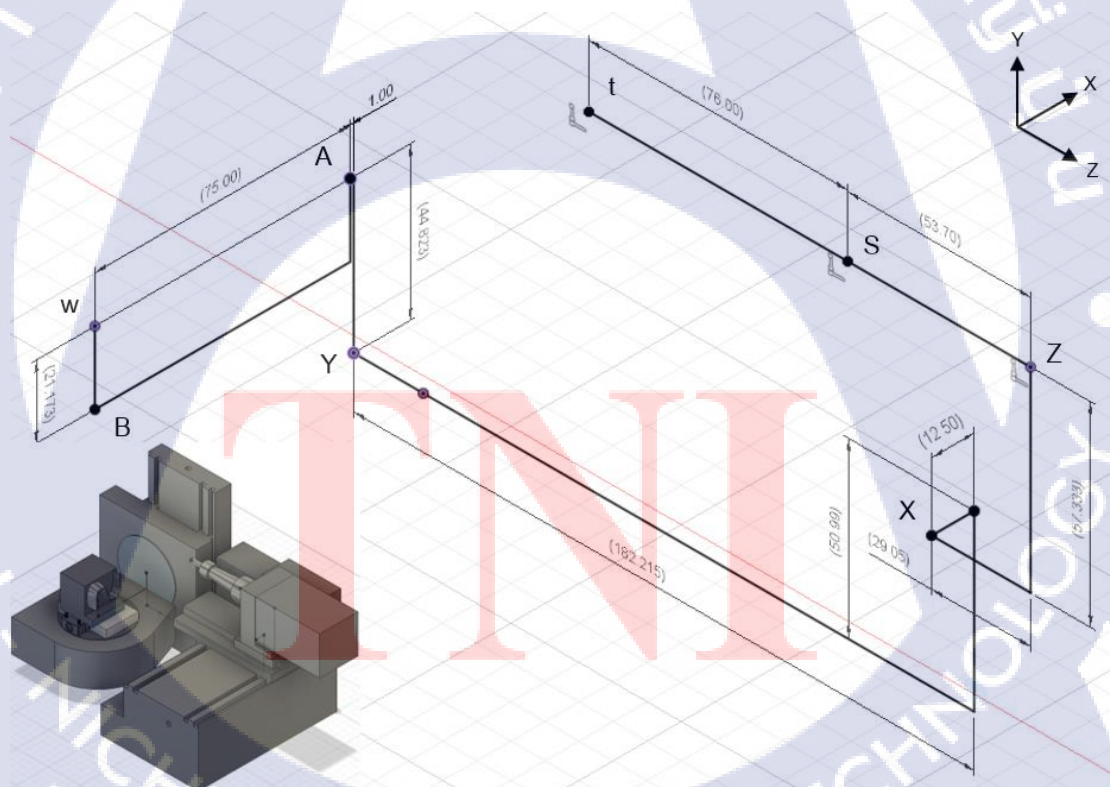
โมเดลการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของกระบวนการกัดเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีโครงสร้างแตกต่างกันตามแต่ละประเภทสำหรับงานวิจัยนี้เลือกศึกษาเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก ที่มีลักษณะเป็นเครื่องกัดแนวอนและเป็นประเภทชิ้นงานหมุน (Workpiece Rotation Type) โดยมีการเคลื่อนที่เชิงเส้น 3 แกน คือ แกน X, Y, Z และมีการเคลื่อนที่เชิงมุม 2 แกน คือ แกน A และแกน B ซึ่งหมุนรอบแกนเชิงเส้นแกน X และแกน Y ตามลำดับ การสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่ (Shape Generation Motion) พิจารณาจากแผนผังการเคลื่อนที่หลัก (Main Motion) และการเคลื่อนที่แนวป้อน (Feed Motion) จากชิ้นงานจนถึงปลายเครื่องมือตัดดังแสดงในรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 โดยจัดให้อยู่ในรูปการคำนวณคณิตศาสตร์ทางโฮโมจีเนียสทรานส์ฟอร์มเมชันเมทริกซ์ 4x4 (Homogeneous Transformation Matrix: HTM 4x4)

การสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.1

$$\begin{aligned}
 r_w = & A^2(d1y) E_{BA} A^1(d2x) A^2(d2y) E_{AY} A^1(d3x) A^2(d3y) A^3(d3z) E_{YX} \\
 & A^3(d4z) A^1(d4x) A^2(d4y) E_{XZ} A^3(d5z) A^2(d5y) E_{ZS} A^3(d6z) E_{ST} A^3(d7z) \\
 & A_{PC} A^4(\phi) A^5(\psi) A^6(S) E_{DF} r_t
 \end{aligned} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.8 แผนผังการเคลื่อนที่หลัก (Main Motion) และการเคลื่อนที่แนวป้อน (Feed Motion)



รูปที่ 3.9 ขนาดระยะการเคลื่อนที่แต่ละคู่แกน

โดยที่	r_w	คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของจุดในระบบพิกัดชิ้นงาน
	r_t	คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของจุดในระบบพิกัดที่ปลายดอกกัด
	A^1	คือ HTM 4x4 ของการเคลื่อนที่เชิงเส้นแกน X
	A^2	คือ HTM 4x4 ของการเคลื่อนที่เชิงเส้นแกน Y
	A^3	คือ HTM 4x4 ของการเคลื่อนที่เชิงเส้นแกน Z
	A^4	คือ HTM 4x4 ของการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน X
	A^5	คือ HTM 4x4 ของการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y
	PC	คือ ตัวแปรการเคลื่อนที่เชิงเส้นประกอบไปด้วย x, y, z ตามแกน X, Y และ Z ตามลำดับ
	ϕ, ψ	คือ ตัวแปรการเคลื่อนที่เชิงมุมแกน X และ Y ตามลำดับ
	d_{ij}	คือ ระยะทางระหว่างคู่ชิ้นส่วน i ในทิศทาง j
	E_{BA}	คือ ความผิดพลาดการเคลื่อนที่ของตำแหน่งและทิศทางระหว่างแกน B กับแกน A
	E_{AY}	คือ ความผิดพลาดการเคลื่อนที่ของตำแหน่งและทิศทางระหว่างแกน A กับแกน Y
	E_{YX}	คือ ความผิดพลาดการเคลื่อนที่ของตำแหน่งและทิศทาง ระหว่างแกน Y กับแกน X
	E_{XZ}	คือ ความผิดพลาดการเคลื่อนที่ของตำแหน่งและทิศทางระหว่างแกน X กับแกน Z
	E_{ZS}	คือ ความผิดพลาดการเคลื่อนที่ของตำแหน่งและทิศทางระหว่างแกน Z กับเพลาหมุน
	E_{ST}	คือ ความผิดพลาดการเคลื่อนที่ของตำแหน่งและทิศทางระหว่างเพลาหมุนกับเอ็นมิล
	E_{DF}	คือ ความผิดพลาดจากการโค้งงอของเอ็นมิล
	r_t	คือ เวกเตอร์ตำแหน่งจุดปลายเอ็นมิล

ความผิดพลาดของเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็กในงานวิจัยนี้พิจารณาจากมาตรฐาน ISO 10791-6 ประกอบด้วย ตัวแปรดังรูปที่ 3.10 ความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางระหว่างแต่ละคู่แกนมีจำนวนทั้งหมด 13 ค่าและจะถูกนำไปคำนวณในสมการที่ 3.1

โดยที่	α_{zs}	คือ ความผิดพลาดเชิงมุมในแนวหมุนรอบแกน A ของคู่ชิ้นส่วนแกน Z กับเพลาหมุน
	β_{zs}	คือ ความผิดพลาดเชิงมุมในแนวหมุนรอบแกน B ของคู่ชิ้นส่วนแกน Z กับเพลาหมุน

β_{XZ}	คือ ความผิดพลาดเชิงมุมในแนวหมุนรอบแกน B ของคู่ชิ้นส่วนแกน X กับ Z
α_{YX}	คือ ความผิดพลาดเชิงมุมในแนวหมุนรอบแกน A ของคู่ชิ้นส่วนแกน Y กับ X
γ_{YX}	คือ ความผิดพลาดเชิงมุมในแนวหมุนรอบแกน C ของคู่ชิ้นส่วนแกน Y กับ X
β_{AY}	คือ ความผิดพลาดเชิงมุมในแนวหมุนรอบแกน B ของคู่ชิ้นส่วนแกน A กับ Y
γ_{AY}	คือ ความผิดพลาดเชิงมุมในแนวหมุนรอบแกน C ของคู่ชิ้นส่วนแกน A กับ Y
δ_{yAY}	คือ ความผิดพลาดเชิงเส้นในแกน Y ของคู่ชิ้นส่วนแกน A กับ Y
δ_{zAY}	คือ ความผิดพลาดเชิงเส้นในแกน Z ของคู่ชิ้นส่วนแกน A กับ Y
α_{BA}	คือ ความผิดพลาดเชิงมุมในแนวหมุนรอบแกน A ของคู่ชิ้นส่วนแกน B กับ A
γ_{BA}	คือ ความผิดพลาดเชิงมุมในแนวหมุนรอบแกน C ของคู่ชิ้นส่วนแกน B กับ A
δ_{xBA}	คือ ความผิดพลาดเชิงเส้นในแกน X ของคู่ชิ้นส่วนแกน B กับ A
δ_{zBA}	คือ ความผิดพลาดเชิงเส้นในแกน Z ของคู่ชิ้นส่วนแกน B กับ A

โดยที่ตัวแปรทั้ง 13 ค่ามีความสัมพันธ์กับค่าความผิดพลาดการเคลื่อนที่ดังสมการที่ 3.2 ถึง

3.6

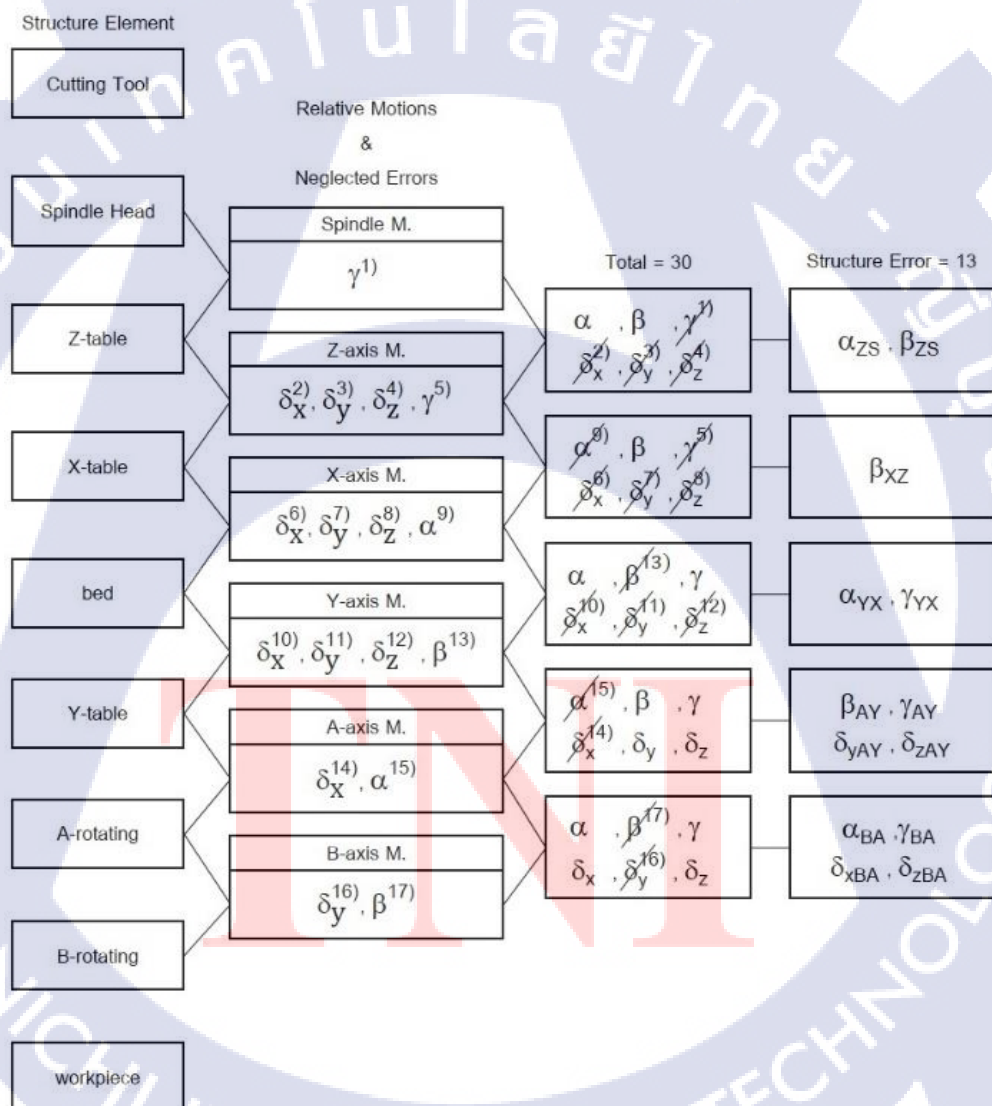
$$E_{BA} = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_{BA} & 0 & \delta_{xBA} \\ \gamma_{BA} & 1 & -\alpha_{BA} & 0 \\ 0 & \alpha_{BA} & 1 & \delta_{zBA} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$E_{AY} = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_{AY} & \beta_{AY} & 0 \\ \gamma_{AY} & 1 & 0 & \delta_{yAY} \\ -\beta_{AY} & 0 & 1 & \delta_{yAY} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$E_{YX} = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_{YX} & 0 & 0 \\ \gamma_{YX} & 1 & -\alpha_{YX} & 0 \\ 0 & \alpha_{YX} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$E_{XZ} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \beta_{XZ} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\beta_{XZ} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$E_{ZS} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \beta_{ZS} & 0 \\ 0 & 1 & -\alpha_{ZS} & 0 \\ -\beta_{ZS} & \alpha_{ZS} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.10 แผนผังการพิจารณาค่าความผิดพลาดของเครื่องซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก

สำหรับตัวแปรตามสมการที่ 3.1 นำมาจากการวัดขนาดของเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็กดังนี้ $d1y = -21.1734$ มม. $d2x = 75$ มม. $d2y = 21.1734$ มม. $d3x = 1$ มม. $d3y = -44.823$ มม. $d3z = 20.455$ มม. $d4z = 161.76$ มม. $d4x = -12.5$ มม. $d4y = 50.99$ มม. $d5z = 29.05$ มม. $d5y = 57.333$ มม. $d6z = -53.7$ มม. $d7z = -76$ มม.

3.2.2 โมเดลแรงการตัดเฉือนของเอ็นมิล

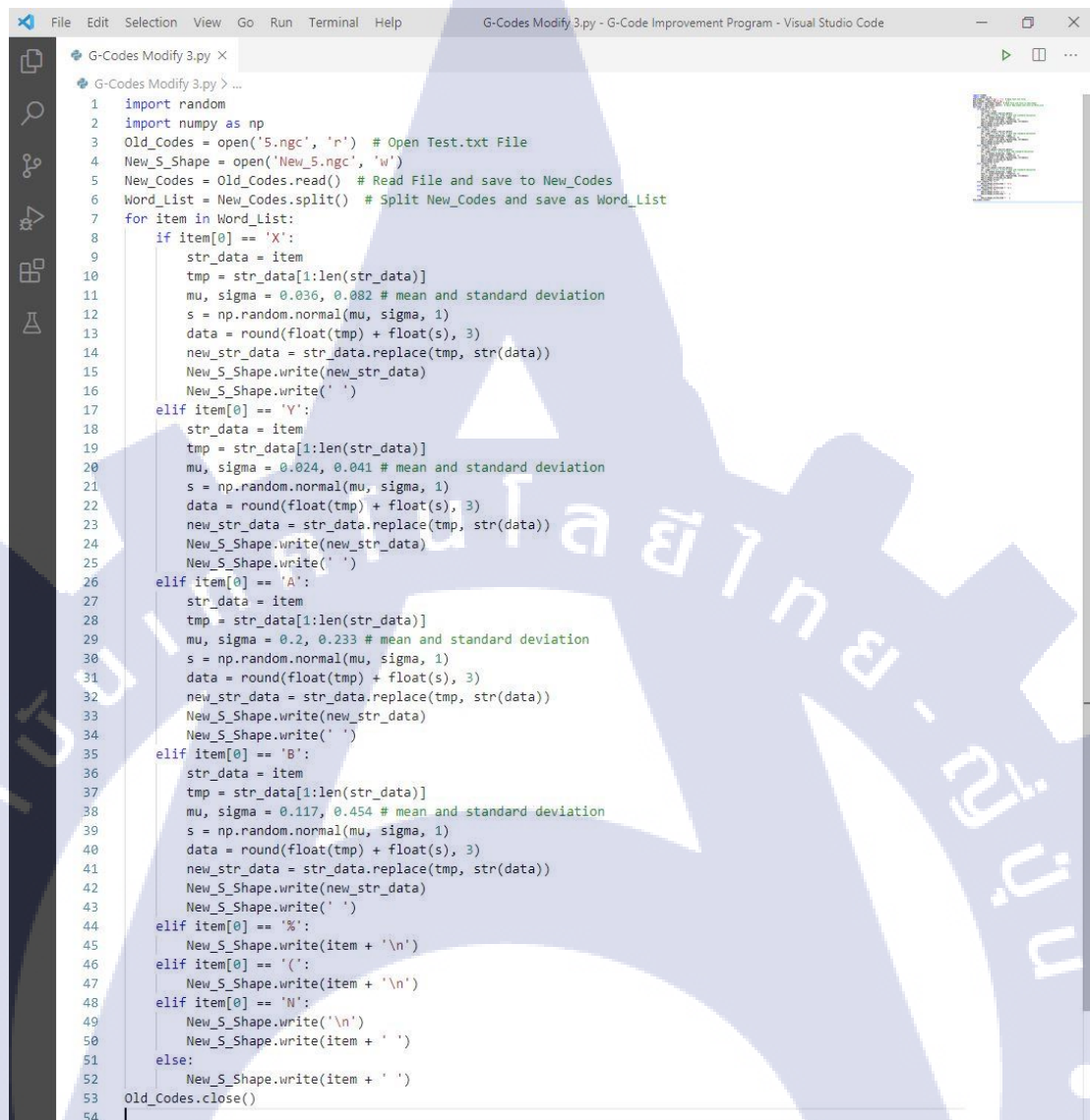
แรงการตัดเฉือนของเอ็นมิลประกอบไปด้วยแรง 3 แรง คือ แรงตามแนวสัมผัส (Tangential Cutting Forces: dF_t) แรงตามแนวรัศมี (Radial Cutting Forces: dF_r) และแรงตามแนวแกน (Axial Cutting Forces: dF_a) ดังแสดง ในหัวข้อที่ 2.3.1 ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงตัดที่นำเสนอโดย Soori และคณะ [6] ที่ได้ทำการทดลองและยืนยันผลแล้วมาใช้ในการคำนวณเพื่อหาแรงลัพธ์ของการตัดเฉือนได้ตามสมการที่ 3.1

3.2.3 โมเดลการโก่งงอของเอ็นมิล

การโก่งงอของเอ็นมิลขณะกัดชิ้นงานมีผลต่อความถูกต้องเที่ยงตรงและแม่นยำของชิ้นงาน โดยการโก่งงอเกิดจากแรงที่กระทำต่อเอ็นมิล ทำให้จุดพิกัดของเอ็นมิลผิดพลาดไปจากทฤษฎี เพื่อให้ความผิดพลาดน้อยที่สุดจึงจำเป็นต้องพิจารณาการโก่งงอของเอ็นมิลซึ่งการคำนวณได้นำแรงลัพธ์ที่ได้จากหัวข้อ 3.2.2 มาคำนวณในสมการ (3.1) โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงตัดไว้ คือ $K_{tc} = 937.334$, $K_{te} = 5.0386$, $K_{rc} = 292.067$, $K_{re} = 6.7597$, $K_{ac} = 171.37$ และ $K_{ae} = -0.83067$, $E = 200$ Gpa

3.4 การปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดด้วยโปรแกรมภาษาไพธอน

การปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดผู้วิจัยได้พิจารณาบนพื้นฐานการเบี่ยงเบนคิเนแมติกส์ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก โดยทำงานสร้างโปรแกรมปรับปรุงด้วยภาษาไพธอนโดยมีขั้นตอนการปรับปรุงดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.8 หัวข้อ 2.6 โปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.11



```

1  import random
2  import numpy as np
3  Old_Codes = open('5.ngc', 'r') # Open Test.txt File
4  New_S_Shape = open('New_5.ngc', 'w')
5  New_Codes = Old_Codes.read() # Read File and save to New_Codes
6  Word_List = New_Codes.split() # Split New_Codes and save as Word_List
7  for item in Word_List:
8      if item[0] == 'X':
9          str_data = item
10         tmp = str_data[1:len(str_data)]
11         mu, sigma = 0.036, 0.082 # mean and standard deviation
12         s = np.random.normal(mu, sigma, 1)
13         data = round(float(tmp) + float(s), 3)
14         new_str_data = str_data.replace(tmp, str(data))
15         New_S_Shape.write(new_str_data)
16         New_S_Shape.write(' ')
17     elif item[0] == 'Y':
18         str_data = item
19         tmp = str_data[1:len(str_data)]
20         mu, sigma = 0.024, 0.041 # mean and standard deviation
21         s = np.random.normal(mu, sigma, 1)
22         data = round(float(tmp) + float(s), 3)
23         new_str_data = str_data.replace(tmp, str(data))
24         New_S_Shape.write(new_str_data)
25         New_S_Shape.write(' ')
26     elif item[0] == 'A':
27         str_data = item
28         tmp = str_data[1:len(str_data)]
29         mu, sigma = 0.2, 0.233 # mean and standard deviation
30         s = np.random.normal(mu, sigma, 1)
31         data = round(float(tmp) + float(s), 3)
32         new_str_data = str_data.replace(tmp, str(data))
33         New_S_Shape.write(new_str_data)
34         New_S_Shape.write(' ')
35     elif item[0] == 'B':
36         str_data = item
37         tmp = str_data[1:len(str_data)]
38         mu, sigma = 0.117, 0.454 # mean and standard deviation
39         s = np.random.normal(mu, sigma, 1)
40         data = round(float(tmp) + float(s), 3)
41         new_str_data = str_data.replace(tmp, str(data))
42         New_S_Shape.write(new_str_data)
43         New_S_Shape.write(' ')
44     elif item[0] == '%':
45         New_S_Shape.write(item + '\n')
46     elif item[0] == ' ':
47         New_S_Shape.write(item + '\n')
48     elif item[0] == 'N':
49         New_S_Shape.write('\n')
50         New_S_Shape.write(item + ' ')
51     else:
52         New_S_Shape.write(item + ' ')
53 Old_Codes.close()
54

```

รูปที่ 3.11 ตัวอย่างโปรแกรมปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ด

เมื่อทำการปรับปรุงด้วยโปรแกรมแล้วเอ็นซีโค้ดใหม่ได้ถูกปรับปรุงบนพื้นฐานการพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์แล้วจะได้เอ็นซีโค้ดที่เปลี่ยนไปดังแสดงที่รูป 3.12

S.ngc - Notepad File Edit Format View Help % (AXIS,stop) (5) N1 G21 N2 G90 G94 G40 G17 G91.1 N3 G53 G0 Z0. (5_SWARF1 3) N4 G49 N5 M5 N6 G53 G0 X63.5 Y63.5 N7 M0 N8 T3 M6 N9 S5000 M3 N10 G54 G0 N11 G0 A-0.089 B2.55 N12 M8 N13 G1 X17.78 Y42.006 F1000. N14 G43 Z39.183 H3 N15 G1 A-0.089 B2.55 N16 X16.798 Y41.972 Z17.148 F1000. N17 Z14.382 F200. N18 X16.772 Z14.208 N19 X16.697 Y41.973 Z14.049 N20 X16.579 Y41.974 Z13.919 N21 X16.429 Y41.977 Z13.828 N22 X16.258 Y41.979 Z13.785 N23 G93 X16.307 Y41.978 Z13.496 A-0.075 B3.542 F301 N24 X16.352 Y41.977 Z13.208 A-0.062 B4.537 F303.4028 N25 X16.412 Y42.091 Z12.71 A-0.323 B5.581 F210.831	New_S.ngc - Notepad File Edit Format View Help % (AXIS,stop) (5) N1 G21 N2 G90 G94 G40 G17 G91.1 N3 G53 G0 Z0.0 (5_SWARF1 3) N4 G49 N5 M5 N6 G53 G0 X63.508 Y63.51 N7 M0 N8 T3 M6 N9 S5000 M3 N10 G54 G0 N11 G0 A-0.063 B2.584 N12 M8 N13 G1 X17.789 Y42.007 F1000. N14 G43 Z39.183 H3 N15 G1 A-0.07 B2.557 N16 X16.799 Y41.976 Z17.148 F1000. N17 Z14.382 F200. N18 X16.775 Z14.208 N19 X16.704 Y41.973 Z14.049 N20 X16.588 Y41.984 Z13.919 N21 X16.435 Y41.987 Z13.828 N22 X16.263 Y41.985 Z13.785 N23 G93 X16.315 Y41.984 Z13.496 A-0.027 B3.591 F301 N24 X16.356 Y41.986 Z13.208 A-0.018 B4.58 F303.4028 N25 X16.417 Y42.095 Z12.71 A-0.308 B5.602 F210.831
--	---

a) ก่อนปรับปรุง

b) หลังปรับปรุง

รูปที่ 3.12 โปรแกรมเอ็นซีโค้ดก่อนและหลังปรับปรุง

หลังจากได้เอ็นซีโค้ดใหม่จะถูกนำไปตัดเฉือนจริงอีกครั้งและวัดขนาดด้วย CMM เพื่อเปรียบเทียบผลระหว่างแบบเดิมและแบบปรับปรุงใหม่ต่อไป

3.5 วิธีการตัดเฉือนในกระบวนการกัด

การตัดเฉือนในกระบวนการกัดชิ้นงานบนเครื่องซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็กมีขั้นตอนการดำเนินการดังอธิบายดังต่อไปนี้

3.5.1 กำหนดตำแหน่งศูนย์เครื่องกัด

การตัดเฉือนเอส-เซฟบนเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็กจำเป็นต้องกำหนดระยะทางจากศูนย์การเคลื่อนที่แกน B ถึงศูนย์การเคลื่อนที่แกน A เพราะการชดเชยตำแหน่งปลายเครื่องมือตัดของโปรแกรมได้คิดคำนวณจากศูนย์ของเครื่องกัดเอง โดยมีค่าแตกต่างกันไปตามแต่ละหมายเลขเครื่องกัด ซึ่งเครื่องกัดนี้มีหมายเลข 1226 และมีระยะอยู่ที่ 0.8336 นิ้ว หรือ 21.173 มม. แสดงจากคู่มือเครื่องกัดดังรูปที่ 3.13

PocketNC Spindle Guide

The 1/2" single flute end mill shipped with your machine should not be used for plunging or cutting metals.
(Part Number 528508 - Carbide, Plastic Cutting End Mill - Square Upcut Single Flute)

Distance from B-Table to Center of A axis rotation

Nominal "B-table offset": 0.836 in

Measured "B-table offset": 0.8336 in

Tool Offset Setup Procedure (used to tell the machine where the end of the tool is in relation to the machine origin)

- 1) Home machine
- 2) Use the tool probe to measure the tool length offset.

Alternatively, measure the tool length offset by hand by following the directions here:

<http://www.pocketnc.com/v2-getting-started> >> Tool Length Offset

Tool Holder Change

- 1) Turn off spindle and loosen the (3) spindle screws using the 3mm wrench
- 2) Tap spindle holder with the back end of the 3mm wrench and take out the tool holder
- 3) Reverse process for installing a new tool holder, being sure to tighten the (3) spindle screws evenly.

Tool Change

- 1) Using the Pocket NC spindle wrench and the 3mm driver (Both found in the tool kit)
- 2) Turn off spindle and place the 3mm driver into one of the 3 spindle screws
- 3) Using the Pocket NC spindle wrench loosen the collet nut while holding the spindle in place using the 3mm wrench
- 4) Change out or move tool and then reverse the process to tighten the tool holder
- 5) Remember to adjust the tool offset after changing or adjusting a tool

Other Information

Shipping position- X 1.26 Y 2.51 Z -3.333 A 90.00 B 0.00

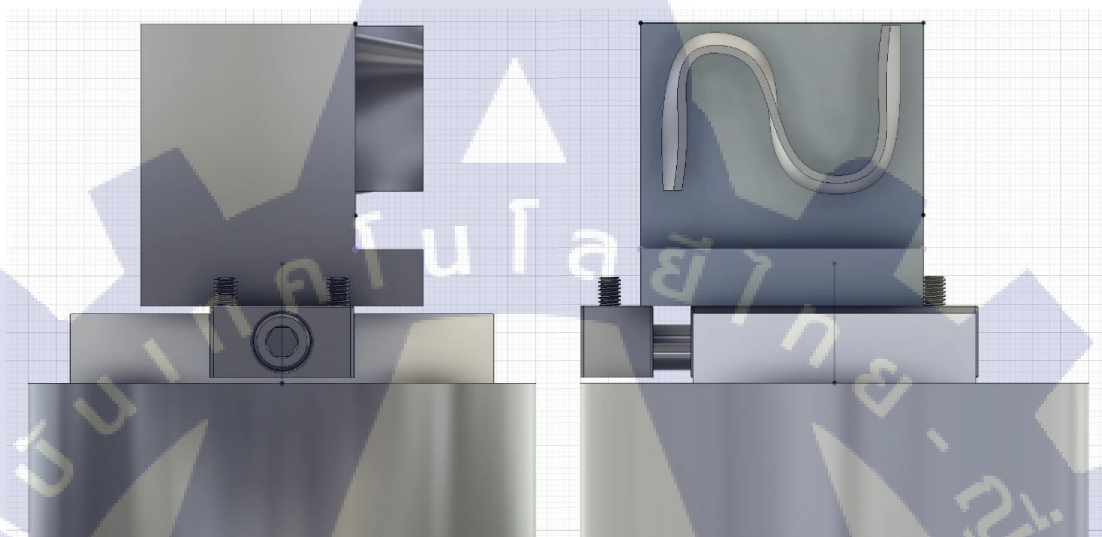
Collet Size- ER11

Machine Number: 1226

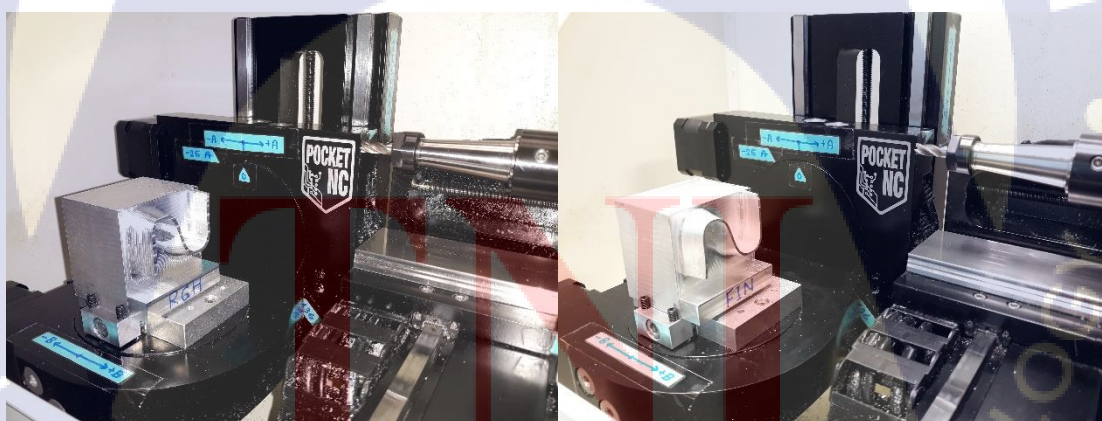
รูปที่ 3.13 ระยะทางจากศูนย์การเคลื่อนที่แกน B ถึงศูนย์การเคลื่อนที่แกน A

3.5.2 กำหนดตำแหน่งชิ้นงาน

การกำหนดตำแหน่งของโมเดลให้ตรงกับการตัดเฉือนจริงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยผู้วิจัยกำหนดให้แกน Z อยู่กึ่งกลางของชิ้นงานและแกน X อยู่ตำแหน่งปลายสุดของปากกาจับชิ้นงานดังรูปที่ 3.14 และวางชิ้นงานจริงให้ตรงกับโปรแกรมดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 ตำแหน่งการวางชิ้นงานในโปรแกรม Fusion 360



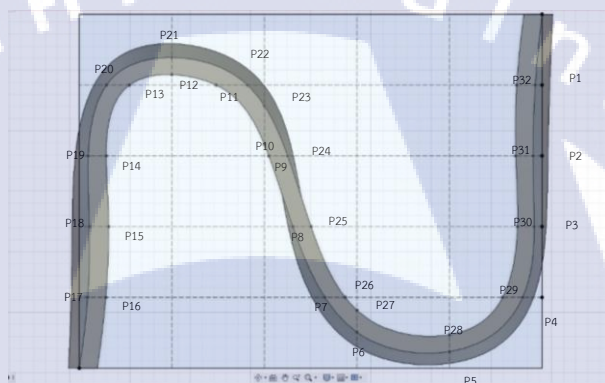
รูปที่ 3.15 ภาพก่อนและหลังการตัดเฉือนจริงด้วยเครื่องซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก

3.5.3 การตัดเฉือนจริง

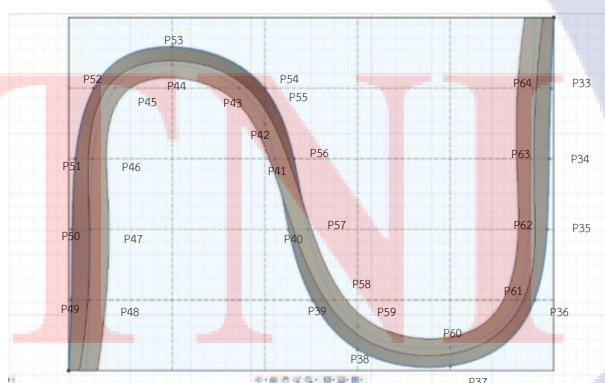
หลังจากได้จัดวางชิ้นงานให้ตรงกับโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว จะทำการตัดเฉือนจริงโดยการโหลดเอ็นซีโค้ดเข้าสู่เครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็กและเริ่มดำเนินการตัดเฉือนจนจบกระบวนการทั้งหมดจากนั้นนำชิ้นงานไปวัดขนาดด้วยเครื่อง CMM ต่อไป

3.6 การวัดค่าความผิดพลาดด้วย CMM และการเปรียบเทียบผล

ตำแหน่งพิกัดของชิ้นงานปกติจาก CAD โมเดลผู้วิจัยได้แบ่งจำนวนจุดทั้งหมด 64 จุด แบ่งเป็น 32 จุดที่ระนาบ $Z = 0$ และอีก 32 จุดที่ระนาบ $Z = -12$ โดยแต่ละจุดจะมีค่าพิกัด (X,Y) แตกต่างกันดังได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.16 a) และ b)



a) ตำแหน่งพิกัดการวัดของชิ้นงานปกติระนาบ $Z = 0$



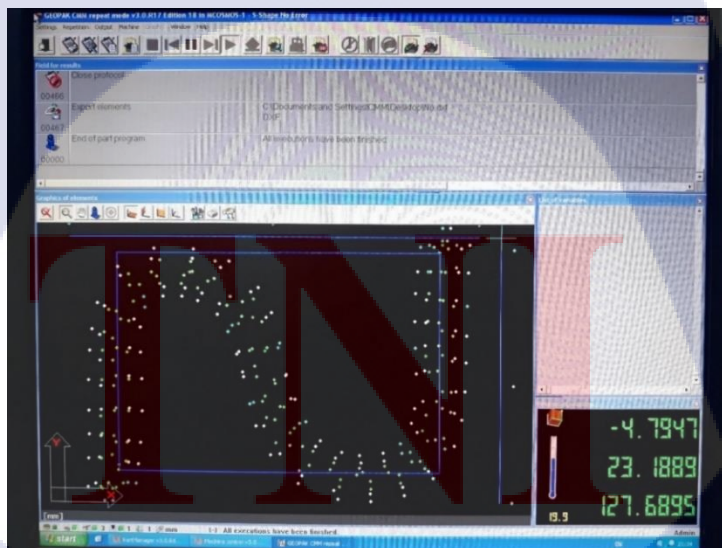
b) ตำแหน่งพิกัดการวัดของชิ้นงานปกติระนาบ $Z = -12$

รูปที่ 3.16 ตำแหน่งพิกัดการวัดชิ้นงาน

จากรูปที่ 3.16 a) และ b) แสดงตำแหน่งพิกัดของชิ้นงานปกติจาก CAD โมเดล เพื่อกำหนดจุดที่จะใช้วัดค่าด้วยเครื่อง CMM ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น Crysta-Apex S 7106 และใช้ซอฟต์แวร์การวัดยี่ห้อ Mitutoyo GEOPAK v.3.0 ในการวัดชิ้นงานและนำค่าพิกัดมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการวัด ดังรูปที่ 3.17 a) และ b)



a) ขั้นตอนการติดตั้งและการวัดชิ้นงาน



b) ภาพหน้าจอแสดงผลโปรแกรม GEOPAK

รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการวัดด้วย CMM

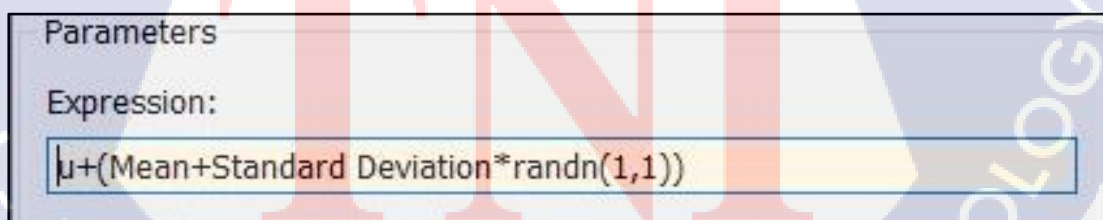
3.7 การจำลองการปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดด้วยระบบควบคุมพีไอดีแบบปิด

ระบบควบคุมพีไอดีแบบปิดเป็นการควบคุมแบบป้อนกลับของข้อมูลโดยอาศัยเซนเซอร์เป็นอุปกรณ์ส่งกลับค่าจริง แต่เนื่องจากเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็กไม่สามารถติดตั้งเซนเซอร์ได้ ผู้วิจัยจึงสร้างแบบจำลองการควบคุมด้วยโปรแกรมซิมูลิงค์โดยให้การปรับจูนโดยเป็นการปรับความสามารถของมอเตอร์ให้ดีขึ้น โดยค่าตัวแปรของมอเตอร์นำค่าจริงมาจากคู่มือของผู้ผลิตมอเตอร์ และฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) C. H. Yeung และ คณะ[25] ได้นำเสนอไว้และผู้วิจัยได้นำบางส่วนมาพิจารณาดังรูปที่ 3.18

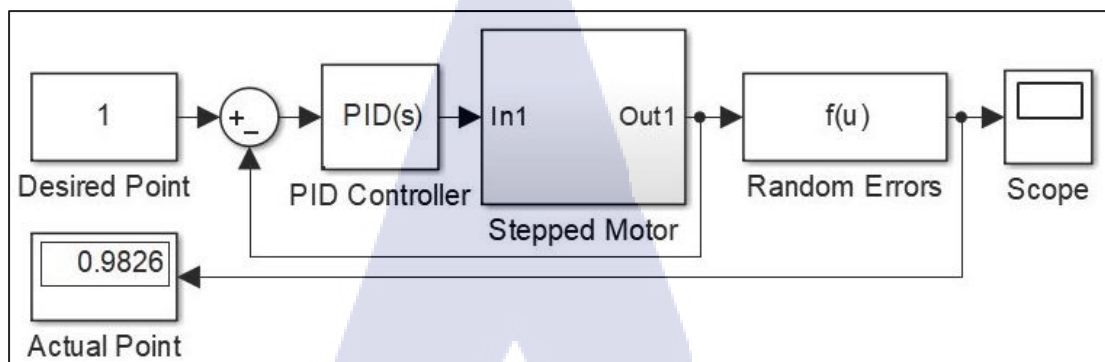


รูปที่ 3.18 ฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ของสเต็ปมอเตอร์

ระบบควบคุมพีไอดีแบบปิดเป็นกระบวนการแบบเชิงเส้น (Linearize Process) ทำให้ค่าป้อนกลับซึ่งผู้วิจัยกำหนดให้เป็นค่าสุ่มแบบการแจกแจงปกติ (Normal Distribution) ที่ได้จากการวัดและวิเคราะห์ผลการตัดเฉือนจริงมาพิจารณาแทนเซนเซอร์ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ฟังก์ชันสุ่มตัวเลขจากการแจกแจงปกติของค่าความผิดพลาดที่วัดได้จริง



รูปที่ 3.20 ระบบควบคุมพีไอดีแบบปิด

จากรูปที่ 3.20 ระบบควบคุมพีไอดีจำเป็นต้องปรับจูนตัวแปรด้วยตนเองโดยกำหนดลักษณะการปรับจูนให้ไม่เกิดการพุ่งเกิน (Overshoot) และเข้าสู่จุดกำหนด (Setpoint) เร็วที่สุด ซึ่งได้ค่าตัวแปรของระบบคือ $P = 2$, $I = 2$, $D = 0.5$ และค่าตัวกรอง (N) = 100

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากที่ได้ดำเนินการตามขั้นตอนวิธีวิจัย ผู้วิจัยได้ปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดบนพื้นฐานการตัดเฉือนเสมือนจริงและระบบควบคุมพีไอดีบนเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก ซึ่งจะวิเคราะห์ผลตามหัวข้อต่อไปนี้

- วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการตัดเฉือนจริง
- วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการตัดเฉือนจริงหลังปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ด
- วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการตัดเฉือนจริงกับการจำลองด้วยระบบควบคุมพีไอดีแบบปิด
- วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหลังการปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดร่วมกับการจำลองด้วยระบบควบคุมพีไอดีแบบปิด

4.1 วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการตัดเฉือนจริง

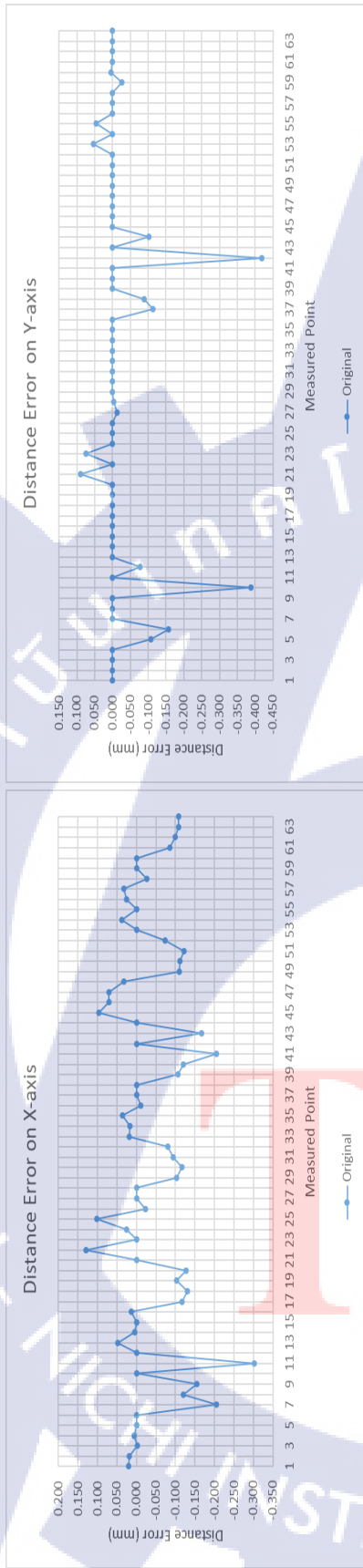
หลังจากได้กำหนดจุดในการวัดค่าแล้ว ผู้วิจัยได้นำเอ็นซีโค้ดที่ได้จากโปรแกรม CAM มาตัดเฉือนชิ้นงานจริงและวัดค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการตัดเฉือนจริงด้วยเครื่องมือวัด CMM โดยตำแหน่งพิกัดการวัดอ้างอิงมาจากตำแหน่งพิกัดชิ้นงานปกติจากรูปที่ 3.16 a) และ b) ได้ผลดังรูปที่ 4.1 a), b), c) และ d)

จากรูป a) ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการตัดเฉือนจริงของแกน X มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.036 มม. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 0.082

จากรูป b) ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการตัดเฉือนจริงของแกน Y มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.019 มม. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 0.080

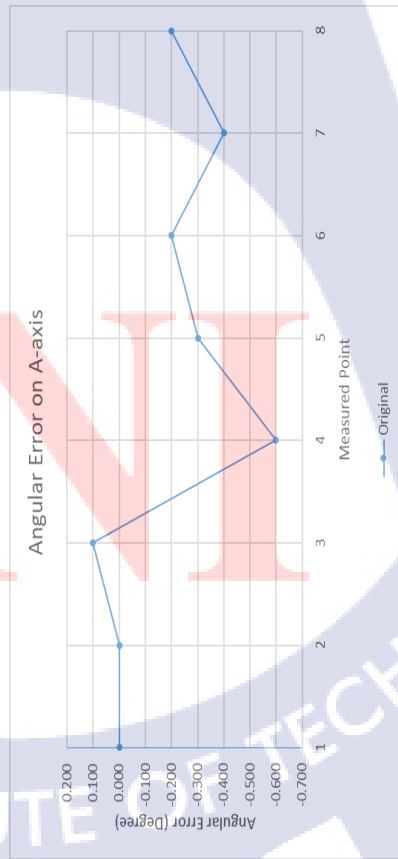
จากรูป c) ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการตัดเฉือนจริงของแกน A มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.200 มม. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 0.233

จากรูป d) ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการตัดเฉือนจริงของแกน B มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.117 มม. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 0.454 โดยผู้วิจัยได้นำค่าดังกล่าวมาปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดในครั้งต่อไป

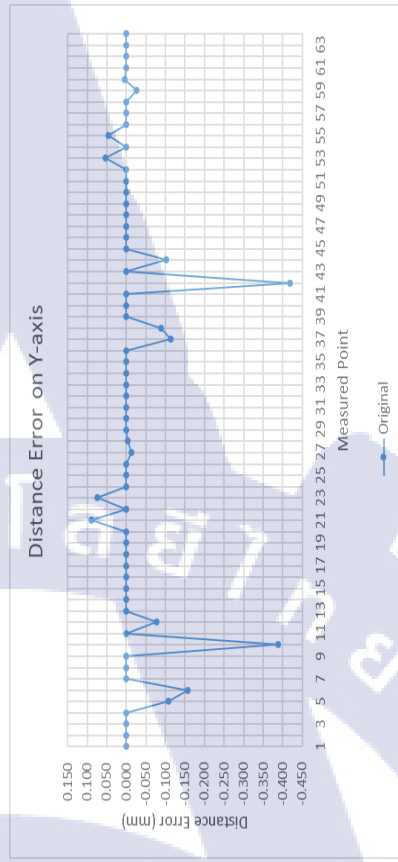


a) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงเส้นของแกน X

b) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงเส้นของแกน Y



c) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงมุมของแกน A



d) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงมุมของแกน B

รูปที่ 4.1 กราฟแสดงระยะผิดพลาดก่อนการปรับปรุง

4.2 วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการตัดเฉือนจริงหลังปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ด

หลังจากได้ปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดบนวิธีพิจารณาค่าเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ แรงตัดเฉือน และการโก่งงอของเครื่องมือตัดแล้ว ผู้วิจัยได้นำเอ็นซีโค้ดใหม่ที่ได้มาตัดเฉือนชิ้นงานจริงอีกครั้งและวัดค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการตัดเฉือนจริงด้วยเครื่องมือวัด CMM โดยตำแหน่งพิกัดการวัดอ้างอิงมาจากตำแหน่งพิกัดชิ้นงานปกติจากรูปที่ 3.16 a) และ b) ได้ผลดังรูปที่ 4.2 a), b), c) และ d)

รูป a) ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแกน X มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.024 มม. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 0.041 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของแกน X มีค่าลดลง 49.916%

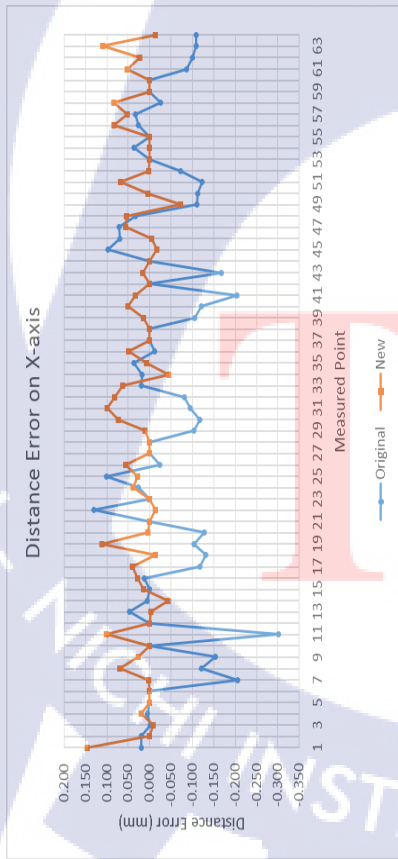
รูป b) ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแกน Y มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.004 มม. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 0.017 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของแกน Y มีค่าลดลง 78.890%

รูป c) ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแกน A มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.013 มม. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 0.099 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของแกน A มีค่าลดลง 57.465%

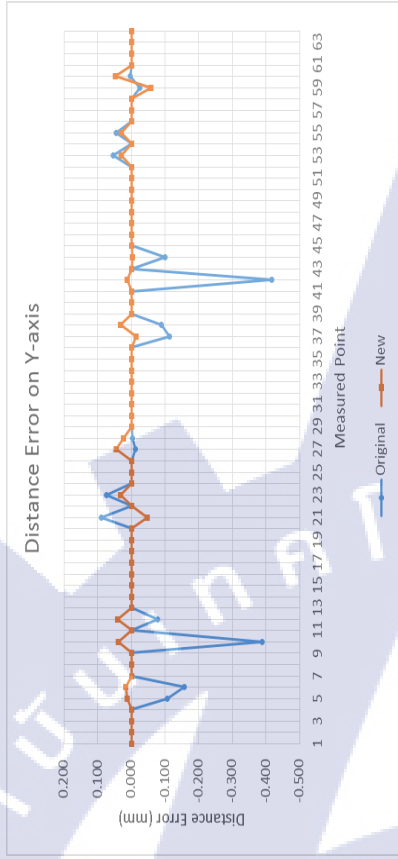
รูป d) ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแกน B มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.017 มม. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 0.275 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของแกน B มีค่าลดลง 39.486%

TNI

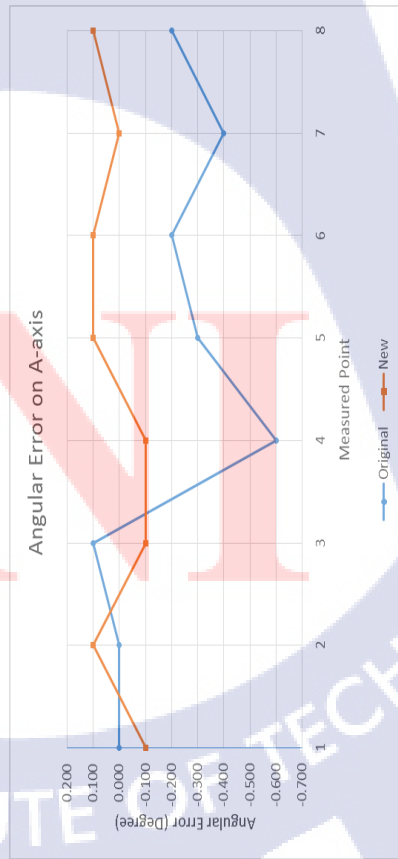
TAHITI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY



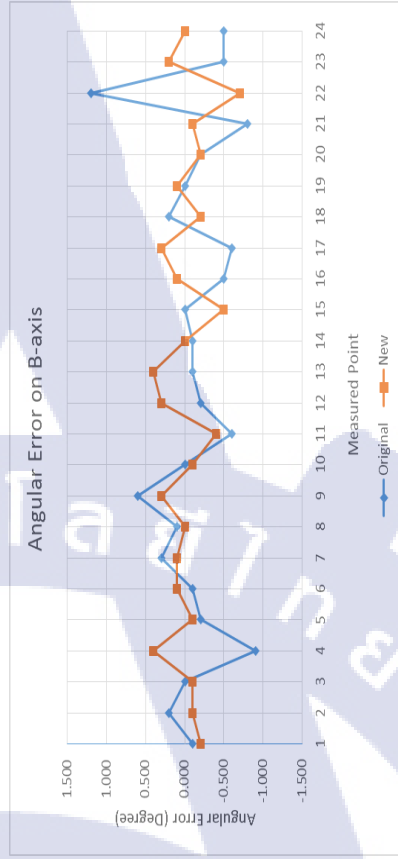
a) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงเส้นของแกน X



b) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงเส้นของแกน Y



c) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงมุมของแกน A



d) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงมุมของแกน B

รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบระยะผิดพลาดก่อนและหลังการปรับปรุง

4.3 วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการตัดเฉือนจริงกับการจำลองด้วยระบบควบคุมพีไอดีแบบปิด

หลังจากได้ปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดบนวิธีพิจารณาค่าเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ แรงตัดเฉือนและการโก่งงอของเครื่องมือตัดแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการจำลองการตัดเฉือนด้วยระบบควบคุมพีไอดีแบบปิดโดยใช้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยก่อนการปรับปรุงตามหัวข้อ 4.1 มาปรับปรุงอีกครั้งโดยตำแหน่งพิกัดการวัดอ้างอิงมาจากตำแหน่งพิกัดชิ้นงานปกติจากรูปที่ 3.16 a) และ b) ดังรูปที่ 4.3 a), b), c) และ d)

รูป a) ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแกน X มีค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากับ 0.017 มม. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0.017 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของแกน X มีค่าลดลง 79.153%

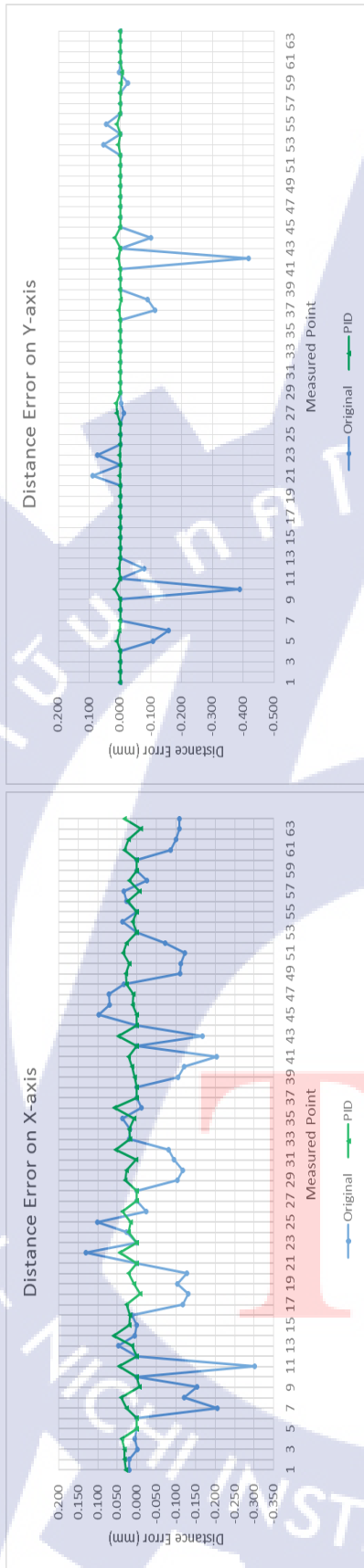
รูป b) ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแกน Y มีค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากับ 0.001 มม. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0.004 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของแกน Y มีค่าลดลง 94.827%

รูป c) ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแกน A มีค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากับ 0.046 มม. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0.041 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของแกน A มีค่าลดลง 82.351%

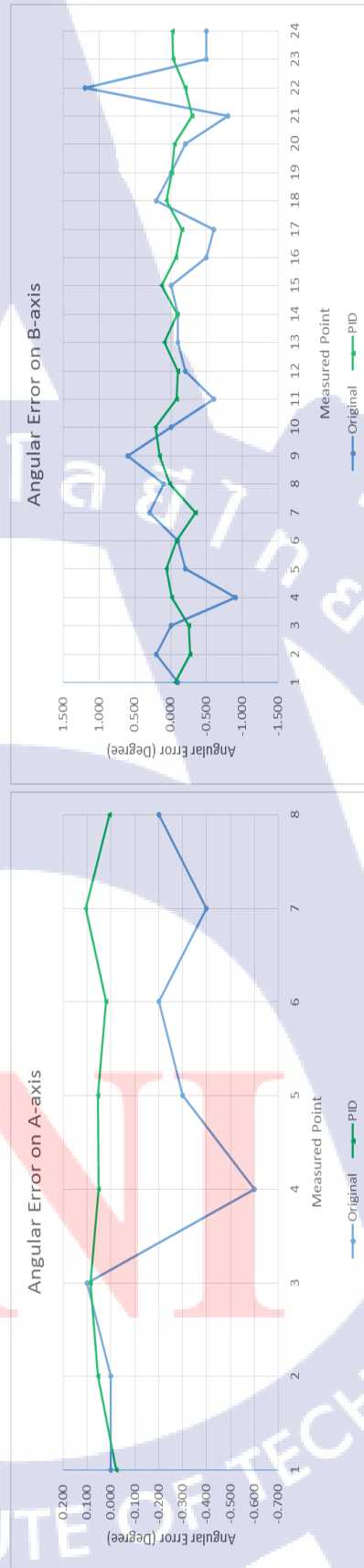
รูป d) ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแกน B มีค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากับ 0.059 มม. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0.142 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของแกน B มีค่าลดลง 68.618%

TNI

TAHITI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY



a) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงเส้นของแกน X



b) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงเส้นของแกน Y

c) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงมุมของแกน A

d) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงมุมของแกน B

รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบระยะผิดพลาดก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยพีเอ็ด

4.4 วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหลังการปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ด ร่วมกับการจำลองด้วยระบบควบคุมพีไอดีแบบปิด

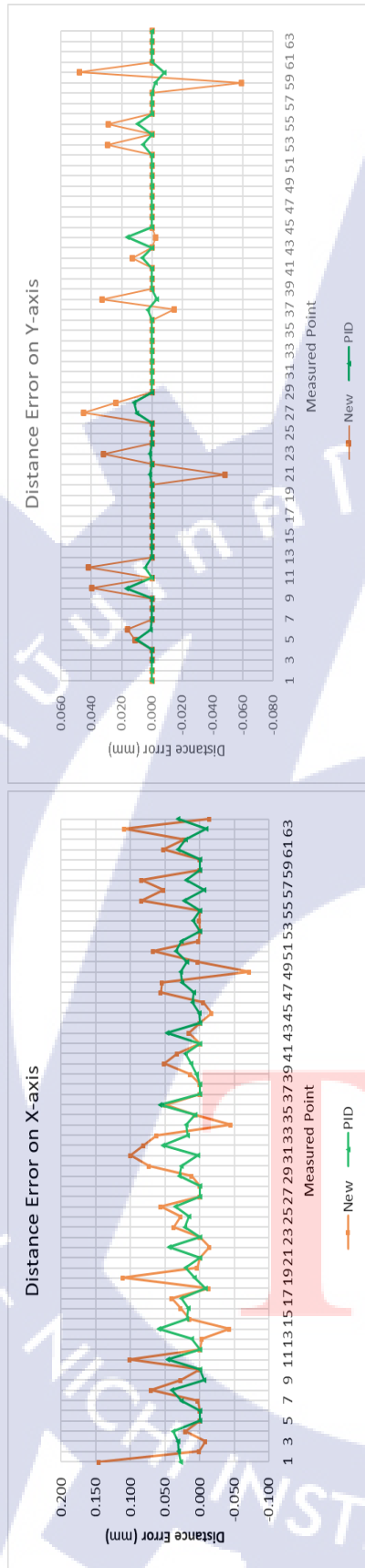
หลังจากได้ปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดบนวิธีพิจารณาค่าเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ แรงตัดเฉือน และการโก่งงอของเครื่องมือตัดและจำลองการตัดเฉือนด้วยระบบควบคุมพีไอดีแบบปิดแล้วดังแสดงในหัวข้อ 4.2 และ 4.3 แล้ว ผู้วิจัยจึงได้นำเสนองราฟเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานได้ผลดังรูปที่ 4.4 a), b), c) และ d)

รูป a) ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแกน X มีค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากับ 0.017 มม. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0.017 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของแกน X มีค่าลดลง 58.376%

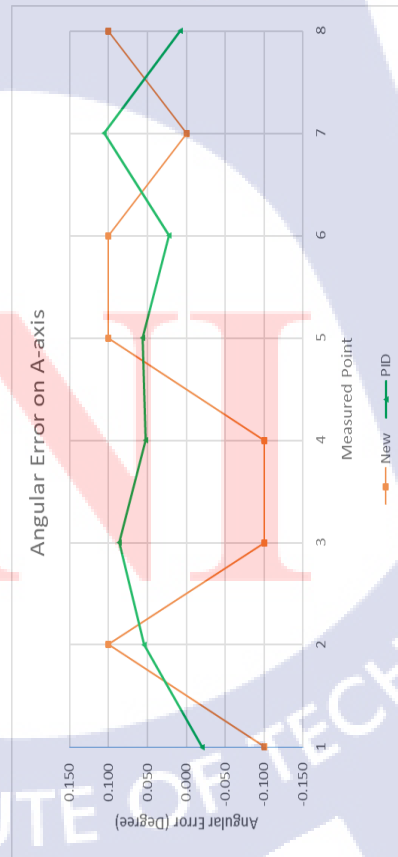
รูป b) ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแกน Y มีค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากับ 0.001 มม. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0.004 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของแกน Y มีค่าลดลง 75.493%

รูป c) ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแกน A มีค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากับ 0.046 มม. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0.041 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของแกน A มีค่าลดลง 58.506%

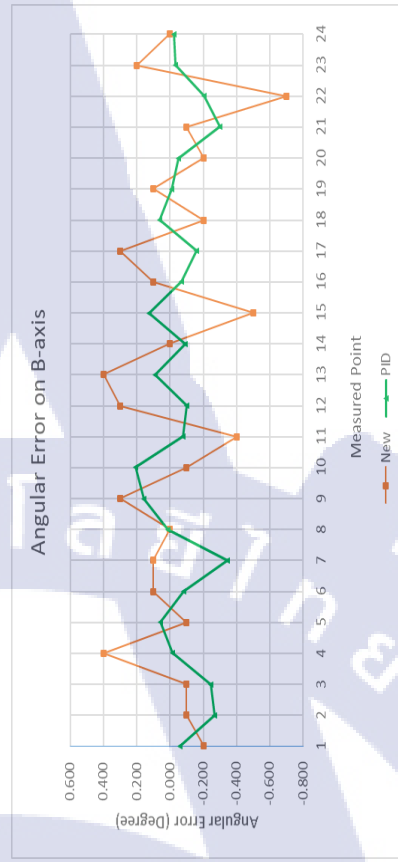
รูป d) ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแกน B มีค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากับ 0.059 มม. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0.142 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของแกน B มีค่าลดลง 48.140%



a) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงเส้นของแกน X



b) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงเส้นของแกน Y



c) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงมุมของแกน A

d) กราฟแสดงระยะผิดพลาดเชิงมุมของแกน B

รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบระยะผิดพลาดของการปรับปรุงสองวิธี

บทที่ 5

บทสรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดบนพื้นฐานการตัดเฉือนเสมือนจริงและระบบควบคุมพีไอดีบนเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก การวิจัยนี้สามารถสรุปผลการดำเนินการวิจัยได้ดังนี้

การปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดบนพื้นฐานการตัดเฉือนเสมือนจริงและระบบควบคุมพีไอดีแบบปิด พิจารณานบนพื้นฐานการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่ การเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ แรงตัดเฉือนและการโค้งงอของเครื่องมือตัด ใช้โปรแกรมภาษาไพธอนปรับปรุงค่าความผิดพลาดที่ได้จากการตัดเฉือนจริง โดยเปรียบเทียบก่อนการปรับปรุง หลังปรับปรุงและปรับปรุงด้วยพีไอดี พบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยแต่ละแกนการเคลื่อนที่ลดลงดังแสดงที่ตาราง 5.1

ตารางที่ 5.1 ตารางเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย

แกน	ก่อนปรับปรุง (มม.)	หลังปรับปรุง (มม.)	ลดลง (%)	หลังปรับปรุงด้วยพีไอดี (มม.)	ลดลง (%)
X	0.082	0.041	↓ 49.916	0.017	↓ 79.153
Y	0.080	0.017	↓ 78.890	0.004	↓ 94.827
A	0.233	0.099	↓ 57.465	0.041	↓ 82.351
B	0.454	0.275	↓ 39.486	0.142	↓ 68.618

จากผลการวิจัยการปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดบนพื้นฐานการตัดเฉือนเสมือนจริงของกระบวนการกัดรูปร่างเอส-เซฟด้วยวิธีพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ พิกัดรูปร่างเรขาคณิต การโค้งงอของดอกเอ็นมิลและวิธีควบคุมพีไอดีแบบปิดบนเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก พบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของรูปร่างเอส-เซฟมีค่าลดลงซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์และผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย โดยวิธีวิจัยที่นำเสนอนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนต่างๆได้ เพื่อแก้ไขปัญหาความถูกต้องแม่นยำและเที่ยงตรงของเอ็นซีโค้ดจาก CAD/CAM และเพิ่มผลิตภาพของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

5.2 อภิปรายผล

การผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในประเทศไทยมีการผลิตทั้งภายในประเทศและส่งออกต่างประเทศ แต่อย่างไรก็ตามในการผลิตยังมีปัญหาด้านคุณภาพ ความถูกต้องแม่นยำและความเที่ยงตรง การผลิตแบบสมัยใหม่ของโรงงานอุตสาหกรรมจึงได้มีระบบการผลิตแบบเสมือนจริง โดยความช่วยเหลือของคอมพิวเตอร์ทางด้านเทคนิคการจำลองทางกายภาพของระบบการผลิตเสมือนจริง และเลียนแบบพฤติกรรมของระบบกรรมวิธีการผลิตก่อนที่จะไปทำการผลิตจริงเพื่อลดจำนวนของการทดสอบและทดลอง ซึ่งกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่มีความซับซ้อนได้มีการนำเครื่องซีเอ็นซี 5 แกนมาผลิตชิ้นส่วนยานยนต์โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบและผลิต (CAD/CAM) แต่ก็ยังพบปัญหาด้านคุณภาพเนื่องจากโปรแกรมเอ็นซีโค้ดที่ส่งไปให้เครื่องจักรยังมีความถูกต้องเที่ยงตรงและแม่นยำไม่เพียงพอ ต้องแก้ไขและทดลองซ้ำอยู่เสมอ ทำให้เสียเวลากระบวนการผลิต จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นผู้วิจัยจึงปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดบนพื้นฐานการตัดเฉือนเสมือนจริงและระบบควบคุมพีไอดีบนเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็ก เพื่อแก้ไขปัญหาความถูกต้องแม่นยำและเที่ยงตรงของเอ็นซีโค้ดจาก CAD/CAM เพื่อเพิ่มผลิตภาพของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ด้านเวลา

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 งานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงคุณภาพเอ็นซีโค้ดด้วยวิธีการพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็กและจำลองการควบคุมด้วยระบบพีไอดีแบบปิด ซึ่งยังไม่ได้ติดตั้งเซนเซอร์จริง ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ไม่เป็นการควบคุมแบบเวลาจริง (Real Time Control System) ซึ่งวิธีการดังกล่าวผู้วิจัยจะดำเนินการในงานวิจัยในอนาคตต่อไป

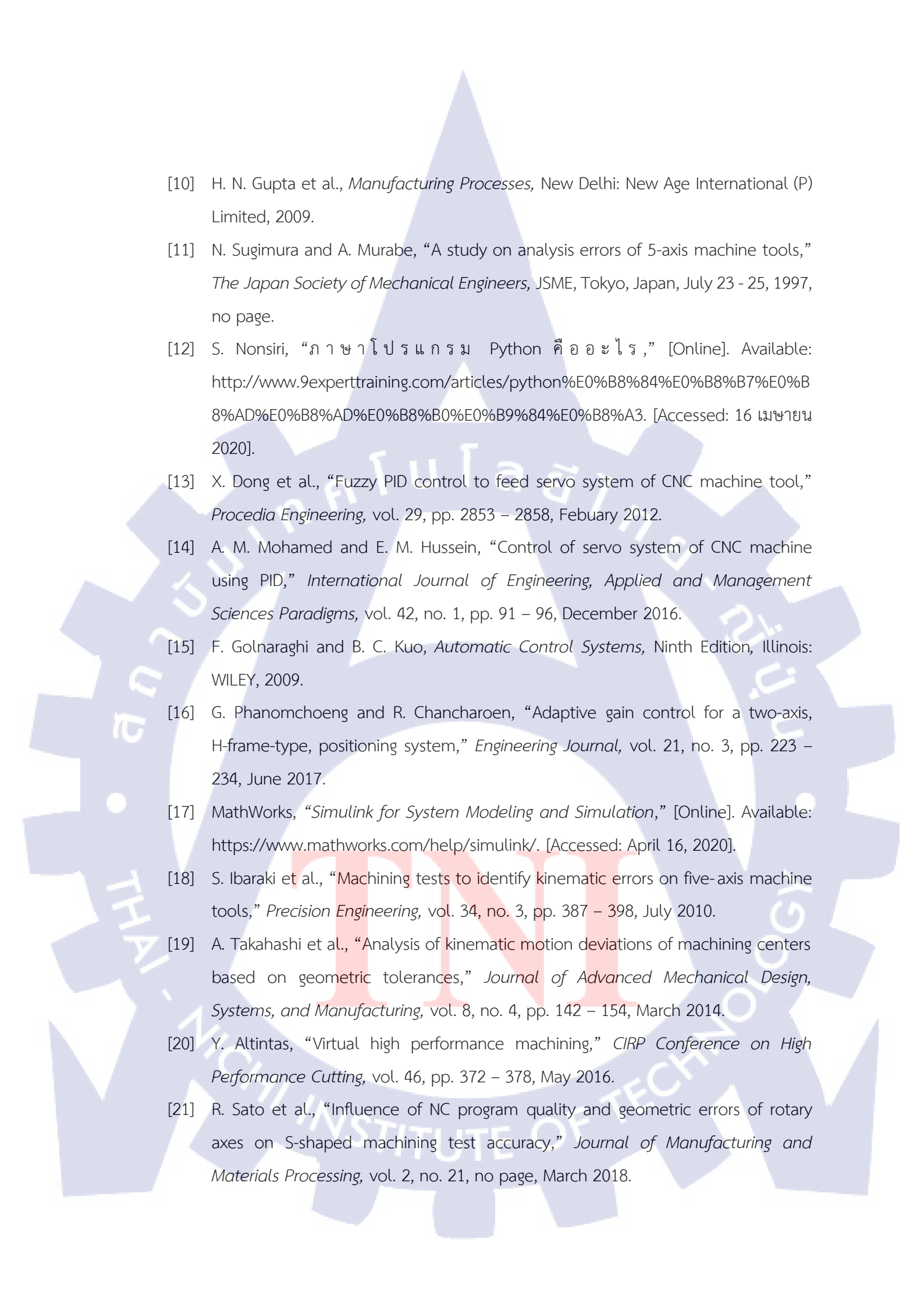
5.3.2 งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมภาษาไพธอนสร้างโปรแกรมปรับปรุงคุณภาพด้วยการกำหนดตัวแปรที่จำเป็นในโปรแกรมด้วยผู้วิจัยเอง ซึ่งผู้วิจัยมองว่ายังไม่สะดวกต่อการใช้งานหากมีการเปลี่ยนตัวแปรที่จำเป็นจึงมีแนวทางในการจัดการด้วยการใช้ภาพเป็นตัวประสานกับผู้ที่ใช้โปรแกรม (Graphic user interface: GUI) ซึ่งจะดำเนินการงานวิจัยในอนาคตต่อไป

บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- [1] M Report, “ยอดการผลิตรถยนต์ กรกฎาคม 2561,” [Online]. Available: <http://www.mreport.co.th/news/statistic-and-ranking/084-Automotive-Production-Export-Thailand>. [Accessed: 3 กุมภาพันธ์ 2562].
- [2] วรรณฯ ยงพิศาลภพ, “แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2561-2563 อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์,” [Online]. Available: https://www.krungsri.com/bank/getmedia/fb1ce3a1-8cc2-44c0-abb9-355b7b697444/IO_Auto_Parts_180713_TH_EX.aspx. [Accessed: 3 กุมภาพันธ์ 2562].
- [3] A. Kadir et al., “Virtual machine tools and virtual machining – A technological review,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 27, no. 3, pp. 494 - 508, June 2011.
- [4] M. Kaymakci et al., “Unified cutting force model for turning, boring, drilling and milling operations,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 54 - 55, pp. 34 – 45, March - April 2012.
- [5] วิโรช ทัศนะ และดอน แก้วดก, “การตัดเฉือนเสมือนจริงของกระบวนการกลึงด้วยวิธีการพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ การสึกหรอเครื่องมือตัด และการโค้งงอของชิ้นงาน,” *การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2560, IE Network 2017*, จังหวัดเชียงใหม่, 12-15 กรกฎาคม 2560, หน้า 609-614.
- [6] M. Soori et al., “Virtual machining considering dimensional, geometrical and tool deflection errors in three-axis CNC milling machines,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 33, no. 4, pp. 498 – 507, October 2014.
- [7] M. Soori et al., “Dimensional and geometrical errors of three-axis CNC milling machines in a virtual machining system,” *Computer-Aided Design*, vol. 45, no. 11, pp. 1,306 – 1,313, November 2013.
- [8] วีระชาติ เวชกามา, “การประมาณค่าความแม่นยำของชิ้นงานฉีดพลาสติกบนพื้นฐานความหยาบผิวแบบ 3 มิติของการตัดเฉือนเสมือนจริงและพารามิเตอร์การฉีดพลาสติก,” *วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (เทคโนโลยีวิศวกรรม)*, สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, กรุงเทพฯ, 2561.
- [9] Y. Altintas, *Manufacturing Automation*, New York: Cambridge University Press, 2012.

- 
- [10] H. N. Gupta et al., *Manufacturing Processes*, New Delhi: New Age International (P) Limited, 2009.
- [11] N. Sugimura and A. Murabe, "A study on analysis errors of 5-axis machine tools," *The Japan Society of Mechanical Engineers, JSME*, Tokyo, Japan, July 23 - 25, 1997, no page.
- [12] S. Nonsiri, "ภาษาโปรแกรม Python คืออะไร," [Online]. Available: <http://www.9experttraining.com/articles/python%E0%B8%84%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%AD%E0%B8%B0%E0%B9%84%E0%B8%A3>. [Accessed: 16 เมษายน 2020].
- [13] X. Dong et al., "Fuzzy PID control to feed servo system of CNC machine tool," *Procedia Engineering*, vol. 29, pp. 2853 – 2858, February 2012.
- [14] A. M. Mohamed and E. M. Hussein, "Control of servo system of CNC machine using PID," *International Journal of Engineering, Applied and Management Sciences Paradigms*, vol. 42, no. 1, pp. 91 – 96, December 2016.
- [15] F. Golnaraghi and B. C. Kuo, *Automatic Control Systems*, Ninth Edition, Illinois: WILEY, 2009.
- [16] G. Phanomchoeng and R. Chanchaoen, "Adaptive gain control for a two-axis, H-frame-type, positioning system," *Engineering Journal*, vol. 21, no. 3, pp. 223 – 234, June 2017.
- [17] MathWorks, "Simulink for System Modeling and Simulation," [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/simulink/>. [Accessed: April 16, 2020].
- [18] S. Ibaraki et al., "Machining tests to identify kinematic errors on five-axis machine tools," *Precision Engineering*, vol. 34, no. 3, pp. 387 – 398, July 2010.
- [19] A. Takahashi et al., "Analysis of kinematic motion deviations of machining centers based on geometric tolerances," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 8, no. 4, pp. 142 – 154, March 2014.
- [20] Y. Altintas, "Virtual high performance machining," *CIRP Conference on High Performance Cutting*, vol. 46, pp. 372 – 378, May 2016.
- [21] R. Sato et al., "Influence of NC program quality and geometric errors of rotary axes on S-shaped machining test accuracy," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 2, no. 21, no page, March 2018.

- 
- [22] W. Thasana and S. Chianrabutra, "A comparison between simulation and experiment of virtual machining in CNC turning machine considering kinematic motion deviations, tool wear and workpiece deflection errors," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 13, no. 1, pp. 250 – 262, January 2019.
- [23] International Organization for Standardization, "Accuracy of finished test pieces," *ISO 10791-7: 2014/DAM 1, Test Conditions for Machining Centers Part7*, Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2016.
- [24] Z. Jiang et al., "Modeling and simulation of surface morphology abnormality of 'S' test piece machined by five-axis CNC machine tool," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 85, pp. 2,745 – 2,759, November 2016.
- [25] C. H. Yeung et al., "Virtual CNC system. part I. system architecture," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 46, no. 10, pp. 1,107– 1,123, September 2006.

ภาคผนวก

TNI

ภาคผนวก ก.
ตำแหน่งพิกัดการวัดชิ้นงานปกติ

TNI

ตำแหน่งพิกัดการวัดชิ้นงานปกติ

ตำแหน่งการวัดของเอส-เซฟมีจำนวนทั้งหมด 64 จุด ที่แสดงค่าอ้างอิงในการวัดก่อนปรับปรุงด้วยวิธีต่างๆ ดังแสดงที่ตารางที่ ก.

ตารางที่ ก.1 ตำแหน่งพิกัดการวัดชิ้นงานปกติ

Normal Top			Normal Bottom			Normal A Angle	
	X	Y		X	Y	A11	7.9
	0	0		0	0	A12	9.2
P1	-6.363	-6.225	P33	-5.157	-6.225	A21	10.7
P2	-6.544	-12.075	P34	-5.295	-12.075	A22	11.5
P3	-6.45	-17.925	P35	-5.461	-17.925	A31	15.5
P4	-7.414	-23.775	P36	-6.494	-23.775	A32	17.8
P5	-13.48	-28.268	P37	-13.48	-29.239	A41	10.9
P6	-21.16	-26.661	P38	-21.16	-27.883	A42	10.2
P7	-23.823	-23.775	P39	-24.907	-23.775		
P8	-26.484	-17.925	P40	-26.871	-17.925	Normal B Angle	
P9	-28.468	-12.075	P41	-27.987	-12.075	B11	8.7
P10	-28.84	-11.119	P42	-28.84	-9.189	B12	10.3
P11	-32.836	-6.225	P43	-31.003	-6.225	B13	9.1
P12	-36.52	-5.357	P44	-36.52	-4.275	B14	10.2
P13	-40.046	-6.225	P45	-41.275	-6.225	B15	13.1
P14	-41.975	-12.075	P46	-43.121	-12.075	B16	12.9
P15	-41.767	-17.925	P47	-43.309	-17.925	B21	9.4
P16	-42.003	-23.775	P48	-43.396	-23.775	B22	8.3
P17	-43.501	-23.775	P49	-44.874	-23.775	B23	2.9
P18	-43.368	-17.925	P50	-44.797	-17.925	B24	3.7
P19	-43.468	-12.075	P51	-44.545	-12.075	B25	14.4
P20	-41.943	-6.225	P52	-42.995	-6.225	B26	13.4
P21	-36.52	-3.944	P53	-36.52	-2.791	B31	11.8
P22	-30.256	-6.225	P54	-28.88	-6.225	B32	11
P23	-28.84	-7.937	P55	-28.84	-6.275	B33	4.5
P24	-26.914	-12.075	P56	-26.437	-12.075	B34	4.6
P25	-24.97	-17.925	P57	-25.274	-17.925	B35	10.8
P26	-22.138	-23.775	P58	-23.098	-23.775	B36	10.2
P27	-21.16	-24.838	P59	-21.16	-25.972	B41	11.4
P28	-13.48	-26.874	P60	-13.48	-27.71	B42	11.7
P29	-9.067	-23.775	P61	-7.972	-23.775	B43	12.9
P30	-7.828	-17.925	P62	-6.954	-17.925	B44	17
P31	-7.976	-12.075	P63	-6.806	-12.075	B45	11.6
P32	-7.903	-6.225	P64	-6.659	-6.225	B46	9.9

ภาคผนวก ข.

ค่าพิกัดของชิ้นงานจริงก่อนการปรับปรุงคุณภาพ

TNI

ค่าพิสัยของชิ้นงานจริงก่อนการปรับปรุงคุณภาพ

ค่าพิสัยของชิ้นงานจริงก่อนการปรับปรุงคุณภาพที่ได้จากการตัดเฉือนจริงและวัดค่าความผิดพลาดด้วย CMM ดังแสดงที่ตาราง ข.

ตารางที่ ข.1 ค่าพิสัยของชิ้นงานจริงก่อนการปรับปรุงคุณภาพ

Average Original Top			Average Original Bottom			Original A Angle	
	X	Y		X	Y	A11	7.9
	0	0		0	0	A12	9.2
P1	-6.343	-6.225	P33	-5.138	-6.225	A21	10.8
P2	-6.525	-12.075	P34	-5.278	-12.075	A22	10.9
P3	-6.452	-17.925	P35	-5.425	-17.925	A31	15.2
P4	-7.408	-23.775	P36	-6.505	-23.775	A32	17.6
P5	-13.48	-28.375	P37	-13.48	-29.352	A41	10.5
P6	-21.16	-26.818	P38	-21.16	-27.971	A42	10
P7	-24.028	-23.775	P39	-25.013	-23.775		
P8	-26.604	-17.925	P40	-26.991	-17.925	Original B Angle	
P9	-28.622	-12.075	P41	-28.191	-12.075	B11	8.6
P10	-28.84	-11.507	P42	-28.84	-9.607	B12	10.5
P11	-33.137	-6.225	P43	-31.17	-6.225	B13	9.1
P12	-36.52	-5.434	P44	-36.52	-4.376	B14	9.3
P13	-39.998	-6.225	P45	-41.178	-6.225	B15	12.9
P14	-41.97	-12.075	P46	-43.051	-12.075	B16	12.8
P15	-41.767	-17.925	P47	-43.238	-17.925	B21	9.7
P16	-41.99	-23.775	P48	-43.363	-23.775	B22	8.4
P17	-43.618	-23.775	P49	-44.984	-23.775	B23	3.5
P18	-43.499	-17.925	P50	-44.909	-17.925	B24	3.7
P19	-43.571	-12.075	P51	-44.667	-12.075	B25	13.8
P20	-42.07	-6.225	P52	-43.068	-6.225	B26	13.2
P21	-36.52	-3.854	P53	-36.52	-2.737	B31	11.7
P22	-30.126	-6.225	P54	-28.843	-6.225	B32	10.9
P23	-28.84	-7.863	P55	-28.84	-6.229	B33	4.5
P24	-26.888	-12.075	P56	-26.411	-12.075	B34	4.1
P25	-24.869	-17.925	P57	-25.241	-17.925	B35	10.2
P26	-22.161	-23.775	P58	-23.124	-23.775	B36	10.4
P27	-21.16	-24.85	P59	-21.16	-25.998	B41	11.4
P28	-13.48	-26.877	P60	-13.48	-27.706	B42	11.5
P29	-9.17	-23.775	P61	-8.058	-23.775	B43	12.1
P30	-7.945	-17.925	P62	-7.054	-17.925	B44	18.2
P31	-8.07	-12.075	P63	-6.914	-12.075	B45	11.1
P32	-7.984	-6.225	P64	-6.767	-6.225	B46	9.4

ภาคผนวก ค.

คำพิกัตของขึ้นงานจริงหลังการปรับปรุงคุณภาพ

TNI

ค่าพิสัยของชิ้นงานจริงหลังการปรับปรุงคุณภาพ

ค่าพิสัยของชิ้นงานจริงหลังการปรับปรุงคุณภาพได้จากการตัดเฉือนจริงและวัดค่าความผิดพลาดด้วย CMM ดังแสดงที่ตาราง ค.

ตารางที่ ค.1 ค่าพิสัยของชิ้นงานจริงหลังการปรับปรุงคุณภาพ

Average New Top			Average New Bottom			New A Angle	
	X	Y		X	Y	A11	7.7
	0	0		0	0	A12	9.3
P1	-6.264	-6.225	P33	-5.049	-6.225	A21	10
P2	-6.459	-12.075	P34	-5.203	-12.075	A22	11.2
P3	-6.389	-17.925	P35	-5.372	-17.925	A31	15.5
P4	-7.386	-23.775	P36	-6.4	-23.775	A32	15
P5	-13.48	-28.32	P37	-13.48	-29.301	A41	11.2
P6	-21.16	-26.649	P38	-21.16	-27.834	A42	10.1
P7	-23.812	-23.775	P39	-24.843	-23.775		
P8	-26.403	-17.925	P40	-26.81	-17.925	New B Angle	
P9	-28.421	-12.075	P41	-28.065	-12.075	B11	9.3
P10	-28.84	-10.987	P42	-28.84	-9.381	B12	10.2
P11	-32.698	-6.225	P43	-30.958	-6.225	B13	9
P12	-36.52	-5.334	P44	-36.52	-4.267	B14	9.8
P13	-40.004	-6.225	P45	-41.184	-6.225	B15	12.9
P14	-41.941	-12.075	P46	-42.983	-12.075	B16	12.7
P15	-41.746	-17.925	P47	-43.184	-17.925	B21	9.6
P16	-41.963	-23.775	P48	-43.322	-23.775	B22	8.1
P17	-43.452	-23.775	P49	-44.802	-23.775	B23	3.2
P18	-43.353	-17.925	P50	-44.777	-17.925	B24	3.9
P19	-43.433	-12.075	P51	-44.54	-12.075	B25	12.5
P20	-41.869	-6.225	P52	-42.964	-6.225	B26	12.4
P21	-36.52	-3.878	P53	-36.52	-2.693	B31	11.8
P22	-30.141	-6.225	P54	-28.75	-6.225	B32	10.4
P23	-28.84	-7.773	P55	-28.84	-6.114	B33	4.9
P24	-26.851	-12.075	P56	-26.338	-12.075	B34	3.4
P25	-24.833	-17.925	P57	-25.164	-17.925	B35	9.9
P26	-22.11	-23.775	P58	-23.063	-23.775	B36	10.4
P27	-21.16	-24.795	P59	-21.16	-25.853	B41	11.4
P28	-13.48	-26.906	P60	-13.48	-27.716	B42	11.2
P29	-8.959	-23.775	P61	-7.877	-23.775	B43	13.1
P30	-7.741	-17.925	P62	-6.982	-17.925	B44	16.2
P31	-7.861	-12.075	P63	-6.759	-12.075	B45	11.1
P32	-7.782	-6.225	P64	-6.597	-6.225	B46	10.3

ภาคผนวก ง.

ค่าพิกัดของชิ้นงานหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยพีไอดี

TNI

ค่าพิกัดของชิ้นงานหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยพีไอดี

ค่าพิกัดของชิ้นงานหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยพีไอดีที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมแมทแลบซิมูเลชัน ดังแสดงที่ตาราง ง.

ตารางที่ ง.1 ค่าพิกัดของชิ้นงานหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยพีไอดี

PID Top			PID Bottom			PID A Angle	
	X	Y		X	Y	A11	7.9
	0	0		0	0	A12	9.3
P1	-6.336	-6.227	P33	-5.139	-6.225	A21	10.8
P2	-6.513	-12.080	P34	-5.275	-12.075	A22	11.6
P3	-6.418	-17.918	P35	-5.454	-17.925	A31	15.6
P4	-7.376	-23.772	P36	-6.437	-23.775	A32	17.8
P5	-13.460	-28.258	P37	-13.480	-29.236	A41	11.0
P6	-21.112	-26.660	P38	-21.160	-27.886	A42	10.2
P7	-23.796	-23.776	P39	-24.902	-23.775		
P8	-26.444	-17.920	P40	-26.858	-17.925	PID B Angle	
P9	-28.474	-12.066	P41	-27.966	-12.075	B11	8.6
P10	-28.816	-11.102	P42	-28.840	-9.182	B12	10.0
P11	-32.790	-6.226	P43	-30.956	-6.225	B13	8.9
P12	-36.508	-5.353	P44	-36.520	-4.259	B14	10.2
P13	-40.034	-6.241	P45	-41.274	-6.225	B15	13.2
P14	-41.916	-12.072	P46	-43.110	-12.075	B16	12.8
P15	-41.748	-17.920	P47	-43.300	-17.925	B21	9.1
P16	-41.986	-23.774	P48	-43.370	-23.775	B22	8.3
P17	-43.474	-23.776	P49	-44.846	-23.775	B23	3.1
P18	-43.376	-17.926	P50	-44.778	-17.925	B24	3.9
P19	-43.460	-12.080	P51	-44.510	-12.075	B25	14.3
P20	-41.922	-6.221	P52	-42.968	-6.225	B26	13.3
P21	-36.498	-3.942	P53	-36.520	-2.785	B31	11.9
P22	-30.212	-6.213	P54	-28.870	-6.225	B32	10.9
P23	-28.846	-7.935	P55	-28.840	-6.265	B33	4.6
P24	-26.892	-12.074	P56	-26.414	-12.075	B34	4.5
P25	-24.954	-17.914	P57	-25.280	-17.925	B35	10.6
P26	-22.102	-23.778	P58	-23.078	-23.775	B36	10.3
P27	-21.118	-24.828	P59	-21.160	-25.974	B41	11.4
P28	-13.448	-26.862	P60	-13.480	-27.718	B42	11.7
P29	-9.037	-23.766	P61	-7.940	-23.775	B43	12.6
P30	-7.801	-17.932	P62	-6.933	-17.925	B44	16.8
P31	-7.974	-12.050	P63	-6.815	-12.075	B45	11.6
P32	-7.849	-6.228	P64	-6.627	-6.225	B46	9.9