

อิทธิพลของทิศทางการวางชิ้นงานต่อความคลาดเคลื่อนของรูปทรงในกระบวนการกัดด้วย
แขนหุ่นยนต์

ภาณุภพ ศรีสม

TNII

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตศึกษา สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2566

INFLUENCE OF GEOMETRICAL ERROR FROM WORKPIECE DIRECTION SETTING IN ROBOT
MILLING PROCESS

Phanuphop Srisom

TNII

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

Graduate Studies

Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2023

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อิทธิพลของทิศทางการวางชิ้นงานต่อความคลาดเคลื่อนของ
รูปทรงในกระบวนการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์

โดย

ภาณุภพ ศรีสม

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ดอน แก้วดก

บัณฑิตศึกษา สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ พิพัฒน์หัตถกุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีสิทธิ์ เจียรบุตร)

..... กรรมการ
(ดร.มรรณพ พักขาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร.ดอน แก้วดก)

ภาพประกอบ : อิทธิพลของทิศทางการวางชิ้นงานต่อความคลาดเคลื่อนของรูปทรงในกระบวนการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์, อาจารย์ที่ปรึกษา: ดร.ดอน แก้วดก, จำนวน 93 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของทิศทางการวางชิ้นงานที่มีผลต่อความเที่ยงตรงของชิ้นงานที่ถูกกัดด้วยแขนหุ่นยนต์แบบ 6 แกน ยี่ห้อ ABB รุ่น IRB 6640 บนวัสดุโฟม EPS เกรด 2.0 โดยชิ้นงานถูกจัดวางใน 2 ทิศทางประกอบด้วย ทิศทางวางขนานแกน X และ ขนานแกน Y ชิ้นงานออกแบบให้มีลักษณะ 2 รูปทรง ให้สอดคล้องกับเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง ทิศทาง ตำแหน่ง และความไม่ได้ระนาบ ตามข้อกำหนด GD&T เพื่อให้สามารถหาความสัมพันธ์ของทิศทางการวางที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนจากการกัด รูปทรงชิ้นงานประกอบด้วย รูปทรงผิวโค้งอิสระ และ รูปทรงเรขาคณิต การตรวจวัดค่าความคลาดเคลื่อนของมิติ และ รูปทรงใช้เครื่องมือวัดแบบ 3 มิติ ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น CRYSTA-Apex 9108 ทำการวัดด้วยหัวโพรบเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ผลการวัดบ่งชี้ให้เห็นว่าทิศทางการจับวางชิ้นงานสำหรับการกัดผิวโค้งอิสระมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่แตกต่างกัน โดยมีระยะความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.1476 มิลลิเมตร และ 2.6643 มิลลิเมตร ในจัดวางแนวขนานแกน Y และ จัดวางแนวขนานแกน X ตามลำดับ ชิ้นงานรูปทรงเรขาคณิตมีผลการวัดชี้ให้เห็นว่าทิศทางการวางชิ้นงานทั้ง 2 รูปแบบ มีค่าความคลาดเคลื่อนจากระยะที่ออกแบบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน จากข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยชิ้นนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาวางแผนสำหรับการกัดชิ้นงานด้วยแขนหุ่นยนต์ได้

บัณฑิตศึกษา

สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม

ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

PHANUPHOP SRISOM : INFLUENCE OF GEOMETRICAL ERROR FROM WORKPIECE
DIRECTION SETTING IN ROBOT MILLING PROCESS, ADVISOR: DR. DON KAEWDOK,
93 PP.

This research aims to investigate the impact of workpiece orientation on the accuracy of robot milling on EPS foam material grade 2.0 using an ABB 6-axis robot arm model IRB 6640. The parts of work are set up in 2 directions following, along axis X and axis Y respectively. The shape of the workpiece is intentionally constructed with two distinct characteristics: a freeform curved surface and a geometrical shape. This design choice is made to fulfill the specific needs of geometric dimensioning and tolerancing (GD&T). The dimensional and shape tolerances were measured using a CMM Mitutoyo brand, model CRYSTA-Apex 9108, with a 5 mm diameter ball probe. The measurement results demonstrated that the workpiece orientation for surface milling in both the Y-axis parallel orientation and the X-axis orientation, the created workpiece's average tolerance range for the free curves is 2.1476 millimeters and 2.6643 millimeters, respectively. The results obtained from the geometric measurements reveal that both orientations of the workpiece exhibit a similar degree of deviation from the intended distance. The addition of the results that are derived from this study might be considered a significant point of reference when considering the adoption of a robotic arm for the purpose of milling workpieces.

Graduate Studies

Field of Engineering Technology

Academic Year 2023

Student's Signature

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีทางผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ พิพัฒน์หัตถกุล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีสิทธิ์ เจียรบุตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช และ ดร.มหรณพ ฟักขาว อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น กรรมการสอบ ขอขอบคุณ ดร.ดอน แก้วดก หัวหน้าสาขาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติแบบสลับ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อาจารย์ที่ปรึกษา รวมถึงอาจารย์ทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้ ที่คอยแนะนำและให้ความช่วยเหลือการทำวิจัยครั้งนี้จนส่งผลให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณกวี บุญสุวรรณ บริษัท มิโตโดโย (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้คำแนะนำงานวิจัย และสนับสนุนการตรวจวัดขนาดชิ้นงานด้วยเครื่องมือวัด 3 มิติ และ วิศวกรจากบริษัท อัลฟาโซลูชั่น จำกัด ที่ให้คำแนะนำด้านเทคนิคของการใช้โปรแกรม SprutCAM

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณครอบครัว และน้องๆ นักศึกษาสาขาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติแบบสลับ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ทุกคนที่เป็นกำลังใจ และคอยสนับสนุนทุกๆ ด้านระหว่างการดำเนินงานวิจัยจนส่งผลให้ได้ผลงานที่มีคุณภาพในครั้งนี้

ภาพนุภาพ ศรีสม

TNI

THAI - NICHII INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.2.1 ศึกษาวิเคราะห์ความสามารถ และประสิทธิภาพของแขนหุ่นยนต์ แบบ 6 แกนในการกัดชิ้นงานรูปทรงผิวโค้งอิสระ และรูปทรง เรขาคณิตด้วย แขนหุ่นยนต์.....	2
1.2.2 ศึกษาผลกระทบของทิศทางการวางชิ้นงานต่อความเที่ยงตรงของ รูปทรงผิวโค้งอิสระและรูปทรงเรขาคณิตที่ได้จากการกัดด้วย แขนหุ่นยนต์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.3.1 ใช้โปรแกรม SpurtCAM ในการเขียนคำสั่งควบคุมหุ่นยนต์	2
1.3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นโฟมสำหรับสร้างแม่พิมพ์ EPS (Expandable Polystyrene) เกรด 2.0	2
1.3.3 หุ่นยนต์ ABB รุ่น IRB 6640-235/2.55	2
1.3.4 คมตัดเหล็กเกรด HSS (high speed steel).....	2
1.3.5 สปindle ติดปลายหุ่นยนต์หมุนด้วยความเร็วรอบสูงสุด 8220 rpm ความถี่ 135 Hz.....	2
1.3.6 กัดด้วยวิธีคมตัดตั้งฉากกับระนาบโต๊ะ (Tool Orientation Fixed)	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
1	1.5 แผนงานและระยะเวลาดำเนินงาน 3
	1.6 นิยามคำศัพท์ที่เกี่ยวข้อง 4
2	ทฤษฎี และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
	2.1 ทฤษฎี 5
	2.1.1 หุ่นยนต์อุตสาหกรรม 5
	2.1.2 CAM (Computer-Aided Manufacturing) 11
	2.1.3 Machining Parameter 13
	2.1.4 คุณภาพผิวจากการกัด 16
	2.1.5 ความคลาดเคลื่อนด้านขนาดและรูปทรง (GD&T) 17
	2.1.6 การวัดขนาดด้วยเครื่องมือวัดแบบ 3 มิติ (CMM) 20
	2.1.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล 21
	2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 22
3	ระเบียบวิธีการวิจัย 25
	3.1 วิธีการดำเนินงานวิจัย 25
	3.2 ออกแบบชิ้นงานด้วยโปรแกรม SOLIDWORK 2022 26
	3.3 การกำหนดพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์สำหรับการจำลองการตัดเฉือน ด้วยโปรแกรม 28
	3.4 หุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลอง 30
	3.4.1 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง 31
	3.4.2 การตั้งค่าตำแหน่งจุดปลายของแขนหุ่นยนต์(TCP) 32
	3.4.3 ผลที่ได้จากการกำหนดจุด TCP ของหุ่นยนต์ 33
	3.4.4 การกำหนดจุดอ้างอิงบนชิ้นงาน (Work object Reference Point) 35
	3.5 การจำลองการกัดชิ้นงานบนโปรแกรม SprutCAM 37
	3.5.1 การตั้งค่า work object ในโปรแกรม 39

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
3	3.5.2 การตั้งค่า TCP ในโปรแกรม	40
	3.5.3 การกำหนดพารามิเตอร์การตัดเฉือนบนโปรแกรม SprutCAM	41
	3.5.4 การสร้างคำสั่ง NC Code บนโปรแกรม SprutCAM	44
	3.6 การกัดชิ้นงานด้วยแขนหุ่นยนต์	44
	3.7 การวัดขนาดชิ้นงานด้วยเครื่อง CMM.....	45
	3.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วยโปรแกรม Minitab	46
4	ผลการดำเนินงานวิจัย	49
	4.1 ผลการวัดชิ้นงานผิวโค้งอิสระ	49
	4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab	52
	4.3 ผลการวัดชิ้นงานรูปทรงเรขาคณิต	53
5	สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	63
	5.1 ผลการวัดผิวโค้งอิสระ.....	63
	5.2 ผลการวัดรูปทรงเรขาคณิต.....	63
	5.3 ข้อเสนอแนะ	67
	บรรณานุกรม.....	69
	ภาคผนวก.....	73
	ภาคผนวก ก NC Code.....	74
	ภาคผนวก ข Conference.....	80
	ประวัติย่อผู้วิจัย	93

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินการศึกษาวิจัย.....	3
2.1 ความสัมพันธ์ของระดับข้อมูล	7
3.1 พิกัดปลาย Tool ที่ความยาว 145.99 มิลลิเมตร	33
3.2 พิกัดปลาย Tool ที่ความยาว 249.17 มิลลิเมตร	34
3.3 พิกัดปลาย Tool.....	35
3.4 แสดงตำแหน่งชิ้นงานรูปทรงผิวโค้งอิสระ	36
3.5 แสดงตำแหน่งชิ้นงานรูปทรงเรขาคณิต	37
3.6 พารามิเตอร์ในการกัดหยาบ (Roughing Waterline)	43
3.7 พารามิเตอร์ในการกัดละเอียด (5D Surfacing)	43
4.1 เปรียบเทียบเส้นทางของทิศทางขนาดแกน X และ แกน Y ของเส้นทางที่ 1	50
4.2 เปรียบเทียบเส้นทางของทิศทางขนาดแกน X และ แกน Y ของเส้นทางที่ 2	51
4.3 เปรียบเทียบเส้นทางของทิศทางขนาดแกน X และ แกน Y ของเส้นทางที่ 3	52
4.4 การวางทิศทางขนาดแกน X ของ 2 ชิ้นงาน.....	54
4.5 การวางทิศทางขนาดแกน Y ของ 2 ชิ้นงาน	58
5.1 ผลการวัดด้วยเครื่อง CMM สำหรับรูปทรง การจัดวางทิศทาง การจัดวางตำแหน่ง และรูปโครงร่างของพื้นผิว	64

TNI

THAI - NICHII INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญรูป

รูป	หน้า
1.1 ลำดับขั้นตอนการดำเนินงาน	3
2.1 องค์ประกอบของหุ่นยนต์ และความสัมพันธ์.....	6
2.2 หุ่นยนต์ ABB รุ่น IRB 6640	6
2.3 ข้อมูลแสดงข้อจำกัดของหุ่นยนต์	7
2.4 การสร้างไฟล์สำหรับสร้างคำสั่งของหุ่นยนต์.....	8
2.5 แสดงคำสั่งการย้ายข้อมูล Tool Data	9
2.6 การสร้างหน้าต่าง Routine สำหรับควบคุมการทำงานหุ่นยนต์	9
2.7 คำสั่งของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์	10
2.8 Zone ของคำสั่งการเคลื่อนที่	11
2.9 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม CAD/CAM เพื่อสร้าง NC code.....	12
2.10 การจำลองเส้นทางการเดินของเครื่องจักร	13
2.11 ลักษณะการปาดผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการกัด	13
2.12 การกัดแนวอน (Peripheral Milling) และการกัดแนวตั้ง (Face Milling).....	14
2.13 การกัดแนวอน Horizontal Milling / Peripheral Milling.....	14
2.14 ทิศทางการกัดตาม (Down Milling) และ การกัดทวน (Up Milling)	15
2.15 การกัดแนวตั้ง Vertical Milling / Face Milling	15
2.16 ร่องรอยพื้นผิวที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของดอกกัด.....	17
2.17 ข้อกำหนด และ สัญลักษณ์ในการควบคุมรูปทรง	18
2.18 ข้อกำหนด และสัญลักษณ์ในทิศทางการจัดวาง	18
2.19 ข้อกำหนด และสัญลักษณ์ในการควบคุมการจัดวางตำแหน่ง	19
2.20 ข้อกำหนด และ สัญลักษณ์ในการควบคุมรูปโครงสร้าง	19
2.21 ข้อกำหนด และ สัญลักษณ์ในการควบคุมความเปียงเบนเนื่องจากการหมุน.....	20
2.22 แสดงการวัดด้วยหัวโพรบสัมผัสแบบต่อเนื่อง	20
3.1 แผนการดำเนินงาน	26
3.2 แบบงานผิวโค้งอิสระสำหรับการตัดเฉือนด้วยแขนหุ่นยนต์	27
3.3 แบบงานรูปทรงเรขาคณิตสำหรับการตัดเฉือนด้วยแขนหุ่นยนต์.....	27
3.4 การแปลงไฟล์จาก .SLDPR เป็นนามสกุล .stp	28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
3.5 ขนาดของแขนหุ่นยนต์ตาม Specification Manual	28
3.6 การตั้ง Parameters ของหุ่นยนต์ให้ตรงกับค่า Specification Manual	29
3.7 Parameters ของหุ่นยนต์ไฟล์เป็น Note Pan	29
3.8 Parameters ของหุ่นยนต์	30
3.9 หุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลอง และชุดสปินเดิลมอเตอร์	31
3.10 วัสดุโฟมสำหรับสร้างแม่พิมพ์ (Expandable Polystyrene; EPS)	31
3.11 การจับยึดชิ้นงาน	32
3.12 การตั้งค่าตำแหน่งจุดปลายของแขนหุ่นยนต์ (TCP) (a) กำหนดจุดที่ 1, (b) กำหนดจุดที่ 2, (c) กำหนดจุดที่ 3, (d) กำหนดจุดที่ 4, (e) กำหนดแกน Z	32
3.13 โปรแกรม Robot Calibration	35
3.14 การเชื่อมต่อ Work object (a) กำหนดจุด X_1 (b), กำหนดจุด X_2 , (c) กำหนดจุด Y_1	36
3.15 Import ไฟล์ 3 มิติของชิ้นงานรูปทรงเรขาคณิต	37
3.16 ปรับตำแหน่งชิ้นงานให้ตรงกับตำแหน่งการวางชิ้นงานจริง	38
3.17 แสดงการตั้งค่าขอบเขตของชิ้นงาน (workobject)	39
3.18 แสดงการตั้งค่าตำแหน่งปลายคมตัด	40
3.19 แสดงการกำหนดพารามิเตอร์ของดอกกัด	41
3.20 แสดงการกำหนดลักษณะของการกัดชิ้นงาน	42
3.21 แสดงการกำหนดลักษณะของการกัดชิ้นงาน	43
3.22 แสดงการเขียน NC Code ของหุ่นยนต์	44
3.23 แสดงการกัดชิ้นงานรูปทรงเรขาคณิตด้วยแขนหุ่นยนต์	45
3.24 แสดงการวัดด้วยเครื่องวัด CMM ของ Mitutoyo รุ่น CRYSTA-Apex 9108	46
3.25 วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วยโปรแกรม Minitab	47
4.1 ทิศทางการวัดชิ้นงานผิวโค้งอิสระ	49
4.2 แสดงการวัดชิ้นงานด้วยเครื่อง CMM แบบสัมผัสด้วยหัวบอลขนาด 5 มิลลิเมตร	50
4.3 แสดงผลการคำนวณใน Minitab	52
4.4 ค่าความแปรปรวนของชิ้นงานแนวแกน X และ แนวแกน Y	53
4.5 แบบการวัดของรูปทรงเรขาคณิต	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.6 ตำแหน่งใน CAD ไฟล์.....	54



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อรักษาคุณภาพของชิ้นงาน (Quality) ลดต้นทุนการผลิต (Cost) และการส่งมอบให้ทันเวลา (Delivery และ เตรียมส่งมอบให้กับลูกค้า การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการการผลิตเป็นนโยบายสำคัญของสถานประกอบการ การนำหุ่นยนต์เข้ามามีใช้ในการผลิตเป็นหนึ่งในแนวทางที่ช่วยให้การผลิตมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเฉพาะงานที่มีการทำงานซ้ำซ้อนกัน หรืองานเสี่ยงอันตราย ประกอบกับหุ่นยนต์สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง มีความแม่นยำและรวดเร็วกว่ามนุษย์ ทนต่อสภาพแวดล้อม การประยุกต์ใช้แขนหุ่นยนต์แบบ 6 แกน สำหรับงานที่มีข้อจำกัดการผลิตบางด้านเป็นหนึ่งในแนวทางการแก้ปัญหาทางด้านการผลิตให้กับภาคอุตสาหกรรม อาทิเช่น หุ่นยนต์พ่นสี [1] ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หรือ ชิ้นส่วนยานยนต์ หุ่นยนต์ขัดผิว [2] งานลบคม และ หุ่นยนต์เชื่อม ในอุตสาหกรรมประกอบชิ้นส่วนยานยนต์ กรณีศึกษานี้พิจารณาการนำหุ่นยนต์มาใช้ในการกัดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ทดแทนการกัดชิ้นงานด้วยเครื่องจักร ซี เอ็น ซี ที่มีราคาต้นทุนค่าเครื่องจักรและค่าบำรุงรักษาสูง โดยเฉพาะการกัดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ต้องใช้เครื่องจักรที่มีโครงสร้างใหญ่กว่าขนาดชิ้นงาน มีพื้นที่ติดตั้งบริเวณกว้าง จึงเป็นที่มาของการศึกษาในงานวิจัยนี้ การกัดชิ้นงานด้วยแขนหุ่นยนต์ประกอบแขนหุ่นยนต์แบบ 6 แกน ถูกติดตั้งที่ส่วนปลายแขนด้วยมอเตอร์ที่เป็นต้นกำลังการหมุนคมตัดเพื่อตัดเฉือนเนื้อวัสดุงาน กำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ตามรูปร่างรูปทรงของชิ้นงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM) สร้างเป็นโค้ดควบคุมเครื่องจักร (NC Code) [3, 4] ให้ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์

งานวิจัยชิ้นนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของทิศทางการวางชิ้นงานที่มีต่อความเที่ยงตรงของรูปทรงผิวโค้งอิสระ (Profile) และขนาด (Dimension) ชิ้นงานทรงเรขาคณิตที่เกิดจากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์บนวัสดุโฟมสำหรับทำแม่พิมพ์ ซึ่งจะเป็ข้อมูลในการออกแบบและวางแผนการผลิตสำหรับงานที่มีการประยุกต์ใช้หุ่นยนต์แบบ 6 แกน ในการกัดงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อเป็นทางเลือกให้กับอุตสาหกรรมการผลิตในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาวิเคราะห์ความสามารถ และประสิทธิภาพของแขนหุ่นยนต์แบบ 6 แกนในการก่ชิ้นงานรูปทรงผิวโค้งอิสระ และรูปทรงเรขาคณิตด้วยแขนหุ่นยนต์

1.2.2 ศึกษาผลกระทบของทิศทางการวางชิ้นงานต่อความเที่ยงตรงของรูปทรงผิวโค้งอิสระ และรูปทรงเรขาคณิตที่ได้จากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ใช้โปรแกรม SpurtCAM ในการเขียนคำสั่งควบคุมหุ่นยนต์

1.3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นโฟมสำหรับสร้างแม่พิมพ์ EPS (Expandable Polystyrene) เกรด 2.0

1.3.3 หุ่นยนต์ ABB รุ่น IRB 6640-235/2.55

1.3.4 คมตัดเหล็กเกรด HSS (high speed steel)

1.3.5 สปินเดิลติดปลายหุ่นยนต์หมุนด้วยความเร็วรอบสูงสุด 8220 rpm ความถี่ 135 Hz

1.3.6 กัดด้วยวิธีคมตัดตั้งฉากกับระนาบโต๊ะ (Tool Orientation Fixed)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถประยุกต์ใช้การกัดด้วยแขนหุ่นยนต์สำหรับสร้างชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่เพื่อลดต้นทุนทางด้านเครื่องจักร

ตารางที่ 1.1 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินการศึกษา (ต่อ)

ขั้นตอนและวิธีการทำงาน		ปี พ.ศ. 2565			ปี พ.ศ. 2566									
		10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	ทดสอบหัวข้อโครงร่างวิทยานิพนธ์													
3	ออกแบบระเบียบวิธีวิจัย													
4	จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์													
5	จัดทำแบบสอบถาม และเก็บข้อมูลด้วยเครื่องมือวัด													
6	วิเคราะห์ข้อมูล และกำหนดแนวทางการปรับปรุง													
7	นำเสนอผลงานวิชาการ													
8	สรุปการทดลอง และจัดทำวิทยานิพนธ์													
9	สอบป้องกันโครงร่างวิทยานิพนธ์													

1.6 นิยามคำศัพท์ที่เกี่ยวข้อง

ความสามารถ หมายถึง การเคลื่อนที่เพื่อกัดชิ้นงานด้วยแขนหุ่นยนต์ให้มีรูปร่างรูปทรงถูกต้องตามแบบ 3D

ประสิทธิภาพ หมายถึง การเคลื่อนที่เพื่อกัดชิ้นงานด้วยแขนหุ่นยนต์ให้มีรูปร่างรูปทรงถูกต้องตามแบบ 3D และมีค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดและรูปทรงอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 หุ่นยนต์อุตสาหกรรม

คำว่า robot ถูกใช้เป็นครั้งแรกใน ค.ศ. 1921 หุ่นยนต์ถูกสร้างขึ้นเพื่อให้ทำงานแทนมนุษย์ องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (International Organization for Standardization หรือ ISO) ให้นิยามของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมตามมาตรฐาน ISO 8373 “หุ่นยนต์อุตสาหกรรมคือ ตัวกระทำ (manipulator) ที่ถูกควบคุมแบบอัตโนมัติ และสามารถใช้โปรแกรมให้ปฏิบัติงานประยุกต์ใน อุตสาหกรรมอัตโนมัติที่หลากหลาย โดยการเคลื่อนที่ในปริภูมิสามแกน หรือมากกว่า แกนอ้างอิง อาจจะเคลื่อนที่ หรือ ไม่เคลื่อนที่ก็ได้” ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 เริ่มมีการนำหุ่นยนต์มาใช้ในสายการผลิต เพื่อทำงานในลักษณะที่เสี่ยงต่ออันตรายจากการทำงาน และลักษณะงานที่มีการทำแบบซ้ำๆ หุ่นยนต์ โดยทั่วไปมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ 4 ส่วน ดังนี้ [5, 6]

1. **ตัวหุ่นยนต์** เป็นโครงสร้างทางกายภาพที่ทำงานตามการประมวลผลของ คำสั่งควบคุม และ สัญญาณโครงสร้างแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ส่วนขับเคลื่อน (Locomotion) ที่ทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตำแหน่งที่ต้องการอีกส่วนหนึ่งของโครงสร้างสำคัญคือส่วนตัวกระทำ (manipulation) ซึ่งทำให้หุ่นยนต์สามารถทำงานต่างๆได้ตามต้องการ กลไกส่วนนี้จะเป็นแขนและมือ หุ่นยนต์

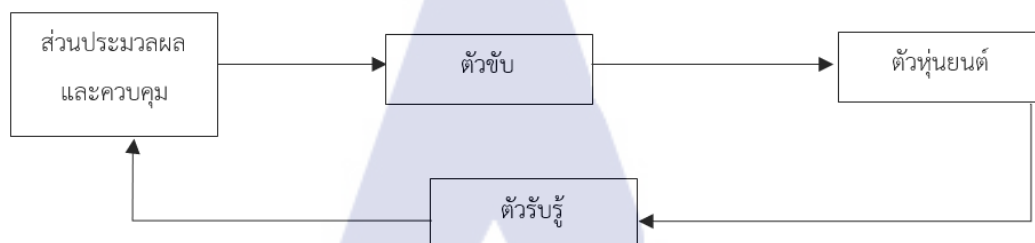
2. **ตัวขับเคลื่อน (actuators)** เป็นส่วนที่ทำให้หุ่นยนต์เกิดการเคลื่อนที่ และทำงาน ด้วยข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีต้นกำลังใช้มอเตอร์เป็นส่วนใหญ่ และจะมีกลไกซึ่งทำหน้าที่ลดทอน ความเร็ว และเพิ่มแรงขับให้เหมาะสมกับภาระ (Load)

3. **ตัวรับรู้ (sensors)** ทำหน้าที่ตรวจวัด (acquire) ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบ และสิ่งแสดงล้อมในแบบทันที (real-time) เพื่อส่งไปในส่วนของการประมวลผล และควบคุมเช่นตำแหน่ง หรือความเร็วของตัวขับเคลื่อน หรืออาจจะเป็นข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ และซับซ้อน

4. **ส่วนประมวลผล และควบคุม** ทำหน้าที่คล้ายกับระบบสมองของมนุษย์คือ จะรับข้อมูลจากตัวรับรู้ต่างๆ (sensor data fusion) เพื่อนำมาประมวลผล และคำนวณสัญญาณ ควบคุม (control signal) ส่งไปยังตัวขับเคลื่อนให้หุ่นยนต์ทำงานตามความต้องการ

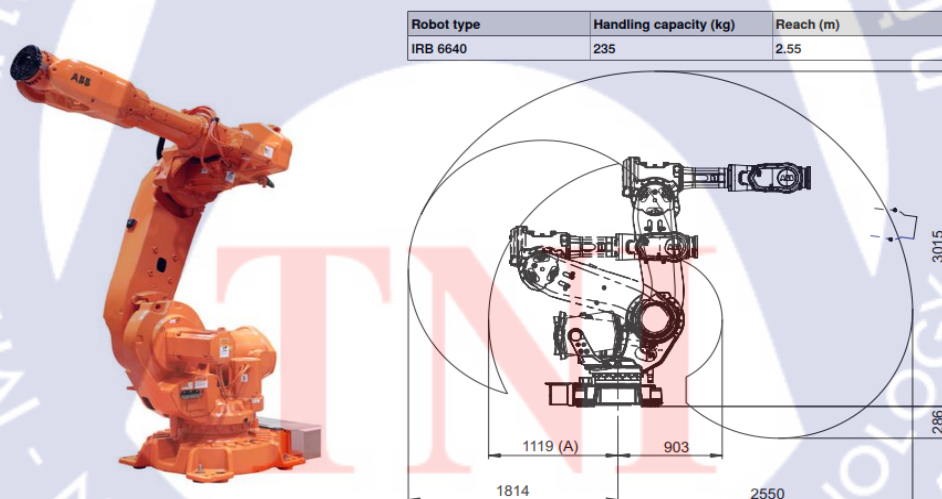
โดยทั่วไปแล้วองค์ประกอบทั้ง 4 ส่วน นี้มีความสัมพันธ์กันดังแสดงในรูปที่ 2.1 ระบบหุ่นยนต์ จะรับคำสั่ง ซึ่งอาจจะเป็นคำสั่งขั้นสูงเช่น การสื่อสารของมนุษย์ ส่วนประมวลผล และควบคุมจะทำ

หน้าที่แปลงคำสั่งเหล่านั้นเป็นคำสั่งปฐมฐาน (primitive command) และนำไปประมวลผลกับข้อมูลที่ได้รับจากตัวรับรู้เพื่อที่จะคำนวณสัญญาณควบคุมตัวขับให้หุ่นยนต์ทำงานตามคำสั่ง



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของหุ่นยนต์ และความสัมพันธ์

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้หุ่นยนต์แบบ Articulated Robot โดยใช้หุ่นยนต์ ABB รุ่น IRB 6640-235/2.55 เป็นแขนหุ่นยนต์แบบ 6 แกน โดยมีความสามารถแบกรับน้ำหนักสูงสุดที่ปลายแขน 235 กิโลกรัม และมีระยะเอื้อมถึง 2,550 มิลลิเมตร [7] ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หุ่นยนต์ ABB รุ่น IRB 6640

ความสามารถในการทำซ้ำของหุ่นยนต์ 0.05 มิลลิเมตร ความแม่นยำท่าทาง 0.15 มิลลิเมตร ความแม่นยำของเส้นทาง 2.17 มิลลิเมตร และการทำซ้ำเส้นทาง 0.66 มิลลิเมตร ของหุ่นยนต์ ABB รุ่น IRB 6640 ดังแสดงในรูปที่ 2.3

IRB 6640		235/2.55
Pose accuracy, APⁱ (mm)		0.15
Pose repeatability, RP (mm)		0.05
Pose stabilization time, PSt (s) within 0.4 mm of the position		0.19
Path accuracy, AT (mm)		2.17
Path repeatability, RT (mm)		0.66

รูปที่ 2.3 ข้อมูลแสดงข้อจำกัดของหุ่นยนต์

การเขียนโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์สำหรับหุ่นยนต์ ABB เป็นการควบคุมการทำงานของแขนเพื่อกำหนดคำสั่ง และการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในการดำเนินงานเช่น การย้ายวัตถุ การประกอบชิ้นงาน หรือการทำงานต่างๆ การเขียนโปรแกรมนี้อาจทำได้โดยใช้ภาษาโปรแกรมที่รองรับโดยระบบควบคุม ABB Robot Controller เป็นภาษา RAPID ที่เป็นภาษาโปรแกรมที่ใช้งานกับหุ่นยนต์ ABB ในการเขียนข้อมูลในการควบคุมหุ่นยนต์จะแบ่งระดับข้อมูลดังนี้ [8]

- Program เป็นระดับใหญ่สุดเหมือน Drive ในคอมพิวเตอร์
- Module เป็นระดับรองลงมาเหมือน Folder ในแต่ละ Drive
- Routine เป็นระดับเล็กที่สุด File ในแต่ละ Folder

การเขียนคำสั่งควบคุมหุ่นยนต์จะเริ่มจากการ Save เป็น Work Station ในการออกคำสั่งจะใช้ระดับข้อมูลทั้ง 3 ระดับดังตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 ความสัมพันธ์ของระดับข้อมูล

Program	Module	Routine
T_ROB 1	Module 1	Main
	Module XX	Routine ย่อยต่างๆ

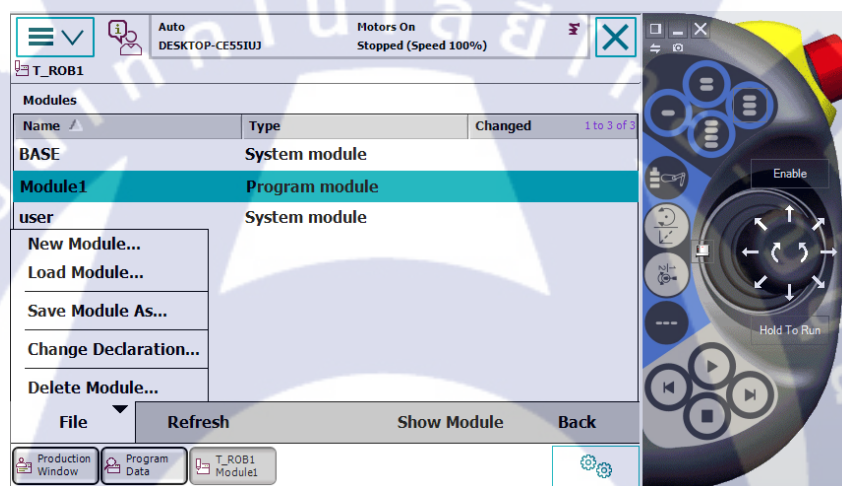
ลำดับการเขียนคำสั่งของหุ่นยนต์

1. ใช้ Program ที่แขนกลคือ T_ROB1
2. ตัว Module1 เป็น Default ของแขนกลในนั้นจะมี Routine ชื่อ Main ใช้ร่วมกัน
3. สร้าง Module ของแต่ละโปรแกรม
4. Module สร้างขึ้นจะไม่มี Main Routine แต่ละ Routine ย่อยไว้ใน Module ที่สร้าง

จะสามารถดึงมาใช้งานได้

การสร้าง Module ดังแสดงในรูปที่ 2.4

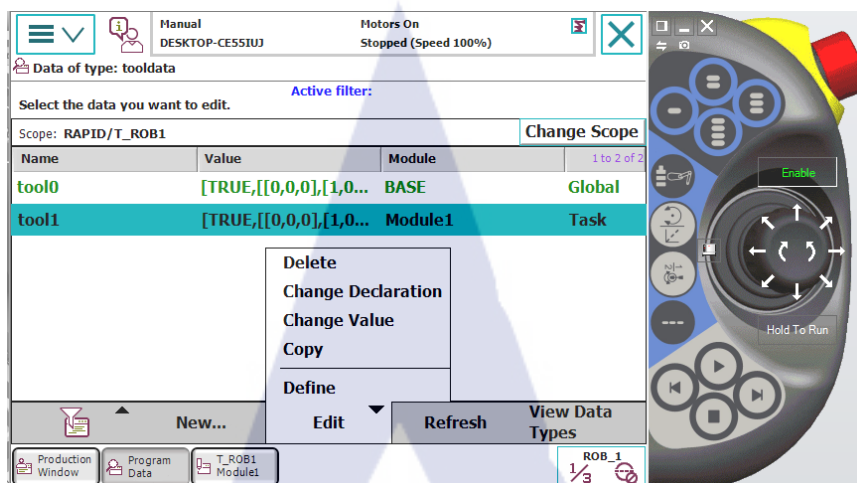
1. ที่ Flex Pendant กด เมนู เลือกโปรแกรม Program Editor
2. เลือกแถบ Modules จะแสดง Module ที่มีอยู่
3. เลือก File กด New Module
4. ตรง Name ตั้งชื่อเป็น XXXX โดย XXXX สามารถสร้างได้ตามต้องการ
5. Module มี 2 แบบ คือ Program กับ System เลือก Program กด OK
6. เลือก Tool ที่สร้างมาใส่ในชื่อที่ตั้ง XXXX
7. ไปที่ Tool Data เลือก tool กด Edit กด change Declaration
8. ตรง Module เลือก XXXX เป็นการย้ายข้อมูล Tool ไปอยู่ใน ชื่อ XXXX



รูปที่ 2.4 การสร้างไฟล์สำหรับสร้างคำสั่งของหุ่นยนต์

การย้าย Tool Data ไปไว้ที่ Module ที่สร้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.5

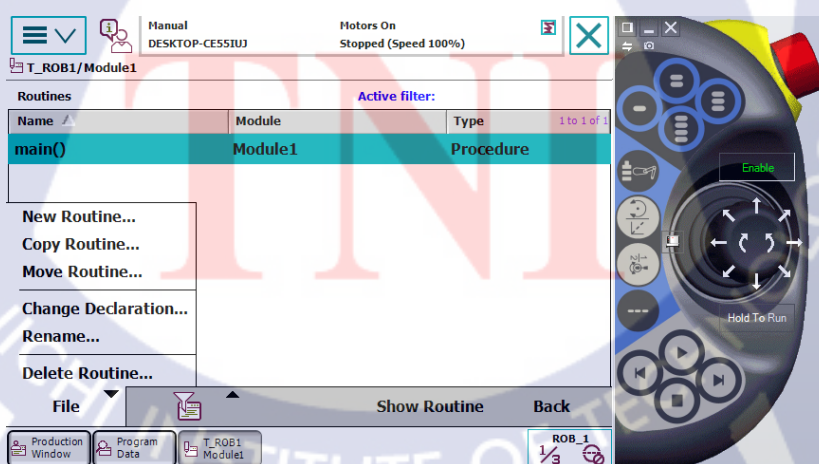
1. บน Flex Pendant เปิด เมนู เปิด Program Data เปิด Tool data
2. เลือก Tool ที่สร้างขึ้น
3. กด Edit กด Change Declaration
4. เปลี่ยนที่อยู่จาก Module1 เป็น XXXX กด OK
5. ข้อมูล Tool จะมาอยู่ใน XXXX



รูปที่ 2.5 แสดงคำสั่งการย้ายข้อมูล Tool Data

การสร้าง Routine ดังแสดงในรูปที่ 2.6

1. ที่ Flex Pendant กดเมนูเลือก Program Editor ไปที่ XXXX ที่สร้างขึ้น
2. กด Show Module จะเห็น Module เปล่า
3. กด File แล้วกด New Routine
4. ตรง Name ตั้งชื่อ RRset0 กด OK
5. กด Routine ที่ต้องการกด Show Routine

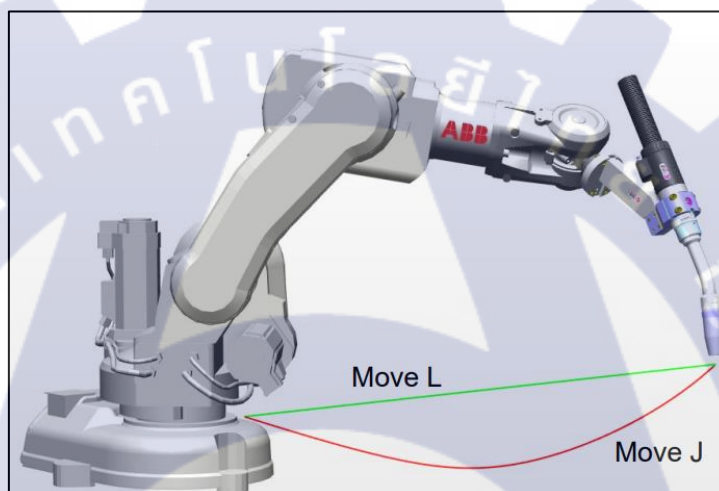


รูปที่ 2.6 การสร้างหน้าต่าง Routine สำหรับควบคุมการทำงานหุ่นยนต์

ภาษาหุ่นยนต์ หรือคำสั่งการทำงานของแขนหุ่นยนต์ยี่ห้อ ABB เพื่อไปยังตำแหน่งเป้าหมายของลักษณะงานเช่น การหยิบจับ การเชื่อม และการกัด เป็นภาษาที่ใช้ในหุ่นยนต์ยี่ห้อ ABB โดยเฉพาะภาษาของหุ่นยนต์คือ MOVJ *, v1000, z50, tool1;

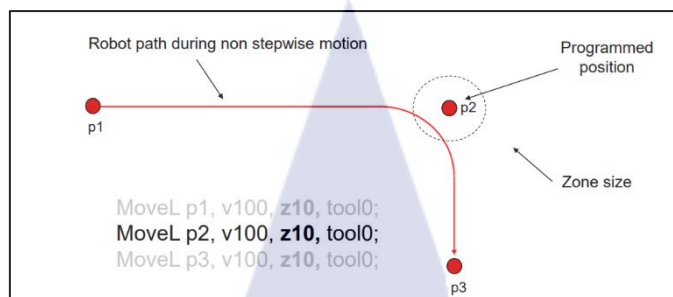
ลักษณะการเคลื่อนที่แบ่งเป็น 4 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2.7

- MoveL เป็นการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง
- MoveC เป็นการเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้ง
- MoveJ เป็นการเคลื่อนที่เป็นแบบอิสระ
- MoveAbsJ เป็นการเคลื่อนที่อิสระมากกว่า MoveJ



รูปที่ 2.7 คำสั่งของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

* แทนสัญลักษณ์ตำแหน่งจุดปลายทางที่ยังไม่ได้กำหนดชื่อ v1000 เป็นความเร็วของการเคลื่อนที่ปลายดอกกัดมีหน่วยเป็น 1000 มิลลิเมตรต่อวินาที z50 โดยที่ z คือ zone เป็นแนวโค้งของการเข้าจุดโค้ง และหมายเลข 50 เป็นรัศมีของ Zone มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.8



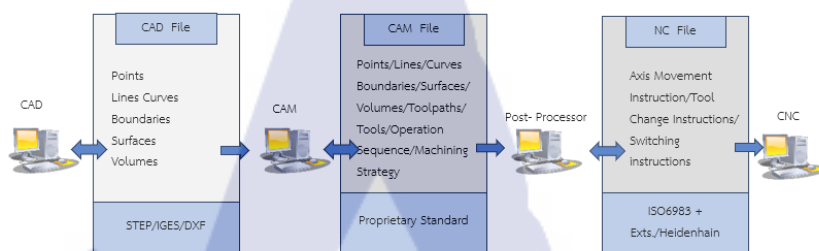
รูปที่ 2. 8 Zone ของคำสั่งการเคลื่อนที่

2.1.2 CAM (Computer-Aided Manufacturing)

คอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการผลิตมีหน้าที่ในการจำลองรูปแบบการผลิตชิ้นงาน โปรแกรม CAM จะถูกใช้ในการแปลงข้อมูลการออกแบบจาก CAD (Computer-Aided Design) เป็นรหัสการควบคุมที่เครื่องจักรสามารถเข้าใจได้ โปรแกรม CAM จะสร้างเส้นทางการเคลื่อนไหวของเครื่องจักร และคำสั่งการผลิตเพื่อสร้างชิ้นงานตามแผนการผลิตที่กำหนด [9] การใช้โปรแกรม CAM มีขั้นตอนที่สำคัญเพื่อให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้ตามที่ต้องการดังนี้

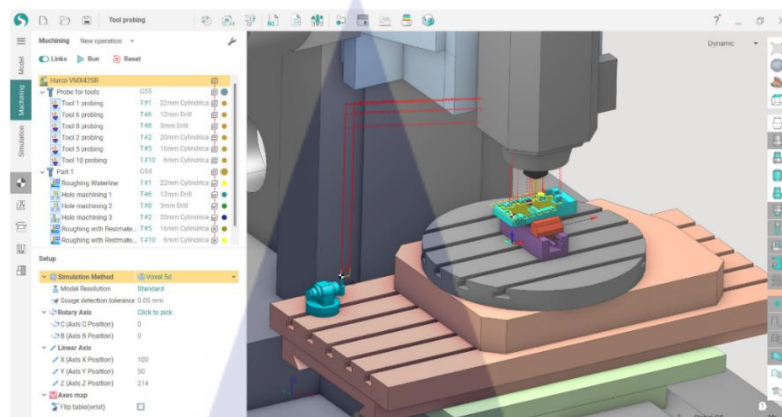
1. การนำเข้าข้อมูล CAD: โปรแกรม CAM มักจะนำเข้าข้อมูลจากโปรแกรม CAD เพื่อให้ได้ข้อมูลการออกแบบที่จะใช้ในกระบวนการผลิต ข้อมูลนี้ส่วนใหญ่จะเป็นไฟล์ CAD ที่ระบุรายละเอียดเกี่ยวกับรูปร่าง, ขนาด, และลักษณะอื่นๆของชิ้นงาน
2. การกำหนดการตัด (Toolpath Generation): โปรแกรม CAM จะสร้างเส้นทางการของเครื่องมือตัด (toolpath) ซึ่งระบุถึงที่ตัดของเครื่องมือตัดที่จะถูกนำไปใช้ในการสร้างสินค้า การกำหนด toolpath นี้ต้องพิจารณาปัจจัยหลายประการ เช่น ประสิทธิภาพ ความแม่นยำและเวลาที่ใช้
3. การกำหนดการตั้งเครื่อง (Setup): การตั้งเครื่องเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการใช้โปรแกรม CAM โดยให้ระบบรู้จักกับเครื่องจักร และเครื่องมือต่างๆที่ใช้ในกระบวนการผลิตนี้รวมถึงการตั้งค่าเครื่องจักร, เลือกเครื่องมือ, และปรับตำแหน่งเริ่มต้นของชิ้นงาน
4. การจำลอง (Simulation): ก่อนที่จะทำการผลิตจริง, การจำลองของกระบวนการผลิต (simulation) จะถูกทำเพื่อตรวจสอบว่าไม่มีความผิดพลาดในการตั้งค่า และการกำหนด toolpath ที่อาจทำให้เกิดความเสี่ยงหรือความเสียหาย
5. โปรแกรมการควบคุมเครื่องจักร (Post-Processing): หลังจากที่ได้รับ toolpath แล้วโปรแกรม CAM ต้องทำการแปลงข้อมูลเหล่านั้นเป็นรหัสที่เครื่องจักรเข้าใจได้ (G-code) ซึ่งจะถูกนำไปใช้ควบคุมเครื่องจักร

6. การทดสอบและปรับปรุง (Testing and Optimization): หลังจากเครื่องจักรทำงาน การทดสอบสินค้าที่ผลิตขึ้นมีความสำคัญ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนี้จะถูกนำมาปรับปรุงในกระบวนการ CAM เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุด



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม CAD/CAM เพื่อสร้าง NC code

งานวิจัยนี้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ SprutCAM เป็นซอฟต์แวร์ CAD/CAM ที่รองรับการทำงานที่หลากหลายอาทิเช่น เครื่อง CNC ตั้งแต่ 3 – 5 แกน เครื่องกลึง เครื่องเจาะ และ Robot ในอุตสาหกรรม 6 แกน มีการจำลองการทำงาน Simulation ที่สามารถดูการเคลื่อนที่ของ Toolpath แกนต่างๆ รวมถึงรูปร่างของชิ้นงานในแต่ละ Operation ได้ และยังสามารถปรับเปลี่ยนการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ เพื่อสร้างชิ้นงานให้ได้คุณภาพ โดยมีปัจจัยสำคัญ 3 ประการเช่น ควบคุมการชน ลดการเคลื่อนที่ของปลายแขนที่ไม่จำเป็น และแสดงผลพัธของการคำนวณที่ได้จากการจำลอง SprutCAM ยังสามารถกำหนดความเร็วการเคลื่อนที่ และความเร็วของ Spindle ในแต่ละ Step มีการกำหนดค่า และยังสามารถนำค่าเหล่านี้มาทำเป็น NC Code / G Code เพื่อที่จะนำไปป้อนใส่เครื่องจักร และหุ่นยนต์ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การจำลองเส้นทางการเดินของเครื่องจักร

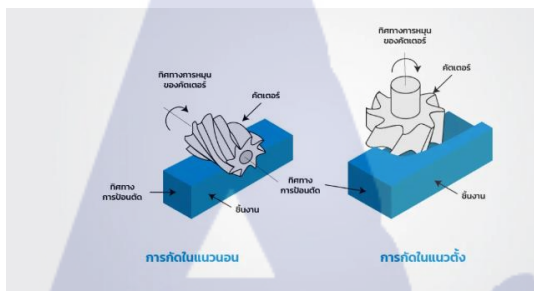
2.1.3 Machining Parameter

กระบวนการมิลลิ่ง (Milling) หรือการกัดเป็นกรรมวิธีขึ้นรูปโดยการตัดเฉือนวัสดุออกจากชิ้นงาน ทำให้ได้ขนาดที่ถูกต้อง และผิวของชิ้นงานมีความเรียบด้วยการป้อนชิ้นงานให้เคลื่อนผ่านเครื่องมือตัดที่หมุนอยู่กับที่รอบแกน (Spindle) เครื่องมือตัดถูกกดเข้ากับชิ้นงานเพื่อกัดวัสดุให้หลุดออกจากชิ้นงาน กระบวนการกัดด้วยเครื่อง Milling Machine และสามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือหลายชิ้น ทั้งหัวกัดปาดหน้า หัวกัดข้าง หัวกัดบ่าฉาก และดอกเอ็นมิล รวมถึงเม็ดมิด insert รูปทรงต่างๆ เลือกกัดให้เหมาะสมกับกระบวนการเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการผลิตสูง [10] ดังแสดงในรูปที่ 2.11



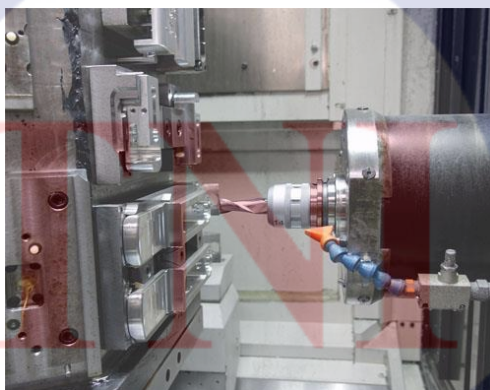
รูปที่ 2.11 ลักษณะการปาดผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการกัด [11]

กระบวนการผลิต Milling สามารถจำแนกได้ 2 รูปแบบ คือ การกัดแนวอน (Peripheral Milling) และการกัดแนวตั้ง (Face Milling) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ขึ้นอยู่กับตำแหน่งแต่ละทิศทางการหมุนของเครื่องมือตัดทั้งสองประเภท “หัวกัด หรือ ดอกกัด” เพื่อตัดเฉือนเนื้อออกจากชิ้นงาน



รูปที่ 2.12 การกัดแนวอน (Peripheral Milling) และการกัดแนวตั้ง (Face Milling)

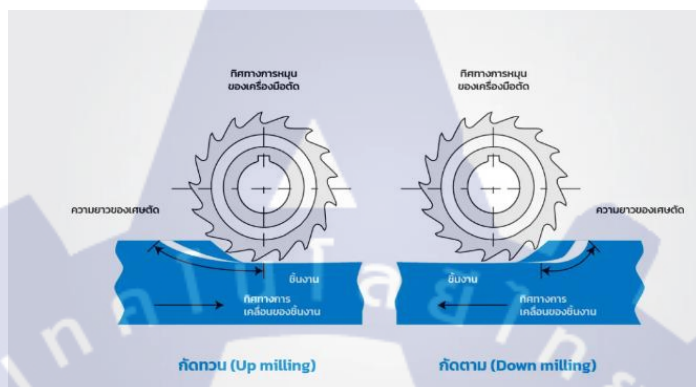
การกัดแนวอน Horizontal Milling / Peripheral Milling เป็นกระบวนการตัดเฉือนโดยวางหัวกัดขนาดกกับชิ้นงาน หรือหัวกัดอยู่ในตำแหน่งที่พื้นด้านข้างกตบนของชิ้นงาน ซึ่งตรงกันข้ามกับการกัดแนวตั้งที่ส่วนปลายสุดของหัวกัดจะกดเข้ากับชิ้นงาน การกัดแนวอนจึงเหมาะกับการกำจัดวัสดุมากออกจากชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การกัดแนวอน Horizontal Milling / Peripheral Milling [12]

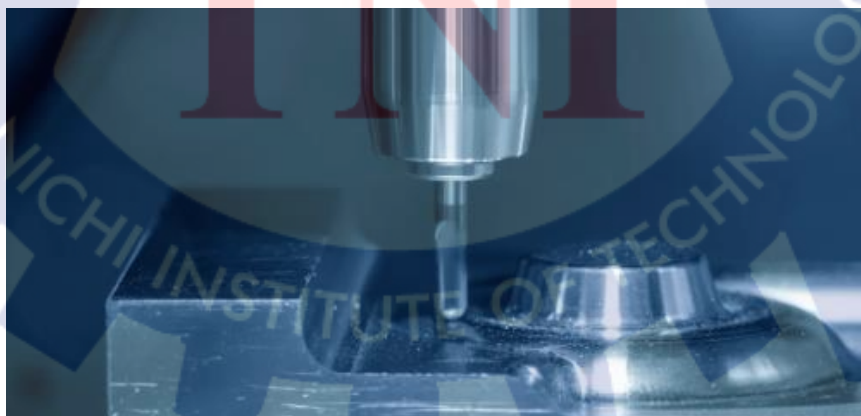
ทั้งนี้การกัดแนวอน (Peripheral Milling) ทิศทางการหมุนของหัวกัดจะแยกความแตกต่างของการกัดออกเป็น 2 รูปแบบ คือการกัดทวนและกัดตามดังแสดงในรูปที่ 2.14

การกัดตาม (Down Milling) เป็นการกัดตามระหว่างขึ้นงานกับคมตัด การกัดลักษณะนี้เป็นงานกัดหนัก อัตราการป้อนสูง ใช้มีดที่มีฟันกัดน้อยเป็นที่ยอมรับมากกว่าการกัดทวน (Up Milling) เพราะทิศทางการหมุนของใบมีดกับทิศทางการป้อนวัสดุไปในทิศทางเดียวกัน แรงกระแทกขึ้นงานกดลงด้านล่าง จึงทำให้ยึดชิ้นงานที่สะดวก ใบมีดมีอายุใช้งานมากขึ้น แรงที่ใช้ในการกัดน้อยลง



รูปที่ 2. 14 ทิศทางการกัดตาม (Down Milling) และ การกัดทวน (Up Milling)

การกัดแนวตั้ง Vertical Milling / Face Milling เป็นกระบวนการตัดเฉือนโดยวางหัวกัดหรือดอกกัดในแนวตั้ง “คว่ำหน้า” ลงทางด้านบนของชิ้นงาน ดอกกัดจะถูกติดตั้งเข้ากับหัวจับยึดเครื่องมือตัด (Tool Holder) และหมุนรอบแกนในแนวตั้ง โดยมีคมตัดที่ปลาย และขอบด้านนอกของดอกกัดทำให้ผิวงานกัดเรียกว่าการกัดแบบแนวนอนเนื่องจากแรงกด และแรงกระแทกที่ใช้ในการกัดน้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การกัดแนวตั้ง Vertical Milling / Face Milling

ออกแบบพารามิเตอร์การตัดเฉือนความเร็วตัดสำหรับวัสดุโพลี และคมตัดที่ทำมาจากเหล็ก เครื่องมือความเร็วรอบสูง (HSS) [10] โดยสมการที่ 1

$$V = \frac{\pi DN}{1000} \quad (1)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วตัด; เมตร ต่อ นาที

d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคมตัด; มิลลิเมตร

N คือ ความเร็วรอบของเพลาชับ; รอบ ต่อ นาที

การเคลื่อนที่ในการป้อนของชิ้นงานเป็นเส้นตรง เส้นโค้ง หรือแบบเกลียวดังสมการที่ 2 และ 3

อัตราการป้อนต่อรอบ S_1

$$S = \frac{f}{N} \quad (2)$$

อัตราการป้อนต่อฟัน S_z

$$S_z = \frac{f}{Nz_c} \quad (3)$$

เมื่อ

S_1 คือ อัตราการป้อนต่อรอบ; มิลลิเมตร ต่อ รอบ

S_z คือ อัตราการป้อนต่อฟัน; มิลลิเมตร ต่อ ฟัน

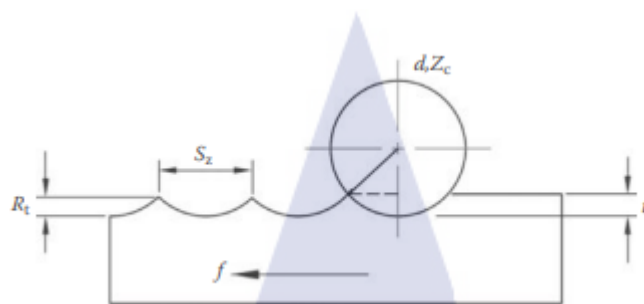
f คือ อัตราการป้อน; มิลลิเมตร ต่อ นาที

N คือ ความเร็วรอบของเพลาชับ; รอบ ต่อ นาที

z_c คือ จำนวนฟันที่ใช้ในการกัด

2.1.4 คุณภาพผิวจากการกัด

การเคลื่อนที่ของดอกกัดที่มีความสัมพันธ์กับพื้นผิวที่กำลังจะทำให้เกิดความหยาบของผิวชิ้นงาน [10] ดังแสดงในรูปที่ 2.16 สมการที่ใช้คำนวณความหยาบของผิวดังสมการที่ 4



รูปที่ 2. 16 ร่องรอยพื้นผิวที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของดอกกัด

$$R_t = \frac{d}{2} - \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2} - \frac{S_z}{2}\right)^2} \quad (4)$$

$$R_t = \frac{S_z^2}{4d}$$

$$R_t = \frac{f^2}{4dZ_c^2N^2}$$

โดยที่ R_t คือ ความหยาบผิว

f คือ อัตราการป้อนชิ้นงาน

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางดอกกัด

Z_c คือ จำนวนฟัน

N คือ ความเร็วในการหมุนหัวกัด

2.1.5 ความคลาดเคลื่อนด้านขนาดและรูปทรง (GD&T)

เป็นภาษาของสัญลักษณ์ที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูลเกี่ยวกับการเขียนแบบทางเทคนิคเพื่อที่จะสื่อสารได้อย่างถูกต้องในภาษาเขียน ผู้เขียน และ ผู้อ่านต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับสัญลักษณ์ และ โครงสร้างของภาษา ความรู้เกี่ยวกับมาตรฐาน GD&T มีสองมาตรฐานหลักสำหรับการวัดขนาดทางเรขาคณิต และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน องค์กรระหว่างประเทศเพื่อมาตรฐาน (ISO) เผยแพร่กลุ่มของมาตรฐาน ซึ่งเรียกรวมกันว่าข้อกำหนดผลิตภัณฑ์เชิงเรขาคณิต หรือมาตรฐาน ISO GPS และ American Society of Mechanical Engineers เผยแพร่มาตรฐาน ASME Y14.5 [13, 14] ประเภทของความคลาดเคลื่อน และลักษณะทางเรขาคณิตแต่ละส่วนเหล่านี้ครอบคลุมหนึ่งใน 5 ประเภท [15] พื้นฐานของความคลาดเคลื่อน ภายในแต่ละประเภทของความคลาดเคลื่อนได้กำหนดลักษณะทางเรขาคณิตหลายประการดังนี้

1. FORM ระบุพิภักัดความเพื่อสำหรับความตรง ความเรียบ ความเป็นวงกลม และ ความเป็นทรงกระบอกอย่างเหมาะสม ค่าความคลาดเคลื่อนเหล่านี้ใช้ในกรณีที่ค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดไม่สามารถควบคุมรูปทรงของชิ้นส่วนได้อย่างเพียงพอ ความคลาดเคลื่อนของรูปแบบไม่สามารถใช้ได้กับ Datum ดังแสดงในรูปที่ 2.17

FORM	—	Straightness (Surface)					
	— M	Straightness (Derived Median Line w/ (M))					
	▱	Flatness (Surface)					
	▱ M	Flatness (Derived Median Plane w/ (M))					
	○	Circularity					
	∅	Cylindricity					

รูปที่ 2.17 ข้อกำหนด และ สัญลักษณ์ในการควบคุมรูปทรง

2. ORIENTATION ความเป็นเชิงมุม ความตั้งฉาก และความขนานคือ ความสัมพันธ์เชิงทิศทางทั้ง 3 แบบ ค่าความคลาดเคลื่อนเหล่านี้ใช้เพื่อควบคุมการหมุนของคุณลักษณะที่สัมพันธ์กับจุดอ้างอิง ไม่สามารถใช้ควบคุมตำแหน่งได้ดังแสดงในรูปที่ 2.18

ORIENTATION	//	Parallelism					
	⊥	Perpendicularity (Feature)					
	⊥ M	Perpendicularity (Feature of Size w/ (M))					
	∠	Angularity					

รูปที่ 2. 18 ข้อกำหนด และสัญลักษณ์ในทิศทางการจัดวาง

3. LOCATION ตำแหน่ง ศูนย์กลาง และ สมมาตรคือ ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง 3 ประเภท ใช้เพื่อควบคุมตำแหน่งของคุณลักษณะที่สัมพันธ์กัน หรือสัมพันธ์กับ Datum ดังแสดงในรูปที่ 2.19

LOCATION		Position				None	
		Position (Maximum Material Condition)					
		Concentricity				Distribution/ Evenness of Form Only	
		Symmetry					

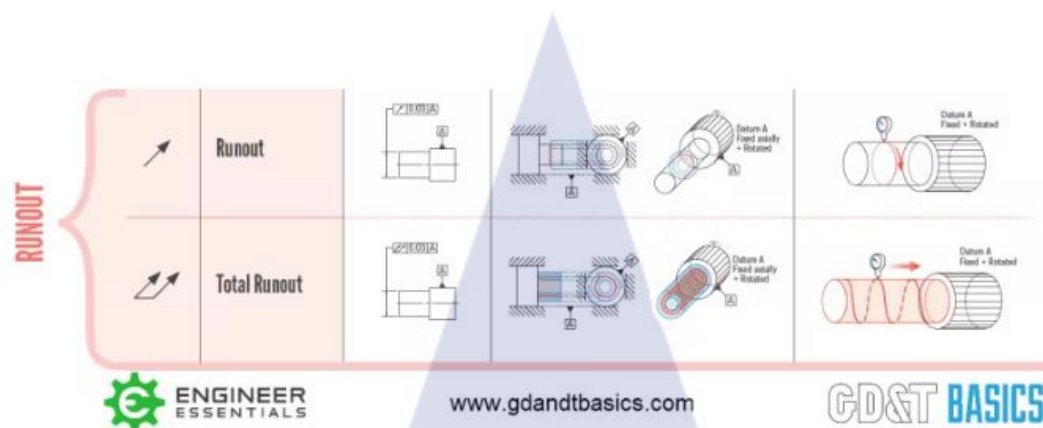
รูปที่ 2.19 ข้อกำหนด และสัญลักษณ์ในการควบคุมการจัดวางตำแหน่ง

4. PROFILE โปรไฟล์ถูกกำหนดให้เป็นโครงร่างของพื้นผิว เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของโปรไฟล์มีสองประเภท ได้แก่ โปรไฟล์ของพื้นผิว และโปรไฟล์ของเส้น โปรไฟล์ของเส้นเพื่อจะควบคุมรูปร่างของพื้นผิวที่สัมพันธ์กับส่วนตัดขวางในอุดมคติที่กำหนดไว้ล่วงหน้าของพื้นผิวนั้น ในกรณีนี้ โปรไฟล์ในอุดมคติ สามารถกำหนดเป็นรูปร่างสองมิติได้ โปรไฟล์ของค่าความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวใช้เพื่อควบคุมรูปร่างของพื้นผิวที่สัมพันธ์กับพื้นผิวสามมิติในอุดมคติ สถานะมาตรฐาน “ไฟล์ข้อมูลดิจิทัล หรือมุมมองที่เหมาะสมบนภาพวาดจะต้องกำหนดโปรไฟล์ที่แท้จริง” ขึ้นอยู่กับรูปร่างโปรไฟล์ และ Datum ที่อ้างอิง ความคลาดเคลื่อนของโปรไฟล์สามารถควบคุมขนาดแบบฟอร์ม การวางแนว หรือตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.20

PROFILE		Profile of a line				
		Profile of a surface				

รูปที่ 2.20 ข้อกำหนด และ สัญลักษณ์ในการควบคุมรูปโครงร่าง

5. RUNOUT ค่าความคลาดเคลื่อนที่ใช้เพื่อควบคุมความแปรผันของพื้นผิวเมื่อหมุนรอบแกน Datum พื้นผิวสามารถขนาน หรือตั้งฉากกับแกน Datum ได้การหมุนหนีศูนย์แบบวงกลมเป็นค่าที่ใช้เพื่อระบุว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนใช้กับพื้นผิวเดียวเท่านั้น ในขณะที่คำว่า การหมุนหนีศูนย์ทั้งหมดระบุว่าค่าเพื่อใช้กับพื้นผิวทั้งหมดที่มีสมมาตรแบบหมุนรอบแกน Datum ดังแสดงในรูปที่ 2.21



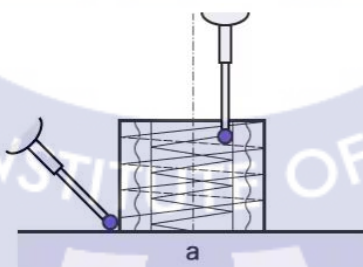
รูปที่ 2.21 ข้อกำหนด และ สัญลักษณ์ในการควบคุมความเบี่ยงเบนเนื่องจากการหมุน

2.1.6 การวัดขนาดด้วยเครื่องมือวัดแบบ 3 มิติ (CMM)

การใช้เครื่อง CMM โดยใช้ฟังก์ชันที่สามารถวิเคราะห์ผลตามเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิต และมิติ (Geometric Dimensional and Tolerancing: GD&T) แล้วนำผลที่ได้จากการวัดไปเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดใน CAD ไฟล์ แล้วแสดงค่าเพื่อสามารถผลิตชิ้นงาน หรือตัดแปลงค่า ERROR ต่างๆ และสามารถวัดค่า และแสดงผลเป็นแบบ 3D

วิธีวัดแบ่งเป็นประเภทการวัด [16] ดังนี้

1. CMM แบบไม่สัมผัส (Non-contact type) แบบไม่สัมผัสจะใช้วิธียิงเลเซอร์ (Laser type) หรือแสงสแกน และภาพถ่าย (Optical type/Structured Light type) วัดค่าชิ้นงานซึ่งมีความแม่นยำสูง เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก
2. CMM แบบสัมผัส (Contact type) แบบสัมผัสจำเป็นต้องสัมผัสกับชิ้นงานโดยตรงด้วยหัวโพรบ จึงมีข้อเสียที่ทำให้ชิ้นงานเป็นรอย แต่เป็นที่นิยมเนื่องจากเครื่องมือมีหลากหลายสามารถเลือกใช้ได้เหมาะสม



รูปที่2. 22 แสดงการวัดด้วยหัวโพรบสัมผัสแบบต่อเนื่อง

วางสไตลส์บนจุดการวัดบนองค์ประกอบ Datum (ทรงกระบอก) แล้ววางสไตลส์บนจุดการวัดขององค์ประกอบของชิ้นงาน (ทรงกระบอก) เพื่อวัดความร่วมแกน ผลการวัดจะถูกบันทึกลงในเครื่องมือวัด การวัดที่ต้องใช้การวางสไตลส์บนพื้นผิวจะมี 2 โหมด ได้แก่ การวัดจุด ซึ่งจะวัดด้วยการวางสไตลส์บนพื้นผิวทุกครั้งที่วัด และการวัดแบบทริกเกอร์อัตโนมัติ (การสแกน) ซึ่งจะวัดจุดอย่างต่อเนื่องด้วยการวางสไตลส์บนชิ้นงานแล้วเลื่อนไปบนพื้นผิวซึ่งจะช่วยให้สไตลส์เคลื่อนที่เป็นเกลียวสำหรับวัดทรงกระบอกที่สไตลส์สัมผัสได้ยาก

2.1.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล

การทดสอบสมมติฐาน และช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ของประชากร โดยประชากรของทั้ง 2 ชุด จะมีค่าเฉลี่ย μ และความแปรปรวน σ รวมถึงการอ้างอิงสรุปผลจากทั้ง 2 ชุดที่มีขนาดจำนวนขนาด n การทดสอบสมมติฐานของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ย (กรณีที่ไม่ทราบค่าความแปรปรวน) Hypothesis Test on Differences in Means of Two Normal Population, Variances Unknown) การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบที (t-Distribution) จึงนำมาใช้ในการทดสอบสมมติฐานสามารถแบ่งได้ 2 กรณี [17] คือ

กรณีที่ 1 : $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$ (ไม่ทราบความแปรปรวน แต่ทราบว่าเท่ากัน) สถิติที่ใช้ทดสอบ (Test Statistic) ที่ใช้คือ T_0 โดยที่

$$t_0 = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} : \text{โดยที่ } v = n_1 + n_2 - 2 \quad (5)$$

$$\text{และ } E(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) = E(\bar{X}_1) - E(\bar{X}_2) \quad (6)$$

$$= \mu_1 - \mu_2$$

$$V(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \text{ แต่ } \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2 \quad (7)$$

$$= \sigma^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)$$

$$\text{และ } S_p^2 = \left(\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right) \quad (8)$$

ดังนั้นการทดสอบสมมติฐานของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยดังนี้

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = \Delta_0$$

$$\text{Test Statistic : } t_0 = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - \Delta_0}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (9)$$

$$H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq \Delta_0 \text{ เงื่อนไขในการปฏิเสธ } H_0 \quad t_0 > t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_2-2} \text{ หรือ } t_0 < t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_2-2}$$

$$H_1 : \mu_1 - \mu_2 > \Delta_0 \quad \text{เมื่อ } t_0 > t_{\alpha, n_1+n_2-2}$$

$$H_1 : \mu_1 - \mu_2 < \Delta_0 \quad \text{เมื่อ } t_0 < -t_{\alpha, n_1+n_2-2}$$

กรณีที่ 2 : $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ (ไม่ทราบความแปรปรวน แต่ทราบว่าไม่เท่ากัน) มีขั้นตอนแบบกรณีที่ 1 แต่เปลี่ยนตัวสถิติที่ใช้ทดสอบ (Test Statistic, T_0) และองศาเสรีที่ต้องใช้สถิติที่ใช้คือ

$$t_0 = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - \Delta_0}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (10)$$

โดยการแจกแจงแบบที (t-Distribution) มีองศาเสรี (Degree of Freedom, v)

$$v = \frac{\frac{(s_1^2 + s_2^2)^2}{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}{\frac{(s_1^2)^2}{n_1+1} + \frac{(s_2^2)^2}{n_2+1}} - 2 \quad \text{หรือ} \quad v = \frac{\frac{(s_1^2 + s_2^2)^2}{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}{\frac{(s_1^2)^2}{n_1-1} + \frac{(s_2^2)^2}{n_2-1}} - 2 \quad (12)$$

σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

n คือ จำนวนตัวอย่างประชากร

μ คือ ค่าเฉลี่ย

t_0 คือ องศาเสรี หรือตัวแปรสุ่ม

H_0 คือ การปฏิเสธสมมติฐานหลัก

H_1 คือ การสนับสนุนสมมติฐานอื่นๆ

$\bar{X}_1, \bar{X}_2$ คือ ค่าเฉลี่ยตัวอย่าง

S_1, S_2 คือ ความแปรปรวนตัวอย่าง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 นริสา ทองนุ่ม และคณะ [4] ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้เลเซอร์แทรกเกอร์ในการตรวจสอบค่าความถูกต้องและความแม่นยำของแขนหุ่นยนต์ 6 แกน ตามมาตรฐาน ISO 9283 ทำการทดลองบนหุ่นยนต์ KUKA รุ่น KR150 R2700 เพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็วและน้ำหนักที่ปลายแขนประกอบด้วยความเร็ว 0.01, 0.25, 0.63 เมตรต่อวินาที และติดน้ำหนักถ่วงปลายแขนหุ่นยนต์ 5

และ 0.5 กิโลกรัม ผลการทดลองพบว่าในตำแหน่ง พิกัดแกน x และพิกัดแกน y จะมีค่าที่เบี่ยงเบนไปเล็กน้อย แต่จะมีค่าเบี่ยงเบนในตำแหน่งพิกัดแกน z สูง ทั้งในแนวแกนที่เป็นบวกและแนวแกนที่เป็นลบ

2.2.2 อัฐภูมิ เหลืองทองคำชนะ รักษศิริ และ คณะ [3] ทำการทดลองเพื่อประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดความถูกต้องและแม่นยำของแขนหุ่นยนต์แบบ 6 แกน โดยใช้หุ่นยนต์ KUKA รุ่น KR150 R2700 โดยติดตั้งตัวสะท้อนแสงเลเซอร์ไว้ที่ส่วนปลายแขนของหุ่นยนต์ ผลการศึกษาพบว่าค่าความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ที่ระดับ ± 0.0149 มิลลิเมตร โดยการรายงานค่าความไม่แน่นอนขยายของการทดสอบตำแหน่งและการทดสอบเส้นทางขึ้นอยู่กับค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานคูณกับตัวประกอบครอบคลุม ($k=2$) ซึ่งให้ระดับความเชื่อมั่นอยู่ที่ 95%

2.2.3 L. B. da Silva และ คณะ [18] ศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะคมตัดในการตัดเฉือนชิ้นงานด้วยแขนหุ่นยนต์แบบ 6 แกน โดยใช้หุ่นยนต์ Motoman SV3X ชิ้นงานวางบนโต๊ะที่สามารถปรับตำแหน่งแบบ 2 แกน โดยใช้คมตัดหัวบอลขนาด 3 มิลลิเมตร และ 1 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่า การเอียงมุมของคมตัดที่เหมาะสมมีผลต่อคุณภาพผิวและความแม่นยำของขนาดชิ้นงานที่เกิดจากการกัดชิ้นงานด้วยแขนหุ่นยนต์

2.2.4 P. J. Fu และ คณะ [19] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเส้นทางการเดินของคมตัดเพื่อเพิ่มระดับความเรียบผิวชิ้นงานที่ได้จากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์ การศึกษาใช้โปรแกรม RobotStudio เพื่อจำลองการเคลื่อนที่และปรับเส้นทางการตัดเฉือนให้เหมาะสม ทำการตัดเฉือนด้วยแขนหุ่นยนต์ ABB รุ่น IRB-6660 205/190 ดอกกัดปลายมนแบบสี่ฟันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ความเร็วของการหมุนมอเตอร์เป็น 15000 รอบต่อนาที และความลึก 0.5 มิลลิเมตร อัตราการป้อนอยู่ที่ 300 มิลลิเมตร ต่อนาที ผลการศึกษาพบว่า การปรับระดับความเร่งของข้อต่อข้อจำกัดของข้อต่อ ข้อจำกัดของประสิทธิภาพความแข็งแรง โดยวิธีการเชิงเส้นต่อเนื่องระหว่างเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของพื้นผิวชิ้นงานที่ได้จากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์

2.2.5 M. F. Zaeh และ O. Roesch [20] บทความนี้นำเสนอแนวทางในการปรับปรุงความแม่นยำในการตัดเฉือนของหุ่นยนต์กัด วิธีการเพิ่มความแม่นยำในการตัดเฉือนประกอบด้วยตัวควบคุมพีซี แบบจำลองสำหรับการชดเชยการเบี่ยงเบนของเส้นทาง (คงที่) และวิธีการระบุพารามิเตอร์ความแข็งที่จำเป็นของหุ่นยนต์ที่มีค่าต่ำ โดยการทดลองใช้หุ่นยนต์ประเภท KUKA KR 240 R2500 ผลที่ได้จากการทดสอบการตัดเฉือนซึ่งความเบี่ยงเบนที่เกิดจากแรงลดลง 70 %.

2.2.6 L. Cen และ S. N. Melkote [21] ทำการศึกษาผลกระทบของพลวัตหุ่นยนต์ต่อแรงในการกัดด้วยหุ่นยนต์ โดยใช้หุ่นยนต์ KUKA รุ่น KR210 โดยใช้การคำนวณแบบวนซ้ำเพื่อหาผลกระทบของแรงการกัดต่อความแข็งแรงของแขนหุ่นยนต์ได้รับการพิจารณาโดยใช้ Conservative

Congruence Transformation (CCT) การทดลองการกัดด้วยหุ่นยนต์แสดงให้เห็นถึงการลดลงของความผิดพลาดที่คาดการณ์ไว้ประมาณ 50% ถึง 75% สำหรับลักษณะสำคัญของแรงการกัดที่เกิดขึ้นจากรูปแบบพลวัต

2.2.7 F. C. Yin และ คณะ [2] ศึกษาผลกระทบของเส้นทางการเดินของล้อหินที่มีผลต่อแรงการเจียรไนของหินทรงซับซ้อนด้วยแขนหุ่นยนต์แบบ 6 แกน ใช้หุ่นยนต์ KUKA รุ่น KR240 R2900 โดยทำการปรับค่าความผันผวนของแรงเจียรในการเก็บผิวละเอียดให้เหมาะสม และวิธีการตัดเฉือนที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการเก็บผิวสำเร็จถูกกำหนดเพื่อปรับปรุงข้อผิดพลาดของโปรไฟล์พื้นผิว ผลการทดลองพบว่าแรงเจียรลดลง 52.8% และข้อผิดพลาดของโปรไฟล์พื้นผิวหลังการตัดเฉือนลดลง 36.9%

2.2.8 E. Abele และ คณะ [22] ศึกษาการปรับเส้นทางการเครื่องมือตามข้อมูลการวัดทางแสงสำหรับการกัดด้วยหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ทำการทดลองด้วยหุ่นยนต์ KUKA KR210 ในการตัดเฉือนชิ้นงานพบว่าค่าความเบี่ยงเบนประมาณ 0.6 มิลลิเมตร จึงนำวิธีการกำหนดเส้นทางการกัดภายใต้แรงการกัด แล้วทำการนำชิ้นงานที่เกิดการตัดเฉือนไปวัดขนาดโดยใช้เครื่องสแกนด้วยแสงเปรียบเทียบกับ CAD แล้วนำไปใส่โปรแกรม dextral discretization เพื่อทำการเปรียบเทียบขนาดและทำการสร้างเส้นทางการตัดเฉือนชิ้นงานใหม่สามารถลดความเบี่ยงเบนได้ 0.1 มิลลิเมตร

2.2.9 X. Qu และ คณะ [23] นำเสนอการปรับปรุงทิศทางการป้อนและท่าทางปลายแขนหุ่นยนต์โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์ โดยใช้หุ่นยนต์ KUKA รุ่น KR210 R2700-2 ผลการทดลองพบว่าทิศทางการป้อนและท่าทางของปลายแขนที่ถูกชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนของโปรไฟล์ที่วัดได้มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของพื้นผิวชิ้นงานที่ได้จากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์ได้อย่างมาก

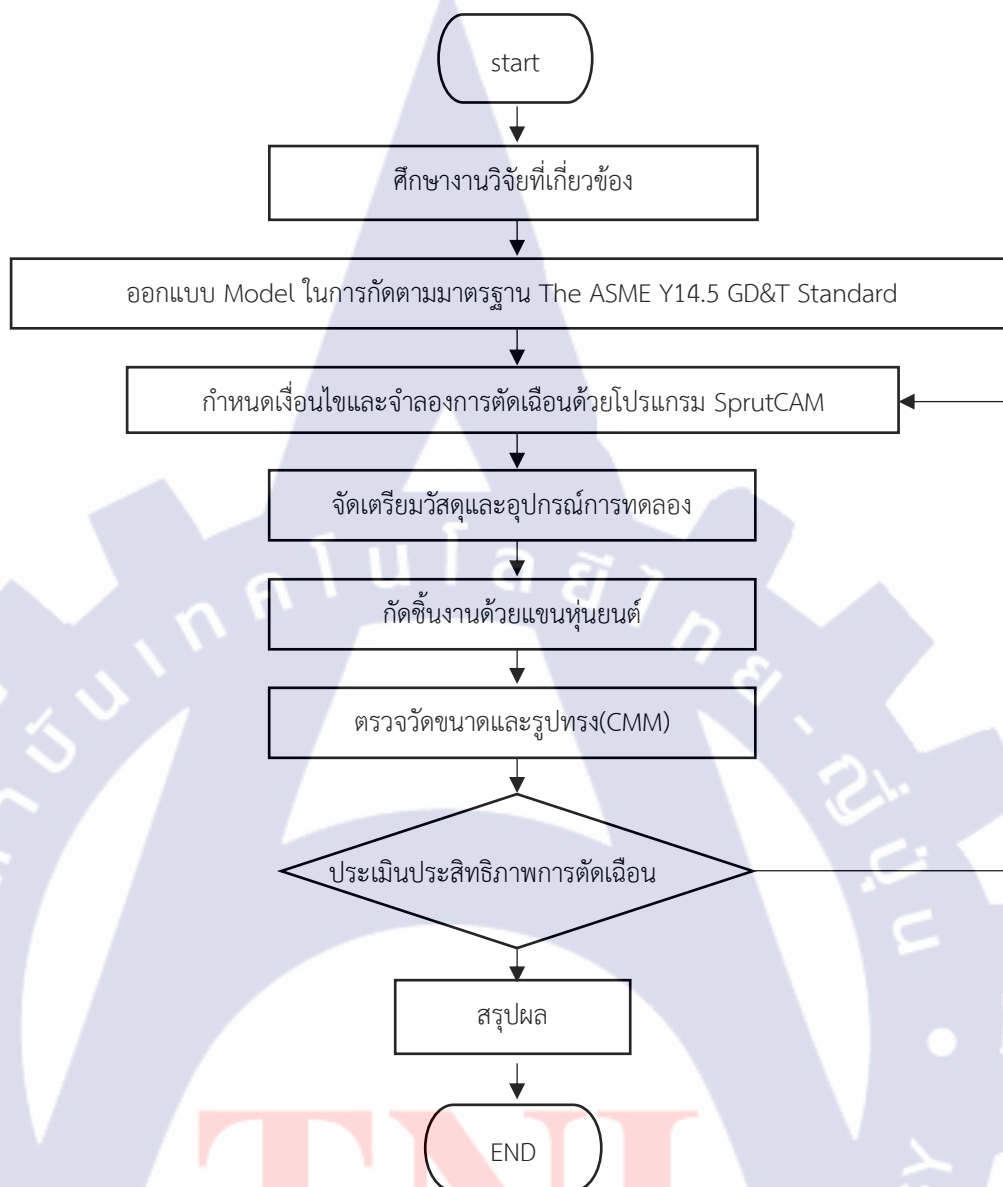
บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงระเบียบวิธีวิจัยเกี่ยวกับการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการกัดวัสดุโพลีเมอร์ด้วยหุ่นยนต์ 6 แกน ที่มีผลต่อความแม่นยำของรูปทรง และขนาดงาน ซึ่งรายละเอียดวิธีการดำเนินการวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

3.1 วิธีการดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ออกแบบชิ้นงาน กำหนดเงื่อนไขในการตัดเฉือน จำลองการตัดเฉือนในโปรแกรม SprutCam กัดชิ้นงานจริง วัดขนาด และรูปทรงดังแสดงใน FlowChart



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

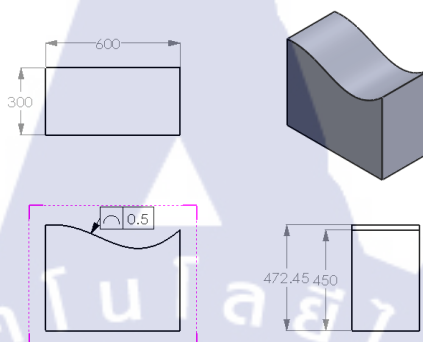
3.2 ออกแบบชิ้นงานด้วยโปรแกรม SOLIDWORK 2022

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Solid Work 2022 ในการออกแบบชิ้นงานโดยกำหนดให้ชิ้นงานมีรูปร่าง (Shape) และรูปทรงเรขาคณิต (Geometry) ให้สามารถตรวจประเมินความเที่ยงตรงตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน GD&T Standard ASME Y 14.5 (2009) [14]

ประกอบด้วยชิ้นงาน 2 แบบ ดังนี้

แบบที่ 1 ชิ้นงานรูปทรงพื้นผิวโค้งอิสระ

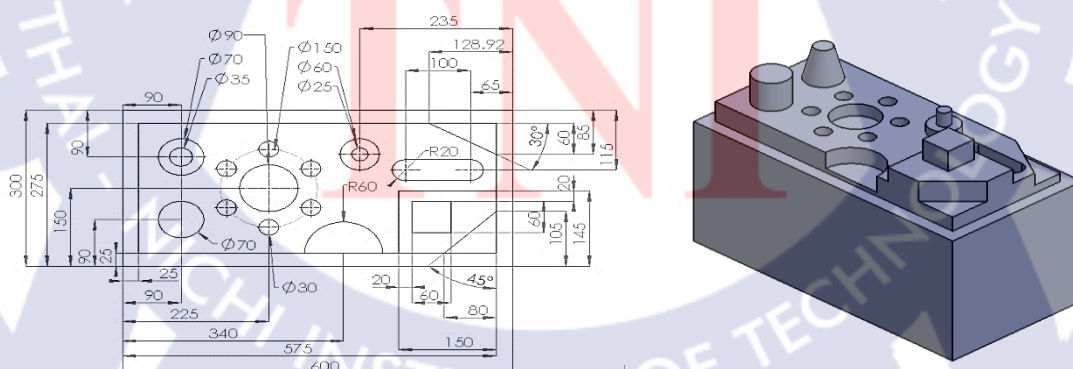
ชิ้นงานมีขนาด กว้าง X ยาว X สูง 300 X 600 X 473 มิลลิเมตร ผิวด้านบนออกแบบให้เป็นผิวสัมผัสของส่วนโค้งเพื่อให้เกิดรูปทรงอิสระดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบงานผิวโค้งอิสระสำหรับการตัดเฉือนด้วยแขนหุ่นยนต์

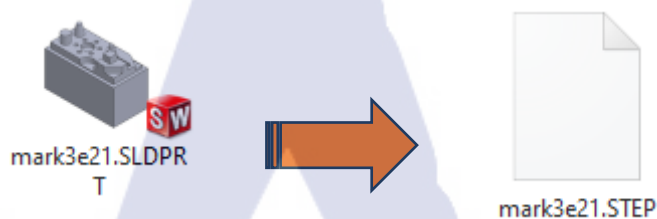
แบบที่ 2 ชิ้นงานรูปทรงเรขาคณิต

ชิ้นงานที่ถูกออกแบบมีขนาด กว้าง X ยาว X สูง 300 X 600 X 520 มิลลิเมตร ประกอบด้วยรูปทรงเรขาคณิต ได้แก่ รูปทรงกระบอก ทรงกลม ทรงกรวย ร่องสลีต รู และ ทรงสี่เหลี่ยม ที่มีขนาด และ ตำแหน่งแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แบบงานรูปทรงเรขาคณิตสำหรับการตัดเฉือนด้วยแขนหุ่นยนต์

แบบงานที่ได้จากการเขียนด้วย Solid Work จะถูกแปลงไฟล์ให้เป็นไฟล์ที่สามารถไปใช้ได้กับโปรแกรม SprutCAM มีชื่อสากลคือ Standard for the Exchange of Product Data (STEP) ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การแปลงไฟล์จาก .SLDPR เป็นนามสกุล .stp

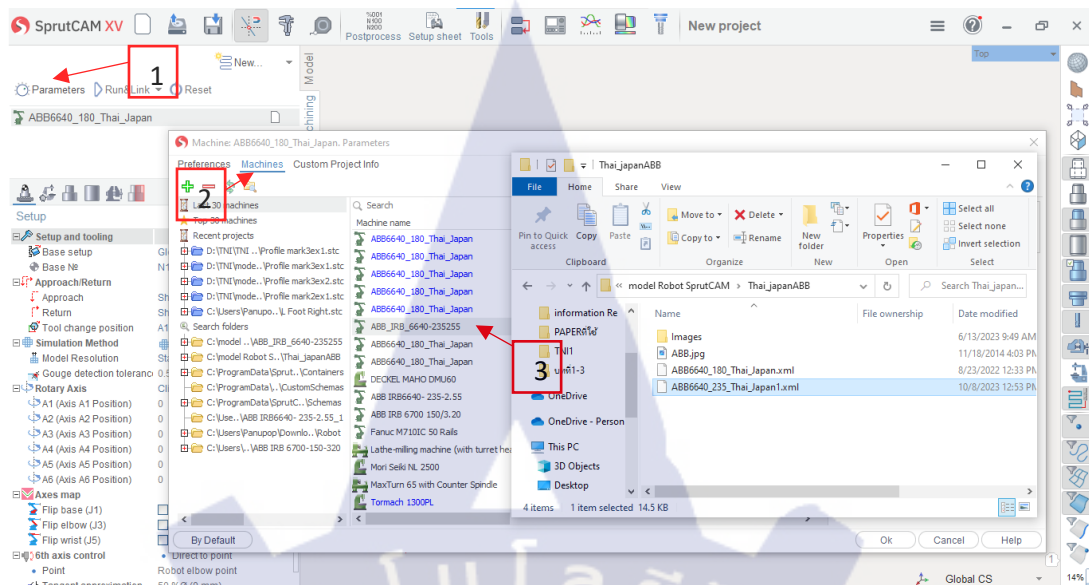
3.3 การกำหนดพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์สำหรับการจำลองการตัดเฉือนด้วยโปรแกรม

เพื่อให้ผลการจำลองด้วยโปรแกรมมีความแม่นยำ จำเป็นต้องตั้งค่ามุม และขนาดแขนของหุ่นยนต์ให้ตรงกับขนาดจริงของหุ่นยนต์โดยอ้างอิงข้อมูลของหุ่นยนต์จากคู่มือ Specification Manual ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้หุ่นยนต์ ABB รุ่น IRB 6640 235/2.55 มืองศาของแต่ละแกนดังแสดงในรูปที่ 3.5

Movement		
Axis movement	Working range	Axis max. speed
Axis 1 Rotation	+170° to -170°	100 to -110°/s
Axis 2 Arm	+85° to -65°	90°/s
Axis 3 Arm	+70° to -180°	90°/s
Axis 4 Wrist	+300° to -300°	170 to -190°/s
Axis 5 Bend	+120° to -120°	120 to -140°/s
Axis 6 Turn	+360° to -360°	190 to -235°/s

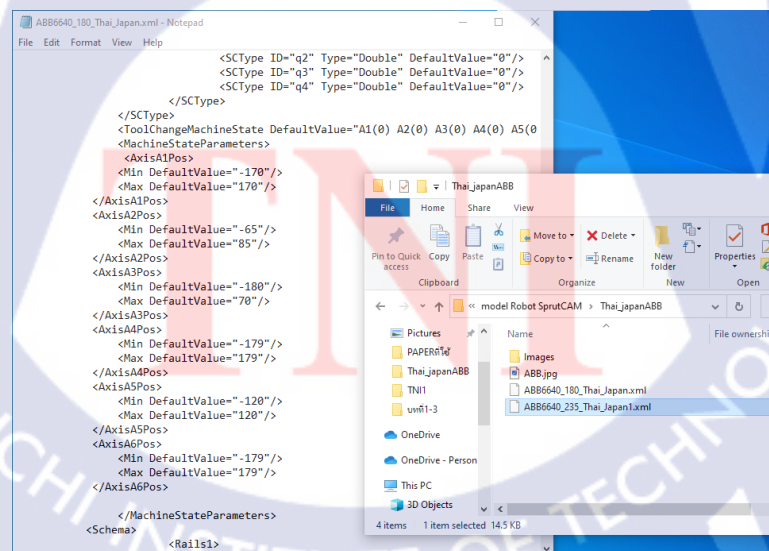
รูปที่ 3.5 ขนาดของแขนหุ่นยนต์ตาม Specification Manual

ขั้นตอนการตั้งค่ามุมมองศาของแกนทั้ง 6 แกน เริ่มต้นจากการเปิดโปรแกรม SprutCAM และดำเนินการเพื่อตั้งค่า Parameters ของหุ่นยนต์ตามขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การตั้ง Parameters ของหุ่นยนต์ให้ตรงกับค่า Specification Manual

1. เลือก Parameters เพื่อ Link ไปที่ไฟล์หุ่นยนต์ ABB IRB 6640 235/2.55
2. เลือกหน้าต่าง Machines
3. เลือก Explorer จะขึ้นไฟล์ Parameters ของหุ่นยนต์



รูปที่ 3.7 Parameters ของหุ่นยนต์ไฟล์เป็น Note Pan

4.เปิดไฟล์ด้วยโปรแกรม Note Pad ตรวจสอบเช็คค่าองศาของแต่ละแกนให้ตรงกับค่า Parameters ของหุ่นยนต์ดังแสดงในรูปที่ 3.8



```

ABB6640_180_Thai_Japan1 - Notepad
File Edit Format View Help

<SCType ID="q2" Type="Double" DefaultValue="0"/>
<SCType ID="q3" Type="Double" DefaultValue="0"/>
<SCType ID="q4" Type="Double" DefaultValue="0"/>
</SCType>
</SCType>
<ToolChangeMachineState DefaultValue="A1(0) A2(0) A3(0) A4(0) A5(0) A6(0)"/>
<MachineStateParameters>
  <AxisA1Pos>
    <Min DefaultValue="-170"/>
    <Max DefaultValue="170"/>
  </AxisA1Pos>
  <AxisA2Pos>
    <Min DefaultValue="-65"/>
    <Max DefaultValue="85"/>
  </AxisA2Pos>
  <AxisA3Pos>
    <Min DefaultValue="-65"/>
    <Max DefaultValue="180"/>
  </AxisA3Pos>
  <AxisA4Pos>
    <Min DefaultValue="-300"/>
    <Max DefaultValue="300"/>
  </AxisA4Pos>
  <AxisA5Pos>
    <Min DefaultValue="-120"/>
    <Max DefaultValue="120"/>
  </AxisA5Pos>
  <AxisA6Pos>
    <Min DefaultValue="-360"/>
    <Max DefaultValue="360"/>
  </AxisA6Pos>

```

รูปที่ 3. 8 Parameters ของหุ่นยนต์

3.4 หุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลอง

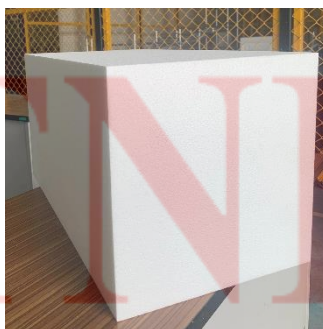
งานวิจัยชิ้นนี้ใช้หุ่นยนต์ยี่ห้อ ABB รุ่น IRB 6640-235/2.55 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ติดตั้งสปินเดิลมอเตอร์ยี่ห้อ HQD รุ่น GDF60-18Z/6.0 คมตัดที่ใช้เป็นดอกกัดเอ็นมิล 2 ขนาดประกอบด้วย เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร สำหรับกัดรูปทรงพื้นผิวโค้งอิสระ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร สำหรับกัดชิ้นงานรูปทรงเรขาคณิต



รูปที่ 3.9 หุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลอง และชุดสปินเดิลมอเตอร์

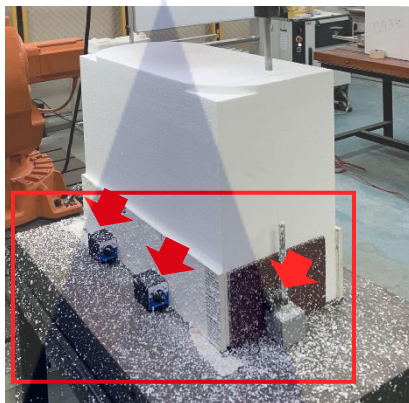
3.4.1 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นโฟมสำหรับสร้างแม่พิมพ์ EPS (Expandable Polystyrene) เกรด 2.0 มิลลิเมตร มีรูปทรงของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมีรูปทรงกล่องสี่เหลี่ยมขนาด 300 x 500 x 600 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วัสดุโฟมสำหรับสร้างแม่พิมพ์ (Expandable Polystyrene; EPS)

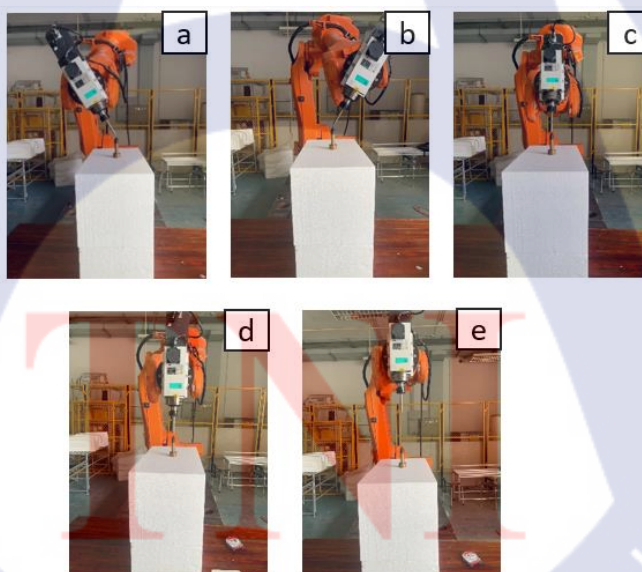
การจับยึดชิ้นงานวัสดุโฟมเริ่มต้นจากนำชิ้นงานวางบนโต๊ะล้อยึดตำแหน่งด้วยแม่เหล็กถาวร และแผ่นไม้เพื่อเพิ่มผิวสัมผัสทั้ง 4 ด้าน ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การจับยึดชิ้นงาน

3.4.2 การตั้งค่าตำแหน่งจุดปลายของแขนหุ่นยนต์ (TCP)

การกำหนดจุดปลายของแขนหุ่นยนต์เพื่อใช้ในการระบุความยาวของ Tool ในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้วิธีการเซตแบบ 4 จุด และ 1 แกนแนวตั้ง (แกน Z) ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การตั้งค่าตำแหน่งจุดปลายของแขนหุ่นยนต์ (TCP) (a) กำหนดจุดที่ 1, (b) กำหนดจุดที่ 2, (c) กำหนดจุดที่ 3, (d) กำหนดจุดที่ 4, (e) กำหนดแกน Z

3.4.3 ผลที่ได้จากการกำหนดจุด TCP ของหุ่นยนต์

การกำหนดพิกัดปลาย Tool เลือกใช้เหล็กปลายแหลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความยาว 2 ขนาด ประกอบด้วย ขนาดความยาว 146 มิลลิเมตร และ 250 มิลลิเมตร เพื่อนำไปคำนวณค่าเฉลี่ยให้ได้ข้อมูลที่มีความแม่นยำมากที่สุด มีผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.1 - 3.2

ตารางที่ 3.1 พิกัดปลาย Tool ที่ความยาว 145.99 มิลลิเมตร

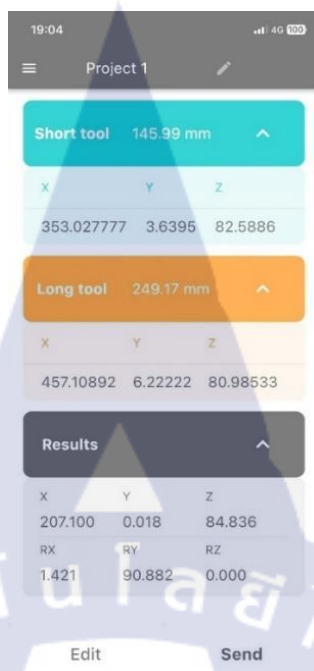
ครั้งที่	ความยาว	X	Y	Z
1	146	353.08	4.078	83.511
2	146	353.84	4.465	83.44
3	145.9	353.99	3.813	83.12
4	146	353.2	2.643	83.53
5	146	335.73	5.715	83.17
6	146	353.12	4.551	83.51
7	146	353.58	0.913	81.12
8	146	350.6	0.805	79.84
9	146.1	352.13	6.409	82.39
10	146	354.01	3.003	82.25

จากตารางที่ 3.1 ค่าเฉลี่ยของพิกัดปลาย Tool ที่ขนาดความยาว 145.99 มิลลิเมตร แกน X อยู่ที่ 353.028 มิลลิเมตร แกน Y 3.640 มิลลิเมตร และ แกน Z ที่ 82.589 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.2 พิกัดปลาย Tool ที่ความยาว 249.17 มิลลิเมตร

ครั้งที่	ความยาว	X	Y	Z
1	249.1	456.96	6.912	83.45
2	249.2	457.36	6.654	83.69
3	249	456.68	5.761	83.8
4	249.2	457.39	6.784	84.16
5	249.2	456.76	6.710	83.56
6	249.2	457.34	5.787	83.96
7	249.2	457.33	5.736	84.282
8	249.2	457.46	5.934	84.52
9	249.2	456.9	6.029	84.02
10	249.2	456.91	5.915	84.42

จากตารางที่ 3.2 ค่าเฉลี่ยของพิกัดปลาย Tool ที่ขนาดความยาว 249.17 มิลลิเมตร แกน X อยู่ที่ 353.028 มิลลิเมตร แกน Y 3.640 มิลลิเมตร และแกน Z ที่ 82.589 มิลลิเมตร ขั้นตอนถัดไป นำค่าได้จากพิกัดปลาย Tool ของทั้ง 2 ขนาดไปใส่ในโปรแกรม Robot Calibration เพื่อคำนวณหา ค่าความยาวปลาย Tool ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และ ตารางที่ 3.3



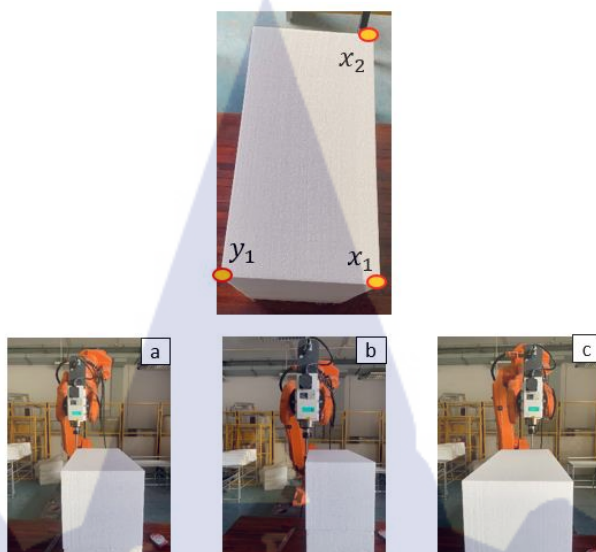
รูปที่ 3.13 โปรแกรม Robot Calibration

ตารางที่ 3.1 พิกัดปลาย Tool

X	317.1 มม.
Y	0.0018 มม.
Z	84.836 มม.
q_1	0.70159
q_2	0.0087
q_3	0.71247
q_4	-0.00884

3.4.4 การกำหนดจุดอ้างอิงบนชิ้นงาน (Work object Reference Point)

จุดเริ่มต้นในการตัดเฉือนถูกกำหนดที่ตำแหน่งจุดตัดขอบแกน X และ Y บนผิวด้านบนของก้อนชิ้นงาน มีขั้นตอนการกำหนดโดยใช้ปลายคมตัดเคลื่อนที่สัมผัสที่จุด X_1, X_2 และ Y_1 ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การเซต Work object (a) กำหนดจุด x_1 (b), กำหนดจุด x_2 , (c) กำหนดจุด y_1

การกำหนดตำแหน่งชิ้นงาน หรือ Work object เพื่อหาตำแหน่งของชิ้นงานทั้ง 2 แบบของทั้ง 2 ทิศทางการวางชิ้นงานขนานแกน X และ ขนานแกน ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และ 3.5

ตารางที่ 3.2 แสดงตำแหน่งชิ้นงานรูปทรงผืนผ้าสี่เหลี่ยม

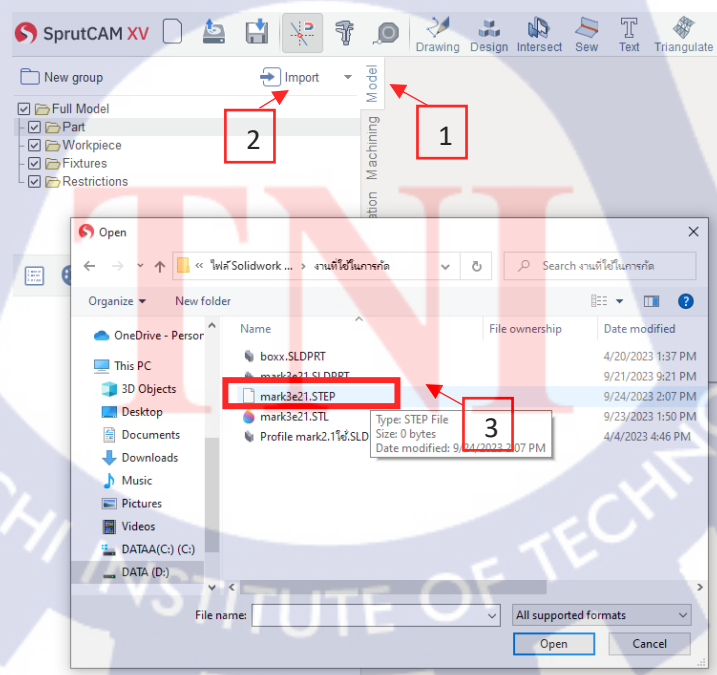
พิกัด/ตำแหน่ง	ทิศทางการวางชิ้นงานขนาน	
	แกน X	แกน Y
X	1566.87 มม.	1907.06 มม.
Y	-109.249 มม.	-292.99 มม.
Z	1025.99 มม.	1021.17 มม.
q_1	1	1
q_2	0	0
q_3	0	0
q_4	0	0

ตารางที่ 3.3 แสดงตำแหน่งชิ้นงานรูปทรงเรขาคณิต

พิกัด/ตำแหน่ง	ทิศทางการวางชิ้นงานขนาน แกน X	ทิศทางการวางชิ้นงานขนาน แกน Y
X	1515.69 มม.	1799.773 มม.
Y	-127.386 มม.	-327.064 มม.
Z	1026.33 มม.	1025.75 มม.
q_1	1	1
q_2	0	0
q_3	0	0
q_4	0	0

3.5 การจำลองการกัดชิ้นงานบนโปรแกรม SprutCAM

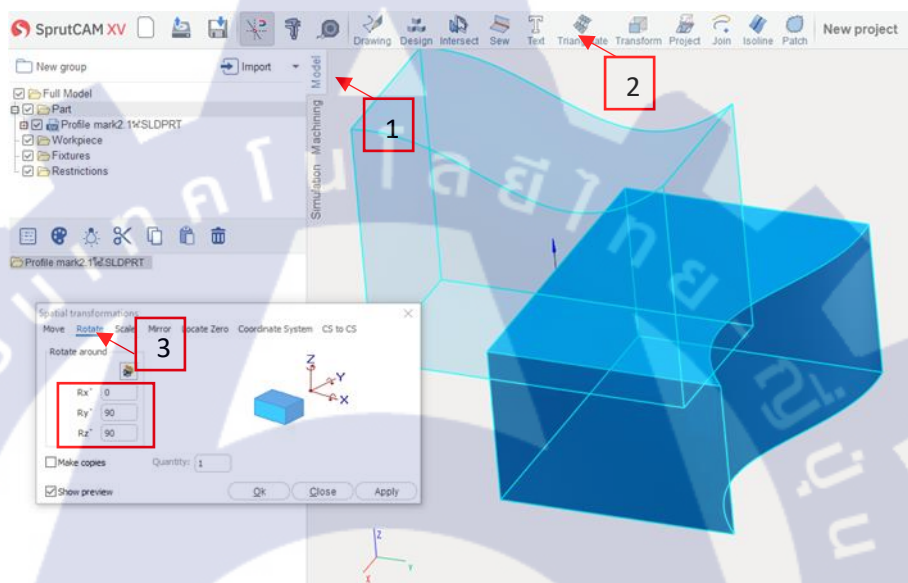
ขั้นตอนการจำลองการกัดของชิ้นงานโดยใช้โปรแกรม SprutCAM XV มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเส้นทางการเดินของปลายแขนหรือ สร้าง Tool Path ให้หุ่นยนต์ในการกัดชิ้นงาน เริ่มต้นจากการนำไฟล์ CAD เข้าโปรแกรม SprutCAM ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 Import ไฟล์ 3 มิติของชิ้นงานรูปทรงเรขาคณิต

1. เลือกคำสั่ง Mode
2. เลือกคำสั่ง Import
3. เลือกไฟล์ชิ้นงาน CAD.STEP

ขั้นตอนถัดมาปรับตำแหน่งชิ้นงานให้อยู่ในเพลนที่จะทำการทดลองโดยหมุนรอบแกน Y และ แกน Z เพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้องดังแสดงในรูปที่ 3.16

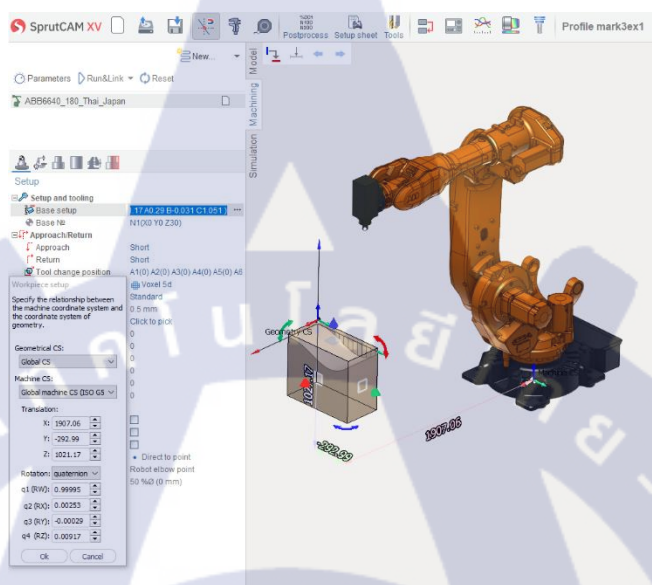


รูปที่ 3.16 ปรับตำแหน่งชิ้นงานให้ตรงกับตำแหน่งการวางชิ้นงานจริง

1. เลือกคำสั่ง Model
2. เลือกคำสั่ง Transform เพื่อเซตพารามิเตอร์ของ 3D ไฟล์
3. เลือก Rotate หมุนชิ้นงานแกน Y และ แกน Z ให้เป็น 90 องศาเพื่อให้ได้ชิ้นงานตามตำแหน่งที่ถูกต้อง

3.5.1 การตั้งค่า work object ในโปรแกรม

เริ่มต้นจากการตั้งค่า Work object โดยใช้ค่าที่ได้จากการทดลองบนปลายแขนหุ่นยนต์จริงเพื่อกำหนดจุดเริ่มต้นการกัดที่ถูกต้องแสดงในดังรูปที่ 3.17

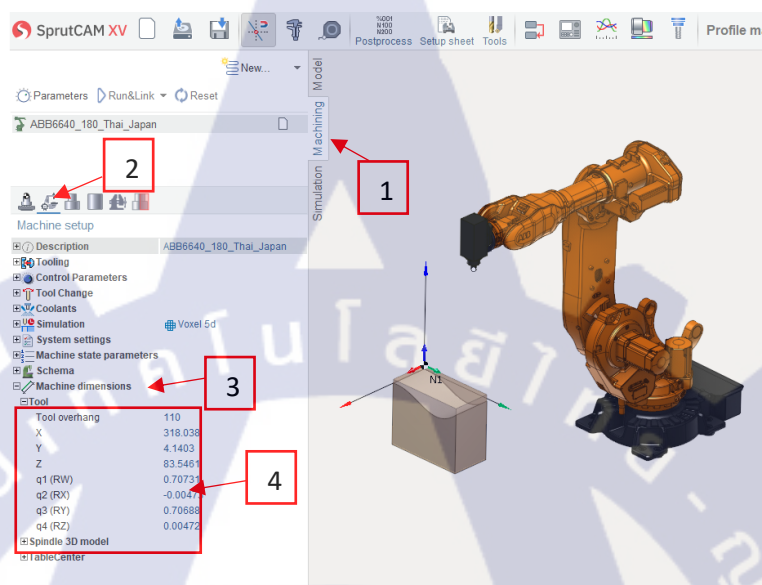


รูปที่ 3.17 แสดงการตั้งค่าขอบเขตของชิ้นงาน (workobject)

1. เลือกคำสั่ง Machining
2. เลือกคำสั่ง Base setup เพื่อกำหนดจุดศูนย์ของชิ้นงาน
3. ใส่ระยะ $X, Y, Z, q_1, q_2, q_3, q_4$

3.5.2 การตั้งค่า TCP ในโปรแกรม

ขั้นตอนการตั้งค่า TCP นำค่าที่ได้จากการทดลองประกอบด้วยค่า $X, Y, Z, q_1, q_2, q_3, q_4$ และ Tool overhang ดังแสดงในรูปที่ 3.18

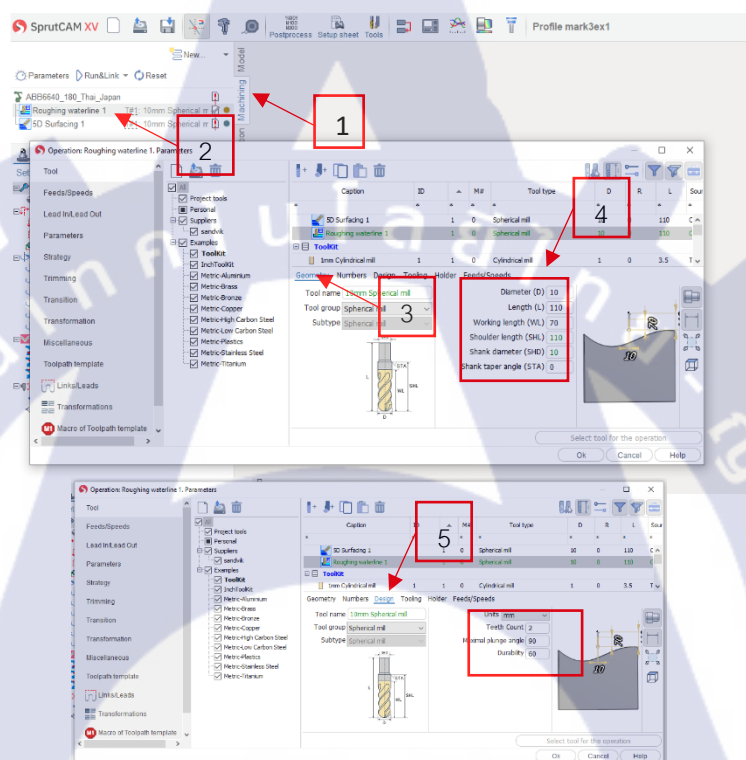


รูปที่ 3.18 แสดงการตั้งค่าตำแหน่งปลายคมตัด

1. เลือกคำสั่ง Machining
2. เลือกคำสั่ง Machine setup
3. เลือกคำสั่ง Machine dimensions แล้วเลือก Tool
4. ใส่ระยะ $X, Y, Z, q_1, q_2, q_3, q_4$ และ Tool overhang

3.5.3 การกำหนดพารามิเตอร์การตัดเฉือนบนโปรแกรม SprutCAM

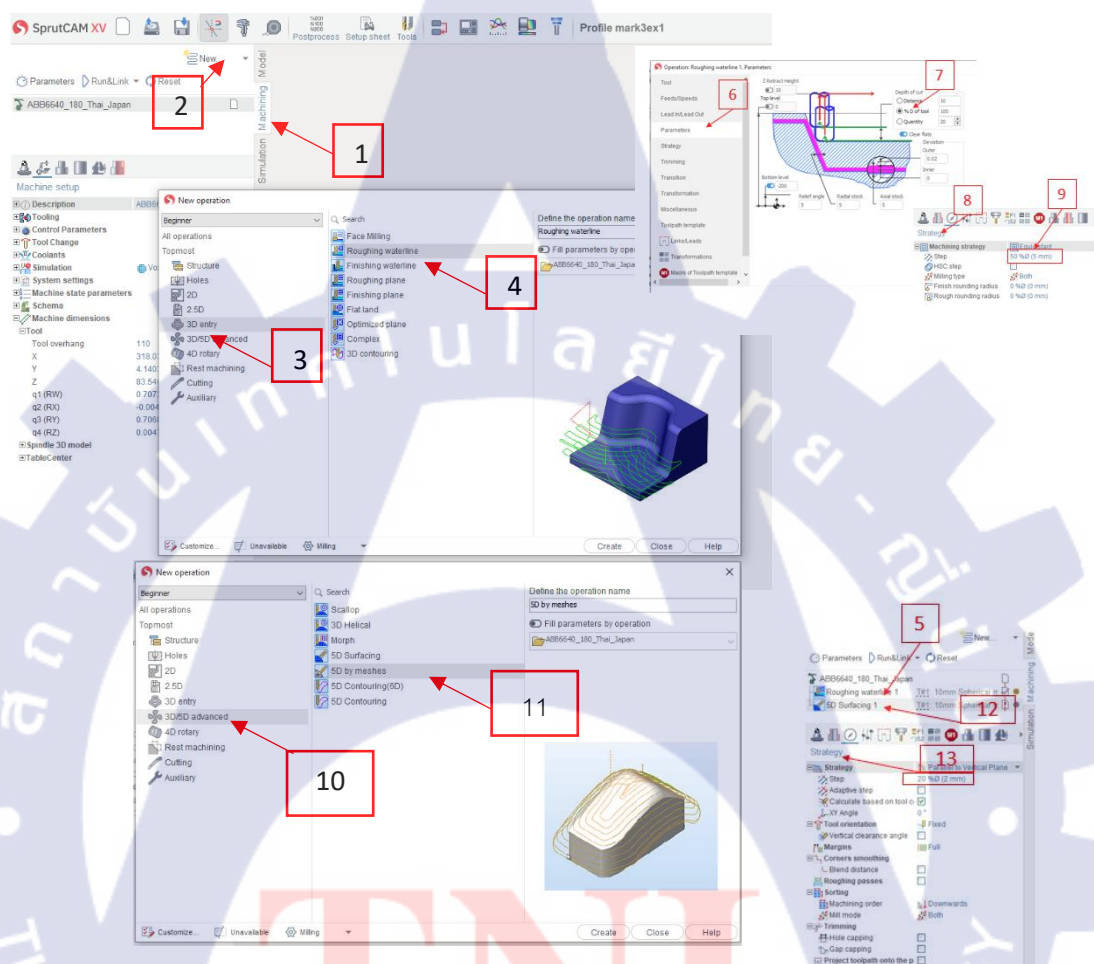
กำหนดพารามิเตอร์ ขนาดดอกกัด ความยาวของดอกกัด ความยาวคมตัด และ จำนวนฟันของดอกกัดใช้ดอกกัดเป็นวัสดุ High speed steel (HSS) ชนิดของดอกเป็นเอ็นด์มิลล์ 2 ลักษณะคือ แบบปลายตัดตรง (Flat End Mill) และ แบบปลายโค้งมน (Ball Nose) ขนาดความยาว 110 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และ 16 มิลลิเมตร มีจำนวนฟัน 4 ฟันดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แสดงการกำหนดพารามิเตอร์ของดอกกัด

1. เลือกคำสั่ง Machining
2. เลือกลักษณะของการกัดขึ้นงาน
3. เลือก Geometry และกำหนดลักษณะของดอกกัด
4. กำหนดระยะความยาวดอกกัดงาน
5. เลือก Design ดอกกัดงาน กำหนดจำนวนฟัน

ในการทดลองนี้ได้ออกแบบการตัดเฉือนไว้ 2 ขั้นตอน ประกอบด้วย การกัดเพื่อลดขนาดอย่างรวดเร็ว (Rough Cutting) และ การกัดผิวสำเร็จ (Finish Cutting) มีขั้นตอนการตั้งค่าในโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 3. 20



รูปที่ 3. 20 แสดงการกำหนดลักษณะของการกัดชิ้นงาน

1. เลือกคำสั่ง Machining
2. เลือกคำสั่ง New
3. เลือกรูปแบบการกัด 3D Entry
4. เลือกลักษณะกัดแบบหยาบ Roughing Waterline
5. เลือกคำสั่ง Roughing Waterline
6. เลือกคำสั่ง Parameters

7. ที่ Depth of Cut เลือก % D of Tool เลือกกััด 100% ของดอกกััดทั้ง 2 แบบงาน ดังแสดงในตารางที่ 3.4

8. เลือกเมนู Strategy เพื่อกำหนด Step ในการเดินคมตัด

9. กำหนดค่า Step ดังแสดงในตารางที่ 3.6

10. เลือกรูปแบบการกััด 3D/5D Advanced

11. เลือกลักษณะกััดละเอียดแบบ 5D Surfacing

12. เลือกคำสั่ง 5D Surfacing

13. เลือกเมนู Strategy เพื่อกำหนด Step ในการเดินคมตัดดังแสดงในตารางที่ 3.7

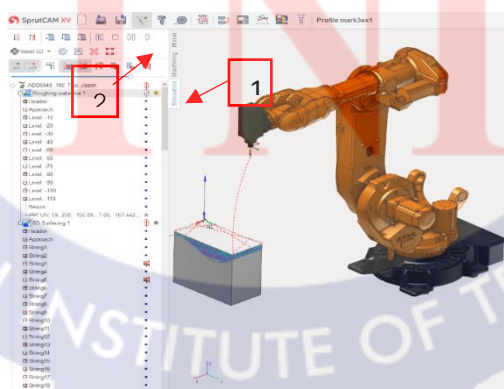
ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ในการกััดหยาบ (Roughing Waterline)

	ผิวโค้งอิสระ	รูปทรงเรขาคณิต
ระยะกััดลึก	10 มม.	16 มม.
Step ในการเดินคมตัด	5 มม.	8 มม.

ตารางที่ 3. 5 พารามิเตอร์ในการกััดละเอียด (5D Surfacing)

	ผิวโค้งอิสระ	รูปทรงเรขาคณิต
Step ในการเดินคมตัด	2 มม.	3.2 มม.

ขั้นตอนการจำลองการกััดขึ้นเพื่อตรวจสอบเส้นทางการเดินของคมตัดดังแสดงในรูปที่ 3.21

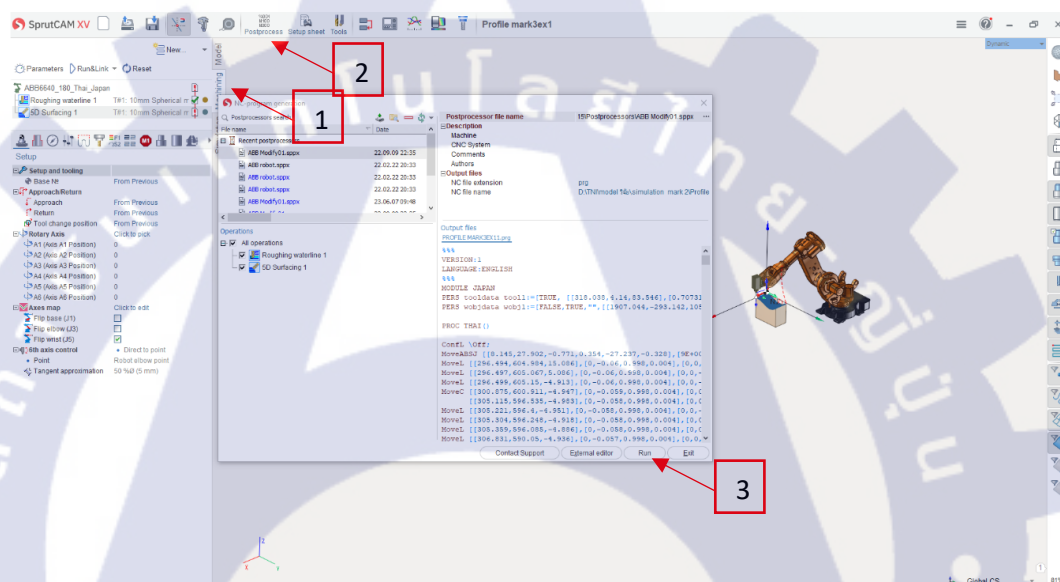


รูปที่ 3.21 แสดงการกำหนดลักษณะของการกััดขึ้นงาน

1. เลือกคำสั่ง Simulation
2. เลือกสัญลักษณ์  เพื่อ Simulation

3.5.4 การสร้างคำสั่ง NC Code บนโปรแกรม SprutCAM

การสร้างคำสั่ง NC Code หลังจากที่ได้จำลองการตัดเฉือนเสร็จสมบูรณ์ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดเพื่อนำ Code ไปเข้าสู่ระบบ controller ของหุ่นยนต์ เพื่อทำการกัดชิ้นงานจริงมีขั้นตอนการดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 3.22



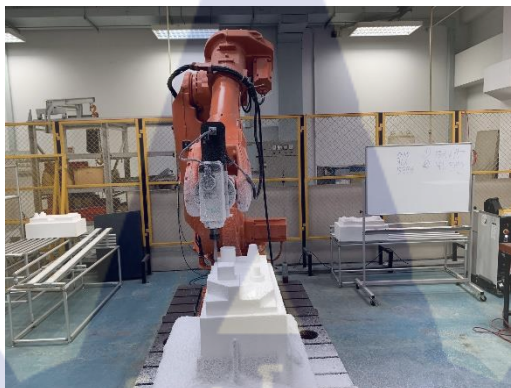
รูปที่ 3.22 แสดงการเจน NC Code ของหุ่นยนต์

1. เลือกคำสั่ง Machining
2. เลือกเมนู Postprocess เพื่อเจน NC Code
3. แล้วกดเมนู Run เพื่อสร้าง NC Code ให้กับหุ่นยนต์

3.6 การกัดชิ้นงานด้วยแขนหุ่นยนต์

ขั้นตอนการกัดชิ้นงานวัสดุโฟมด้วยแขนหุ่นยนต์ ABB รุ่น IRB 6640 เริ่มต้นจากขั้นตอนการตรวจเช็คความถูกต้องของโปรแกรมและตรวจเช็คการจับยึดคมตัด ความเร็วการหมุนของมอเตอร์ การจับยึดชิ้นงานที่มั่นคงปลอดภัย ในขั้นตอนเริ่มการตัดเฉือนเลือก Mode การเดินกัดแบบทีละ

บรรทัดเพื่อยืนยันความถูกต้องของทิศทางการเข้าของคมตัด หลังจากนั้นจึงเลือก Mode อัตโนมัติเพื่อกัดชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.23

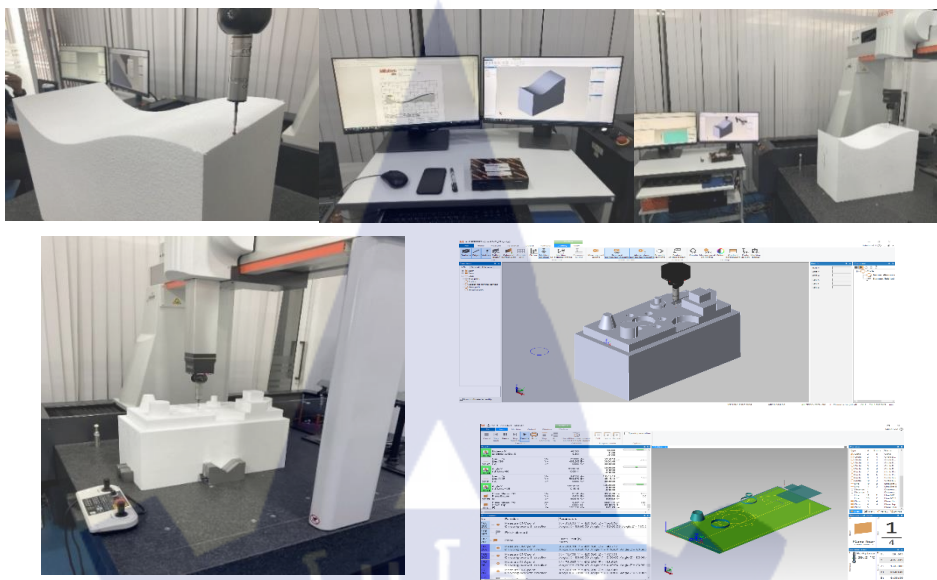


รูปที่ 3.23 แสดงการกัดชิ้นงานรูปทรงเรขาคณิตด้วยแขนหุ่นยนต์

3.7 การวัดขนาดชิ้นงานด้วยเครื่อง CMM

การวัดขนาดชิ้นงานที่ได้จากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์ทั้ง 2 รูปแบบ ใช้การวัดด้วยเครื่องมือวัดแบบ 3 มิติ เพื่อให้ได้ ขนาด และ รูปทรงที่ถูกต้องของชิ้นงาน งานวิจัยชิ้นนี้ใช้เครื่องมือวัดแบบ 3 มิติ หรือเครื่องวัด CMM ของ Mitutoyo รุ่น CRYSTA-Apex 9108 โดยใช้หัวโพรบแบบทรงกลมขนาด 5 มิลลิเมตร ความยาวก้าน 21 มิลลิเมตร ทำการวัดแบบสัมผัสพื้นผิวของชิ้นงาน ด้วยแรง

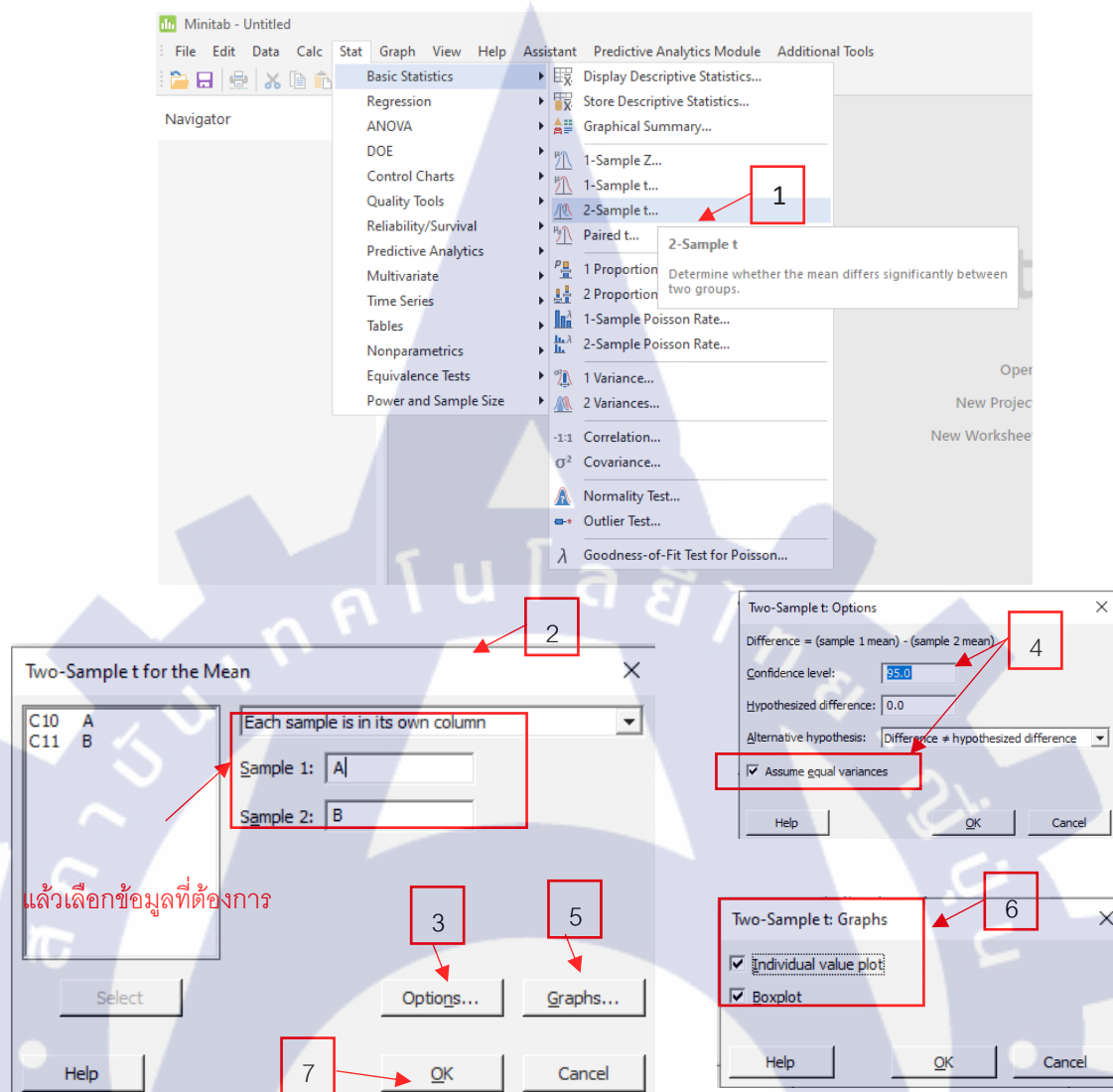
สัมผัส 0.20 นิวตันต่อมิลลิเมตร ที่ความเร็ว 20 มิลลิเมตรต่อวินาที เพื่อนำค่าที่วัดได้ไปประเมินประสิทธิภาพของการกัดโดยอ้างอิงกับมาตรฐาน GD&T standard ASME Y14.5 (2009) [14] ดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 แสดงการวัดด้วยเครื่องวัด CMM ของ Mitutoyo รุ่น CRYSTA-Apex 9108

3.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วยโปรแกรม Minitab

งานวิจัยชิ้นนี้ใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการวัดชิ้นงานที่ได้จากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์ที่เกิดจากการวางในแนวแกน X และ แกน Y มีขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วยโปรแกรม Minitab

1. คลิกเมนู Stat > Basic Statistics > 2-Sample t.. จะปรากฏหน้าต่าง Two-sample t for the Mean
2. คลิกเลือก Each sample is in its own column เพื่อป้อนข้อมูลค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการวัดของชิ้นงานของทิศทางการวางทั้ง 2 แบบ ที่อยู่คนละคอลัมน์แล้วเลือกข้อมูลมาวิเคราะห์ โดยเลือกคอลัมน์ A ค่าความคลาดเคลื่อนของทิศทางการวางขนานแกน X และ B ค่าความคลาดเคลื่อนของทิศทางการวางขนานแกน Y
3. คลิกปุ่ม Option จะปรากฏหน้าต่าง Two-Sample t: Option

4. ใส่ค่าระดับความเชื่อมั่นในช่อง Confidence level: ซึ่งค่าระดับความเชื่อมั่นมีค่าเท่ากับ $1 - \alpha$ โดยทั่วไปค่าระดับความเชื่อมั่นมีค่าเท่ากับ 95% และเลือกประเภทของสมมติฐานรองที่ต้องการทดสอบ พร้อมกับเลือก Assume equal variances เพราะค่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกันจากการทดสอบสมมติฐานอัตราส่วนความแปรปรวนในขั้นตอนที่ 4 แล้วคลิก OK (หากค่าความแปรปรวนแตกต่างกันไม่ต้องเลือก Assume equal variances)

5. คลิกปุ่ม Graphs จะปรากฏหน้าต่าง Two-Sample t: Graphs

6. คลิกเลือกชนิดของกราฟที่ต้องการให้แสดงผล แล้วคลิก OK

7. คลิก OK เพื่อเริ่มการประมวลผลข้อมูล

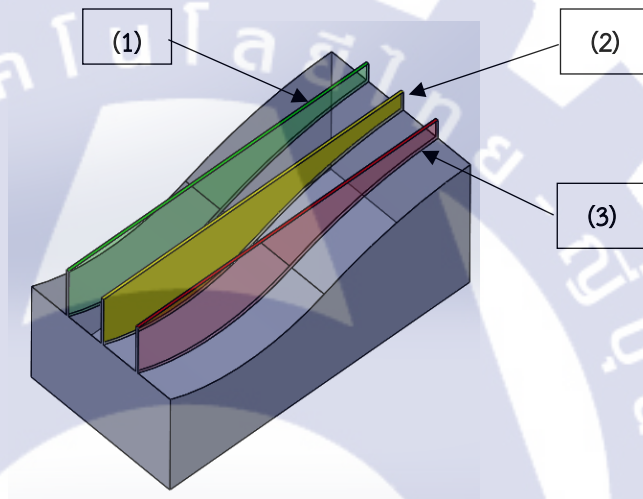


บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

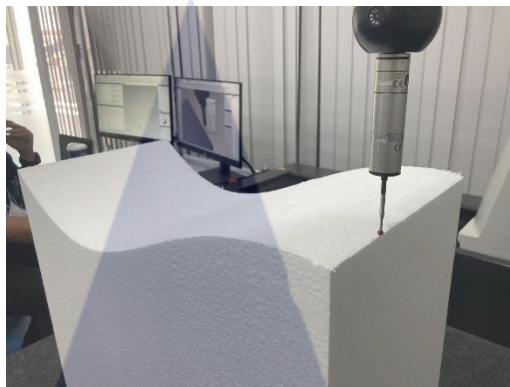
4.1 ผลการวัดชิ้นงานผิวโค้งอิสระ

ผลการวัดชิ้นงานผิวโค้งอิสระทั้ง 2 ทิศทาง ประกอบด้วยทิศทางขนานแกน X และ ขนานแกน Y ด้วยเครื่อง CMM Mitutoyo รุ่น CRYSTA-Apex 9108 โดยแบ่งการวัดผิวโค้งออกเป็น 3 แนวการวัด เพื่อให้ได้ค่าที่ครอบคลุมตลอดชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งแต่ละแนวการวัดมีระยะห่าง 50 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.1 ทิศทางการวัดชิ้นงานผิวโค้งอิสระ

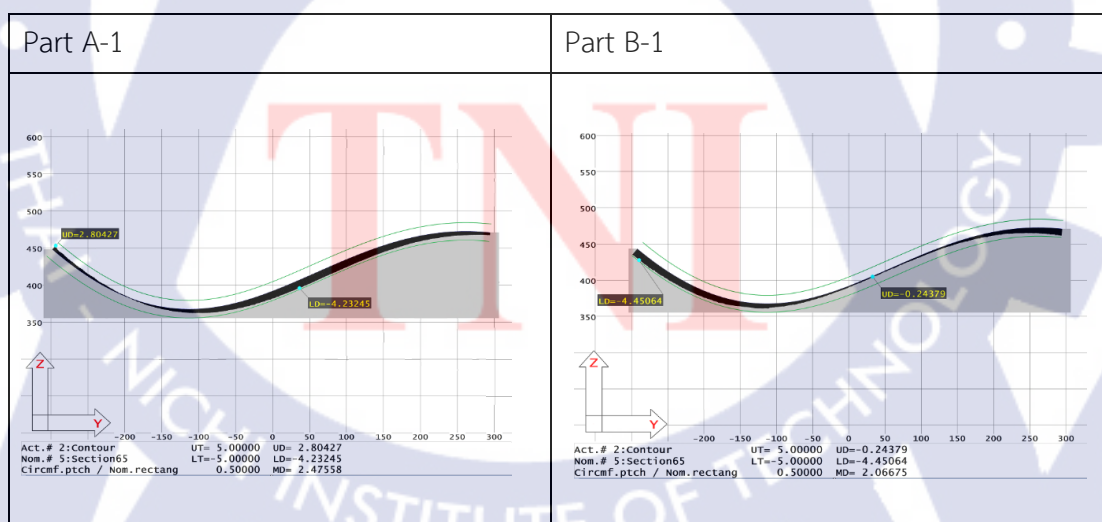
การวัดชิ้นงานทิศทางขนานแกน X กำหนดให้เป็น Part A และทิศทางการวางขนานแกน Y กำหนดให้เป็น Part B มีผลการวัดเปรียบเทียบของทั้ง 2 ทิศทางมีดังตารางที่ 4.1 – 4.3



รูปที่ 4.2 แสดงการวัดชิ้นงานด้วยเครื่อง CMM แบบสัมผัสด้วยหัวบอลขนาด 5 มิลลิเมตร

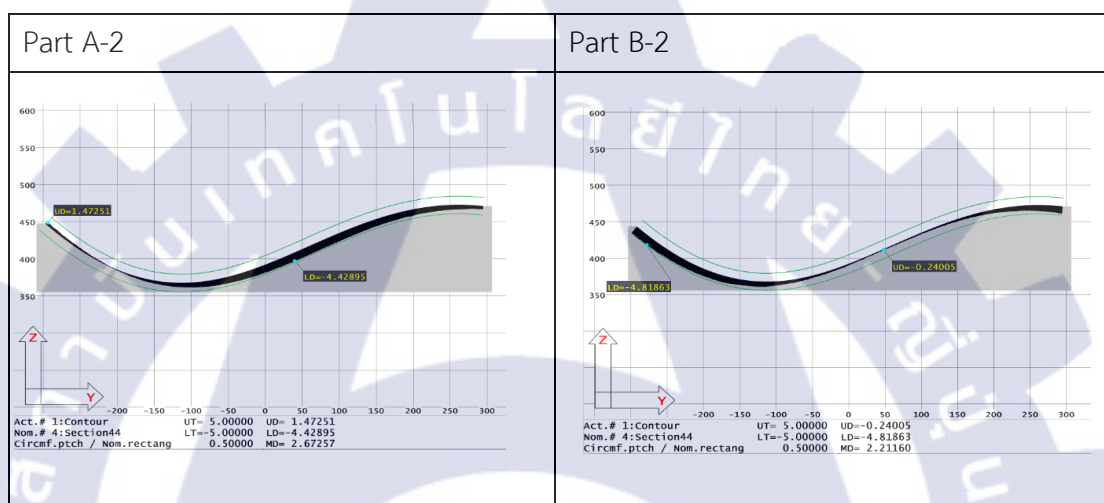
ผลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง CMM ที่แนวการวัดที่ 1 ของทั้ง 2 ทิศทางการวางชิ้นงาน ให้ผลการวัดประกอบด้วย ทิศทางการวางชิ้นงานขนานแนวแกน X มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 4.23 มิลลิเมตร และ ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด 2.804 มิลลิเมตร ที่ค่าเฉลี่ยที่ 2.476 มิลลิเมตร และ ทิศทางขนานแกน Y มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 4.450 มิลลิเมตร ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดอยู่ 0.244 มิลลิเมตร ที่ค่าเฉลี่ย 2.067 มิลลิเมตร โดยทิศทางการวางชิ้นงานขนานแกน Y ให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำกว่าการวางชิ้นงานในแนวขนานแกน X ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4. 1 เปรียบเทียบเส้นทางของทิศทางขนาดแกน X และ แกน Y ของเส้นทางที่ 1



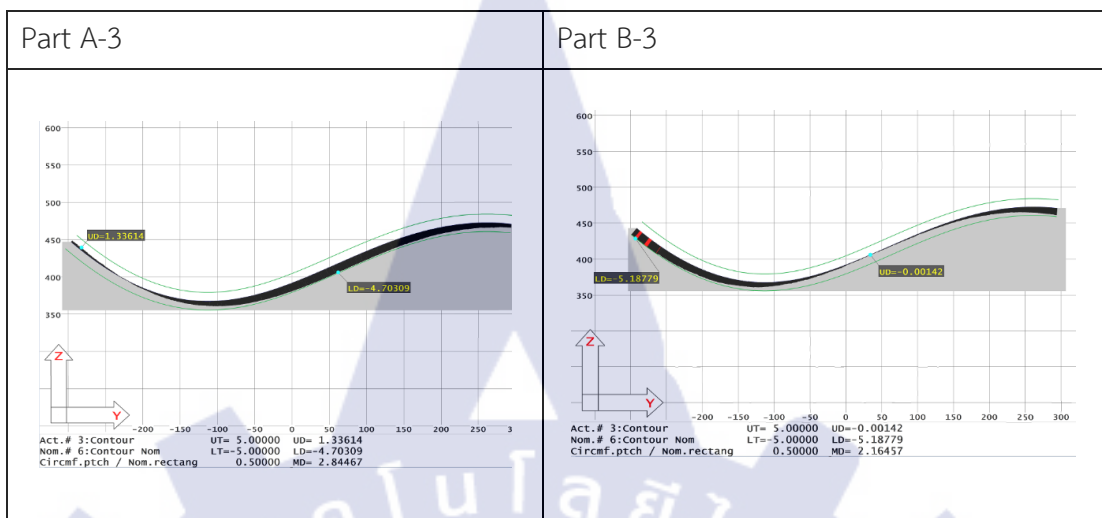
ผลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง CMM ที่แนวการวัดที่ 2 ของทั้ง 2 ทิศทางการวางชิ้นงาน ให้ผลการวัดประกอบด้วย ทิศทางการวางชิ้นงานขนานแนวแกน X มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 4.429 มิลลิเมตร และ ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด 1.473 มิลลิเมตร ที่ค่าเฉลี่ยที่ 2.673 มิลลิเมตร และทิศทางการวางชิ้นงานขนานแกน Y มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 4.819 มิลลิเมตร ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด อยู่ 0.240 มิลลิเมตร ที่ค่าเฉลี่ย 2.212 มิลลิเมตร โดยทิศทางการวางชิ้นงานขนานแกน Y ให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำกว่าการวางชิ้นงานในแนวขนานแกน X ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบเส้นทางของทิศทางการวางชิ้นงาน X และ แกน Y ของเส้นทางที่ 2



ผลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง CMM ที่แนวการวัดที่ 3 ของทั้ง 2 ทิศทางการวางชิ้นงาน ให้ผลการวัดประกอบด้วย ทิศทางการวางชิ้นงานขนานแนวแกน X มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 4.703 มิลลิเมตร และ ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด 1.336 มิลลิเมตร ที่ค่าเฉลี่ยที่ 2.845 มิลลิเมตร และทิศทางการวางชิ้นงานขนานแกน Y มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 5.188 มิลลิเมตร ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด อยู่ 0.001 มิลลิเมตร ที่ค่าเฉลี่ย 2.165 มิลลิเมตร โดยทิศทางการวางชิ้นงานขนานแกน Y ให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำกว่าการวางชิ้นงานในแนวขนานแกน X ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3เปรียบเทียบเส้นทางของทิศทางขนาดแกน X และ แกน Y ของเส้นทางที่ 3



4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab

เมื่อนำผลที่ได้จากการวัดของชิ้นงานทั้ง 2 ทิศทางมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าความแปรปรวนของข้อมูลด้วยโปรแกรม Minitab 17 โดยกำหนดค่านัยสำคัญทางสถิติ $\alpha = 0.05$ พบว่าค่า P-value = 0.077 ดังแสดงในรูปที่ 4.5

Two-Sample T-Test and CI: S1, S2

Two-sample T for S1 vs S2

	N	Mean	StDev	SE Mean
S1	11	2.146	0.615	0.19
S2	11	2.666	0.625	0.19

Difference = μ (S1) - μ (S2)

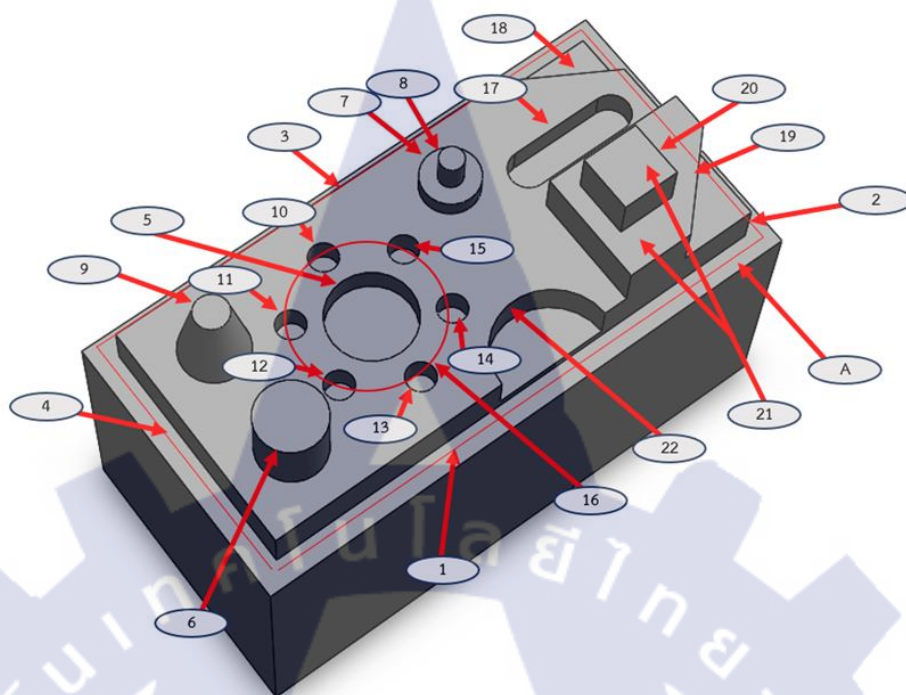
Estimate for difference: -0.520

95% CI for difference: (-1.073, 0.033)

T-Test of difference = 0 (vs $\neq$): T-Value = -1.97 P-Value = 0.064 DF = 19

รูปที่ 4.3 แสดงผลการคำนวณใน Minitab

ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า α จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก [Do not Reject $H_0 \Rightarrow \mu_1 = \mu_2$] ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งให้เห็นว่าทิศทางการจัดวางชิ้นงานทั้ง 2 แบบ ไม่มีผลต่อความเที่ยงตรงของขนาดชิ้นงานที่เกิดจากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งใน CAD ไฟล์

ตารางที่ 4.4 การวางทิศทางขนาดแกน X ของ 2 ชิ้นงาน

สัญลักษณ์	ตำแหน่งตามรูปที่ 4.3	ชื่อลักษณะเฉพาะ	ตำแหน่งตามแบบ	สูง-ต่ำ ของความคลาดเคลื่อน	ตำแหน่งที่ได้จากการวัดของทิศทางวางขนาดแกน X		ค่าความคลาดเคลื่อน	
					Sample-1	Sample-2	Sample-1	Sample-2
	1	Line Straightness		0.000 0.500			0.262	0.338
	2	Line Straightness		0.000 0.500			0.216	0.334
	3	Line Straightness		0.000 0.500			0.480	0.316
	4	Line Straightness		0.000 0.500			0.417	0.336

ตารางที่ 4.4 การวางทิศทางขนาดแกน X ของ 2 ชิ้นงาน (ต่อ)

สัญลักษณ์	ตำแหน่งตามรูปที่ 4.3	ชื่อลักษณะเฉพาะ	ตำแหน่งตามแบบ	สูง-ต่ำ ของความคลาดเคลื่อน	ตำแหน่งที่ได้จากการวัดของทิศทางวางขนาดแกน X		ค่าความคลาดเคลื่อน	
					Sample-1	Sample-2	Sample-1	Sample-2
	A	Plane Datum A Flatness		0.000 1.000	0.580	0.539	0.580	0.539
	5	Circle Circularity		0.000 1.000			0.970	0.662
	5	Circle Circularity		0.000 1.000			0.438	0.377
	5	Circle D90 Diameter	90.000	-0.500 0.500	90.581	90.599	0.581	0.599
	5	Circle D90 Position X	0.000	-0.500 0.500	0.127	0.066	0.127	0.066
	5	Circle D90 Position Y	200.00	-0.500 0.500	199.611	199.717	-0.389	-0.283
	5	Circle Position X - Y	0.0000 200.00	0.000 1.000	0.127 199.611	0.066 199.717	0.819	0.582
	6	Circle D70 Circularity		0.000 1.000			0.800	0.701
	6	Cylinder Diameter	70.00	-0.500 0.500	69.298	69.275	-0.702	0.-725
	6	Circle D70 Position X	60	-0.500 0.500	59.725	59.573	-0.275	-0.427
	6	Circle D70 Position Y	65	-0.500 0.500	64.486	64.648	-0.514	-0.352
	6	Cylinder D70 Perpendicularity		0.000 0.300	0.411	0.132	0.411	0.132

ตารางที่ 4.4 การวางทิศทางขนาดแกน X ของ 2 ชิ้นงาน (ต่อ)

สัญลักษณ์	ตำแหน่งตามรูปที่ 4.3	ชื่อลักษณะเฉพาะ	ตำแหน่งตามแบบ	สูง-ต่ำ ของความคลาดเคลื่อน	ตำแหน่งที่ได้จากการวัดของทิศทางวางขนาดแกน X		ค่าความคลาดเคลื่อน	
					Sample-1	Sample-2	Sample-1	Sample-2
	7	Cylinder D60 Diameter	60.000	-0.500 0.500	59.402	59.259	-0.598	-0.741
	7	Circle D60 Position X	65	-0.500 0.500	64.838	64.806	-0.162	-0.194
	7	Circle D60 Position Y	340	-0.500 0.500	339.557	339.728	-0.443	-0.272
	8	Cylinder D25 Diameter	25	-0.500 0.500	24.247	24.208	-0.753	-0.792
	8	Circle D25 Position X	65.00	-0.500 0.500	65.007	65.054	0.007	0.054
	8	Circle D25 Position Y	340.00	-0.500 0.500	339.516	339.661	-0.484	-0.339
	8	Cylinder Coaxiality		0.000 0.500	1.901	1.657	1.901	1.657
	9	Cone Cone ang.	24:40:41	-0:30:00 0:30:00	24:49:02	24:46:19	0:08:21	0:05:38
	9	Cone Perpendicularity		0.000 0.300	0.955	0.846	0.955	0.846
	10	Circle D30 #1 Diameter	30.00	-0.500 0.500	30.611	30.560	0.611	0.560
	11	Circle D30 #2 Diameter	30.00	-0.500 0.500	30.662	30.489	0.662	0.489
	12	Circle D30 #3 Diameter	30.00	-0.500 0.500	30.093	30.504	0.093	0.504
	13	Circle D30 #4 Diameter	30.00	-0.500 0.500	30.556	30.592	0.556	0.592

ตารางที่ 4.4 การวางทิศทางขนาดแกน X ของ 2 ชิ้นงาน (ต่อ)

สัญลักษณ์	ตำแหน่งตามรูปที่ 4.3	ชื่อลักษณะเฉพาะ	ตำแหน่งตามแบบ	สูง-ต่ำของ ความคลาดเคลื่อน	ตำแหน่งที่ได้จากการวัด ของทิศทางวางขนาด แกน X		ค่าความคลาดเคลื่อน	
					Sample-1	Sample-2	Sample-1	Sample-2
	14	Circle D30 #5 Diameter	30.00	-0.500 0.500	30.315	30.219	0.315	0.219
	15	Circle D30 #6 Diameter	30.00	-0.500 0.500	29.978	-	-0.022	-
	16	Circle PCD 150 Diameter	150.00	-0.500 0.500	149.761	149.772	-0.239	-0.228
	16	Circle PCD 150 Distance X - Y	0.000 200.00	0.00 1.000	0.036 199.512	0.068 199.782	0.978	0.457
	16	Circle Origin Concentricity	0.066 199.717	0.000 0.500	0.036 199.512	0.068 199.783	0.205	0.131
	17	Distance Slot L Distance Y	140	-0.500 0.500	140.420	140.470	0.420	0.470
	17	Distance Slot S Distance X	40	-0.500 0.500	40.374	40.702	0.374	0.702
	18	Line A60 Angle X	60:00:00	-0:30:00 0:30:00	59:52:20	60:03:33	-0:07:40	0:03:33
	19	Line A135 Angle X	135:00:00	-0:30:00 0:30:00	135:02:51	134:52:00	0:02:51	-0:08:00
	20	Distance H Distance Z	50.00	-0.500 0.500	50.066	50.003	0.066	0.003
	20	Distance L Distance Y	60.00	-0.500 0.500	59.784	59.597	-0.216	-0.403
	20	Distance W Distance X	60.00	-0.500 0.500	59.054	59.068	-0.946	-0.932

ตารางที่ 4.4 การวางทิศทางขนาดแกน X ของ 2 ชิ้นงาน (ต่อ)

สัญลักษณ์	ตำแหน่งตามรูปที่ 4.3	ชื่อลักษณะเฉพาะ	ตำแหน่งตามแบบ	สูง-ต่ำ ของความคลาดเคลื่อน	ตำแหน่งที่ได้จากการวัดของทิศทางวางขนาดแกน X		ค่าความคลาดเคลื่อน	
					Sample-1	Sample-2	Sample-1	Sample-2
	21	Plane Top Parallelism		-0.500 0.500			0.282	0.387
	22	Circle R60 Radius	60.00	-0.500 0.500	60.100	60.054	0.100	0.054
	22	Circle R60 Position X	1254.000	-0.500 0.500	124.661	124.432	-0.339	-0.568
	22	Circle R60 Position Y	315.00	-0.500 0.500	314.596	314.593	-0.404	-0.407

ตารางที่ 4.5การวางทิศทางขนาดแกน Y ของ 2 ชิ้นงาน

สัญลักษณ์	ตำแหน่งตามรูปที่ 4.3	ชื่อลักษณะเฉพาะ	ตำแหน่งตามแบบ	สูง-ต่ำ ของความคลาดเคลื่อน	ตำแหน่งที่ได้จากการวัดของทิศทางวางขนาดแกน Y		ค่าความคลาดเคลื่อน	
					Sample-1	Sample-2	Sample-1	Sample-2
	1	Line Straightness		0.000 0.500			0.217	0.197
	2	Line Straightness		0.000 0.500			0.243	0.227
	3	Line Straightness		0.000 0.500			0.317	0.241
	4	Line Straightness		0.000 0.500			0.388	0.282
	A	Plane Datum A Flatness		0.000 1.000	0.380	0.369	0.380	0.369
	5	Circle Circularity		0.000 1.000			0.842	0.608

ตารางที่ 4 1 การวางทิศทางขนาดแกน Y ของ 2 ชิ้นงาน (ต่อ)

สัญลักษณ์	ตำแหน่งตามรูปที่ 4.3	ชื่อลักษณะเฉพาะ	ตำแหน่งตามแบบ	สูง-ต่ำ ของความคลาดเคลื่อน	ตำแหน่งที่ได้จากการวัดของทิศทางวางขนาดแกน Y		ค่าความคลาดเคลื่อน	
					Sample-1	Sample-2	Sample-1	Sample-2
	5	Circle Circularity		0.000 1.000			0.380	0.298
	5	Circle D90 Diameter	90.000	-0.500 0.500	90.408	90.369	0.408	0.369
	5	Circle D90 Position X	0.000	-0.500 0.500	0.180	0.064	0.180	0.064
	5	Circle D90 Position Y	200.00	-0.500 0.500	199.316	199.210	-0.684	-0.790
	5	Circle Position X - Y	0.0000 200.00	0.000 1.000	0.180 199.316	0.064 199.210	1.414	1.585
	6	Circle D70 Circularity		0.000 1.000			1.027	0.857
	6	Cylinder Diameter	70.00	-0.500 0.500	69.213	69.150	-0.787	-0.850
	6	Circle D70 Position X	60	-0.500 0.500	59.698	59.973	-0.302	-0.027
	6	Circle D70 Position Y	65	-0.500 0.500	64.818	64.793	-0.182	-0.207
	6	Cylinder D70 Perpendicularity		0.000 0.300			0.174	0.437
	7	Cylinder D60 Diameter	60.000	-0.500 0.500	59.550	59.539	-0.450	-0.461

ตารางที่ 4 5 การวางทิศทางขนาดแกน Y ของ 2 ชิ้นงาน (ต่อ)

สัญลักษณ์	ตำแหน่งตามรูปที่ 4.3	ชื่อลักษณะเฉพาะ	ตำแหน่งตามแบบ	สูง-ต่ำ ของความคลาดเคลื่อน	ตำแหน่งที่ได้จากการวัดของทิศทางวางขนาดแกน Y		ค่าความคลาดเคลื่อน	
					Sample-1	Sample-2	Sample-1	Sample-2
	7	Circle D60 Position X	65	-0.500 0.500	65.073	64.973	0.073	-0.027
	7	Circle D60 Position Y	340	-0.500 0.500	339.115	338.952	-0.885	-1.048
	8	Cylinder D25 Diameter	25	-0.500 0.500	24.368	24.428	-0.632	-0.572
	8	Circle D25 Position X	65.00	-0.500 0.500	65.125	64.961	0.125	-0.039
	8	Circle D25 Position Y	340.00	-0.500 0.500	339.049	338.996	-0.951	-1.004
	8	Cylinder Coaxiality		0.000 0.500			0.899	1.496
	9	Cone Cone ang.	24:40:41	-0:30:00 0:30:00	24:12:36	23:53:59	-0:28:05	-0:46:42
	9	Cone Perpendicularity		0.000 0.300			0.979	1.625
	10	Circle D30 #1 Diameter	30.00	-0.500 0.500	30.215	30.326	0.215	0.326
	11	Circle D30 #2 Diameter	30.00	-0.500 0.500	30.276	30.541	0.276	0.541
	12	Circle D30 #3 Diameter	30.00	-0.500 0.500	30.304	30.371	0.304	0.371

ตารางที่ 4 5 การวางทิศทางขนาดแกน Y ของ 2 ชั้นงาน (ต่อ)

สัญลักษณ์	ตำแหน่งตามรูปที่ 4.3	ชื่อลักษณะเฉพาะ	ตำแหน่งตามแบบ	สูง-ต่ำ ของความคลาดเคลื่อน	ตำแหน่งที่ได้จากการวัดของทิศทางวางขนาดแกน Y		ค่าความคลาดเคลื่อน	
					Sample-1	Sample-2	Sample-1	Sample-2
	13	Circle D30 #4 Diameter	30.00	-0.500 0.500	30.341	30.463	0.341	0.463
	14	Circle D30 #5 Diameter	30.00	-0.500 0.500	30.605	30.357	0.605	0.357
	15	Circle D30 #6 Diameter	30.00	-0.500 0.500	30.358	30.290	0.358	0.290
	16	Circle PCD 150 Diameter	150.00	-0.500 0.500	149.887	149.772	-0.113	-0.228
	16	Circle PCD 150 Distance X - Y	0.000 200.00	0.00 1.000	0.194 199.235	0.075 199.265	1.578	1.478
	16	Circle Origin Concentricity	0.066 199.717	0.000 0.500	-0.194 199.235	0.075 199.265	0.164	0.112
	17	Distance Slot L Distance Y	140	-0.500 0.500	140.022	140.321	0.022	0.321
	17	Distance Slot S Distance X	40	-0.500 0.500	40.301	40.362	0.301	0.362
	18	Line A60 Angle X	60:00:00	-0:30:00 0:30:00	59:56:16	59:52:58	-0:03:44	-0:07:02

ตารางที่ 4 5 การวางทิศทางขนาดแกน Y ของ 2 ชั้นงาน (ต่อ)

สัญลักษณ์	ตำแหน่งตามรูปที่ 4.3	ชื่อลักษณะเฉพาะ	ตำแหน่งตามแบบ	สูง-ต่ำ ของความคลาดเคลื่อน	ตำแหน่งที่ได้จากการวัดของทิศทางวางขนาดแกน Y		ค่าความคลาดเคลื่อน	
					Sample-1	Sample-2	Sample-1	Sample-2
	19	Line A135 Angle X	135:00:0 0	-0:30:00 0:30:00	135:15:1 9	135:16:5 8	0:15:19	0:16:58
	20	Distance H Distance Z	50.00	-0.500 0.500	49.771	49.778	-0.229	-0.222
	20	Distance L Distance Y	60.00	-0.500 0.500	59.401	59.489	-0.599	-0.511
	20	Distance W Distance X	60.00	-0.500 0.500	59.583	59.351	-0.417	-0.649
	21	Plane Top Parallelism		-0.500 0.500			0.391	0.284
	22	Circle R60 Radius	60.00	-0.500 0.500	60.038	59.998	0.038	-0.002
	22	Circle R60 Position X	1254.000	-0.500 0.500	124.413	124.668	-0.587	-0.332
	22	Circle R60 Position Y	315.00	-0.500 0.500	314.187	314.123	-0.813	-0.877

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

5.1 ผลการวัดผิวโค้งอิสระ

ผลการวัดด้วยเครื่องมือวัดแบบ 3 มิติ (CMM) ของชิ้นงานที่ได้จากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์บนชิ้นงานที่มีการจัดวาง 2 ทิศทางประกอบด้วย ทิศทางการวางของชิ้นงานขนานแกน X และ แกน Y บนวัสดุโฟม EPS เกรด 2.0 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าพิสัยค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ของหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลอง [7] โดยสาเหตุที่เกิดความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเนื่องจากตำแหน่งที่ไกลจากจุดฐานของหุ่นยนต์จะเกิดความคลาดเคลื่อนสะสมของแต่ละแกนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ที่ตำแหน่งปลายแขนเกิดจากวิธีการเคลื่อนที่ในปริภูมิสามมิติที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งและการหมุนของแขนแต่ละแกน โดยระยะความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.1476 มิลลิเมตร และ 2.6643 มิลลิเมตร ในจัดวางแนวขนานแกน Y และจัดวางในแนวแกน X ตามลำดับ เมื่อเทียบกับขนาดกำหนดของแบบงาน ซึ่ง ผลการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ มีค่า $p\text{-value} = 0.077$ บ่งชี้ว่าทิศทางการวางในแนวขนานแกน Y และการวางในแนวขนานแกน X ในกระบวนการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์มีความเที่ยงตรงเฉลี่ยที่เท่ากันของขนาดชิ้นงาน

5.2 ผลการวัดรูปทรงเรขาคณิต

ผลการวัดขนาดชิ้นงานที่ถูกกัดรูปทรงเรขาคณิตโดยพิจารณา 4 ลักษณะ ประกอบด้วย รูปทรง การจัดวางทิศทาง การจัดวางตำแหน่งและรูปโครงสร้างของพื้นผิว ที่ได้จากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์โดยการวางชิ้นงานที่แตกต่างกัน ประกอบด้วยทิศทางการวางขนานแกน X และ แกน Y อ้างอิงกับโคออร์ดิเนตของหุ่นยนต์ ได้ผลสรุป ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5. 1 ผลการวัดด้วยเครื่อง CMM สำหรับรูปทรง การจัดวางทิศทาง การจัดวางตำแหน่ง และรูปโครงสร้างของพื้นผิว

สัญลักษณ์ ตำแหน่งตามรูปที่ 4.3 ชื่อลักษณะเฉพาะ			ตำแหน่งที่ได้จากการวัดของ ทิศทางวางขนานแกน X				ตำแหน่งที่ได้จากการวัดของ ทิศทางวางขนานแกน Y			
			No.1		No.2		No.1		No.2	
			NG	OK	NG	OK	NG	OK	NG	OK
	1	Line Straightness		○		○		○		○
	2	Line Straightness		○		○		○		○
	3	Line Straightness		○		○		○		○
	4	Line Straightness		○		○		○		○
	A	Plane Datum A Flatness		○		○		○		○
	5	Circle Circularity		○		○		○		○
	5	Circle Circularity		○		○		○		○
	5	Circle D90 Diameter	○		○			○		○
	5	Circle D90 Position X		○		○		○		○
	5	Circle D90 Position Y		○		○	○		○	
	5	Circle Position X - Y		○		○	○		○	
	6	Circle D70 Circularity		○		○	○			○
	6	Cylinder Diameter	○		○		○		○	
	6	Circle D70 Position X		○		○		○		○
	6	Circle D70 Position Y	○			○		○		○
	6	Cylinder D70 Perpendicularit y	○			○		○	○	
	7	Cylinder D60 Diameter	○		○			○		○

ตารางที่ 5.1 ผลการวัดด้วยเครื่อง CMM สำหรับรูปทรง การจัดวางทิศทาง การจัดวางตำแหน่ง และรูปโครงสร้างของพื้นผิว (ต่อ)

สัญลักษณ์ ตำแหน่งตามรูปที่ 4.3 ชื่อลักษณะเฉพาะ			ตำแหน่งที่ได้จากการวัดของ ทิศทางวางขนานแกน X				ตำแหน่งที่ได้จากการวัดของ ทิศทางวางขนานแกน Y			
			No.1		No.2		No.1		No.2	
			NG	OK	NG	OK	NG	OK	NG	OK
	7	Circle D60 Position X		○		○		○		○
	7	Circle D60 Position Y		○		○	○		○	
	8	Cylinder D25 Diameter	○		○		○		○	
	8	Circle D25 Position X		○		○		○		○
	8	Circle D25 Position Y		○		○	○		○	
	8	Cylinder Coaxiality	○		○		○		○	
	9	Cone Cone ang.		○		○		○	○	
	9	Cone Perpendicularity	○		○		○		○	
	10	Circle D30 #1 Diameter	○		○			○		○
	11	Circle D30 #2 Diameter	○			○		○	○	
	12	Circle D30 #3 Diameter		○	○			○		○
	13	Circle D30 #4 Diameter	○		○			○		○
	14	Circle D30 #5 Diameter		○		○	○			○
	15	Circle D30 #6 Diameter		○	○			○		○
	16	Circle PCD 150 Diameter		○		○		○		○

ตารางที่ 5.1 ผลการวัดด้วยเครื่อง CMM สำหรับรูปทรง การจัดวางทิศทาง การจัดวางตำแหน่ง และรูปโครงสร้างของพื้นผิว (ต่อ)

สัญลักษณ์ ตำแหน่งตามรูปที่ 4.3 ชื่อลักษณะเฉพาะ			ตำแหน่งที่ได้จากการวัดของ ทิศทางวางขนานแกน X				ตำแหน่งที่ได้จากการวัดของ ทิศทางวางขนานแกน Y			
			No.1		No.2		No.1		No.2	
			NG	OK	NG	OK	NG	OK	NG	OK
	16	Circle PCD 150 Distance X - Y		○		○	○		○	
	16	Circle Origin Concentricity		○		○		○		○
	17	Distance Slot L Distance Y		○		○	○			○
	17	Distance Slot S Distance X		○	○		○			○
	18	Line A60 Angle X		○		○	○			○
	19	Line A135 Angle X		○		○	○			○
	20	Distance H Distance Z		○		○		○		○
	20	Distance L Distance Y		○		○	○		○	
	20	Distance W Distance X	○		○			○	○	
	21	Plane Top Parallelism		○		○		○		○
	22	Circle R60 Radius		○		○		○		○
	22	Circle R60 Position X		○	○		○		○	
	22	Circle R60 Position Y		○		○	○		○	

ตำแหน่งที่เกิดค่าความคลาดเคลื่อนของทิศทางวางขนานแกน X ประกอบด้วย ตำแหน่งที่ 5, ตำแหน่งที่ 6, ตำแหน่งที่ 7, ตำแหน่งที่ 8, ตำแหน่งที่ 9, ตำแหน่งที่ 10, ตำแหน่งที่ 11, ตำแหน่งที่ 12, ตำแหน่งที่ 13, ตำแหน่งที่ 15, ตำแหน่งที่ 17, ตำแหน่งที่ 20 และ ตำแหน่งที่ 22

ค่าความคลาดเคลื่อนของทิศทางการวางขนานแกน Y ประกอบด้วย ตำแหน่งที่ 5, ตำแหน่งที่ 6, ตำแหน่งที่ 7, ตำแหน่งที่ 8, ตำแหน่งที่ 9, ตำแหน่งที่ 11, ตำแหน่งที่ 14, ตำแหน่งที่ 16, ตำแหน่งที่ 20 และ ตำแหน่งที่ 22

จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าผลการวัดด้วยเครื่อง CMM ของชิ้นงานที่ถูกจัดวางทั้ง 2 ทิศทาง โดยในทิศทางการวางขนานแกน X มีจุดที่ให้ค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดเกินข้อกำหนดของแขนหุ่นยนต์ 17 จุด จากจำนวนการวัดทั้งหมด 45 จุดคิดเป็นร้อยละ 37.78 และ ทิศทางการวางขนานแกน Y มีจุดที่ให้ค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดเกินข้อกำหนดของแขนหุ่นยนต์ 18 จุด จากจำนวนการวัดทั้งหมด 45 จุดคิดเป็นร้อยละ 40

ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมาจาก 3 ปัจจัยหลักได้แก่ ความแม่นยำในการเซตความยาวของคมตัด ตำแหน่งอ้างอิงของปลาย Tool ในด้านสมรรถนะของหุ่นยนต์ระยะเอื้อมของแขนที่ไกลจากฐาน ค่าความ Error สะสมจะยิ่งเพิ่มขึ้น ในด้านการวัดด้วยเครื่อง CMM แรงกดของหัวโพรบและความอ่อนของผิววัสดุโคมเป็นหนึ่งในสาเหตุของค่าความคลาดเคลื่อน

5.3 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการทดลองบนวัสดุโคม EPS เกรด 2.0 ซึ่งมีลักษณะของพื้นผิวที่อ่อนนุ่ม มีโอกาสที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนจากการวัด แนะนำให้เลือกใช้วัสดุอื่นที่มีผิวสัมผัสที่แข็งมาใช้ในการทดลอง

มอเตอร์คมตัดที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เป็นรุ่นที่ควบคุมความเร็วด้วยการปรับค่าจากภายนอกซึ่งมีระดับความแม่นยำในการตั้งค่าไม่แน่นอนแนะนำให้ใช้รุ่นที่ควบคุมโดยตรงผ่านระบบตัวควบคุมของหุ่นยนต์

การจับยึดชิ้นงานบนโต๊ะแนะนำให้สร้างกลไกการจับยึดด้วยอุปกรณ์ ฟิกเจอร์ เพื่อให้เกิดการกระจายแรงบีบจับบนผิวชิ้นงานที่สม่ำเสมอและมั่นคง

การทดลองนี้ไม่ได้พิจารณาผลกระทบของ feed rate ต่อค่าความคลาดเคลื่อนแนะนำให้ผู้สนใจศึกษาต่อพิจารณาผลกระทบของ feed rate ต่อไป

แนะนำให้ผู้สนใจศึกษาเพิ่มจำนวนชิ้นงานตัวอย่างเพื่อความแม่นยำของข้อมูลในการวิเคราะห์ทางสถิติ

แนะนำให้เลือกใช้การวัดแบบสแกนเพื่อลดผลกระทบของพื้นผิวที่อ่อนนุ่มของโคม

สำหรับการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์เพื่อกัดชิ้นงานรูปทรงผิวโค้งทรงกระบอกเป็นการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการผสมผสานการหมุนของแกนทั้ง 6 เพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ถูกตัดซึ่งมีข้อจำกัดที่เกิด

จากระบบ Controller ของหุ่นยนต์จึงส่งผลให้ความแม่นยำที่ได้จากการกัดผิวโค้งมีค่าต่ำกว่าการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง





บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- [1] S. B. Niku et al., *Introduction to Robotics Analysis Control Applications*, USA : Courier Westford, 2011.
- [2] F. C. Yin et al., “Effect of machining traject on grinding force of complex-shaped stone by robotic manipulator,” *Machines*, vol.10, pp. 1-12, Septembe 2022.
- [3] อัฐภูมิ เหลืองทองคำ และคณะ, “การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดความถูกต้องและแม่นยำของหุ่นยนต์แขนกลเคลื่อนที่อิสระ 6 แกน โดยใช้เลเซอร์แทรกเกอร์วัดตามข้อกำหนด ISO 9283,” *วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, ปีที่ 33, ฉบับที่ 80, หน้า 79-92, กรกฎาคม – ธันวาคม, 2563.
- [4] นริสา ทองนุ่ม และคณะ, “การประยุกต์ใช้เลเซอร์แทรกเกอร์ในการตรวจสอบค่าความถูกต้องและแม่นยำของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อิสระ 6 แกน spurtcam,” *วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหการ)*, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2562.
- [5] วโรตม ตูจินดา, *การวิเคราะห์และควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรม*, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559.
- [6] พงศ์แสน พัทธ์วัชร, *พื้นฐานของหุ่นยนต์ กลศาสตร์ของหุ่นยนต์แบบอนุกรม*, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.
- [7] ABB Group, “Product specification IRB 6640,” [Onilne]. Available: <https://library.abb.com/r?cid=9AAC132059>. [Accessed: October 2, 2023].
- [8] จารุคม์ คุณานพดล, *การใช้งานโปรแกรม ABB Robot Studio*, นครปฐม: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์, 2563.
- [9] T. C. Chang et al., *Computer Adied Manufacturing*, New Delhi: Laxmi Publication (P) LTD 113, 2007.
- [10] H. E. Hofy, *Fundamentals of Machining Processes Convention and Nonconventional Processes*, USA: Taylor & Francis Group, 2007.
- [11] Sumipol Agile Technology, “การกัด (Milling) มีกี่ประเภท กระบวนการมีอะไรบ้าง,” [Onilne]. Available: <https://www.sumipol.com/knowledge/types-of-milling-operation>. [Accessed: October 7, 2023].

- [12] บริษัท กรุ๊ปวิศวกรรม จำกัด, “เครื่องกัด CNC แนวระนาบ,” [Online]. Available: <https://groupcor.com/cnc-lathe-machining-center/horizontal-machining-center/>. [Accessed: 22 พฤศจิกายน 2566].
- [13] G. Henzold, *Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design*, Leiden: Manufacturing and Inspection, Elsevier Ltd., 2006.
- [14] P. Geen, *The Geometrical Tolerancing Desk Reference Creating and Interpreting ISO Standard Technical Drawings*, Leiden: Elsevier, 2005.
- [15] Engineer Essentials LLC - creators of GD&T Basics, “The ASME Y14.5 GD&T Standard,” [Online]. Available: <https://www.gdandtbasics.com/asme-y14-5-gdt-standard/>. [Accessed: November 22, 2023].
- [16] บริษัท คีย์เอ็นซ์ (ไทยแลนด์) จำกัด, “การใช้เครื่องมือวัดพิกัด (CMM),” [Online]. Available: <https://www.keyence.co.th/ss/products/measure-sys/gd-and-t/location-tolerance/coaxiality.jsp>. [Accessed: 17 ธันวาคม 2566].
- [17] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เพหฺลือ่งไพบูลย์, *สถิติวิศวกรรม*, กรุงเทพฯ: บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, 2551.
- [18] L. B. da Silva et al., “Tool orientation angle optimization for a multiaxisroboticmilling system,” *International Journal of Automation Technology*, vol. 13, no. 5, pp. 574-582, September 2019.
- [19] P. J. Fu et al., “Smoothness-oriented path optimization for robotic milling processes,” *Science China Technological Sciences*, vol. 63 no. 9, pp 1751-1763, September 2020.
- [20] M. F. Zaeh and O. Roesch, “Improvement of the machining accuracy of millingrobots,” *Production Engineering*, vol. 18 no.1, pp 737-744, February 2024.
- [21] L. Cen and S. N.Melkote, “Effect of robot dynamics on the machining forces in robotic milling,” *Procedia Manufacturing, the 45th SME North American Manufacturing Research Conference (NAMRC 45)*, Los Angeles, USA, 2017, pp. 486-496.
- [22] E. Able et al., “Tool path adaption based on optical measurement data for milling with industrial robots,” *Production Engineering*, vol. 6, pp. 459-465, May 2012.

- [23] X. Qu et al., “Profile error-oriented optimization of the feed direction and posture of the end-effector in robotic free-form milling,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 83, pp. 102580, October 2023.





ภาคผนวก

TNI



NC Code ที่ได้จากโปรแกรม SprutCAM ชิ้นงานผิวโค้งอิสระ

%%%

VERSION:1

LANGUAGE:ENGLISH

%%%

MODULE JAPAN

PROC THAI()

ConfL \Off;

MoveABSJ [[6.987,-4.534,37.924,0.48,-33.482,-

0.373],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009],[167,500,5000,500],[TRUE,0.5,0.5,0.5,0.05,0.5,0.05],tool1\WObj:=wobj2;

MoveL [[3.584,304.975,15.046],[0.002,0.059,-0.998,-0.005],[0,0,-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V100, Z0, tool1\WObj:=wobj2;

MoveL [[3.547,305.066,5.043],[0.002,0.059,-0.998,-0.005],[0,0,-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V100, Z0, tool1\WObj:=wobj2;

MoveL [[3.509,305.158,-4.957],[0.002,0.059,-0.998,-0.005],[0,0,-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool1\WObj:=wobj2;

MoveC [[-0.881,300.906,-4.979],[0.002,0.058,-0.998,-0.005],[0,0,-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]],[-5.133,296.517,-

5.004],[0.002,0.057,-0.998,-0.005],[0,0,-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0,tool1\WObj:=wobj2;

MoveL [[-5.239,296.382,-4.971],[0.002,0.057,-0.998,-0.005],[0,0,-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool1\WObj:=wobj2;

MoveL [[596.522,-5.25,9.969],[0.002,-0.028,-1,-0.005],[-1,0,-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V100, Z0, tool1\WObj:=wobj2;

MoveL [[596.485,-5.158,-0.035],[0.002,-0.028,-1,-0.005],[-1,0,-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V100, Z0, tool1\WObj:=wobj2;

MoveL [[596.447,-5.067,-10.034],[0.002,-0.028,-1,-0.005],[-1,0,-

1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool1\WObj:=wobj2;


```

MoveC [[600.84,-0.811,-10.012],[0.002,-0.027,-1,-0.005],[-1,0,-
1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]],
MoveC [[253.218,0.055,-123.37],[0.002,-0.032,-0.999,-0.005],[-1,0,
-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]],[[245.263,0.061,-
125.383],[0.002,-0.032,-0.999,-0.005],[-1,0,-
1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0,tool1\WObj:=wobj2;
MoveC [[239.445,0.065,-126.715],[0.002,-0.033,-0.999,-0.005],[-1,0,
-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]],[[233.602,0.068,-127.93],[0.002,-
0.033,-0.999,-0.005],[-1,0,-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80,
Z0,tool1\WObj:=wobj2;
MoveC [[228.823,0.069,-128.827],[0.002,-0.033,-0.999,-0.005],[-1,0,
-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]],[[224.028,0.069,-
129.639],[0.002,-0.033,-0.999,-0.005],[-1,0,-
1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0,tool1\WObj:=wobj2;
MoveC [[220.281,0.069,-130.209],[0.002,-0.033,-0.999,-0.005],[-1,0,
-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]],[[216.527,0.068,-
130.724],[0.002,-0.033,-0.999,-0.005],[-1,0,-
1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0,tool1\WObj:=wobj2;
MoveC [[202.822,0.061,-132.099],[0.002,-0.033,-0.999,-0.005],[-1,0,
-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], [[189.06,0.046,-132.652],[0.002,-
0.034,-0.999,-0.005],[-1,0,-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80,
Z0,tool1\WObj:=wobj2;
MoveL [[189.098,-0.046,-122.653],[0.002,-0.034,-0.999,-0.005],[-1,0,
-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool1\WObj:=wobj2;
MoveL [[189.49,-1.002,-18.465],[0.002,-0.034,-0.999,-0.005],[-1,0,-
1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V100, Z0, tool1\WObj:=wobj2;
MoveABSJ
[[0,0,0,0,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], [167,500,5000,500],[TRU
E,0.5,0.5,0.5,0.05,0.5,0.05],tool1\WObj:=wobj2;

```

ENDPROC

ENDMODULE

NC Code ที่ได้จากโปรแกรม SprutCAM ชิ้นงานผิวโค้งอิสระ

%%%

VERSION:1

LANGUAGE:ENGLISH

%%%

MODULE JAPAN

PROC THAI()

ConfL \Off;

MoveABSJ [[8.279,27.845,-0.563,0.118,-27.322,
0.134],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], [167,500,5000,500],[TRUE,0.5,0
.5,0.5,0.05,0.5,0.05],tool4\WObj:=wobj4;

MoveL [[291.6,608.203,10.516],[0.001,-0.054,0.999,0],[0,0,
-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V100, Z0, tool4\WObj:=wobj4;

MoveL [[291.618,608.199,0.511],[0.001,-0.054,0.999,0],[0,0,
-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V100, Z0, tool4\WObj:=wobj4;

MoveL [[291.646,608.192,-15.489],[0.001,-0.054,0.999,0],[0,0,
-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;

MoveC [[300.169,600.161,-15.471],[0.001,-0.052,0.999,0],[0,0,
-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], [[308.2,591.639,-15.453],[0.001,-
0.05,0.999,0],[0,0,-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80,
Z0,tool4\WObj:=wobj4;

MoveL [[308.332,591.468,-15.428],[0.001,-0.05,0.999,0],[0,0,
-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;

MoveL [[308.44,591.282,-15.403],[0.001,-0.05,0.999,0],[0,0,
-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;

MoveL [[308.522,591.083,-15.377],[0.001,-0.05,0.999,0],[0,0,
-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;

MoveL [[308.576,590.874,-15.352],[0.001,-0.05,0.999,0],[0,0,

-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;
 MoveL [[311.027,578.004,-15.343],[0.001,-0.047,0.999,0],[0,0,
 -1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;
 MoveL [[311.054,577.74,-15.349],[0.001,-0.047,0.999,0],[0,0,
 -1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;
 MoveL [[311.038,577.475,-15.355],[0.001,-0.047,0.999,0],[0,0,
 -1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;
 MoveL [[310.978,577.216,-15.361],[0.001,-0.047,0.999,0],[0,0,
 -1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;
 MoveL [[310.876,576.97,-15.367],[0.001,-0.047,0.999,0],[0,0,
 -1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;
 MoveL [[310.735,576.745,-15.374],[0.001,-0.047,0.999,0],[0,0,
 -1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;
 MoveL [[310.559,576.546,-15.38],[0.001,-0.047,0.999,0],[0,0,
 -1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;
 MoveL [[310.352,576.38,-15.387],[0.001,-0.047,0.999,0],[0,0,
 -1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;
 MoveL [[310.12,576.25,-15.394],[0.001,-0.047,0.999,0],[0,0,
 -1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;
 MoveL [[132.003,83.019,-127.556],[0.001,0.07,0.998,0],[-1,0,
 -1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;
 MoveL [[132.002,157.008,-127.586],[0.001,0.052,0.999,0],[-1,0,
 -1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;
 MoveL [[58.051,157.008,-127.717],[0.001,0.054,0.999,0],[-1,0,
 -1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;
 MoveL [[58.052,119.995,-127.701],[0.001,0.063,0.998,0],[-1,0,
 -1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;
 MoveL [[58.062,119.813,-127.701],[0.001,0.063,0.998,0],[-1,0,
 -1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;
 MoveL [[58.093,119.634,-127.701],[0.001,0.063,0.998,0],[-1,0,

```
-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;  
MoveL [[58.144,119.459,-127.701],[0.001,0.063,0.998,0],[-1,0,  
-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;  
MoveL [[58.215,119.291,-127.701],[0.001,0.063,0.998,0],[-1,0,  
-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V80, Z0, tool4\WObj:=wobj4;  
MoveL [[57.971,119.348,10.304],[0.001,0.063,0.998,0],[-1,0,  
-1,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], V100, Z0, tool4\WObj:=wobj4;  
MoveABSJ  
[[0,0,0,0,0,0],[9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009,9E+009]], [167,500,5000,500], [TRU  
E,0.5,0.5,0.5,0.05,0.5,0.05], tool4\WObj:=wobj4;  
ENDPROC  
ENDMODULE
```







วารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

ปีที่ 3 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2567

อิทธิพลของทิศทางการวางชิ้นงานต่อความเที่ยงตรงของขนาดรูปทรงผิวโค้งอิสระ ที่เกิดจากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์

Influence of Workpiece Alignment on the Dimension Accuracy Freeform Curved

Surface Geometry Achieved through Robotic Milling Process

ภาณุภพ ศรีสม¹ กวี บุญสุวรรณ² และ ดอน แก้วดก^{3*}

¹สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น 1771/1 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง
กทม. 10250

²มิตุโตโย ประเทศไทย 76/3-5 ถนนแจ้งวัฒนะ แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กทม. 10220

³สาขาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติแบบสิ้น คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น 1771/1 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง กทม. 10250

Panupop Srisoom¹ Kawee Boonsuwan² and Don Kaewdook^{3*}

¹Engineering Technology Program, Graduate School, Thai-Nichi Institute of Technology
1771/1 Pattakarn Rd., Suan Luang, Bangkok 10250

²Mitutoyo (Thailand) Company,
76/3-5 Chaengwattana Rd., Kwaeng Anusawaree, Khet Bangkaen, Bangkok 10220

³Robotics and Lean Automation Engineering Program, Faculty of Engineering, Thai-Nichi Institute of
Technology 1771/1 Pattakarn Rd., Suan Luang, Bangkok 10250

Corresponding author Email: don@tni.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของทิศทางการจัดวางชิ้นงานที่มีต่อค่าความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตและมิติของรูปทรงผิวโค้งอิสระชิ้นงานที่เกิดจากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์บนวัสดุโพลีเมอร์ EPS เกรด 2.0 การทดลองใช้มอเตอร์ปรับความเร็วรอบได้และตอกกัดเอ็นมิลแบบ 4 ฟัน ชนิดหัวบอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ติดตั้งที่ส่วนปลายแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบ 6 แกน ยี่ห้อ ABB รุ่น IRB 6640 มีระยะเอื้อมปลายแขนไกลสุด 2.55 เมตร ออกแบบการวางชิ้นงาน 2 ทิศทาง ประกอบด้วยการวางขนานกับแนวแกน X และวางขนานแนวแกน Y อ้างอิงจากโคออร์ดิเนตฐานของหุ่นยนต์ ซึ่งทิศทางการวางชิ้นงานมีผลต่อการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์ เนื่องจากตำแหน่งเกิดจากวิธีการเคลื่อนที่ในปริภูมิสามมิติที่เกี่ยวข้องทั้งตำแหน่งและการหมุนของแกน เส้นทางการเดินคมตัดแขนหุ่นยนต์ถูกสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการผลิต ประกอบด้วยการกัดสวนทางและกัดตาม เพื่อสร้างพื้นผิวโค้งอิสระตามแบบงานบนชิ้นงานทดสอบ การตรวจสอบขนาดของรูปทรงผิวโค้งอิสระที่เกิดจากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์ใช้เครื่องมือวัด 3 มิติแบบสัมผัสด้วยหัวบอลขนาด 5 มิลลิเมตร ผลการวัดพบว่ากรวางชิ้นงานทั้งสองทิศทางมีขนาดแตกต่างกันเล็กน้อย โดยการวางขนานกับแนวแกน X มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2.664 มิลลิเมตร และ ทิศทางขนานกับแนวแกน Y มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2.148 มิลลิเมตร ผลการทดสอบทางสถิติที่



วารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

ปีที่ 3 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2567

ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ มีค่า $p\text{-value} > 0.05$ บ่งชี้ว่าทิศทางการวางชิ้นงานไม่มีผลต่อระดับค่าความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานรูปทรงผิวโค้งอิสระที่เกิดจากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์

คำสำคัญ: กัดด้วยแขนหุ่นยนต์ วัสดุโฟม รูปทรงผิวโค้งอิสระ ความเที่ยงตรง เครื่องมือวัด 3 มิติ

Abstract

This research aims to study the directional impact of workpiece arrangement on the geometric and dimensional deviations of the freeform curved surfaces milled by robotic milling on EPS foam material grade 2.0. The experiment utilized an adjustable rotational speed motor, cutter with a 4-tooth end mill, ball head type, and 10 millimeters of diameter. The cutter was mounted at the end of a 6-axis industrial robotic arm ABB IRB 6640 model with a maximum reach of 2.55 meters. The two orientations for workpiece placement were designed, parallel to the X-axis and parallel to the Y-axis, referencing the robot's coordinate base. The direction of workpiece placement affects the robotic arm's end-effector movement due to the positions generated in the three-dimensional coordinate system, involving both position and rotation of the axes. The toolpaths for the robotic arm's end effector were generated using computer-aided programming to facilitate the milling process. The toolpaths included contouring and pocketing to create a curved freeform surface on the workpieces. The measurement of the size of the freeform curved surfaces resulting from robotic arm milling utilized a Coordinate Measuring Machine (CMM) with touch probe diameter 5-millimeter of ball head. The measured results indicated slight differences in the size of the curved surfaces for the two orientations. The workpiece placement parallel to the X-axis showed an average deviation of 2.664 millimeters, while the orientation parallel to the Y-axis showed an average deviation of 2.148 millimeters. Statistical testing at a 95% confidence level with a $p\text{-value} > 0.05$ suggested that the workpiece placement direction in the robotic arm milling process not significantly impact the deviation levels of the freeform curved surfaces resulting from the robotic arm milling process.

Keywords: Robot milling, Foam material, Freeform curved surfaces, Coordinate Measuring Machine (CMM)



1. บทนำ

หุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบ 6 แกน คือหุ่นยนต์ที่มีองศาอิสระหรือแกนการเคลื่อนที่หกระดับ โดยทั่วไปแกนทั้งหกจะถูกกำหนดเป็นแกน X, Y, Z, A, B และ C โดยแกน X, Y และ Z สอดคล้องกับตำแหน่งของหุ่นยนต์ในพื้นที่สามมิติ ในขณะที่แกน A, B และ C สอดคล้องกับทิศทางของหุ่นยนต์หรือทิศทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปด้วยความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ทั้ง 6 แกน โครงสร้างของหุ่นยนต์ประกอบขึ้นจากการต่อกันของก้านต่อ (Link) ต่างๆ ด้วยข้อต่อ (Joint) จากส่วนฐาน (Base) และปลายแขน (End Effector) [1, 2] ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้งานหุ่นยนต์สำหรับงานที่มีลักษณะเฉพาะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้แก่ การใช้หุ่นยนต์สำหรับพ่นสีผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหรือชิ้นส่วนยานยนต์ การใช้หุ่นยนต์ในการขัดพื้นผิวและงานลบคมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นงานและอัตราการผลิตที่สูงขึ้น [3] และการใช้หุ่นยนต์สำหรับกระบวนการเชื่อมในอุตสาหกรรมประกอบชิ้นส่วนยานยนต์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานและรักษาคุณภาพแนวเชื่อม [4] อย่างไรก็ตามลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบ 6 แกน มีขีดความสามารถในการทำงานที่หลากหลายหนึ่งในลักษณะงานที่สามารถนำหุ่นยนต์มาประยุกต์ใช้ได้คือการติดตั้งชุดคมตัดที่ส่วนปลายแขนหุ่นยนต์ โดยการปรับพารามิเตอร์การตัดเฉือนให้สอดคล้องตามทฤษฎีการตัดเฉือนเส้นทางการเคลื่อนที่ปลายแขนของหุ่นยนต์ (Tool path) ถูกสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM) ซอฟต์แวร์สามารถปรับเส้นทางเครื่องมือให้เหมาะสมโดยอัตโนมัติ ลดการสิ้นเปลืองวัสดุ และตรวจจับการชนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างเครื่องจักรและชิ้นส่วนสามารถลดข้อผิดพลาด เพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตได้ [5] จากการศึกษาทางวิจัยที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย อัฐภูมิ เหลืองทองคำ และ คณะ [6] ทำการทดลองเพื่อประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดความถูกต้องและแม่นยำของแขนหุ่นยนต์แบบ 6 แกน โดยใช้หุ่นยนต์ KUKA รุ่น KR150 R2700 โดยติดตั้งตัวสะท้อนแสงเลเซอร์ไว้ที่ส่วนปลายแขนของหุ่นยนต์ ผลการศึกษาพบว่าค่าความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ที่ระดับ ± 0.0149 มิลลิเมตร โดยการรายงานค่าความไม่แน่นอนขยายของการทดสอบตำแหน่งและการทดสอบเส้นทางขึ้นอยู่กับค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานคูณกับตัวประกอบครอบคลุม ($k=2$) ซึ่งให้ระดับความเชื่อมั่นอยู่ที่ 95% Leandro Batista da Silva และ คณะ [7] ศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะคมตัดในการตัดเฉือนชิ้นงานด้วยแขนหุ่นยนต์แบบ 6 แกน โดยใช้หุ่นยนต์ Motoman SV3X ชิ้นงานวางบนโต๊ะที่สามารถปรับตำแหน่งแบบ 2 แกน โดยใช้คมตัดหัวบอลขนาด 3 มิลลิเมตร และ 1 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่าการเอียงมุมของคมตัดที่เหมาะสมมีผลต่อคุณภาพผิวและความแม่นยำของขนาดชิ้นงานที่เกินจากการกัดชิ้นงานด้วยแขนหุ่นยนต์ Peng JingFu และ คณะ [8] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเส้นทางการเดินของคมตัดเพื่อเพิ่มระดับความเรียบผิวชิ้นงานที่ได้จากการด้วยแขนหุ่นยนต์ การศึกษาใช้โปรแกรม RobotStudio เพื่อจำลองการเคลื่อนที่และปรับเส้นทางการตัดเฉือนให้เหมาะสม ทำการตัดเฉือนด้วยแขนหุ่นยนต์ ABB รุ่น IRB-6660 205/190 ผลการศึกษาพบว่าการปรับระดับความเร่งของข้อต่อข้อจำกัดของข้อต่อ ข้อจำกัดของประสิทธิภาพความแข็งแรง โดยวิธีการเชิงเส้นต่อเนื่องระหว่างเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของพื้นผิวชิ้นงานที่ได้จากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์ Xiang Qu และ คณะ [9] นำเสนอการปรับปรุงทิศทางการป้อนและท่าทางปลายแขนหุ่นยนต์โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์ โดยใช้หุ่นยนต์ KUKA รุ่น KR210 R2700-2 ผลการทดลองพบว่าทิศ



วารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

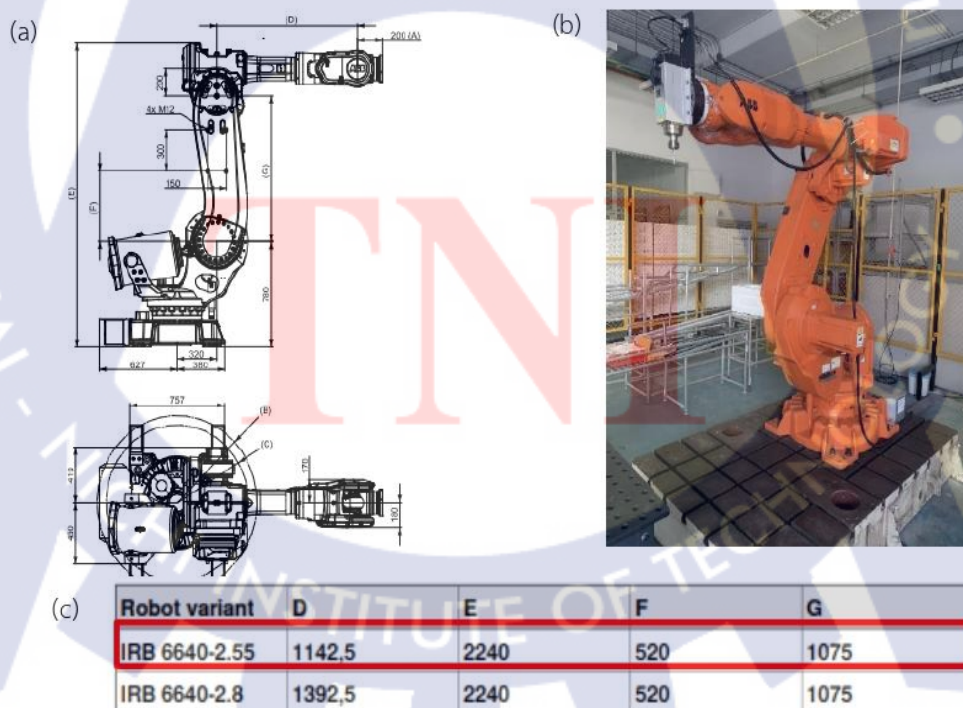
ปีที่ 3 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2567

ทางการป้อนและท่าทางของปลายแขนที่ถูกขดเคี้ยวความคลาดเคลื่อนของโปรไฟล์ที่วัดได้มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของพื้นผิวชิ้นงานที่ได้จากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์ได้อย่างมาก Lejun Cen และคณะ [10] ทำการศึกษาลักษณะของพลวัตหุ่นยนต์ต่อแรงในการกัดด้วยหุ่นยนต์ โดยใช้หุ่นยนต์ KUKA รุ่น KR210 โดยใช้การคำนวณแบบวนซ้ำเพื่อหาผลกระทบของแรงการกัดต่อความแข็งแรงของแขนหุ่นยนต์ได้รับการพิจารณาโดยใช้ Conservative Congruence Transformation (CCT) การทดลองการกัดด้วยหุ่นยนต์แสดงให้เห็นถึงการลดลงของความผิดพลาดที่คาดการณ์ไว้ประมาณ 50% ถึง 75% สำหรับลักษณะสำคัญของแรงการกัดที่เกิดขึ้นจากรูปแบบพลวัต งานวิจัยชิ้นนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของทิศทางการวางชิ้นงานที่มีต่อความเที่ยงตรงของรูปทรงผิวโค้งอิสระที่เกิดจากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์บนวัสดุโพลีเมอร์สำหรับทำแม่พิมพ์ ซึ่งจะเป็แนวทางในการประยุกต์ใช้หุ่นยนต์แบบ 6 แกน สำหรับการตัดเฉือนเพื่อลดต้นทุนทางด้านเครื่องจักรในอุตสาหกรรมการผลิต

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 หุ่นยนต์สำหรับกัดชิ้นงาน

งานวิจัยนี้ใช้หุ่นยนต์อาร์ทีคิวเลท (Articulated Arm Robot) แบบ 6 แกน มีลักษณะโครงสร้างคล้ายแขนมนุษย์ [11] ยี่ห้อ ABB รุ่น IRB 6640 รับภาระโหลดได้สูงสุด 235 กิโลกรัม มีระยะเอื้อมปลายแขนไกลสุด 2.55 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1

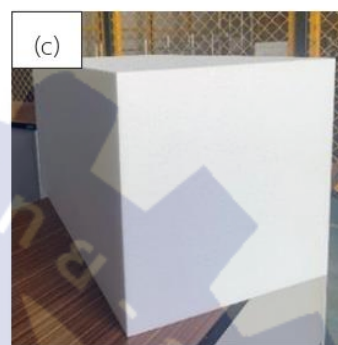
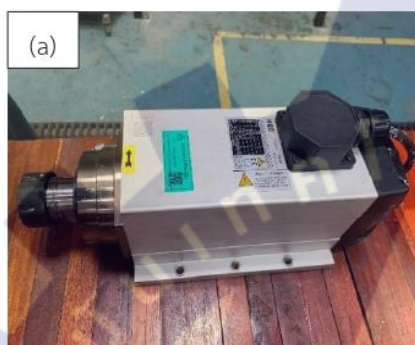


รูปที่ 1 (a) ขนาดด้านมิติของแขนหุ่นยนต์ (b) หุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลอง (c) ตารางแสดงค่าระยะความยาวของข้อต่อแขนหุ่นยนต์



คมตัด 2.2 และระบบเฟลาซิป

เฟลาซิปที่ใช้ในการกัดชิ้นงานใช้เซอร์โวมอเตอร์ติดตั้งที่ปลายแขนหุ่นยนต์ ยี่ห้อ HQD รุ่น GDF60-18Z/6.0 ความเร็วหมุนที่ใช้กัดงาน 8400 รอบต่อนาที ที่ความถี่ 140 Hz ดังแสดงในรูปที่ 2-a ใช้ดอกกัดเอ็นมิลแบบ 4 ฟัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร มีระยะกัตลึก 100 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2-b ชิ้นงานที่ทดลองเป็นวัสดุโฟมเกรดอุตสาหกรรมสำหรับผลิตแม่พิมพ์ต้นแบบ (Expandable Polystyrene หรือ EPS) ความหนาแน่น 2 ปอนด์ ที่ขนาด 300 มิลลิเมตร x 600 มิลลิเมตร x 500 มิลลิเมตร ดัง

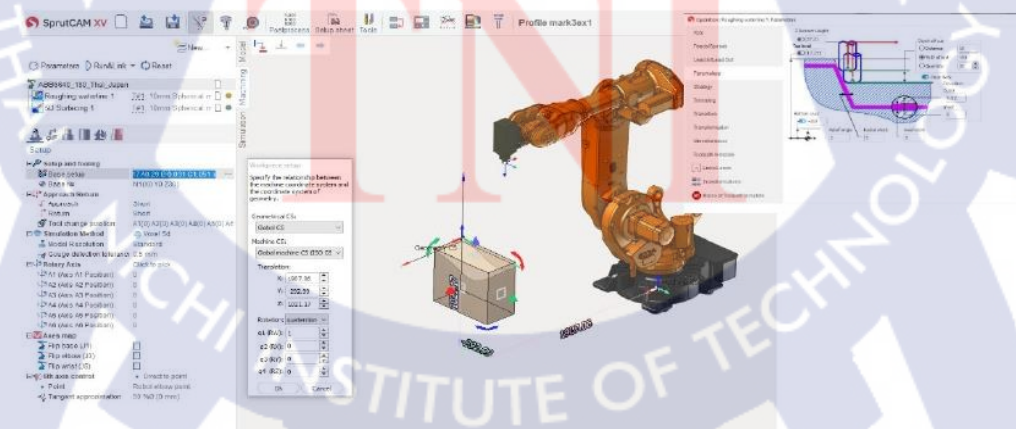


แสดงในรูปที่ 2-c

รูปที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง (a) เซอร์โวมอเตอร์, (b) ดอกกัดเอ็นมิลแบบ 4 ฟัน และ (c) วัสดุชิ้นงานโฟม EPS เกรด 2.0

โปรแกรม 2.3 คอมพิวเตอร์สำหรับสร้างเส้นทางเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการผลิต (CAM) เพื่อสร้างเส้นทางการกัดให้กับแขนหุ่นยนต์ [10, 12] ในรูปแบบ NC Code ด้วยโปรแกรม SprutCAM XV ซึ่งสามารถวิเคราะห์จลศาสตร์การเคลื่อนที่ของปลายหุ่นยนต์ได้อย่างแม่นยำ ตรงกับลักษณะงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3

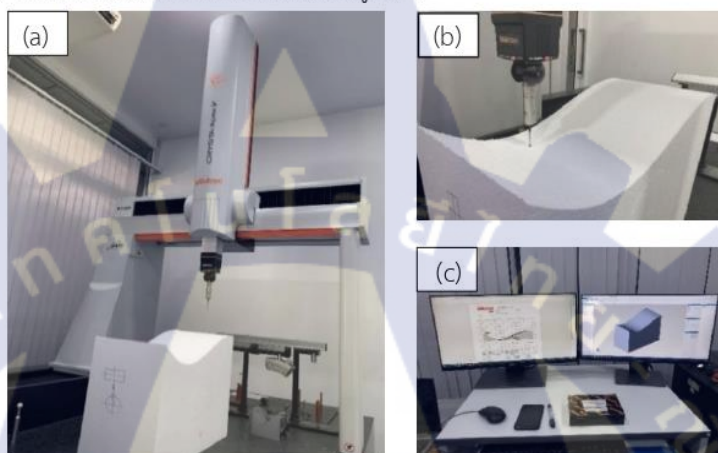


รูปที่ 3 หน้าต่างควบคุมหุ่นยนต์โปรแกรม SprutCAM XV



2.4 การตรวจวัดขนาดและรูปทรงชิ้นงาน

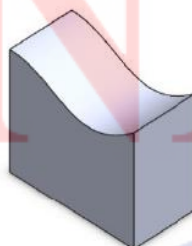
การตรวจวัดค่าความเที่ยงตรงของพื้นผิวชิ้นงานหลังการตัดเฉือนใช้เครื่องวัดแบบ 3 มิติ (CMM) ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น CRYSTA-Apex V 9108 ใช้การวัดแบบสัมผัสด้วยหัวโพรบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ความยาวก้าน 21 มิลลิเมตร ทำการสัมผัสบนพื้นผิวของชิ้นงานด้วยแรงสัมผัส นิวตันต่อมิลลิเมตร 0.20 ที่ความเร็ว 20 มิลลิเมตรต่อวินาที บนพื้นผิวโค้งทั้ง เส้นทาง 3 ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 (a) เครื่องวัดขนาดแบบ มิติ 3(CMM) Mitutoyo รุ่น CRYSTA-Apex V 9108 (b) การสัมผัสของหัวโพรบ ขณะทำการวัด (c) โปรแกรมเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลการวัด

2.5 การทดลอง

ออกแบบชิ้นงานพื้นผิวโค้ง ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ (CAD) สำหรับการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์ตามมาตรฐาน The ASME Y 14.5GD&T Standard [13, 14] เพื่อการประเมินความคลาดเคลื่อนของรูปทรง ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 รูปทรงผิวโค้งอิสระของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

ออกแบบพารามิเตอร์การตัดเฉือนความเร็วตัดสำหรับวัสดุโพลีเอทิลีนและคมตัดที่ทำมาจากเหล็กเครื่องมือความเร็วรอบสูง (HSS) โดยสมการที่ 1, 2 และ 3 [15]

$$V = \frac{\pi d N}{1000} \quad (1)$$



เมื่อ v คือ ความเร็วตัด; เมตร ต่อ นาที

d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคมตัด; มิลลิเมตร

N คือ ความเร็วรอบของเฟลาขับ; รอบ ต่อ นาที

การเคลื่อนที่ในการป้อนของชิ้นงานเป็นเส้นตรง เส้นโค้ง หรือแบบเกลียวดังสมการที่ 2 และ 3
อัตราการป้อนต่อรอบ S

$$S = \frac{f}{N} \quad (2)$$

อัตราการป้อนต่อฟัน S_z

$$S_z = \frac{f}{Nz_c} \quad (3)$$

เมื่อ S คือ อัตราการป้อนต่อรอบ; มิลลิเมตร ต่อ รอบ

S_z คือ อัตราการป้อนต่อฟัน; มิลลิเมตร ต่อ ฟัน

f คือ อัตราการป้อน; มิลลิเมตร ต่อ นาที

N คือ ความเร็วรอบของเฟลาขับ; รอบ ต่อ นาที

z_c คือ จำนวนฟันที่ใช้ในการกัด

สร้าง NC Code ด้วยโปรแกรม SprutCAM XV ตั้งค่าโปรแกรมโดยเริ่มต้นจากการกำหนดคุณลักษณะของหุ่นยนต์เป็น ABB รุ่น IRB 6640 นำไฟล์ชิ้นงานที่ถูกออกแบบเข้าสู่โปรแกรม SprutCAM XV ตั้งค่าคมตัดและเงื่อนไขการตัดเฉือน จำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ขณะตัดเฉือน เลือกคำสั่งสร้าง NC Code นำไฟล์ไปโหลดเข้าตู้ควบคุมหุ่นยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 (a) จำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ปลายแขนหุ่นยนต์ด้วยโปรแกรม SprutCAM (b) การปฏิบัติงานจริงด้วยแขนหุ่นยนต์

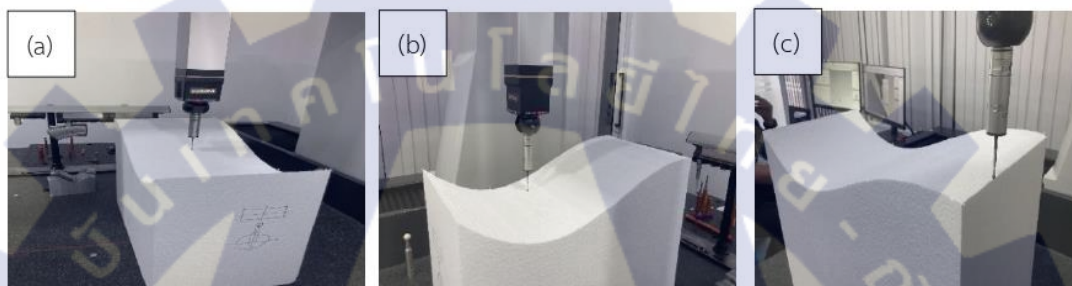


วารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

ปีที่ 3 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2567

ตรวจวัดค่าความเที่ยงตรงของพื้นผิวชิ้นงานหลังการตัดเฉือนใช้เครื่องวัดแบบ 3 มิติ อ้างอิงจากพื้นผิวของโต๊ะวางชิ้นงานเครื่องมือวัดหาระนาบด้านข้างของชิ้นงานทั้ง 4 เฟลน เพื่อหาขอบของชิ้นงาน ทำการแบ่งครึ่งชิ้นงานเพื่อหาจุดกึ่งกลาง และแบ่งเป็น 4 ส่วน เพื่อการวัดพื้นผิวของงานโดยเริ่มจากการวัดตรงกลางของชิ้นงานเป็นเส้นทางแรก เพิ่มเส้นทางจากจุดกึ่งกลางไปทางซ้ายห่าง 75 มิลลิเมตร เป็นเส้นทางที่สอง และ เส้นทางที่ 3 ห่างจากจุดกึ่งกลางไปทางขวาห่าง 75 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 7

นำเส้นทางที่ทำการวัดด้วยหัวโพรบทั้ง 3 มิติเพื่อหา 2 มิติโดยการเปรียบเทียบแบบ 3 เส้นทางเปรียบเทียบกับแบบ 3 ค่าความเที่ยงตรงของชิ้นงาน



รูปที่ 7(a) ตำแหน่งการวัดที่จุดกึ่งกลางชิ้นงาน (b) ตำแหน่งการวัดขอบซ้ายชิ้นงาน (c) ตำแหน่งการวัดขอบขวาชิ้นงาน

3. ผลที่ได้จากการวิจัย

ชิ้นงานที่ถูกจัดวางในระนาบที่แตกต่างกันประกอบด้วย ทิศทางการวางชิ้นงานขนานแกน X และ แกน Y อ้างอิงกับโคออร์ดิเนตของหุ่นยนต์ มีผลต่อระยะการเคลื่อนที่แต่ละแกนของแขนหุ่นยนต์ส่งผลให้ได้ค่าผลการวัดพื้นผิวของชิ้นงานหลังการกัดมีระยะความเที่ยงตรงของขนาดที่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับแบบงานจริง มีรายละเอียดผลการวัดดังนี้

แนวการวัด a-1 มีระยะคลาดเคลื่อนสูงสุด 2.80427 มิลลิเมตร และ ระยะคลาดเคลื่อนต่ำสุด 4.23245 มิลลิเมตร

แนวการวัด a- 4.42895 มีระยะคลาดเคลื่อนสูงสุด 2มิลลิเมตร และ ระยะคลาดเคลื่อนต่ำสุด 1.47251 มิลลิเมตร

แนวการวัด a- 1.33614 มิลลิเมตร และ ระยะคลาดเคลื่อนต่ำสุด 4.70309 มีระยะคลาดเคลื่อนสูงสุด 3 มิลลิเมตร

แนวการวัด b-1 มีระยะคลาดเคลื่อนสูงสุด 4.45064 มิลลิเมตร และ ระยะคลาดเคลื่อนต่ำสุด 0.24379 มิลลิเมตรแนวการวัด b-2 มีระยะคลาดเคลื่อนสูงสุด .481863 มิลลิเมตร และ ระยะคลาดเคลื่อนต่ำสุด 0.24005 มิลลิเมตร

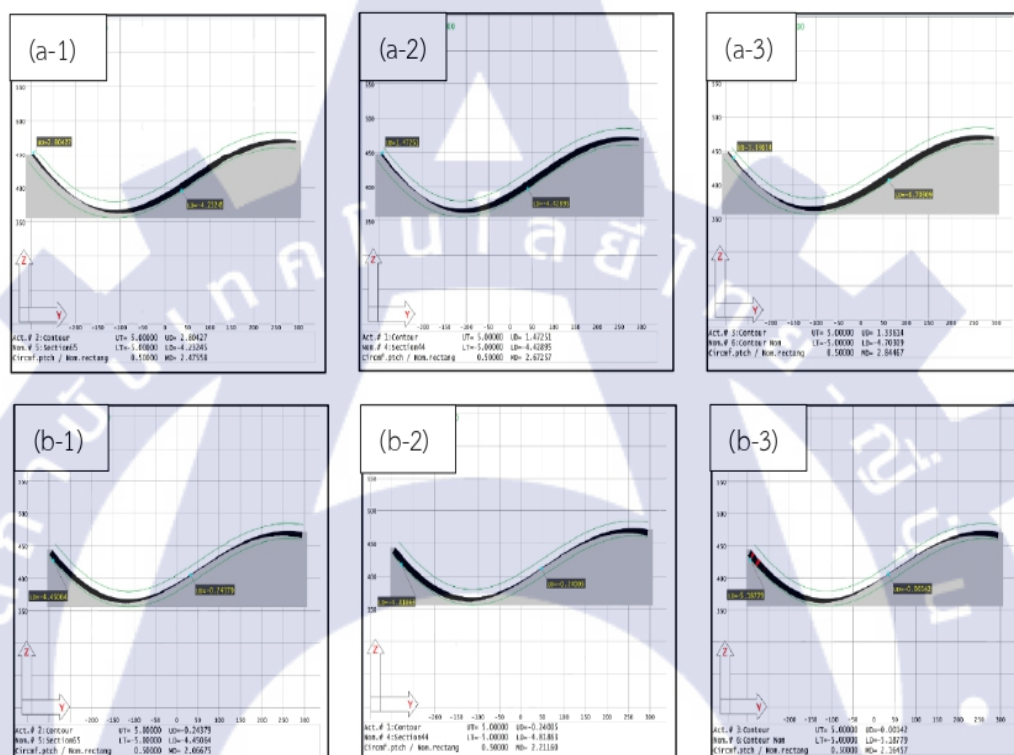
แนวการวัด b- มีระยะคลาดเคลื่อนสูงสุด 35.18779 มิลลิเมตร และ ระยะคลาดเคลื่อนต่ำสุด 0.00142 มิลลิเมตร



วารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

ปีที่ 3 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2567

จากข้อมูลการวัดตามแนวความยาวของชิ้นงานพบว่าตำแหน่งส่วนปลายแขนที่ไกลจากฐานหุ่นยนต์จะมีค่าความคลาดเคลื่อน (Error) สูงกว่าระยะปลายแขนที่อยู่ใกล้ฐาน และหากวิเคราะห์ค่าการวัดตามแนวขวางของชิ้นงานพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนไม่แตกต่างกันทั้งการวางชิ้นงานขนานแกน X และแกน Y อ้างอิงกับโคออร์ดิเนตของหุ่นยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 (a) ทิศทางการวางชิ้นงานขนานแกน X อ้างอิงกับโคออร์ดิเนตของหุ่นยนต์

(a-1) ระยะที่ห่างจากกึ่งกลางทางซ้าย, (a-2) ระยะกึ่งกลาง, (a-3) ระยะห่างจากกึ่งกลางทางขวา (b) ทิศทางการวางชิ้นงานขนานแกน Y อ้างอิงกับโคออร์ดิเนตของหุ่นยนต์ (b-1) ระยะที่ห่างจากกึ่งกลางทางซ้าย, (b-2) ระยะกึ่งกลาง, (b-3) ระยะห่างจากกึ่งกลางทางขวา

เมื่อนำผลที่ได้จากการวัดของชิ้นงานทั้ง ทิศทางมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าความแปรปรวนของข้อมูลด้วย 2 โปรแกรม Minitab 17 โดยกำหนดค่านัยสำคัญทางสถิติ $\alpha = 0.05$ พบว่าค่า P-value = 0.077 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า α จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก [Do not Reject $H_0 \Rightarrow \mu_1 = \mu_2$] ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 [16] ชี้ให้เห็นว่าทิศทางการ

จัดวางชิ้นงานทั้ง แบบ ไม่มีผลต่อความเที่ยงตรงของขนาดชิ้นงานที่เกิดจากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์ ดัง 2 10 และ รูปที่ 9 แสดงในรูปที่

Two-Sample T-Test and CI: A, B

Two-sample T for A vs B

	N	Mean	StDev	SE Mean
A	10	2.146	0.615	0.19
B	10	2.666	0.625	0.20

Difference = μ (A) - μ (B)

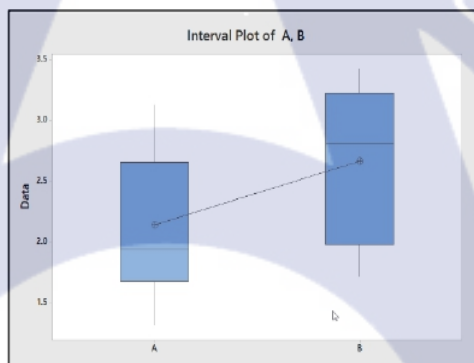
Estimate for difference: -0.520

95% CI for difference: (-1.102, 0.062)

T-Test of difference = 0 (vs $\neq$): T-Value = -1.88 P-Value = 0.077 DF = 18

Both use Pooled StDev = 0.6197

รูปที่ 9 ค่าแตกต่างของ Hypothesis Testing ด้วยวิธี Sample T ระหว่างกลุ่ม A และ กลุ่ม B



รูปที่ 10 Boxplot ค่าเฉลี่ยกลุ่มตัวอย่าง A และ กลุ่ม B

4. สรุป

ตำแหน่งจัดวางชิ้นงานวัสดุโฟม EPS เกรด 2.0 ในกระบวนการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์ มีผลกระทบต่อขนาดมิติของชิ้นงานเนื่องจากตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์เกิดจากวิถีการเคลื่อนที่ในปริภูมิสามมิติ ซึ่งเกี่ยวข้องกับตำแหน่งและการหมุนของแขนแต่ละแกน ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าชิ้นงานที่ถูกจัดวางในแนวขนานแกน Y อ้างอิงกับโคออร์ดิเนตของหุ่นยนต์ให้ผลการวัดที่มีความเที่ยงตรงของขนาดชิ้นงานหลังการกัดดีกว่า ผลการวัดด้วยเครื่องวัดขนาดแบบ มิติ ระยะความคลาด 3เคลื่อนที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ มิลลิเมตร ในจัด 2.6643 มิลลิเมตร และ 2.1476 วางแนวขนานแกน Y และจัดวางในแนวแกน X ตามลำดับ เมื่อเทียบกับขนาดกำหนดของแบบงาน ซึ่งตำแหน่งที่ไกลจากจุดฐานของหุ่นยนต์จะเกิดความคลาดเคลื่อนของระยะการกัดมากที่สุดเนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนสะสม (Error) แต่ละแกนของแขนหุ่นยนต์ที่มีระยะความแตกต่างในการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ ผลการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น เปอร์เซนต์ มีค่า 95 p-value = 0.077 บ่งชี้ว่าทิศทางการวางในแนวขนานแกน Y และ การวางในแนวขนานแกน X ในกระบวนการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์มีค่าความเที่ยงตรงเฉลี่ยที่เท่ากันของขนาดชิ้นงาน



5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท มิตูโตโย (ประเทศไทย) จำกัด ในความอนุเคราะห์ด้านการวัดขนาดด้วยเครื่อง CMM บริษัท อัลฟาโซลูชั่น จำกัด ในการให้คำแนะนำการใช้โปรแกรม SprutCAM XV และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่สนับสนุนเครื่องมือสำหรับการดำเนินงานวิจัย ส่งผลให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Toochinda, Analysis and control of industrial robots, Bangkok: Chulalongkorn University Press, 2016. (in Thai)
- [2] P. Pitakwatchara, Basics of robotics: serial robot mechanics, Bangkok: Chulalongkorn University Press, 2014. (in Thai)
- [3] F. Yin, s. Wu, H. Huang, C. Cui and Q. Ji, "Effect of Machining Traject on Grinding Force of Complex-Shaped Stone by Robotic Manipulator," Machines, vol. 10, no. 9, pp. 1-12, 2022.
- [4] P. Saeed Benjamin Niku, Introduction to Robotics Analysis,Control,Applications, United States of America: Pearson Education, 2011.
- [5] A. Karim, J. Hitzer, A. Lechler and A. Verl, "Analysis of the dynamic behavior of a six-axis industrial robot within the entire workspace in respect of machining tasks," in IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Munich, 2017.
- [6] Attapoom , Chana Raksiri and Paim Kittiya, "The Measurement Uncertainty Evaluation of Accuracy and Precision for 6-axis Robotic Arm in Accordance with ISO 9283 by Laser Tracker," Kasetsart Engineering Journal, vol. 33, no. 110, pp. 79-92, 2020. (in Thai)
- [7] L. B. d. Silva, H. Yoshioka, H. Shimmo and J. Zhu, "Tool Orientation Angle Optimization for a Multi-Axis Robotic Milling System," pp. 574-582, 2019.
- [8] Y. D. G. Z. a. H. D. JingFu PENG, "Smoothness-oriented path optimization for robotic milling," Science China Technological Sciences, vol. 63, no. 9, p. 1751-1763, 2020.
- [9] W. M. S. C.-J. a. Z. W.-H. Qu Xiang, "Profile error-oriented optimization of the feed direction and posture of the end-effector in robotic free-feom milling," Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 83, no. 102580, 2023.



- [10] C. L. a. N. Shreyes, "Effect of Robot Dynamics on the Machining Forces in Robotic Milling," *Procedia Manufacturing*, vol. 10, pp. 486-496, 2017.
- [11] S. Mejri, V. Gagnol, T.-P. Le, L. Sabourin, P. Ray and P. Paultre, "Dynamic characterization of machining robot and stability analysis," *Springer-Verlag London*, pp. 351-359, 2015.
- [12] T. Narisa, *An Application of Laser Tracker for ISO 9283 Six Axis Robot Accuracy and Precision Test Method*, Bangkok: Kasart University, 2562. (in Thai)
- [13] L. Y. a. D. Y. Chen Yongxue, "Toolpath Generation for Robotic Flank Milling via Smoothness and Stiffness Optimization," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 85, no. 102640, 2023.
- [14] H. Georg, *Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection*, Elsevier Ltd 2006, 2006.
- [15] E.-H. Hassan, *Fundamentals of Machining Processes Conventional and Nonconventional Processes*, Tauror & Francis Group, 2007.
- [16] P. Sudasna-Na-Ayudhya and P. Luangpaiboon, *Statistic for Engineering*, Bangkok: Top Publishing, 2008, (in Thai)

TNI

ประวัติย่อผู้วิจัย



ชื่อ – สกุล

นาย ภาณุภพ ศรีสม

วัน-เดือน-ปี เกิด

16 ธันวาคม 2541

ที่อยู่ปัจจุบัน

50 หมู่ 8 ตำบล นาป่า อำเภอมืองชลบุรี จังหวัดชลบุรี
20000

E-mail

Panupop.s@gmail.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2566

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

พ.ศ. 2564

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบการผลิต

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY