

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

³สาขาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติแบบสลับ 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 Anusaowaree, 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

(Received: January 10, 2024; Revise: February 17, 2024; Accepted: February 27, 2024)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของทิศทางการจัดวางชิ้นงานที่มีต่อค่าความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตและมิติของรูปทรงผิวโค้งอิสระชิ้นงานที่เกิดจากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์บนวัสดุโฟม EPS เกรด 2.0 การทดลองใช้มอเตอร์ปรับความเร็วรอบได้และดอกกัดเอ็นมิลแบบ 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 ประกอบด้วยการกัดสวนทางและกัดตามเพื่อสร้างพื้นผิวโค้งอิสระตามแบบงานบนชิ้นงานทดสอบ การตรวจสอบขนาดของรูปทรงผิวโค้งอิสระที่เกิดจากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์ใช้เครื่องมือวัด 3 มิติแบบสัมผัสด้วยหัวบอลขนาด 5 มิลลิเมตร ผลการวัดพบว่าการวางชิ้นงานทั้งสองทิศทางมีขนาดแตกต่างกันเล็กน้อย โดยการวางขนานกับแนวแกน X มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2.664 มิลลิเมตร และ ทิศทางขนานกับแนวแกน Y มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2.148 มิลลิเมตร ผลการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ มีค่า p-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-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

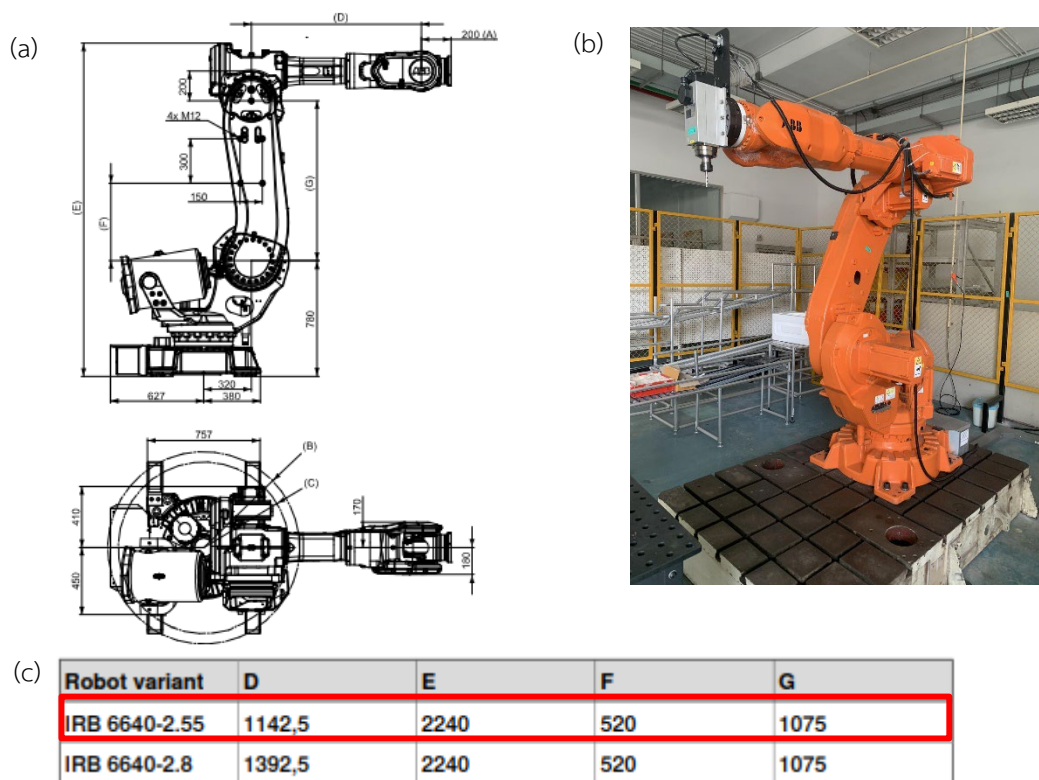
หุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบ 6 แกน คือหุ่นยนต์ที่มีองศาอิสระหรือแกนการเคลื่อนที่หกระดับ โดยทั่วไปแกนทั้งหกจะถูกกำหนดเป็นแกน X, Y, Z, A, B และ C โดยแกน X, Y และ Z สอดคล้องกับตำแหน่งของหุ่นยนต์ในพื้นที่สามมิติ ในขณะที่แกน A, B และ C สอดคล้องกับทิศทางของหุ่นยนต์หรือทิศทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปด้วยความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ทั้ง 6 แกน โครงสร้างของหุ่นยนต์ประกอบขึ้นจากการต่อกันของก้านต่อ (Link) ต่างๆ ด้วยข้อต่อ (Joint) จากส่วนฐาน (Base) และปลายแขน (End Effector) [1, 2] ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้งานหุ่นยนต์สำหรับงานที่มีลักษณะเฉพาะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้แก่ การใช้หุ่นยนต์สำหรับพ่นสีผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหรือชิ้นส่วนยานยนต์ การใช้หุ่นยนต์ในการขัดพื้นผิวและงานลบคมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นงานและอัตราการผลิตที่สูงขึ้น [3] และการใช้หุ่นยนต์สำหรับกระบวนการเชื่อมในอุตสาหกรรมประกอบชิ้นส่วนยานยนต์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานและรักษาคุณภาพแนวเชื่อม [4] อย่างไรก็ตามลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบ 6 แกนมีขีดความสามารถในการทำงานที่หลากหลายหนึ่งในลักษณะงานที่สามารถนำหุ่นยนต์มาประยุกต์ใช้ได้คือการติดตั้งชุด

คมตัดที่ส่วนปลายแขนหุ่นยนต์ โดยการปรับพารามิเตอร์การตัดเฉือนให้สอดคล้องตามทฤษฎีการตัดเฉือน เส้นทางเคลื่อนที่ปลายแขนของหุ่นยนต์ (Tool path) ถูกสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM) ซอฟต์แวร์สามารถปรับเส้นทางเครื่องมือให้เหมาะสมโดยอัตโนมัติ ลดการสิ้นเปลืองวัสดุ และตรวจจับการชนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างเครื่องจักรและชิ้นส่วนสามารถลดข้อผิดพลาด เพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตได้ [5] จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย อัญญภูมิ เหลืองทองคำ และ คณะ [6] ทำการทดลองเพื่อประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดความถูกต้องและแม่นยำของแขนหุ่นยนต์แบบ 6 แกน โดยใช้หุ่นยนต์ KUKA รุ่น KR150 R2700 โดยติดตั้งตัวสะท้อนแสงเลเซอร์ไว้ที่ส่วนปลายแขนของหุ่นยนต์ ผลการศึกษพบว่าค่าความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ที่ระดับ ± 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 ผลการศึกษพบว่าการปรับระดับความเร่งของข้อต่อชิดจำกัดของข้อต่อ ข้อจำกัดของประสิทธิภาพความแข็งแกร่ง โดยวิธีการเชิงเส้นต่อเนื่องระหว่างเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของพื้นผิวชิ้นงานที่ได้จากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์ Xiang Qu และ คณะ [9] นำเสนอการปรับปรุงทิศทางการป้อนและท่าทางปลายแขนหุ่นยนต์โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์ โดยใช้หุ่นยนต์ KUKA รุ่น KR210 R2700-2 ผลการทดลองพบว่าทิศทางการป้อนและท่าทางของปลายแขนที่ถูกชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนของโปรไฟล์ที่วัดได้มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของพื้นผิวชิ้นงานที่ได้จากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์ได้อย่างมาก Lejun Cen และคณะ [10] ทำการศึกษาผลกระทบของพลวัตหุ่นยนต์ต่อแรงในการกัดด้วยหุ่นยนต์ โดยใช้หุ่นยนต์ KUKA รุ่น KR210 โดยใช้การคำนวณแบบวนซ้ำเพื่อหาผลกระทบของแรงการกัดต่อความแข็งแกร่งของแขนหุ่นยนต์ ได้รับการพิจารณาโดยใช้ Conservative Congruence Transformation (CCT) การทดลองการกัดด้วยหุ่นยนต์แสดงให้เห็นถึงการลดลงของความผิดพลาดที่คาดการณ์ไว้ประมาณ 50% ถึง 75% สำหรับลักษณะสำคัญของแรงการกัดที่เกิดขึ้นจากรูปแบบพลวัต งานวิจัยชิ้นนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของทิศทางการวางชิ้นงานที่มีต่อความเที่ยงตรงของรูปทรงผิวโค้งอิสระที่เกิดจากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์บนวัสดุโฟมสำหรับทำแม่พิมพ์ ซึ่งจะเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้หุ่นยนต์แบบ 6 แกน สำหรับการตัดเฉือนเพื่อลดต้นทุนทางด้านเครื่องจักรในอุตสาหกรรมการผลิต

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 หุ่นยนต์สำหรับกัดชิ้นงาน

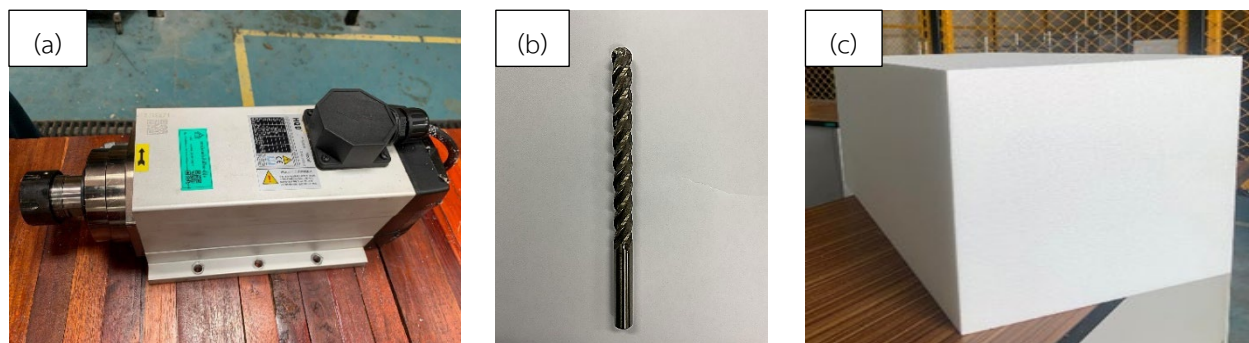
งานวิจัยนี้ใช้หุ่นยนต์อาร์ทิคิวเลต (Articulated Arm Robot) แบบ 6 แกน มีลักษณะโครงสร้างคล้ายแขนมนุษย์ [11] ยี่ห้อ ABB รุ่น IRB 6640 รับภาระโหลดได้สูงสุด 235 กิโลกรัม มีระยะเอื้อมปลายแขนไกลสุด 2.55 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1



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

2.2 คมตัดและระบบเฟลาซิป

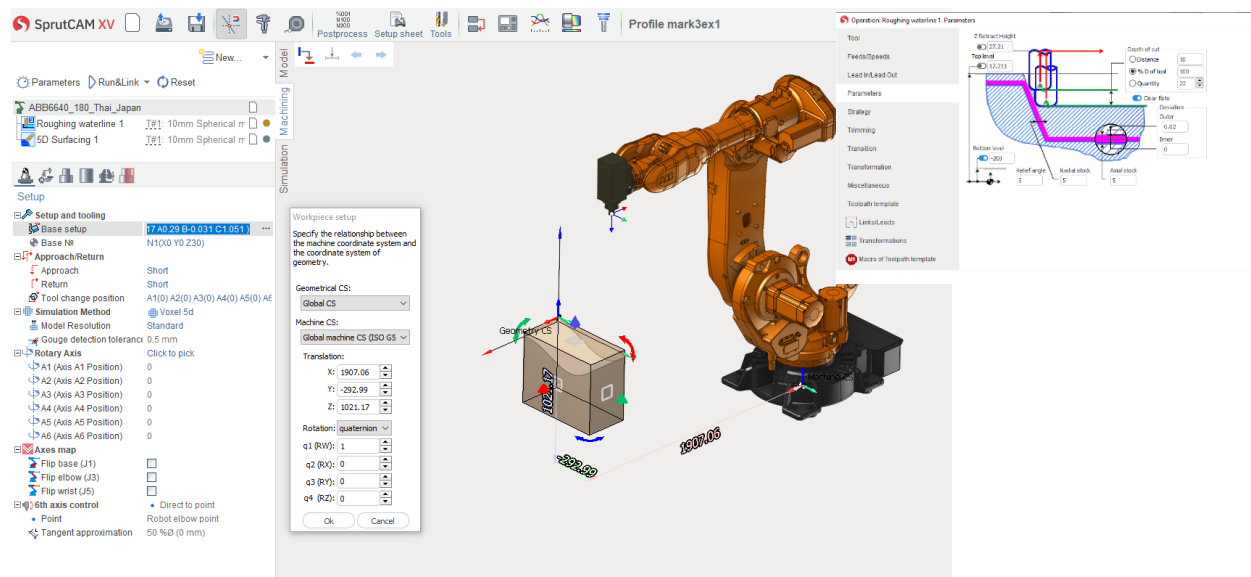
เฟลาซิปที่ใช้ในการกัดชิ้นงานใช้เซอร์โวมอเตอร์ติดตั้งที่ปลายแขนหุ่นยนต์ ยี่ห้อ HQD รุ่น GDF60-18Z/6.0 ความเร็วหมุนที่ใช้กัดงาน 8400 รอบต่อนาที ที่ความถี่ 140 Hz ดังแสดงในรูปที่ 2-a ใช้ดอกกัดเอ็นมิลแบบ 4 ฟัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร มีระยะกัตลึก 100 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่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



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

2.3 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับสร้างเส้นทางเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์

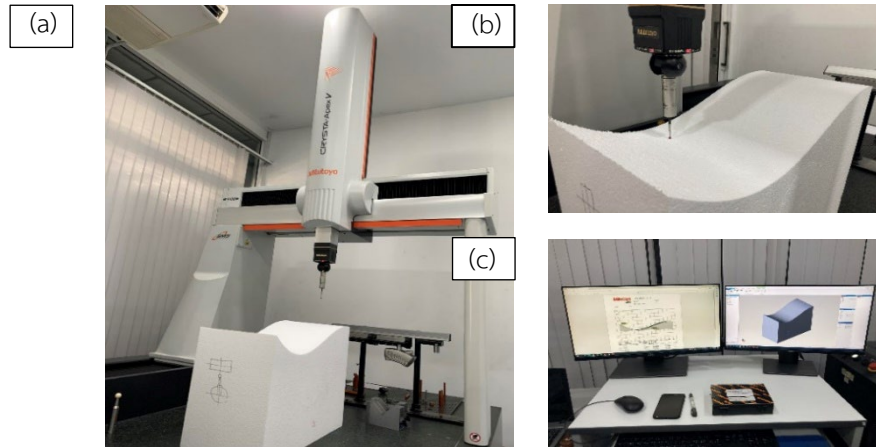
งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการผลิต (CAM) เพื่อสร้างเส้นทางเคลื่อนที่ให้กับแขนหุ่นยนต์ [10, 12] ในรูปแบบ NC Code ด้วยโปรแกรม SprutCAM XV ซึ่งสามารถวิเคราะห์โครงสร้างการเคลื่อนที่ของปลายหุ่นยนต์ได้อย่างแม่นยำ ตรงกับลักษณะงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 หน้าต่างควบคุมหุ่นยนต์โปรแกรม SprutCAM XV

2.4 การตรวจวัดขนาดและรูปทรงชิ้นงาน

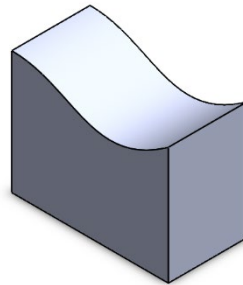
การตรวจวัดค่าความเที่ยงตรงของพื้นผิวชิ้นงานหลังการตัดเฉือนใช้เครื่องวัดแบบ 3 มิติ (CMM) ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น CRYSTA-Apex V 9108 ใช้การวัดแบบสัมผัสด้วยหัวโพรบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ความยาวก้าน 21 มิลลิเมตร ทำการสัมผัสบนพื้นผิวของชิ้นงานด้วยแรงสัมผัส 0.20 นิวตันต่อมิลลิเมตร ที่ความเร็ว 20 มิลลิเมตรต่อวินาที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



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

2.5 การทดลอง

ออกแบบชิ้นงานพื้นผิวโค้ง ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ (CAD) สำหรับการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์ตามมาตรฐาน The ASME Y14.5 GD&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 ความเร็วรอบของเพลาชับ; 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

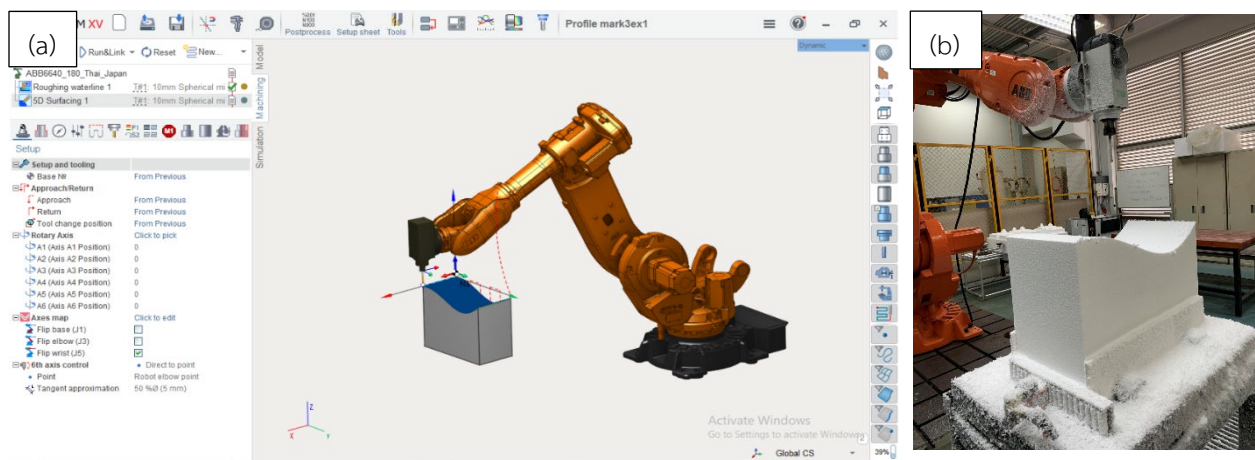
S_z คือ อัตราการป้อนต่อฟัน; มิลลิเมตร ต่อ ฟัน

f คือ อัตราการป้อน; มิลลิเมตร ต่อ นาที

N คือ ความเร็วรอบของเพลาขับ; รอบ ต่อ นาที

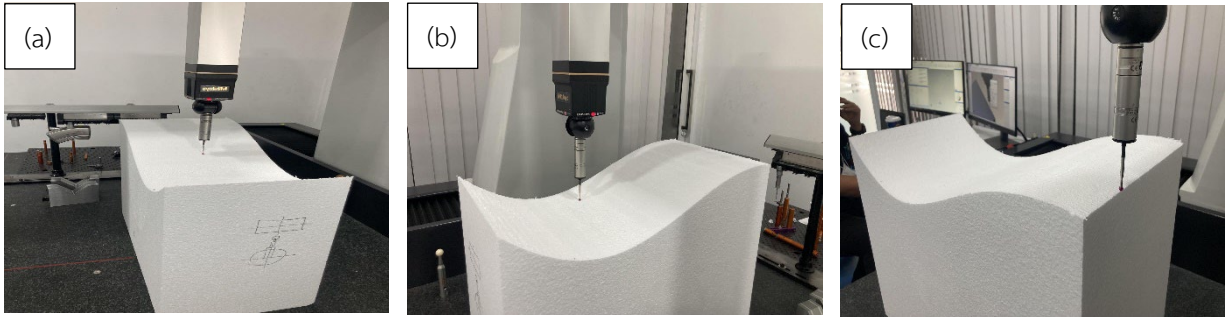
Z_c คือ จำนวนฟันที่ใช้ในการกัด

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

ตรวจวัดค่าความเที่ยงตรงของพื้นผิวชิ้นงานหลังการตัดเฉือนใช้เครื่องวัดแบบ 3 มิติ อ้างอิงจากพื้นผิวของโต๊ะวางชิ้นงาน เครื่องมือวัดหาระนาบด้านข้างของชิ้นงานทั้ง 4 เฟลน เพื่อหาขอบของชิ้นงาน ทำการแบ่งครึ่งชิ้นงานเพื่อหาจุดกึ่งกลาง และแบ่งเป็น 4 ส่วน เพื่อการวัดพื้นผิวของงานโดยเริ่มจากการวัดตรงกลางของชิ้นงานเป็นเส้นทางแรก เพิ่มเส้นทางจากจุดกึ่งกลางไปทางซ้ายห่าง 75 มิลลิเมตร เป็นเส้นทางที่สอง และ เส้นทางที่ 3 ห่างจากจุดกึ่งกลางไปทางขวาห่าง 75 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 7 นำเส้นทางที่ทำการวัดด้วยหัวโพรบทั้ง 3 เส้นทางเปรียบเทียบกับแบบ 3 มิติโดยการเปรียบเทียบแบบ 2 มิติเพื่อหาค่าความเที่ยงตรงของชิ้นงาน



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

3. ผลที่ได้จากการวิจัย

ชิ้นงานที่ถูกจัดวางในระนาบที่แตกต่างกันประกอบด้วย ทิศทางการวางชิ้นงานขนานแกน X และ แกน Y อ้างอิงกับโคออร์ดิเนตของหุ่นยนต์ มีผลต่อระยะการเคลื่อนที่แต่ละแกนของแขนหุ่นยนต์ส่งผลให้ได้ค่าผลการวัดพื้นผิวของชิ้นงานหลังการกัด มีระยะความเที่ยงตรงของขนาดที่ต่างกันเมื่อเทียบกับแบบงานจริง มีรายละเอียดผลการวัดดังนี้

แนวการวัด a-1 มีระยะคลาดเคลื่อนสูงสุด 4.23245 มิลลิเมตร และ ระยะคลาดเคลื่อนต่ำสุด 2.80427 มิลลิเมตร

แนวการวัด a-2 มีระยะคลาดเคลื่อนสูงสุด 4.42895 มิลลิเมตร และ ระยะคลาดเคลื่อนต่ำสุด 1.47251 มิลลิเมตร

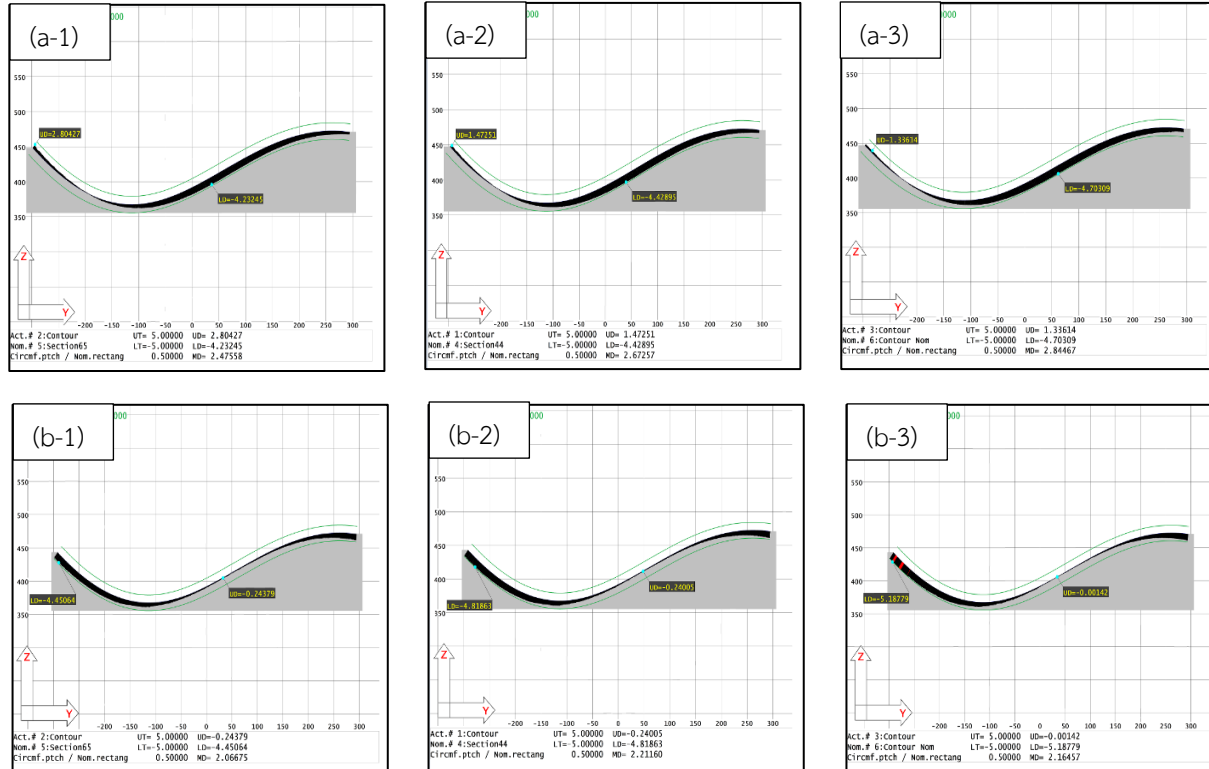
แนวการวัด a-3 มีระยะคลาดเคลื่อนสูงสุด 4.70309 มิลลิเมตร และ ระยะคลาดเคลื่อนต่ำสุด 1.33614 มิลลิเมตร

แนวการวัด b-1 มีระยะคลาดเคลื่อนสูงสุด 4.45064 มิลลิเมตร และ ระยะคลาดเคลื่อนต่ำสุด 0.24379 มิลลิเมตร

แนวการวัด b-2 มีระยะคลาดเคลื่อนสูงสุด 4.81863 มิลลิเมตร และ ระยะคลาดเคลื่อนต่ำสุด 0.24005 มิลลิเมตร

แนวการวัด b-3 มีระยะคลาดเคลื่อนสูงสุด 5.18779 มิลลิเมตร และ ระยะคลาดเคลื่อนต่ำสุด 0.00142 มิลลิเมตร

จากข้อมูลการวัดตามแนวความยาวของชิ้นงานพบว่าตำแหน่งส่วนปลายแขนที่ไกลจากฐานหุ่นยนต์จะมีค่าความคลาดเคลื่อน (Error) สูงกว่าระยะปลายแขนที่อยู่ใกล้ฐาน และหากวิเคราะห์ค่าการวัดตามแนวขวางของชิ้นงานพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนไม่แตกต่างกันทั้งการวางชิ้นงานขนานแกน X และ แกน Y อ้างอิงกับโคออร์ดิเนตของหุ่นยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 8

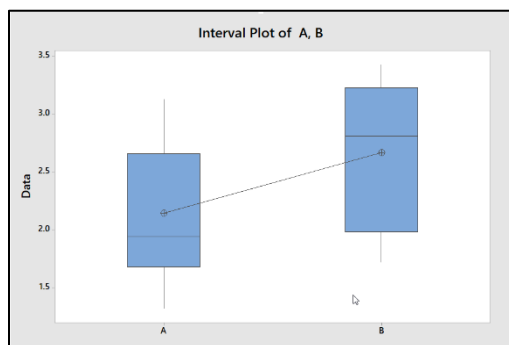


รูปที่ 8 (a) ทิศทางการวางชิ้นงานขนานแกน X อ้างอิงกับโคออร์ดิเนตของหุ่นยนต์ (a-1) ระยะที่ห่างจากกึ่งกลางทางซ้าย (a-2) ระยะกึ่งกลาง (a-3) ระยะห่างจากกึ่งกลางทางขวา (b) ทิศทางการวางชิ้นงานขนานแกน Y อ้างอิงกับโคออร์ดิเนตของหุ่นยนต์ (b-1) ระยะที่ห่างจากกึ่งกลางทางซ้าย (b-2) ระยะกึ่งกลาง (b-3) ระยะห่างจากกึ่งกลางทางขวา

เมื่อนำผลที่ได้จากการวัดของชิ้นงานทั้ง 2 ทิศทางมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าความแปรปรวนของข้อมูลด้วยโปรแกรม Minitab 17 โดยกำหนดนัยสำคัญทางสถิติ $\alpha = 0.05$ พบว่าค่า P-value = 0.077 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า α จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก [Do not Reject $H_0 \Rightarrow \mu_1 = \mu_2$] ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 [16] ซึ่งให้เห็นว่าทิศทางการจัดวางชิ้นงานทั้ง 2 แบบ ไม่มีผลต่อความเที่ยงตรงของขนาดชิ้นงานที่เกิดจากการกัดด้วยแขนหุ่นยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 9 และ รูปที่ 10

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 มีผลกระทบต่อขนาดมิติของชิ้นงาน เนื่องจากตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์เกิดจากวิถีการเคลื่อนที่ในปริภูมิสามมิติ ซึ่งเกี่ยวข้องกับตำแหน่งและการหมุนของแขนแต่ละแกน ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าชิ้นงานที่ถูกจัดวางในแนวขนานแกน Y อ้างอิงกับโคออร์ดิเนตของหุ่นยนต์ให้ผลการวัดที่มีความเที่ยงตรงของขนาดชิ้นงานหลังการกัดดีกว่า ผลการวัดด้วยเครื่องวัดขนาดแบบ 3 มิติ ระยะความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.1476 มิลลิเมตร และ 2.6643 มิลลิเมตร ในจัดวางแนวขนานแกน Y และจัดวางในแนวแกน X ตามลำดับ เมื่อเทียบกับขนาดกำหนดของแบบงาน ซึ่งตำแหน่งที่ไกลจากจุดฐานของหุ่นยนต์จะเกิดความคลาดเคลื่อนของระยะการกัดมากที่สุดเนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนสะสม (Error) แต่ละแกนของแขนหุ่นยนต์ที่มีระยะความแตกต่างในการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ ผลการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ มีค่า $p\text{-value} = 0.077$ 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*, 1st ed. Bangkok: Chulalongkorn University Press, 2016. (in Thai)
- [2] P. Pitakwatchara, *Basics of Robotics: Serial Robot Mechanics*, 1st ed. Bangkok: Chulalongkorn University Press, 2014. (in Thai)
- [3] F. Yin, S. Wu, H. Huang, C. Cui, and Q. Ji, "Effect of Machining Trajectory on Grinding Force of Complex-Shaped Stone by Robotic Manipulator," *Machines*, vol. 10, no. 9, pp. 1–12, Sep. 2022. doi:10.3390/machines10090787

- [4] S. B. Niku, *Introduction to Robotics: Analysis, Control, Applications*, 2nd ed. Wiley, 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,” *2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Jul. 2017. doi:10.1109/aim.2017.8014094
- [6] A. Lounghongkam, C. Raksiri, and P. 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. Silva, H. Yoshioka, H. Shinno, and J. Zhu, “Tool Orientation Angle Optimization for A Multi-Axis Robotic Milling System,” *International Journal of Automation Technology*, vol. 13, no. 5, pp. 574–582, Sep. 2019. doi:10.20965/ijat.2019.p0574
- [8] J. Peng, Y. Ding, G. Zhang, and H. Ding, “Smoothness-Oriented Path Optimization for Robotic Milling Processes,” *Science China Technological Sciences*, vol. 63, no. 9, pp. 1751–1763, May 2020. doi:10.1007/s11431-019-1529-x
- [9] X. Qu, M. Wan, C.-J. Shen, and W.-H. Zhang, “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, p. 102580, Oct. 2023. doi:10.1016/j.rcim.2023.102580
- [10] L. Cen and S. N. Melkote, “Effect of Robot Dynamics on The Machining Forces in Robotic Milling,” *Procedia Manufacturing*, vol. 10, pp. 486–496, 2017. doi:10.1016/j.promfg.2017.07.034
- [11] S. Mejri, V. Gagnol, T.-P. Le, L. Sabourin, P. Ray and P. Paultre, “Dynamic characterization of machining robot and Stability Analysis,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 82, no. 1–4, pp. 351–359, Jun. 2015. doi:10.1007/s00170-015-7336-3
- [12] T. Narisa, *An Application of Laser Tracker for ISO 9283 Six Axis Robot Accuracy and Precision Test Method*, 1st ed. Bangkok: Kasetsart University, 2019. (in Thai)
- [13] Y. Chen, Y. Lu, and Y. Ding, “Toolpath Generation for Robotic Flank Milling via Smoothness and Stiffness Optimization,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 85, p. 102640, Feb. 2024. doi:10.1016/j.rcim.2023.102640
- [14] G. Henzold, *Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection: A Handbook for Geometrical Product Specification Using ISO and ASME Standards*, 2nd ed. Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2006.
- [15] H. A.-G. El-Hofy, *Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes*, 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.

- [16] P. Suthat-Na-Ayutthaya and P. Luengpaiboon, *Engineering Statistics (Revised Version)*, Bangkok: Top Publishing, 2016. (in Thai)