

การปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสระโปกเทียมด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดา



นายวาริช ประสงค์เจริญ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SPHERICITY IMPROVEMENT OF THE FEMORAL HEAD COMPONENT IN HIP PROSTHESIS
USING A CONVENTIONAL CNC LATHE

Mr. Warich Prasongcharoen



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมด้วย เครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดา
โดย	นายวาริช ประสงค์เจริญ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร. ชัญญาพันธ์ วิรุฬห์ศรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร. ชัญญาพันธ์ วิรุฬห์ศรี)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. ไชยณรงค์ จักรธรานนท์)

วาริช ประสงค์เจริญ : การปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดา (SPHERICITY IMPROVEMENT OF THE FEMORAL HEAD COMPONENT IN HIP PROSTHESIS USING A CONVENTIONAL CNC LATHE) อ.ที่
 ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร. ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ. ดร.
 ชัญญาพันธ์ วิรุฬห์ศรี, 136 หน้า.

การผ่าตัดเปลี่ยนข้อต่อสะโพกเทียม (total hip) มีค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากข้อต่อสะโพกเทียมมีราคาแพง ส่วนหนึ่งมาจากการใช้เครื่องจักรที่มีราคาสูงมากในการปรับความเป็นทรงกลม (sphericity) หัวสะโพกเทียม (femoral head) หลังจากกระบวนการกลึง ตามมาตรฐาน ASTM F2033 หัวสะโพกเทียมที่ใช้กับเบ้าพลาสติก (acetabular cup) ต้องมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลม (out-of-sphericity) ไม่เกิน 10 ไมโครเมตร และไม่เกิน 5 ไมโครเมตรสำหรับหัวสะโพกเทียมที่ใช้กับเบ้าโลหะ จากการทดลองกลึงหัวสะโพกเทียมด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดา (conventional CNC lathe) พบว่า ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมมีค่าเท่ากับ 11.13 ± 0.60 ไมโครเมตร (ที่ระดับความมั่นใจ 95%) ซึ่งไม่เป็นไปตามมาตรฐาน งานวิจัยนี้จึงออกแบบและผลิตฟาสต์ทูลเซอร์โว (fast tool servo) ที่มีความแม่นยำสูงและมีสมรรถนะเพียงพอสำหรับการใช้ชุดเซอร์โวมอเตอร์ที่คลาดเคลื่อนเพื่อปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดา จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า สามารถใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยและโปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนสำหรับการอ้างอิงรัศมีที่คลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นได้ หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลม พบว่า การใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนสามารถผลิตหัวสะโพกเทียมที่มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมเท่ากับ 6.69 ± 0.67 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของหัวสะโพกเทียมที่ใช้กับเบ้าพลาสติก และการใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนสามารถผลิตหัวสะโพกเทียมที่มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมเท่ากับ 4.04 ± 0.54 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของหัวสะโพกเทียมที่ใช้กับเบ้าพลาสติกและเบ้าโลหะ ดังนั้นการปรับปรุงความเป็นทรงกลมด้วยฟาสต์ทูลเซอร์โวนเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดาจึงสามารถลดต้นทุนและขั้นตอนการผลิตหัวสะโพกเทียมที่มีความเป็นทรงกลมตามมาตรฐาน ASTM F2033 ได้

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5470370421 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS:

WARICH PRASONGCHAROEN: SPHERICITY IMPROVEMENT OF THE FEMORAL HEAD COMPONENT IN HIP PROSTHESIS USING A CONVENTIONAL CNC LATHE. ADVISOR: PAIRAT TANGPORNPRASERT, Ph.D., CO-ADVISOR: CHANYAPHAN VIRULSRI, Ph.D., 136 pp.

Following ASTM F2033 standard, an out-of-sphericity of a metal femoral head for plastic and metal acetabular cup must not exceed 10 micron and 5 micron respectively. In general manufacturing, a raw material is turned to be near-net shape. Then, the workpiece is done by a high-priced machine to achieve the standard. Lead time and machining cost could be reduced if the femoral head can be done on a conventional CNC lathe. A preliminary experiment is done using conventional CNC lathe. A roundness profile is measured by a roundness tester, ACCRETECH RONDCOM60A. The CNC lathe gives spheres with 11.13 ± 0.60 micron out-of-sphericity (95% confidence) which exceeds the standard value. This research designs and manufactures a highly accurate and high performance fast tool servo, then integrates it on the CNC lathe in order to improve sphericity. Many samples are collected for define roundness characteristics and reference roundness profile. A compensation movement of fast tool servo in current cutting process uses two types of reference profile; average profile and preceding profile. By using an average profile for compensation, the integrated machine gives spheres with 6.69 ± 0.67 micron out-of-sphericity. Compensation using preceding profile gives spheres with 4.04 ± 0.54 micron out-of-sphericity. In conclusion, the integrated machine, conventional CNC lathe with fast tool servo, is capable of producing spheres following ASTM F2033 standard.

Department:	Mechanical Engineering	Student's Signature
Field of Study:	Mechanical Engineering	Advisor's Signature
Academic Year:	2014	Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.ชญญาพันธ์ วิรุฬห์ศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้โอกาสสำคัญในการทำวิทยานิพนธ์นี้ รวมถึงการให้ความกรุณาถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำ และประสบการณ์ต่างๆ ที่มีคุณค่ายิ่ง อันเป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้าทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วง

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ ที่ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ไชยณรงค์ จักรธรานนท์ ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้ง อาจารย์ทุกท่านที่สละเวลาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนมีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณ นายปริญญาเอก ร่มไทรรัตน์ นิสิตระดับดุขฎิบัณฑิต ที่คอยให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ท้ายสุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาในทุกด้านมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา คุณค่าและประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทั้งหมด ผู้วิจัยขอมอบแต่บิดามารดาและครอบครัว ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่เกี่ยวข้องและสนับสนุนการศึกษาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฑ
สารบัญรูป.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3. ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5. ขั้นตอนในการทำงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรม.....	5
2.1. มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการผลิต.....	5
2.1.1. มาตรฐาน ASTM standard F2033 “standard specification for total hip joint prosthesis and hip endoprosthesis bearing surfaces made of metallic, ceramic, and polymeric materials”.....	5
2.1.2. มาตรฐาน ISO standard 4291 [10] “methods for assessment of departure from roundness - measurement of variations in radius”.....	5
2.2. การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.2.1. งานวิจัย “error analysis and in-process compensation on cup wheel grinding of hard sphere” ของ Dongdong Lin, Mingming Xu, Chenjun Wei, Dejin Hu และ Liming Xu [6].....	6

2.2.2. การใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โว (fast tool servo) เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการกลึงบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดา (conventional CNC lathe).....	10
2.2.3. งานวิจัย “waviness compensation of precision machining by piezoelectric micro cutting device” ของ Jeong-Du Kim และ Dong-Sik Kim [9]	13
2.3. สิ่งที่ได้จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 การทดลองศึกษาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมที่กลึงได้จากเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดาเบื้องต้น.....	17
3.1. แนวทางการทดลองศึกษา	17
3.2. การจัดเตรียมการทดลอง	17
3.2.1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง.....	17
3.2.1.1. เครื่องกลึงซีเอ็นซี	17
3.2.1.2. เม็ดมีด (insert).....	17
3.2.1.3. เครื่องวัดความกลม (roundness measuring machine).....	18
3.2.2. วัสดุที่ใช้กลึงหัวสะพานเทียม.....	21
3.2.3. ขนาดและรูปร่างของหัวสะพานเทียม	21
3.2.4. ข้อกำหนดในการกลึงหัวสะพานเทียม.....	22
3.2.4.1. ขั้นตอนการกลึงและภาวะการตัด (cutting condition).....	22
3.2.4.2. การจับชิ้นงานก่อนกลึง	23
3.3. วิธีการทดลอง	23
3.4. ขั้นตอนการทดลอง	23
3.5. ผลการทดลองและการอภิปราย	26
3.6. สรุปผลการทดลอง.....	34
3.7. แนวทางการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียม	34

บทที่ 4 การออกแบบและผลิตฟาสต์ทูลเซอร์โว.....	36
4.1. แนวทางการออกแบบ.....	36
4.2. ข้อกำหนดการออกแบบ.....	38
4.2.1. ข้อกำหนดการเลือกรุ่นเพียโซอิเล็กทริกและเครื่องขยายสัญญาณ.....	38
4.2.2. ข้อกำหนดการออกแบบระบบนำทาง.....	39
4.3. รายละเอียดการเลือกรุ่นของเพียโซอิเล็กทริกและเครื่องขยายสัญญาณ.....	39
4.4. การออกแบบระบบนำทาง.....	42
4.5. การออกแบบเพื่อการประกอบฟาสต์ทูลเซอร์โว.....	51
4.6. การผลิตและติดตั้งฟาสต์ทูลเซอร์โว.....	57
4.6.1. การผลิตระบบนำทาง.....	57
4.6.2. การผลิตตัวเชื่อมต่อ.....	58
4.6.3. การผลิตแหวนรองวางแนว.....	59
4.6.4. การติดตั้งฟาสต์ทูลเซอร์โวบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี.....	59
บทที่ 5 การทดสอบสมรรถนะของฟาสต์ทูลเซอร์โว.....	61
5.1. จุดประสงค์ของการทดสอบสมรรถนะของฟาสต์ทูลเซอร์โว.....	61
5.2. การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบสมรรถนะ.....	61
5.2.1. ฟาสต์ทูลเซอร์โว.....	61
5.2.2. ชุดเซนเซอร์วัดระยะทาง.....	63
5.2.3. คอมพิวเตอร์.....	66
5.2.4. สรุปการเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะ.....	66
5.2.5. การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบสมรรถนะ.....	68
5.3. การทดสอบระยะขับเคลื่อนมีดกลึงสูงสุด.....	69
5.3.1. วิธีการทดสอบ.....	69

5.3.2. ขั้นตอนการทดสอบ	69
5.3.3. ผลการทดสอบและการอภิปราย	69
5.4. การทดสอบความละเอียดในการขับเคลื่อนมีดกลิ้ง	70
5.4.1. วิธีการทดสอบ	70
5.4.2. ขั้นตอนการทดสอบ	71
5.4.3. ผลการทดสอบและการอภิปราย	71
5.5. การทดสอบการตอบสนองในภาวะชั่วคราว	72
5.5.1 วิธีการทดสอบ	72
5.5.2. ขั้นตอนการทดสอบ	73
5.5.3. ผลการทดสอบและการอภิปราย	73
5.6. การทดสอบการติดตามตำแหน่ง	73
5.6.1. วิธีการทดสอบ	73
5.6.2. ขั้นตอนการทดสอบ	75
5.6.3. ผลการทดสอบและการอภิปราย	75
5.7. สรุปผลการทดสอบสมรรถนะ	78
5.8. การสอบเทียบฟาสต์ทูลเซอร์โว.....	78
5.8.1. แนวทางการสอบเทียบ.....	78
5.8.2. วิธีการสอบเทียบ.....	79
5.8.3. ขั้นตอนการสอบเทียบ.....	79
5.8.4. ผลการสอบเทียบ	80
บทที่ 6 การปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมด้วยฟาสต์ทูลเซอร์โว.....	81
6.1. แนวคิดในการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมด้วยฟาสต์ทูลเซอร์โว	81
6.2. ขั้นตอนการดำเนินการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียม	84

6.3. การทดลองกลึงหัวสะโปกเทียมด้วยวิธีปกติหลังจากติดตั้งฟาสต์ทูลเซอร์ไวโว	84
6.3.1. จุดประสงค์การทดลอง.....	84
6.3.2. การเตรียมการทดลอง	84
6.3.2.1. การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	84
6.3.2.2. วัสดุที่ใช้กลึงหัวสะโปกเทียม	84
6.3.2.3. ขนาดและรูปร่างของหัวสะโปกเทียม.....	85
6.3.2.4. ข้อกำหนดในการกลึงหัวสะโปกเทียม	85
6.3.3. วิธีการทดลอง.....	85
6.3.4. ขั้นตอนการทดลอง.....	85
6.3.5. ผลการทดลอง	85
6.3.6. การอภิปรายผลการทดลอง	88
6.3.7. สรุปผลการทดลอง	89
6.4. การหาโปรไฟล์ความกลมตัวแทนที่เหมาะสม.....	89
6.4.1. จุดประสงค์ของการหาโปรไฟล์ความกลมตัวแทนที่เหมาะสม.....	89
6.4.2. แนวทางการเลือกใช้โปรไฟล์ความกลมตัวแทน.....	89
6.4.3. แนวทางการประเมินความเหมาะสมของโปรไฟล์ความกลมตัวแทน.....	91
6.4.4. การเตรียมการประเมินความเหมาะสมของโปรไฟล์ความกลมตัวแทน	92
6.4.4.1. สมมุติฐานที่ใช้ในการประเมินความเหมาะสมของโปรไฟล์ความกลม ตัวแทน	92
6.4.4.2. การคำนวณหาโปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยและค่าสถิติที่เกี่ยวข้อง	93
6.4.4.3. การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมเฉลี่ยและค่าสถิติ ต่างๆที่เกี่ยวข้อง	95
6.4.5. การหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติเมื่อใช้โปรไฟล์ ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน	96

6.4.5.1. แนวทางการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติ	96
6.4.5.2. วิธีการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติ	97
6.4.5.3. ขั้นตอนการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติ	98
6.4.5.4. ผลการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติและ การอภิปราย.....	98
6.4.6. การหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติเมื่อใช้โปรไฟล์ ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน	99
6.4.6.1. แนวทางการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติ	99
6.4.6.2. วิธีการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติ	101
6.4.6.3. ขั้นตอนการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติ ...	103
6.4.6.4. ผลการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติและ การอภิปราย.....	104
6.4.7. ผลการหาโปรไฟล์ความกลมตัวแทนที่เหมาะสมและการอภิปราย	106
6.4.8. สรุปผลการหาโปรไฟล์ความกลมตัวแทนที่เหมาะสม.....	108
6.5. การจัดเตรียมการทดลองปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมด้วยฟาสต์ทูล เซอร์โว	108
6.5.1. การจัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	108
6.5.2. วัสดุที่ใช้กลึงหัวสะโพกเทียม.....	108
6.5.3. ขนาดและรูปร่างของหัวสะโพกเทียม	108
6.5.4. ข้อกำหนดในการกลึงหัวสะโพกเทียม.....	109
6.5.5. การจัดเตรียมโปรไฟล์ความกลมตัวแทนเพื่อนำไปใช้ร่วมกับฟาสต์ทูลเซอร์โว	109
6.5.5.1. การหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งมุมกับเวลา	109
6.5.5.2. การแปลงโปรไฟล์ความกลมตัวแทนให้อยู่บนพิกัดคาร์ทีเซียน.....	113
6.5.5.3. การสร้างสัญญาณควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์โว	115

6.6. การทดลองปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ย เป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน	115
6.6.1. วิธีการทดลอง.....	115
6.6.2. ขั้นตอนการทดลอง.....	115
6.6.3. ผลการทดลอง	116
6.6.4. การอภิปราย.....	116
6.7. การทดลองปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับ ก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน.....	118
6.7.1. วิธีการทดลอง.....	118
6.7.2. ขั้นตอนการทดลอง.....	119
6.7.3. ผลการทดลอง	119
6.7.4. การอภิปราย.....	120
บทที่ 7 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	124
7.1. สรุปผลงานวิจัย	124
7.2. ข้อเสนอแนะ.....	125
รายการอ้างอิง.....	126
ภาคผนวก	128
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	136

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องวัดความกลมยี่ห้อ ACCRETECH รุ่น RONDCOM60A	19
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลการจัดเตรียมเครื่องวัดความกลมยี่ห้อ ACCRETECH รุ่น RONDCOM60A สำหรับการทดลอง	20
ตารางที่ 3.3 ความคลาดเคลื่อนจากความกลมเฉลี่ยในระนาบ x-z และ x-y ของหัวสะพานเทียมน	32
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลจำเพาะของเพียโซอิเล็กทริกยี่ห้อ PI รุ่น P-845.30	40
ตารางที่ 4.2 สรุปรูปการออกแบบระบบนำทาง	50
ตารางที่ 5.1 อินพุตและเอาต์พุตของเพียโซอิเล็กทริกและเครื่องขยายสัญญาณ	63
ตารางที่ 5.2 ข้อมูลจำเพาะของชุดเซนเซอร์วัดระยะทางแบบเลเซอร์ยี่ห้อ KEYENCE รุ่น LK-G15 ...	64
ตารางที่ 5.3 ข้อมูลการจัดเตรียมชุดเซนเซอร์วัดระยะทางแบบเลเซอร์ของ KEYENCE รุ่น LK- G15 สำหรับการทดสอบ	64
ตารางที่ 5.4 ข้อมูลจำเพาะของตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกและแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ของ National Instrument (NI) รุ่น NI PCI-6221	67
ตารางที่ 5.5 ย่านของอินพุตและเอาต์พุตของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะ	67
ตารางที่ 5.6 ความคลาดเคลื่อนในการติดตามตำแหน่งที่เกิดขึ้นสูงสุด เมื่อสัญญาณจุดปรับตั้งเป็น ฟังก์ชันต่างๆ	77
ตารางที่ 5.7 สรุปผลทดสอบสมรรถนะของฟาสต์ทูลเซอร์โว	77
ตารางที่ 6.1 ผลการจัดกลุ่มโปรไฟล์ความกลมด้วยวิธี k-means	89
ตารางที่ 6.2 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมที่สามารถเกิดขึ้นได้ของหัวสะพานเทียมน หลังจากการจำลองการปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็น โปรไฟล์ความกลมตัวแทน ที่แต่ละค่า m ที่ระดับความมั่นใจ 95%	105
ตารางที่ 6.3 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ของหัวสะพาน เทียมน ที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลม ที่ระดับความมั่นใจ 95%	107
ตารางที่ 6.4 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมเฉลี่ยของหัวสะพานเทียมนที่ได้หลังจากการ ปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมตัวแทนในแต่ละแนวทาง	123

ตารางที่ 6.5 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมที่เป็น ผลิตภัณฑ์ทางการค้ากับหัวสะโพกเทียมที่ได้จากงานวิจัย.....	123
ตารางที่ ก.1 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมที่กลึงด้วยวิธีปกติ ก่อน ละเว้นบริเวณที่ภาวะการตัดไม่เหมาะสม.....	129
ตารางที่ ก.2 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมที่กลึงด้วยวิธีปกติ หลัง ละเว้นบริเวณที่ภาวะการตัดไม่เหมาะสม.....	130
ตารางที่ ก.3 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมที่กลึงด้วยวิธีปกติ หลังจากติดตั้งฟาสต์ทูลเซอร์โว (เม็ดมีดที่ 1).....	131
ตารางที่ ก.4 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมที่กลึงด้วยวิธีปกติ หลังจากติดตั้งฟาสต์ทูลเซอร์โว (เม็ดมีดที่ 2).....	133
ตารางที่ ก.5 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการ ปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน	134
ตารางที่ ก.6 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการ ปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน	135

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 ข้อต่อสะโพกเทียม	1
รูปที่ 2.1 การวัดความคลาดเคลื่อนจากความกลมด้วยวิธี MZC [11]	6
รูปที่ 2.2 แผนภาพเครื่องเจียรไนทรงกลมแบบธรรมดาแบบใช้ cup wheel [6]	8
รูปที่ 2.3 ค่าความคลาดเคลื่อนจากความไม่เป็นทรงกลมของชิ้นงานทรงกลม ที่ได้จากการเจียรไนด้วยเครื่องเจียรไนทรงกลมแบบธรรมดา [6]	8
รูปที่ 2.4 โพรไฟล์ของขนาดรัศมีของทรงกลมที่ได้จากการเจียรไน ด้วยเครื่องเจียรไนทรงกลมแบบธรรมดา [6]	9
รูปที่ 2.5 เครื่องเจียรไนทรงกลมที่ปรับปรุงให้ปรับระยะกินลึกที่ตำแหน่งต่างๆได้ [6]	9
รูปที่ 2.6 ลักษณะการปรับระยะกินลึกที่ตำแหน่งต่างๆของเครื่องเจียรไนทรงกลมที่ปรับปรุงแล้ว [6]	10
รูปที่ 2.7 ค่าความคลาดเคลื่อนจากความไม่เป็นทรงกลมของชิ้นงานทรงกลมหลังจากที่เจียรไนด้วยเครื่องเจียรไนทรงกลมที่ปรับระยะกินลึกที่ตำแหน่งต่างๆได้ [6]	10
รูปที่ 2.8 แผนภาพของระบบฟาสต์ทูลเซอร์โว [8]	12
รูปที่ 2.9 ลักษณะการติดตั้งฟาสต์ทูลเซอร์โวบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี [8]	12
รูปที่ 2.10 โพรไฟล์ในระดับไมโครเมตรที่สามารถกลึงได้ด้วยฟาสต์ทูลเซอร์โว [5]	13
รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงการชดเชยความเป็นคลื่นบนชิ้นงานด้วยฟาสต์ทูลเซอร์โว บนเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบความแม่นยำสูง [9]	14
รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบค่าความเป็นคลื่นบนผิวชิ้นงานเมื่อกลึงด้วยวิธีปกติ กับกลึงโดยใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวชดเชยความคลาดเคลื่อน [9]	15
รูปที่ 3.1 เครื่องกลึงซีเอ็นซียี่ห้อ OKUMA รุ่น LB3000EX	20
รูปที่ 3.2 เม็ดมีด 25° rhombic shape insert ยี่ห้อ TUNGALOY	21
รูปที่ 3.3 เครื่องวัดความกลมยี่ห้อ ACCRETECH รุ่น RONDCOM 60A	21
รูปที่ 3.4 ขนาดและรูปร่างของหัวสะโพกเทียม	22
รูปที่ 3.5 การจับชิ้นงาน	24

รูปที่ 3.6	กลึงหยาบด้านหน้าหัวสะพานเทียม.....	24
รูปที่ 3.7	กลึงหยาบแบบเซาะร่องบริเวณ undercut	24
รูปที่ 3.8	กลึงละเอียดหัวสะพานเทียม	25
รูปที่ 3.9	หัวสะพานเทียมที่ได้จากการกลึง	25
รูปที่ 3.10	การวัดความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียม	25
รูปที่ 3.11	ระนาบ x-z ของเครื่องกลึงซีเอ็นซี	26
รูปที่ 3.12	ระนาบ x-y ของเครื่องกลึงซีเอ็นซี	26
รูปที่ 3.13	การวัดความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ x-z.....	27
รูปที่ 3.14	การวัดความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ x-y.....	27
รูปที่ 3.15	ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมทั้ง 25 ลูก	28
รูปที่ 3.16	โปรไฟล์ความกลมในระนาบ x-z ของหัวสะพานเทียมทั้ง 25 ลูก ก่อนละเว้นบริเวณที่ ภาวะการตัดไม่เหมาะสม	30
รูปที่ 3.17	โปรไฟล์ความกลมในระนาบ x-z ของหัวสะพานเทียมทั้ง 25 ลูก หลังจากละเว้น บริเวณที่ภาวะการตัดไม่เหมาะสม	30
รูปที่ 3.18	ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมทั้ง 25 ลูก หลังจากละ เว้นบริเวณที่ภาวะการตัดไม่เหมาะสม.....	31
รูปที่ 3.19	กราฟเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ x-z และ x-y.....	32
รูปที่ 3.20	เปรียบเทียบโปรไฟล์ความกลมในระนาบ x-z และ x-y.....	32
รูปที่ 4.1	ตัวขับเคลื่อนและระบบนำทาง	37
รูปที่ 4.2	flexure แบบขนานและสมมาตร [5].....	37
รูปที่ 4.3	flexure แบบสี่เหลี่ยมด้านขนาน	38
รูปที่ 4.4	แผนภาพคุณสมบัติของเครื่องขยายสัญญาณยี่ห้อ PI รุ่น E-625.....	41
รูปที่ 4.5	แผนภาพบล็อกระบบควบคุมแบบป้อนกลับแบบพีไอภายในเครื่องขยายสัญญาณ	41
รูปที่ 4.6	รูปร่างและขนาดของ flexure ที่ออกแบบ.....	43

รูปที่ 4.7 ขนาดและรูปร่างของระบบนำทางที่ออกแบบ และการอ้างอิงทิศทางของการมองภาพ ฉาย	44
รูปที่ 4.8 ส่วนต่างๆ ของระบบนำทาง	44
รูปที่ 4.9 การทดสอบความแข็งตึงของ flexure ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	46
รูปที่ 4.10 รูปร่างของโหมดการสั่นโหมดแรกจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	47
รูปที่ 4.11 แผนภาพวัตถุอิสระของแรงที่กระทำต่อระบบนำทาง	50
รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ความเค้นวอนมิสที่เกิดขึ้นสูงสุดขณะใช้งาน ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิ เมนต์	51
รูปที่ 4.13 ชิ้นส่วนของฟาสต์ทูลเซอร์โรว์ที่มีผลต่อการวางแนวของมีดกลึง	52
รูปที่ 4.14 ตัวเชื่อมต่อที่ด้านทุกด้านตั้งฉากกัน	52
รูปที่ 4.15 ระบบนำทางที่ช่องใส่มีดกลึงขนานกับช่องใส่ตัวเชื่อมต่อ	52
รูปที่ 4.16 ชิ้นส่วนของฟาสต์ทูลเซอร์โรว์	53
รูปที่ 4.17 การประกอบส่วนเชื่อมต่อเข้ากับป้อมมีดบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี	54
รูปที่ 4.18 การประกอบระบบนำทางเข้ากับตัวเชื่อมต่อ	54
รูปที่ 4.19 การขันสกรูฟรีโหลตเพื่อขยายช่องสำหรับใส่เพียโซอิเล็กทริก	55
รูปที่ 4.20 การประกอบเพียโซอิเล็กทริกกับแหวนรองวางแนว	55
รูปที่ 4.21 การคลายสกรูฟรีโหลตออกเพื่อฟรีโหลตเพียโซอิเล็กทริกด้วยแรงสปริงจาก flexure	55
รูปที่ 4.22 การประกอบมีดกลึงโดยใช้เซทสกรู	56
รูปที่ 4.23 ฟาสต์ทูลเซอร์โรว์ที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว	56
รูปที่ 4.24 การขึ้นรูประบบนำทางด้วยเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ซีเอ็นซี	57
รูปที่ 4.25 ระบบนำทางหลังจากขึ้นรูปด้วยเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ซีเอ็นซี	58
รูปที่ 4.26 ระบบนำทางหลังจากผลิตเสร็จ	58
รูปที่ 4.27 ตัวเชื่อมต่อหลังจากผลิต	59
รูปที่ 4.28 ฟาสต์ทูลเซอร์โรว์ที่ติดตั้งบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี	60

รูปที่ 5.1 แผนภาพการทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของฟาสต์ทูลเซอร์ไว	62
รูปที่ 5.2 แผนภาพบล็อกการควบคุมตำแหน่งของฟาสต์ทูลเซอร์ไว	63
รูปที่ 5.3 แผนภาพการรับและส่งข้อมูลของเซนเซอร์วัดระยะทาง	64
รูปที่ 5.4 แผนภาพการรับและส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์แต่ละส่วน ในการทดสอบสมรรถนะของฟาสต์ทูลเซอร์ไว	67
รูปที่ 5.5 แทนวัตถุ	68
รูปที่ 5.6 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของฟาสต์ทูลเซอร์ไว	69
รูปที่ 5.7 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบขั้นบันไดที่ใช้ทดสอบความละเอียดในการขับเคลื่อนมีดกลึง	70
รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบความละเอียดในการขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์ไว	71
รูปที่ 5.9 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบขั้นบันไดขนาด 5 โวลต์ที่ใช้ทดสอบผลตอบสนองในภาวะชั่วคราว	72
รูปที่ 5.10 ผลตอบสนองในภาวะชั่วคราวของการขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์ไว	74
รูปที่ 5.11 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าฟังก์ชันแรมป์	74
รูปที่ 5.12 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าฟังก์ชันพาราโบลา	74
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงการติดตามตำแหน่งของฟาสต์ทูลเซอร์ไว เมื่อสัญญาณจุดปรับตั้งเป็นฟังก์ชันแรมป์	76
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงการติดตามตำแหน่งของฟาสต์ทูลเซอร์ไว เมื่อสัญญาณจุดปรับตั้งเป็นฟังก์ชันพาราโบลา	76
รูปที่ 5.15 flexure ส่วนบนและส่วนล่างของระบบนำทาง	77
รูปที่ 5.16 เส้นโค้งการสอบเทียบ	80
รูปที่ 6.1 โพรไฟล์ความกลม	81
รูปที่ 6.2 การปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะเกียวเทียมด้วยฟาสต์ทูลเซอร์ไว	82
รูปที่ 6.3 โพรไฟล์ความกลมของหัวสะเกียวเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนของโพรไฟล์ความกลมตัวแทนกับโพรไฟล์ความกลมปกติ	83
รูปที่ 6.4 แผนภาพการดำเนินการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะเกียวเทียม	84

รูปที่ 6.5 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมทั้ง 70 ลูก.....	86
รูปที่ 6.6 โพรไฟล์ความกลมของหัวสะโพกเทียมทั้ง 70 ลูกที่กลึงด้วยวิธีปกติ หลังจากติดตั้งฟาสต์ ทูลเซอร์โว.....	87
รูปที่ 6.7 รูปแบบของโพรไฟล์ความกลมที่เกิดขึ้นจากการกลึงทั้ง 2 เม็ดมิต.....	87
รูปที่ 6.8 แผนภาพแสดงการใช้โพรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโพรไฟล์ความกลมตัวแทน	91
รูปที่ 6.9 การสร้างโพรไฟล์ความกลมที่อยู่บนด้าน +x เพียงด้านเดียว	93
รูปที่ 6.10 ตารางแสดงการคำนวณโพรไฟล์ความกลมเฉลี่ยและค่าสถิติต่างๆ.....	95
รูปที่ 6.11 แนวทางการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติ เมื่อใช้โพร ไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโพรไฟล์ความกลมตัวแทน	96
รูปที่ 6.12 โพรไฟล์ความกลมเฉลี่ย	99
รูปที่ 6.13 แผนภาพแสดงการจำลองการปรับปรุงความเป็นทรงกลม โดยใช้โพรไฟล์ความกลม ลำดับก่อนหน้าเป็นโพรไฟล์ความกลมตัวแทน.....	101
รูปที่ 6.14 การแบ่งช่วงในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งมุมกับเวลา	110
รูปที่ 6.15 การชดเชยระยะคลาดเคลื่อนด้วยฟาสต์ทูลเซอร์โว.....	113
รูปที่ 6.16 การแปลงโพรไฟล์ความกลมตัวแทนให้อยู่บนพิกัดคาร์ทีเซียน	113
รูปที่ 6.17 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการ ปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โพรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโพรไฟล์ความกลมตัวแทน	117
รูปที่ 6.18 โพรไฟล์ความกลมของหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดย ใช้โพรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโพรไฟล์ความกลมตัวแทน	117
รูปที่ 6.19 แผนภาพแสดงวิธีการทดลองปรับปรุงความเป็นทรงกลม โดยใช้โพรไฟล์ความกลม ลำดับก่อนหน้าเป็นโพรไฟล์ความกลมตัวแทน.....	119
รูปที่ 6.20 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการ ปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โพรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโพรไฟล์ความกลมตัวแทน	120
รูปที่ 6.21 โพรไฟล์ความกลมของหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลม โดยใช้โพรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโพรไฟล์ความกลมตัวแทน.....	120

รูปที่ 6.22 กราฟแสดงการเพิ่มขึ้นของความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลม ของหัวสะโพก เทียมตามลำดับการกลิ้ง.....	122
รูปที่ 6.23 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียม หลังจากการ ปรับปรุงความเป็นทรงกลมเมื่อ $m=1$	123



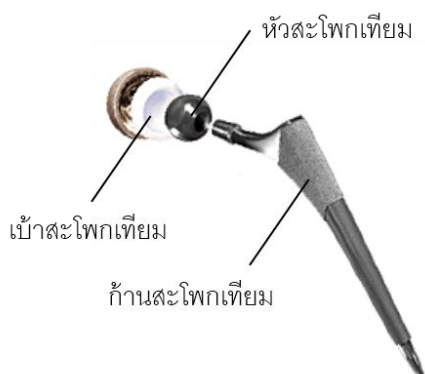
บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบัน ผู้ป่วยที่เข้ารับการผ่าตัดข้อต่อสะโพกเพื่อใส่ข้อต่อสะโพกเทียม (total hip) แทนที่กระดูกสะโพกเดิมที่เสียหายมีเป็นจำนวนมาก อัตราการผ่าตัดเปลี่ยนข้อต่อสะโพกเทียมในผู้ป่วยไทยอยู่ที่ประมาณ 1,200-1,500 รายต่อปี (ข้อมูลปีพ.ศ.2548) [1] และยังคงมีผู้ป่วยอีกจำนวนมากที่ไม่ได้รับการผ่าตัดเนื่องจากค่าใช้จ่ายในการผ่าตัดสูง ซึ่งส่วนหนึ่งมาจากการที่ต้องนำเข้าข้อต่อสะโพกเทียมจากต่างประเทศเพราะยังไม่สามารถผลิตใช้ภายในประเทศได้ จึงทำให้ข้อต่อสะโพกเทียมมีราคาแพง

ข้อต่อสะโพกเทียมประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ ก้านสะโพกเทียม (femoral stem) หัวสะโพกเทียม (femoral head) และเบ้าสะโพกเทียม (acetabula cup) หัวสะโพกเทียมและเบ้าสะโพกเทียมทำหน้าที่เป็นข้อต่อแบบเบ้า (ball-and-socket joint) จึงมีการเสียดสีกันตลอดเวลาที่ใช้งาน ทำให้เกิดการสึกหรอซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้งาน ดังนั้นข้อต่อสะโพกเทียมจะต้องมีอัตราการสึกหรอต่ำเพื่อให้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นระยะเวลานานหลังจากผ่าตัด ในทางวิศวกรรม อัตราการสึกหรอของข้อต่อแบบเบ้าขึ้นอยู่กับความเป็นทรงกลม (sphericity) และความหยาบผิว (roughness) [2],[3] ตามมาตรฐาน ASTM F2033 [4] หัวสะโพกเทียมที่ใช้กับเบ้าพลาสติกต้องมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลม (out-of-sphericity) ไม่เกิน 10 ไมโครเมตร และหัวสะโพกเทียมที่ใช้กับเบ้าโลหะต้องมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมไม่เกิน 5 ไมโครเมตร และมีความหยาบผิวแบบเฉลี่ย (R_a) ไม่เกิน 0.05 ไมโครเมตร



รูปที่ 1.1 ข้อต่อสะโพกเทียม

(ที่มา : <http://www.ravalli-ortho.com/procedure.htm>)

โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมจะใช้เครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดา (conventional CNC lathe) เพื่อกลึงชิ้นรูปชิ้นงานที่เป็นทรงกลม เครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดา คือ เครื่องกลึงซีเอ็นซีที่ใช้โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมที่มีสไลด์เวย์เป็นแบบสัมผัส (contact-type slideway) เช่น บอลสกรู (ball screw) ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ (temperature control) และไม่มีการลดการสั่นสะเทือน (vibration isolation) การควบคุมตำแหน่งมีดกลึงของเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดาก็มีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานและระยะคลอน (backlash) ของสไลด์เวย์ ซึ่งอาจคลาดเคลื่อนได้ถึง 10 ไมโครเมตร [5] ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของรูปร่างชิ้นงาน (shape form error) และผลจากอุณหภูมิที่ไม่คงที่และการสั่นสะเทือนในขณะกลึงก็ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของรูปร่างชิ้นงานเช่นกัน ดังนั้นเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดาจึงไม่สามารถผลิตชิ้นงานที่ต้องการความแม่นยำสูง (form accuracy) และมีความหยาบผิวต่ำอย่างหัวสะพานเทียมได้ [6],[7] ในการผลิตหัวสะพานเทียมให้ตามมาตรฐาน จะต้องเพิ่มกระบวนการเจียรไน (grinding) เพื่อปรับความเป็นทรงกลมและเพิ่มกระบวนการขัดผิว (polishing) เพื่อปรับผิวของหัวสะพานเทียม การขัดผิวหัวสะพานเทียมเพื่อให้ได้ความหยาบผิวตามมาตรฐาน สามารถกระทำได้โดยใช้เครื่องขัดผิวที่มีราคาไม่สูงมาก เช่นเครื่อง drag finishing แต่การปรับความเป็นทรงกลมหัวสะพานเทียมเพื่อให้ได้ความเป็นทรงกลมตามมาตรฐานจะต้องใช้เครื่องเจียรไนทรงกลมซีเอ็นซี (CNC spherical grinding) หรือเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบความแม่นยำสูง (ultra precision CNC lathe) ซึ่งมีราคาสูงมาก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้หัวสะพานเทียมมีราคาแพง

มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการเพิ่มความแม่นยำในกระบวนการกลึงโดยใช้เครื่องกลึงซีเอ็นซีเป็นจำนวนมาก เช่นงานวิจัยของ Zhu Jun และ Altintas [8] และงานวิจัยของ Woronko Huang และ Altintas [5] ที่เสนอการใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โว (fast tool servo) ที่ติดตั้งบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดาเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการกลึงเพล่าให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลางตามที่ต้องการ และมีความหยาบผิวต่ำ และงานวิจัยของ Kim และ Kim [9] ที่เสนอการใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวที่ติดตั้งบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบความแม่นยำสูงเพื่อลดความคลาดเคลื่อน (waviness) บนผิวราบของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการกลึงปาดหน้า (face turning) ที่เกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่ของโต๊ะเลื่อน (slide table) หลังจากขัดเซตด้วยฟาสต์ทูลเซอร์โวแล้วสามารถลดความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานลงได้ประมาณ 50% แต่งานวิจัยที่กล่าวมานี้ไม่ใช้การปรับปรุงความแม่นยำของชิ้นงานทรงกลม งานวิจัยที่เกี่ยวกับการปรับปรุงค่าความเป็นทรงกลมของทรงกลมโดยใช้เครื่องจักรทั่วไปที่ราคาไม่สูงมากนั้นยังมีจำนวนน้อย เช่นงานวิจัยของ Li Xu Wei Hu และ Xu [6] ได้เสนอการปรับปรุงเครื่องเจียรไนทรงกลมแบบธรรมดา (conventional sphere grinding machine) แบบใช้ cup wheel ให้สามารถปรับระยะกินลึก (depth of cut) ที่ตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงานได้ เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมจาก 20 ไมโครเมตร ไปเป็น 5 ไมโครเมตร แต่วิธีการนี้ยังคงต้องการจัดตั้ง (set up) และการวาง

แนว (alignment) ชิ้นงานบนเครื่องเจียระไนหลังจากที่ขึ้นรูปชิ้นงานขึ้นต้นด้วยการกลึง และลักษณะของเครื่องจักรไม่สามารถเจียระไนผิวทรงกลมให้ต่อเนื่องกันได้ ทำให้ไม่สามารถปรับความเป็นทรงกลมของหัวสวะโปกที่ต้องใช้พื้นผิวเป็นบริเวณกว้างได้ นอกจากนี้ยังไม่มีการวิจัยใดเสนอการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของชิ้นงานทรงกลมด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดา งานวิจัยนี้เห็นว่าสามารถใช้แนวคิดการใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวนเครื่องกลึงซีเอ็นซีจากงานวิจัยที่ศึกษามา เพื่อปรับปรุงวิธีการผลิตหัวสวะโปกเทียมบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดาให้ได้หัวสวะโปกเทียมที่ความเป็นทรงกลมตามมาตรฐาน ASTM F2033 โดยไม่ต้องใช้เครื่องจักรที่มีราคาแพง ซึ่งจะทำให้สามารถลดต้นทุน เวลา และขั้นตอนในการผลิตได้

1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อปรับปรุงวิธีการผลิตหัวสวะโปกเทียมด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดาให้มีความเป็นทรงกลมตามมาตรฐานสากล ASTM F2033

1.3. ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1. ใช้เครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดา
- 1.3.2. ปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสวะโปกเทียมเท่านั้น
- 1.3.3. การวัดค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมอ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM F2033 และ ISO 4291
- 1.3.4. ใช้เหล็กกล้าไร้สนิม 304 (304 stainless steel) ในการทดลอง
- 1.3.5. พิจารณาความเป็นทรงกลมเฉพาะบริเวณที่มีภาวะการตัด (cutting condition) เหมาะสมเท่านั้น

1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

หัวสวะโปกเทียมที่ผลิตได้จากเครื่องกลึงซีเอ็นซีธรรมดาจะมีต้นทุนที่ไม่สูงและผลิตได้รวดเร็ว เมื่อได้รับการพัฒนาต่อไปจนกระทั่งผ่านการทดสอบมาตรฐานสากล ASTM F2033 จะทำให้ได้หัวสวะโปกเทียมที่สามารถผลิตได้ในประเทศไทย เพื่อนำมาใช้ภายในประเทศ ทำให้ลดค่าใช้จ่ายของผู้ที่เข้ารับการผ่าตัดและค่าใช้จ่ายในการนำเข้าจากต่างประเทศ

1.5. ขั้นตอนในการทำงานวิจัย

- 1.5.1. ศึกษาข้อกำหนดและมาตรฐานการผลิตหัวสระโปกเทียมจากมาตรฐานสากล
- 1.5.2. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปวัสดุทรงกลม
- 1.5.3. กำหนดขอบเขตของงานวิจัย
- 1.5.4. ออกแบบการทดลอง
- 1.5.5. ทดลองและเก็บข้อมูล
- 1.5.6. วิเคราะห์ผลการทดลอง
- 1.5.7. สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ
- 1.5.8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

2.1. มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการผลิต

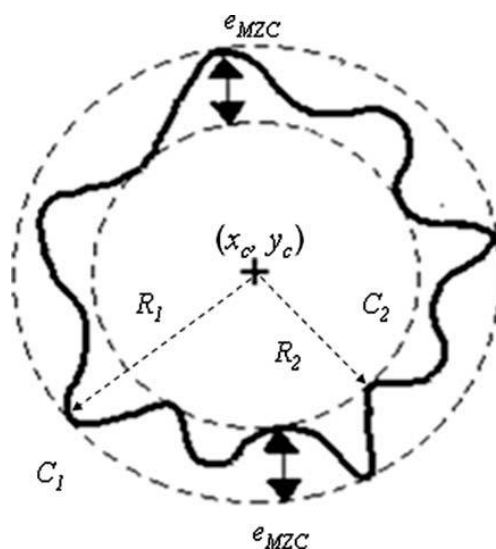
2.1.1. มาตรฐาน ASTM standard F2033 “standard specification for total hip joint prosthesis and hip endoprosthesis bearing surfaces made of metallic, ceramic, and polymeric materials”

มาตรฐาน ASTM F2033 กำหนดไว้ว่าหัวสะโพกเทียม (femoral head) ต้องมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลม (out-of-sphericity) ไม่เกิน 10 ไมโครเมตรสำหรับใช้กับเบ้าสะโพกเทียม (acetabula cup) ที่เป็นพลาสติก และไม่เกิน 5 ไมโครเมตรสำหรับใช้กับเบ้าสะโพกเทียมที่เป็นโลหะ และให้ใช้ค่าความคลาดเคลื่อนจากความกลม (out-of-roundness) สูงสุดที่วัดได้แสดงถึงค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลม โดยการวัดค่าความคลาดเคลื่อนจากความกลมจากระนาบที่ไม่ขนานกันมากกว่า 2 ระนาบขึ้นไปด้วยวิธี minimum zone center ที่กำหนดไว้ใน ISO 4291

2.1.2. มาตรฐาน ISO standard 4291 [10] “methods for assessment of departure from roundness - measurement of variations in radius”

มาตรฐาน ISO 4291 กำหนดไว้ว่า ค่าความคลาดเคลื่อนจากความกลมคือผลต่างระหว่างรัศมีที่มีค่ามากที่สุดกับรัศมีที่มีค่าน้อยที่สุดของรูปร่างวงกลมที่วัด วิธีการวัดค่าความคลาดเคลื่อนจากความกลมที่ยอมรับให้ใช้ได้มี 4 วิธีคือ least square center (LSC) minimum zone center (MZC) minimum circumscribed circle center (MCC) และ maximum inscribed circle center (MIC)

วิธีการวัดค่าความคลาดเคลื่อนจากความกลมที่ใช้ใน ASTM F2033 คือ minimum zone center (MZC) ซึ่งนิยามจุดศูนย์กลางของวงกลมคือจุดที่มีรัศมีของวงกลม 2 วงที่ร่วมศูนย์กลางซึ่งวงหนึ่งครอบด้านนอกของโปรไฟล์ความกลม (roundness profile) ที่วัดทั้งหมดและอีกวงหนึ่งถูกครอบด้วยด้านในของโปรไฟล์ความกลม และมีผลต่างระหว่างรัศมีของวงกลมทั้งสองนั้นน้อยที่สุด ค่าผลต่างนั้นคือค่าความคลาดเคลื่อนจากความกลม [11] ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การวัดความคลาดเคลื่อนจากความกลมด้วยวิธี MZC [11]

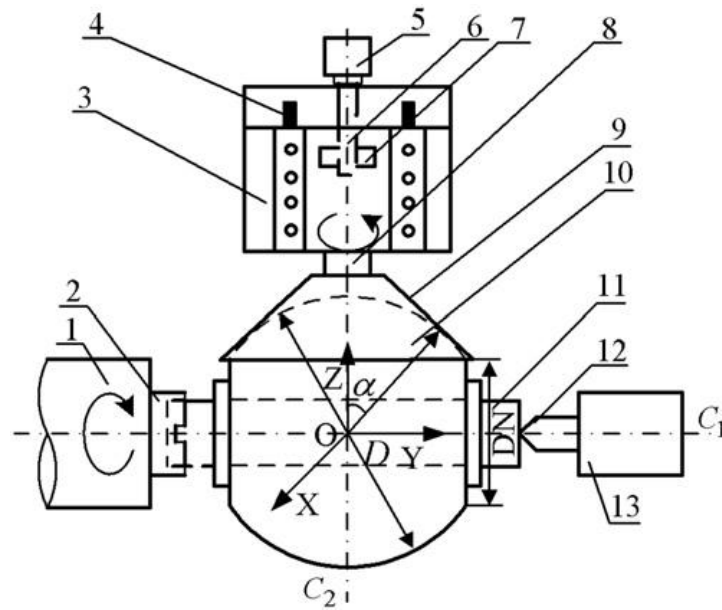
2.2. การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1. งานวิจัย “error analysis and in-process compensation on cup wheel grinding of hard sphere” ของ Dongdong Lin, Mingming Xu, Chenjun Wei, Dejin Hu และ Liming Xu [6]

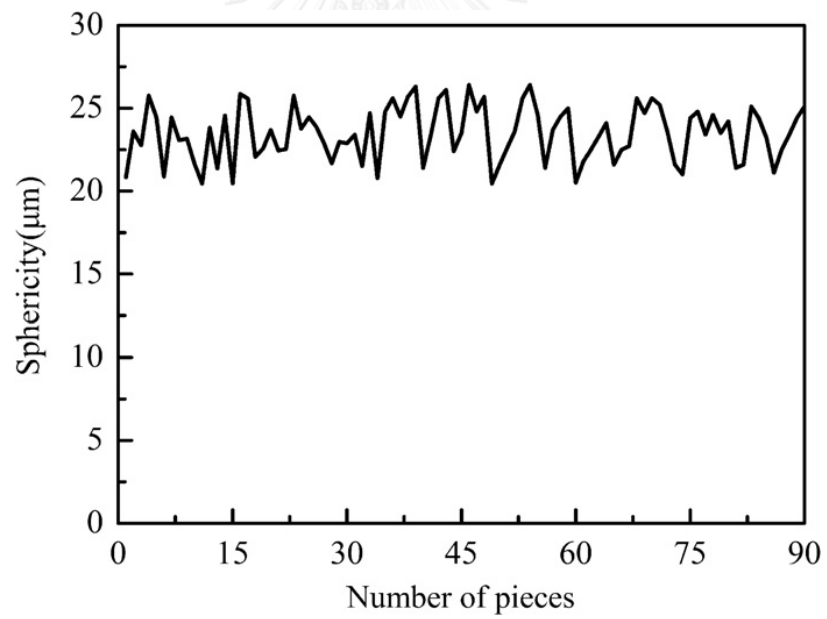
งานวิจัยนี้วิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้การเจียรระโนทรงกลมด้วยเครื่องเจียรระโนทรงกลมแบบธรรมดา (conventional sphere grinding) แบบใช้ cup wheel มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงและเสนอการปรับปรุงเครื่องเจียรระโนทรงกลมแบบธรรมดาให้สามารถเจียรระโนชิ้นงานทรงกลมให้มีค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมลดลงเพื่อที่จะใช้งานในลักษณะของวาล์วแบบทรงกลม (spherical valve) ที่ต้องมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมไม่เกิน 20 ไมโครเมตร

แผนภาพในรูปที่ 2.2 แสดงถึงลักษณะการทำงานของเครื่องเจียรระโนทรงกลมแบบธรรมดาแบบใช้ cup wheel ชิ้นงานทรงกลม (หมายเลข 10) ถูกจับยึดด้วยที่จับยึด (fixture) (หมายเลข 11) ด้านหนึ่งของที่จับยึดถูกจับด้วยหัวจับ (chuck) (หมายเลข 2) และอีกด้านหนึ่งชนกับเพลายันศูนย์ (tailstock) (หมายเลข 12) ทำให้ชิ้นงานทรงกลมสามารถหมุนรอบแกน C_1 พร้อมกับที่จับยึด cup Wheel (หมายเลข 9) ยึดอยู่กับเพลาสปินเดิล (spindle) (หมายเลข 8) ซึ่งติดอยู่กับโต๊ะเลื่อน (slide table) (หมายเลข 3) และเคลื่อนที่ป้อน (feed motion) ด้วยสเต็ปมอเตอร์ (step motor) (หมายเลข 5) เวลาเจียรระโน cup wheel จะหมุนรอบแกน C_2 ในขณะที่ชิ้นงานทรงกลมหมุนรอบแกน C_1 ซึ่งทั้งสองแกนนี้จะมาตัดกันที่จุดศูนย์กลาง O ของชิ้นงานทรงกลม

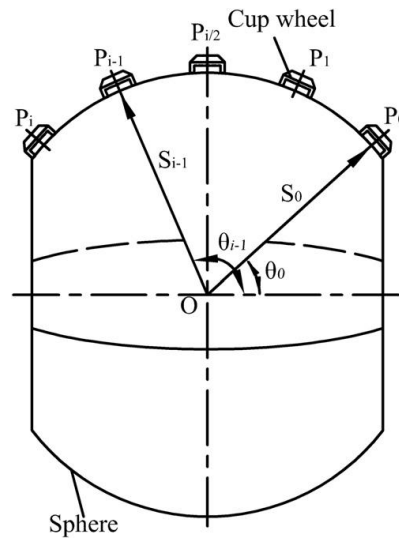
สาเหตุที่ทำให้การเจียรระไนชิ้นงานทรงกลมด้วยเครื่องเจียรระไนชนิดนี้แล้วชิ้นงานมีค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงที่งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์มี 2 สาเหตุ สาเหตุแรกเกิดจากความเร็วเชิงเส้นของแต่ละจุดบนละติจูดเดียวกันของชิ้นงานทรงกลมในขณะที่เจียรระไนมีค่าไม่คงที่ ซึ่งเกิดจากระยะแขนจากแกนหมุน C_1 มีค่าไม่คงที่ ทางเรขาคณิตพบว่าระยะแขนจากแกนหมุนมีค่าน้อยลงเมื่อมุม α มีค่ามากขึ้น (มุม α อ้างอิงตามรูปที่ 2.2) มีผลทำให้จุดที่มุม α มีค่ามากจะมีความเร็วเชิงเส้นน้อยกว่าจุดที่มุม α มีค่าน้อยบนละติจูดเดียวกัน และสาเหตุที่สองเกิดจากการวางแนวคลาดเคลื่อน (misalignment) ของชิ้นงานบนเครื่องเจียรระไน ซึ่งเกิดจากการที่แนวแกนหมุน C_1 และ C_2 ไม่ได้ตัดกันที่จุดศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม ซึ่งเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นตามปกติในการปฏิบัติจริง จากสาเหตุทั้งสองทำให้การเจียรระไนทรงกลมมีค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงกว่า 20 ไมโครเมตรเมื่อทดลองเจียรระไนจำนวนหนึ่งดังรูปที่ 2.3 เมื่อพิจารณาโปรไฟล์ขนาดรัศมีทรงกลมที่จุดต่างๆที่เกิดขึ้นจากการเจียรระไนพบว่าบริเวณด้านข้างของชิ้นงานทรงกลมนั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าบริเวณที่อยู่ตรงกลางดังรูปที่ 2.4 งานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการปรับปรุงเครื่องเจียรระไนทรงกลมแบบธรรมดาให้สามารถปรับระยะกินลึก (depth of cut) ที่ตำแหน่งต่างๆบนชิ้นงานทรงกลมได้โดยมีลักษณะดังแผนภาพในรูปที่ 2.5 โดยให้โต๊ะเลื่อน (หมายเลข 8) ติดอยู่กับโต๊ะหมุน (rotating table) (หมายเลข 3) ซึ่งปลายด้านหนึ่งถูกรองรับด้วยไกด์เวย์ที่เป็นรูปโค้ง (arc guide way) (หมายเลข 11) และอีกด้านหนึ่งยึดด้วยแกนหมุน (pivot) (หมายเลข 13) ทำให้ cup wheel สามารถหมุนไปรอบๆชิ้นงานทรงกลมได้ซึ่งเครื่องเจียรระไนทรงกลมแบบธรรมดาไม่สามารถทำได้ เมื่อปรับระยะกินลึกในแต่ละตำแหน่งที่ cup wheel เคลื่อนที่ไปให้ขัดเข้ากับรูปร่างที่ได้จากหลังจากที่เจียรระไนด้วยเครื่องเจียรระไนแบบธรรมดาในรูปที่ 2.4 โดยการค่อยๆ ลดระยะกินลึกจากบริเวณด้านข้างของชิ้นงานทรงกลมไปสู่บริเวณตรงกลางของชิ้นงานทรงกลมตามที่แสดงในรูปที่ 2.6 จะทำให้บริเวณตรงกลางของชิ้นงานทรงกลมถูกเจียรระไนออกไปน้อยกว่าบริเวณด้านข้างมีผลทำให้ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการเจียรระไนแบบธรรมดา คือ จาก 20 ไมโครเมตรเหลือ 5 ไมโครเมตรดังรูปที่ 2.7



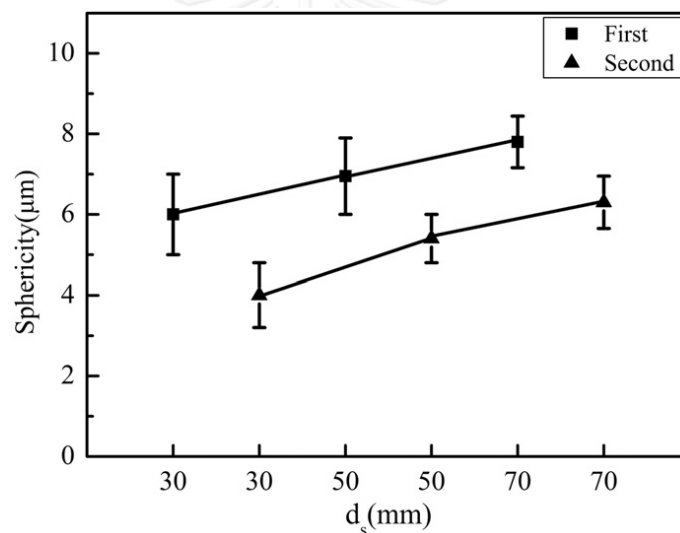
รูปที่ 2.2 แผนภาพเครื่องเจียระไนทรงกลมแบบธรรมดาแบบใช้ cup wheel [6]



รูปที่ 2.3 ค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของชิ้นงานทรงกลมที่ได้จากการเจียระไนด้วยเครื่องเจียระไนทรงกลมแบบธรรมดา [6]



รูปที่ 2.6 ลักษณะการปรับระยะกึ่งกลางที่ตำแหน่งต่างๆของเครื่องเจียระไนทรงกลมที่ปรับปรุงแล้ว [6]



รูปที่ 2.7 ค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็ทรงกลมของชิ้นงานทรงกลมหลังจากที่เจียระไนด้วยเครื่องเจียระไนทรงกลมที่ปรับระยะกึ่งกลางที่ตำแหน่งต่างๆได้ [6]

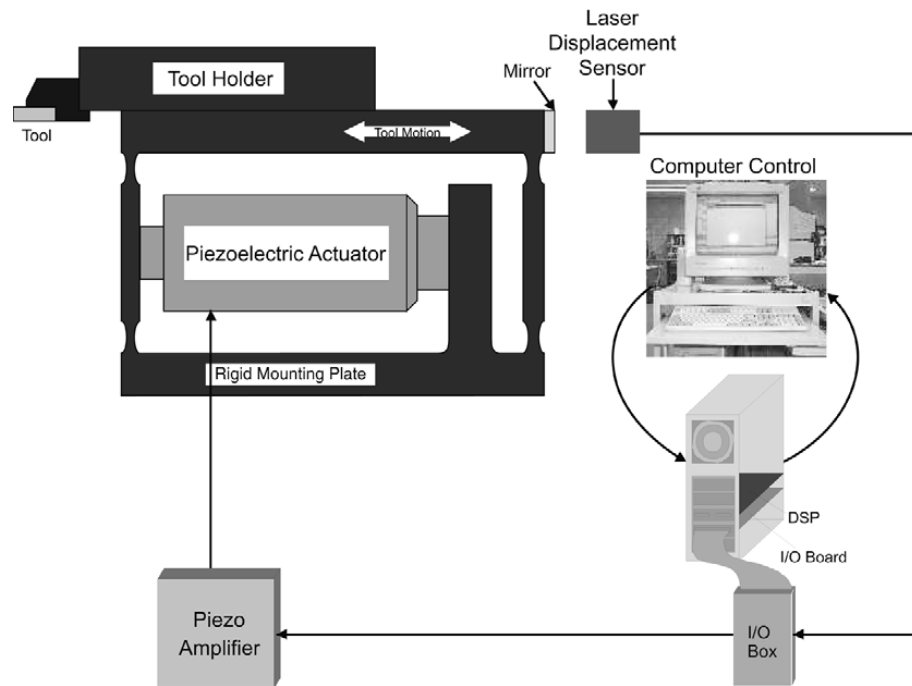
2.2.2. การใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โว (fast tool servo) เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการกลึงบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดา (conventional CNC lathe)

งานวิจัย “a fast tool servo design for precision turning of shafts on conventional CNC lathes” ของ Wen-Hong Zhu, Martin B. Jun และ Yusuf Altintas [8] และงานวิจัย “piezoelectric tool actuator for precision machining on conventional CNC turning centers” ของ Andrew Woronko, Jin Huang และ Yusuf Altintas [5] ได้เสนอวิธีการพัฒนา

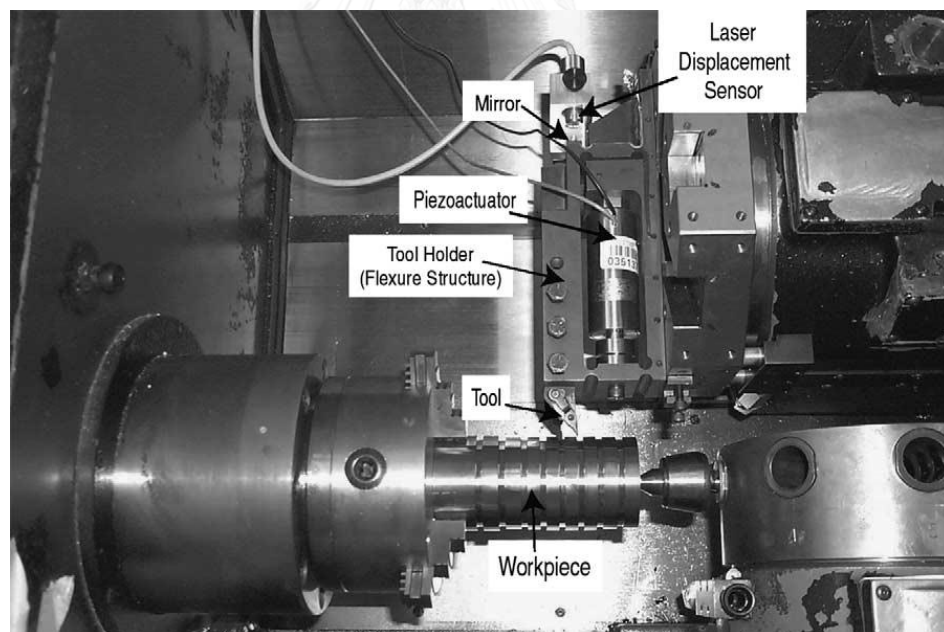
ความเที่ยงตรง (precision) และความแม่นยำ (accuracy) ในการกลึงด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดา (conventional CNC lathe) โดยใช้ฟาสต์ทูลเซอร์ไว

ฟาสต์ทูลเซอร์ไวคืออุปกรณ์ที่ต่อเติมเข้าไปบนป้อมมิต (turret) ของเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมิตกลึงด้วยความละเอียด (resolution) ในระดับนาโนเมตร โดยใช้ตัวขับ (actuator) เป็นเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ส่งแรงผ่าน flexure ใช้เซนเซอร์ (sensor) วัดตำแหน่งที่มีความละเอียดสูงเช่น เซนเซอร์แบบเลเซอร์และเซนเซอร์แบบความจุไฟฟ้า (capacitive position sensor) ในการวัดตำแหน่งมิตกลึง และควบคุมตำแหน่งแบบป้อนกลับ (feedback control) เพื่อชดเชยความไม่แม่นยำของเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดา แผนภาพของระบบฟาสต์ทูลเซอร์ไวแสดงได้ดังรูปที่ 2.8 และลักษณะการติดตั้งฟาสต์ทูลเซอร์ไวบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีแสดงดังรูปที่ 2.9 ทั้งสองงานวิจัยเสนอการใช้ระบบควบคุมแบบ sliding mode controller เพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งอันเนื่องมาจากแรงตัด (cutting force disturbance) และฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ของเพียโซอิเล็กทริกเพื่อควบคุมให้มิตกลึงบนฟาสต์ทูลเซอร์ไวเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ

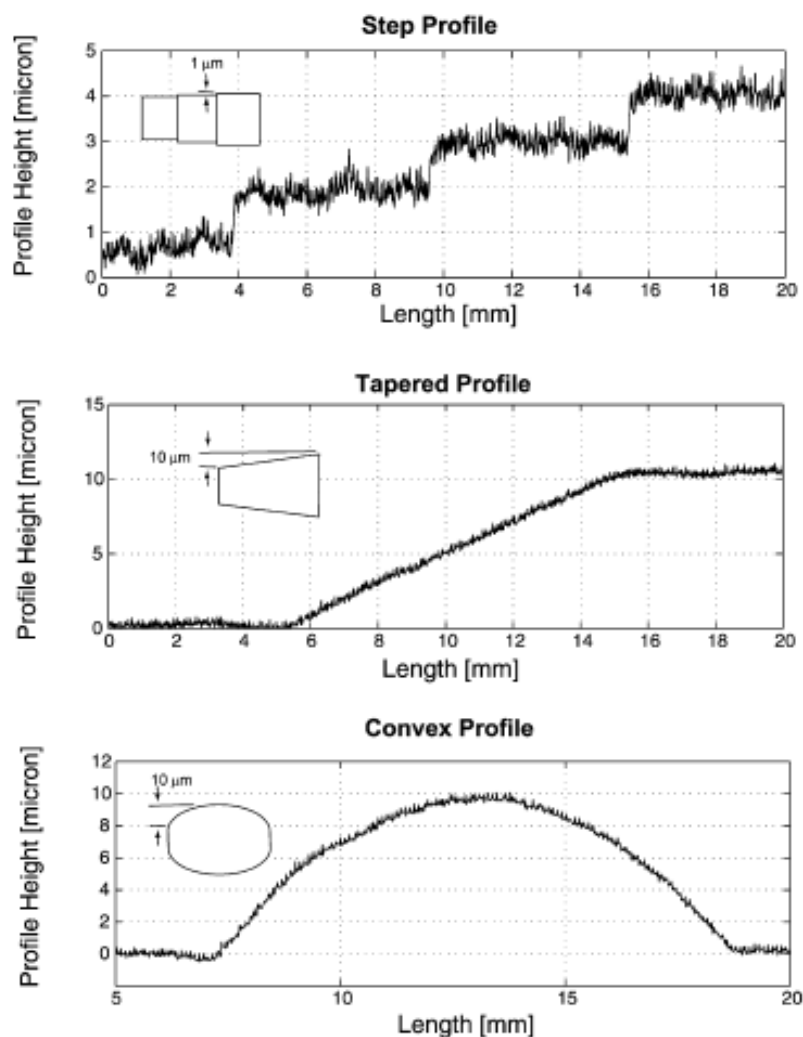
ขั้นตอนการทดลองกลึงทั้งสองงานวิจัยนี้คือ กลึงเพลลาในขั้นตอนกลึงกึ่งละเอียด (semi-finish turning) ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามที่ต้องการด้วยระบบควบคุมและตัวขับของเครื่องกลึงซีเอ็นซี จากนั้นวัดผลต่างระหว่างค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต้องการกับค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้จริง แล้วปรับระยะกินลิกเพื่อกลึงเพลลาในขั้นตอนกลึงละเอียด (finish turning) ให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลางตามที่ต้องการด้วยฟาสต์ทูลเซอร์ไวเพียงอย่างเดียวโดยไม่เคลื่อนที่แกน x ของเครื่องกลึงซีเอ็นซี (ตรึง (fix) ตำแหน่งของแกน x ให้เป็นตำแหน่งเดียวกับขั้นตอนการกลึงกึ่งละเอียด) ซึ่งเป็นการกำจัดผลของระยะคลอน (backlash) และแรงเสียดทานของเครื่องกลึงซีเอ็นซี ในงานวิจัย [10] สามารถควบคุมตำแหน่งของมิตบนฟาสต์ทูลเซอร์ไวในขณะกลึงเพลลาให้มีความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งที่ต้องการอยู่ในช่วง 20 นาโนเมตร ทำให้ได้เพลลาที่ขนาดตามที่ต้องการอย่างแม่นยำ และมีความหยาบผิว (roughness) แบบเฉลี่ย (R_a) เท่ากับ 0.3 ไมโครเมตรเมื่อกลึงเหล็กกล้า 4340 และความหยาบผิวแบบเฉลี่ยเท่ากับ 0.15 ไมโครเมตรเมื่อกลึงเหล็กกล้า 4320 ซึ่งโดยปกติความหยาบผิวระดับนี้จะได้จากกระบวนการเจียรไนหรือการกลึงด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีความแม่นยำสูง (high precision CNC lathe) นอกจากนี้ยังสามารถกลึงเพลลากลมให้มีลักษณะเป็นขั้นบันได (step) ขนาด 1 ไมโครเมตร ลักษณะเทเปอร์ (taper) และลักษณะเส้นโค้งคอนเวกซ์ (convex) ในระดับไมโครเมตรได้ ตามรูปที่ 2.10 ซึ่งถ้าไม่ใช้ฟาสต์ทูลเซอร์ไวแล้วใช้การควบคุมจากเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพียงอย่างเดียวในการกลึงเพลลาให้มีลักษณะดังที่กล่าวมาจะมีความคลาดเคลื่อนสูงถึง 3 ไมโครเมตร แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยทั้งสองนี้เน้นไปที่การกลึงเพลลากลมโดยไม่มีการเคลื่อนที่ในแกน x ของเครื่องกลึงซีเอ็นซีซึ่งไม่ใช่ลักษณะของการกลึงชิ้นงานทรงกลม



รูปที่ 2.8 แผนภาพของระบบฟาสต์ทูลเซอร์โว [8]



รูปที่ 2.9 ลักษณะการติดตั้งฟาสต์ทูลเซอร์โวบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี [8]

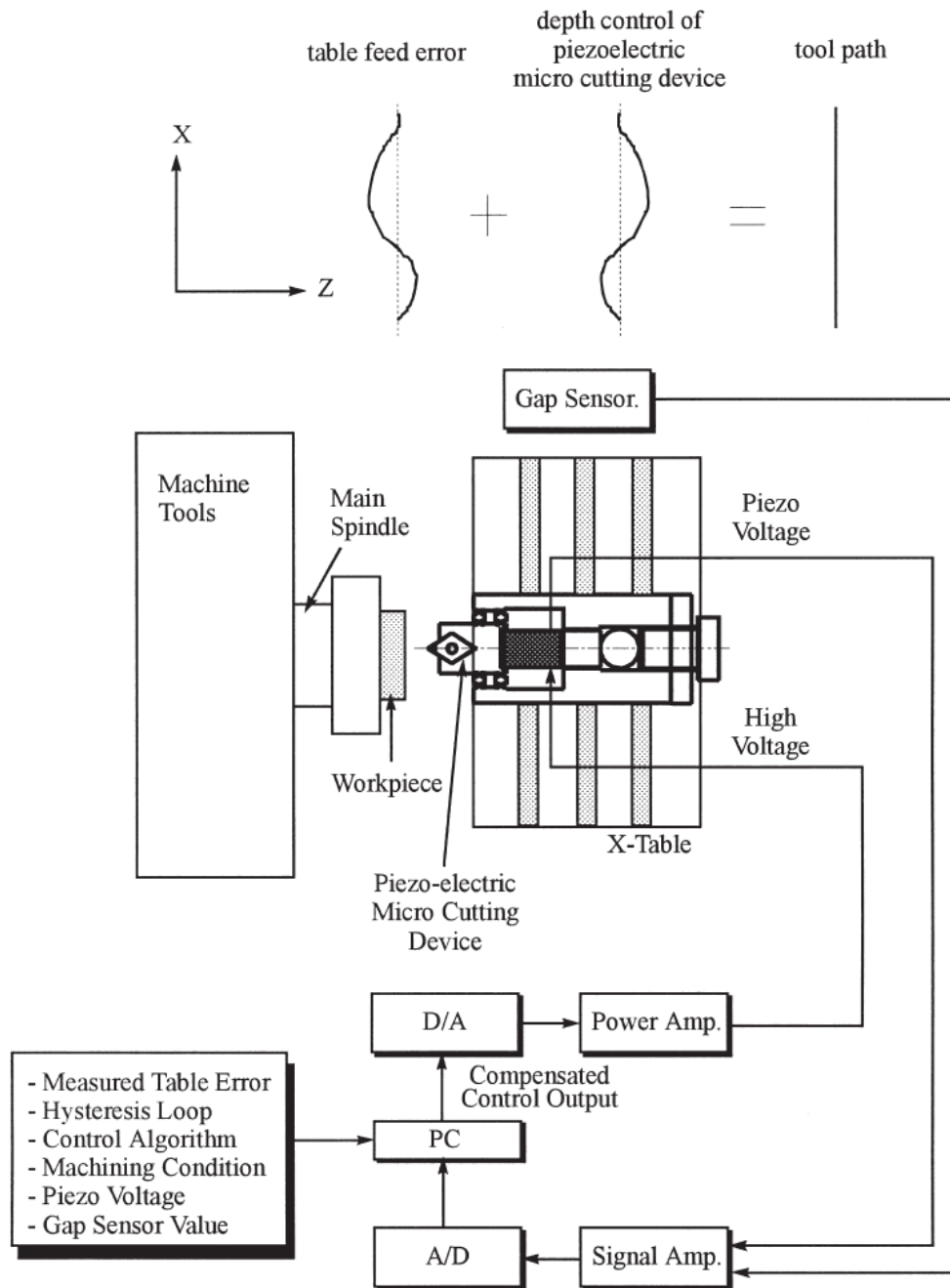


รูปที่ 2.10 โพรไฟล์ในระดับไมโครเมตรที่สามารถผลิตได้ด้วยฟาสต์ทูลเซอร์โว [5]

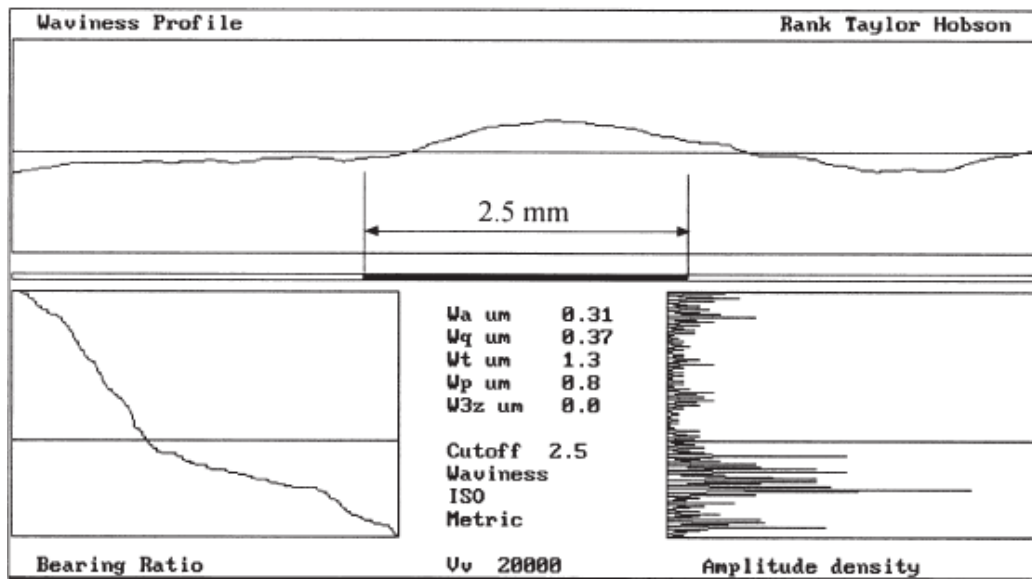
2.2.3. งานวิจัย “waviness compensation of precision machining by piezoelectric micro cutting device” ของ Jeong-Du Kim และ Dong-Sik Kim [9]

งานวิจัยนี้แสดงการใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวเพื่อชดเชยความเป็นคลื่น (waviness) บนผิวราบของชิ้นงานในกระบวนการกลึงปาดหน้า (face turning) บนเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบความแม่นยำสูง (high precision CNC lathe) หลักการของงานวิจัยนี้คือ การเก็บข้อมูลที่โต๊ะเลื่อน (slide table) เคลื่อนที่คลาดเคลื่อนไปในแกน z ของเครื่องกลึงที่แต่ละตำแหน่ง x ไว้ในคอมพิวเตอร์ และควบคุมให้ฟาสต์ทูลเซอร์โวเคลื่อนที่ชดเชยความคลาดเคลื่อนนั้นในขณะกลึง แผนภาพระบบฟาสต์ทูลเซอร์โวของงานวิจัยนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.11 เมื่อใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวชดเชยความคลาดเคลื่อนของโต๊ะเลื่อน

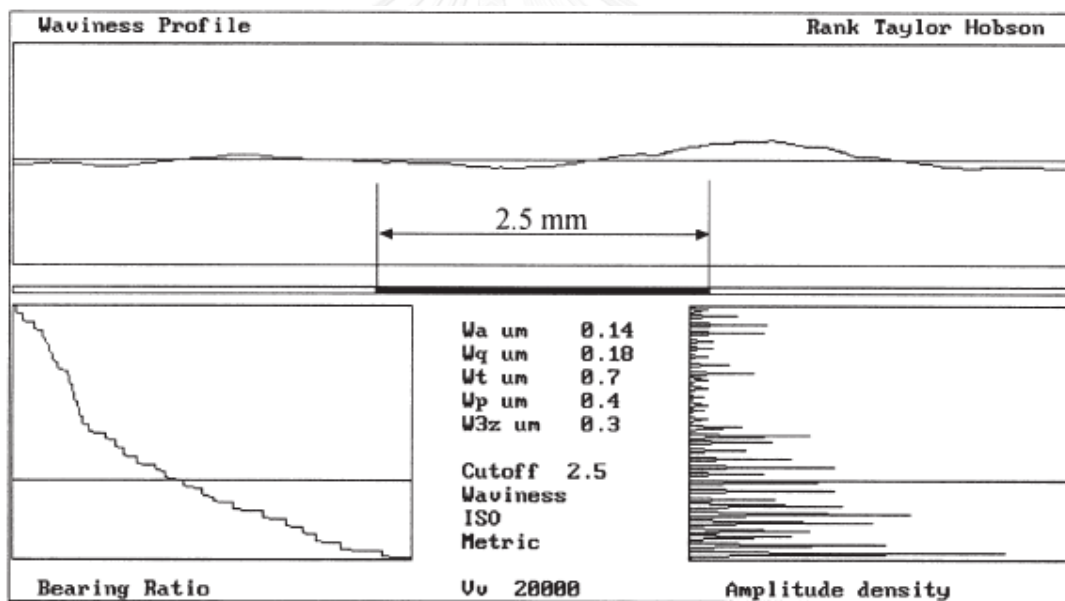
ในขณะกลึงชิ้นงาน ชิ้นงานมีความเป็นคลื่นลดลงจาก 1.3 ไมโครเมตร (peak-to-valley) ไปเป็น 0.7 ไมโครเมตร (peak-to-valley) ซึ่งสามารถลดความเป็นคลื่นได้ประมาณ 46% ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงการชดเชยความเป็นคลื่นบนชิ้นงานด้วยฟาสต์ทูลเซอร์ไวบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบความแม่นยำสูง [9]



(ก) ค่าความเป็นคลื่นบนชิ้นงานเมื่อกลึงด้วยวิธีปกติ



(ข) ค่าความเป็นคลื่นบนชิ้นงานหลังใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวชดเชยความคลาดเคลื่อน

รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบค่าความเป็นคลื่นบนผิวชิ้นงานเมื่อกลึงด้วยวิธีปกติ

กับกลึงโดยใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวชดเชยความคลาดเคลื่อน [9]

2.3. สิ่งที่ได้จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากแนวคิดการปรับปรุงความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยเครื่องเจียรระไนทรงกลมแบบธรรมดาในงานวิจัย [6] ที่ปรับปรุงให้เครื่องเจียรระไนทรงกลมแบบธรรมดาสามารถปรับระยะกินลึกที่ตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงานทรงกลมได้ แล้วใช้เครื่องเจียรระไนที่ปรับปรุงแล้วมาปรับระยะกินลึกที่ตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงานทรงกลมในขณะที่เจียรระไนเพื่อชดเชยระยะคลาดเคลื่อนจากการเจียรระไนด้วยวิธีปกติ และแนวคิดในการปรับปรุงความเป็นคลื่นบนผิวราบของชิ้นงานที่กลึงด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบความแม่นยำสูงในงานวิจัย [9] ที่ใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวขับเคลื่อนมีดกลึงชดเชยระยะคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่ของโต๊ะเลื่อนในขณะที่กลึงปาดหน้า ทำให้เกิดแนวคิดในการใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวขับเคลื่อนมีดกลึงชดเชยระยะคลาดเคลื่อนในขณะที่กลึงเพื่อปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียม ซึ่งมีวิธีการใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวที่คล้ายคลึงกับงานวิจัย [9] แต่นำมาประยุกต์ใช้บนพื้นผิวทรงกลม เพื่อปรับปรุงความเป็นทรงกลมเช่นเดียวกับงานวิจัย [6] และใช้แนวทางการออกแบบฟาสต์ทูลเซอร์โวสำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดาจากงานวิจัย [5] และ [8]

บทที่ 3

การทดลองศึกษาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสโปกเทียมที่กลึงได้จากเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดาเบื้องต้น

3.1. แนวทางการทดลองศึกษา

งานวิจัยนี้จะใช้เครื่องกลึงซีเอ็นซีเครื่องใหม่ที่ยังไม่ได้ผ่านการใช้งานใดๆ กลึงหัวสโปกเทียมและหาค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลม (out-of-sphericity) ของหัวสโปกเทียมที่ได้จากกลึงด้วยความแม่นยำสูงสุดของเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดา (conventional CNC lathe) ที่ไม่มีผลกระทบจากความสึกหรอของเครื่องกลึงซีเอ็นซี เพื่อกำหนดขีดความสามารถในการผลิตหัวสโปกเทียมโดยวิธีกลึงด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดา และนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ถึงสาเหตุของความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมที่เกิดจากการผลิตด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดา และกำหนดแนวทางในการปรับปรุงวิธีการกลึงเพื่อปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสโปกเทียม

3.2. การจัดเตรียมการทดลอง

3.2.1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

รายละเอียดของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

3.2.1.1. เครื่องกลึงซีเอ็นซี

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องกลึงซีเอ็นซียี่ห้อ OKUMA รุ่น LB3000EX (รูปที่ 3.1) และสารหล่อเย็นที่ใช้คือ CASTROL Hysol X ที่ผสมน้ำด้วยความเข้มข้น 5%

3.2.1.2. เม็ดมิต (insert)

เม็ดมิต (Insert) ที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 3 ชนิดได้แก่

- ขั้นตอนกลึงหยาบ (rough turning) ใช้เม็ดมิต 80° rhombic shape carbide insert ยี่ห้อ KENNAMETAL ที่มีรัศมีมุมมิต (nose radius) 0.8 มิลลิเมตร
- ขั้นตอนกลึงหยาบบริเวณ undercut ใช้เม็ดมิตเซาะร่องแบบสี่เหลี่ยม square grooving carbide insert ยี่ห้อ KENNAMETAL ที่มีความกว้าง 3 มิลลิเมตร และมีรัศมีมุมมิต 0.2 มิลลิเมตร

- ขั้นตอนกลึงกึ่งละเอียด (semi-finish turning) และกลึงละเอียด (finish turning) ใช้เม็ดมีดเดียวกันคือ 25° rhombic shape cermet insert ยี่ห้อ TUNGALOY ที่มีรัศมีมุมมีด 0.2 มิลลิเมตรดังรูปที่ 3.2

3.2.1.3. เครื่องวัดความกลม (roundness measuring machine)

การทดลองนี้ใช้เครื่องมือวัดความกลมยี่ห้อ ACCRETECH รุ่น RONDCOM60A (รูปที่ 3.3) สำหรับวัดโปรไฟล์ความกลม (roundness profile) และความคลาดเคลื่อนจากความกลม (out-of-roundness) เครื่องวัดความกลมนี้เป็นใช้หัววัดแบบสไตลัส (stylus) โดยที่สไตลัสอยู่กับที่และใช้โต๊ะหมุนขึ้นงาน ข้อมูลจำเพาะของเครื่องวัดความกลมแสดงในตารางที่ 3.1 และข้อมูลการจัดเตรียมเครื่องวัดความกลมสำหรับการทดลองนี้แสดงในตารางที่ 3.2

จากตารางที่ 3.2 สามารถคำนวณความไม่แน่นอนของการวัด (measurement uncertainty) ที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่างๆ ที่ระดับความเชื่อมั่น (confidence level) 95% ได้ดังนี้

- ความไม่แน่นอนของการวัดจากความละเอียดในการวัด (zero-order uncertainty) (u_0) มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความละเอียดในการวัด เท่ากับ

$$u_0 = \frac{1}{2} \times 0.01 = 0.005 \text{ ไมโครเมตร}$$

- ความไม่แน่นอนของการวัดจากความผิดพลาดในการหมุน (rotation error) (u_r) มีค่าเท่ากับ 0.02 ไมโครเมตร

- ความไม่แน่นอนของการวัดจากความผิดพลาดในการอ่านค่า (readout error) (u_e) มีค่าเท่ากับ 1.28 ไมโครเมตร

เมื่อได้ค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่เกิดขึ้นจากแต่ละปัจจัย (individual uncertainty) จะสามารถหาความไม่แน่นอนของการวัดรวม (combined uncertainty) (u_{total}) ของเครื่องวัดความกลมได้ดังนี้

$$u_{total} = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (3.1)$$

เมื่อ u_i คือความไม่แน่นอนของการวัดที่เกิดขึ้นจากแต่ละปัจจัย เมื่อแทนค่าความไม่แน่นอนของการวัดของทั้ง 3 ปัจจัยที่คำนวณไว้ข้างต้นในสมการที่ 3.1 จะได้ว่า ความไม่แน่นอนของการวัดรวมของเครื่องวัดความกลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ

$$u_{total} = \sqrt{u_0^2 + u_r^2 + u_e^2} = \sqrt{0.005^2 + 0.02^2 + 1.28^2} = 1.28 \text{ ไมโครเมตร}$$

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องวัดความกลมยี่ห้อ ACCRETECH รุ่น RONDCOM60A

ความละเอียดในการวัด (resolution)	1 – 0.001 ไมโครเมตร	
ย่านการวัด (measurement range)	±12.8 – ±3200 ไมโครเมตร (ขึ้นอยู่กับความละเอียดในการวัดที่เลือกใช้)	
ความแม่นยำในการหมุน (rotation accuracy)	0.009 ไมโครเมตร	
ความแม่นยำในการอ่านค่า (readout accuracy)	0.02C (C คือ ย่านการวัดที่เลือกใช้)	
จำนวนจุดวัด (number of measurement points)	3600 จุด (ทุก 0.1 องศา)	
ชนิดของตัวกรอง (filter type)	Gaussian / 2RC	
ความถี่ตัดออฟ (cutoff frequency)	lowpass	15 / 50 / 150 / 500 upr (undulations per revolution)
	bandpass	15 ถึง 150 / 15 ถึง 500 upr
วิธีวัดความคลาดเคลื่อนจากความกลม (out-of-roundness evaluation method)	MZC / LSC / MCC / MIC	
ชนิดและขนาดของสไตลัส	Ø1.6 mm carbide ball ยาว 35 มิลลิเมตร	

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลการจัดเตรียมเครื่องวัดความกลมยี่ห้อ ACCRETECH รุ่น RONDCOM60A
สำหรับการทดลอง

ความละเอียดในการวัด (resolution)		0.01 ไมโครเมตร
ย่านการวัด (measurement range)		±32 ไมโครเมตร
ความแม่นยำในการหมุน (rotation accuracy)		0.009 ไมโครเมตร
ความแม่นยำในการอ่านค่า (readout accuracy)		1.28 ไมโครเมตร
จำนวนจุดวัด (number of measurement points)		3600 จุด (ทุก 0.1 องศา)
ชนิดของตัวกรอง (filter type)		Gaussian
ความถี่ตัดออฟ (cutoff frequency)	lowpass	50 upr
วิธีวัดความคลาดเคลื่อนจากความกลม (out-of-roundness evaluation method)		MZC
ชนิดและขนาดของสไตลัส		Ø1.6 mm carbide ball ยาว 35 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 เครื่องกลึงซีเอ็นซียี่ห้อ OKUMA รุ่น LB3000EX



รูปที่ 3.2 เม็ดมีด 25° rhombic shape insert ยี่ห้อ TUNGALOY



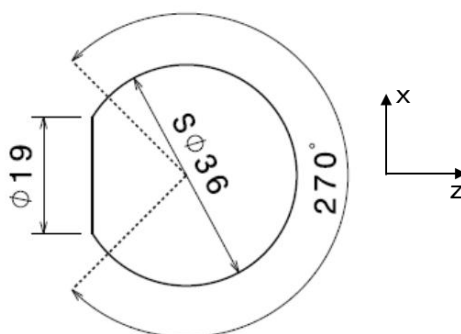
รูปที่ 3.3 เครื่องวัดความกลมยี่ห้อ ACCRETECH รุ่น ROND COM 60A

3.2.2. วัสดุที่ใช้กลึงหัวสะพานเทียม

เพลากลมเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร

3.2.3. ขนาดและรูปร่างของหัวสะพานเทียม

ขนาดและรูปร่างของหัวสะพานเทียมที่ทดลองกลึงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มิลลิเมตร และมีส่วนของทรงกลมครอบคลุมพื้นที่ใช้งาน 270 องศา ดังรูปที่ 3.4 (แกน x-z แสดงถึงแกนของเครื่องกลึง)



รูปที่ 3.4 ขนาดและรูปร่างของหัวสะเกียวเทียม

3.2.4. ข้อกำหนดในการกลึงหัวสะเกียวเทียม

การกำหนดข้อกำหนดในการทดลองกลึงหัวสะเกียวเทียม กระทำเพื่อควบคุมการกลึงหัวสะเกียวเทียมในแต่ละครั้งให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันตลอดทั้งการทดลอง โดยจะแบ่งเป็น 3 หัวข้อดังนี้

3.2.4.1. ขั้นตอนการกลึงและภาวะการตัด (cutting condition)

การกลึงหัวสะเกียวเทียมประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนกลึงหยาบ ขั้นตอนกลึงกึ่งละเอียด และขั้นตอนกลึงละเอียด ทั้ง 3 ขั้นตอนใช้เม็ดมีดตั้งที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.2.1.2 ความเร็วรอบสูงสุดของสปินเดิล (spindle) ที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนของการกลึงคือ 4,500 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการกลึงทั้งหมด 6 นาที 45 วินาทีต่อหนึ่งลูก ภาวะการตัดในแต่ละขั้นตอนที่กล่าวต่อไปนี้เป็นภาวะการตัดที่ได้จากการทดลองกลึงหลายครั้งจนได้ภาวะการตัดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ คือ หัวสะเกียวเทียมมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมน้อยที่สุดและไม่เกิดการสั่นในขณะกลึง (chattering) ดังนี้

- ขั้นตอนกลึงหยาบ
 - การกลึงหยาบปกติใช้ความเร็วตัด (cutting speed) 120 เมตรต่อนาที อัตราป้อน (feed) 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ และระยะกินลึก (depth of cut) 0.25 มิลลิเมตร ใช้เวลา 1 นาที 52 วินาที
 - การกลึงหยาบแบบเซาะร่อง (groove turning) ใช้ความเร็วตัด 120 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ ใช้เวลา 2 นาที 22 วินาที
- ขั้นตอนกลึงกึ่งละเอียดใช้ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และระยะกินลึก 0.1 มิลลิเมตร ใช้เวลา 1 นาที 19 วินาที
- ขั้นตอนกลึงละเอียดใช้ภาวะการตัดเดียวกับการกลึงกึ่งละเอียด ใช้เวลา 1 นาที 12 วินาที

3.2.4.2. การจับชิ้นงานก่อนกลึง

จับชิ้นงานให้ชิ้นงานมีความยาวจากหัวจับ (chuck) 55 มิลลิเมตร ก่อนกลึงทุกครั้ง เพื่อให้การเสียรูป (deformation) ของชิ้นงานขณะถูกแรงตัดกระทำ เป็นไปในลักษณะเดียวกันทุกการทดลอง

3.3. วิธีการทดลอง

ทดลองกลึงหัวสะโพกเทียมทั้งหมด 25 ลูก แล้วนำไปวัดความคลาดเคลื่อนจากความกลมรอบเส้นรอบวงในระนาบต่างๆ ที่ไม่ขนานกัน เพื่อหาระนาบที่มีความคลาดเคลื่อนจากความกลมสูงสุด แล้วใช้ค่าความคลาดเคลื่อนจากความกลมของเส้นรอบวงในระนาบนั้นเป็นค่าความคลาดเคลื่อนจากความ เป็นทรงกลม (ตามที่กล่าวไว้ในมาตรฐาน ASTM F2033)

3.4. ขั้นตอนการทดลอง

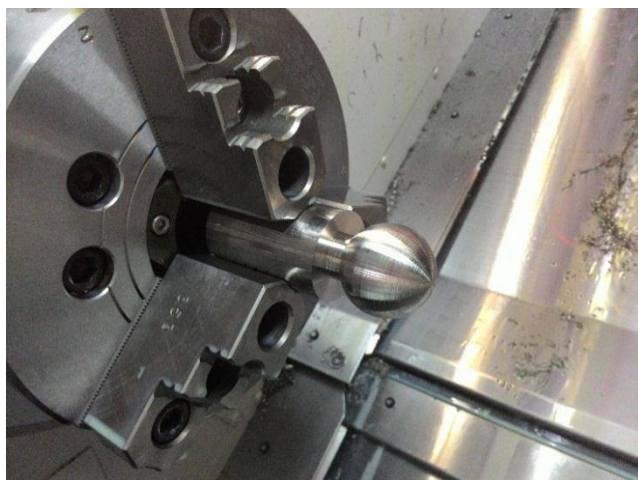
1. จับชิ้นงานให้ชิ้นงานมีความยาวจากหัวจับ 55 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.5
2. กลึงหยาบส่วนครึ่งทรงกลมด้านหน้าของหัวสะโพกเทียมจากเพลากลมให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม 36.4 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.6
3. กลึงหยาบแบบเซาะร่องส่วนครึ่งทรงกลมด้านหลังที่เป็นบริเวณ undercut ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม 36.4 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.7
4. กลึงกึ่งละเอียดส่วนของทรงกลมที่ต้องการให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม 36.2 มิลลิเมตร
5. กลึงละเอียดเพื่อให้ได้หัวสะโพกเทียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม 36 มิลลิเมตร ตามที่กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 3.2.3 ดังรูปที่ 3.8
6. ตัดส่วนที่ไม่ต้องการออกจะได้หัวสะโพกเทียมดังรูปที่ 3.9
7. กลึงหัวสะโพกเทียมตามขั้นตอนที่ 1 – 6 จนครบ 25 ลูก
8. นำหัวสะโพกเทียมทั้ง 25 ลูก มาวัดความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบต่างๆ ที่ไม่ขนานกัน เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนจากความ เป็นทรงกลม ดังรูปที่ 3.10



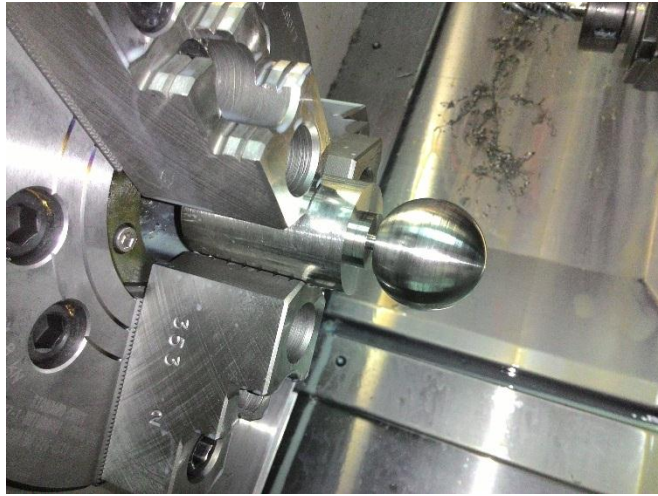
รูปที่ 3.5 การจับชิ้นงาน



รูปที่ 3.6 กลึงหยาบด้านหน้าหัวสะพานเทียม



รูปที่ 3.7 กลึงหยาบแบบเจาะร่องบริเวณ undercut



รูปที่ 3.8 กลึงละเอียดหัวสโปกเทียม

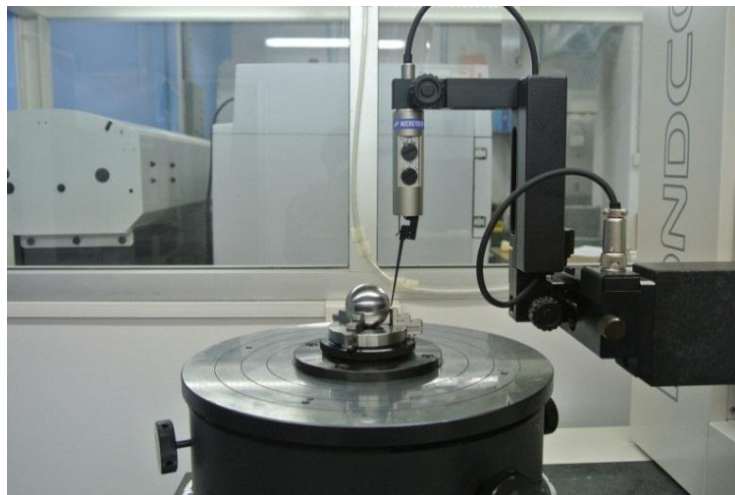


(ก) มุมมองจากด้านบน



(ข) มุมมองจากด้านข้าง

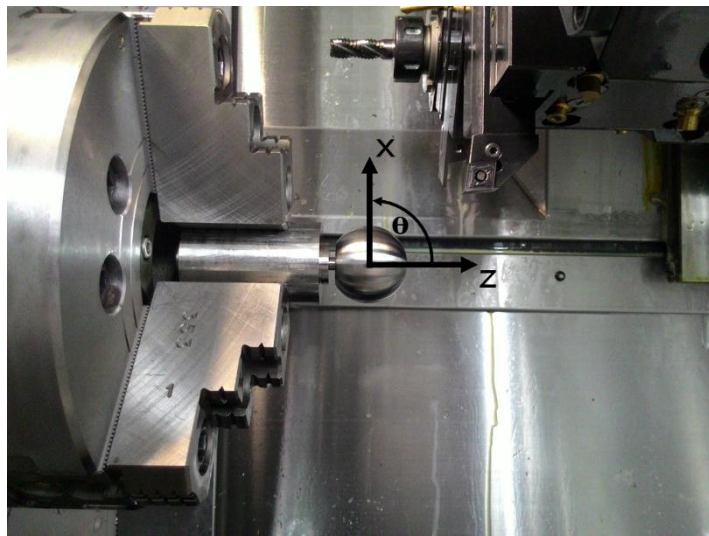
รูปที่ 3.9 หัวสโปกเทียมที่ได้จากการกลึง



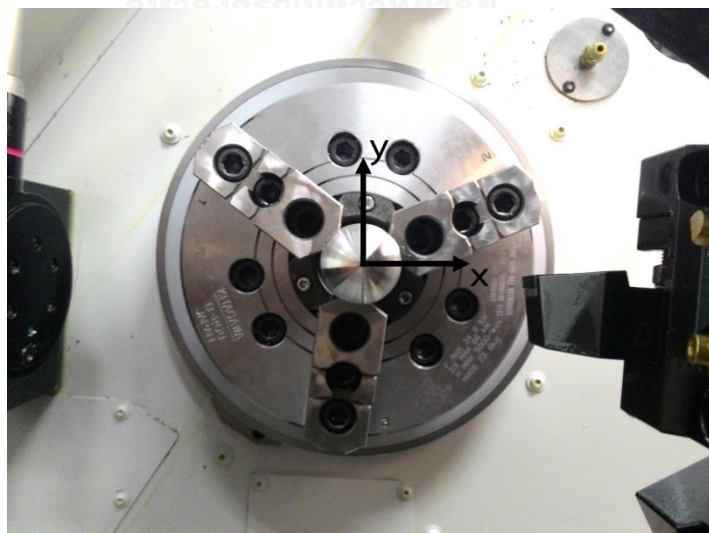
รูปที่ 3.10 การวัดความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสโปกเทียม

3.5. ผลการทดลองและการอภิปราย

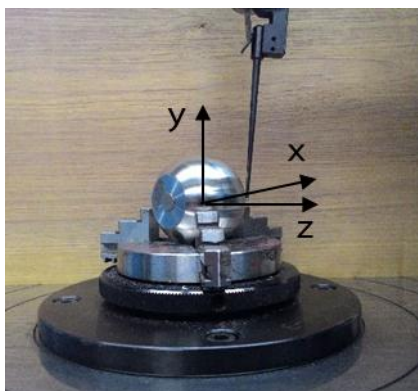
แกน x y และ z ในผลการทดลองต่อไปนี้อ้างอิงตามแกนของเครื่องกลึงซีเอ็นซี ระนาบ x - z คือระนาบที่มีดกลึงเคลื่อนที่ (ระนาบกลึง) ดังรูปที่ 3.11 และระนาบ x - y คือระนาบตั้งฉากกับแกนหมุนของสปินเดิลดังรูปที่ 3.12 การวัดความคลาดเคลื่อนจากความกลมของหัวสะพานเทียมในระนาบ x - z แสดงได้ดังรูปที่ 3.13 และการวัดความคลาดเคลื่อนจากความกลมของหัวสะพานเทียมในระนาบ x - y แสดงได้ดังรูปที่ 3.14



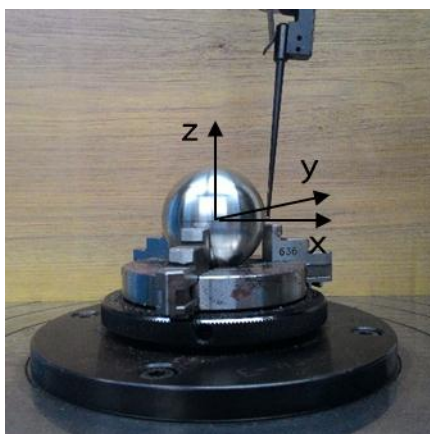
รูปที่ 3.11 ระนาบ x - z ของเครื่องกลึงซีเอ็นซี



รูปที่ 3.12 ระนาบ x - y ของเครื่องกลึงซีเอ็นซี



รูปที่ 3.13 การวัดความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ x-z

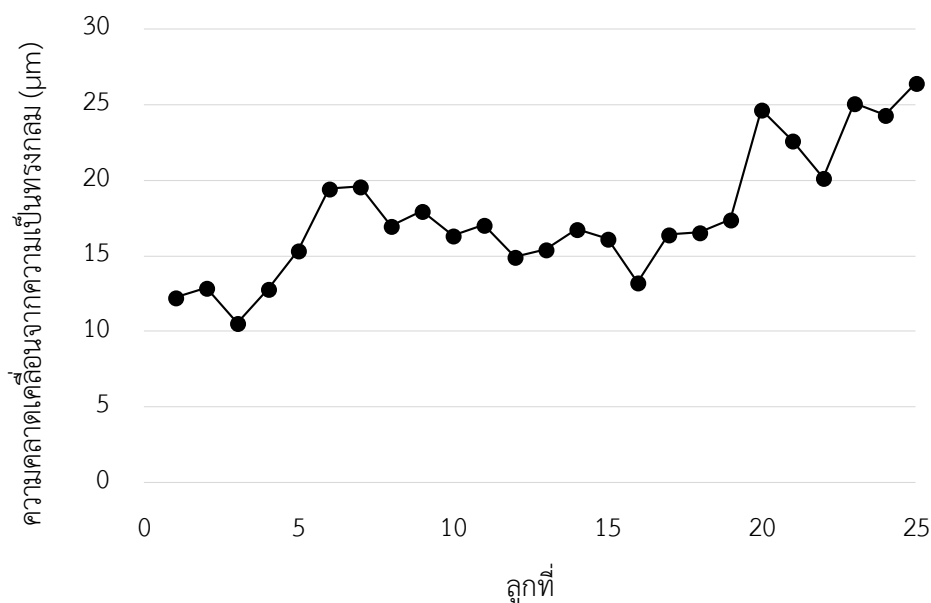


รูปที่ 3.14 การวัดความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ x-y

จากการวัดค่าความคลาดเคลื่อนจากความกลมของเส้นรอบในระนาบต่างๆ ของหัวสะโพกเทียม ทั้ง 25 ลูก พบว่า ความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ x-z มีค่าสูงที่สุด ดังนั้นความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมจึงมีค่าเท่ากับ ความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ x-z สามารถแสดงค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมทั้ง 25 ลูก ได้ดังกราฟในรูปที่ 3.15 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการวัด 5 ครั้งของแต่ละลูก ข้อมูลดิบของการวัดทั้ง 5 ครั้งของแต่ละลูกแสดงไว้ในตารางที่ ก.1 และค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมเฉลี่ยของทั้ง 25 ลูกเท่ากับ 17.66 ไมโครเมตร

จากผลการทดลองดังกล่าว พบว่า หัวสะโพกเทียมที่ได้จากการกลึงด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดา มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมมากกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM F2033 ที่กำหนดไว้ที่ 10 ไมโครเมตรสำหรับหัวสะโพกเทียมที่ใช้กับเข้าพลาสติก และ 5 ไมโครเมตรสำหรับหัวสะโพกเทียมที่ใช้กับเข้าโลหะ จึงทำให้ทราบว่าเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดาไม่สามารถกลึงหัวสะโพกเทียมให้มีความเป็นทรงกลมได้ตามมาตรฐาน แม้จะเป็นเครื่องกลึงซีเอ็นซีที่ยังไม่ผ่านการใช้

งานใดๆ มาก่อน ซึ่งแสดงถึงขีดความสามารถในการผลิตหัวสะโพกเทียมของเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบ
 ธรรมดาที่กลึงด้วยวิธีการปกติ



รูปที่ 3.15 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมทั้ง 25 ลูก

โปรไฟล์ความกลม (roundness profile) ที่เกิดขึ้นในระนาบ x-z ของหัวสะโพกเทียมทั้ง 25 ลูก
 แสดงในรูปที่ 3.16 ตำแหน่งมุมที่แสดงในโปรไฟล์ความกลมคือ มุม θ ที่กวาดจากแกน z ดังรูปที่
 3.11 (แกน z คือแกนหมุนของสปินเดิล) เมื่อพิจารณาโปรไฟล์ความกลมดังกล่าวพบว่า บริเวณ
 ตำแหน่งมุมที่ -15 องศา ถึง 15 องศา เป็นบริเวณที่เสียรูปทรงไป เนื่องจากภาวะการตัดที่ไม่เหมาะสม
 ที่มีสาเหตุมาจากความเร็วตัดที่ไม่เพียงพอ เพราะเป็นบริเวณที่ใกล้กับแกนหมุนของสปินเดิล
 เพื่อที่จะให้มีความเร็วตัดที่ต้องการ จำเป็นต้องใช้ความเร็วรอบสปินเดิลสูงมาก และสูงจนถึงอนันต์ที่
 ตำแหน่งแกนหมุนของสปินเดิล เพราะความเร็วตัดคือผลคูณระหว่างระยะทางจากแกนหมุนของสปิน
 เดิลกับความเร็วรอบสปินเดิล แต่ความเร็วรอบสูงสุดที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 4,500 รอบต่อนาที ซึ่ง
 เป็นความเร็วรอบสูงสุดที่ใช้งานเครื่องกลึงซีเอ็นซีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้อย่างปลอดภัย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงละเว้น (notch) บริเวณที่ภาวะการตัดไม่เหมาะสมดังกล่าวออกไป เพราะ
 ต้องการศึกษาและปรับปรุงความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของการกลึงด้วยเครื่องกลึง
 ซีเอ็นซีแบบธรรมดาที่ภาวะการตัดที่เหมาะสมตามขอบเขตของงานวิจัย เมื่อละเว้นบริเวณตำแหน่ง
 มุมที่ -15 องศา ถึง 15 องศาในโปรไฟล์ความกลมระนาบ x-z ดังรูปที่ 3.17 พบว่าความคลาดเคลื่อน
 จากความกลมในระนาบ x-z ของหัวสะโพกเทียมทั้ง 25 ลูกมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับ
 ความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบอื่น ความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ x-z

หลังจากละเว้นบริเวณที่ภาวะการตัดที่ไม่เหมาะสมนี้ยังคงมีค่าสูงที่สุด ดังนั้นความคลาดเคลื่อนจากความทรงกลมหลังจากละเว้นบริเวณที่ภาวะการตัดไม่เหมาะสมแล้ว จึงเท่ากับความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ x-z ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของทั้ง 25 ลูกเท่ากับ 11.13 ไมโครเมตร และแสดงค่าความคลาดเคลื่อนจากความทรงกลมหลังจากละเว้นบริเวณที่ภาวะการตัดไม่เหมาะสมของหัวสะโพกเทียมทั้ง 25 ลูกได้ดังกราฟในรูปที่ 3.18 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการวัด 5 ครั้งของแต่ละลูก ข้อมูลดิบของการวัดทั้ง 5 ครั้งของแต่ละลูกหลังจากละเว้นบริเวณที่ภาวะการตัดไม่เหมาะสมแสดงในตารางที่ ก.2

ตามทฤษฎีทางสถิติที่กล่าวไว้ใน [12] เมื่อให้โปรไฟล์ความกลมใดของหัวสะโพกเทียมลูกใดๆ ที่กลิ้งที่สภาวะเดียวกัน (condition) มีการแจกแจงแบบที (t distribution) จะสามารถหาความคลาดเคลื่อนจากความทรงกลมเฉลี่ยของประชากรหัวสะโพกเทียมที่กลิ้งด้วยสภาวะเดียวกันได้ดังนี้

$$\psi' = \bar{\psi} \pm t_{v,P} \frac{S_{\psi}}{\sqrt{n}} \quad (P\%) \quad (3.2)$$

เมื่อ

ψ' คือความคลาดเคลื่อนจากความทรงกลมเฉลี่ยของประชากรหัวสะโพกเทียม

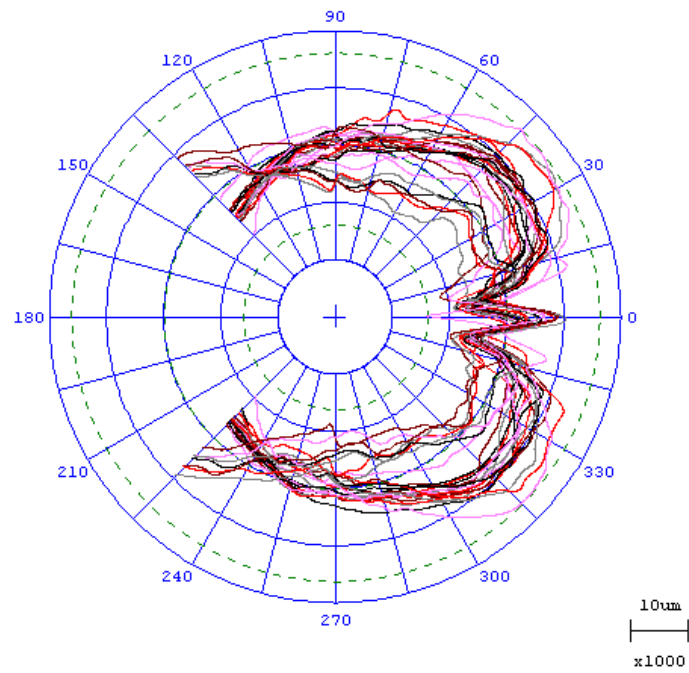
$\bar{\psi}$ คือความคลาดเคลื่อนจากความทรงกลมเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างหัวสะโพกเทียม

$t_{v,P}$ คือค่าที่จากการแจกแจงแบบที ที่มีองศาความเป็นอิสระเท่ากับ v ที่ระดับความเชื่อมั่น $P\%$

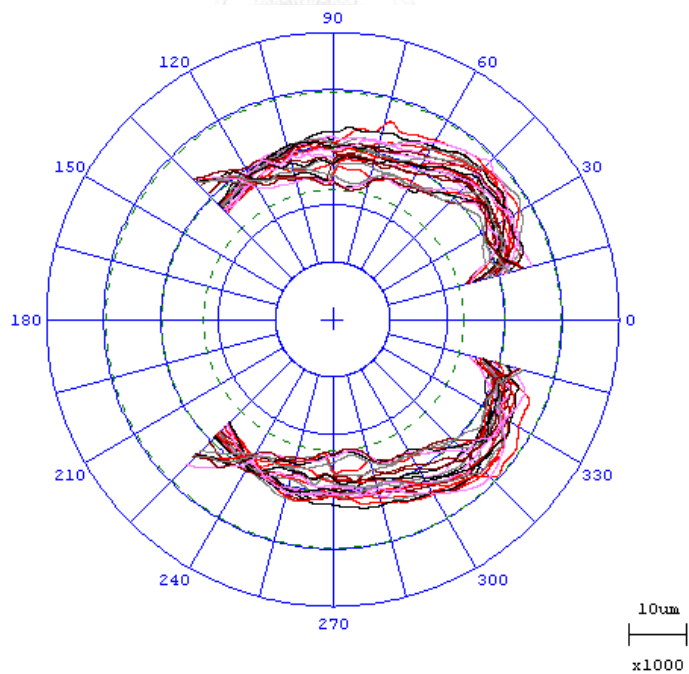
S_{ψ} คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่างหัวสะโพกเทียม

n คือจำนวนกลุ่มตัวอย่างหัวสะโพกเทียม (25 ลูก)

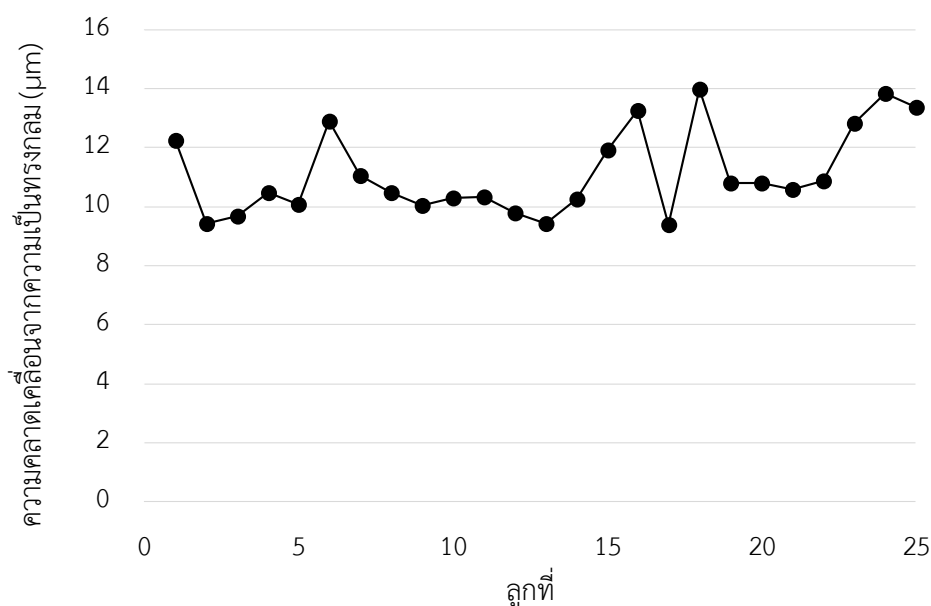
จากสมการที่ 3.2 จะสามารถหาค่าเฉลี่ยของประชากรหัวสะโพกเทียมที่กลิ้งด้วยสภาวะเดียวกับที่ใช้ในการทดลองนี้ได้ว่าจะอยู่ในช่วง 11.13 ± 0.60 ไมโครเมตรที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งหมายความว่า ความคลาดเคลื่อนจากความทรงกลมเฉลี่ยของประชากรหัวสะโพกเทียมที่กลิ้งด้วยสภาวะเดียวกันนี้จะมีค่าต่ำสุด 10.53 ไมโครเมตร และสูงสุด 11.73 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.16 โพรไฟล์ความกลมในระนาบ x-z ของหัวสะโพกเทียมทั้ง 25 ลูก
ก่อนเลว้บริเวณที่ภาวะการตัดไม่เหมาะสม



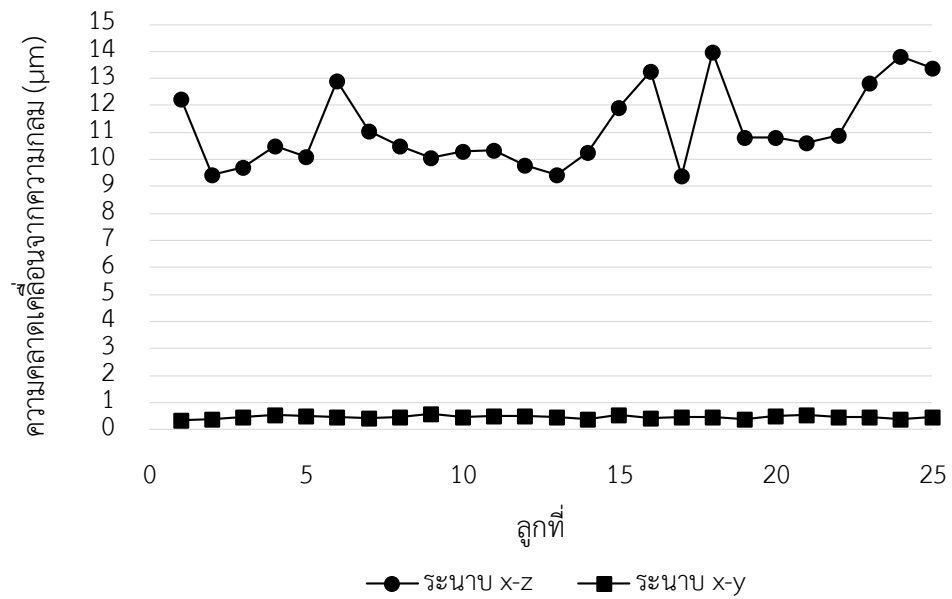
รูปที่ 3.17 โพรไฟล์ความกลมในระนาบ x-z ของหัวสะโพกเทียมทั้ง 25 ลูก
หลังจากเลว้บริเวณที่ภาวะการตัดไม่เหมาะสม



รูปที่ 3.18 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมทั้ง 25 ลูก
หลังจากละเว้นบริเวณที่ภาวะการตัดไม่เหมาะสม

จากรูปที่ 3.18 พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมบางลูกมีค่าน้อยกว่า 10 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานสำหรับหัวสะพานเทียมที่ใช้กับเข้าพลาสติก แต่อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมมีค่าเท่ากับ 11.13 ± 0.60 ไมโครเมตร และมีหัวสะพานเทียมบางลูกมีค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงถึง 13.97 ไมโครเมตร แสดงว่า โดยเฉลี่ยแล้วเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดาไม่สามารถผลิตหัวสะพานเทียมที่ใช้กับเข้าพลาสติกได้ตามมาตรฐาน เมื่อสังเกตผลการทดลองในกราฟรูปที่ 3.18 ต่อไปจะพบว่า หัวสะพานเทียมที่มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 9.41 ไมโครเมตร แสดงว่า เครื่องกลึงซีเอ็นซีไม่สามารถผลิตหัวสะพานเทียมที่ใช้กับเข้าโลหะได้ตามมาตรฐาน (น้อยกว่า 5 ไมโครเมตร)

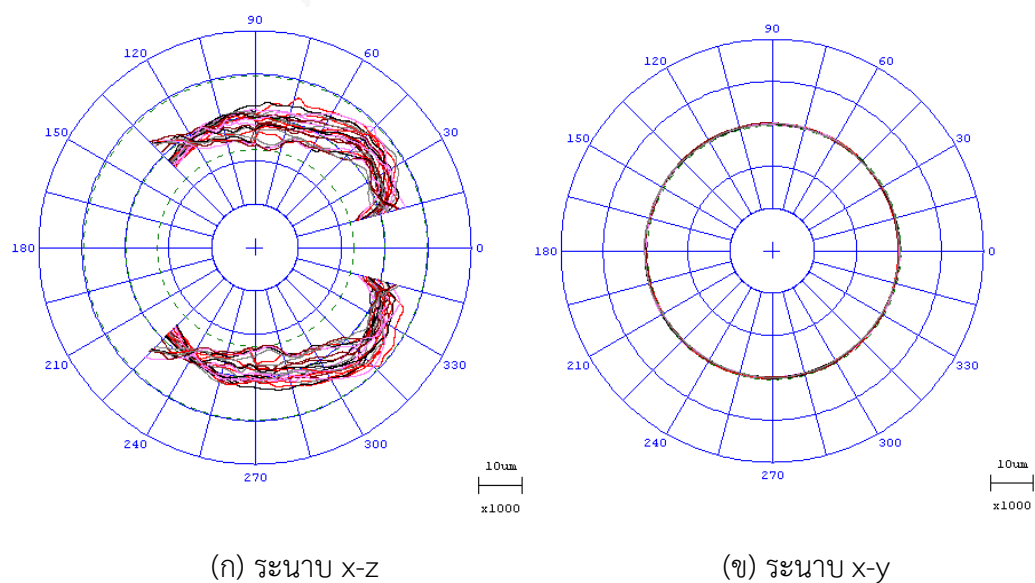
จากผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้นแสดงถึงขีดความสามารถของเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดาที่แม้ว่าจะกลึงหัวสะพานเทียมด้วยภาวะการตัดที่เหมาะสม ก็ไม่สามารถผลิตหัวสะพานเทียมที่ใช้กับเข้าพลาสติกให้เป็นไปตามมาตรฐานทุกลูก และไม่สามารถผลิตหัวสะพานเทียมที่ใช้กับเข้าโลหะให้เป็นไปตามมาตรฐานได้ ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงวิธีการกลึงเพื่อให้สามารถผลิตหัวสะพานเทียมที่มีความเป็นทรงกลมตามมาตรฐาน โดยเริ่มจากการหาสาเหตุของความไม่แม่นยำของเครื่องกลึงซีเอ็นซีดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.19 กราฟเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ x-z และ x-y

ตารางที่ 3.3 ความคลาดเคลื่อนจากความกลมเฉลี่ยในระนาบ x-z และ x-y ของหัวสโปกเทียม

ความคลาดเคลื่อนจากความกลมเฉลี่ย (ไมโครเมตร) (95%)	
ระนาบ x-z	ระนาบ x-y
11.13 ± 0.60	0.47 ± 0.02



รูปที่ 3.20 เปรียบเทียบโปรไฟล์ความกลมในระนาบ x-z และ x-y

เมื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนจากความกลมที่เกิดในระนาบ $x-z$ และ $x-y$ ของหัวสะพาน เทียมทั้ง 25 ลูก จากค่าความคลาดเคลื่อนจากความกลมในกราฟรูปที่ 3.19 โปรไฟล์ความกลมในรูปที่ 3.20 และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนจากความกลมในตารางที่ 3.3 พบว่าความคลาดเคลื่อนจากความกลมที่เกิดในระนาบ $x-z$ มีค่ามากกว่าความคลาดเคลื่อนจากความกลมที่เกิดในระนาบ $x-y$ ถึง 24 เท่า และความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ $x-y$ มีค่าน้อยกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานมาก ดังนั้นสาเหตุของความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมจึงมาจากความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ $x-z$

สาเหตุหลักของความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ $x-y$ มาจากการส่าย (runout) ของสปินเดิล เพราะระนาบ $x-y$ เป็นระนาบที่ตั้งฉากกับแกนหมุนของสปินเดิล แต่เนื่องจากความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ $x-y$ มีค่าเพียง 0.47 ไมโครเมตร จึงทำให้ทราบว่า การส่ายของสปินเดิลมีผลกระทบกับค่าคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเพียงน้อยมาก

เมื่อพิจารณาสาเหตุของความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ $x-z$ ซึ่งเป็นระนาบที่มีดกถึงเคลื่อนที่ พบว่า สาเหตุของความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ $x-z$ เกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น ความไม่แม่นยำของระบบควบคุมของเครื่องกลึงซีเอ็นซี ความคลาดเคลื่อนในการวางแนว (misalignment) ในการประกอบเครื่องกลึงซีเอ็นซี แรงเสียดทานในสไลด์เวย์ (slideway) ระยะเวลาคลอน (backlash) การสั่นสะเทือน อุณหภูมิที่ไม่คงที่ในขณะกลึง การเสียรูป (deformation) ของชิ้นงานในขณะกลึง หรือการสึกหรอของเม็ดมีด เป็นต้น ตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 1.1 แรงเสียดทานและระยะเวลาคลอนของเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดาทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งมีดกลึงได้ถึง 10 ไมโครเมตร ขึ้นอยู่กับเครื่องกลึงที่ใช้และระดับความสึกหรอของเครื่องกลึง และจากบันทึกการทดสอบ (test record) ของเครื่องกลึงซีเอ็นซีที่ใช้งาน (ยี่ห้อ OKUMA รุ่น LB3000EX เลขหมายประจำเครื่อง 155464) พบว่า แม้จะมีการเคลื่อนที่ของมีดกลึงในแกน z เพียงอย่างเดียวก็สามารถทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานคลาดเคลื่อนไป 1.2 ไมโครเมตร (สำหรับระยะทาง 36 มิลลิเมตร) เนื่องจากความไม่ขนานกันของแกนหมุนสปินเดิลกับสไลด์เวย์ของแกน z

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า ปัจจัยที่ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ $x-z$ โดยส่วนใหญ่แล้วเป็นผลมาจากลักษณะเฉพาะ (characteristic) ของเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดา และธรรมชาติของกระบวนการกลึง อีกทั้งยังไม่ทราบอีกหลายตัวแปรที่เป็นต้นเหตุของความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบนี้ ดังนั้นการแก้ไขปัญหาที่ต้นเหตุดังกล่าวจึงไม่สามารถกระทำได้อย่างง่าย แต่อย่างไรก็ตาม ระนาบ $x-z$ เป็นระนาบที่มีดกถึงเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงสามารถปรับเปลี่ยนเส้นทางเดินมีดกลึง (tool path) เพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบนี้ได้

จากรูปที่ 3.19 จะเห็นได้ว่า ความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ $x-z$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งที่กลึง ซึ่งเกิดจากการสึกหรอของเม็ดมีด เพราะหัวสะพานเทียมทั้ง 25 ลูกกลึงด้วยเม็ด

มิตเดียวกัน จึงเห็นได้ชัดว่า การสึกหรอของเม็ดกลิ้งเป็นปัจจัยหนึ่งที่กระทบต่อความเป็นทรงกลมของ หัวสะโปกเทียมที่ได้จากการกลิ้ง และสามารถกำจัดปัจจัยนี้ได้ด้วยการเปลี่ยนเม็ดมิตทุกครั้งก่อนกลิ้ง แต่ด้วยงบประมาณที่จำกัด งานวิจัยนี้จึงไม่สามารถกำจัดปัจจัยนี้ได้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้เห็นว่า ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการสึกหรอของเม็ดมิตมีค่าอยู่ในช่วงที่สามารถชดเชยได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโปกเทียมที่รวม ผลกระทบจากการสึกหรอของเม็ดมิตด้วย

3.6. สรุปผลการทดลอง

1. ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมเฉลี่ยของหัวสะโปกเทียมที่กลิ้งได้จากเครื่องกลิ้ง ซีเอ็นซีแบบธรรมดา มีค่าเท่ากับ 11.13 ± 0.60 ไมโครเมตร ที่ระดับความมั่นใจ 95% ดังนั้น โดยเฉลี่ยแล้ว เครื่องกลิ้งซีเอ็นซีแบบธรรมดาไม่สามารถผลิตหัวสะโปกเทียมที่มีความเป็นทรงกลมตามมาตรฐาน ASTM F2033 ได้
2. สาเหตุของความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโปกเทียมในการกลิ้งด้วย เครื่องกลิ้งซีเอ็นซีแบบธรรมดา มาจากความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบที่มีดกลิ้ง เคลื่อนที่ (ระนาบ x-z) ซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น ข้อจำกัดของ เครื่องกลิ้งซีเอ็นซีแบบธรรมดาและธรรมชาติของการกลิ้ง เป็นต้น และเกิดขึ้นจากปัจจัยที่สามารถควบคุมได้แต่ต้องใช้งบประมาณสูงในการวิจัย เช่น การสึกหรอของเม็ดมิต
3. ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโปกเทียมที่เกิดขึ้นจากการสึกหรอของ เม็ดมิตอยู่ในช่วงที่สามารถชดเชยได้
4. การส่ายของสปินเดิลมีผลกระทบกับความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโปก เทียมน้อยมาก

3.7. แนวทางการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโปกเทียม

จากผลการทดลองศึกษาเบื้องต้นพบว่า สาเหตุหลักของความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโปกเทียมที่ได้จากการกลิ้งด้วยวิธีปกติเกิดจากความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบที่มีดกลิ้งเคลื่อนที่ (ระนาบ x-z) ซึ่งมีต้นเหตุมาจากหลายปัจจัย ทั้งปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น ข้อจำกัดของเครื่องกลิ้งซีเอ็นซีแบบธรรมดาและธรรมชาติของการกลิ้ง เป็นต้น และปัจจัยที่สามารถควบคุมได้แต่ต้องใช้งบประมาณสูงในการวิจัย เช่น การสึกหรอของเม็ดมิต และยังมีอีกหลายปัจจัยที่ยังไม่ทราบที่เป็นต้นเหตุของความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบนี้ ดังนั้นการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโปกเทียมของงานวิจัยนี้จึงมุ่งเป้าไปที่การแก้ไขผลที่เกิดขึ้นจากต้นเหตุ

เท่านั้น นั่นคือ การปรับเปลี่ยนเส้นทางเดินมีดกลิ้งเพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ x-z

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 พบว่า การปรับเปลี่ยนเส้นทางเดินมีดกลิ้งเพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี กระทำได้โดยการติดตั้งฟาสต์ทูลเซอร์ไวบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี และใช้ฟาสต์ทูลเซอร์ไวขับเคลื่อนมีดกลิ้งชดเชยระยะคลาดเคลื่อนนั้นในขณะกลึง เนื่องจากฟาสต์ทูลเซอร์ไวมีความเที่ยงตรง (precision) และความแม่นยำ (accuracy) ในการเคลื่อนที่สูง มีความละเอียดในการเคลื่อนที่ในระดับนาโนเมตร และมีช่วงเวลาการตอบสนอง (response time) ในระดับมิลลิวินาที

งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ฟาสต์ทูลเซอร์ไวเพื่อขับเคลื่อนมีดกลิ้งชดเชยความคลาดเคลื่อนจากความกลมในขณะกลึง เพื่อปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสวะโปกเทียม เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงและความแม่นยำในการเคลื่อนที่สูงและมีความเร็วในการขับเคลื่อนเพียงพอที่จะใช้งานในขณะกลึง



บทที่ 4

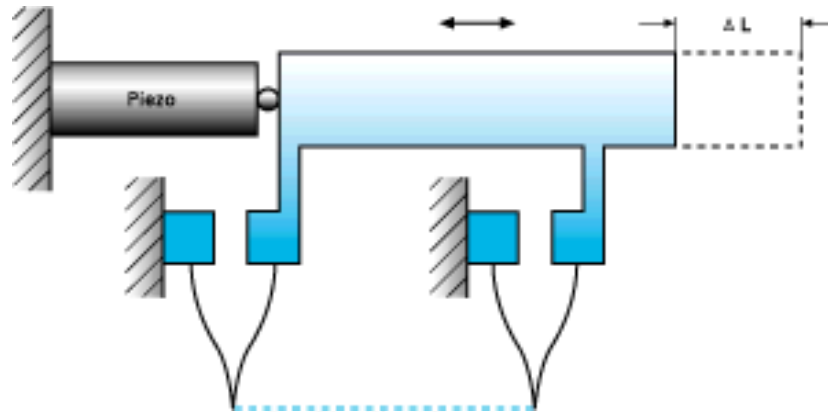
การออกแบบและผลิตฟาสต์ทูลเซอร์ไว

4.1. แนวทางการออกแบบ

ฟาสต์ทูลเซอร์ไวแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ตัวขับเคลื่อน (actuator) และระบบนำทาง (guiding system) ดังรูปที่ 4.1 จากการศึกษางานวิจัย [8],[5] และ [9] พบว่าเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) เป็นตัวขับเคลื่อนที่นิยมใช้ในฟาสต์ทูลเซอร์ไวเพื่อติดตั้งเครื่องกลึงแบบธรรมดา (conventional CNC lathe) และเครื่องกลึงแบบความแม่นยำสูง (ultra precision CNC lathe) เพราะเป็นตัวขับเคลื่อนที่มีความแม่นยำสูง (high accuracy) มีความเที่ยงตรงสูง (high precision) มีความละเอียด (resolution) ในระดับนาโนเมตร และมีช่วงเวลาการตอบสนอง (response time) ในระดับมิลลิวินาที เพียโซอิเล็กทริกสามารถรับแรงอัด (compression force) ได้ในแนวแกนการขยายตัว (axial) เท่านั้น ไม่สามารถรับแรงดึง (tensile force) แรงเฉือน (shear force) แรงบิด (torque) หรือ โมเมนต์ดัดได้ (bending moment) จึงไม่สามารถใช้เพียโซอิเล็กทริกเพียงอย่างเดียวเพื่อใช้ในงานในขณะกลึงได้ เพราะในขณะกลึงจะมีแรงจากทุกทิศทาง ดังนั้นจึงต้องออกแบบระบบนำทางเพื่อรับแรงในทิศทางที่จะทำให้เพียโซอิเล็กทริกเสียหาย ระบบนำทางที่นิยมใช้ในฟาสต์ทูลเซอร์ไวคือ ระบบนำทางแบบ flexure เนื่องจากเป็นระบบนำทางที่ไม่มีแรงเสียดทานเข้ามาเกี่ยวข้อง และคุณสมบัติของระบบนำทางขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการเสียรูปแบบยืดหยุ่น (elastic deformation) ของวัสดุที่นำมาผลิต ทำให้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ได้ง่าย ระบบนำทางแบบ flexure สามารถรับแรงได้มาก ไม่เกิดการสึกหรอ และไม่ต้องใช้สารหล่อลื่น ทำให้บำรุงรักษาได้ง่าย และสามารถใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ

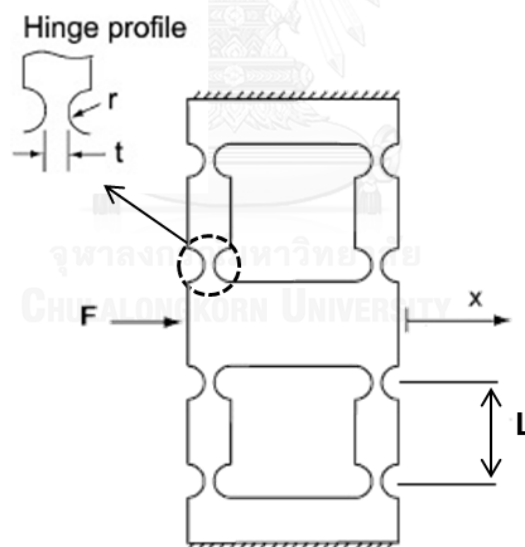
งานวิจัยนี้จะใช้หลักการออกแบบลักษณะของระบบนำทางตามแนวทางของงานวิจัย [5] คือ ใช้ flexure ทั้งหมด 4 อัน flexure แต่ละอันมีข้อพับ (hinge) 2 ตำแหน่ง และตำแหน่งของ flexure ทั้งหมดขนานและสมมาตรกันดังรูปที่ 4.2 การเคลื่อนที่ของระบบนำทาง (x ในรูปที่ 4.2) เกิดจากการเสียรูป (deformation) ของ flexure ที่ถูกกระทำด้วยแรงจากการขยายตัวของเพียโซอิเล็กทริก (F ในรูปที่ 4.2) การใช้ flexure ที่มีความสมมาตรทำให้การเคลื่อนที่ของระบบนำทางเป็นเส้นตรง ไม่มี parasitic error ต่างจากการใช้ระบบนำทาง flexure แบบสี่เหลี่ยมด้านขนาน (parallelogram flexure) ดังรูปที่ 4.3 เนื่องจาก flexure แบบสี่เหลี่ยมด้านขนานจะเคลื่อนที่ในแนววิถีโค้งทำให้เกิด parasitic error เป็นระยะทาง ΔH ตามรูปที่ 4.3 ดังนั้นการใช้ระบบนำทางแบบ flexure แบบขนานที่สมมาตรกันทำให้สามารถควบคุมตำแหน่งของมีดกลึงในแนวแกนที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ

งานวิจัยนี้จึงออกแบบฟาสต์ทูลเซอร์โวโดยใช้ตัวขับเคลื่อนเป็นเพียโซอิเล็กทริกและระบบนำทางเป็นแบบ flexure แบบขนานที่สมมาตรกัน และติดตั้งให้ขับเคลื่อนมีดกลึงในแนวรัศมีของเครื่องกลึง (แกน x ของเครื่องกลึง) เพื่อปรับเปลี่ยนเส้นทางเดินมีดกลึงในระนาบ x-z ในการกลึงหัวสโปกเทียม

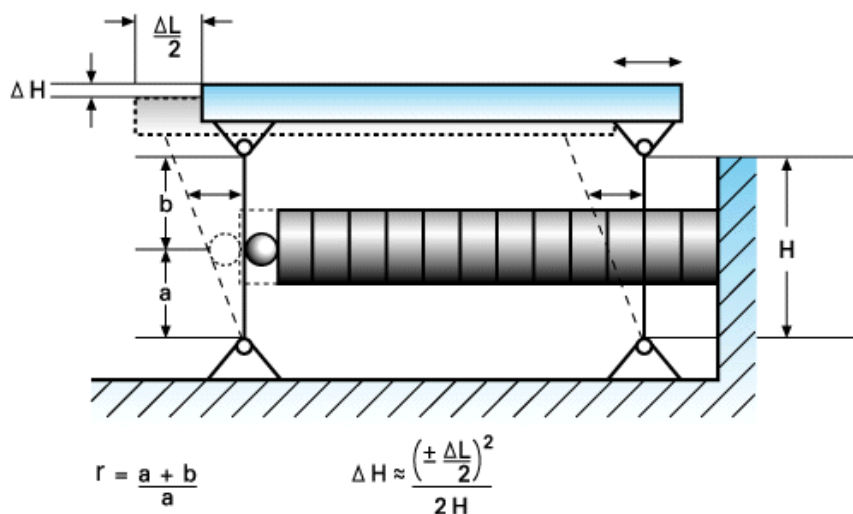


รูปที่ 4.1 ตัวขับเคลื่อนและระบบนำทาง

(ที่มา : http://www.pi-usa.us/tutorial/4_43.html)



รูปที่ 4.2 flexure แบบขนานและสมมาตร [5]



รูปที่ 4.3 flexure แบบสี่เหลี่ยมด้านขนาน

(ที่มา : http://www.pi-usa.us/tutorial/4_43.html)

4.2. ข้อกำหนดการออกแบบ

ข้อกำหนดการออกแบบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ข้อกำหนดการเลือกรุ่นของเพียโซอิเล็กทริก และเครื่องขยายสัญญาณ (amplifier) และข้อกำหนดการออกแบบระบบนำทาง

4.2.1. ข้อกำหนดการเลือกรุ่นเพียโซอิเล็กทริกและเครื่องขยายสัญญาณ

ข้อกำหนดที่สำคัญในการเลือกรุ่นของเพียโซอิเล็กทริกและเครื่องขยายสัญญาณคือระยะขยายตัวออกสูงสุด (stroke) ของเพียโซอิเล็กทริกและช่วงเวลาการตอบสนอง จากการทดลองเบื้องต้นในบทที่ 3 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมนั้นมีค่าสูงสุดเท่ากับ 14 ไมโครเมตร ดังนั้นเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ต้องมีระยะขยายตัวออกสูงสุดมากกว่า 14 ไมโครเมตร และการกำหนดช่วงเวลาการตอบสนองอ้างอิงจากจากงานวิจัย [5] ที่ใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวกลิ่งโปรไฟล์ในระดับไมโครเมตร ในงานวิจัยดังกล่าวใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวที่มีเวลาขึ้น (rise time) 10 มิลลิวินาที ในการควบคุมให้ฟาสต์ทูลเซอร์โวเคลื่อนที่ไปตามโปรไฟล์ ดังนั้นเพียโซอิเล็กทริกและเครื่องขยายสัญญาณต้องขยายตัวออกหรือหดตัวด้วยเวลาขึ้นไม่เกิน 10 มิลลิวินาที

4.2.2. ข้อกำหนดการออกแบบระบบนำทาง

ระบบนำทางที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือระบบนำทางแบบ flexure ข้อกำหนดของการออกแบบระบบนำทางมีดังนี้

1. มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการใช้ภายในเครื่องกลึงซีเอ็นซีและสามารถประกอบเข้ากับเครื่องกลึงซีเอ็นซีที่ใช้ในงานวิจัยได้
2. เมื่อประกอบตัวขับเคลื่อน (เพียโซอิเล็กทริก) เข้ากับระบบนำทางแล้วระยะขับเคลื่อนมีดกลึงต้องไม่น้อยกว่า 14 ไมโครเมตร เพื่อครอบคลุมระยะขดเซยค่าความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ x-z ตามที่ได้จากการทดลองในบทที่ 3
3. ส่วนเคลื่อนที่ (moving section) ของระบบนำทางมีความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ในทิศทางที่ใช้งานสูงกว่าความถี่ใช้งาน เพื่อให้ความกว้างแถบความถี่ (bandwidth) ของระบบนำทางครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน และความถี่ธรรมชาติของโหมดแรก (first mode) (ความถี่ธรรมชาติที่ต่ำที่สุดของระบบ) ของระบบนำทางสูงกว่าความถี่ของแรงตัดที่เกิดขึ้น เพื่อป้องกันการสั่นพ้อง (resonance) ที่เกิดขึ้นจากแรงตัด
4. ส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทางต้องสัมผัสเพียโซอิเล็กทริกตลอดเวลาขณะที่เพียโซอิเล็กทริกขยายตัวหรือหดตัว
5. ระบบนำทางมีความแข็งแรงต่อการล้าตัวเพียงพอ (fatigue strength) ที่จะรับแรงจากเพียโซอิเล็กทริกขณะขยายตัวออกเต็มที่ และแรงตัดที่เกิดขึ้น เนื่องจากการใช้งานอยู่ภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงที่กระทำตลอดเวลา

4.3. รายละเอียดการเลือกรุ่นของเพียโซอิเล็กทริกและเครื่องขยายสัญญาณ

งานวิจัยนี้เลือกใช้เพียโซอิเล็กทริกยี่ห้อ PI รุ่น P-845.30 ที่มีข้อมูลจำเพาะ (specification) ดังตารางที่ 4.1 มีเซนเซอร์วัดระยะขยายตัวเป็นแบบเกจวัดความเครียด (strain gauge) และเลือกใช้เครื่องขยายสัญญาณยี่ห้อ PI รุ่น E-625 ที่มีคุณสมบัติตามแผนภาพในรูปที่ 4.4 จากแผนภาพดังกล่าวเมื่อกำหนดแอมพลิจูด (amplitude) ที่เพียงพอต่อการใช้งานให้มีค่าเท่ากับ 22.5 ไมโครเมตร (50 โวลต์ ตามแผนภาพ) จะสามารถหาความถี่สูงสุดที่สามารถใช้งานได้เท่ากับ 40 เฮิร์ตซ์ และนำความถี่มาคำนวณหาช่วงเวลาขึ้น (10% - 90%) จากสมการใน [13] ดังนี้

$$t_r = \frac{1.8}{2\pi f}$$

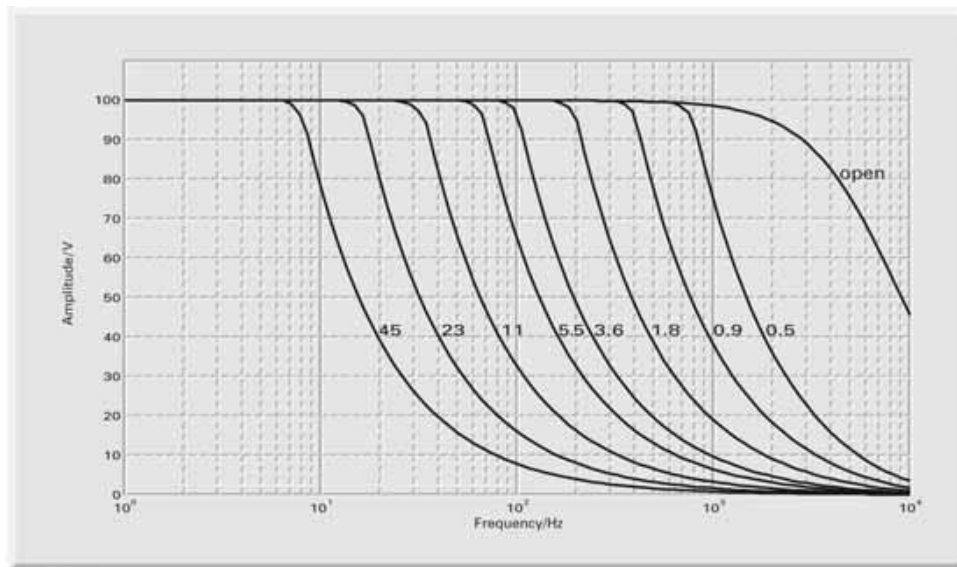
เมื่อ t_r คือ เวลาช่วงขึ้น (วินาที) และ f คือความถี่ (40 เฮิร์ตซ์) จะได้ช่วงเวลาขึ้นเท่ากับ 7.16 มิลิวินาที นอกจากนี้เครื่องขยายสัญญาณที่เลือกยังมีความสามารถในการควบคุมแบบป้อนกลับ

(feedback control) ระยะเวลาขยายตัวของเพียโซอิเล็กทริก โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI controller) แผนภาพบล็อก (block diagram) ของระบบควบคุมป้อนกลับแบบพีไอภายในเครื่องขยายสัญญาณ แสดงได้ดังรูปที่ 4.5

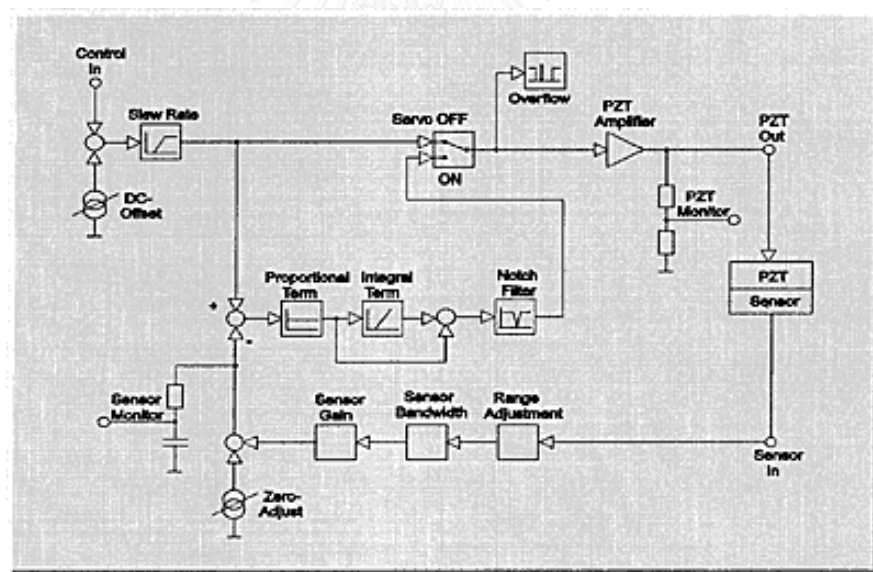
จากคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกและเครื่องขยายสัญญาณที่เลือกข้างต้น เห็นได้ว่าเป็นไปตามข้อกำหนดการออกแบบที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 ทุกประการ คือ เพียโซอิเล็กทริกมีระยะยืด 45 ไมโครเมตร ซึ่งมากกว่า 14 ไมโครเมตรที่กำหนดไว้ และมีช่วงเวลาขึ้น 7.16 มิลลิวินาที ซึ่งน้อยกว่า 10 มิลลิวินาทีที่กำหนดไว้ในข้อกำหนดการออกแบบ

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลจำเพาะของเพียโซอิเล็กทริกยี่ห้อ PI รุ่น P-845.30

ระยะขยายตัวสูงสุด	45 ไมโครเมตร
ความละเอียดในการขยายตัว	0.9 นาโนเมตร
ความแข็งตึง	75 นิวตันต่อไมโครเมตร
ทนแรงอัดสูงสุด	3,000 นิวตัน
ทนแรงดึงสูงสุด	700 นิวตัน
ความจุไฟฟ้า	18 ไมโครฟารัด
ความถี่ธรรมชาติ	9 กิโลเฮิรตซ์
มวล	132 กรัม
ความยาว	83 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.4 แผนภาพคุณสมบัติของเครื่องขยายสัญญาณยี่ห้อ PI รุ่น E-625
(ที่มา : http://www.pi-usa.us/pztcontrolelectronics/6_31.html)



รูปที่ 4.5 แผนภาพบล็อกระบบควบคุมแบบป้อนกลับแบบพีไอภายในเครื่องขยายสัญญาณ
(ที่มา : http://www.pi-usa.us/pztcontrolelectronics/6_31.html)

4.4. การออกแบบระบบนำทาง

รายละเอียดการออกแบบระบบนำทางจะคำนึงถึงความแข็งตึง (stiffness) ของ flexure ในทิศทางการเคลื่อนที่ของมีดกลึง (ทิศทาง x ในรูปที่ 4.2) เป็นอันดับแรก เพราะความแข็งตึงของ flexure ทำให้ระยะขยายตัวสูงสุดของเพียโซอิเล็กทริกลดลง เนื่องจากแรงสปริงจาก flexure ส่งผลให้ระยะขับเคลื่อนมีดกลึงสูงสุดลดลง ระยะขยายตัวสูงสุดของเพียโซอิเล็กทริกหลังจากประกอบเข้ากับระบบนำทาง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta L = \Delta L_0 \frac{K_t}{K_t + K_x} \quad (4.1)$$

เมื่อ

ΔL คือระยะขยายตัวสูงสุดของเพียโซอิเล็กทริกหลังจากประกอบเข้ากับระบบนำทาง (ไมโครเมตร)

ΔL_0 คือระยะขยายตัวสูงสุดปกติของเพียโซอิเล็กทริก (45 ไมโครเมตร)

K_t คือความแข็งตึงของเพียโซอิเล็กทริกในทิศทางที่เพียโซอิเล็กทริกขยายตัว (ทิศทางของแรง F ในรูปที่ 4.2) (75 นิวตันต่อไมโครเมตร)

K_x คือความแข็งตึงของ flexure ในทิศทางการเคลื่อนที่ของมีดกลึง (ทิศทาง x ในรูปที่ 4.2) (นิวตันต่อไมโครเมตร)

จากข้อกำหนดการออกแบบในหัวข้อที่ 4.1.2 ฟาสต์ทูลเซอร์โวต้องขับเคลื่อนมีดกลึงให้ได้ระยะทางสูงสุดอย่างน้อย 14 ไมโครเมตร งานวิจัยนี้เลือกให้ฟาสต์ทูลเซอร์โวสามารถขับเคลื่อนมีดกลึงให้ได้ระยะทางสูงสุด 40 ไมโครเมตร นั่นคือ ระยะขยายตัวสูงสุดของเพียโซอิเล็กทริกหลังจากประกอบเข้ากับระบบนำทาง เท่ากับ 40 ไมโครเมตร เมื่อคำนวณโดยใช้สมการที่ 4.1 จะได้ว่า ค่าความแข็งตึงของระบบนำทางต้องมีค่าประมาณ 9.4 นิวตันต่อไมโครเมตร

เมื่อกำหนดค่าความแข็งตึงของ flexure ที่ต้องการแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การคำนวณหาขนาดของ flexure และโปรไฟล์ (profile) ของข้อพับ ค่าความแข็งตึงของ flexure ที่มีลักษณะดังรูปที่ 4.2 สามารถคำนวณได้จากสมการที่แสดงไว้ในงานวิจัย [5] คือ

$$K_x = \frac{16Ebt^{\frac{5}{1}}}{9\pi r^2 L^2} \quad (4.2)$$

เมื่อ

K_x คือความแข็งดิ่งของ flexure ในทิศทางการเคลื่อนที่ของมีดกลึง (9.4×10^6 นิวตันต่อเมตร)

E คือโมดูลัสของยัง (Young's modulus) (ปาสคาล)

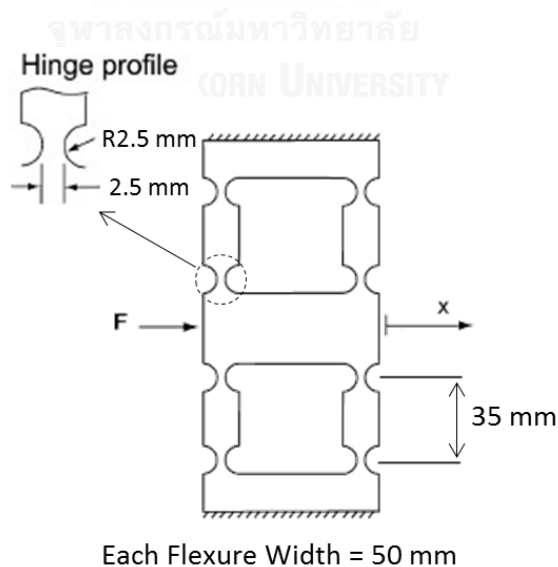
b คือความกว้างของ flexure แต่ละอัน (เมตร)

t คือความหนาของข้อพับของ flexure (เมตร)

r คือ รัศมีของข้อพับของ flexure (เมตร)

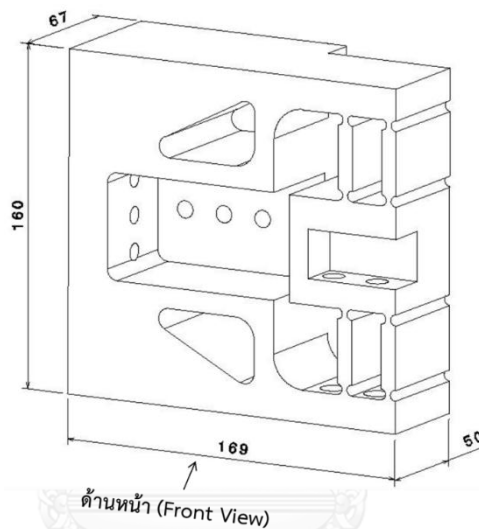
L คือความยาวของ flexure แต่ละอัน (เมตร)

จากสมการที่ 4.2 พบว่า $K_x \propto \frac{E}{L^2}$ เพื่อให้ขนาดของฟาสต์ทูลเซอร์โวมินขนาดเล็ก นั้นคือ ต้องการให้ความยาวของ flexure (L) มีค่าน้อย จึงเลือกใช้วัสดุที่มีค่าโมดูลัสของยังน้อย และเพื่อให้สามารถเคลื่อนย้ายและประกอบได้ง่าย วัสดุที่ใช้ควรมีน้ำหนักเบา แต่มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะใช้งานตามข้อกำหนดการออกแบบ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อะลูมิเนียม 7075-T6 ที่มีค่าโมดูลัสของยังเท่ากับ 71.7 จิกะปาสคาล ความแข็งแรงต่อการล้าตัว 159 เมกะปาสคาล จากนั้นใช้สมการที่ 4.2 กำหนด ความกว้างของ flexure แต่ละอัน (b) ความยาวของ flexure แต่ละอัน (L) ความหนาของข้อพับ (t) และรัศมีของข้อพับ (r) ให้สอดคล้องกับความแข็งดิ่งของ flexure ที่ต้องการ ซึ่งค่าที่เลือกใช้คือ ความกว้างของ flexure แต่ละอันเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ความยาวของ flexure แต่ละอันเท่ากับ 35 มิลลิเมตร ความหนาของข้อพับเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร และรัศมีของข้อพับเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร สามารถแสดงให้เห็นขนาดโดยรวมได้ดังรูปที่ 4.6

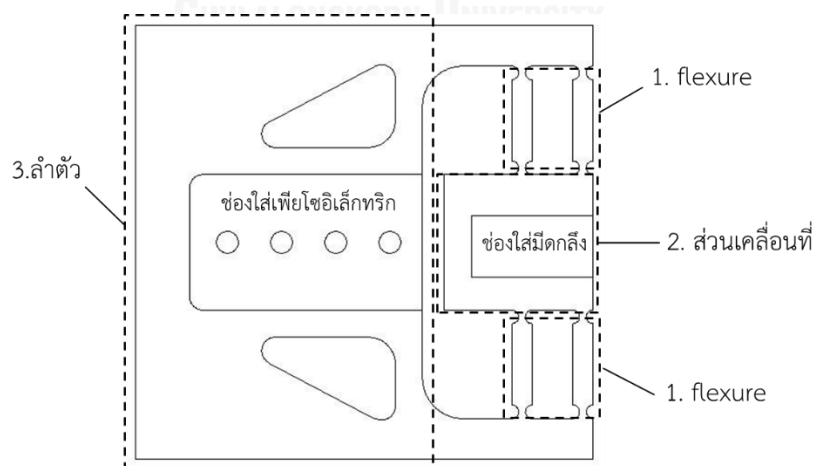


รูปที่ 4.6 รูปร่างและขนาดของ flexure ที่ออกแบบ

เมื่อกำหนดขนาดของ flexure ได้แล้ว จึงใช้โปรแกรม CATIA ออกแบบรูปร่างของระบบนำทาง จนได้ระบบนำทางที่มีรูปร่างดังรูปที่ 4.7 และมีขนาดโดยรวมคือ 169 มิลลิเมตร × 160 มิลลิเมตร × 67 มิลลิเมตร มีน้ำหนัก 3.9 กิโลกรัม ระบบนำทางที่ออกแบบแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ flexure (หมายเลข 1 ในรูปที่ 4.8) ส่วนเคลื่อนที่ (หมายเลข 2 ในรูปที่ 4.8) และลำตัว (body) (หมายเลข 3 ในรูปที่ 4.8) โดยส่วนเคลื่อนที่จะมีช่องสำหรับใส่ด้ามมีดกลึง และส่วนลำตัวจะมีช่องสำหรับใส่เพียโซอิเล็กทริก สามารถแสดงส่วนต่างๆของระบบนำทางบนภาพฉายด้านหน้าได้ดังรูปที่ 4.8 โดยอ้างอิงทิศทางของการมองภาพฉายตามรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ขนาดและรูปร่างของระบบนำทางที่ออกแบบ และการอ้างอิงทิศทางของการมองภาพฉาย



รูปที่ 4.8 ส่วนต่างๆ ของระบบนำทาง

งานวิจัยนี้จะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของ flexure ความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณต่างๆ บนโครงสร้างเมื่อรับภาระ (load) สูงสุดขณะใช้งาน โหมดการสั่นสะเทือน (mode of vibration) และความถี่ธรรมชาติของแต่ละโหมดที่ส่งผลต่อการใช้งานของระบบนำทาง โดยใช้โครงร่างตาข่าย (mesh) ขนาด 2 มิลลิเมตรในการคำนวณ และโปรแกรมที่ใช้คือ ANSYS

ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทดสอบความแข็งแรงของ flexure ที่ได้จากการออกแบบข้างต้น โดยการใส่แรงกระทำ F ที่ส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทาง ในทิศทาง $+x$ ซึ่งเป็นทิศทางในการขับเคลื่อนมีดกลึง เพื่อให้โปรแกรมคำนวณระยะ x ที่ส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทางเคลื่อนที่ไป ตามรูปที่ 4.9 จากนั้นนำระยะ x ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม มาคำนวณหาความแข็งแรงด้วยสมการ

$$F = K_x x \quad (4.3)$$

เมื่อ

F คือแรงที่กระทำที่ส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทาง (นิวตัน)

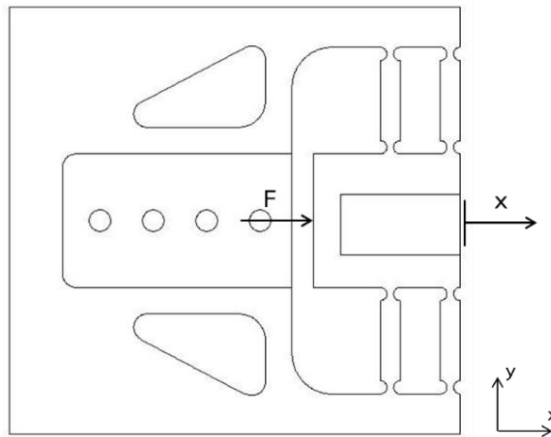
K_x คือความแข็งแรงของ flexure ในแกน x (นิวตันต่อไมโครเมตร)

x คือระยะที่ส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทางเคลื่อนที่ไปในแกน x (ไมโครเมตร)

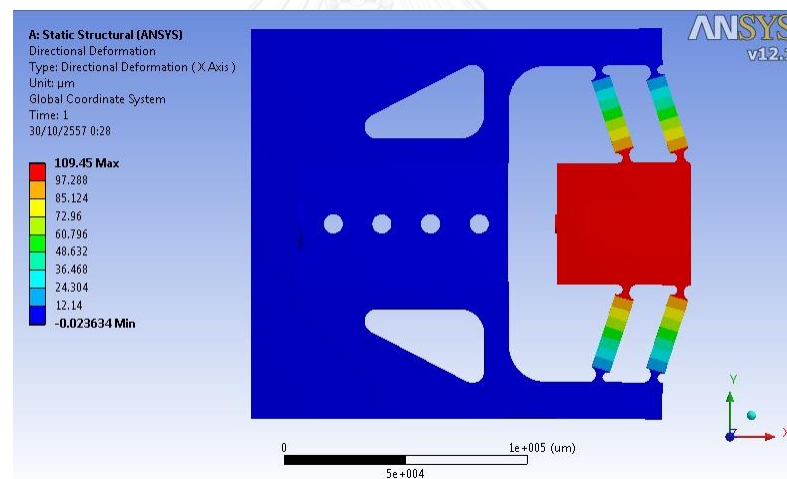
จะได้ว่า ความแข็งแรงของ flexure ในระบบนำทางที่ออกแบบมีค่าเท่ากับ 9.14 นิวตันต่อไมโครเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงที่ต้องการที่กล่าวไว้ข้างต้น คือ 9.4 นิวตันต่อไมโครเมตร โดยแตกต่างกันเพียง 2.8% เมื่อประกอบเพียโซอิเล็กทริกเข้ากับระบบนำทางที่มีขนาดของ flexure ตามที่ออกแบบ เพียโซอิเล็กทริกจะมีระยะขยายตัวสูงสุด 40.1 ไมโครเมตร ใกล้เคียงกับระยะขยายตัวสูงสุดที่ต้องการคือ 40 ไมโครเมตร ดังนั้นจึงสามารถใช้ flexure ที่ออกแบบนี้ในระบบนำทางเพื่อให้ได้ระยะขับเคลื่อนมีดกลึงตามที่ต้องการได้ และสอดคล้องกับข้อกำหนดการออกแบบระบบนำทางที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2 ข้อที่ 2 ทุกประการ

จากนั้นใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์โหมดการสั่นของระบบนำทาง พบว่าโหมดแรกสั่นที่บริเวณส่วนเคลื่อนที่ ในทิศทางที่ใช้ขับเคลื่อนมีดกลึง (ทิศทางในแนวแกน x) ด้วยความถี่ธรรมชาติ 792 เฮิรตซ์ และมีรูปร่างของโหมด (mode shape) ดังรูปที่ 4.10 ตามข้อกำหนดการออกแบบระบบนำทางที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.1.2.2 ความถี่ธรรมชาติของส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทางในทิศทางการใช้งานต้องมีค่าสูงกว่าความถี่ที่ต้องการใช้งาน ซึ่งความถี่สูงสุดที่ต้องการใช้งานตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.3.1 คือ 40 เฮิรตซ์ และระบบนำทางต้องมีความถี่ธรรมชาติของโหมดการสั่นโหมดแรก สูงกว่าความถี่ของแรงตัดที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถประมาณความถี่ของแรงตัดสูงสุดได้จากความเร็วรอบสูงสุดของสปินเดิลที่ใช้ คือ 4,500 รอบต่อนาที หรือ 75 เฮิรตซ์ ระบบนำทางที่ออกแบบมีความถี่ธรรมชาติของโหมดแรกเท่ากับ 792 เฮิรตซ์ และเป็นโหมดการสั่นที่อยู่ในทิศทางการใช้งาน ดังนั้นระบบนำทาง

ที่ออกแบบมีโหมดการสั่นที่สอดคล้องกับข้อกำหนดการออกแบบระบบนำทางที่กล่าวไว้หัวข้อที่ 4.2.2 ข้อที่ 3 ทุกประการ

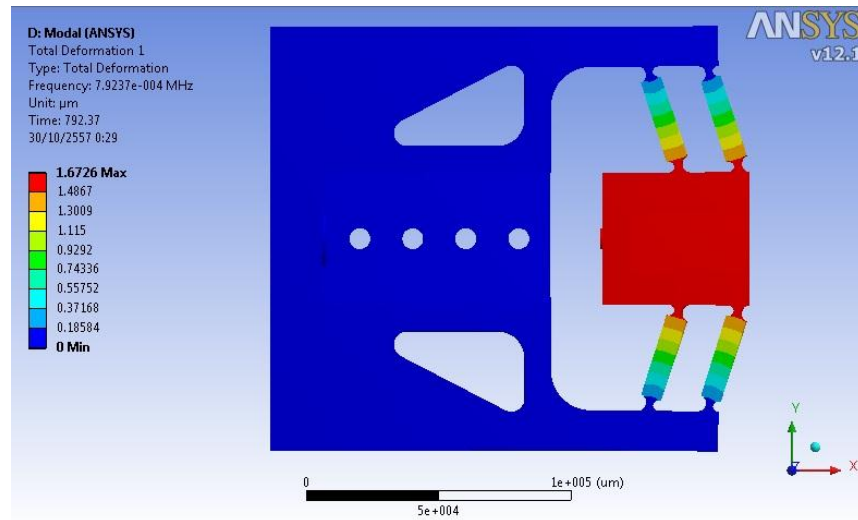


(ก) ทิศทางของการเคลื่อนที่และแรงที่ใช้ทดสอบความแข็งตึงของ flexure



(ข) ผลการคำนวณระยะที่ส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทางเคลื่อนที่ไปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปที่ 4.9 การทดสอบความแข็งตึงของ flexure ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4.10 รูปร่างของโหมดการสั่นโหมดแรกจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการใช้งาน มีดกลิ่งที่ติดตั้งบนส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทางต้องเคลื่อนที่พร้อมกับการขยายตัวหรือหดตัวของเพียโซอิเล็กทริก ดังนั้นส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทางต้องสัมผัสเพียโซอิเล็กทริกตลอดเวลาขณะที่เพียโซอิเล็กทริกขยายตัวหรือหดตัว การที่จะให้ส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทางสัมผัสกับเพียโซอิเล็กทริกตลอดเวลา แรงพรีโหลด (preload force) ที่กระทำระหว่างส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทางกับเพียโซอิเล็กทริกต้องมีค่ามากกว่าแรงเฉื่อย (inertial force) ใดๆ ที่กระทำบนส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทาง แรงเฉื่อยที่กระทำต่อส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทางคือแรงพลวัต (dynamic force) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ด้วยความถี่ของส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทางซึ่งสามารถคำนวณแรงพลวัตได้จากสมการ

$$F_d = 4\pi^2 f^2 m_{eff} \frac{\Delta L}{2} \quad (4.4)$$

เมื่อ

F_d คือแรงพลวัต (นิวตัน)

f คือความถี่ใช้งาน (เฮิร์ตซ์)

m_{eff} คือมวลยังผล (effective mass) (กิโลกรัม)

ΔL คือระยะเคลื่อนที่ที่ยอดถึงยอด (peak-to-peak displacement) (เมตร)

จากสมการที่ 4.4 สามารถคำนวณหาแรงพลวัตที่เกิดขึ้นสูงสุดในขณะงานได้จากความถี่สูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในขณะใช้งาน นั่นคือความถี่ธรรมชาติของโหมดแรกที่มีค่าเท่ากับ 792 เฮิร์ตซ์ และระยะเคลื่อนที่สูงสุดที่เกิดขึ้นในขณะใช้งาน นั่นคือระยะขยายตัวสูงสุดของเพียโซอิเล็กทริกที่ประกอบเข้ากับระบบนำทาง มีค่าเท่ากับ 40 ไมโครเมตร มวลยังผลประมาณได้จากผลรวมระหว่างมวลของ

ส่วนเคลื่อนที่และ flexure ของระบบนำทาง กับมวลของด้ามมีดกลึง มวลของส่วนเคลื่อนที่และ flexure ของระบบนำทางสามารถคำนวณได้โดยใช้โปรแกรม CATIA ซึ่งมีค่าประมาณ 0.47 กิโลกรัม มวลของด้ามมีดกลึงที่ใช้มีขนาด 20 มิลลิเมตร × 20 มิลลิเมตร × 80 มิลลิเมตร และวัสดุทำมาจาก เหล็ก มวลของด้ามมีดกลึงจึงมีค่าประมาณ 0.25 กิโลกรัม ดังนั้นมวลยังผลที่ใช้ในการคำนวณหาแรง พลวัตในสมการที่ 4.4 มีค่าประมาณ 0.72 กิโลกรัม แรงพลวัตสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะใช้งานจึงมี ค่าประมาณ 357 นิวตัน งานวิจัยนี้เลือกใช้อัตราส่วนความปลอดภัย (factor of safety) เท่ากับ 2 ดังนั้นแรงพรีโหลดที่กระทำระหว่างส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทางกับเพียโซอิเล็กทริกในงานวิจัยนี้จึงมี ค่าเท่ากับ 714 นิวตัน

การพรีโหลด (preloading) กระทำได้โดยออกแรง F ผลักส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทางให้ เคลื่อนที่ออกไปในทิศทาง $+x$ ตามรูปที่ 4.9 เพื่อให้ช่องสำหรับใส่เพียโซอิเล็กทริกยาวขึ้นชั่วคราว จากนั้นวางเพียโซอิเล็กทริกกับแหวนรองวางแนว (alignment washer) ลงในช่องเพื่อประกอบเข้ากับระบบนำทาง โดยที่ความยาวรวมของเพียโซอิเล็กทริกและแหวนรองวางแนวมีค่ามากกว่าความ ยาวปกติของช่องสำหรับใส่เพียโซอิเล็กทริก (ความยาวเดิมก่อนถูกแรง F กระทำ) เมื่อปล่อยแรง F ออก จะเกิดแรงพรีโหลดระหว่างส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทางกับเพียโซอิเล็กทริกเนื่องจากแรงสปริง จาก flexure ที่แปรผันตามระยะทางระหว่างตำแหน่งสมดุลของโครงสปริงก่อนประกอบเพียโซ อิเล็กทริกกับตำแหน่งสมดุลของ flexure หลังประกอบเพียโซอิเล็กทริก ดังนั้นจึงสามารถกำหนด แรงพรีโหลดที่ต้องการได้จากระยะทางดังกล่าว ตามสมการ

$$F_p = K_x d \quad (4.5)$$

เมื่อ

F_p คือแรงพรีโหลด (714 นิวตัน)

K_x คือความแข็งตึงของ flexure ในแกน x (9.14 นิวตันต่อไมโครเมตร)

d คือระยะทางระหว่างตำแหน่งสมดุลของ flexure ก่อนประกอบเพียโซอิเล็กทริกกับตำแหน่งสมดุล ของ flexure หลังประกอบเพียโซอิเล็กทริก (ไมโครเมตร)

แรงพรีโหลดที่ต้องการมีค่าเท่ากับ 714 นิวตัน ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อนำไปแทนในสมการ ที่ 4.5 จะได้ว่าระยะทางระหว่างตำแหน่งสมดุลของ flexure ก่อนประกอบเพียโซอิเล็กทริกกับ ตำแหน่งสมดุลของ flexure หลังประกอบเพียโซอิเล็กทริกต้องมีค่าเท่ากับ 78.1 ไมโครเมตร ซึ่ง ระยะทางระหว่างตำแหน่งสมดุลของ flexure ก่อนประกอบเพียโซอิเล็กทริกกับตำแหน่งสมดุลของ flexure หลังประกอบเพียโซอิเล็กทริก คือ ผลต่างของความยาวรวมของเพียโซอิเล็กทริกและแหวน รองวางแนว กับความยาวปกติของช่องใส่เพียโซอิเล็กทริก ดังนั้นจึงต้องผลิตแหวนรองวางแนวให้มีความหนาสอดคล้องกับ ความยาวของเพียโซอิเล็กทริก และความยาวของช่องใส่เพียโซอิเล็กทริกบน

ระบบนำทาง เพื่อที่จะได้แรงปรีโหลตที่ต้องการ ซึ่งทำให้ส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทางสัมผัสเพียโซอิเล็กทริกตลอดเวลาขณะที่เพียโซอิเล็กทริกขยายตัวหรือหดตัว ตามข้อกำหนดการออกแบบระบบนำทางในหัวข้อที่ 4.2.2 ข้อที่ 4

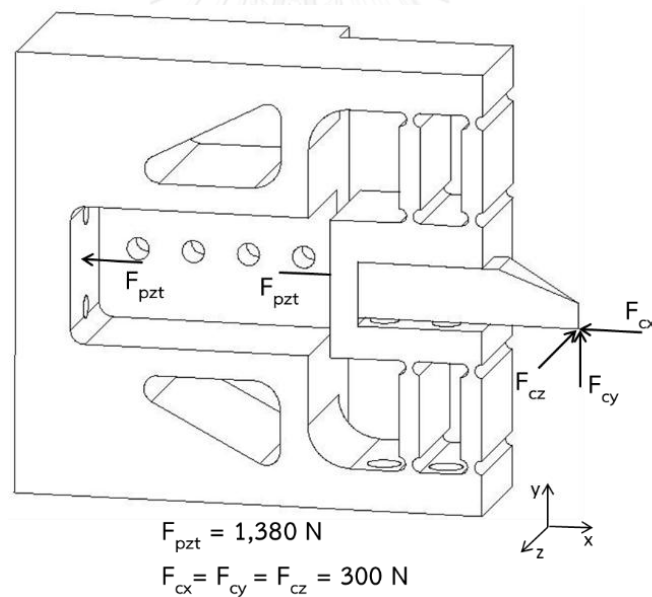
ขั้นตอนต่อมาคือการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ความเค้นของระบบนำทางภายใต้สภาวะที่รับภาระสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในขณะใช้งาน แรงที่กระทำต่อระบบนำทางมาจาก 2 แหล่งที่มาคือแรงตัดและแรงจากเพียโซอิเล็กทริก แรงตัด (F_c) กระทำที่บริเวณปลายมีดกลึง ทั้ง 3 ทิศทางตามแนวแกนดังนี้ F_{cx} กระทำในทิศทาง $-x$ F_{cy} กระทำในทางทิศทาง $+y$ และ F_{cz} กระทำในทิศทาง $-z$ ตามรูปที่ 4.11 หาขนาดของแรงตัดได้จากการทดลองกลึงโดยใช้มีดมีด TUNGALOY 25° rhombic shape cermet insert ที่มีรัศมีมุมมีด (nose radius) 0.2 มิลลิเมตร และวัดแรงขณะกลึงด้วยไดนาโมมิเตอร์ (dynamometer) ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 9129AA โดยทดลองกลึงภายใต้ภาวะการตัด (cutting condition) ต่อไปนี้ คือ ระยะเวลาการตัด (depth of cut) 0.5 มิลลิเมตร อัตราป้อน (feed) 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด (cutting speed) 150 เมตรต่อนาที พบว่าแรงตัดที่เกิดขึ้นในแต่ละแนวแกนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 300 นิวตัน

แรงจากเพียโซอิเล็กทริก (F_{pzt}) กระทำที่บริเวณส่วนเคลื่อนที่และลำตัวของระบบนำทางตามรูปที่ 4.11 ขนาดของแรงคำนวณได้จากผลรวมของแรงปรีโหลตกับแรงที่เกิดจากการขยายตัวของเพียโซอิเล็กทริกในขณะใช้งาน แรงปรีโหลตมีขนาด 714 นิวตันตามที่กล่าวไว้ข้างต้น และแรงที่เกิดขึ้นจากการขยายตัวของเพียโซอิเล็กทริกมีค่าสูงสุดเมื่อเพียโซอิเล็กทริกขยายตัวออกสูงสุด เป็นระยะทาง 40 ไมโครเมตร คำนวณได้จากสมการที่ 4.3 มีค่าเท่ากับ 366 นิวตัน แต่ในการใช้งานจริงจะมีแรงตัดในทิศ $-x$ (F_{cx}) ขนาดสูงสุด 300 นิวตัน (ตามที่กล่าวข้างต้น) ด้านการขยายตัวของเพียโซอิเล็กทริกเพียโซอิเล็กทริกจะออกแรงเพิ่มเพื่อดันส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทางไปยังตำแหน่งที่ต้องการเนื่องจากการใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ดังนั้นแรงจากการขยายตัวออกสูงสุด (40 ไมโครเมตร) ของเพียโซอิเล็กทริกที่กระทำต่อส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทางจึงมีค่าสูงสุดเท่ากับ $366 + 300 = 666$ นิวตัน เมื่อรวมกับแรงปรีโหลต แรงจากเพียโซอิเล็กทริกทั้งหมดที่กระทำต่อระบบนำทางจึงมีขนาดเท่ากับ $714 + 666 = 1,380$ นิวตัน นำขนาดและทิศทางของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อระบบนำทางมาเขียนเป็นแผนภาพวัตถุอิสระ (free body diagram) ได้ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงถึงภาระสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ขณะใช้งาน เมื่อคำนวณหาความเค้นที่ตำแหน่งต่างๆ บนระบบนำทางภายใต้สภาวะดังกล่าวด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณข้อพับของ flexure มีค่าเท่ากับ 81 เมกะปาสคาล ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดของการล้าตัวของอะลูมิเนียม 7075-T6 ที่มีค่าเท่ากับ 159 เมกะปาสคาล ดังนั้นระบบนำทางที่ออกแบบนี้มีความแข็งแรงเพียงพอในการใช้งาน ด้วยอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2 ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดการ

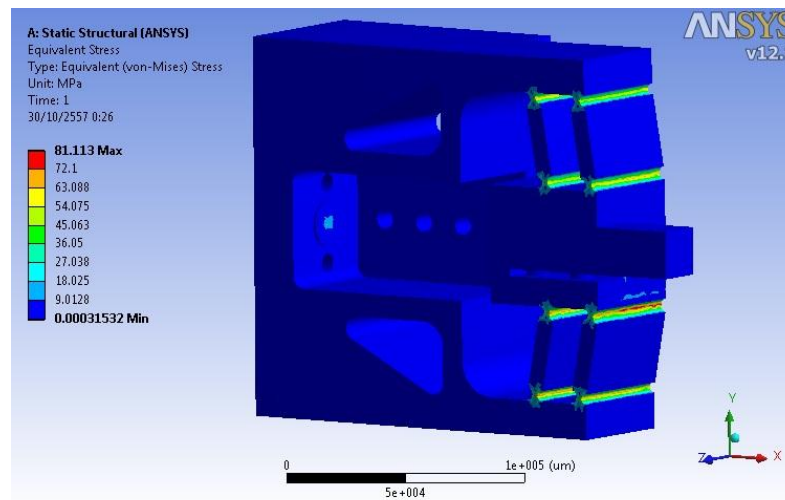
ออกแบบระบบนำทางที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2 ข้อที่ 5 ทุกประการ และสรุปการออกแบบระบบนำทางได้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุปการออกแบบระบบนำทาง

ขนาดโดยรวม	169 mm × 160 mm × 67 mm
น้ำหนัก	3.9 กิโลกรัม
ความแข็งดิ่งของ flexure	9.14 นิวตันต่อไมโครเมตร
ความกว้างแถบความถี่	792 เฮิรตซ์
ระยะขับเคลื่อนมีดกลึงสูงสุด (เมื่อใช้เพียโซอิเล็กทริกยี่ห้อ PI รุ่น P-845.30)	40 ไมโครเมตร
อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการล้าตัว	2



รูปที่ 4.11 แผนภาพวัตถุอิสระของแรงที่กระทำต่อระบบนำทาง



รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ความเค้น von-Mises ที่เกิดขึ้นสูงสุดขณะใช้งาน ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

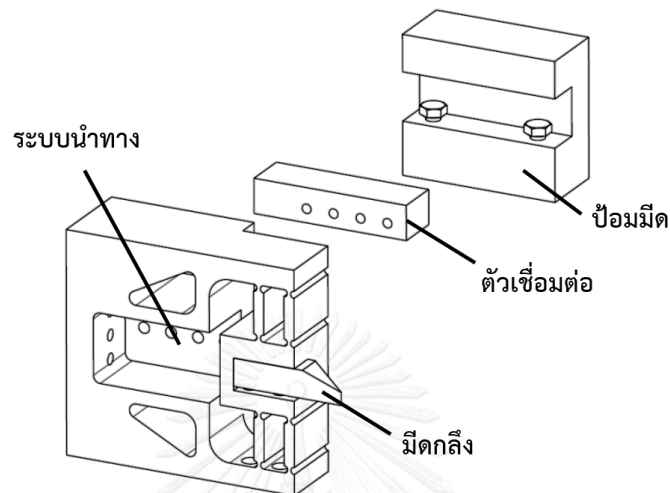
4.5. การออกแบบเพื่อการประกอบฟาสต์ทูลเซอร์ไว

การออกแบบการประกอบฟาสต์ทูลเซอร์ไวจะคำนึงถึงการวางแนว (alignment) ของมีดกลึงเป็นอันดับแรก เนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการวางแนว (misalignment) ของมีดกลึงจะทำให้มุมของมีดกลึงในขณะตัด เช่น มุมคาย (rake angle) มุมหลบ (relief angle) มุมนำ (lead angle) เป็นต้น คลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งที่ผู้ผลิตด้ามมีดกลึงและเม็ดมีดออกแบบไว้ ซึ่งส่งผลต่อกลไกในการตัด (cutting mechanism) อย่างมาก ดังนั้นจึงต้องวางแนวมีดกลึงที่ติดตั้งบนฟาสต์ทูลเซอร์ไวให้เป็นเช่นเดียวกับการวางแนวมีดกลึงที่ติดตั้งบนป้อมมีด (turret) ตามปกติ

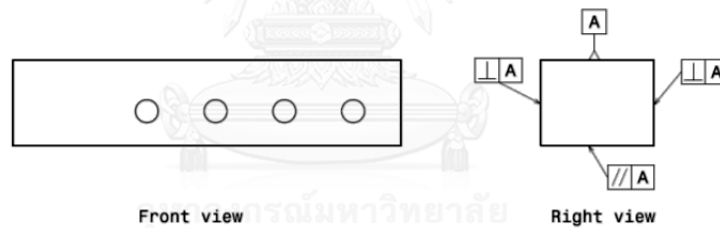
การวางแนวที่คลาดเคลื่อนสามารถเกิดขึ้นได้จากจำนวนชิ้นส่วนที่นำมาประกอบ เพราะการประกอบแต่ละชิ้นส่วนจะเกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างชิ้นส่วนอยู่เสมอ และอีกสาเหตุหนึ่งมาจากความไม่แม่นยำในการผลิต ดังนั้นจึงต้องออกแบบฟาสต์ทูลเซอร์ไวให้มีชิ้นส่วนที่น้อยที่สุดที่สามารถประกอบเข้าป้อมมีด (turret) บนเครื่องกลึงได้ และต้องใช้วิธีการผลิตที่มีความแม่นยำในการผลิต เช่น การกัด (milling) ด้วยเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ซีเอ็นซี (CNC machining center machine)

เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการประกอบหลายชิ้นส่วน งานวิจัยนี้จึงออกแบบให้ฟาสต์ทูลเซอร์ไวมีเพียง 2 ส่วนหลักที่เกี่ยวข้องกับการวางแนวของมีดกลึง คือ ระบบนำทาง และตัวเชื่อมต่อ (connector) ดังรูปที่ 4.13 ตัวเชื่อมต่อมีรูปร่างเหมือนด้ามมีดกลึงทั่วไปซึ่งลักษณะเป็นปริซึมสี่เหลี่ยมมุมฉาก ใช้ประกอบเข้ากับป้อมมีดเพื่อเชื่อมต่อระบบนำทางเข้ากับป้อมมีด ดังนั้นตัวเชื่อมต่อจึงมีความสำคัญกับการวางแนวของระบบนำทางซึ่งส่งผลกระทบต่อวางแนวของมีดกลึงต่อไป เพื่อให้ระบบนำทางวางแนวตรงกับแนวของป้อมมีด ตัวเชื่อมต่อต้องมีด้านข้างทุกด้านตั้งฉาก

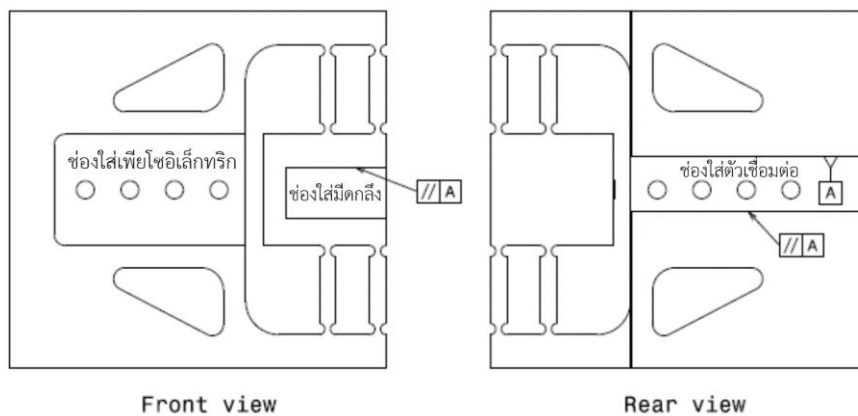
กันดังรูปที่ 4.14 และเพื่อให้มีดกึ่งที่อยู่บนระบบนำทางวางแนวตรงกับตัวเชื่อมต่อ ช่องใส่มีดกึ่งต้องขนานกับช่องใส่ตัวเชื่อมต่อดังรูปที่ 4.15 เมื่อวางแนวได้อย่างที่กล่าวมา จะทำให้การวางแนวของมีดกึ่งที่ติดตั้งบนฟาสต์ทูลเซอร์โวลเป็นเช่นเดียวกับการวางแนวมีดกึ่งที่ติดตั้งบนป้อมมีดตามปกติ



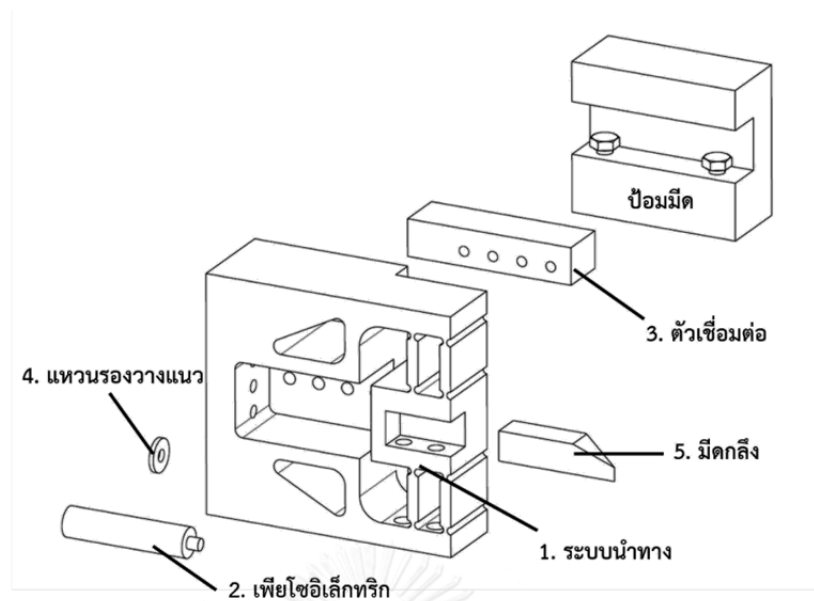
รูปที่ 4.13 ชิ้นส่วนของฟาสต์ทูลเซอร์โวลที่มีผลต่อการวางแนวของมีดกึ่ง



รูปที่ 4.14 ตัวเชื่อมต่อที่ด้านทุกด้านตั้งฉากกัน



รูปที่ 4.15 ระบบนำทางที่ช่องใส่มีดกึ่งขนานกับช่องใส่ตัวเชื่อมต่อ



รูปที่ 4.16 ชิ้นส่วนของฟาสต์ทูลเซอร์ไว

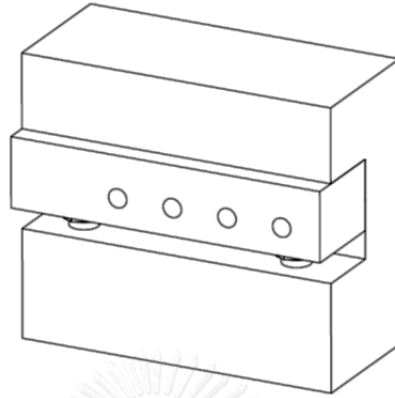
เมื่อออกแบบฟาสต์ทูลเซอร์ไวครบทุกชิ้นส่วนแล้ว จะได้ชิ้นส่วนของฟาสต์ทูลเซอร์ไวทั้งหมด 5 ชิ้นส่วนดังนี้

1. ระบบนำทาง
2. ตัวเชื่อมต่อ
3. เพียโซอิเล็กทริก
4. แหวนรองวางแนว
5. มีดกลึง

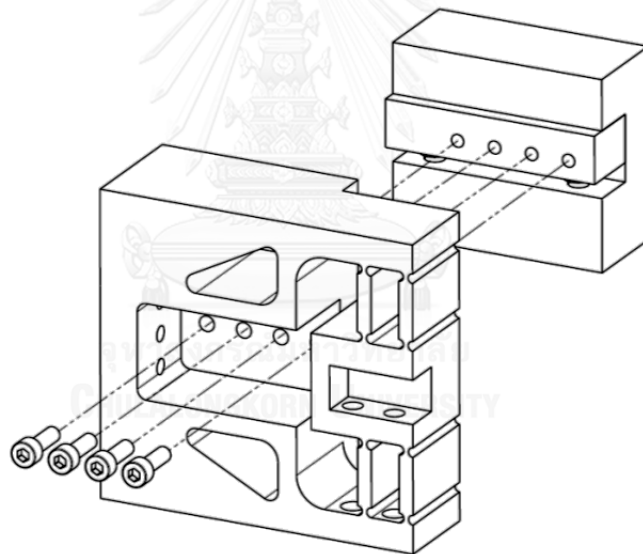
ทั้ง 5 ชิ้นส่วนแสดงได้ดังรูปที่ 4.16 โดยมีวิธีการประกอบเข้ากับป้อมมิดของเครื่องกลึงดังนี้

1. ประกอบส่วนเชื่อมต่อเข้ากับป้อมมิดบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี ดังรูปที่ 4.17
2. ประกอบระบบนำทางเข้ากับส่วนเชื่อมต่อ ดังรูปที่ 4.18
3. ขึ้นสกรูพรีโหลตผลึกส่วนเคลื่อนที่ออก เพื่อขยายช่องสำหรับใส่เพียโซอิเล็กทริกและแหวนรองวางแนว เตรียมสำหรับการพรีโหลตเพียโซอิเล็กทริก ดังรูปที่ 4.19
4. ประกอบเพียโซอิเล็กทริกกับแหวนรองวางแนว ดังรูปที่ 4.20
5. คลายสกรูพรีโหลตออก เพื่อพรีโหลตเพียโซอิเล็กทริกด้วยแรงสปริงจาก flexure ดังรูปที่ 4.21
6. ประกอบมีดกลึงโดยใช้เซทสกรู (set screw) ดังรูปที่ 4.22
7. ฟาสต์ทูลเซอร์ไวที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้วจะเป็นดังรูปที่ 4.23

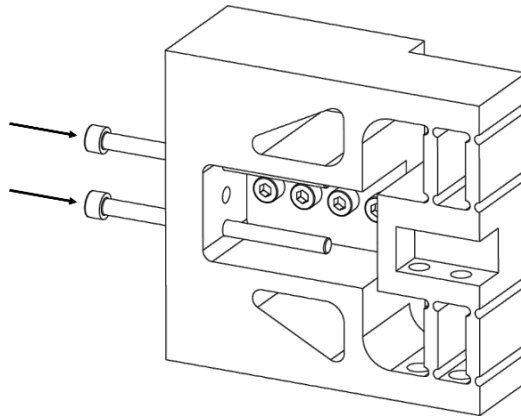
จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่า ฟาสต์ทุลเซอร์ไวท์ที่ออกแบบพร้อมที่จะนำไปผลิตและประกอบได้ ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป



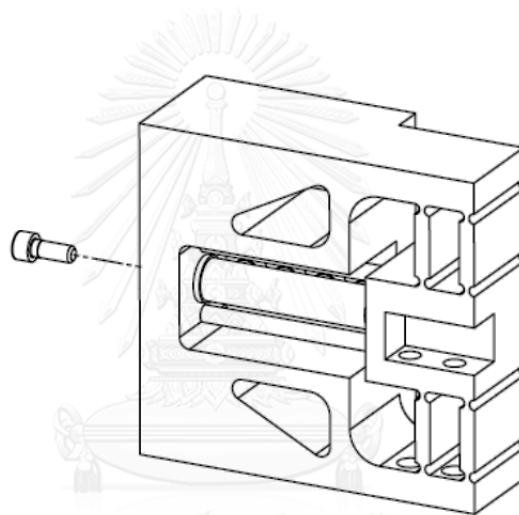
รูปที่ 4.17 การประกอบส่วนเชื่อมต่อเข้ากับป้อมมีดบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี



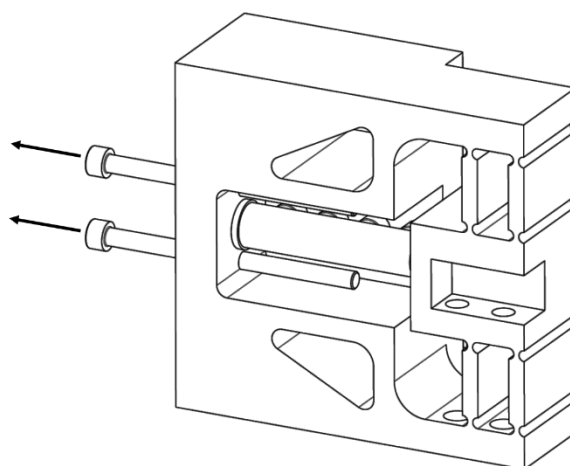
รูปที่ 4.18 การประกอบระบบนำทางเข้ากับตัวเชื่อมต่อ



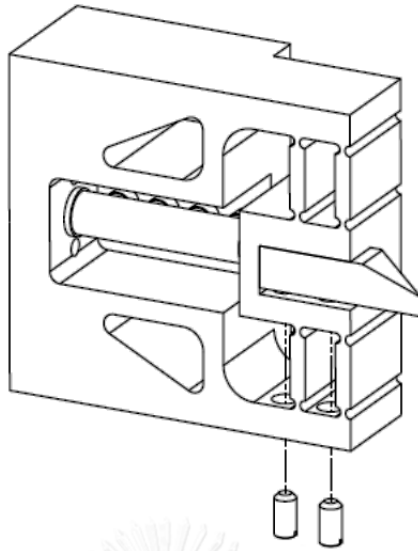
รูปที่ 4.19 การขันสกรูฟรีโหลตเพื่อขยายช่องสำหรับใส่เพียโซอิเล็กทริก



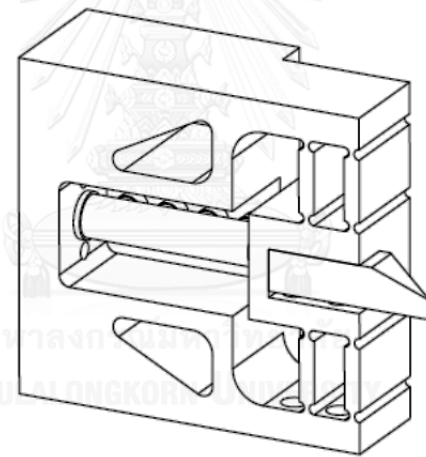
รูปที่ 4.20 การประกอบเพียโซอิเล็กทริกกับแหวนรองวางแนว



รูปที่ 4.21 การคลายสกรูฟรีโหลตออกเพื่อฟรีโหลตเพียโซอิเล็กทริกด้วยแรงสปริงจาก flexure



รูปที่ 4.22 การประกอบมีดกลึงโดยใช้เซทสกรู



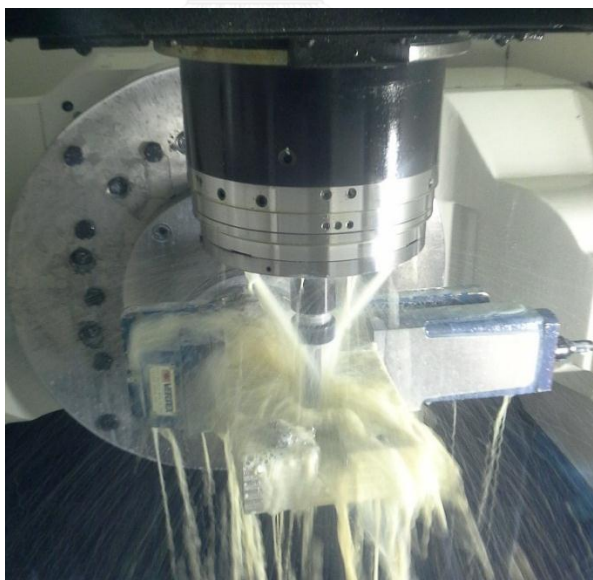
รูปที่ 4.23 ฟาสต์ทูลเซอร์ไวท์ที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว

4.6. การผลิตและติดตั้งฟาสต์ทูลเซอร์โว

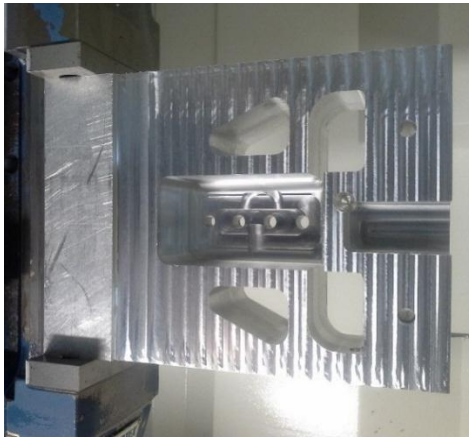
ชิ้นส่วนของฟาสต์ทูลเซอร์โวที่ผลิตมี 3 ชิ้นส่วนคือ ระบบนำทาง ตัวเชื่อมต่อ และแหวนรองวางแนว ซึ่งมีรายละเอียดของการผลิตตามหัวข้อต่อไปนี้

4.6.1. การผลิตระบบนำทาง

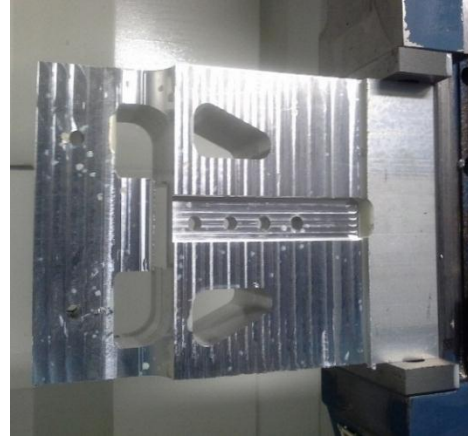
จากที่กล่าวในหัวข้อที่ 4.5 ช่องใส่มีดกลึงและช่องใส่ตัวเชื่อมต่อจะต้องขนานกันเพื่อป้องกันการวางแนวของมีดกลึงคลาดเคลื่อน ดังรูปที่ 4.15 และจากหัวข้อที่ 4.4 โพรไฟล์บริเวณข้อพับของ flexure มีขนาดเล็กมาก คือมีรัศมี (r) เพียง 2.5 มิลลิเมตร และมีความหนา (t) เพียง 2.5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.6 และโพรไฟล์ของข้อพับของ flexure นี้มีผลต่อความแข็งแรงของ flexure ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญในการใช้งาน ดังนั้นจึงต้องผลิตระบบนำทางด้วยวิธีที่มีความแม่นยำสูงเพื่อให้ได้ระบบนำทางที่ตรงตามที่ต้องการ ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ซีเอ็นซี 5 แกนในการขึ้นรูปชิ้นงาน ทำช่องสำหรับใส่ชิ้นส่วนต่างๆ ตลอดจนเจาะรูและทำเกลียว (tapping) ดังรูปที่ 4.24 เมื่อผลิตด้วยเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ซีเอ็นซีเสร็จแล้ว จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 4.25 จากนั้นจึงใช้วิธี wire cut ในการตัดเพื่อทำให้เป็น flexure ที่มีความยาวและโพรไฟล์ของข้อพับตามที่ต้องการ เมื่อตัดเสร็จเรียบร้อยแล้วจะได้ระบบนำทางดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.24 การขึ้นรูประบบนำทางด้วยเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ซีเอ็นซี



(ก) ด้านหน้า

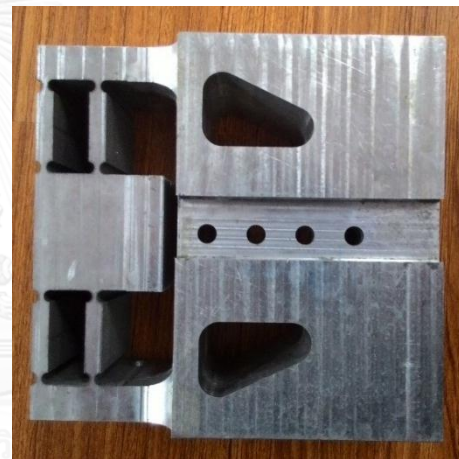


(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.25 ระบบนำทางหลังจากขึ้นรูปด้วยเครื่องแมชชีนนึงเซ็นเตอร์ซีเอ็นซี



(ก) ด้านหน้า



(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.26 ระบบนำทางหลังจากผลิตเสร็จ

4.6.2. การผลิตตัวเชื่อมต่อ

จากหัวข้อที่ 4.5. ตัวเชื่อมต่อจะต้องมีด้านข้างทุกด้านตั้งฉากกันดังรูปที่ 4.14 ดังนั้นจึงต้องใช้เครื่องเจียรระไนราบ (surface grinding machine) ร่วมกับการขึ้นรูปโดยการกัดโดยใช้เครื่องแมชชีนนึงเซ็นเตอร์ซีเอ็นซี ตามขั้นตอนดังนี้

1. กัดชิ้นงานด้านที่อยู่ตรงข้ามซึ่งกันและกันก่อน 1 คู่
2. เจียรระไนด้านที่กัดในขั้นตอนที่ 1 ทั้ง 2 ด้าน จะได้ด้านตรงข้ามที่ขนานกัน 1 คู่
3. ใช้ปากกาจับด้านที่เจียรระไนเพื่อให้ด้านที่จะกัดตั้งฉากกับด้านที่เจียรระไนแล้ว
4. กัดด้านตรงข้ามคู่ที่เหลือ

5. เจียรระไนด้านที่ได้จากขั้นตอนที่ 4
6. เจาะรูและทำเกลียวสำหรับเชื่อมต่อกับระบบนำทางและป้อมมิด
7. รมดำเพื่อกันสนิม

เมื่อทำตามขั้นตอนดังกล่าวจะได้ตัวเชื่อมต่อที่เป็นปริซึมสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ด้านข้างทุกด้านตั้งฉากกัน ดังรูปที่ 4.27

4.6.3. การผลิตแหวนรองวางแนว

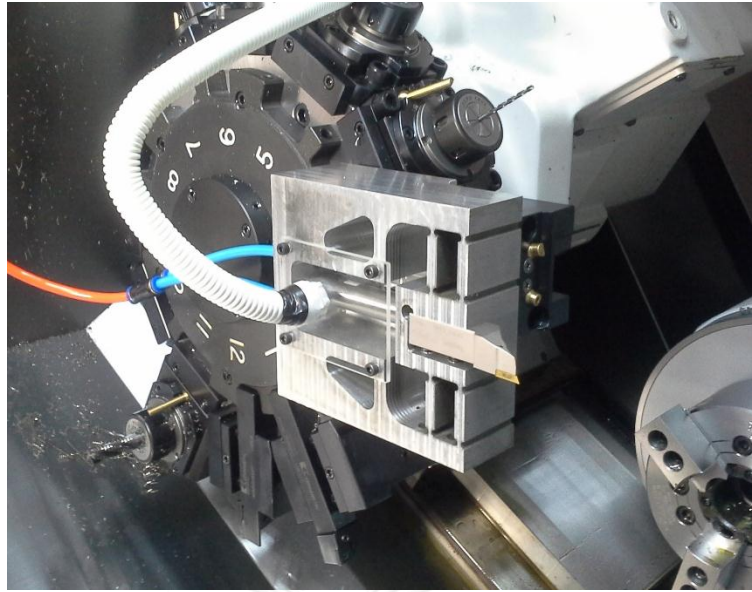
แหวนรองวางแนวมีหน้าที่สำหรับปรับโฟลด์เพียโซอิเล็กทริกและ flexure ตามที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.4. ความหนาของแหวนรองวางแนวจะส่งผลโดยตรงกับแรงโฟลด์ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีเจียรระไนให้ได้ความหนาที่ต้องการด้วยเครื่องเจียรระไนราบ แล้วนำไปตัดให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต้องการ

4.6.4. การติดตั้งฟาสต์ทูลเซอร์ไวบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี

เมื่อนำชิ้นส่วนทั้ง 5 ชิ้นส่วนมาประกอบและติดตั้งบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีตามวิธีที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.5 จะได้ฟาสต์ทูลเซอร์ไวที่พร้อมใช้งานดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.27 ตัวเชื่อมต่อหลังจากผลิต



รูปที่ 4.28 ฟาสต์ทูลเซอร์ไวที่ติดตั้งบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี

บทที่ 5

การทดสอบสมรรถนะของฟาสต์ทูลเซอร์โว

5.1. จุดประสงค์ของการทดสอบสมรรถนะของฟาสต์ทูลเซอร์โว

การทดสอบสมรรถนะของฟาสต์ทูลเซอร์โว (fast tool servo) กระทำเพื่อตรวจสอบสมรรถนะด้านต่างๆ ของฟาสต์ทูลเซอร์โวก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง ว่าสามารถนำไปใช้งานตามที่ต้องการได้หรือไม่ สมรรถนะของฟาสต์ทูลเซอร์โวที่ต้องการทดสอบมีดังนี้

- ระยะขับเคลื่อนมีดถึงสูงสุด (stroke) (หัวข้อที่ 5.3)
- ความละเอียด (resolution) ในการขับเคลื่อนมีดถึง (หัวข้อที่ 5.4)
- การตอบสนองในภาวะชั่วคราว (transient response) (หัวข้อที่ 5.5)
- การติดตามตำแหน่ง (position tracking) (หัวข้อที่ 5.6)

5.2. การจัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบสมรรถนะ

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของฟาสต์ทูลเซอร์โวมีทั้งหมด 3 ส่วน ส่วนแรกคือ ฟาสต์ทูลเซอร์โวสำหรับรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (voltage signal) แล้วเปลี่ยนเป็นระยะขับเคลื่อนมีดถึง ส่วนที่สองคือ ชุดเซนเซอร์วัดระยะทางแบบเลเซอร์ (laser displacement sensor) สำหรับวัดระยะขับเคลื่อนมีดถึงของฟาสต์ทูลเซอร์โวแล้วส่งข้อมูลออกไปเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ส่วนสุดท้ายคือ คอมพิวเตอร์สำหรับสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (voltage signal generator) ส่งไปยังฟาสต์ทูลเซอร์โว และรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์วัดระยะทางเพื่อรวบรวมข้อมูล (data acquisition) ระยะขับเคลื่อนมีดถึงของฟาสต์ทูลเซอร์โว สามารถแสดงการทำงานของอุปกรณ์ทั้ง 3 ส่วน เป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 5.1 และรายละเอียดของการจัดเตรียมอุปกรณ์การทดสอบสามารถอธิบายได้ตามหัวข้อต่อไปนี้

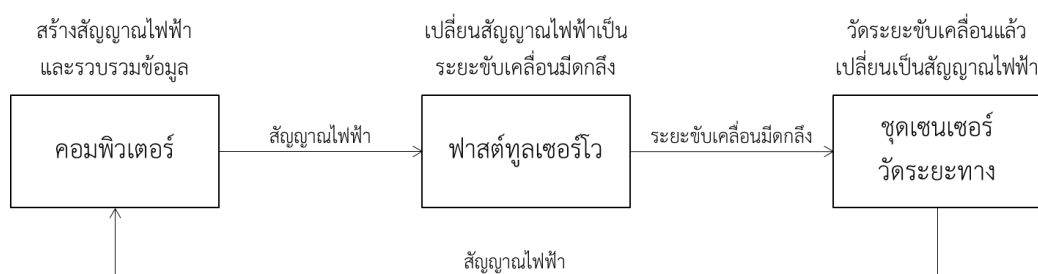
5.2.1. ฟาสต์ทูลเซอร์โว

ฟาสต์ทูลเซอร์โวมีตัวขับเคลื่อนเป็นเพียโซอิเล็กทริกยี่ห้อ PI รุ่น P-845.30 ที่รับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (voltage input) 0 – 100 โวลต์ เพื่อขับเคลื่อนเป็นระยะทาง 0 – 45 ไมโครเมตร มีเซนเซอร์วัดระยะขยายตัวเป็นแบบเกจวัดความเครียด (strain gauge) ติดตั้งในตัว (built-in sensor) เพียโซอิเล็กทริกรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องขยายสัญญาณ (amplifier) ยี่ห้อ PI รุ่น E-625 ที่รับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 0 – 10 โวลต์ และมีอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า (voltage gain)

เท่ากับ 10 ส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออก (voltage output) ไปยังเพียโซอิเล็กทริก 0 – 100 โวลต์ สามารถแสดงอินพุต (input) และเอาต์พุต (output) ของอุปกรณ์แต่ละส่วนได้ดังตารางที่ 5.1

เครื่องขยายสัญญาณรุ่นนี้สามารถควบคุมระยะขยายตัวของเพียโซอิเล็กทริกแบบป้อนกลับ (feedback control) ได้โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI controller) โดยรับสัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์เกจวัดความเครียดที่อยู่ภายในเพียโซอิเล็กทริก รูปที่ 5.2 แสดงแผนภาพบล็อก (block diagram) ของการควบคุมตำแหน่งของฟาสต์ทูลเซอร์โว ตัวขยายสัญญาณสำหรับเพียโซอิเล็กทริก (piezo electric amplifier unit) ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI controller) และตัวขยายสัญญาณเซ็นเซอร์ (sensor gain) อยู่ภายในเครื่องขยายสัญญาณ (แสดงด้วยกรอบเส้นประด้านซ้าย) ทำหน้าที่ควบคุมระยะขยายตัวของเพียโซอิเล็กทริกแบบป้อนกลับ โดยรับสัญญาณจุดปรับตั้ง (set point) จากคอมพิวเตอร์ และสัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์เกจวัดความเครียดที่ติดตั้งภายในเพียโซอิเล็กทริก เพียโซอิเล็กทริกรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องขยายสัญญาณแล้วเปลี่ยนเป็นระยะขยายตัว เซนเซอร์แบบเกจวัดความเครียดวัดระยะขยายตัวแล้วส่งสัญญาณป้อนกลับไปยังเครื่องขยายสัญญาณ (แสดงด้วยกรอบเส้นประด้านขวา)

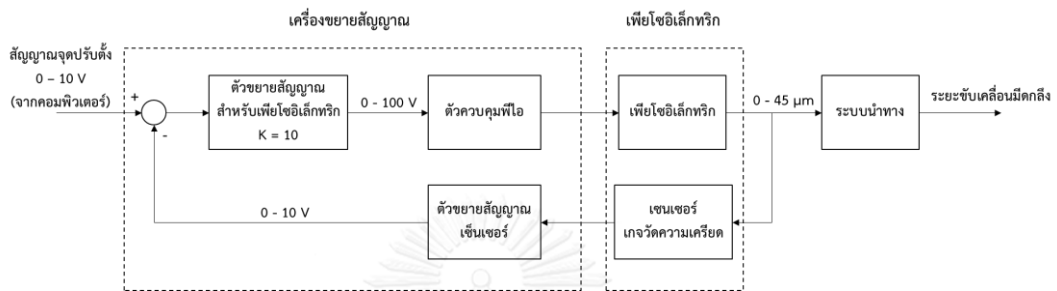
ในการทดสอบสมรรถนะของฟาสต์ทูลเซอร์โว จะควบคุมระยะขับเคลื่อนของมีดกลึงด้วยวิธีควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้สัญญาณป้อนกลับเป็นระยะขยายตัวของเพียโซอิเล็กทริกที่วัดได้จากเซนเซอร์เกจวัดความเครียดที่ติดตั้งภายในเพียโซอิเล็กทริก ตามที่แสดงในแผนภาพบล็อกในรูปที่ 5.2 อย่างไรก็ตาม สัญญาณป้อนกลับที่ใช้ในการควบคุมดังกล่าว เป็นระยะขยายตัวของเพียโซอิเล็กทริกซึ่งยังไม่ได้รวมผลกระทบจากระบบนำทาง สัญญาณป้อนกลับดังกล่าวจึงไม่ใช่ระยะขับเคลื่อนมีดกลึงโดยตรง ดังนั้นจึงต้องสอบเทียบฟาสต์ทูลเซอร์โวก่อนนำไปประยุกต์การใช้งานจริง ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 5.8



รูปที่ 5.1 แผนภาพการทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของฟาสต์ทูลเซอร์โว

ตารางที่ 5.1 อินพุตและเอาต์พุตของเพียโซอิเล็กทริกและเครื่องขยายสัญญาณ

	เพียโซอิเล็กทริก	เครื่องขยายสัญญาณ
อินพุต	0 – 100 โวลต์	0 – 10 โวลต์
เอาต์พุต	0 – 45 ไมโครเมตร	0 – 100 โวลต์



รูปที่ 5.2 แผนภาพบล็อกการควบคุมตำแหน่งของฟาสต์ทูลเซอร์โว

5.2.2. ชุดเซนเซอร์วัดระยะทาง

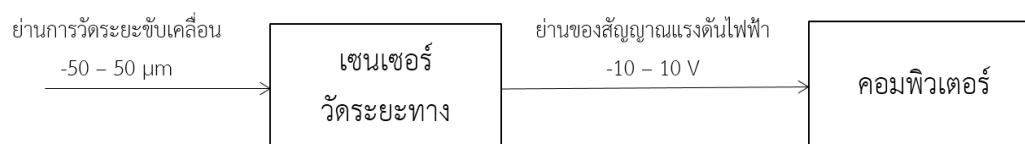
ชุดเซนเซอร์วัดระยะทางใช้วัดระยะขับเคลื่อนมีดกลึงในการทดสอบสมรรถนะของฟาสต์ทูลเซอร์โว ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือตัวเซนเซอร์วัดระยะทาง ซึ่งเป็นเซนเซอร์วัดระยะทางแบบเลเซอร์ยี่ห้อ KEYENCE รุ่น LK-G15 ส่วนที่สองคือเครื่องขยายสัญญาณของเซนเซอร์ที่มีหน้าจอแสดงผล ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณจากเซนเซอร์และแสดงค่าที่วัดได้บนหน้าจอแสดงผล และมีช่องสัญญาณแอนะล็อกขาออก (analog output channel) สำหรับส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าไปยังคอมพิวเตอร์ ข้อมูลจำเพาะของชุดเซนเซอร์แสดงในตารางที่ 5.2 และข้อมูลการจัดเตรียมชุดเซนเซอร์วัดระยะทางแสดงในตารางที่ 5.3 ซึ่งกำหนดให้ส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออก -10 – 10 โวลต์ไปยังคอมพิวเตอร์ สำหรับระยะทางที่วัดในย่าน (range) -50 – 50 ไมโครเมตร ดังแผนภาพในรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลจำเพาะของชุดเซนเซอร์วัดระยะทางแบบเลเซอร์ยี่ห้อ KEYENCE รุ่น LK-G15

ระยะอ้างอิง (reference distance)	10 มิลลิเมตร
ย่านการวัด (measurement range)	±1 มิลลิเมตร
ความละเอียดในการแสดงผล (display resolution)	0.01 ไมโครเมตร
ความเป็นเชิงเส้น (linearity)	±0.03% FSO (FSO = ±1 มิลลิเมตร)
ความสามารถในการทวนซ้ำ (repeatability)	0.02 ไมโครเมตร
อัตราการชั่งตัวอย่าง (sampling rate)	20/50/100/200/500/1,000 ไมโครวินาที
ย่านของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออก	-10 - 10 โวลต์

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลการเตรียมชุดเซนเซอร์วัดระยะทางแบบเลเซอร์ของ KEYENCE รุ่น LK-G15
สำหรับการทดสอบ

ระยะอ้างอิง (reference distance)	10 มิลลิเมตร
ย่านการวัด (measurement range)	±50 ไมโครเมตร
ความละเอียดในการแสดงผล (display resolution)	0.01 ไมโครเมตร
อัตราการชั่งตัวอย่าง (sampling rate)	100 ไมโครวินาที
ย่านของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออก	-10 - 10 โวลต์



รูปที่ 5.3 แผนภาพการรับและส่งข้อมูลของเซนเซอร์วัดระยะทาง

จากตารางที่ 5.3 สามารถคำนวณความไม่แน่นอนของการวัด (measurement uncertainty) ที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่างๆ ของเซนเซอร์วัดระยะทางที่ระดับความเชื่อมั่น (confidence level) 95% ได้ดังนี้

- ความไม่แน่นอนของการวัดจากความละเอียดในการวัด (zero-order uncertainty) (u_0) มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความละเอียดในการวัด เท่ากับ

$$u_0 = \frac{1}{2} \times 0.01 = 0.005 \text{ ไมโครเมตร}$$

- ความไม่แน่นอนของการวัดจากความผิดพลาดจากความเป็นเชิงเส้น (linearity error) (u_l) คำนวณได้จากความเป็นเชิงเส้นของเซนเซอร์วัดระยะทางซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.03% FSO (ตารางที่ 5.3) ค่าสุดสเกล (full-scale) ของเซนเซอร์เท่ากับ 2 มิลลิเมตร (± 1 มิลลิเมตร) ดังนั้นความไม่แน่นอนของการวัดจากความผิดพลาดจากความเป็นเชิงเส้นจึงมีค่าเท่ากับ

$$u_l = 0.03 \times \frac{1}{100} \times 2,000 = 0.6 \text{ ไมโครเมตร}$$

- ความไม่แน่นอนของการวัดจากความสามารถในการทวนซ้ำ (repeatability) (u_r) มีค่าเท่ากับ 0.02 ไมโครเมตร (ตารางที่ 5.3)

เมื่อได้ค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่เกิดขึ้นจากแต่ละปัจจัย (individual uncertainty) จะสามารถหาความไม่แน่นอนของการวัดรวม (combined uncertainty) (u_{total}) ของเซนเซอร์วัดระยะทางได้ด้วยสมการที่ 3.1

$$u_{total} = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (3.1)$$

เมื่อ u_i คือความไม่แน่นอนของการวัดที่เกิดขึ้นจากแต่ละปัจจัย เมื่อแทนค่าความไม่แน่นอนของการวัดของทั้งสามปัจจัยที่คำนวณไว้ข้างต้นในสมการที่ 3.1 จะได้ว่า ความไม่แน่นอนของการวัดรวมของเซนเซอร์วัดระยะทางที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีค่าเท่ากับ

$$u_{total} = \sqrt{u_0^2 + u_l^2 + u_e^2} = \sqrt{0.005^2 + 0.6^2 + 0.02^2} = 0.6 \text{ ไมโครเมตร}$$

5.2.3. คอมพิวเตอร์

คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นสัญญาณจุดปรับตั้งในการควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกึ่งของฟาสต์ทูลเซอร์โว และรับสัญญาณจากเซนเซอร์วัดระยะทางเพื่อรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ โดยใช้ตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (digital to analog converter หรือ D/A) และแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (analog to digital converter หรือ A/D) ยี่ห้อ National Instrument (NI) รุ่น NI 6221 มีช่องสัญญาณแอนะล็อกขาเข้า (analog input channel) 16 ช่อง และมีช่องสัญญาณแอนะล็อกขาออก (analog output channel) 2 ช่อง ช่องสัญญาณแอนะล็อกขาเข้าสามารถรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าได้ $-10 - 10$ โวลต์ และช่องสัญญาณแอนะล็อกขาออกสามารถส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าได้ $-10 - 10$ โวลต์ ข้อมูลจำเพาะของการรับและส่งสัญญาณแอนะล็อกแสดงในตารางที่ 5.4

งานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม LABVIEW ในการสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเพื่อส่งไปฟาสต์ทูลเซอร์โว และใช้รวบรวมข้อมูลระยะขับเคลื่อนมีดกึ่งในการทดสอบสมรรถนะที่วัดจากเซนเซอร์วัดระยะทาง โดยเลือกใช้อัตราการอัปเดตข้อมูล (update rate) ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ส่งออกไปฟาสต์ทูลเซอร์โว และอัตราการซึกข้อมูลของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่รับมาจากเซนเซอร์วัดระยะทางเท่ากับ 2,000 เฮิรตซ์ เลือกใช้ย่านของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแอนะล็อกขาเข้า $-10 - 10$ โวลต์ (ตามย่านของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของเซนเซอร์วัดระยะทางที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.2.2) และเลือกใช้ย่านของสัญญาณแอนะล็อกขาออก $0 - 10$ โวลต์ (ตามย่านของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของฟาสต์ทูลเซอร์โวที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.2.1)

5.2.4. การเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะ

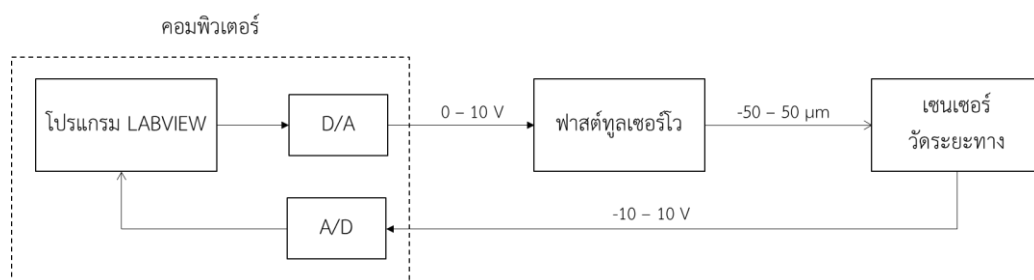
อุปกรณ์ในการทดสอบสมรรถนะมีทั้งหมด 3 ส่วน คือ ฟาสต์ทูลเซอร์โว เซนเซอร์วัดระยะทาง และคอมพิวเตอร์ ตามที่ได้กล่าวไปแล้วตอนต้น สามารถสรุปย่านของอินพุตและเอาต์พุตที่ใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ ได้ในตารางที่ 5.5 และแสดงเป็นแผนภาพการรับและส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ข้อมูลจำเพาะของตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกและแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล
ของ National Instrument (NI) รุ่น NI PCI-6221

	ส่วนแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (A/D)	ส่วนแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (D/A)
ความละเอียด	16 บิต	16 บิต
อัตราการซิกตัวอย่าง (ขาเข้า)	250 กิโลแซมเปิลต่อวินาที (kS/s)	-
อัตราการอัปเดตข้อมูล (ขาออก)	-	833 กิโลแซมเปิลต่อวินาที
สัญญาณแรงดันไฟฟ้า แอนะล็อก	-10 – 10 โวลต์ (ขาเข้า)	-10 – 10 โวลต์ (ขาออก)

ตารางที่ 5.5 ย่านของอินพุตและเอาต์พุตของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะ

	อุปกรณ์ขับเคลื่อน มีดกถึงความเร็วสูง	เซนเซอร์วัดระยะทาง	คอมพิวเตอร์
อินพุต	0 – 10 โวลต์	-50 – 50 ไมโครเมตร	-10 – 10 โวลต์ (A/D)
เอาต์พุต	0 – 45 ไมโครเมตร (ประมาณการ)	-10 – 10 โวลต์	0 – 10 โวลต์ (D/A)



รูปที่ 5.4 แผนภาพการรับและส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์แต่ละส่วน
ในการทดสอบสมรรถนะของฟาสต์ทูลเซอร์โว

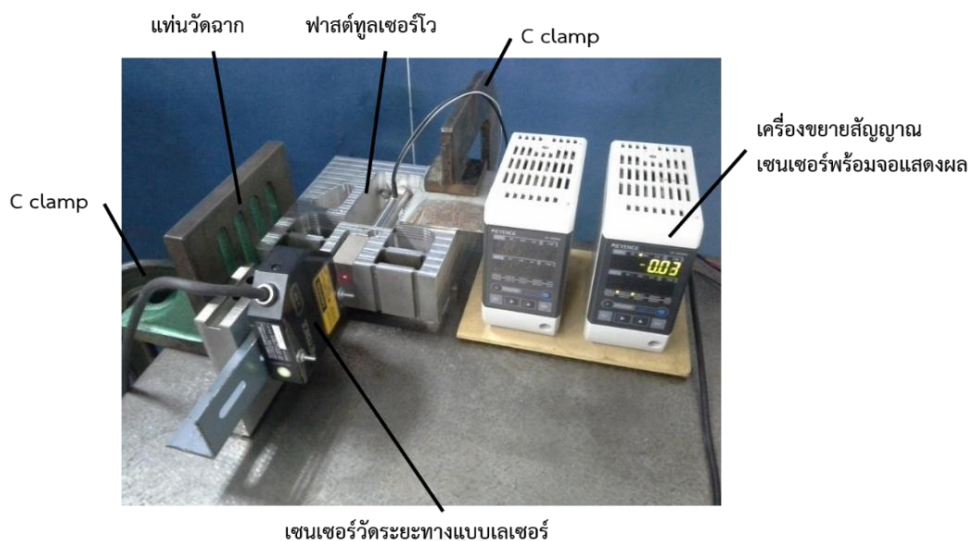
5.2.5. การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบสมรรถนะ

การวัดระยะขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์โวด้วยเซนเซอร์วัดระยะทางแบบเลเซอร์ จำเป็นต้องวางแนว (alignment) ให้แนวการเคลื่อนที่ของฟาสต์ทูลเซอร์โว และแนวการยิงเลเซอร์ของเซนเซอร์วัดระยะทางอยู่ในแนวเดียวกัน ดังนั้นจึงติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนและเซนเซอร์วัดระยะทางบนโต๊ะระดับ และใช้แท่นวัดฉาก (รูปที่ 5.5) ซึ่งมีระนาบตั้งฉากกับพื้นโต๊ะ วางแนวให้แนวการเคลื่อนที่ของฟาสต์ทูลเซอร์โว และแนวยิงเลเซอร์ของเซนเซอร์วัดระยะทางขนานกัน จากนั้นจึงปรับตำแหน่งของเลเซอร์ให้ตรงกับตำแหน่งที่ต้องการวัดระยะขับเคลื่อนของฟาสต์ทูลเซอร์โว

การจับยึดอุปกรณ์ต่างๆ เข้ากับโต๊ะระดับ ต้องจับยึดอย่างมั่นคง เพื่อความเที่ยงตรงในการวัด ดังนั้นจึงใช้ปากคีบรูปซี (c-clamp) ยึดฟาสต์ทูลเซอร์โวและแท่นวัดฉากเข้ากับโต๊ะระดับ และยึดเซนเซอร์วัดระยะทางเข้าเหล็กฉากซึ่งวางอยู่บนขาตั้งที่เป็นแท่งเหล็กเรียบและมีด้านตรงข้ามที่ขนานกัน และยึดกับโต๊ะระดับด้วยแม่เหล็ก การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบสมรรถนะและตำแหน่งของอุปกรณ์ต่างๆ แสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.5 แท่นวัดฉาก



รูปที่ 5.6 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของฟาสต์ทูลเซอร์โว

5.3. การทดสอบระยะขับเคลื่อนมีดถึงสูงสุด

5.3.1. วิธีการทดสอบ

ใช้คอมพิวเตอร์สร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเพื่อเป็นสัญญาณจุดปรับตั้งในการควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดถึงของฟาสต์ทูลเซอร์โว ตั้งค่าสัญญาณจุดปรับตั้งเป็นค่าสูงสุดของย่านสัญญาณไฟฟ้าขาเข้าของฟาสต์ทูลเซอร์โว ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10 โวลต์ เพื่อให้ฟาสต์ทูลเซอร์โวขับเคลื่อนมีดถึงเป็นระยะสูงสุด (เพียโซอิเล็กทริกขยายตัวออกสูงสุด) จากนั้นอ่านค่าที่แสดงบนหน้าจอแสดงผลของเซนเซอร์วัดระยะทาง

5.3.2. ขั้นตอนการทดสอบ

1. ติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของฟาสต์ทูลเซอร์โวตามรูปที่ 5.6
2. เขียนโปรแกรมสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าในโปรแกรม LABVIEW เพื่อส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณจุดปรับตั้งของอุปกรณ์ขับเคลื่อนมีดถึงความเร็วสูง
3. ตั้งค่าสัญญาณจุดปรับตั้งเท่ากับ 10 โวลต์ จากโปรแกรมหดงกล่าว
4. อ่านค่าระยะขับเคลื่อนมีดถึงบนหน้าจอแสดงผลของเซนเซอร์วัดระยะทาง

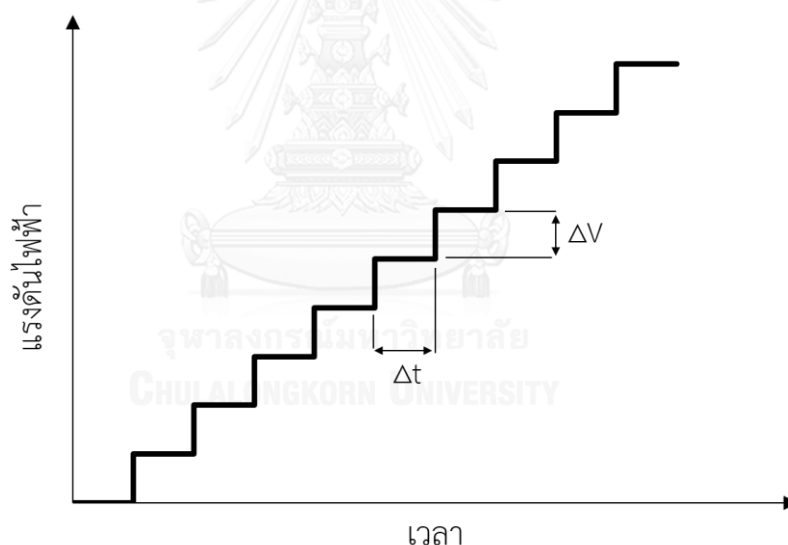
5.3.3. ผลการทดสอบและการอภิปราย

ฟาสต์ทูลเซอร์โวสามารถขับเคลื่อนมีดถึงได้เป็นระยะทางสูงสุด 40 ไมโครเมตร ซึ่งตรงตามที่ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 4.1.3

5.4. การทดสอบความละเอียดในการขับเคลื่อนมีดกลึง

5.4.1. วิธีการทดสอบ

เขียนโปรแกรมสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบขั้นบันได (step) ที่เพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นละ ΔV โวลต์ ทุก 1 วินาที ($\Delta t = 1$ วินาที) ดังรูปที่ 5.7 ใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบขั้นบันไดดังกล่าวเป็นสัญญาณจุดปรับตั้งในการควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์โว และนำข้อมูลระยะขับเคลื่อนมีดกลึงที่วัดได้จากเซนเซอร์ มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะขับเคลื่อนมีดกลึงกับเวลา จะได้กราฟที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดเช่นเดียวกับสัญญาณจุดปรับตั้งที่ใช้ในการควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกลึง จากนั้นปรับค่า ΔV ให้มีขนาดน้อยลง และใช้เป็นสัญญาณจุดปรับตั้งใหม่จนกระทั่งไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างขั้นบันไดของระยะขับเคลื่อนมีดกลึงที่วัดจากเซนเซอร์ได้ จะได้ว่า ความละเอียดของในการขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์โว คือ ขนาดของขั้นบันไดของระยะขับเคลื่อนมีดกลึงที่เล็กที่สุดที่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างขั้นได้



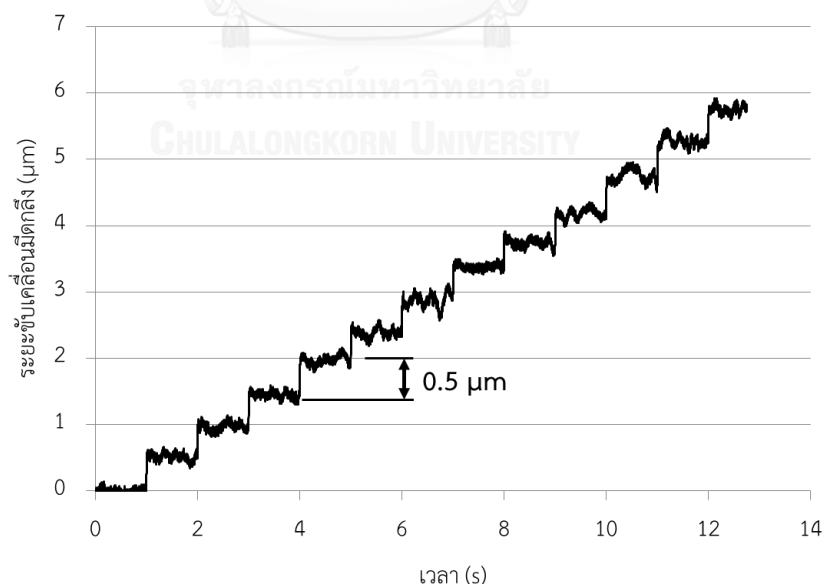
รูปที่ 5.7 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบขั้นบันไดที่ใช้ทดสอบความละเอียดในการขับเคลื่อนมีดกลึง

5.4.2. ขั้นตอนการทดสอบ

1. เขียนโปรแกรมสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบขั้นบันไดเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นละ ΔV โวลต์ ทุก 1 วินาที ($\Delta t = 1$ วินาที) ดังรูปที่ 5.7
2. ใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบขั้นบันไดดังกล่าวเป็นสัญญาณจุดปรับตั้งของฟาสต์ทูลเซอร์โว
3. นำข้อมูลระยะขับเคลื่อนมีดกลึงที่วัดได้จากเซนเซอร์ มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะขับเคลื่อนมีดกลึงกับเวลา ดังรูปที่ 5.8
4. ปรับค่า ΔV ให้มีขนาดน้อยลง และใช้เป็นสัญญาณจุดปรับตั้งใหม่
5. ทำตามขั้นตอนที่ 1 – 4 ซ้ำอีกครั้ง จนกระทั่งไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างขั้นบันไดของระยะขับเคลื่อนมีดกลึงที่วัดจากเซนเซอร์ได้

5.4.3. ผลการทดสอบและการอภิปราย

เมื่อปรับค่าความแตกต่างระหว่างขั้นของแรงดันไฟฟ้า (ΔV) ของสัญญาณจุดปรับตั้งให้มีขนาดน้อยลงเรื่อยๆ แล้วนำข้อมูลของระยะขับเคลื่อนที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดระยะทางมาสร้างกราฟ พบว่าขนาดของขั้นบันไดของระยะขับเคลื่อนมีดกลึงที่เล็กที่สุดที่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างขั้นได้ มีค่าเท่ากับ 0.5 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 5.8 ดังนั้นความละเอียดในการขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์โวจึงมีค่าเท่ากับ 0.5 ไมโครเมตร



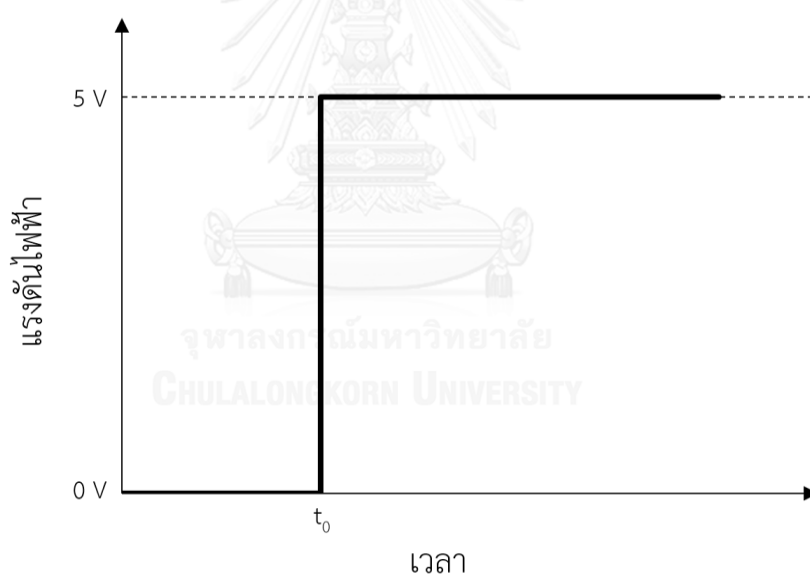
รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบความละเอียดในการขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์โว

5.5. การทดสอบการตอบสนองในภาวะชั่วคราว

5.5.1 วิธีการทดสอบ

เขียนโปรแกรมสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบขั้นบันไดขนาด 5 โวลต์ ดังรูปที่ 5.9 ใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบขั้นบันไดดังกล่าวเป็นสัญญาณจุดปรับตั้งในการควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์โว และนำข้อมูลระยะขับเคลื่อนมีดกลึงที่วัดได้จากเซนเซอร์ มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะขับเคลื่อนมีดกลึงกับเวลา จะได้กราฟแสดงการตอบสนองในภาวะชั่วคราวของฟาสต์ทูลเซอร์โว

ค่าที่สนใจในการทดสอบการตอบสนองในภาวะชั่วคราวของฟาสต์ทูลเซอร์โวคือ โอเวอร์ชูต (overshoot) และช่วงเวลาขึ้น (rise time) ซึ่งสามารถวัดได้จากเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากระยะทาง 10% ของระยะขับเคลื่อนมีดกลึงในสถานะอยู่ตัว (steady state value) ไปยังระยะทาง 90% ของระยะขับเคลื่อนมีดกลึงในสถานะอยู่ตัว ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.9 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบขั้นบันไดขนาด 5 โวลต์ที่ใช้ทดสอบผลตอบสนองในภาวะชั่วคราว

5.5.2. ขั้นตอนการทดสอบ

1. เขียนโปรแกรมสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบขั้นบันไดขนาด 5 โวลต์ ดังรูปที่ 5.9
2. ใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบขั้นบันไดดังกล่าวเป็นสัญญาณจุดปรับตั้งในการควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์ไว
3. นำข้อมูลระยะขับเคลื่อนมีดกลึงที่วัดได้จากเซนเซอร์ มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะขับเคลื่อนมีดกลึงกับเวลา จะได้กราฟแสดงการตอบสนองในภาวะชั่วคราวของฟาสต์ทูลเซอร์ไว ดังรูปที่ 5.10
4. หาเวลาช่วงขึ้นและโอเวอร์ชุตจากกราฟแสดงการตอบสนองในภาวะชั่วคราว

5.5.3. ผลการทดสอบและการอภิปราย

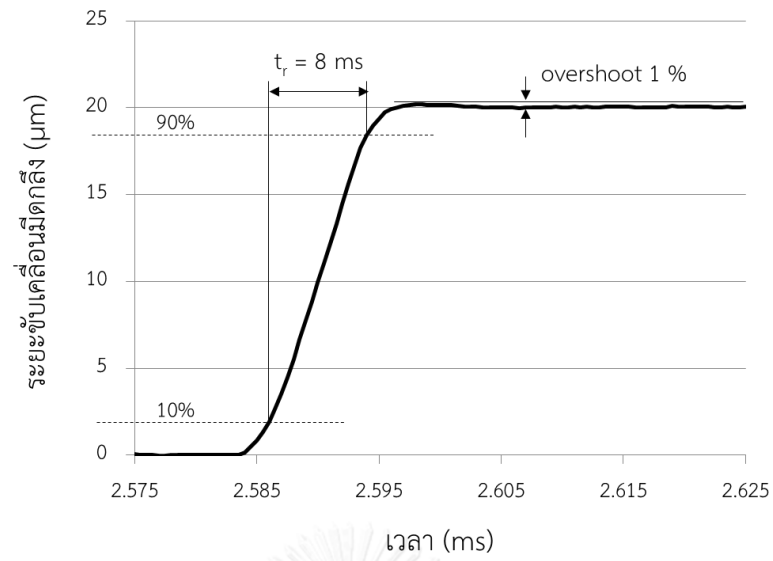
จากผลการทดสอบการตอบสนองในภาวะชั่วคราวในรูปที่ 5.10 ช่วงเวลาขึ้นในการขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์มีค่าเท่ากับ 8 มิลลิวินาที และมีโอเวอร์ชุต 1% ซึ่งเร็วเพียงพอสำหรับการใช้งาน ตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อข้อกำหนดการออกแบบ

5.6. การทดสอบการติดตามตำแหน่ง

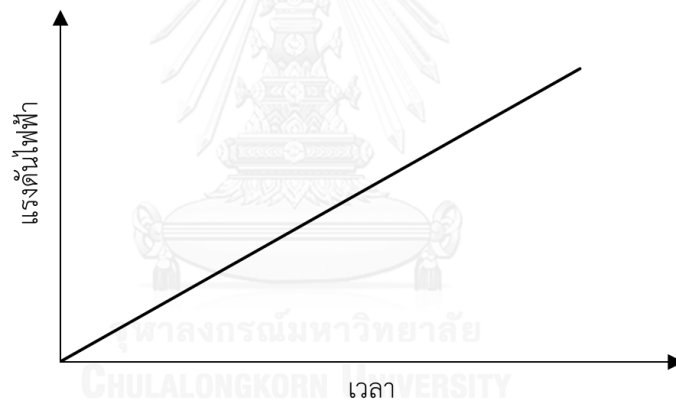
การทดสอบการติดตามตำแหน่ง (position tracking) จะทดสอบ 2 กรณี คือ สัญญาณจุดปรับตั้งเป็นฟังก์ชันแรมป์ (ramp) และฟังก์ชันพาราโบลา (parabola)

5.6.1. วิธีการทดสอบ

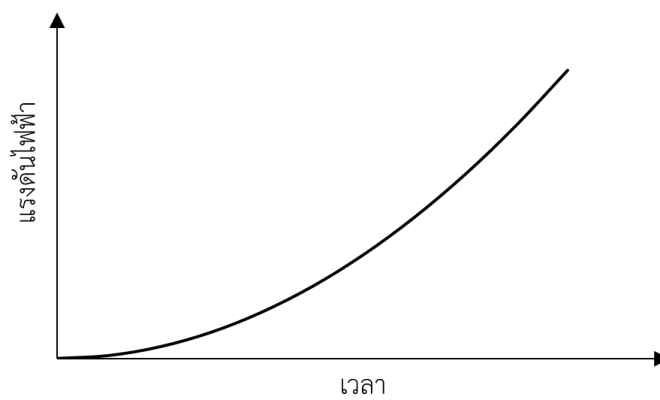
เขียนโปรแกรมสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันแรมป์และพาราโบลา ดังรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.12 ตามลำดับ ใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าง่ายดังกล่าวเป็นสัญญาณจุดปรับตั้งในการควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์ไว และนำข้อมูลระยะขับเคลื่อนมีดกลึงที่วัดได้จากเซนเซอร์ มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะขับเคลื่อนมีดกลึงกับเวลา และความคลาดเคลื่อนในการติดตามตำแหน่งกับเวลา ทำเช่นนี้ทั้ง 2 กรณี จะได้กราฟแสดงการติดตามตำแหน่งของฟาสต์ทูลเซอร์ไวเมื่อสัญญาณจุดปรับตั้งเป็นฟังก์ชันแรมป์และฟังก์ชันพาราโบลา



รูปที่ 5.10 ผลตอบสนองในภาวะชั่วคราวของการขับเคลื่อนมีดถึงของฟาสต์ทูลเซอร์ไว



รูปที่ 5.11 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าฟังก์ชันแรมป์



รูปที่ 5.12 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าฟังก์ชันพาราโบลา

5.6.2. ขั้นตอนการทดสอบ

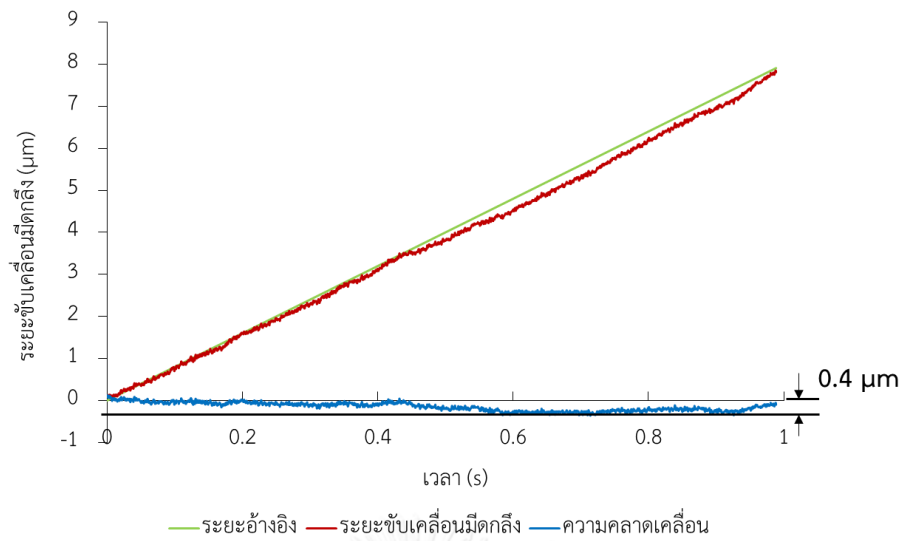
1. เขียนโปรแกรมสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันแรมป์ดังรูปที่ 5.11
2. ใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าฟังก์ชันแรมป์ดังกล่าวเป็นสัญญาณจุดปรับตั้งในการควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์โว
3. นำข้อมูลระยะขับเคลื่อนมีดกลึงที่วัดได้จากเซนเซอร์ มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะขับเคลื่อนมีดกลึงกับเวลา และความคลาดเคลื่อนในการติดตามตำแหน่งกับเวลา จะได้กราฟแสดงการติดตามตำแหน่งของฟาสต์ทูลเซอร์โว
4. หาความคลาดเคลื่อนในการติดตามตำแหน่งที่เกิดขึ้นสูงสุด
5. ทำตามขั้นตอนที่ 1 – 4 แต่เปลี่ยนเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฟังก์ชันพาราโบลาดังรูปที่ 5.12

5.6.3. ผลการทดสอบและการอภิปราย

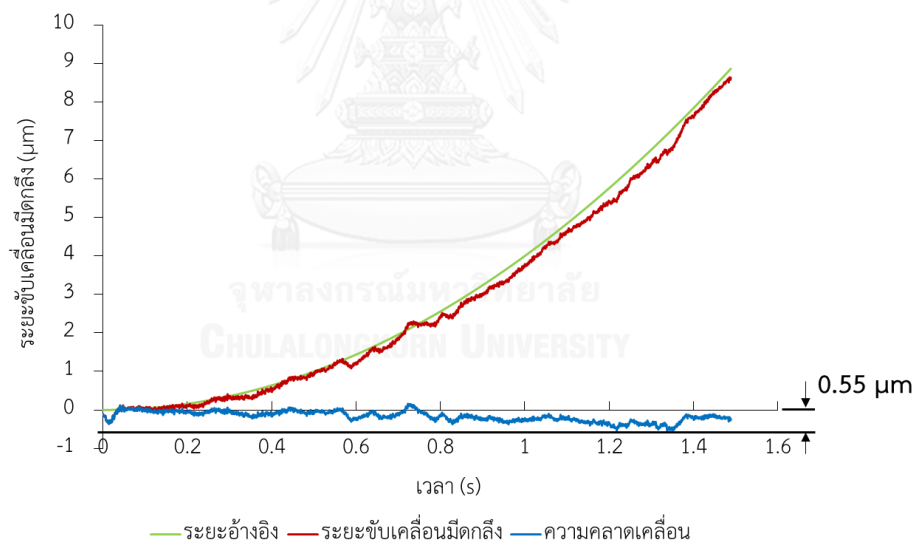
กราฟแสดงการติดตามตำแหน่งของฟาสต์ทูลเซอร์โวเมื่อสัญญาณจุดปรับตั้งเป็นฟังก์ชันแรมป์และฟังก์ชันพาราโบลา แสดงได้ดังรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 ตามลำดับ เส้นสีเขียวในกราฟคือ ระยะอ้างอิงจากสัญญาณจุดปรับตั้ง เส้นสีแดงคือระยะขับเคลื่อนมีดกลึงที่วัดได้จากเซนเซอร์ และเส้นสีน้ำเงินคือความคลาดเคลื่อนในการติดตามตำแหน่ง และความคลาดเคลื่อนในการติดตามตำแหน่งที่เกิดขึ้นสูงสุดของทั้ง 2 กรณี แสดงในตารางที่ 5.6

จากผลการทดสอบดังกล่าวจะเห็นได้ว่า มีความคลาดเคลื่อนในการติดตามตำแหน่งเกิดขึ้นทั้ง 2 กรณี เนื่องจากระบบควบคุมของตำแหน่งของฟาสต์ทูลเซอร์โวเป็นระบบแบบ 1 (system type 1) จึงเกิดความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว (steady state error) เมื่อสัญญาณจุดปรับตั้งเป็นฟังก์ชันแรมป์หรือฟังก์ชันพาราโบลา และเมื่อสั่งเกตเพิ่มเติมจะพบว่าความคลาดเคลื่อนในการติดตามตำแหน่งเพิ่มขึ้นเมื่อระยะขับเคลื่อนมีดกลึงเพิ่มขึ้น มีสาเหตุมาจากความไม่สมมาตรของ flexure ส่วนบนและส่วนล่าง ซึ่งเกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนในการผลิตตรงบริเวณข้อพับ (รูปที่ 5.15) ทำให้ข้อพับแต่ละตำแหน่งมีขนาดไม่เท่ากัน ส่งผลให้ส่วนเคลื่อนที่ของระบบนำทางเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปในแนวแกน y (อ้างอิงตามรูปที่ 5.15) และเบี่ยงเบนขึ้นเรื่อยๆ เมื่อระยะขับเคลื่อนมีดกลึงเพิ่มขึ้น ดังนั้นถ้าสามารถผลิตระบบนำทางได้แม่นยำกว่านี้ จะสามารถลดความคลาดเคลื่อนในการติดตามตำแหน่งได้

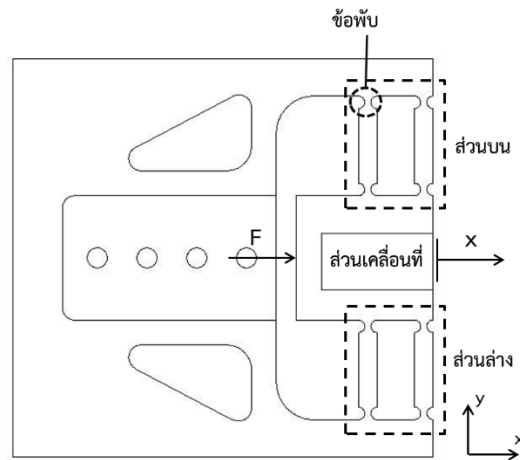
อย่างไรก็ตาม จากตารางที่ 5.6 จะเห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนในการติดตามตำแหน่งที่เกิดขึ้นสูงสุดมีค่าเพียง $0.55 \mu\text{m}$ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการใช้งานเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงสามารถใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวนี้ในการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมได้



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงการติดตามตำแหน่งของฟาสต์ทูลเซอร์ไว
เมื่อสัญญาณจุดปรับตั้งเป็นฟังก์ชันแรมป์



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงการติดตามตำแหน่งของฟาสต์ทูลเซอร์ไว
เมื่อสัญญาณจุดปรับตั้งเป็นฟังก์ชันพาราโบลา



รูปที่ 5.15 flexure ส่วนบนและส่วนล่างของระบบนำทาง

ตารางที่ 5.6 ความคลาดเคลื่อนในการติดตามตำแหน่งที่เกิดขึ้นสูงสุด
เมื่อสัญญาณจุดปรับตั้งเป็นฟังก์ชันต่างๆ

ความคลาดเคลื่อนในการติดตามตำแหน่งที่เกิดขึ้นสูงสุด (μm)	
ฟังก์ชันแรมป์	ฟังก์ชันพาราโบลา
0.40	0.55

ตารางที่ 5.7 สรุปผลทดสอบสมรรถนะของฟาสต์ทูลเซอร์โว

สมรรถนะ	ผลการทดสอบ
ระยะขับเคลื่อนมีดกลึงสูงสุด	40 ไมโครเมตร
ความละเอียดในการขับเคลื่อน	0.5 ไมโครเมตร
ช่วงเวลาขึ้น (10% - 90%)	8 มิลลิวินาที
โอเวอร์ชูต	1%
ความคลาดเคลื่อนในการติดตามตำแหน่ง (แรมป์)	0.40 ไมโครเมตร
ความคลาดเคลื่อนในการติดตามตำแหน่ง (พาราโบลา)	0.55 ไมโครเมตร

5.7. สรุปผลการทดสอบสมรรถนะ

จากผลการทดสอบสมรรถนะในตารางที่ 5.7 ฟาสต์ทูลเซอร์ไวท์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสมรรถนะด้านต่างๆ เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งเพียงพอสำหรับการนำไปใช้ปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมในขณะกึ่งได้

5.8. การสอบเทียบฟาสต์ทูลเซอร์ไวท์

การควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกึ่งของฟาสต์ทูลเซอร์ไวท์เป็นการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้สัญญาณป้อนกลับเป็นระยะขยายตัวของเพียโซอิเล็กทริกที่วัดได้จากเซนเซอร์เกจวัดความเครียดที่ติดตั้งภายในเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งสัญญาณป้อนกลับดังกล่าวยังไม่ได้รวมผลกระทบจากระบบนำทาง (การเสียรูป (deformation) ของเพียโซอิเล็กทริกอันเนื่องมาจากแรงสปริงจาก flexure ของระบบนำทาง) ตามที่แสดงในแผนภาพบล็อกในรูปที่ 5.2 การควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกึ่งแบบป้อนกลับดังกล่าวจึงไม่ใช้การควบคุมระยะที่มิดกึ่งเคลื่อนที่ไปโดยตรง แต่เป็นการควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกึ่งโดยการควบคุมระยะขยายตัวของเพียโซอิเล็กทริก ดังนั้นจึงต้องสอบเทียบฟาสต์ทูลเซอร์ไวท์ก่อนนำไปใช้งานจริง

5.8.1. แนวทางการสอบเทียบ

การสอบเทียบฟาสต์ทูลเซอร์ไวท์เป็นการสอบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่ใช้เป็นสัญญาณจุดปรับตั้งของการควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกึ่งที่มีขนาด 0 – 10 โวลต์ กับระยะขับเคลื่อนมีดกึ่งที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดระยะทาง เนื่องจากระยะขยายตัวของเพียโซอิเล็กทริกมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าดังนั้นจึงกำหนดให้ความสัมพันธ์ของระยะขับเคลื่อนมีดกึ่งกับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าอยู่ในรูป

$$x = aE \quad (5.1)$$

โดยที่

x คือระยะขับเคลื่อนมีดกึ่ง

E คือแรงดันไฟฟ้าขาเข้า

a คือค่าคงตัวที่หาได้จากการสอบเทียบ

โดยอ้างอิงวิธีการสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO 11095:1996 “linear calibration using reference materials”

5.8.2. วิธีการสอบเทียบ

กำหนดตำแหน่งที่ใช้สอบเทียบ 10 ตำแหน่งตลอดย่านการใช้งาน คือ ตั้งแต่ 0 โวลต์ ถึง 10 โวลต์ ระยะห่างระหว่างแต่ละตำแหน่งที่ใช้ในการสอบเทียบคือ 1 โวลต์ โดยไม่ใช้ตำแหน่งที่ 0 โวลต์ เนื่องจากเป็นตำแหน่งอ้างอิง และแต่ละตำแหน่งวัดซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง

แปรค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าตั้งแต่ 0 ถึง 10 โวลต์ โดยเพิ่มขึ้นทีละ 1 โวลต์ จากนั้นแปรค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าลดลงทีละ 1 โวลต์ รวมทั้งหมด 10 รอบ ทั้งขาไปและขากลับ จากนั้นนำข้อมูลมาสร้างเส้นโค้งการสอบเทียบ (calibration curve) และสร้างสมการการสอบเทียบ พร้อมทั้งคำนวณความไม่แน่นอน (uncertainty) ที่เกิดจากการสอบเทียบ ตามวิธีการที่กล่าวไว้ในมาตรฐาน ISO 11095:1996

สาเหตุของการสอบเทียบขาไปและขากลับ คือ ความผิดพลาดของการขยายตัวของเพียโซอิเล็กทริกอันเนื่องมาจากฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ส่งผลให้ระยะขับเคลื่อนมีค่านิ่งผิดพลาดไป จึงต้องสอบเทียบทั้งขาไปและขากลับเพื่อให้ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากการสอบเทียบครอบคลุมความผิดพลาดอันเนื่องมาจากฮิสเทอรีซิส

5.8.3. ขั้นตอนการสอบเทียบ

1. รีเซท (reset) ตำแหน่งเซนเซอร์วัดระยะทางให้เท่ากับ 0 เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟาสต์ทูลเซอร์เท่ากับ 0 เพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิง
2. แปรค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่ใช้เป็นสัญญาณจุดปรับตั้งตั้งแต่ 0 ถึง 10 โวลต์ โดยเพิ่มขึ้นทีละ 1 โวลต์ และบันทึกระยะขับเคลื่อนมีค่านิ่งที่อ่านได้จากเซนเซอร์วัดระยะทาง
3. แปรค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าจากระดับเดิมในขั้นตอนที่ 1 (10 โวลต์) ลดลงทีละ 1 โวลต์ และบันทึกระยะขับเคลื่อนมีค่านิ่งที่อ่านได้จากเซนเซอร์วัดระยะทาง
4. ทำตามขั้นตอนที่ 1 – 3 ทั้งหมด 5 รอบ จะได้จุดข้อมูลทั้ง 100 จุด จากการวัดระยะขับเคลื่อนมีค่านิ่งตลอดย่านการใช้งาน 10 ตำแหน่ง และวัดซ้ำตำแหน่งละ 10 ครั้ง
5. สร้างเส้นโค้งการสอบเทียบและสมการการสอบเทียบพร้อมทั้งคำนวณความไม่แน่นอน ตามวิธีการที่กล่าวไว้ในมาตรฐาน ISO 11095:1996

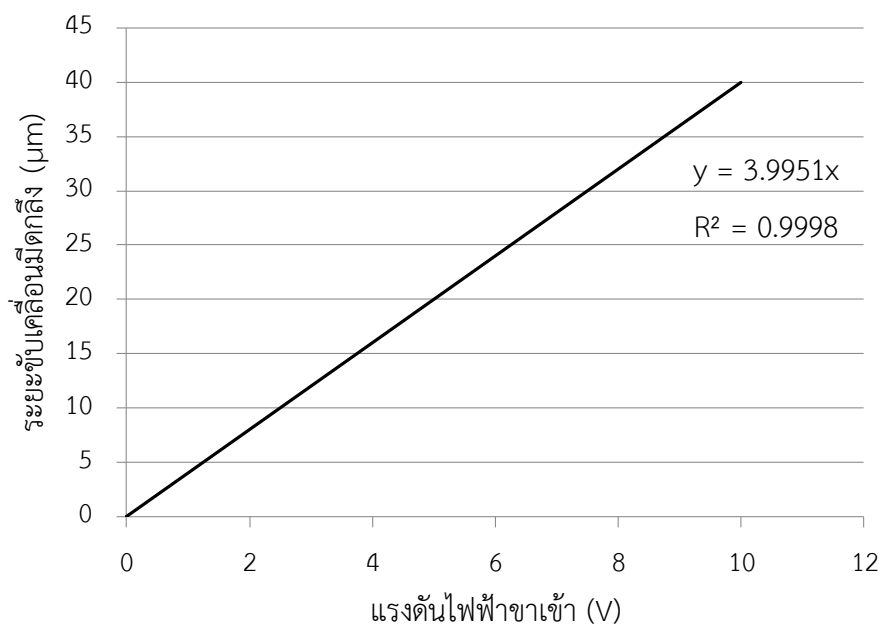
5.8.4. ผลการสอบเทียบ

จากการวัดระยะขับเคลื่อนมีดกลึงที่ตำแหน่งต่างๆ 10 จุด ซ้ำ 10 ครั้ง จะคำนวณหาค่า a ในสมการที่ 5.1 และความไม่แน่นอนจากการสอบเทียบตามวิธีใน ISO11095:1996 จะได้เส้นโค้งการสอบเทียบดังรูปที่ 5.16 และมีสมการการสอบเทียบดังนี้

$$x = 4.00 \text{ V} \pm 0.34 \text{ } \mu\text{m}$$

และเมื่อรวมความไม่แน่นอนจากการวัดของเซนเซอร์วัดระยะทางที่ใช้ในการสอบเทียบที่มีค่าเท่ากับ 0.6 ไมโครเมตร (หัวข้อที่ 5.2.2) โดยใช้สมการที่ 3.1 จะได้สมการการสอบเทียบที่สามารถนำไปใช้งานได้ดังนี้

$$x = 4.00 \text{ V} \pm 0.69 \text{ } \mu\text{m} \quad (5.2)$$



รูปที่ 5.16 เส้นโค้งการสอบเทียบ

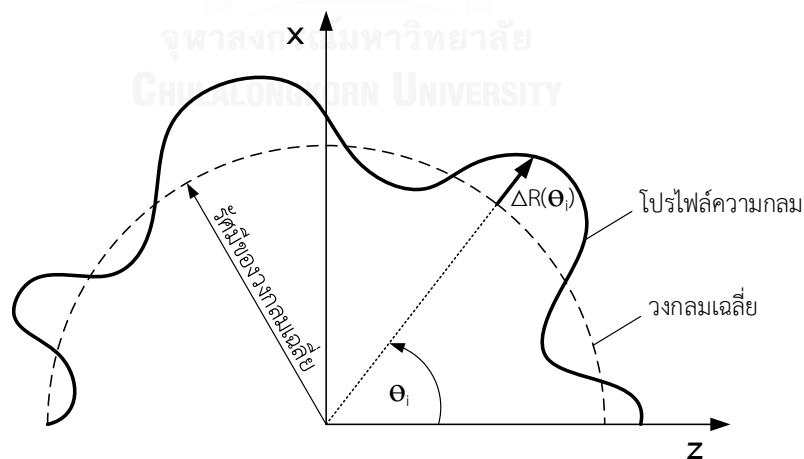
บทที่ 6

การปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะเกียวด้วยฟาสต์ทูลเซอร์โว

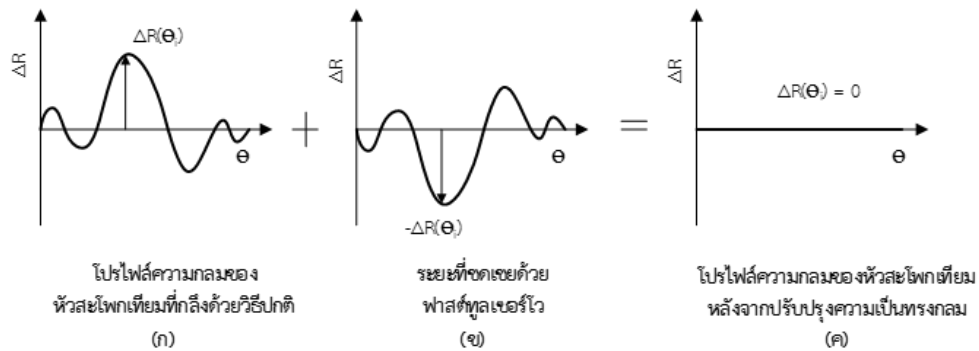
6.1. แนวคิดในการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะเกียวด้วยฟาสต์ทูลเซอร์โว

จากการทดลองศึกษาเบื้องต้นในบทที่ 3 พบว่าสาเหตุหลักของความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลม (out-of-sphericity) ของหัวสะเกียวที่ได้อาจเกิดจากการกึ่งด้วยวิธีปกติเกิดจากความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบที่มีดกถึงเคลื่อนที่ (ระนาบ x-z) จึงเกิดแนวทางในการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะเกียวด้วยการปรับเปลี่ยนเส้นทางเดินมีดกถึง (tool path) เพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนจากความกลม (out-of-roundness) ในระนาบ x-z ด้วยฟาสต์ทูลเซอร์โว โดยใช้ข้อมูลจากโปรไฟล์ความกลม (roundness profile) ของหัวสะเกียวที่กึ่งด้วยวิธีปกติ

โปรไฟล์ความกลมคือรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ย (mean circle) $\Delta R(\theta_i)$ ที่ตำแหน่งมุม θ_i ดังรูปที่ 6.1 ถ้าโปรไฟล์ความกลมของหัวสะเกียวที่กึ่งด้วยวิธีปกติมีรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ย $\Delta R(\theta_i)$ ที่ตำแหน่งมุม θ_i เป็นดังรูปที่ 6.2 (ก) เมื่อใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวขับเคลื่อนมีดกถึงชดเชยรัศมีที่คลาดเคลื่อน $\Delta R(\theta_i)$ ด้วยระยะทาง $-\Delta R(\theta_i)$ ที่ทุกตำแหน่งมุม θ_i ในขณะกึ่งดังรูปที่ 6.2 (ข) จะได้หัวสะเกียวที่ไม่มี ความคลาดเคลื่อนจากความกลมในระนาบ x-z ดังรูปที่ 6.2 (ค) ซึ่งเป็นการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะเกียว



รูปที่ 6.1 โปรไฟล์ความกลม



รูปที่ 6.2 การปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะพานที่กึ่งด้วยวิธีปกติด้วยฟาสต์ทูลเซอร์โว

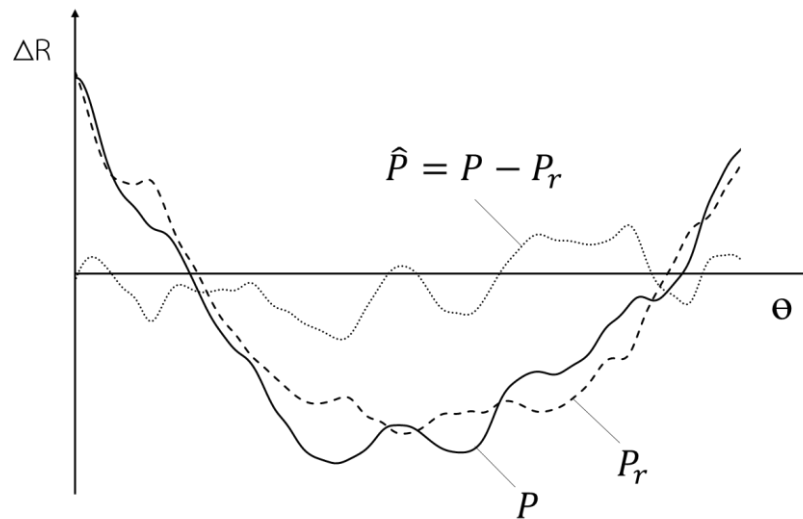
อย่างไรก็ตาม โพรไฟล์ความถี่ของหัวสะพานที่กึ่งใดๆ ที่จะนำไปใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดรัศมีที่คลาดเคลื่อนที่ต้องการชดเชย เป็นสิ่งที่วัดได้หลังจากการกลิ้งโดยวิธีปกติ ที่ไม่ได้ใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวชดเชยรัศมีที่คลาดเคลื่อน ซึ่งไม่สามารถทราบได้ก่อนการกลิ้ง จึงจำเป็นต้องหา “โพรไฟล์ความถี่ความถี่ตัวแทน” เพื่อใช้ทำนายโพรไฟล์ความถี่ความถี่ที่กึ่งขึ้นถ้ากลิ้งโดยไม่ได้ใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวชดเชยรัศมีที่คลาดเคลื่อน ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกโพรไฟล์ความถี่ความถี่ที่กึ่งขึ้นถ้ากลิ้งโดยวิธีปกติที่มิได้ใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวชดเชยรัศมีที่คลาดเคลื่อนว่า “โพรไฟล์ความถี่ความถี่ปกติ”

เมื่อใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวขับเคลื่อนมีดกลิ้งเพื่อชดเชยรัศมีที่คลาดเคลื่อนที่อ้างอิงจากโพรไฟล์ความถี่ความถี่ตัวแทน จะสามารถปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะพานที่กึ่งได้ โดยที่ความคลาดเคลื่อนจากความถี่ความถี่ของหัวสะพานที่กึ่งได้หลังจากการปรับปรุง สามารถเกิดขึ้นได้จากความคลาดเคลื่อนของโพรไฟล์ความถี่ความถี่ตัวแทนที่ใช้ กับโพรไฟล์ความถี่ความถี่ปกติ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

ให้ P_r เป็นโพรไฟล์ความถี่ความถี่ตัวแทน และให้ P เป็นโพรไฟล์ความถี่ความถี่ปกติ ดังรูปที่ 6.3 เมื่อปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะพานที่กึ่งโดยใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวชดเชยรัศมีที่คลาดเคลื่อนที่อ้างอิงจากโพรไฟล์ความถี่ความถี่ตัวแทน โพรไฟล์ความถี่ความถี่ของหัวสะพานที่กึ่งได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลม \hat{P} จะเป็นผลต่างระหว่าง P กับ P_r ดังนี้

$$\hat{P} = P - P_r \quad (6.1)$$

และแสดงโพรไฟล์ความถี่ความถี่ \hat{P} และ P_r ได้ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 โพรไฟล์ความกลมของหัวสะพานที่วัดได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนของโพรไฟล์ความกลมตัวแทนกับโพรไฟล์ความกลมปกติ

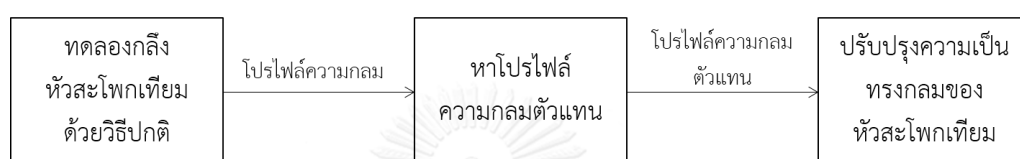
จะเห็นได้ว่า โพรไฟล์ความกลมที่นำมาใช้เป็นโพรไฟล์ความกลมตัวแทนมีผลกระทบโดยตรงต่อโพรไฟล์ความกลมของหัวสะพานที่วัดได้หลังจากการปรับปรุง ซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานที่วัดได้หลังจากการปรับปรุง ดังนั้นความเหมาะสมของโพรไฟล์ความเป็นตัวแทนที่นำมาใช้ทำนายเส้นทางเดินมีดกลึงก่อนชดเชยจึงมีความสำคัญต่อความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานที่เพิ่มขึ้นหลังจากการปรับปรุง งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีทางสถิติเพื่อหาโพรไฟล์ความกลมตัวแทนที่เหมาะสม ด้วยการทดลองกลึงหัวสะพานเทียมด้วยมีดกลึงที่ติดตั้งบนฟาสต์ทูลเซอร์โว โดยยังไม่ใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวขับเคลื่อนมีดกลึงเพื่อชดเชยระยะใดๆ เพื่อศึกษาลักษณะของโพรไฟล์ความกลม (roundness profile characteristic) ของหัวสะพานเทียมจากการกลึงที่รวมผลกระทบของการติดตั้งฟาสต์ทูลเซอร์โวเข้าไปในระบบ จากนั้นวิเคราะห์โพรไฟล์ความกลมที่เกิดขึ้นและนำไปใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้โพรไฟล์ความกลมตัวแทน และวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจากการเลือกใช้โพรไฟล์ความกลมในแต่ละแนวทางด้วยวิธีทางสถิติ เพื่อหาโพรไฟล์ความกลมตัวแทนที่เหมาะสมในการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียม

แนวคิดของการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมในงานวิจัยนี้คือ การใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวขับเคลื่อนชดเชยรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ย โดยใช้โพรไฟล์ความกลมตัวแทนทำนายโพรไฟล์ความกลมที่จะเกิดขึ้นถ้ากลึงโดยวิธีปกติ (โพรไฟล์ความกลมปกติ)

6.2. ขั้นตอนการดำเนินการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะเก็อกเทียม

การดำเนินการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะเก็อกเทียมนั้นเริ่มจากการทดลองกลึงหัวสะเก็อกเทียมเพื่อหาโปรไฟล์ความกลมที่เกิดขึ้นจากการกลึงด้วยวิธีปกติหลังจากติดตั้งฟาสต์ทูลเซอร์โว จากนั้นนำข้อมูลโปรไฟล์ความกลมที่ได้จากการทดลองมาหาโปรไฟล์ความกลมตัวแทน และขั้นตอนสุดท้ายคือการนำโปรไฟล์ความกลมตัวแทนไปใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะเก็อกเทียมด้วยฟาสต์ทูลเซอร์โว ขั้นตอนดำเนินการดังกล่าวสามารถเขียนเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่

6.4



รูปที่ 6.4 แผนภาพการดำเนินการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะเก็อกเทียม

6.3. การทดลองกลึงหัวสะเก็อกเทียมด้วยวิธีปกติหลังจากติดตั้งฟาสต์ทูลเซอร์โว

6.3.1. จุดประสงค์การทดลอง

เพื่อศึกษาลักษณะของโปรไฟล์ความกลมของหัวสะเก็อกเทียมที่กลึงด้วยวิธีปกติหลังจากติดตั้งฟาสต์ทูลเซอร์โว

6.3.2. การจัดเตรียมการทดลอง

6.3.2.1. การจัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

เครื่องกลึงซีเอ็นซี เม็ดเม็ด และเครื่องวัดความกลมมีการจัดเตรียมเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.2.1 การติดตั้งฟาสต์ทูลเซอร์โวบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีทำตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 4.6.4 การควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์โวมี่วิธีการเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 5.2.1 การใช้คอมพิวเตอร์สร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเพื่อควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์โวมี่วิธีการเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 5.2.3

6.3.2.2. วัสดุที่ใช้กลึงหัวสะเก็อกเทียม

เพลลาเหล็กกล้าไร้สนิมกลม 304 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร

6.3.2.3. ขนาดและรูปร่างของหัวสะโพกเทียม

เส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มิลลิเมตร ครอบคลุมพื้นที่ใช้งาน 270°

6.3.2.4. ข้อกำหนดในการกลึงหัวสะโพกเทียม

ใช้ข้อกำหนดเดียวกับหัวข้อที่ 3.2.4

6.3.3. วิธีการทดลอง

กลึงหัวสะโพกเทียมด้วยมีดกลึงที่อยู่บนฟาสต์ทูลเซอร์โว โดยใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวควบคุมตำแหน่ง ปลายมีดกลึงให้อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกับตอนที่วัดระยะออฟเซตปลายมีดกลึง (tool offset) โดยไม่ใช้ ฟาสต์ทูลเซอร์โวขับเคลื่อนมีดกลึงเพื่อชดเชยระยะใดๆ ในขณะกลึง

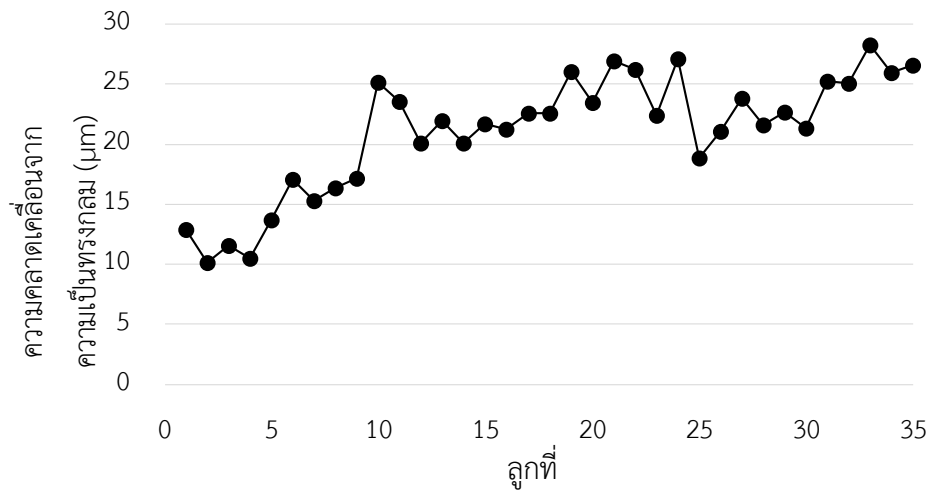
การทดลองนี้จะกลึงหัวสะโพกเทียมทั้งหมด 35 ลูกสำหรับการกลึงใน 1 เม็ดมีด และใช้เม็ดมีด ทั้งหมด 2 เม็ดมีดในการทดลองนี้ ดังนั้นจะได้หัวสะโพกเทียมทั้งหมด 70 ลูก จากนั้นนำไปวัดโปรไฟล์ ความกลมในระนาบ x-z

6.3.4. ขั้นตอนการทดลอง

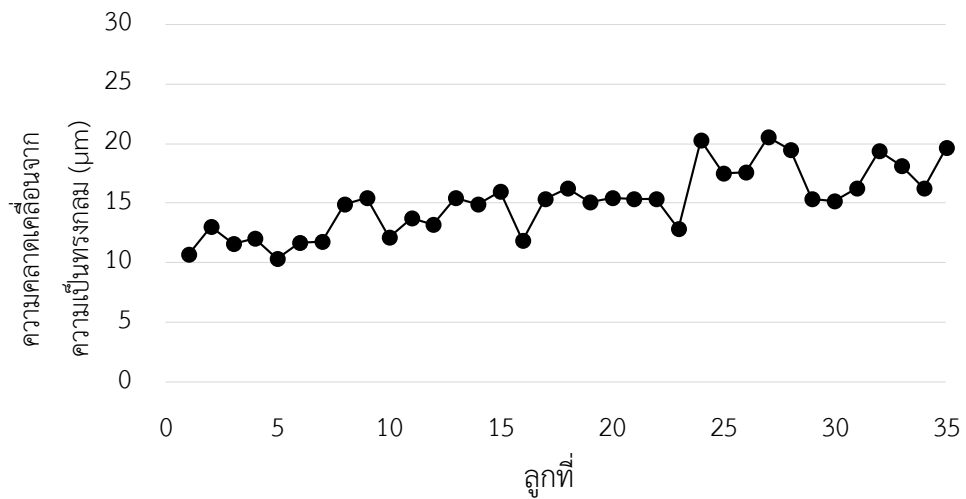
1. กลึงหัวสะโพกเทียม 35 ลูก ตามขั้นตอนที่ 1 – 6 ที่กล่าวไว้ในขั้นตอนการทดลองของการทดลองศึกษาเบื้องต้น หัวข้อที่ 3.4
2. เปลี่ยนเม็ดมีดแล้วกลึงหัวสะโพกเทียมเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1
3. นำหัวสะโพกเทียมทั้ง 70 ลูก มาวัดโปรไฟล์ความกลมในระนาบ x-z และความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลม

6.3.5. ผลการทดลอง

ค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมทั้ง 70 ลูกที่ได้จากการทดลอง กลึงด้วยเม็ดมีดที่ 1 และเม็ดมีดที่ 2 แสดงในกราฟรูปที่ 6.5 โดยแบ่งตามเม็ดมีดที่ใช้กลึง ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการวัด 5 ครั้งของแต่ละลูก ข้อมูลดิบของการวัดทั้ง 5 ครั้งของแต่ละลูกของเม็ดมีดที่ 1 และเม็ดมีดที่ 2 แสดงไว้ในตารางที่ ก.3 และตารางที่ ก.4 ตามลำดับ โปรไฟล์ความกลมในระนาบ x-z ของหัวสะโพกเทียมทั้ง 70 ลูกแสดงในรูปที่ 6.6 โดยแบ่งตามเม็ดมีดที่ใช้กลึง

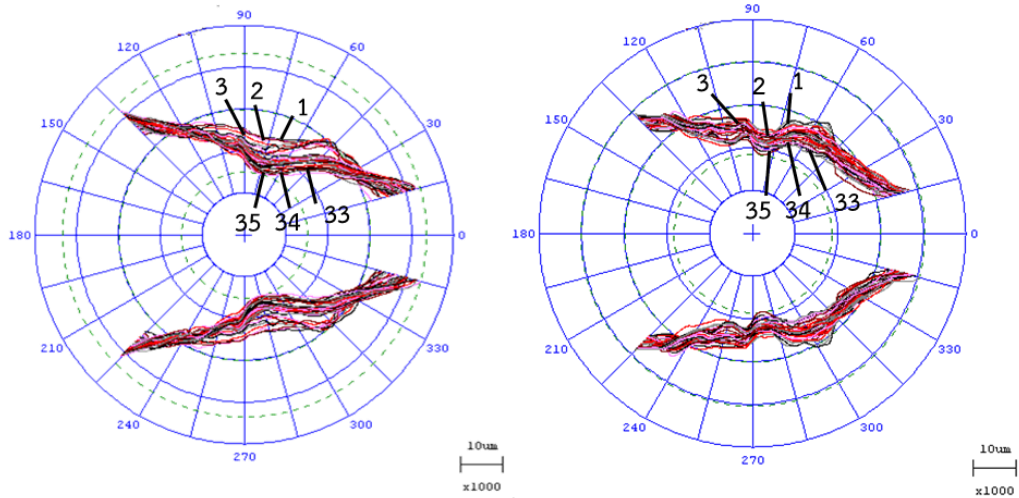


(ก) หัวสะโพกเทียมที่กลึงด้วยเม็ดมีดที่ 1



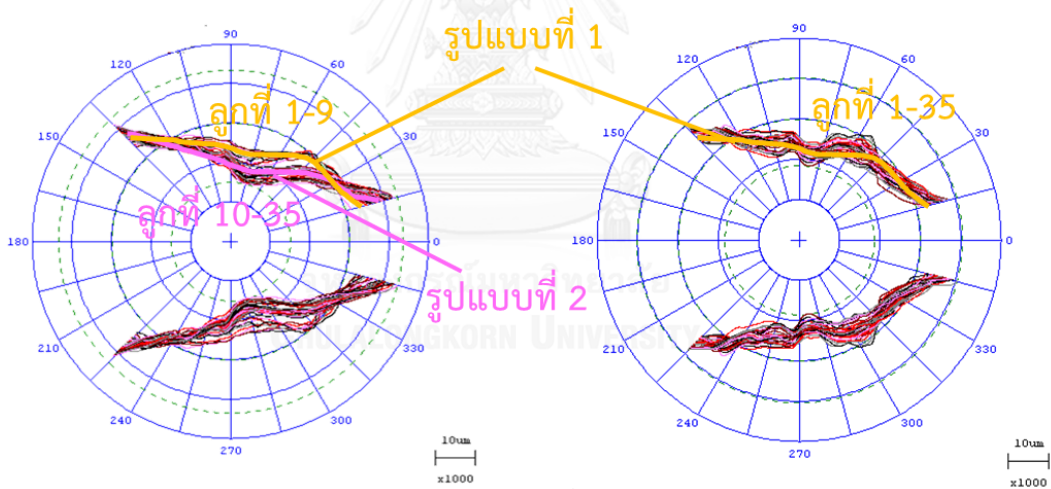
(ข) หัวสะโพกเทียมที่กลึงด้วยเม็ดมีดที่ 2

รูปที่ 6.5 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมทั้ง 70 ลูก



(ก) หัวสะพานเชื่อมที่กลึงด้วยเม็ดมีดที่ 1 (ข) หัวสะพานเชื่อมที่กลึงด้วยเม็ดมีดที่ 2

รูปที่ 6.6 โปรไฟล์ความกลมของหัวสะพานเชื่อมทั้ง 70 ลูกที่กลึงด้วยวิธีปกติ
หลังจากติดตั้งฟาสต์ทูลเซอร์ไว



(ก) หัวสะพานเชื่อมที่กลึงด้วยเม็ดมีดที่ 1 (ข) หัวสะพานเชื่อมที่กลึงด้วยเม็ดมีดที่ 2

รูปที่ 6.7 รูปแบบของโปรไฟล์ความกลมที่เกิดขึ้นจากการกลึงทั้ง 2 เม็ดมีด

6.3.6. การอภิปรายผลการทดลอง

จากผลการทดลองในรูปที่ 6.5 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโปกเทียมมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งที่กลิ้ง และจากผลการทดลองในรูปที่ 6.6 พบว่าโปรไฟล์ความกลมของหัวสะโปกเทียมมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนครั้งที่กลิ้ง โดยที่หัวสะโปกเทียมที่ถูกกลิ้งในลำดับที่ใกล้เคียงกัน จะมีโปรไฟล์ความกลมที่คล้ายคลึงกัน และแตกต่างกันออกไปเรื่อยๆ ในลำดับการกลิ้งที่ไกลออกไป (หมายเลขที่แสดงในรูปที่ 6.6 แสดงถึงลำดับของการกลิ้ง) ซึ่งเป็นผลมาจากการสึกหรอของเม็ดเม็ดตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ในหัวข้อที่ 3.5 และเมื่อพิจารณากราฟในรูปที่ 6.5 เพิ่มเติมจะพบว่า หัวสะโปกเทียมที่กลิ้งด้วยเม็ดเม็ดที่ 1 มีอัตราการเพิ่มของความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมมากกว่าหัวสะโปกเทียมที่กลิ้งด้วยเม็ดเม็ดที่ 2 แสดงถึงอัตราการสึกหรอ (wear rate) ของทั้ง 2 เม็ดเม็ดที่ไม่เท่ากัน โดยที่อัตราการสึกหรอของเม็ดที่ 1 มากกว่าอัตราการสึกหรอของเม็ดเม็ดที่ 2 ซึ่งอาจเกิดได้จากคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอของเม็ดเม็ดที่เลือกใช้ในงานวิจัย

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 6.7 (ก) จะพบว่าหัวสะโปกเทียมที่กลิ้งโดยใช้เม็ดเม็ดที่ 1 มีโปรไฟล์ความกลมทั้งหมด 2 รูปแบบ คือ เส้นสี่เหลี่ยมและเส้นสี่ชมพูตามรูป โดยที่เส้นสี่เหลี่ยมคือรูปแบบโปรไฟล์ความกลมของลูกที่ 1 – 9 และเส้นสี่ชมพูคือรูปแบบโปรไฟล์ความกลมของลูกที่ 10 – 35 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของการสึกหรอของเม็ดเม็ดต่อโปรไฟล์ความกลม และเมื่อพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 6.7 (ข) จะพบว่าหัวสะโปกเทียมที่กลิ้งโดยใช้เม็ดเม็ดที่ 2 มีโปรไฟล์ความกลมเพียงรูปแบบเดียว คือเส้นสี่เหลี่ยม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอัตราการสึกหรอที่ไม่เท่ากันของทั้ง 2 เม็ดเม็ด เม็ดเม็ดที่ 1 มีอัตราการสึกหรอมากกว่า ตามที่กล่าวไว้ข้างต้น โปรไฟล์ความกลมของหัวสะโปกเทียมที่กลิ้งด้วยเม็ดเม็ดที่ 1 จึงเปลี่ยนแปลงไปเร็วกว่า ทำให้โปรไฟล์ความกลมที่เกิดขึ้นมีทั้งหมด 2 รูปแบบ ในขณะที่โปรไฟล์ความกลมของหัวสะโปกเทียมที่กลิ้งด้วยเม็ดเม็ดที่ 2 ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก จึงเกิดขึ้นเพียงรูปแบบเดียว

เมื่อนำโปรไฟล์ความกลมของหัวสะโปกเทียมทั้ง 70 ลูกมาจัดกลุ่มด้วยวิธีทางสถิติ โดยเลือกใช้การจัดกลุ่มแบบ k-means (k-means clustering) [14] ผลที่ได้จากการจัดกลุ่มคือ โปรไฟล์ความกลมทั้งหมด 70 ลูก สามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ (pattern) คือ รูปแบบที่ 1 (เส้นสี่เหลี่ยมในรูปที่ 6.7) ประกอบด้วยโปรไฟล์ความกลมของหัวสะโปกเทียมที่กลิ้งโดยเม็ดเม็ดที่ 1 ลูกที่ 1 – 9 และโปรไฟล์ความกลมของหัวสะโปกเทียมที่ถูกกลิ้งโดยเม็ดเม็ดที่ 2 ลูกที่ 1 – 35 และรูปแบบที่ 2 (เส้นชมพูในรูปที่ 6.7) ประกอบด้วยโปรไฟล์ความกลมของหัวสะโปกเทียมที่ถูกกลิ้งโดยเม็ดเม็ดที่ 2 ลูกที่ 10 – 35 ผลของการจัดกลุ่มแสดงไว้ในตารางที่ 6.1

จากผลการจัดกลุ่มตามตารางที่ 6.1 จะเห็นได้ว่า โปรไฟล์ความกลมรูปแบบที่ 1 ของทั้ง 2 เม็ดเม็ดเป็นรูปแบบเดียวกัน ดังนั้นหัวสะโปกเทียมที่กลิ้งด้วยเม็ดเม็ดที่ระดับการสึกหรอเดียวกันจะมีโปร

ไฟล์ความกลมที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งถ้าสามารถหาเมล็ดมีดที่มีคุณภาพสม่ำเสมอกว่านี้ได้ (อัตราการสีกหรือสม่ำเสมอกันทุกเมล็ดมีด) โพรไฟล์ความกลมที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากการกลึงด้วยเมล็ดมีดใดๆ จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของโพรไฟล์ความกลมที่คล้ายคลึงกันด้วย กล่าวคือ ถ้าเมล็ดมีดมีคุณภาพที่สม่ำเสมอ หัวสะโพกเทียมที่กลึงด้วยเมล็ดมีดใดๆ จะเกิดโพรไฟล์ความกลมรูปแบบที่ 2 ในจำนวนครั้งการกลึงที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 6.1 ผลการจัดกลุ่มโพรไฟล์ความกลมด้วยวิธี k-means

	โพรไฟล์ความกลมรูปแบบที่ 1	โพรไฟล์ความกลมรูปแบบที่ 2
เมล็ดมีดที่ 1	ลูกที่ 1 – 9	ลูกที่ 10 – 35
เมล็ดมีดที่ 2	ลูกที่ 1 – 35	-
จำนวน	44 ลูก	26 ลูก

6.3.7. สรุปผลการทดลอง

1. หัวสะโพกเทียมที่ได้จากการกลึงที่สภาวะเดียวกันและการสีกหรือของเมล็ดมีดในระดับเดียวกันจะมีโพรไฟล์ความกลมที่คล้ายคลึงกัน แม้ว่าจะไม่ได้กลึงด้วยเมล็ดมีดเม็ดเดียวกัน
2. หัวสะโพกเทียมที่กลึงในลำดับที่ใกล้เคียงกัน จะมีโพรไฟล์ความกลมที่คล้ายคลึงกัน และแตกต่างกันออกไปเรื่อยๆ ตามลำดับการกลึงที่ไกลออกไป เนื่องจากการสีกหรือของเมล็ดมีด

6.4. การหาโพรไฟล์ความกลมตัวแทนที่เหมาะสม

6.4.1. จุดประสงค์ของการหาโพรไฟล์ความกลมตัวแทนที่เหมาะสม

เพื่อหาโพรไฟล์ความกลมตัวแทนและประเมินความเหมาะสมของโพรไฟล์ความกลมตัวแทนก่อนนำไปใช้ปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียม

6.4.2. แนวทางการเลือกใช้โพรไฟล์ความกลมตัวแทน

จากการสรุปผลการทดลองในหัวข้อที่ 6.3.7 สามารถแบ่งแนวทางการเลือกใช้โพรไฟล์ความกลมตัวแทนได้ 2 แนวทาง ดังนี้

แนวทางที่ 1 : การเลือกใช้โพรไฟล์ความกลมตัวแทนจากโพรไฟล์ความกลมเฉลี่ย

จากการสรุปผลการทดลองในหัวข้อที่ 6.3.7 หัวสะพานเทียมที่ได้จากการกลึงที่สภาวะเดียวกัน และการสึกหรอของเม็ดมิดในระดับเดียวกันจะมีโพรไฟล์ความกลมที่คล้ายคลึงกัน แม้ว่าจะไม่ได้กลึงด้วยเม็ดมิดเม็ดเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถใช้โพรไฟล์ความกลมเฉลี่ยของโพรไฟล์ความกลมแต่ละรูปแบบเป็นโพรไฟล์ความกลมตัวแทนได้ ภายใต้สมมติฐานว่า การสึกหรอของเม็ดมิดส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโพรไฟล์ความกลมที่มีรูปแบบเดียวกันน้อยมาก แต่เนื่องจากอัตราการสึกหรอของเม็ดมิดที่ใช้ในงานวิจัยไม่เท่ากัน (คุณภาพไม่สม่ำเสมอ) ดังนั้นการทดลองปรับปรุงความเป็นทรงกลมในงานวิจัยนี้จะใช้โพรไฟล์ความกลมเฉลี่ยของรูปแบบที่ 1 (อ้างอิงตามตารางที่ 6.1) เพียงรูปแบบเดียว เพราะเป็นรูปแบบแรกที่จะเกิดขึ้นในการกลึงครั้งใดๆ

แนวทางที่ 2 : การเลือกใช้โพรไฟล์ความกลมตัวแทนจากโพรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้า

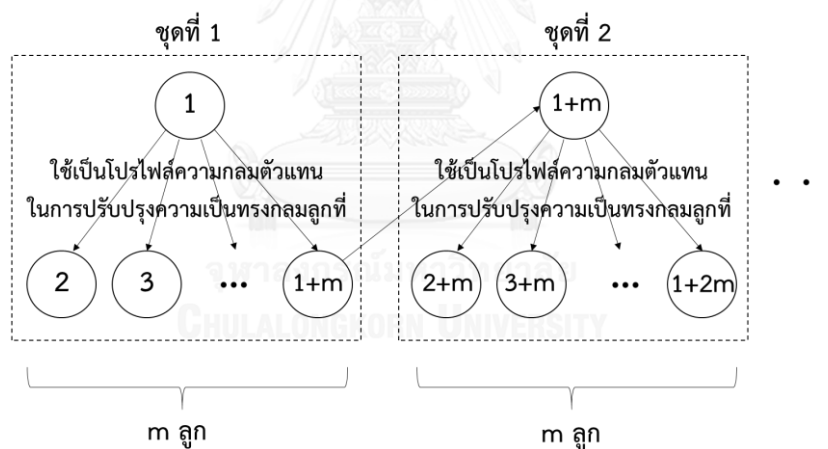
จากการสรุปผลการทดลองในหัวข้อที่ 6.3.7 หัวสะพานเทียมที่ถูกกลึงด้วยเม็ดมิดเดียวกันในลำดับที่ใกล้เคียงกันจะมีโพรไฟล์ความกลมที่คล้ายคลึงกัน และแตกต่างกันออกไปเรื่อยๆ ตามลำดับการกลึงที่ไกลออกไป ดังนั้นจึงสามารถใช้โพรไฟล์ความกลมของหัวสะพานเทียมที่กลึงในลำดับก่อนหน้าด้วยเม็ดมิดเดียวกัน เป็นโพรไฟล์ความกลมตัวแทนได้ ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกโพรไฟล์ความกลมของหัวสะพานเทียมที่กลึงในลำดับก่อนหน้าว่า “โพรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้า”

เมื่อใช้โพรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโพรไฟล์ความกลมตัวแทน ความคลาดเคลื่อนจากความไม่เป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามลำดับการกลึงที่ไกลออกไป จึงต้องกำหนดจำนวนหัวสะพานเทียมลูกถัดไปที่จะใช้โพรไฟล์ความกลมตัวแทนเดียวกันในการปรับปรุงความเป็นทรงกลม กล่าวคือ กำหนดจำนวนหัวสะพานเทียมลูกถัดไป m ลูก เพื่อใช้โพรไฟล์ความกลมของหัวสะพานเทียมลูกที่ 1 เป็นโพรไฟล์ความกลมตัวแทนในการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมลูกที่ 2 ลูกที่ 3 ไปเรื่อยๆ จนถึงลูกที่ $1+m$ และใช้โพรไฟล์ความกลมของหัวสะพานเทียมลูกที่ $1+m$ เป็นโพรไฟล์ความกลมตัวแทนในการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมลูกที่ $2+m$ ลูกที่ $3+m$ ไปเรื่อยๆ จนถึงลูกที่ $1+2m$ และทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ สำหรับหัวสะพานเทียม m ลูกถัดไป สามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 6.8

จากที่กล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่า วิธีนี้สามารถชดเชยความคลาดเคลื่อนจากความไม่เป็นทรงกลมที่เกิดจากการสึกหรอของเม็ดมิดได้ และสามารถชดเชยความคลาดเคลื่อนจากความไม่เป็นทรงกลมที่เกิดจากคุณภาพของเม็ดมิดที่ไม่สม่ำเสมอได้ เพราะเป็นการชดเชยตามลักษณะของโพรไฟล์ความกลมที่เกิดขึ้นของเม็ดมิดนั้นๆ (เนื่องจากเป็นเม็ดมิดเดียวกัน) ดังนั้นความคลาดเคลื่อนจากความไม่เป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมหลังจากปรับปรุงความเป็นทรงกลมด้วยวิธีนี้จะมีค่าน้อยกว่าการใช้โพรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโพรไฟล์ความกลมตัวแทน แต่วิธีนี้จำเป็นต้องวัดโพรไฟล์ความกลมทุก m ลูกเพื่อ

นำไปเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนของหัวสะพานเทียม m ลูกถัดไป ดังนั้นการกำหนดจำนวน m จึงมีผลต่อการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมในทางปฏิบัติ และมีผลต่อความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุง กล่าวคือ ถ้ากำหนดจำนวน m มากจะทำให้ง่ายต่อการปฏิบัติ แต่ความสามารถในการชดเชยความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการสึกหรอของเมตมีดจะลดลง ทำให้หัวสะพานเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงจะมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูง และในทางกลับกัน ถ้ากำหนดจำนวน m น้อย จะให้ทำให้ยากต่อการปฏิบัติ แต่หัวสะพานเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงจะมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมต่ำ ดังนั้นจึงต้องกำหนดให้จำนวน m ให้มากที่สุดโดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความความเป็นทรงกลมมีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

การกำหนดจำนวน m ที่เหมาะสมก่อนการทดลองปรับปรุงความเป็นทรงกลมจริง สามารถกระทำได้โดยใช้วิธีทางสถิติหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมที่จะเกิดขึ้นหลังจากการปรับปรุงความความเป็นทรงกลม ที่แต่ละค่า m โดยใช้กลุ่มตัวอย่างจากการทดลองในหัวข้อที่ 6.3 ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 6.4.6



รูปที่ 6.8 แผนภาพแสดงการใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน

6.4.3. แนวทางการประเมินความเหมาะสมของโปรไฟล์ความกลมตัวแทน

งานวิจัยนี้จะใช้วิธีทางสถิติในการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมที่มีค่าสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้หลังจากการปรับปรุง ที่เกิดจากการเลือกใช้โปรไฟล์ความกลมตัวแทนแต่ละแนวทาง มาประเมินความเหมาะสมของโปรไฟล์ความกลมตัวแทนที่เลือกใช้ โดยอ้างอิงทฤษฎีทางสถิติจาก [12] และ [15] และใช้กลุ่มตัวอย่างจากการทดลองในหัวข้อที่ 6.3 โปรไฟล์ความกลมตัวแทนที่เหมาะสมจะสามารถปรับปรุงให้หัวสะพานเทียมมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรง

กลมเป็นไปตามมาตรฐานที่ใช้กับแก้วพลาสติกได้ทุกกลู (น้อยกว่า 10 ไมโครเมตร) ด้วยความมั่นใจ 95%

6.4.4. การจัดเตรียมการประเมินความเหมาะสมของโปรไฟล์ความกลมตัวแทน

6.4.4.1. สมมุติฐานที่ใช้ในการประเมินความเหมาะสมของโปรไฟล์ความกลมตัวแทน

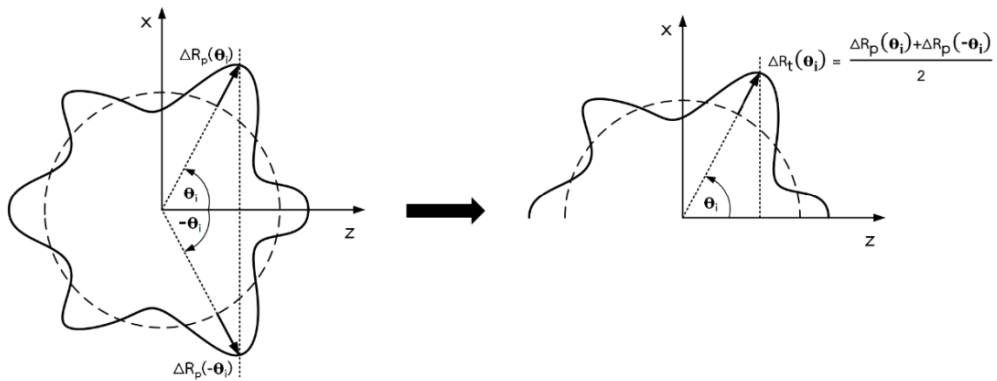
สมมุติฐานข้อที่ 1 โปรไฟล์ความกลมมีความสมมาตรรอบแกน z

เนื่องจากกระบวนการกลึงเป็นวิธีการผลิตชิ้นส่วนที่มีความสมมาตรรอบแกนหมุนของสปินเดิล (แกน z ของเครื่องกลึงซีเอ็นซี) ดังนั้นการวิเคราะห์หาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติต่อไปนี้ จึงวิเคราะห์เพียงด้าน $+x$ เพียงด้านเดียวของโปรไฟล์ความกลม คือโปรไฟล์ความกลมตั้งแต่ตำแหน่งมุมที่ $15^\circ - 135^\circ$ ($0^\circ - 15^\circ$ อยู่นอกขอบเขตงานวิจัย) โดยการนำโปรไฟล์ความกลมที่วัดได้จากเครื่องวัดความกลมมาหาค่าเฉลี่ยของรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยของโปรไฟล์ความกลมที่ตำแหน่งมุมที่อยู่ด้านตรงข้ามกันของแกน z แล้วนำมาสร้างเป็นโปรไฟล์ความกลมบนด้าน $+x$ ด้านเดียว ดังรูปที่ 6.9 ซึ่งสามารถอธิบายโดยละเอียดได้ดังนี้

ให้ $\Delta R_p(\theta_i)$ แทนรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยที่ตำแหน่งมุม θ_i ของโปรไฟล์ความกลมที่วัดได้จากเครื่องวัดความกลม และให้ $\Delta R_t(\theta_i)$ แทนรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยที่ตำแหน่งมุม θ_i ของโปรไฟล์ความกลมที่จะสร้างขึ้นใหม่ให้อยู่บนด้าน $+x$ เพียงด้านเดียว โดยที่มุม θ คือมุมที่กวาดจากแกน z ดังรูปที่ 6.9 ค่าของ $\Delta R_t(\theta_i)$ สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของ $\Delta R_p(\theta_i)$ กับ $\Delta R_p(-\theta_i)$ ดังนี้

$$\Delta R_t(\theta_i) = \frac{\Delta R_p(\theta_i) + \Delta R_p(-\theta_i)}{2}$$

โดยที่มุม θ_i และ มุม $-\theta_i$ เป็นมุมที่อยู่ตรงข้ามกันของแกน z ตามรูปที่ 6.9 จากนั้นหาค่า $\Delta R_t(\theta_i)$ ที่ทุกตำแหน่งมุม θ_i เพื่อสร้างเป็นโปรไฟล์ความกลมที่อยู่บนด้าน $+x$ เพียงด้านเดียวเพื่อนำไปประเมินความเหมาะสม ในงานวิจัยนี้จะหาค่า $\Delta R_t(\theta_i)$ ทุก 0.1 องศา เพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลโปรไฟล์ความกลมของหัวสะพานที่วัดได้จากเครื่องวัดความกลม



รูปที่ 6.9 การสร้างโปรไฟล์ความกลมที่อยู่บนด้าน +x เพียงด้านเดียว

สมมุติฐานข้อที่ 2 โปรไฟล์ความกลมและความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมมีการแจกแจงแบบที

โปรไฟล์ความกลมและความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะเก็ทียมที่กัถึงด้วยสภาวะ (condition) เดียวกัน จะมีการแจกแจงแบบที (t distribution)

6.4.4.2. การคำนวณหาโปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยและค่าสถิติที่เกี่ยวข้อง

โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยสามารถหาได้จากกลุ่มตัวอย่างของโปรไฟล์ความกลมของหัวสะเก็ทียมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 6.3. ด้วยวิธีการดังนี้ ให้ $\Delta R_j(\theta_i)$ แทนรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยของหัวสะเก็ทียมลูกที่ j ที่ตำแหน่งมุม θ_i โดยที่ $i=1,2,3,\dots,n$ และ $j=1,2,3,\dots,k$ เมื่อ n เป็นจำนวนจุดที่วัดได้บนโปรไฟล์ความกลม และ k เป็นจำนวนกลุ่มตัวอย่างของหัวสะเก็ทียม จะสามารถคำนวณค่าเฉลี่ยของรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ย $\overline{\Delta R}(\theta_i)$ ที่ตำแหน่ง θ_i ได้จากสมการ

$$\overline{\Delta R}(\theta_i) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \Delta R_j(\theta_i) \quad (6.2)$$

จากนั้นใช้สมการที่ 6.2 หาค่าเฉลี่ยของรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ย $\overline{\Delta R}(\theta_i)$ ที่ทุกตำแหน่งมุม θ_i จนถึง θ_n (ทุก 0.1 องศา) ตามตารางแสดงการคำนวณโปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยในรูปที่ 6.10 และนำค่า $\overline{\Delta R}(\theta_i)$ ของทุกตำแหน่งมุม θ_i มาสร้างโปรไฟล์ความกลมเฉลี่ย (คอลัมน์ที่วงด้วยเส้นประ ในตารางแสดงการคำนวณโปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยและค่าสถิติต่างๆ ในรูปที่ 6.10)

ส่วนเบี่ยงมาตรฐานของรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ย $S_{\Delta R}(\theta_i)$ ที่ตำแหน่งมุม θ_i ของกลุ่มตัวอย่าง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$S_{\Delta R}(\theta_i) = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k (\Delta R_j(\theta_i) - \overline{\Delta R}(\theta_i))^2} \quad (6.3)$$

จากนั้นใช้สมการที่ 6.3 หาส่วนเบี่ยงมาตรฐานของรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ย $S_{\Delta R}(\theta_i)$ ที่ทุกตำแหน่งมุม θ_i ตามตารางแสดงการคำนวณโปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยและค่าสถิติต่างๆ ในรูปที่ 6.10

เมื่อกำหนดให้กลุ่มตัวอย่างของโปรไฟล์ความกลมของหัวสะพานเทียมมีการแจกแจงแบบที (t distribution) จะสามารถหารัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยบนโปรไฟล์ความกลมของหัวสะพานเทียมลูกใดๆ $\Delta R(\theta_i)$ ที่ตำแหน่งมุม θ_i ที่สามารถเกิดขึ้นได้ ที่ระดับความมั่นใจ (confidence level) P% ว่าจะมีค่าอยู่ในช่วง

$$\Delta R(\theta_i) = \overline{\Delta R}(\theta_i) \pm CI_{\Delta R}(\theta_i) \quad (P\%) \quad (6.4)$$

โดยที่ช่วงความเชื่อมั่น (confidence interval) ของรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ย $PI_{\Delta R}(\theta_i)$ ที่ตำแหน่งมุม θ_i คำนวณได้จากสมการ

$$CI_{\Delta R}(\theta_i) = t_{v,P} S_{\Delta R}(\theta_i) \quad (P\%) \quad (6.5)$$

เมื่อ $t_{v,P}$ คือค่าที่จากการแจกแจงแบบที ที่มีองศาความเป็นอิสระ (degree of freedom) เท่ากับ v ที่ระดับความมั่นใจ P% โดยที่องศาความเป็นอิสระ $v = k - 1$ เมื่อ k คือจำนวนหัวสะพานเทียมทั้งหมดที่กำลัง

จากสมการที่ 6.4 รัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยบนโปรไฟล์ความกลมของหัวสะพานเทียมลูกใดๆ $\Delta R(\theta_i)$ ที่ตำแหน่งมุม θ_i ที่สามารถเกิดขึ้นได้ บอกถึงรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยบนโปรไฟล์ความกลมปกติที่ตำแหน่งมุม θ_i ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในการกลึงหัวสะพานเทียมลูกใดๆ ดังนั้นสมการที่ 6.4 จึงเป็นสมการที่สำคัญที่ใช้ในการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมที่จะเกิดขึ้นหลังปรับปรุงโดยใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน เพื่อประเมินความเหมาะสมของโปรไฟล์ความกลมตัวแทน

ตำแหน่งมุม	ระยะคลาดเคลื่อนในแนวรัศมีจากเส้นวงกลมเฉลี่ยบนโปรไฟล์ความกลม							
	ลูกที่ 1	ลูกที่ 2	ลูกที่ 3	...	ลูกที่ k	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ช่วงความเชื่อมั่น
θ_1	$\Delta R_1(\theta_1)$	$\Delta R_2(\theta_1)$	$\Delta R_3(\theta_1)$	...	$\Delta R_k(\theta_1)$	$\bar{\Delta R}(\theta_1)$	$S_{\Delta R}(\theta_1)$	$CI_{\Delta R}(\theta_1)$
θ_2	$\Delta R_1(\theta_2)$	$\Delta R_2(\theta_2)$	$\Delta R_3(\theta_2)$	...	$\Delta R_k(\theta_2)$	$\bar{\Delta R}(\theta_2)$	$S_{\Delta R}(\theta_2)$	$CI_{\Delta R}(\theta_2)$
θ_3	$\Delta R_1(\theta_3)$	$\Delta R_2(\theta_3)$	$\Delta R_3(\theta_3)$	...	$\Delta R_k(\theta_3)$	$\bar{\Delta R}(\theta_3)$	$S_{\Delta R}(\theta_3)$	$CI_{\Delta R}(\theta_3)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
θ_n	$\Delta R_1(\theta_n)$	$\Delta R_2(\theta_n)$	$\Delta R_3(\theta_n)$	...	$\Delta R_k(\theta_n)$	$\bar{\Delta R}(\theta_n)$	$S_{\Delta R}(\theta_n)$	$CI_{\Delta R}(\theta_n)$

นำไปสร้างโปรไฟล์ความกลมเฉลี่ย

รูปที่ 6.10 ตารางแสดงการคำนวณโปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยและค่าสถิติต่างๆ

6.4.4.3. การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมเฉลี่ยและค่าสถิติต่างๆที่เกี่ยวข้อง

ค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมเฉลี่ยของหัวสะโพกเทียมสามารถคำนวณได้ด้วยวิธีการดังนี้ ให้ ψ_j แทนค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมลูกที่ j โดยที่ $j = 1, 2, 3, \dots, k$ จะสามารถคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมเฉลี่ยของหัวสะโพกเทียม $\bar{\psi}$ ได้จากสมการ

$$\bar{\psi} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \psi_j \quad (6.6)$$

และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของกลุ่มตัวอย่าง S_{ψ} สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$S_{\psi} = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k (\psi_j - \bar{\psi})^2} \quad (6.7)$$

เมื่อกำหนดให้กลุ่มตัวอย่างของความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมมีการแจกแจงแบบที่ จะสามารถหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมลูกใดๆ ψ ที่สามารถเกิดขึ้นได้ ที่ระดับความมั่นใจ $P\%$ ว่าจะมีค่าอยู่ในช่วง

$$\psi = \bar{\psi} \pm CI_{\psi} \quad (P\%) \quad (6.8)$$

โดยที่ช่วงความเชื่อมั่นของความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะเก็อกเทียมคำนวณได้จากสมการ

$$CI_{\psi} = t_{v,P} S_{\psi} \quad (P\%) \quad (6.9)$$

เมื่อ $t_{v,P}$ คือค่าที่จากการแจกแจงแบบที ที่มีองศาความเป็นอิสระเท่ากับ v ที่ระดับความมั่นใจ $P\%$ โดยที่องศาความเป็นอิสระ $v = k - 1$ เมื่อ k คือจำนวนหัวสะเก็อกเทียมทั้งหมดที่กลึง

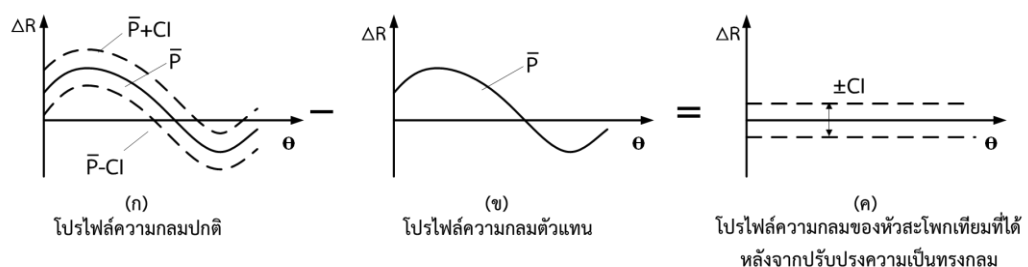
6.4.5. การหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติเมื่อใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน

6.4.5.1. แนวทางการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติ

สร้างโปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 6.3 เพื่อเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน \bar{P} แล้วหาช่วงความเชื่อมั่นของโปรไฟล์ความกลมปกติที่สามารถเกิดขึ้นได้จากกลุ่มตัวอย่างนั้น CI จะได้ว่า โปรไฟล์ความกลมปกติที่สามารถเกิดขึ้นได้จะอยู่ในช่วง $\bar{P} \pm CI$ ดังรูปที่ 6.11 (ก) เมื่อใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ย \bar{P} เป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน โปรไฟล์ความกลมของหัวสะเก็อกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลม \hat{P} จะเป็นผลต่างระหว่างโปรไฟล์ความกลมปกติกับโปรไฟล์ความกลมตัวแทน ตามสมการที่ 6.1 ที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 6.1 ดังนี้

$$\hat{P} = (\bar{P} \pm CI) - \bar{P} = \pm CI$$

จะเห็นได้ว่าโปรไฟล์ความกลมของหัวสะเก็อกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมจะมีค่าอยู่ในช่วง $\pm CI$ ดังรูปที่ 6.11 (ค) ดังนั้นความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะเก็อกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงจึงสามารถหาได้จากช่วงความเชื่อมั่น CI ของกลุ่มตัวอย่างเมื่อใช้โปรไฟล์ความกลมตัวแทนเป็นโปรไฟล์ความกลมเฉลี่ย



รูปที่ 6.11 แนวทางการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติ
เมื่อใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน

6.4.5.2. วิธีการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติ

ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลม เกิดขึ้นได้จากความคลาดเคลื่อนระหว่างโปรไฟล์ความกลมปกติกับโปรไฟล์ความกลมตัวแทน ซึ่งอธิบายได้ดังต่อไปนี้ ให้ $\Delta R_r(\theta_i)$ แทนรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยของโปรไฟล์ความกลมตัวแทนที่ตำแหน่งมุม θ_i และให้ $\Delta R(\theta_i)$ แทนโปรไฟล์ความกลมปกติ ที่ตำแหน่งมุม θ_i โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ เมื่อ n เป็นจำนวนจุดที่วัดได้บนโปรไฟล์ความกลม จะสามารถคำนวณหารัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยของโปรไฟล์ความกลมของหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุง $\hat{\Delta R}(\theta_i)$ ที่ตำแหน่งมุม θ_i ได้จากผลต่างของ $\Delta R_r(\theta_i)$ และ $\Delta R(\theta_i)$ ตามสมการ

$$\Delta R(\theta_i) = \Delta R_r(\theta_i) - \Delta R_r(\theta_i) \quad (6.10)$$

เมื่อใช้สมการที่ 6.10 คำนวณค่า $\hat{\Delta R}(\theta_i)$ ที่ทุกตำแหน่งมุม θ_i จะได้โปรไฟล์ความกลมของหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุง ซึ่งเป็นผลต่างของโปรไฟล์ความกลมตัวแทนกับโปรไฟล์ความกลมปกติ (ตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 6.1) ดังนั้น จากนิยามของค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.1.1 และ 2.2.2 สามารถหาค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุง ψ ได้จากสมการ

$$\psi = \max(\Delta R(\theta_i)) - \min(\Delta R(\theta_i)) \quad (6.11)$$

เมื่อให้โปรไฟล์ความกลมตัวแทนคือโปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยจะสามารถหาค่า $\Delta R_r(\theta_i)$ ได้จาก

$$\Delta R_r(\theta_i) = \overline{\Delta R}(\theta_i) \quad (6.12)$$

และให้โปรไฟล์ความกลมปกติมีการแจกแบบที่ จะสามารถหาค่า $\Delta R(\theta_i)$ ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในการกลึงหัวสะโพกเทียมลูกใดๆ ที่ระดับความมั่นใจ $P\%$ ตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 6.4.4.2 ตามสมการที่ 6.4 ได้ดังนี้

$$\Delta R(\theta_i) = \overline{\Delta R}(\theta_i) \pm CI_{\Delta R}(\theta_i) \quad (P\%) \quad (6.4)$$

เมื่อแทนค่า $\Delta R_r(\theta_i)$ และ $\Delta R(\theta_i)$ จากสมการที่ 6.12 และสมการที่ 6.4 ตามลำดับ ลงไปในสมการที่ 6.6 จะสามารถหาค่า $\hat{\Delta R}(\theta_i)$ บนโปรไฟล์ความกลมของหัวสะโพกเทียมลูกใดๆ ที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลม ที่ระดับความมั่นใจ $P\%$ ดังนี้

$$\begin{aligned} \Delta R(\theta_i) &= (\overline{\Delta R}(\theta_i) \pm CI_{\Delta R}(\theta_i)) - \overline{\Delta R}(\theta_i) \quad (P\%) \\ \Delta R(\theta_i) &= 0 \pm CI_{\Delta R}(\theta_i) \quad (P\%) \end{aligned} \quad (6.13)$$

เมื่อแทนค่า $\widehat{\Delta R}(\theta_i)$ ที่ได้จากสมการที่ 6.13 ลงไปในสมการที่ 6.11 จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงสุดของหัวสะโปกเทียมที่สามารถเกิดขึ้นได้หลังจากการปรับปรุง $\max(\psi)$ ที่ระดับความมั่นใจ P% ดังนี้

$$\begin{aligned}\max(\psi) &= \max(0 \pm CI_{\Delta R}(\theta_i)) - \min(0 \pm CI_{\Delta R}(\theta_i)) \quad (P\%) \\ \max(\psi) &= 2 \max(CI_{\Delta R}(\theta_i)) \quad (P\%) \end{aligned} \quad (6.14)$$

เมื่อแทนค่า $CI_{\Delta R}(\theta_i)$ จากสมการที่ 6.5 ลงไปในสมการที่ 6.14 จะได้

$$\max(\psi) = 2t_{v,P} \max(S_{\Delta R}(\theta_i)) \quad (P\%) \quad (6.15)$$

จากสมการที่ 6.15 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงสุดของหัวสะโปกเทียมที่สามารถเกิดขึ้นได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลม สามารถหาได้จากค่าสูงสุดของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยจากกลุ่มตัวอย่างที่นำไปใช้หาโปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเพื่อเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน

6.4.5.3. ขั้นตอนการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติ

- นำข้อมูลโปรไฟล์ความกลมจากกลุ่มตัวอย่างของหัวสะโปกเทียมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 6.3 มาทำให้เป็นโปรไฟล์ความกลมสมมาตรรอบแกน z ตามที่กล่าวในหัวข้อที่ 6.4.4.1 โดยกำหนดให้โปรไฟล์ความกลมครอบคลุมตำแหน่งมุมที่ 15° ถึง 135°
- นำกลุ่มตัวอย่างของโปรไฟล์ความกลมรูปแบบที่ 1 ของหัวสะโปกเทียมทั้งหมด 44 ลูก ตามตารางที่ 6.1 มาคำนวณหาโปรไฟล์ความกลมเฉลี่ย ด้วยวิธีการที่กล่าวในหัวข้อ 6.4.4.2 และสร้างกราฟแสดงโปรไฟล์ความกลมเฉลี่ย
- ใช้วิธีการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 6.4.5.2 มาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อการใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน
- ประเมินความเหมาะสมของโปรไฟล์ความกลมเฉลี่ย

6.4.5.4. ผลการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติและการอภิปราย

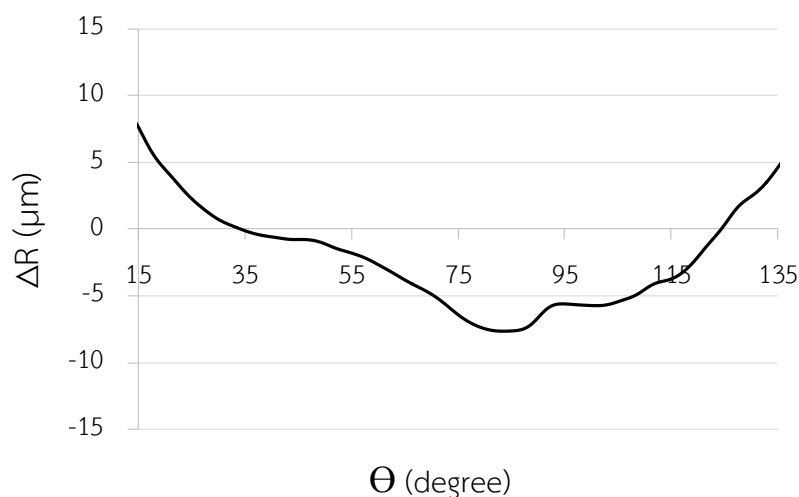
กลุ่มตัวอย่างของหัวสะโปกเทียมที่มีรูปแบบของโปรไฟล์ความกลมเป็นรูปแบบที่ 1 มีทั้งหมด 44 ลูก โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยของรูปแบบที่ 1 ที่ได้จากการคำนวณทั้ง 44 ลูก แสดงได้ดังรูปที่ 6.12 มีค่าสูงสุดของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ย ($\max(S_{\Delta R}(\theta_i))$) เท่ากับ

$$\max(S_{\Delta R}(\theta_i)) = 2.31 \text{ ไมโครเมตร}$$

และสามารถทำนายค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงสุดของหัวสะโปกเทียมที่สามารถเกิดขึ้นได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลม ($\max(\psi)$) โดยใช้สมการที่ 6.16 ที่ระดับความมั่นใจ 95% ได้ดังนี้

$$\max(\psi) = 2t_{44-1,95}\max(S_{\Delta R}(\Theta_i)) = 2(2.02)(2.31) = 9.31 \text{ ไมโครเมตร}$$

ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 10 ไมโครเมตร ดังนั้นจึงสามารถใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนได้ เพราะสามารถปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโปกเทียมให้สามารถใช้กับเข้าพลาสติกได้ตามมาตรฐานทุกลูกที่ระดับความมั่นใจ 95%



รูปที่ 6.12 โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

6.4.6. การหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติเมื่อใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน

6.4.6.1. แนวทางการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติ

แบ่งหัวสะโปกเทียมที่กลึงด้วยเม็ดมีดเดียวกันทั้งหมด 35 ลูก ที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 6.3 ออกเป็นชุดๆ ตามลำดับการกลึง ชุดละ m ลูก โดยไม่รวมลูกที่ 1 เพราะเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนเริ่มต้น แล้วใช้โปรไฟล์ความกลมของหัวสะโปกเทียมลูกที่ 1 เป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนในการจำลองการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโปกเทียมลูกที่ 2 ลูกที่ 3 ต่อไปเรื่อยๆ จนถึงลูกที่ $1+m$ เพื่อหาโปรไฟล์ความกลมที่เกิดขึ้นหลังจากการจำลองการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโปกเทียมชุดที่ 1 และใช้โปรไฟล์ความกลมลูกที่ $1+m$ เป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนในการจำลองการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโปกเทียมลูกที่ $2+m$ ลูกที่ $3+m$ ต่อไปเรื่อยๆ จนถึงลูกที่

$1+2m$ เพื่อหาโปรไฟล์ความกลมที่เกิดขึ้นหลังจากการจำลองการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัว
 สะโปกเทียมชุดที่ 2 กระทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนครบทุกชุด โดยละเว้นเศษที่เกิดขึ้นจากการแบ่งชุด ชุดละ
 m ลูก กล่าวคือ ถ้าแบ่งหัวสะโปกเทียมออกเป็นชุดละ 3 ลูก ($m = 3$) กลุ่มตัวอย่างของสะโปกเทียมที่
 ใช้ในการวิเคราะห์จะมีทั้งหมด 32 ลูก คือลูกที่ 2 ถึง ลูกที่ 33 หรือถ้าแบ่งหัวสะโปกเทียมออกเป็นชุด
 ละ 4 ลูก ($m = 4$) กลุ่มตัวอย่างของสะโปกเทียมที่ใช้ในการวิเคราะห์จะมีทั้งหมด 31 ลูก คือลูกที่ 2
 ถึงลูกที่ 32

โปรไฟล์ความกลมที่เกิดขึ้นหลังจากการจำลองการปรับปรุงความเป็นทรงกลมสามารถหาได้จาก
 ผลต่างของโปรไฟล์ความกลมปกติและโปรไฟล์ความกลมตัวแทนตามสมการที่ 6.1 ซึ่งนำมาเขียนใหม่
 ได้ดังนี้

$$\hat{P}_j = P_j - P_{rj} \quad (6.16)$$

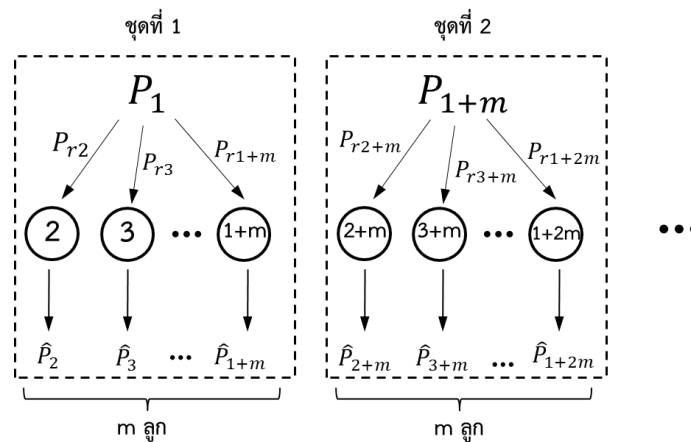
เมื่อ

\hat{P}_j คือ โปรไฟล์ความกลมที่ได้หลังจากปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโปกเทียมลูกที่ j

P_j คือ โปรไฟล์ความกลมปกติของหัวสะโปกเทียมลูกที่ j

P_{rj} คือ โปรไฟล์ความกลมตัวแทนที่ในการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโปกเทียมลูกที่ j

ดังนั้นการจำลองการปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมก่อนหน้าก็คือการหา
 ผลต่างระหว่าง P_2 กับ P_1 P_3 กับ P_1 จนถึง P_{1+m} กับ P_1 จะได้โปรไฟล์ความกลมหลังจากจำลองการ
 ปรับปรุงความเป็นทรงกลม \hat{P}_2 \hat{P}_3 จนถึง \hat{P}_{1+m} สำหรับชุดที่ 1 และโปรไฟล์ความกลม \hat{P}_{2+m} \hat{P}_{3+m}
 จนถึง \hat{P}_{1+2m} สำหรับชุดที่ 2 และกระทำเช่นนี้ไปเรื่อยจนครบทุกชุดตามที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งสามารถ
 แสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 6.13 จากนั้นนำโปรไฟล์ความกลมที่เกิดขึ้นหลังจากการจำลองการ
 ปรับปรุงความเป็นทรงกลม \hat{P}_j ทั้งหมด มาหาค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงสุดที่
 สามารถเกิดขึ้นได้จากการใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน เพื่อใช้
 ในการประเมินความเหมาะสมของการใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลม
 ตัวแทน



รูปที่ 6.13 แผนภาพแสดงการจำลองการปรับปรุงความเป็นทรงกลม โดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน

6.4.6.2. วิธีการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติ

จากสมการที่ 6.10 ที่ให้ $\Delta R_r(\theta_i)$ แทนรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยของโปรไฟล์ความกลมตัวแทนที่ตำแหน่งมุม θ_i และให้ $\Delta R(\theta_i)$ แทนรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยของโปรไฟล์ความกลมปกติ ที่ตำแหน่งมุม θ_i โดยที่ $i = 1, 2, \dots, n$ เมื่อ n เป็นจำนวนจุดที่วัดได้บนโปรไฟล์ความกลม จะสามารถคำนวณหารัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยของโปรไฟล์ความกลมของหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุง $\hat{\Delta R}(\theta_i)$ ที่ตำแหน่งมุม θ_i ได้จากสมการที่ 6.10 ดังนี้

$$\Delta R(\theta_i) = \Delta R(\theta_i) - \Delta R_r(\theta_i) \quad (6.10)$$

และสามารถหาค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลม ψ ได้จากสมการที่ 6.11 ดังนี้

$$\psi = \max(\Delta R(\theta_i)) - \min(\Delta R(\theta_i)) \quad (6.11)$$

กำหนดให้ m แทนจำนวนหัวสะโพกเทียมในลำดับถัดไปที่กำลังด้วยเม็ดมิติเดียวกันที่ต้องการนำมาจำลองการปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมของหัวสะโพกเทียมลูกที่ $1+pm$ เป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน โดยที่ $p = 0, 1, 2, \dots, \frac{k}{m} - 1$ เมื่อ k คือจำนวนกลุ่มตัวอย่างของหัวสะโพกเทียมที่ต้องการนำมาจำลองการปรับปรุงความเป็นทรงกลม ซึ่งจะมีค่าเป็นจำนวนเต็มเท่าของ m ที่มากที่สุดที่มีค่าไม่เกิน 35 ลูก ยกตัวอย่างเช่น ถ้ากำหนดให้ $m = 3$ จำนวนกลุ่มตัวอย่างจะเท่ากับ 33 ลูก ($k=33$) หรือถ้ากำหนดให้ $m = 4$ จำนวนกลุ่มตัวอย่างจะเท่ากับ 32 ลูก ($k=32$)

เมื่อให้โปรไฟล์ความกลมตัวแทนคือโปรไฟล์ความกลมของหัวสะพานเทียมลูกที่ $1+pm$ จะสามารถหาค่า $\Delta R_r(\theta_i)$ ได้จากรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยของโปรไฟล์ความกลมของหัวสะพานเทียมลูกที่ $1+pm$ $\Delta R_{1+pm}(\theta_i)$ ดังนี้

$$\Delta R_r(\theta_i) = \Delta R_{1+pm}(\theta_i) \quad (6.17)$$

และให้โปรไฟล์ความกลมปกติคือโปรไฟล์ความกลมของหัวสะพานเทียมลูกถัดไปได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 6.3 ที่กึ่งด้วยเม็ดมิตเดียวกัน นั่นคือ หัวสะพานเทียมลูกที่ $1+pm+l$ โดยที่ $l = 1, 2, \dots, m$ จะสามารถหาค่า $\Delta R(\theta_i)$ ได้จากรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยของโปรไฟล์ความกลมของหัวสะพานเทียมลูกที่ $1+pm+l$ $\Delta R_{1+pm+l}(\theta_i)$ ดังนี้

$$\Delta R(\theta_i) = \Delta R_{1+pm+l}(\theta_i) \quad (6.18)$$

เมื่อแทนค่า $\Delta R_r(\theta_i)$ และ $\Delta R(\theta_i)$ จากสมการที่ 6.17 และสมการที่ 6.18 ตามลำดับ ลงไปในสมการที่ 6.10 จะสามารถหาค่ารัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยของโปรไฟล์ความกลมของหัวสะพานเทียมลูกที่ $1+pm+l$ ที่ได้หลังจากจำลองการปรับปรุงความเป็นทรงกลม ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ $\hat{\Delta R}_{1+pm+l}(\theta_i)$ ได้ดังนี้

$$\Delta R_{1+pm+l}(\theta_i) = \Delta R_{1+pm+l}(\theta_i) - \Delta R_{1+pm}(\theta_i) \quad (6.19)$$

เมื่อแทนค่า $\hat{\Delta R}_{j+}(\theta_i)$ ที่ได้จากสมการที่ 6.19 ลงไปในสมการที่ 6.11 จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมลูกที่ $1+pm+l$ ที่ได้หลังจากจำลองการปรับปรุงความเป็นทรงกลม ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ ψ_{1+pm+l} ดังนี้

$$\psi_{1+pm+l} = \max(\Delta R_{1+pm+l}(\theta_i)) - \min(\Delta R_{1+pm+l}(\theta_i)) \quad (6.20)$$

จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมหลังจากจำลองการปรับปรุงความเป็นทรงกลม $\bar{\psi}$ ได้ โดยใช้สมการที่ 6.6 ดังนี้

$$\bar{\psi} = \sum_{p=0}^{k-1} \sum_{l=1}^m \psi_{1+pm+l} \quad (6.21)$$

และหาส่วนเบี่ยงมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมหลังจากจำลองการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของกลุ่มตัวอย่างได้จากสมการที่ 6.7 ดังนี้

$$S_\psi = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k (\psi_j - \bar{\psi})^2} \quad (6.7)$$

เมื่อกำหนดให้กลุ่มตัวอย่างของความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะเกโทกเทียม หลังจากจำลองการปรับปรุงความเป็นทรงกลมมีการแจกแจงแบบที จะสามารถใช้สมการที่ 6.8 และ สมการที่ 6.9 หาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะเกโทกเทียมลูกใดๆ หลังจากการ ปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน ที่ ระดับความมั่นใจ P% ว่าจะมีค่าอยู่ในช่วง

$$\psi = \bar{\psi} \pm t_{v,P} S_{\psi} \quad (P\%) \quad (6.22)$$

เมื่อ $t_{v,P}$ คือค่าที่จากการแจกแจงแบบที ที่มีองศาความเป็นอิสระเท่ากับ v ที่ระดับความมั่นใจ P% โดยที่องศาความเป็นอิสระ $v = k - 1$

จากสมการที่ 6.22 สามารถหาค่าสูงสุดของความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะเกโทกเทียมหลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน ที่ระดับความมั่นใจ P% ได้ดังนี้

$$\max(\psi) = \bar{\psi} + t_{v,P} S_{\psi} \quad (P\%) \quad (6.23)$$

ซึ่งจะนำไปใช้ในการประเมินความเหมาะสมของการใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนในการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะเกโทกเทียม และสามารถหาค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างหัวสะเกโทกเทียมที่ได้หลังจากการจำลองการปรับปรุงความเป็นทรงกลม $\bar{\psi}$ ไปหาค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของประชากรหัวสะเกโทกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมที่กลึงด้วยสภาวะเดียวกัน ψ' โดยใช้สมการที่ 3.2

$$\psi' = \bar{\psi} \pm t_{v,P} \frac{S_{\psi}}{\sqrt{n}} \quad (P\%) \quad (3.2)$$

6.4.6.3. ขั้นตอนการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติ

- นำข้อมูลโปรไฟล์ความกลมจากกลุ่มตัวอย่างของหัวสะเกโทกเทียมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 6.3 มาทำให้เป็นโปรไฟล์ความกลมสมมาตรรอบแกน z ตามที่กล่าวในหัวข้อที่ 6.4.4.1 โดยกำหนดให้โปรไฟล์ความกลมครอบคลุมตำแหน่งมุมที่ 15 องศา ถึง 135 องศา
- แบ่งชุดโปรไฟล์ความกลมของหัวสะเกโทกเทียมที่ได้จากการกลึงด้วยเม็ดมีดที่ 1 (ตามที่ทดลองในหัวข้อ 6.3) ให้มีจำนวน 1 ลูกในแต่ละชุด ($m=1$)
- ใช้วิธีการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 6.4.5.2 มาคำนวณหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ เมื่อ $m=1$

4. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 – 3 โดยกำหนดจำนวนหัวสะเกือกเทียมในแต่ละชุด เป็น 2 ลูก 3 ลูก 4 ลูก จนถึง 18 ลูก ซึ่งก็คือกำหนดให้ m มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 18
5. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 – 4 โดยใช้โปรไฟล์ความกลมที่ได้จากการกรึงด้วยเม็ดมีดที่ 2 (ตามที่ทดลองในหัวข้อ 6.3)
6. ประเมินความเหมาะสมของโปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้า ที่แต่ละค่า m

6.4.6.4. ผลการหาความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมด้วยวิธีทางสถิติและการอภิปราย

ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมเฉลี่ยของประชากรหัวสะเกือกเทียมที่ได้หลังจากการจำลองการปรับปรุงความเป็นทรงกลม (ψ') และความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ ($\max(\psi)$) ที่ระดับความมั่นใจ 95% ที่แต่ละค่า m ตั้งแต่ 1 ถึง 18 แสดงในตารางที่ 6.2 ซึ่งเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมและความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า m ซึ่งเป็นตามที่ตั้งสมมุติฐานไว้ ดังนั้นจึงต้องเลือกกำหนดค่า m ให้เหมาะสมโดยพิจารณาจากการผลิตจริงในทางปฏิบัติ และความคลาดเคลื่อนจากความกลมสูงสุดที่ยอมรับได้ โดยการเลือกค่า m ที่มากที่สุดที่สามารถปรับปรุงความเป็นทรงกลมให้ได้ตามที่ต้องการได้ จากตารางที่ 6.2 จะเห็นได้ว่าสามารถเลือกใช้ $m=17$ เพื่อผลิตหัวสะเกือกเทียมที่ใช้กับเข้าพลาสติกให้ได้ตามมาตรฐานทุกลูกที่ระดับความมั่นใจ 95% ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนได้

ตารางที่ 6.2 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมที่สามารถเกิดขึ้นได้ของหัวสะพานเทียม หลังจากการจำลองการปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ความกลมตัวแทน ที่แต่ละค่า m ที่ระดับความมั่นใจ 95%

m	ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลม (μm) (95%)	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้
1	3.67±0.31	6.22
2	3.80±0.36	6.74
3	4.05±0.34	6.83
4	4.14±0.39	7.27
5	4.67±0.39	7.70
6	4.69±0.48	8.44
7	4.93±0.46	8.30
8	4.64±0.50	8.67
9	5.26±0.48	8.83
10	5.12±0.46	8.69
11	5.37±0.41	8.74
12	5.48±0.59	9.56
13	5.27±0.56	9.29
14	5.28±0.50	9.05
15	5.69±0.53	9.82
16	5.38±0.50	9.37
17	5.48±0.46	9.31
18	6.55±0.67	10.55

6.4.7. ผลการหาโปรไฟล์ความกลมตัวแทนที่เหมาะสมและการอภิปราย

จากหัวข้อที่ 6.4.5.4 ถ้าใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ของหัวสะพานเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลม $\max(\nu)$ ที่ระดับความมั่นใจ 95% จะมีค่าเท่ากับ 9.31 ไมโครเมตร และจากหัวข้อที่ 6.4.6.4 ถ้าใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนสำหรับการปรับปรุงหัวสะพานเทียมลูกถัดไป 17 ลูก ($m=17$) ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ของหัวสะพานเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมที่ระดับความมั่นใจ 95% จะมีค่าเท่ากับ 9.31 ไมโครเมตร ดังตารางที่ 6.3

จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติตามตารางที่ 6.3 พบว่าโปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยและโปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าสามารถนำมาใช้เป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนได้ เพราะสามารถปรับปรุงให้หัวสะพานเทียมมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงสุดน้อยกว่า 10 ไมโครเมตร ที่ระดับความมั่นใจ 95% ซึ่งหมายความว่า สามารถผลิตหัวสะพานเทียมที่ใช้กับเบ้าพลาสติกได้ตามมาตรฐานทุกลูก ที่ระดับความมั่นใจ 95%

เมื่อพิจารณาจากความเหมาะสมในทางปฏิบัติ พบว่า การใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนมีความเหมาะสมมากกว่าการใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน เพราะการใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน จำเป็นต้องวัดโปรไฟล์ความกลมทุก 17 ลูกในระหว่างการดำเนินการผลิต ซึ่งเป็นความยุ่งยากในทางปฏิบัติ ในขณะที่โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยสามารถใช้ได้ตลอดการดำเนินการผลิต

แต่เมื่อพิจารณาจากผลวิเคราะห์ทางสถิติในตารางที่ 6.2 จะพบว่า ถ้าใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน จะสามารถทำนายความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมเฉลี่ยที่จะเกิดขึ้นได้ ในขณะที่ไม่สามารถทำนายค่าเฉลี่ยดังกล่าวได้เมื่อใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน ดังนั้นการใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนจึงเป็นวิธีที่สามารถคาดการณ์ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมที่จะได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมได้ดีกว่า และเมื่อพิจารณาตารางที่ 6.2 ต่อไปจะพบว่า ถ้าใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน โดยเลือกใช้ $m=1$ หัวสะพานเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมจะมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 3.67 ± 0.31 ไมโครเมตร และความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้เท่ากับ 6.22 ไมโครเมตร ซึ่งแสดงว่า สามารถผลิตหัวสะพานเทียมที่มีสามารถใช้กับเบ้าโลหะได้ตามมาตรฐาน (น้อยกว่า 5 ไมโครเมตร) และมีแนวโน้มที่จะได้หัวสะพานเทียมที่ความคลาดเคลื่อน

จากความเป็นทรงกลมต่ำกว่าการใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน เพราะความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้มีค่าน้อยกว่า

จากการวิเคราะห์จากข้อมูลทางสถิติข้างต้นจะเห็นได้ว่าการใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนมีแนวโน้มที่จะเป็นวิธีที่มีประสิทธิผลดีกว่า เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถชดเชยความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมที่เกิดจากการสึกหรอของเม็ดมีดได้ และสามารถชดเชยความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมที่เกิดจากคุณภาพของเม็ดมีดที่ไม่สม่ำเสมอได้ (อัตราการสึกหรอไม่สม่ำเสมอของแต่ละเม็ดมีด) และเมื่อเลือกใช้ค่า m น้อยๆ ความสามารถในการชดเชยความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการสึกหรอของเม็ดมีดจะยิ่งสูงขึ้น ทำให้ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมหลังจากปรับปรุงมีค่าต่ำลง ซึ่งสังเกตได้จากตารางที่ 6.2 ดังนั้นถ้าต้องการผลิตหัวสะโพกเทียมให้มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมต่ำ ควรจะเลือกใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน และเลือกใช้ค่า m น้อยๆ เช่น $m=1$

งานวิจัยนี้จึงเห็นว่าการใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนเป็นวิธีที่สามารถผลิตหัวสะโพกเทียมที่ใช้กับเข้าโลหะได้ตามมาตรฐาน เพราะมีค่าเฉลี่ยที่จะเกิดขึ้นต่ำกว่า 5 ไมโครเมตร เมื่อเลือกใช้ค่า m น้อยๆ อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ค่า m ที่น้อยไป จะเกิดความยุ่งยากในทางปฏิบัติ จึงต้องเลือกค่า m ที่เหมาะสมที่สุด โดยการเลือกค่า m ที่มากที่สุดที่ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า 5 ไมโครเมตร และความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ไม่เกิน 10 ไมโครเมตร เพื่อที่จะผลิตหัวสะโพกเทียมให้สามารถใช้กับเข้าพลาสติกได้ตามมาตรฐานทุกลูกและโดยเฉลี่ยใช้กับเข้าโลหะได้ และไม่ยุ่งยากในทางปฏิบัติมากเกินไป เมื่อพิจารณาตารางที่ 6.2 แล้วพบว่า ค่า $m=4$ สอดคล้องกับความต้องการที่กล่าวข้างต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่า $m=4$ สำหรับการ ใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนในการปรับปรุงความเป็นทรงกลมจริง

ตารางที่ 6.3 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ของหัวสะโพกเทียม ที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลม ที่ระดับความมั่นใจ 95%

ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ (μm) (95%)	
โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ย	โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้า ($m=17$)
9.31	9.31

6.4.8. สรุปผลการหาโปรไฟล์ความกลมตัวแทนที่เหมาะสม

1. การปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยและโปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนสามารถผลิตหัวสะพานเทียมที่ใช้กับเบ้าพลาสติกได้ตามมาตรฐานทุกลูกที่ระดับความมั่นใจ 95% (น้อยกว่า 10 ไมโครเมตร)
2. การปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนมีความสะดวกมากกว่าในทางปฏิบัติ
3. การปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนที่ค่า m น้อยๆ มีแนวโน้มที่จะได้หัวสะพานเทียมที่มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมต่ำกว่าการใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน เพราะมีความสามารถในการชดเชยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการสึกหรอของเม็ดและความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอของเม็ดเม็ด
4. งานวิจัยนี้จะใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยและโปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าที่ค่า $m=4$ เป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนในการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียม

6.5. การจัดเตรียมการทดลองปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมด้วยฟาสต์ทูลเซอร์ไว

6.5.1. การจัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

เครื่องกลึงซีเอ็นซี เม็ดเม็ด และเครื่องวัดความกลมมีการจัดเตรียมเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.2.1 การติดตั้งฟาสต์ทูลเซอร์ไวบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีทำตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 4.6.4 การควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์ไววิธีการเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 5.2.1 การใช้คอมพิวเตอร์สร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเพื่อควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์ไววิธีการเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 5.2.3 และใช้สัญญาณกระตุ้น (trigger) จากเครื่องกลึงซีเอ็นซีในการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นการขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์ไว

6.5.2. วัสดุที่ใช้กลึงหัวสะพานเทียม

เพลลาเหล็กกล้าไร้สนิมกลม 304 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร

6.5.3. ขนาดและรูปร่างของหัวสะพานเทียม

เส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มิลลิเมตร ครอบคลุมพื้นที่ใช้งาน 270°

6.5.4. ข้อกำหนดในการกริ่งหัวสะโปกเทียม

ใช้ข้อกำหนดเดียวกับหัวข้อที่ 3.2.4

6.5.5. การจัดเตรียมโปรไฟล์ความกลมตัวแทนเพื่อนำไปใช้ร่วมกับฟาสต์ทูลเซอร์ไว

โปรไฟล์ความกลมตัวแทนคือข้อมูลของรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ย $\Delta R_i(\theta_i)$ ที่ตำแหน่ง θ_i ซึ่งข้อมูลในรูปแบบนี้ไม่สามารถนำไปใช้ร่วมกับฟาสต์ทูลเซอร์ไวได้โดยตรง จึงต้องแปลงโปรไฟล์ความกลมให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปใช้กับฟาสต์ทูลเซอร์ไวได้เสียก่อน ซึ่งรายละเอียดจะแบ่งเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

6.5.5.1. การหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งมุมกับเวลา

เนื่องจากฟาสต์ทูลเซอร์ไวเป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนภายนอก ระบบควบคุมของฟาสต์ทูลเซอร์ไวจึงแยกกับระบบควบคุมของเครื่องกลึงซีเอ็นซี ดังนั้นฟาสต์ทูลเซอร์ไวจึงไม่รู้ตำแหน่งมุม θ_i ที่มีดกถึงเคลื่อนที่ไป จึงต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งมุม θ_i กับเวลา แล้วใช้เวลาในการอ้างอิงตำแหน่งมุม θ_i ของมีดกถึงในการใช้ฟาสต์ทูลเซอร์ไวขับเคลื่อนมีดกถึงขดเซอร์คิมี่ที่คลาดเคลื่อนที่ตำแหน่งมุมต่างๆ โดยกำหนดให้เวลา $t=0$ ที่ $\theta=0^\circ$ และกำหนดความสัมพันธ์ของตำแหน่งมุม θ_i กับเวลาดังนี้

$$\theta_i = \theta(t_i) \quad (6.24)$$

เมื่อ t_i คือเวลาที่ตำแหน่งมุม θ_i

ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งมุมกับเวลาสามารถหาได้จากภาวะการตัดที่ใช้ ดังนั้นการหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งมุมกับเวลาต่อไปนี้จะใช้ภาวะการตัดของการกริ่งละเอียดตามหัวข้อที่ 3.2.4.1 และการกริ่งหัวสะโปกเทียมแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือช่วงที่ความเร็วรอบสปินเดลคงที่ และช่วงที่ความเร็วรอบสปินเดลไม่คงที่ เพราะเนื่องจากในการทดลองกำหนดความเร็วรอบสูงสุดของสปินเดลไว้ที่ 4,500 รอบต่อนาที ดังนั้นมีดกถึงจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่ตั้งแต่ตำแหน่งมุม 0° จนถึง θ_c และเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วไม่คงที่ตั้งแต่ตำแหน่งมุมที่ θ_c ถึง 135° ดังรูปที่ 6.14 โดยที่ตำแหน่งมุม θ_c คือตำแหน่งมุมสุดท้ายที่มีดกถึงจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่ ซึ่งสามารถหาตำแหน่งมุม θ ได้จากระยะทางจากแกนหมุนของสปินเดลกับรัศมีของหัวสะโปกเทียมตามสมการ

$$x = r \sin \theta \quad (6.25)$$

เมื่อ r คือรัศมีของหัวสะโปกเทียม (18 mm) และจะสามารถหาตำแหน่งมุม θ_c ได้จากสมการที่ 6.25 ดังนี้

$$x_c = r \sin \theta_c \quad (6.26)$$

เมื่อ x_c คือระยะทางจากแกนหมุนสปินเดิลสูงสุดที่มีดกถึงเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่ ซึ่งสามารถหาได้จากระยะทางจากแกนหมุนสปินเดิลที่มีความเร็วตัดตามที่กำหนดไว้ในภาวะการตัด คือ 100 เมตรต่อนาที ในขณะที่สปินเดิลหมุนด้วยความเร็วรอบสูงสุด คือ 4,500 รอบต่อนาที โดยใช้สมการ

$$V = 2\pi x N \quad (6.27)$$

เมื่อ

V คือ ความเร็วตัด (100 เมตรต่อนาที)

N คือ ความเร็วรอบของสปินเดิล (4,500 รอบต่อนาที)

x คือ ระยะทางจากแกนหมุนของสปินเดิล (เมตร)

เมื่อแทนค่า ความเร็วตัด (V) และความเร็วรอบของสปินเดิล (N) ลงในสมการที่ 6.26 จะหาค่า x_c ได้ดังนี้

$$100 \text{ m/min} = 2\pi x_c (4,500 \text{ rev/min})$$

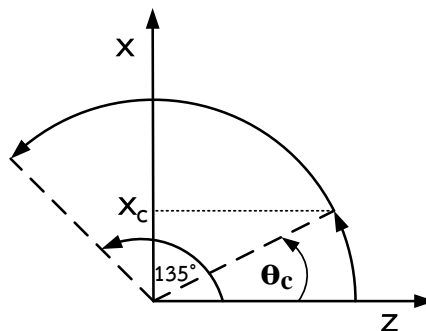
$$x_c = 3.54 \text{ mm}$$

เมื่อแทนค่า x_c ลงในสมการที่ 6.27 จะคำนวณค่า θ_c ได้ดังนี้

$$3.54 = 18 \sin \theta_c$$

$$\theta_c = 11.3^\circ$$

เมื่อได้ตำแหน่งมุม θ_c แล้ว จึงแบ่งช่วงของการหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งมุมกับเวลา ออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงที่มีดกถึงเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่ คือ ตั้งแต่ตำแหน่งมุมที่ 0° ถึง 11.3° และช่วงที่มีดกถึงเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วไม่คงที่ คือ ตั้งแต่ตำแหน่งมุมที่ 11.3° ถึง 135° โดยมีรายละเอียดของแต่ละช่วงดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.14 การแบ่งช่วงในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งมุมกับเวลา

1. ช่วงที่มีดกถึงเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่ $0^\circ - 11.3^\circ$ (ความเร็วรอบของสปินเดิลคงที่)

การหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งมุมกับเวลา จะเริ่มจากความสัมพันธ์ของอัตราป้อนต่อเวลา อัตราป้อนต่อรอบ และความเร็วรอบของสปินเดิล ตามสมการ

$$f_r = fN \quad (6.28)$$

เมื่อ

f_r คือ อัตราป้อนต่อเวลา (มิลลิเมตรต่อนาที)

f คือ อัตราป้อนต่อรอบ (0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ)

N คือความเร็วรอบของสปินเดิล (4,500 รอบต่อนาที)

เนื่องจากการเคลื่อนที่ของมีดกถึงเป็นการเคลื่อนที่แนววงกลม ดังนั้น

$$f_r = r\dot{\theta} \quad (6.29)$$

จากนั้นแทนค่า f_r จากสมการที่ 6.29 ลงไปในสมการที่ 6.28 จะได้

$$r\dot{\theta} = fN \quad (6.30)$$

เมื่อแทนค่ารัศมีหัวสะพาน $r=18$ mm อัตราป้อนต่อรอบ $f=0.01$ mm/rev และความเร็วรอบของสปินเดิล $N=4,500$ rev/min จะหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งมุมกับเวลาได้ดังนี้

$$(18 \text{ mm})\dot{\theta} = (0.01 \text{ mm/rev})(4,500 \text{ rev/min})$$

$$\dot{\theta} = 2.5 \text{ rad/min}$$

$$\dot{\theta} = 0.0417 \text{ rad/s}$$

เมื่อแปลงตำแหน่งมุมให้เป็นหน่วยองศาจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\dot{\theta} = 2.389 \text{ deg/s}$$

และเมื่อมีดกถึงเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่จะได้ว่า

$$\theta = (2.389 \text{ deg/s})t \quad (6.31)$$

เมื่อนำสมการที่ 6.31 ไปแทนในสมการที่ 6.24 จะได้ความสัมพันธ์ของตำแหน่งมุม θ_i กับเวลา t_i ตั้งแต่ตำแหน่งมุม 0° ถึง 11.3° ดังนี้

$$\theta_i = 2.389t_i \quad \text{เมื่อ } 0^\circ \leq \theta_i \leq 11.3^\circ$$

โดยที่ t_i มีหน่วยเป็นวินาทีและ θ_i มีหน่วยเป็นองศา และสามารถหาเวลาที่ t_i ที่มีดกถึงเคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่งมุม θ_i ได้จาก

$$t_i = 0.419\theta_i \quad \text{เมื่อ } 0^\circ \leq \theta_i \leq 11.3^\circ \quad (6.32)$$

ดังนั้นมีดกึ่งจะเคลื่อนที่ไปสิ้นสุดที่ตำแหน่งมุม $\theta = 11.3^\circ$ ที่เวลา $t = 4.735$ s

2. ช่วงที่มีดกึ่งเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วไม่คงที่ $11.3^\circ - 135^\circ$ (ความเร็วรอบของสปินเดิลไม่คงที่)

ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งมุมกับเวลาในช่วงนี้ สามารถหาได้จากสมการที่ 6.30 เช่นเดียวกับการหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลาในช่วงที่แล้ว แต่ความเร็วรอบของสปินเดิล (N) ไม่คงที่จึงต้องแทนค่า N จากสมการที่ 6.27 ลงไปในสมการที่ 6.30 จะได้

$$r\dot{\theta} = f \frac{V}{2\pi x} \quad (6.33)$$

และแทนค่า x จากสมการที่ 6.25 ลงไปในสมการที่ 6.33 จะได้

$$r\dot{\theta} = f \frac{V}{2\pi R \sin \theta} \quad (6.34)$$

จัดรูปสมการที่ 6.34 แล้วอินทิเกรตทั้งสองข้างโดยใช้เวลาเริ่มต้น $t = 4.735$ s ที่ตำแหน่งมุม $\theta = 11.3^\circ$ จะได้

$$\begin{aligned} 2\pi r^2 \int_{\theta=11.3^\circ}^{\theta} \sin \theta d\theta &= fV \int_{t_0=4.735 \text{ s}}^t dt \\ 2\pi r^2 (-\cos \theta + \cos 11.3^\circ) &= fV (t - 4.735 \text{ s}) \end{aligned} \quad (6.35)$$

เมื่อแทนค่ารัศมีหัวสะพาน $r = 18$ mm อัตราป้อนต่อรอบ $f = 0.01$ mm/rev และความเร็วตัด $V = 100$ m/min ลงไปในสมการที่ 6.35 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งมุม θ_i กับเวลา t_i ดังนี้

$$t_i = 124.512 - 122.145 \cos \theta_i \quad \text{เมื่อ } 11.3^\circ \leq \theta_i \leq 135^\circ \quad (6.36)$$

โดยที่ t_i มีหน่วยเป็นวินาทีและ θ_i มีหน่วยเป็นองศา

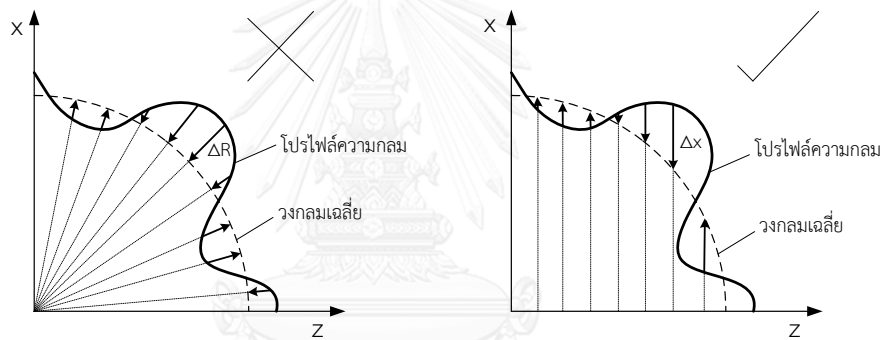
จากสมการที่ 6.32 และสมการที่ 6.36 จะได้ความสัมพันธ์ของตำแหน่งมุมกับเวลาเพื่อนำไปใช้ร่วมกับฟาสต์ทูลเซอร์โวลต์ดังนี้

$$t_i = 0.419\theta_i \quad \text{เมื่อ } 0^\circ \leq \theta_i \leq 11.3^\circ \quad (6.32)$$

$$t_i = 124.512 - 122.145 \cos \theta_i \quad \text{เมื่อ } 11.3^\circ \leq \theta_i \leq 135^\circ \quad (6.36)$$

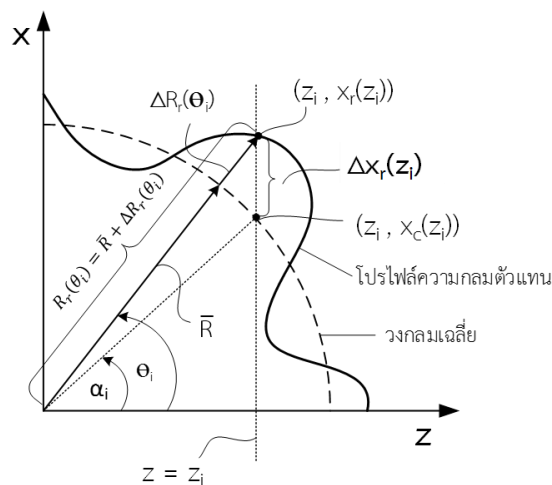
6.5.5.2. การแปลงโปรไฟล์ความกลมตัวแทนให้อยู่บนพิกัดคาร์ทีเซียน

รัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ย $\Delta R(\theta)$ ที่ตำแหน่งมุม θ บนโปรไฟล์ความกลมเป็นข้อมูลที่อ้างอิงบนพิกัดเชิงขั้ว (polar coordinate system) แต่เครื่องกลึงซีเอ็นซีที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องกลึงที่เคลื่อนที่ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate system) และฟาสต์ทูลเซอร์ไวท์ที่ออกแบบไว้ สามารถขับเคลื่อนมีดกลึงในแกน x ได้เพียงแกนเดียว จึงไม่สามารถใช้ฟาสต์ทูลเซอร์ไวท์ชดเชยระยะ $\Delta R(\theta)$ ที่ตำแหน่งมุม θ ในแนวรัศมีได้โดยตรงดังรูปที่ 6.15 (ก) ดังนั้นจึงต้องชดเชยระยะที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยในแนวแกน x แทน (Δx) ดังรูปที่ 6.15 (ข) ซึ่งการชดเชยในลักษณะดังกล่าวต้องแปลงข้อมูลรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ย $\Delta R_r(\theta)$ ที่ตำแหน่งมุม θ บนโปรไฟล์ความกลมตัวแทน ให้เป็นระยะชดเชยที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยในแนวแกน x ($\Delta x_r(z_i)$) ที่แต่ละตำแหน่งบนแกน z เสียก่อน (z_i) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



(ก) ชดเชย ΔR (ข) ชดเชย Δx

รูปที่ 6.15 การชดเชยระยะคลาดเคลื่อนด้วยฟาสต์ทูลเซอร์ไวท์



รูปที่ 6.16 การแปลงโปรไฟล์ความกลมตัวแทนให้อยู่บนพิกัดคาร์ทีเซียน

ให้ $R_r(\theta_i)$ คือรัศมีของโปรไฟล์ความกลมตัวแทนที่ตำแหน่งมุม θ_i \bar{R} คือรัศมีของวงกลมเฉลี่ย (คือรัศมีของหัวสะพานเทียม 18 มิลลิเมตร) และ $\Delta R_r(\theta_i)$ คือรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยของโปรไฟล์ความกลมตัวแทนที่ตำแหน่งมุม θ_i ดังรูปที่ 6.16 จะสามารถหา $R_r(\theta_i)$ ได้จาก

$$R_r(\theta_i) = \bar{R} + \Delta R_r(\theta_i) \quad (6.37)$$

ให้ $(z_i, x_r(z_i))$ เป็นจุดที่อยู่บนโปรไฟล์ความกลมตัวแทนที่ตำแหน่งมุม θ_i และให้ $(z_i, x_c(z_i))$ เป็นจุดที่อยู่บนวงกลมเฉลี่ย โดยที่ทั้ง 2 จุด เป็นจุดที่อยู่บนเส้นตรง $z=z_i$ ดังรูปที่ 6.16 สามารถหา z_i ที่ตำแหน่งมุม θ_i ได้จาก

$$z_i = R_r(\theta_i) \cos \theta_i \quad (6.38)$$

หา $x_r(z_i)$ ได้จาก

$$x_r(z_i) = R_r(\theta_i) \sin \theta_i \quad (6.39)$$

และหา $x_c(z_i)$ ได้จาก

$$x_c(z_i) = \bar{R} \sin \alpha_i \quad (6.40)$$

เมื่อ α_i คือตำแหน่งมุมของจุด $(z_i, x_c(z_i))$ ซึ่งอยู่บนวงกลมเฉลี่ย ดังรูปที่ 6.16 ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\alpha_i = \cos^{-1} \left(\frac{z_i}{\bar{R}} \right) \quad (6.41)$$

เมื่อแทนค่า α_i จากสมการที่ 6.41 ลงในสมการที่ 6.40 จะได้

$$x_c(z_i) = \bar{R} \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{z_i}{\bar{R}} \right) \right) \quad (6.42)$$

และเมื่อแทนค่า z_i จากสมการที่ 6.38 ลงในสมการที่ 6.42 จะได้

$$x_c(z_i) = \bar{R} \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{R_r(\theta_i) \cos \theta_i}{\bar{R}} \right) \right) \quad (6.43)$$

จากนั้นจะสามารถหาระยะคลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยในแนวแกน x $\Delta x_r(z_i)$ ที่ตำแหน่ง z_i ได้จากผลต่างของ $x_r(z_i)$ และ $x_c(z_i)$ ดังรูปที่ 6.16 ซึ่งสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$\Delta x_r(z_i) = x_r(z_i) - x_c(z_i) \quad (6.44)$$

จากนั้นแทนค่า $x_r(z_i)$ จากสมการที่ 6.39 ลงไปในสมการที่ 6.44 และแทนค่า $x_c(z_i)$ จากสมการที่ 6.43 ลงไปในสมการที่ 6.44 จะได้ว่า

$$\Delta x_r(z_i) = R_r(\theta_i) \sin \theta_i - \bar{R} \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{R_r(\theta_i) \cos \theta_i}{\bar{R}} \right) \right) \quad (6.45)$$

จากนั้นใช้สมการที่ 6.37 กับสมการที่ 6.45 ในการแปลงโปรไฟล์ความกลมตัวแทนที่แสดงรัศมีที่คลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ย $\Delta R_r(\theta_i)$ ที่ตำแหน่งมุม θ_i ไปเป็นระยะคลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยในแนวแกน x $\Delta x_r(z_i)$ ที่ตำแหน่ง z_i โดยสามารถหาเวลา t_i ที่ตำแหน่ง z_i ได้จากเวลา t_i ที่ตำแหน่งมุม θ_i ตามสมการที่ 6.32 และสมการที่ 6.36 เพราะตำแหน่ง z_i กับ θ_i เป็นตำแหน่งเดียวกัน

6.5.5.3. การสร้างสัญญาณควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์โว

เมื่อได้ระยะคลาดเคลื่อนจากวงกลมเฉลี่ยในแนวแกน x $\Delta x_r(z_i)$ ที่ตำแหน่ง z_i และเวลา t_i ที่มีดกลึงเคลื่อนที่ไปแล้ว จากหัวข้อที่ 6.5.1 และ 6.5.2 จากนั้นใช้สมการการสอบเทียบในหัวข้อที่ 5.8.4. สมการที่ 5.2 สร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าสำหรับควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกลึงให้ชดเชยระยะคลาดเคลื่อนตามที่กำหนดไว้

6.6. การทดลองปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสโปกเทียมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน

6.6.1. วิธีการทดลอง

นำโปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยรูปแบบที่ 1 จากหัวข้อที่ 6.4.5 มาใช้เป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน และสร้างสัญญาณควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์โวตามวิธีที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 6.5.5 จากนั้นใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวขับเคลื่อนมีดกลึงชดเชยความคลาดเคลื่อนจากความกลมในขั้นตอนกลึงละเอียด (finish turning) โดยใช้สัญญาณกระตุ้น (trigger) จากเครื่องกลึงซีเอ็นซีกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของการชดเชย ตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 6.5.1

6.6.2. ขั้นตอนการทดลอง

- นำข้อมูลจากโปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยรูปแบบที่ 1 มาสร้างสัญญาณควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์โวตามวิธีที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 6.5.
- เตรียมสัญญาณกระตุ้นจากเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของการชดเชยในขั้นตอนกลึงละเอียด
- กลึงหัวสโปกเทียมตามขั้นตอนที่ 1 – 4 ในหัวข้อที่ 3.4 จะได้ชิ้นงานหลังจากกลึงกึ่งละเอียด (semi finish turning)
- ใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวขับเคลื่อนมีดกลึงชดเชยระยะคลาดเคลื่อนในขั้นตอนการกลึงละเอียด

5. ทำตามขั้นตอนที่ 1 – 4 จนครบ 4 ลูก
6. นำหัวสะโพกเทียมทั้ง 4 ลูกไปวัดความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลม

6.6.3. ผลการทดลอง

ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมทั้ง 4 ลูก แสดงในกราฟรูปที่ 6.17 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.69 ± 0.67 ไมโครเมตรและค่าสูงสุดเท่ากับ 7.33 ไมโครเมตร (ข้อมูลดิบแสดงในตารางที่ ก.5) โปรไฟล์ความกลมของหัวสะโพกเทียมทั้ง 4 ลูกแสดงในกราฟรูปที่ 6.18

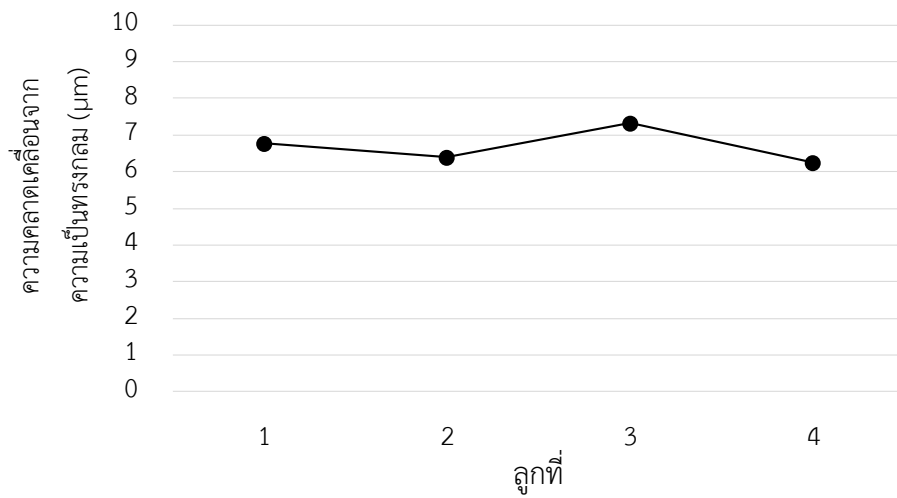
6.6.4. การอภิปราย

จากผลการทดลองพบว่า ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงสุดของหัวสะโพกเทียมที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 7.33 ไมโครเมตร ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติในหัวข้อที่ 6.4.5 ที่วิเคราะห์ไว้ว่า ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ของหัวสะโพกเทียมหลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนจะมีค่าไม่เกิน 9.31 ไมโครเมตรที่ระดับความมั่นใจ 95%

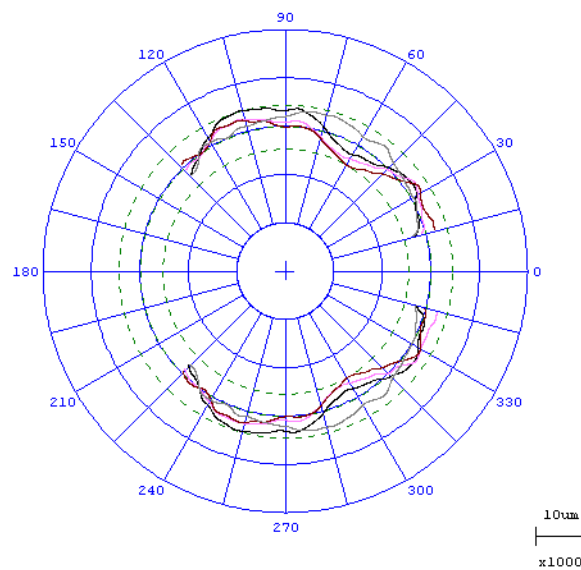
จากผลการทดลองในกราฟรูปที่ 6.17 เห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมหลังจากปรับปรุงความเป็นทรงกลมด้วยวิธีนี้มีค่าน้อยกว่า 10 ไมโครเมตรทุกลูก แสดงว่าการปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนสามารถผลิตหัวสะโพกเทียมที่ใช้กับเบ้าพลาสติกได้ตามมาตรฐาน (น้อยกว่า 10 ไมโครเมตร) แต่เมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ยซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.69 ± 0.67 ไมโครเมตร และแนวโน้มของผลการทดลองตามรูปที่ 6.17 พบว่า การปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนไม่สามารถผลิตหัวสะโพกเทียมให้มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมน้อยกว่า 5 ไมโครเมตรได้ ซึ่งหมายความว่า ไม่สามารถผลิตหัวสะโพกเทียมที่ใช้กับเบ้าโลหะให้เป็นไปตามมาตรฐานได้ (น้อยกว่า 5 ไมโครเมตร)

จากผลการทดลองในรูปที่ 6.18 จะเห็นได้ว่าโปรไฟล์ความกลมที่เกิดขึ้นมีความคล้ายคลึงกันซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานของการใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยที่กล่าวไว้ว่า การสึกหรอของเม็ดมีดส่งผลต่อโปรไฟล์ความกลมน้อยมาก แต่เนื่องจากอัตราการสึกหรอของแต่ละเม็ดมีดไม่เท่ากัน ทำให้โปรไฟล์ความกลมที่เกิดขึ้นจากแต่ละเม็ดมีดแตกต่างกัน ส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมที่ปรับปรุงด้วยวิธีนี้มีค่าสูง ดังนั้นถ้าใช้เม็ดมีดที่มีคุณภาพสม่ำเสมอจะสามารถใช้วิธีนี้ปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่านี้

จากที่กล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าผลกระทบจากคุณภาพของเม็ดมิดที่ไม่สม่ำเสมอทำให้การปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมเป็นโปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยไม่สามารถผลิตหัวสะโพกเทียมที่ใช้กับเบ้าโลหะได้ จึงต้องใช้วิธีที่สามารถชดเชยความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมเนื่องจากคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอของเม็ดมิดได้ นั่นคือการใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป



รูปที่ 6.17 ความคลาดเคลื่อนจากความทรงกลมของหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน



รูปที่ 6.18 โปรไฟล์ความกลมของหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน

6.7. การทดลองปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะเกโทกเทียมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับ ก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน

6.7.1. วิธีการทดลอง

จากที่กล่าวในหัวข้อที่ 6.4.6.4. งานวิจัยนี้เลือกใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนเดียวกันในการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะเกโทกเทียมลูกถัดไปจำนวน 4 ลูก ($m=4$) และทำการทดลองปรับปรุงความเป็นทรงกลมทั้งหมด 24 ลูก โดยเริ่มจากการกลึงหัวสะเกโทกเทียมลูกที่ 1 ด้วยวิธีปกติ แล้วนำไปวัดโปรไฟล์ความกลม เพื่อใช้เป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนของลูกที่ 2 ลูกที่ 3 ลูกที่ 4 และลูกที่ 5 และนำหัวสะเกโทกเทียมลูกที่ 5 มาวัดโปรไฟล์ความกลมเพื่อใช้เป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนในชุดถัดไป แต่เนื่องจากโปรไฟล์ความกลมของหัวสะเกโทกเทียมลูกที่ 5 เป็นโปรไฟล์ความกลมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมแล้ว ดังนั้นจึงนำไปใช้โดยตรงไม่ได้ จะต้องนำโปรไฟล์ความกลมที่วัดได้ ไปหาโปรไฟล์ความกลมปกติของลูกที่ 5 ก่อนการนำไปใช้เป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน โปรไฟล์ความกลมปกติสามารถหาได้จากการกลับข้างสมการที่ 6.16 ซึ่งเขียนใหม่ดังนี้

$$P_j = \hat{P}_j + P_{rj} \quad (6.46)$$

เมื่อ

P_j คือ โปรไฟล์ความกลมปกติของหัวสะเกโทกเทียมลูกที่ j

\hat{P}_j คือ โปรไฟล์ความกลมที่ได้หลังจากปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะเกโทกเทียมลูกที่ j

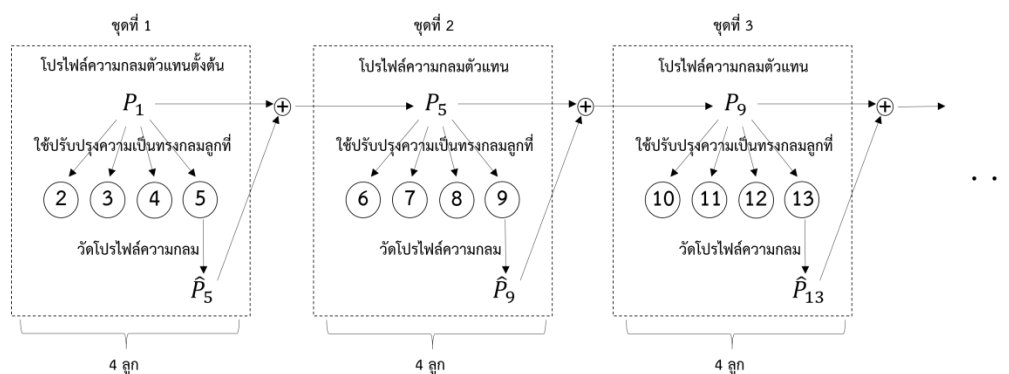
P_{rj} คือ โปรไฟล์ความกลมตัวแทนที่ใช้ในการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะเกโทกเทียมลูกที่ j

จากสมการที่ 6.46 สามารถหาโปรไฟล์ความกลมปกติของหัวสะเกโทกเทียมลูกที่ 5 (P_5) ได้จากผลบวกของโปรไฟล์ความกลมของหัวสะเกโทกเทียมลูกที่ 5 ที่วัดได้หลังจากการปรับปรุง (\hat{P}_5) กับโปรไฟล์ความกลมตัวแทนที่ใช้ในการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะเกโทกเทียมลูกที่ 5 (P_{r5}) (ซึ่งก็คือโปรไฟล์ความกลมปกติของหัวสะเกโทกเทียมลูกที่ 1 (P_1)) ดังนี้

$$P_5 = \hat{P}_5 + P_1$$

จากนั้นนำโปรไฟล์ความไม่ถูกต้องของหัวสะเกโทกเทียมลูกที่ 5 (P_5) ไปเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนในการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะเกโทกเทียมลูกที่ 6 ลูกที่ 7 ลูกที่ 8 และลูกที่ 9 และวัดโปรไฟล์ความกลมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะเกโทกเทียมลูกที่ 9 (\hat{P}_9) และใช้สมการที่ 6.46 หาโปรไฟล์ความกลมปกติของหัวสะเกโทกเทียมลูกที่ 9 (P_9) เป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนในการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของลูกที่ 10 ลูกที่ 11 ลูกที่ 12 และลูกที่ 13 และทำเช่นนี้

ต่อไปเรื่อยๆ จนครบ 24 ลูก โดยไม่นับลูกที่ 1 สามารถแสดงวิธีการทดลองเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 6.19



รูปที่ 6.19 แผนภาพแสดงวิธีการทดลองปรับปรุงความเป็นทรงกลม โดยใช้โพรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโพรไฟล์ความกลมตัวแทน

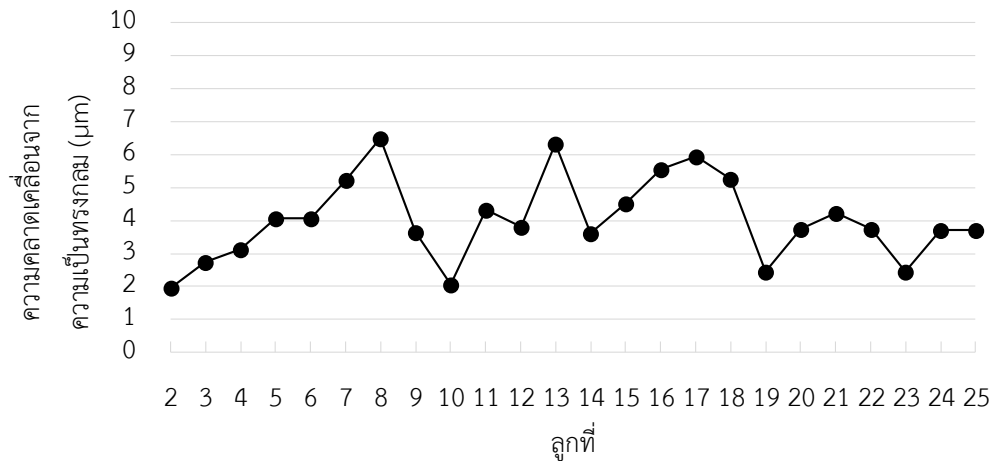
6.7.2. ขั้นตอนการทดลอง

1. กลึงหัวสะโพกเทียมลูกที่ 1 ด้วยวิธีปกติ ตามขั้นตอน 1 – 6 ในหัวข้อที่ 3.4
2. นำหัวสะโพกเทียมลูกที่ 1 มาวัดโพรไฟล์ความกลม เพื่อใช้เป็นโพรไฟล์ความกลมตัวแทน
3. นำโพรไฟล์ความกลมตัวแทน มาสร้างสัญญาณควบคุมระยะขับเคลื่อนมีดกลึงของฟาสต์ทูลเซอร์โวตามวิธีที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 6.5
4. ใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โวขับเคลื่อนมีดกลึงชุดเซอร์โวลดเคลื่อนในขั้นตอนการกลึงละเอียดในการกลึงหัวสะโพกเทียม 4 ลูกถัดไป (ลูกที่ 2 ลูกที่ 3 ลูกที่ 4 และลูกที่ 5)
5. นำหัวสะโพกเทียมลูกสุดท้ายที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 มาวัดโพรไฟล์ความกลม หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลม (P_i)
6. นำโพรไฟล์ความกลมที่วัดได้จากขั้นตอนที่ 5 ไปหาโพรไฟล์ความกลมปกติ (P_j) ด้วยสมการที่ 6.46 ตามวิธีที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 6.7.1
7. นำโพรไฟล์ความกลมปกติที่หาได้จากขั้นตอนที่ 6 มาใช้เป็นโพรไฟล์ความกลมตัวแทน
8. ทำตามขั้นตอนที่ 3 – 7 จนครบ 24 ลูก (ไม่นับลูกที่ 1)

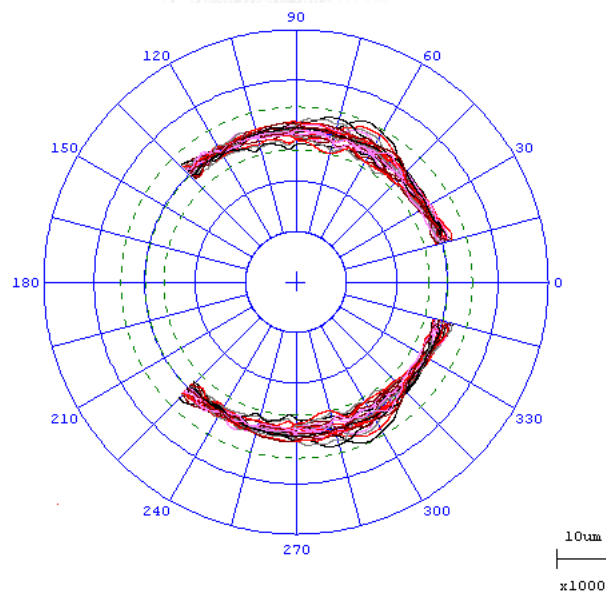
6.7.3. ผลการทดลอง

ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมทั้ง 24 ลูก แสดงในกราฟรูปที่ 6.20 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.04 ± 0.54 ไมโครเมตรและค่าสูงสุด

เท่ากับ 6.50 ไมโครเมตร (ข้อมูลดิบแสดงในตารางที่ ก.6) โปรไฟล์ความกลมของหัวสะพานเทียมทั้ง 24 ลูกแสดงในรูปที่ 6.21



รูปที่ 6.20 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน



รูปที่ 6.21 โปรไฟล์ความกลมของหัวสะพานเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน

6.7.4. การอภิปราย

จากผลการทดลองพบว่า ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงสุดของหัวสะพานเทียมที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 6.50 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.04 ± 0.54 ไมโครเมตร ซึ่ง

สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติในหัวข้อที่ 6.4.5 ที่วิเคราะห์ไว้ว่า ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ของหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนจะมีค่าไม่เกิน 7.27 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.14 ± 0.39 ไมโครเมตร ที่ระดับความมั่นใจ 95%

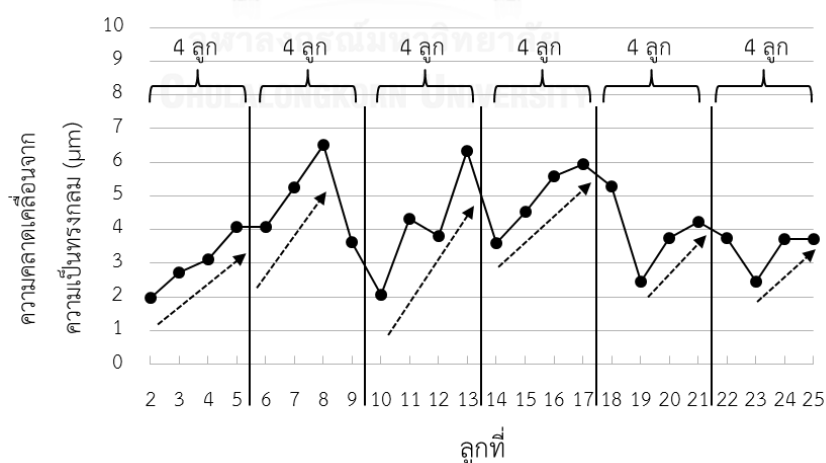
เมื่อเปรียบเทียบกับหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน ตามตารางที่ 6.4 พบว่าหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน มีค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมน้อยกว่าถึง 40% แสดงว่าการปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนเป็นวิธีการที่มีประสิทธิผลดีกว่า เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถชดเชยความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมที่เกิดขึ้นจากการสึกหรอของเม็ดมีด และสามารถชดเชยความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมที่เกิดจากคุณภาพของเม็ดมีดที่ไม่สม่ำเสมอได้ เพราะเป็นการชดเชยตามลักษณะของโปรไฟล์ความกลมที่เกิดขึ้นของเม็ดมีदनั้นๆ (เนื่องจากเป็นเม็ดมีดเดียวกัน)

จากผลการทดลองในกราฟรูปที่ 6.20 เห็นได้ว่าหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนทั้ง 24 ลูก มีค่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมน้อยกว่า 10 ไมโครเมตร แสดงว่า การปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนสามารถผลิตหัวสะโพกเทียมที่ใช้กับเข้าพลาสติกได้ตามมาตรฐาน (น้อยกว่า 10 ไมโครเมตร) และเมื่อพิจารณาต่อไป พบว่าในจำนวนหัวสะโพกเทียมที่ได้จากการทดลองทั้งหมด 24 ลูก มีหัวสะโพกเทียม 18 ลูกซึ่งคิดเป็น 75% มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมน้อยกว่า 5 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.04 ± 0.54 ไมโครเมตร แสดงว่า โดยเฉลี่ยแล้ว การปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนสามารถผลิตหัวสะโพกเทียมที่ใช้กับเข้าโลหะได้ตามมาตรฐาน (น้อยกว่า 5 ไมโครเมตร)

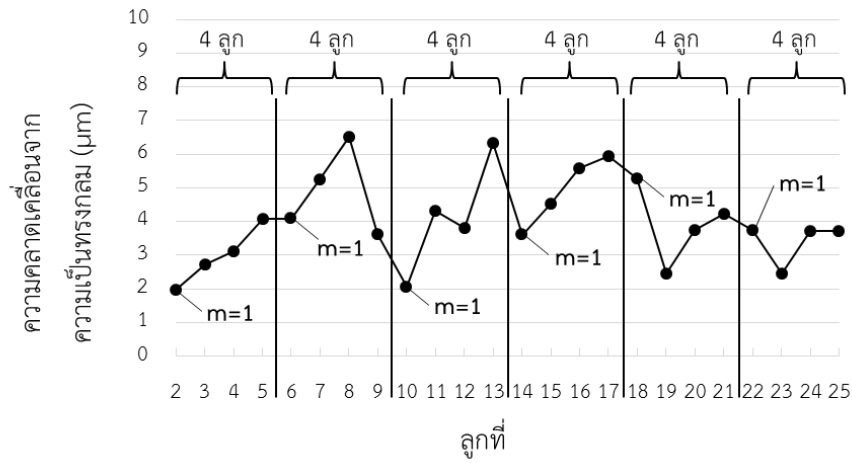
เมื่อเปรียบเทียบกับหัวสะโพกเทียมที่เป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้า (commercial product) ที่แสดงในงานวิจัย [2] ตามตารางที่ 6.5 พบว่า หัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงด้วยฟาสต์ทูลเซอร์โรว์ในงานวิจัยนี้ มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมใกล้เคียงกับหัวสะโพกเทียมยี่ห้อ Hasrris และ S-ROM และมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมน้อยกว่าหัวสะโพกเทียมยี่ห้อ Omnifit แสดงว่า การปรับปรุงความเป็นทรงกลมด้วยเทคนิคการใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โรว์ชดเชยรัศมีที่คลาดเคลื่อนบนโปรไฟล์ความกลมตัวแทน สามารถผลิตหัวสะโพกเทียมที่มีความเป็นทรงกลมสำหรับการใช้งานจริงได้

เมื่อพิจารณากราฟผลการทดลองในรูปที่ 6.22 จะเห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะเกโทกเทียมมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามลำดับการกลึงภายในชุดที่ใช้โปรไฟล์ความกลมตัวแทนเดียวกัน (ชุดละ 4 ลูก) ซึ่งตรงตามสมมุติฐานที่กล่าวไว้ก่อนการปรับปรุงจริง คือ โปรไฟล์ความกลมจะแตกต่างกันออกไปเรื่อยๆ ตามลำดับการกลึงเนื่องจากการสึกหรอของเม็ดมิต ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างโปรไฟล์ความกลมตัวแทนและโปรไฟล์ความกลมปกติมากขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามลำดับการกลึงที่เห็นในผลการทดลองจากรูปจะเห็นได้ว่าการสึกหรอของเม็ดมิตส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะเกโทกเทียมที่กลึงในลำดับถัดกันมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1 – 2 ไมโครเมตร ดังนั้นถ้าลดค่า m ลงจะสามารถผลิตหัวสะเกโทกเทียมที่มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมต่ำลงได้โดยรวม

จากการพิจารณากราฟผลการทดลองในรูปที่ 6.23 จะเห็นได้ว่าหัวสะเกโทกเทียมที่กลึงหลังจากเปลี่ยนโปรไฟล์ความกลมตัวแทน ($m=1$) มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมน้อยมาก โดยมีค่าเฉลี่ยเพียง 3.46 ± 1.33 ไมโครเมตร เพราะเป็นการชดเชยการสึกหรอของมิตกลึงด้วยโปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเพียงลูกเดียว ดังนั้นถ้าสามารถปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าที่ $m=1$ ได้ หัวสะเกโทกเทียมที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมน้อยมาก ซึ่งอาจจะใช้วิธีการติดเซนเซอร์วัดความกลมบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีแล้ววัดโปรไฟล์ความกลมที่เกิดขึ้นแล้วนำมาเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนทันที ก็จะทำให้การใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าที่ $m=1$ มีความสะดวกในทางปฏิบัติมากขึ้น



รูปที่ 6.22 กราฟแสดงการเพิ่มขึ้นของความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะเกโทกเทียมตามลำดับการกลึง



รูปที่ 6.23 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนจากความป็นทรงกลมของหัวสะโปกเทียม หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมเมื่อ m=1

ตารางที่ 6.4 ความคลาดเคลื่อนจากความป็นทรงกลมเฉลี่ยของหัวสะโปกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมตัวแทนในแต่ละแนวทาง

ความคลาดเคลื่อนจากความป็นทรงกลมเฉลี่ย (μm) (95%)	
โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ย	โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้า
6.69±0.67	4.04±0.54

ตารางที่ 6.5 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนจากความป็นทรงกลมของหัวสะโปกเทียมที่เป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้ากับหัวสะโปกเทียมที่ได้จากงานวิจัย

ความคลาดเคลื่อนจากความป็นทรงกลม (μm)				
หัวสะโปกเทียมที่เป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้า				หัวสะโปกเทียมที่ได้จากงานวิจัย (n=24)
Elite (n=10)	Harris (n=10)	S-ROM (n=10)	Omnifit (n=10)	
2.71±1.42	3.65±2.76	3.97±2.26	6.93±2.46	4.04±1.27

*หมายเหตุ ค่าที่แสดงในตารางคือ mean ± sd

บทที่ 7

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1. สรุปผลงานวิจัย

การผ่าตัดเปลี่ยนข้อต่อสะโพกเทียม (total hip) มีค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากข้อต่อสะโพกเทียมมีราคาแพง ส่วนหนึ่งมาจากการใช้เครื่องจักรที่มีราคาสูงมากในการปรับความเป็นทรงกลม (sphericity) ของหัวสะโพกเทียม (femoral head) ที่ได้หลังจากกระบวนการกลึง ตามมาตรฐาน ASTM F2033 หัวสะโพกเทียมที่ใช้กับเบ้าพลาสติก (acetabula cup) ต้องมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลม (out-of-sphericity) ไม่เกิน 10 ไมโครเมตร และหัวสะโพกเทียมที่ใช้กับเบ้าโลหะ ต้องมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมไม่เกิน 5 ไมโครเมตร งานวิจัยนี้จึงเสนอการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดา (conventional CNC lathe) โดยการใช้ฟาสต์ทูลเซอร์โว (fast tool servo) ชดเชยรัศมีที่คลาดเคลื่อนบนโปรไฟล์ความกลมตัวแทน เพื่อผลิตหัวสะโพกเทียมที่ความเป็นทรงกลมตามมาตรฐาน ทำให้สามารถลดต้นทุน เวลา และขั้นตอนการผลิตหัวสะโพกเทียมได้ โดยมีผลสรุปดังนี้

1. ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมที่กลึงด้วยวิธีปกติจากเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดา มีค่าเท่ากับ 11.13 ± 0.60 ไมโครเมตร (ที่ระดับความมั่นใจ 95%) แสดงว่า การกลึงหัวสะโพกเทียมตามวิธีปกติด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบธรรมดาไม่สามารถผลิตหัวสะโพกเทียมให้มีความเป็นทรงกลมได้ตามมาตรฐาน
2. ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน มีค่าเท่ากับ 6.69 ± 0.67 ไมโครเมตร แสดงว่า การปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนสามารถผลิตหัวสะโพกเทียมที่ใช้กับเบ้าพลาสติกได้ตามมาตรฐาน (น้อยกว่า 10 ไมโครเมตร) แต่ไม่สามารถผลิตหัวสะโพกเทียมที่ใช้กับเบ้าโลหะได้ตามมาตรฐาน (น้อยกว่า 5 ไมโครเมตร)
3. ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะโพกเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน มีค่าเท่ากับ 4.04 ± 0.54 ไมโครเมตร แสดงว่า การปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนสามารถผลิตหัวสะโพกเทียมที่ใช้กับเบ้าพลาสติกและเบ้าโลหะได้ตามมาตรฐาน (น้อยกว่า 5 ไมโครเมตร)

7.2. ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยเห็นได้ว่าการปรับปรุงความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดี แต่มีความยุ่งยากในทางปฏิบัติ เพราะต้องวัดโปรไฟล์ความกลมของหัวสะพานเทียมในระหว่างการดำเนินการผลิต เพื่อนำไปใช้เป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทนของลูกถัดไป ดังนั้น ถ้าสามารถติดตั้งเครื่องมือวัดโปรไฟล์ความกลมบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี และใช้วัดโปรไฟล์ความกลมในระหว่างการดำเนินการผลิตได้ จะทำให้การปรับปรุงความเป็นทรงกลมโดยวิธีนี้มีความสะดวกในทางปฏิบัติมากขึ้น



รายการอ้างอิง

1. นายแพทย์สุรพงษ์ อัมพวันวงษ์, การผ่าตัดข้อสะโพกเทียมด้วยแผลเล็ก ตอนที่ 1, in หนังสือพิมพ์เดลินิวส์. 2005.
2. Ito, H., et al., *The sphericity of the bearing surface in total hip arthroplasty*. The Journal of Arthroplasty, 2001. **16**(8): p. 1024-1029.
3. Leyen, S., S. Köbel, and W. Weber, *Sphericity related contact mechanics in ceramic-on-ceramic hip joint replacements*. Journal of Biomechanics, 2006. **39**, Supplement 1(0): p. S530.
4. ASTM F2033-12, *Standard Specification for Total Hip Joint Prosthesis and Hip Endoprosthesis Bearing Surfaces Made of Metallic, Ceramic, and Polymeric Materials*. 2012, ASTM International, West Conshohocken, PA
5. Woronko, A., J. Huang, and Y. Altintas, *Piezoelectric tool actuator for precision machining on conventional CNC turning centers*. Precision Engineering, 2003. **27**(4): p. 335-345.
6. Li, D., et al., *Error analysis and in-process compensation on cup wheel grinding of hard sphere*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011. **51**(6): p. 543-548.
7. Chen, W.K. and H. Huang, *Ultra precision grinding of spherical convex surfaces on combination brittle materials using resin and metal bond cup wheels*. Journal of Materials Processing Technology, 2003. **140**(1-3): p. 217-223.
8. Zhu, W.-H., M.B. Jun, and Y. Altintas, *A fast tool servo design for precision turning of shafts on conventional CNC lathes*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001. **41**(7): p. 953-965.
9. Kim, J.-D. and D.-S. Kim, *Waviness compensation of precision machining by piezo-electric micro cutting device*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998. **38**(10-11): p. 1305-1322.
10. ISO 4291:1985, *Methods for the assesement of departure from roundness -- Measurement of variations in radius*. 2009.
11. Sui, W. and D. Zhang, *Four Methods for Roundness Evaluation*. Physics Procedia, 2012. **24**, Part C(0): p. 2159-2164.

12. Figliola, R.S. and D.E. Beasley, *Theory and design for mechanical measurements*. Measurement Science and Technology, 2001. **12**(10): p. 1743.
13. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, การควบคุมระบบพลศาสตร์. 2 ed. 2005, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
14. กัลยา วานิชย์บัญชา, สถิติสำหรับงานวิจัย. 6 ed. 2012, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
15. ส่องศรี พิทยารัตน์ และคณะ, หลักสถิติ. 8 ed. 1998, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.1 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานโพกเทียมที่กลึงด้วยวิธีปกติ
ก่อนละเว้นบริเวณที่ภาวะการตัดไม่เหมาะสม

ลูกที่	ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลม (μm)					ค่าเฉลี่ย
	วัดครั้งที่					
	1	2	3	4	5	
1	12.24	12.24	12.26	12.21	12.23	12.24
2	12.9	12.91	12.90	12.93	12.87	12.90
3	10.57	10.59	10.57	10.56	10.59	10.58
4	12.82	12.81	12.80	12.82	12.85	12.82
5	15.38	15.37	15.37	15.41	15.37	15.38
6	19.49	19.47	19.47	19.48	19.51	19.48
7	19.59	19.56	19.57	19.56	19.62	19.58
8	16.95	16.95	16.95	16.94	16.96	16.95
9	17.98	17.98	17.98	17.98	17.94	17.97
10	16.34	16.34	16.33	16.32	16.39	16.34
11	17.04	17.07	17.01	17.05	17.07	17.05
12	14.94	14.97	14.94	14.94	14.90	14.94
13	15.4	15.37	15.39	15.38	15.37	15.38
14	16.74	16.70	16.75	16.76	16.77	16.74
15	16.1	16.11	16.08	16.09	16.09	16.09
16	13.25	13.23	13.22	13.25	13.27	13.24
17	16.41	16.40	16.43	16.43	16.39	16.41
18	16.54	16.53	16.51	16.54	16.55	16.53
19	17.43	17.39	17.46	17.45	17.45	17.44
20	24.7	24.67	24.73	24.70	24.72	24.71
21	22.65	22.64	22.63	22.66	22.68	22.65
22	20.18	20.15	20.21	20.18	20.21	20.18
23	25.09	25.09	25.10	25.10	25.09	25.09
24	24.34	24.32	24.33	24.35	24.37	24.34
25	26.45	26.47	26.46	26.49	26.45	26.47

ตารางที่ ก.2 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานโพกเทียมที่กลึงด้วยวิธีปกติ
หลังละเว้นบริเวณที่ภาวะการตัดไม่เหมาะสม

ลูกที่	ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลม (μm)					ค่าเฉลี่ย
	วัดครั้งที่					
	1	2	3	4	5	
1	12.24	12.24	12.28	12.21	12.24	12.24
2	9.45	9.46	9.46	9.45	9.45	9.45
3	9.69	9.66	9.69	9.70	9.69	9.69
4	10.49	10.51	10.51	10.46	10.46	10.49
5	10.10	10.09	10.07	10.10	10.11	10.10
6	12.91	12.90	12.90	12.89	12.92	12.90
7	11.06	11.03	11.07	11.05	11.07	11.06
8	10.49	10.48	10.49	10.50	10.48	10.49
9	10.05	10.04	10.04	10.05	10.06	10.05
10	10.30	10.30	10.29	10.33	10.32	10.31
11	10.35	10.33	10.35	10.32	10.34	10.34
12	9.79	9.81	9.77	9.77	9.80	9.79
13	9.44	9.46	9.44	9.46	9.45	9.45
14	10.25	10.23	10.24	10.25	10.23	10.24
15	11.91	11.90	11.92	11.91	11.94	11.91
16	13.28	13.33	13.27	13.30	13.26	13.29
17	9.41	9.42	9.42	9.45	9.41	9.42
18	13.97	13.97	13.95	13.96	13.96	13.96
19	10.80	10.82	10.79	10.80	10.80	10.80
20	10.82	10.80	10.78	10.84	10.79	10.81
21	10.60	10.63	10.57	10.62	10.58	10.60
22	10.89	10.91	10.88	10.90	10.89	10.89
23	12.82	12.81	12.81	12.80	12.86	12.82
24	13.83	13.85	13.80	13.82	13.81	13.82
25	13.39	13.40	13.42	13.42	13.40	13.40

ตารางที่ ก.3 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมที่กลึงด้วยวิธีปกติ
หลังจากติดตั้งฟาสต์ทูลเซอร์ไว (เมตมีตที่ 1)

ลูกที่	ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลม (μm)					ค่าเฉลี่ย
	วัดครั้งที่					
	1	2	3	4	5	
1	12.93	12.92	12.91	12.94	12.88	12.92
2	10.19	10.18	10.20	10.17	10.18	10.18
3	11.57	11.57	11.58	11.58	11.54	11.57
4	10.46	10.46	10.47	10.45	10.46	10.46
5	13.66	13.67	13.64	13.64	13.66	13.66
6	17.07	17.08	17.08	17.08	17.02	17.06
7	15.3	15.31	15.30	15.31	15.32	15.31
8	16.38	16.39	16.40	16.39	16.41	16.39
9	17.13	17.12	17.15	17.13	17.11	17.13
10	25.21	25.23	25.24	25.25	25.25	25.23
11	23.58	23.57	23.58	23.61	23.55	23.58
12	20.12	20.10	20.09	20.15	20.13	20.12
13	22	21.98	21.99	22.01	22.00	22.00
14	20.14	20.18	20.14	20.12	20.14	20.14
15	21.73	21.69	21.77	21.75	21.72	21.73
16	21.22	21.22	21.23	21.19	21.21	21.21
17	22.63	22.66	22.61	22.64	22.66	22.64
18	22.59	22.61	22.60	22.56	22.59	22.59
19	26.11	26.11	26.12	26.08	26.11	26.10
20	23.51	23.50	23.51	23.52	23.53	23.51
21	26.93	26.89	26.92	26.93	26.96	26.93
22	26.24	26.23	26.20	26.26	26.26	26.24
23	22.41	22.41	22.42	22.37	22.45	22.41
24	27.12	27.12	27.12	27.07	27.11	27.11
25	18.9	18.91	18.87	18.88	18.89	18.89

26	21.11	21.12	21.10	21.11	21.12	21.11
27	23.81	23.81	23.84	23.82	23.83	23.82
28	21.64	21.61	21.66	21.65	21.63	21.64
29	22.65	22.62	22.68	22.68	22.65	22.66
30	21.34	21.35	21.31	21.32	21.34	21.33
31	25.3	25.33	25.28	25.31	25.29	25.30
32	25.11	25.10	25.10	25.10	25.11	25.10
33	28.29	28.29	28.32	28.27	28.28	28.29
34	25.96	25.94	26.00	25.99	25.92	25.96
35	26.6	26.56	26.62	26.61	26.61	26.60



ตารางที่ ก.4 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมที่กลึงด้วยวิธีปกติ
หลังจากติดตั้งฟาสต์ทูลเซอร์ไว (เมตมีตที่ 2)

ลูกที่	ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลม (μm)					ค่าเฉลี่ย
	วัดครั้งที่					
	1	2	3	4	5	
1	10.68	10.69	10.64	10.70	10.65	10.67
2	13	13.00	12.98	12.98	13.03	13.00
3	11.61	11.60	11.64	11.60	11.61	11.61
4	12.09	12.05	12.08	12.09	12.09	12.08
5	10.33	10.33	10.35	10.36	10.32	10.34
6	11.68	11.67	11.68	11.70	11.72	11.69
7	11.76	11.75	11.74	11.74	11.73	11.74
8	14.88	14.89	14.88	14.90	14.91	14.89
9	15.43	15.45	15.42	15.44	15.44	15.44
10	12.12	12.13	12.13	12.12	12.15	12.13
11	13.77	13.77	13.78	13.80	13.79	13.78
12	13.17	13.17	13.16	13.16	13.19	13.17
13	15.44	15.43	15.46	15.43	15.42	15.44
14	14.93	14.93	14.96	14.91	14.90	14.93
15	15.98	16.00	16.01	15.98	15.97	15.99
16	11.91	11.94	11.90	11.92	11.90	11.91
17	15.4	15.43	15.42	15.42	15.41	15.42
18	16.24	16.27	16.20	16.25	16.24	16.24
19	15.12	15.10	15.10	15.12	15.12	15.11
20	15.45	15.45	15.45	15.47	15.44	15.45
21	15.37	15.37	15.36	15.37	15.39	15.37
22	15.39	15.39	15.38	15.43	15.40	15.40
23	12.89	12.91	12.87	12.88	12.91	12.89
24	20.26	20.23	20.27	20.26	20.29	20.26
25	17.47	17.48	17.46	17.50	17.51	17.48

26	17.59	17.60	17.61	17.60	17.61	17.60
27	20.57	20.58	20.57	20.57	20.55	20.57
28	19.44	19.43	19.45	19.43	19.43	19.44
29	15.4	15.38	15.35	15.39	15.37	15.38
30	15.18	15.16	15.13	15.17	15.15	15.16
31	16.23	16.26	16.22	16.20	16.27	16.23
32	19.38	19.41	19.40	19.37	19.39	19.39
33	18.15	18.13	18.15	18.14	18.15	18.14
34	16.25	16.22	16.24	16.27	16.27	16.25
35	19.62	19.61	19.59	19.59	19.61	19.61

ตารางที่ ก.5 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุง
ความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมเฉลี่ยเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน

ลูกที่	ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลม (μm)					ค่าเฉลี่ย
	วัดครั้งที่					
	1	2	3	4	5	
1	6.79	6.80	6.78	6.82	6.80	6.80
2	6.4	6.42	6.41	6.40	6.39	6.40
3	7.33	7.29	7.34	7.30	7.34	7.32
4	6.25	6.25	6.23	6.22	6.24	6.24

ตารางที่ ก.6 ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลมของหัวสะพานเทียมที่ได้หลังจากการปรับปรุง
ความเป็นทรงกลมโดยใช้โปรไฟล์ความกลมลำดับก่อนหน้าเป็นโปรไฟล์ความกลมตัวแทน

ลูกที่	ความคลาดเคลื่อนจากความเป็นทรงกลม (μm)					ค่าเฉลี่ย
	วัดครั้งที่					
	1	2	3	4	5	
2	1.97	1.96	2.00	1.94	1.98	1.97
3	2.74	2.75	2.77	2.72	2.73	2.74
4	3.13	3.17	3.12	3.17	3.12	3.14
5	4.08	4.10	4.06	4.11	4.10	4.09
6	4.08	4.05	4.06	4.12	4.11	4.08
7	5.24	5.25	5.22	5.26	5.21	5.24
8	6.5	6.53	6.51	6.49	6.48	6.50
9	3.64	3.68	3.64	3.65	3.66	3.65
10	2.06	2.06	2.04	2.03	2.07	2.05
11	4.32	4.32	4.31	4.35	4.29	4.32
12	3.81	3.78	3.78	3.80	3.81	3.80
13	6.34	6.33	6.38	6.34	6.36	6.35
14	3.61	3.61	3.63	3.61	3.59	3.61
15	4.52	4.55	4.56	4.48	4.53	4.53
16	5.57	5.54	5.60	5.54	5.59	5.57
17	5.95	5.97	5.94	5.97	5.97	5.96
18	5.28	5.30	5.30	5.25	5.30	5.29
19	2.45	2.47	2.47	2.49	2.48	2.47
20	3.74	3.72	3.71	3.74	3.76	3.73
21	4.24	4.23	4.28	4.24	4.26	4.25
22	3.74	3.76	3.74	3.72	3.75	3.74
23	2.45	2.45	2.41	2.42	2.47	2.44
24	3.71	3.69	3.68	3.70	3.73	3.70
25	3.71	3.72	3.72	3.71	3.71	3.72

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวาริช ประสงค์เจริญ เกิดเมื่อวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2531 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2553 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2554

