

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบ และพัฒนากระบวนการผลิตชุดข้อเข่าเทียม และการ
ทดสอบภาคสนาม ปีที่ ๒ (โครงการต่อเนื่อง ๒ ปี)

Design and manufacturing process development of prosthetic
knee joint sets and field test (2nd year of 2 years project)

สัญญาเลขที่ GRB_APS_๑๙_๕๖_๒๑_๐๒
เงินทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วไปรัฐบาล
งบประมาณแผ่นดิน ปีงบประมาณ ๒๕๕๖

โดย
อ.ดร. ชัญญาพันธ์ วิรุพห์ศรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มีนาคม ๒๕๕๗

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาล ประจำปีงบประมาณ 2556 และได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดีในการทดสอบภาคสนามจากโรงพยาบาลทหารผ่านศึก องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก ในพระบรมราชูปถัมภ์

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัยต่อเนื่อง 2 ปี โดยปีแรกของโครงการวิจัยได้เริ่มจากการทดสอบความแข็งแรงของกลไกข้อเข้าเทียมที่ทีมวิจัยได้พัฒนาขึ้นตามแนวทางของมาตรฐานสากล ISO 10328:2006 และได้ออกแบบและพัฒนากระบวนการผลิตข้อต่อและแกนหน้าแข้งของขาเทียมให้มีความแข็งแรง ผลิตได้เองภายในประเทศ สามารถใช้ได้ทั้งกับท่อลุ่มิเนียมนำเข้าที่ผู้พิการใช้อยู่ก่อน และท่อลุ่มิเนียมที่หาซื้อได้ภายในประเทศ จากนั้นจึงได้ทำการออกแบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Jig-Fixture) และออกแบบการผลิตด้วย CAM (Computer-Aided-Manufacturing) ช่วยในการผลิตข้อเข้าของขาเทียมด้วยเครื่องจักร CNC เป็นจำนวน 10 ชุด แล้วนำไปทดสอบภาคสนามกับอาสาสมัครผู้พิการขาขาดเหนือเข่าจากโรงพยาบาลทหารผ่านศึก ผลปรากฏว่ายังสามารถใช้งานได้ดี และไม่พบความเสียหายใดๆ เกิดขึ้น และได้ทำการติดตามผลต่อเนื่องไปยังปีที่ 2 ของโครงการ

งานวิจัยในปีที่ 2 ของโครงการนี้ได้เน้นปรับปรุงและพัฒนากระบวนการผลิตข้อเข้าของขาเทียมที่พัฒนาโดยทีมวิจัยให้สามารถผลิตได้เร็วในปริมาณมากๆ พร้อมทั้งยังคงรักษาคุณภาพของชิ้นงาน โดยเริ่มจากกำหนดค่าความเผื่อสำหรับชิ้นส่วนของข้อเข้าของขาเทียม เพื่อให้การผลิตชิ้นส่วนสามารถทำการผลิตเป็นจำนวนมากๆ และสามารถทดแทนหรือประกอบเข้าด้วยกันได้อย่างเหมาะสมกับ Function ใช้งาน ทุกๆ ชิ้นส่วนที่ทำการผลิต จากนั้นเป็นการปรับปรุงกระบวนการผลิตชิ้นส่วนของข้อเข้าของขาเทียมทุกชิ้น ได้แก่ การปรับปรุงกระบวนการผลิตสลัก (Pin) การปรับปรุงกระบวนการผลิตแผ่นสร้างความหน่วง (Damping Bronze Bushing) การปรับปรุงกระบวนการผลิต Side Cover Plate การปรับปรุงกระบวนการผลิตสปริง และแผนการการปรับปรุงกระบวนการผลิต Case และ Inner body ซึ่งการปรับปรุงการผลิตชิ้นส่วนดังกล่าว ช่วยให้สามารถผลิตชิ้นส่วนในจำนวนมากๆ ให้ได้ค่าความเผื่อตามต้องการ สุดท้ายด้านการทดสอบภาคสนามได้ทำการติดตามผลการทดสอบภาคสนามกับอาสาสมัครทหารผ่านศึกผู้พิการผ่านโรงพยาบาลทหารผ่านศึกจำนวน 10 ราย ต่อเนื่องจากปีแรกอีก 12 เดือนรวมเป็นทดสอบต่อเนื่องทั้งสิ้น 18 เดือน พบว่ากลไกข้อเข้าของขาเทียมยังสามารถใช้งานได้ปกติอยู่ทุกราย

ABSTRACT

This research project is for two years. The first year of the research project was begun with structural testing of the developed prosthetic knee joint according to international standard ISO 10328:2006. Design and manufacturing process of tube adapters set were then developed for strength and can be manufactured locally. The tube adapter set was developed to be used with both imported aluminum tube and aluminum tube that can be purchase within country. After that the jig-fixtures and manufacturing processes with CAM (Computer-Aided-Manufacturing) were designed to manufacture 10 sets of developed prosthetic knee joints with CNC. Amputees from Veterans General Hospital then field tested them. The field test results in the first year showed that they can still be functioned normally and there was no any damage occurred. The follow up processes will then be continued on the second year of the project.

For the second year of the research project, we concentrated on improvement and development of manufacturing processes of developed prosthetic knee joint. The goal is able to be mass-produced while the quality can be preserved.

The tolerance and fit of prosthetic knee joint parts were designed so that a number of parts with mass-production can be replaced or assembled. Moreover, its function can be maintained properly. Subsequently, manufacturing processes of all prosthetic knee joint parts such as pin, damping Bronze Bushing, side Cover Plate case and inner body were developed and improved to be mass production with designed tolerance and fit. Finally, follow up of the field test of 10 Amputees from Veterans General Hospital were continued for 12 months in this second year of the project. The total field tests were then totally 18 months for this project. The field test results showed that they can still be functioned normally for all field test amputees.

สารบัญ

	หน้าที่
1.บทนำ	9
2. ทฤษฎีและปรัทัศน์วรรณกรรม	12
3. การกำหนดค่าความพิกัดความเผื่อสำหรับขึ้นส่วนของข้อเฝ้าของชาเทียม	20
4. การปรับปรุงกระบวนการผลิตขึ้นส่วนของข้อเฝ้าของชาเทียม	22
5. การทดสอบภาคสนาม	38
6. สรุปผลของโครงการวิจัยปี 2	44
7. เอกสารอ้างอิง	44

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าพิ้งค์ดความเผื่อที่นิยมใช้ในระบบ Hole-Basis	18
ตารางที่ 2.2 ค่าพิ้งค์ดความเผื่อที่นิยมใช้ในระบบ Shaft-Basis	19
ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดชิ้นงานหน่วยเป็น μm (จากการสุ่มวัดชิ้นงาน 20 ชิ้น)	24
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของวัสดุสแตนเลส 304 และ 309	35
ตารางที่ 5.1 ข้อมูลอาสาสมัครการทดสอบกลไกข้อเข้าของเทียม	38
ตารางที่ 5.2 ผลการติดตามผลการทดสอบภาคสนาม(ปี 2)	40
ตารางที่ 5.3 ผลการติดตามผลการทดสอบภาคสนาม (ปี 2)	43

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 ข้อเข้าของขาเทียมนำเข้าชนิดหลายจุดหมุน (70,000 บาท)	9
รูปที่ 1.2 ขาเทียมไม้ชนิดแกนหมุนเดียว (20,000-30,000 บาท)	9
รูปที่ 2.1 กลไกข้อเข้าแบบ Active knee joint ที่มีขายในท้องตลาด	12
รูปที่ 2.2 กลไกข้อเข้าแบบ Passive knee joint ที่มีขายในท้องตลาด	12
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างตัวอย่างกลไกข้อเข้าของขาเทียมที่ได้จดสิทธิบัตรในต่างประเทศ	13
รูปที่ 2.4 กลไกข้อเข้าของขาเทียมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย	13
รูปที่ 2.5 ขาเทียมแบบปรับอัตราหมุนซึ่งควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์	14
รูปที่ 2.6 กลไกข้อเข้าเทียมของมูลนิธิขาเทียมฯ	14
รูปที่ 2.7 กลไกข้อเข้าเทียมพัฒนาโดยบริษัท แอสเซียมเมทอล จำกัด ร่วมกับ เนคเทค/สวทช.	14
รูปที่ 2.8 กลไกข้อเข้าเทียมโดยคณะวิศวฯ จุฬาฯ ร่วมกับองค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก	15
รูปที่ 2.9 สวมเผื่อ (Clearance Fit)	16
รูปที่ 2.10 สวมพอดี (Transition Fit)	16
รูปที่ 2.11 สวมอัด (Interference Fit)	16
รูปที่ 2.12 Principal Fits for Bearings ISO System of Limits and Fits	17
รูปที่ 3.1 ชิ้นส่วนหลักและชิ้นส่วนประกอบอื่นๆ ของข้อเข้าเทียมที่ทีมวิจัยได้พัฒนาขึ้น	20
รูปที่ 4.1 เครื่องจักร CNC Swiss Type Lathe	22
รูปที่ 4.2 3 Jaw Chuck	22
รูปที่ 4.3 ลักษณะการกลึงเครื่องกลึง CNC Lathe ทั่วไป	23
รูปที่ 4.4 ลักษณะการกลึงชิ้นงานขนาดเล็กด้วยเครื่องกลึง CNC Swiss Type Lathe	23
รูปที่ 4.5 ตรวจสอบเส้นผ่านศูนย์กลางของสลักที่กลึงได้ด้วยเครื่อง CMM	24
รูปที่ 4.6 แผนภาพกระบวนการเจียรไร้ศูนย์	24
รูปที่ 4.7 วัตถุดิบเพลาทองเหลืองลายเสือ	25
รูปที่ 4.8 วัตถุดิบเพลาทองเหลืองลายเสือที่ผ่านกระบวนการ Groove จนได้เป็นแผ่น	25
รูปที่ 4.9 ระบบถ้วยสุญญากาศ	26
รูปที่ 4.10 การยึดแผ่นทองเหลืองเข้ากับระบบสุญญากาศบนแท่นเครื่องเจียรราบ	26
รูปที่ 4.11 ระบบ Jig Fixture สำหรับยึดแผ่นทองเหลือง	27
รูปที่ 4.12 การยึดแผ่นทองเหลืองเข้ากับระบบ Jig Fixture บนแท่นเครื่องเจียรราบ	27
รูปที่ 4.13 การตัดแผ่นทองเหลืองด้วย Waterjet	27
รูปที่ 4.14 การโปรแกรมการตัดแผ่นทองเหลืองด้วย Waterjet	28
รูปที่ 4.15 Side Cover Plate	28
รูปที่ 4.16 เครื่องขัดเงา Side Cover Plate ด้วยลูกผ้า	28
รูปที่ 4.17 ชิ้นงาน Side Cover Plate ที่ขัดเงาแล้ว	29

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.18 แผ่นสแตนเลสชนิดมันเงา	29
รูปที่ 4.19 Fixture สำหรับจับยึดแผ่นสแตนเลสชนิดมันเงา	29
รูปที่ 4.20 ดอกกัดชนิดคมตัดรูปร่าง Fillet	30
รูปที่ 4.21 Side Cover Plate ขึ้นรูปด้วยแผ่นสแตนเลสชนิดมันเงา	30
รูปที่ 4.22 สปริงแหวนจากรถบรรทุก	31
รูปที่ 4.23 การทดสอบค่าความแข็งแรงของสปริงแหวนด้วยเครื่องดึง Tensile Test Machine	31
รูปที่ 4.24 ชิ้นงานจากวัสดุแหวนที่ใช้ทดสอบ	31
รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบสปริงจากเหล็กแหวน	32
รูปที่ 4.26 รูปแบบ torsional Spring ที่ออกแบบสำหรับข้อเหวี่ยงของขาเทียม	32
รูปที่ 4.27 Finite Element Model	33
รูปที่ 4.28 ผลการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์	33
รูปที่ 4.29 การตัดสปริงตามที่ได้ออกแบบด้วยเครื่อง Waterjet	33
รูปที่ 4.30 สปริงที่ผ่านการตัดด้วย Waterjet และรมดำจนพร้อมใช้งาน	34
รูปที่ 4.31 การเตรียมชิ้นงาน Near Net Shape จากเพลาสแตนเลสสตีลเกรด SS304	34
รูปที่ 4.32 การทดสอบความแข็งแรงของสแตนเลสหล่อ 309 โดยใช้เครื่อง Tensile Test	35
รูปที่ 4.33 ผลการทดสอบสแตนเลสหล่อ 309 ด้วยเครื่อง Tensile Test	36
รูปที่ 4.34 แบบชิ้นงานหล่อสำหรับ case	36
รูปที่ 4.35 แบบชิ้นงานหล่อสำหรับ Inner	37
รูปที่ 5.1 แสดงตัวอย่างกลไกข้อเหวี่ยงที่ผลิตขึ้นจำนวน 10 ชุด พร้อมนำไปทดสอบภาคสนาม	39
รูปที่ 5.2 แสดงตัวอย่างกลไกข้อเหวี่ยงที่ประกอบแล้ว	39
รูปที่ 5.3 แสดงตัวอย่างอาสาสมัครสวมใส่กลไกข้อเหวี่ยงใช้งานในชีวิตประจำวัน	39
รูปที่ 5.4 ตัวอย่างกลไกข้อเหวี่ยงที่ผ่านการใช้งานมาแล้วเป็นระยะเวลา 14 เดือน	41
รูปที่ 5.5 การล็อกสองชั้นเพื่อทำให้สปริงไม่คายตัวขณะใช้งาน	42
รูปที่ 5.6 ตัวอย่างกลไกข้อเหวี่ยงที่ผ่านการใช้งานมาแล้วเป็นระยะเวลา 18 เดือน	42

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันจำนวนผู้พิการขาขาดในประเทศไทยมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น โดยจากสถิติของสำนักงานสถิติแห่งชาติ กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร ปีพ.ศ. 2550 พบว่าจำนวนผู้พิการขาขาด/ด้วนในประเทศไทยมีมากกว่า 70,000 คน [1] แม้ว่าในประเทศไทยจะมีองค์กรหรือมูลนิธิต่างๆ ที่ผลิตขาเทียมบริจาคให้แก่ผู้พิการขาขาด ก็ยังไม่สามารถผลิตขาเทียมได้เพียงพอกับความต้องการของผู้พิการซึ่งมีเป็นจำนวนมาก เช่น มูลนิธิขาเทียมในสมเด็จพระศรีนครินทราบรมราชชนนี สามารถผลิตได้ปีละประมาณ 1,000 ขา ถึงแม้ในไลน์การผลิตของมูลนิธิจะมีเครื่องกลึง และเครื่องจักรมากก็ตาม [2]

ในขาเทียมทุกประเภทนั้นจำเป็นต้องใช้ข้อต่อ และแกนหน้าแข้งของขาเทียม ซึ่งในปัจจุบันหน่วยงานของรัฐ เช่น โรงพยาบาลทหารผ่านศึก ยังคงต้องนำเข้าชุดข้อต่อและแกนหน้าแข้งที่มีคุณภาพจากต่างประเทศอยู่ซึ่งมีราคาแพง โดยชุดข้อต่อและแกนหน้าแข้งที่นำเข้าดังกล่าวจะมีลักษณะประกอบข้อต่อและแกนหน้าแข้งมาเสร็จทั้งชุด ทำให้ต้องตัดอลูมิเนียมหน้าแข้งบางส่วนทิ้งไปให้เข้ากับความสูงของผู้พิการ ซึ่งเป็นการสูญเสียวัสดุทิ้งไปโดยไม่จำเป็น และยังมีราคาแพง



รูปที่ 1.1 ข้อเข้าของ
ขาเทียมนำเข้าชนิดหลาย
จุดหมุน (70,000 บาท)



รูปที่ 1.2 ขาเทียมไม้
ชนิดแกนหมุนเดียว
(20,000-30,000 บาท)

นอกจากนี้กลไกข้อเข้าถือเป็นชิ้นส่วนที่มีบทบาทสำคัญต่อการเดิน คือทำให้การเดินเป็นธรรมชาติและไม่เกิดปัญหาจากการใช้งาน เช่น ผลจากการเสียดสีที่ต่อขา อาการปวดสะโพก เนื่องจากลักษณะการเดินที่ไม่เป็นธรรมชาติ เป็นต้น โดยกลไกข้อเข้าคุณภาพดี (ชนิดหลายจุดศูนย์กลางการหมุน) ที่ใช้ในประเทศไทยนั้น จำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาสูง โดยขาเทียมเนื้อไม้ที่นำเข้าจากต่างประเทศนั้นมีราคาแพง เช่น ข้อเข้าของขาเทียมที่นำเข้าโดยทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 1.1 มีราคาประมาณ 70,000 บาท [3] ทำให้ผู้ด้อยโอกาสในประเทศต้องใช้ขาเทียมที่มีคุณภาพไม่ดีนัก โดยส่วนใหญ่ยังคงเป็นขาเทียมทำด้วยไม้ชนิดแกนหมุนเดียว (Single-axis) ตามรูปที่ 1.2 โดยมีอายุใช้งานสั้น น้ำหนักสูงมาก เสถียรภาพไม่ดี และทำให้ผู้สวมใส่มีลักษณะการเดินผิดธรรมชาติทำให้เกิดอาการแทรกซ้อนตามมา เช่น อาการปวด

หลัง ปวดสะโพก หรือเป็นข้อเข้าของขาเทียมชนิดหลายจุดศูนย์กลาง แต่วัสดุที่ใช้ยังคงทำด้วย อลูมิเนียม ซึ่งไม่มีความคงทน

ด้วยเหตุนี้ทีมวิจัยห้องปฏิบัติการ Biomechanical Design and Manufacturing ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ร่วมกับองค์การสงเคราะห์ทหาร ผ่านศึก ในพระบรมราชูปถัมภ์ จึงได้พัฒนากลไกข้อเข้าของขาเทียม โดยได้รับการสนับสนุนจากมูลนิธิ ส่งเสริมนวัตกรรมวิศวกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งกลไกข้อเข้าของขาเทียมดังกล่าวมีจุดเด่น ดังนี้

- 1) กลไกข้อเข้าเป็นชนิดหลายจุดศูนย์กลางหมุน (Polycentric Knee Joint) ซึ่งส่งผลให้การ เคลื่อนที่ของข้อเข้าหรือการเดินของผู้พิการเหมือนธรรมชาติ
- 2) เป็นกลไกที่ออกแบบใหม่ต่างจากกลไกข้อเข้าที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน กล่าวคือลักษณะของข้อต่อ เป็นแบบข้อต่อเคลื่อนที่ในเชิงเส้น (Prismatic Joint) จึงทำให้มีชิ้นส่วนหลัก (Linkage) ของ กลไกเหลือน้อยเพียง 2 ชิ้น และชิ้นส่วนประกอบอื่นๆจำนวนน้อย ส่งผลให้ง่ายต่อการผลิต และบำรุงรักษา
- 3) วัสดุทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ต้นทุนการผลิตต่ำเพียง 10,000 บาท ในขณะที่ข้อเข้าเทียมรุ่นคุณภาพใกล้เคียงกันที่นำเข้าจากต่างประเทศราคาสูงกว่ามาก ประมาณ 70,000 บาท

โครงการวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาชุดขาเทียมให้สามารถผลิต และใช้วัสดุที่หาได้ ภายในประเทศ โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วนคือ

- 1) ส่วนของข้อต่อ และแกนหน้าแข้งของขาเทียม จะทำการออกแบบและพัฒนากระบวนการผลิต ข้อต่อและแกนหน้าแข้งให้มีความแข็งแรงผลิตได้เองภายในประเทศ และสามารถใช้ได้ทั้งกับท่อ อลูมิเนียมนำเข้าที่ผู้พิการใช้อยู่ก่อน และท่ออลูมิเนียมที่หาได้ในประเทศ
- 2) ส่วนของข้อเข้าของขาเทียม จะนำกลไกข้อเข้าแบบใหม่ ที่ได้พัฒนาขึ้นเองโดยทีมวิจัยตามหลัก วิศวกรรมและเวชศาสตร์ฟื้นฟู [4,5] และผ่านการทดลองทดสอบตามมาตรฐานสากลแล้ว มา ทดสอบภาคสนามและปรับปรุงแบบจนมั่นใจ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 ผลิตข้อเข้าของขาเทียมที่ได้ออกแบบและทดสอบตามมาตรฐานสากลเรียบร้อยแล้ว เพื่อ ทำการทดสอบภาคสนามกับอาสาสมัครผู้พิการขาขาดเหนือเข่า และติดตามผล
- 1.2.2 เพื่อออกแบบและพัฒนากระบวนการผลิตข้อต่อและแกนหน้าแข้งของขาเทียมให้มีความ แข็งแรงผลิตได้เองภายในประเทศ

1.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 13.1 ติดตามผลทดสอบภาคสนามต่อเนื่องในปีที่ 2 กับผู้พิการชาชาตเหนือเขาอาสามัครที่ได้เข้าร่วมโครงการเพื่อทดสอบในปีที่ 1 ทุกๆ 4 เดือน 3 ครั้ง รวมเป็นระยะเวลา 1ปี
- 13.2 ออกแบบขบวนการผลิตกลไกข้อเข้าของขาเทียมที่พัฒนาขึ้นจากทีมวิจัย (ออกแบบชิ้นงานหล่อ (Casting) สร้าง Jig & Fixture) พร้อมทั้งประยุกต์ใช้เครื่องเจียราบ เครื่องตัด Water Jet ร่วมกับการใช้เครื่องจักร CNC และเครื่องยิงทราย เพื่อปรับปรุงและพัฒนาขบวนการผลิตให้สามารถผลิตได้เร็วในปริมาณมากๆ พร้อมทั้งยังคงรักษาคุณภาพของชิ้นงาน
- 13.3 ทดลองขบวนการผลิตกลไกข้อเข้าของขาเทียมที่พัฒนาขึ้นจากทีมวิจัย
- 13.4 ศึกษาประสิทธิภาพ ได้แก่ ความเร็ว ความแม่นยำ (Precision) ในขบวนการผลิตกลไกข้อเข้าของขาเทียมที่ได้ออกแบบ และทำการปรับปรุงพัฒนาขบวนการผลิตให้ดีขึ้นในด้านคุณภาพและความเร็วในการผลิต

2. ทฤษฎีและปริทัศน์วรรณกรรม

2.1 กลไกข้อเข่าเทียม

ข้อเข่าเทียมถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลายาวนานจากลักษณะของข้อที่เพียงเหมือนข้อพับ (Hinge joint) ธรรมดา หรือเรียกว่ากลไกชนิดแกนหมุนเดียว (Single-axis) เมื่อก่อนสงครามโลกครั้งที่ 1 คือเป็นข้อที่รับน้ำหนักตัวได้ งอ-เหยียด เดินได้ แต่จังหวะความเร็วของการเดินมีเพียงจังหวะเดียว (One cadence) มาเป็นข้อที่มีความปลอดภัยสูงคือ ไม่งอพับได้ง่ายในช่วงแรกของ Stance phase ซึ่งเรียกว่า Safety knee ซึ่งจะใช้พิจารณาเป็นหลักในที่นี้ กลไกที่มีอยู่ในปัจจุบันจะสามารถแบ่งออกเป็นประเภทหลักๆได้ 2 ประเภท คือ กลไกที่มีระบบไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้อง (Passive knee joint mechanism) และกลไกที่เป็นระบบทางกลเพียงอย่างเดียว (Active knee joint mechanism) โดยที่กลไก Passive knee joint นั้นจะมีระบบอิเล็กทรอนิกส์ช่วยในการควบคุมการเคลื่อนไหวซึ่งสามารถให้อิสระในการการเคลื่อนที่ของผู้ใช้ได้มากกว่ากลไกแบบ Active ยกตัวอย่างเช่น การเดินบนพื้นต่างระดับ การขึ้นลงบันได รวมถึงการออกกำลังกายเล่นกีฬา เป็นต้น ซึ่งทำให้ราคาของ Passive knee joint ที่ช่วยให้ผู้ใช้สามารถทำกิจกรรมได้หลากหลายมากขึ้นนั้นสูงมากขึ้นไปตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามลักษณะของกลไกใน Passive knee joint นั้นยังเป็นแบบแกนหมุนเดียวอยู่ ดังรูปที่ 2.1 สำหรับ Active knee joint แล้วมีการออกแบบทั้งแกนหมุนเดียว (Single Axis) และหลายแกนหมุน (Polycentric Knee Joint) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 กลไกข้อเข่าแบบ Active knee joint ที่มีขายในท้องตลาด [3], [6]

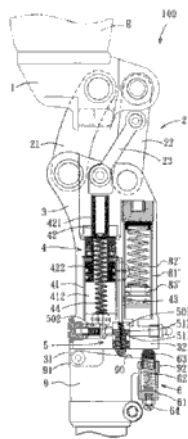


รูปที่ 2.2 กลไกข้อเข่าแบบ Passive knee joint ที่มีขายในท้องตลาด [3], [6]

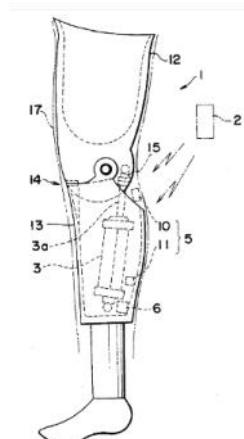
สำหรับกลไกหลายแกนหมุน (Polycentric Knee Joint) ที่มีขายในท้องตลาดปัจจุบันนั้น นิยมเป็นแบบ Four-bar linkage หรือ Six-bar linkage เพราะนอกจากให้เส้นทางการเคลื่อนที่คล้าย

ธรรมชาติแล้ว ยังให้มุมข้อง่า (Knee flexion angle) ที่ค่อนข้างมาก มีความมั่นคง มีเสถียรภาพที่ดี และให้การเดินที่เป็นธรรมชาติ โดยจะสามารถงอได้ประมาณ 160-170 องศา บางแบบมีระบบของไหลสำหรับปรับค่าความหน่วงในระหว่างการดีดกลับของกลไกข้อ ข้อดีอีกข้อสำหรับกลไกหลายแกนหมุนคือในจังหวะ Swing phase จะมีช่องว่างระหว่างพื้นและเท้ามากขึ้นทำให้ลดโอกาสที่จะทำให้ผู้ใช้สะดุดหกล้มเนื่องจากสะดุดสิ่งกีด

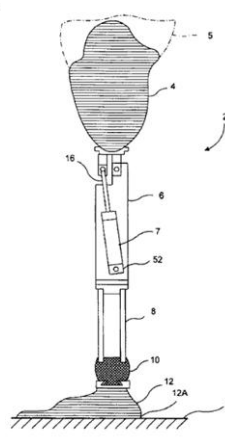
อย่างไรก็ตามกลไกข้อเข่าของขาเทียมชนิดหลายจุดศูนย์กลาง (Polycentric knee joint) ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันก็ยังคงมีส่วนประกอบหลายชิ้นดังแสดงในรูปที่ 2.3 [7-9] ซึ่งแสดงตัวอย่างกลไกข้อเข่าของขาเทียมที่ได้จดสิทธิบัตรในต่างประเทศ ตัวกลไกมีความซับซ้อน มีชิ้นส่วนที่ต้องประกอบจำนวนมากหากต้องผลิตขึ้นใช้เอง และยากต่อการซ่อมแซมบำรุงรักษา จะเห็นได้ว่ากลไกข้อเข่าเทียมที่มีขายในท้องตลาดนั้นแม้จะมีให้เลือกหลากหลายตามความเหมาะสมของการทำงานของผู้ใช้แต่ละคน แต่ในส่วนของราคานั้นมีราคาที่สูงมาก ซึ่งเป็นปัญหาของผู้พิการที่ขาดโอกาสในประเทศอย่างมาก ส่วนขาเทียมเหนือเข่าในประเทศไทยที่มีคุณภาพ หรือข้อเข่าของขาเทียมโดยทั่วไปที่นำเข้าจากต่างประเทศนั้นมีราคาแพง เช่น ข้อเข่าของขาเทียมที่นำเข้าจากต่างประเทศดังรูปที่ 2.4 มีราคาประมาณ 70,000 บาท [3]



รูปที่ 2.3a [7]

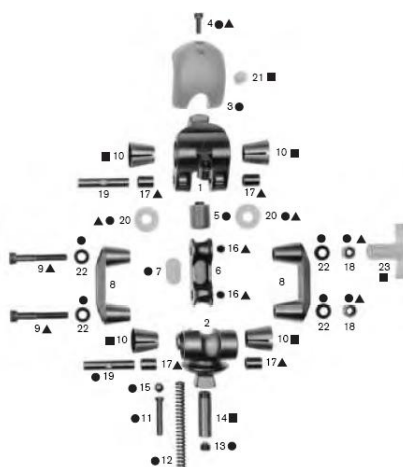


รูปที่ 2.3b [8]



รูปที่ 2.3c [9]

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างตัวอย่างกลไกข้อเข่าของขาเทียมที่ได้จดสิทธิบัตรในต่างประเทศ



รูปที่ 2.4 กลไกข้อเข่าของขาเทียมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย [3]

สำหรับงานวิจัยในประเทศที่เกี่ยวกับขาเทียมนั้นมีจำนวนไม่มาก ตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ ดร.ชิต และคณะ เรื่องขาเทียมสำหรับคนพิการแบบปรับอัตราหมุนได้ [10] ซึ่งเป็นกลไกแบบแกนหมุนเดียว แต่ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์เข้ามาควบคุมการปรับอัตราหมุน ร่วมกับการใช้สปริง ซึ่งจะทำให้สามารถตอบสนองการเดินได้ในจังหวะความเร็วเดินที่หลากหลาย แต่อาจไม่เหมาะสมกับการใช้งานในสภาพที่รุดันดาร โดยกลไกมีรูปแสดงลักษณะของกลไกข้อเข่าดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ขาเทียมแบบปรับอัตราหมุนซึ่งควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์

กลไกข้อเข่าเทียมของมูลนิธิขาเทียม ในสมเด็จพระศรีนครินทราบรมราชชนนี [2] จะเป็นกลไกชนิดหลายแกนหมุน (Polycentric Knee Joint) แบบ Four-bar linkage ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กลไกข้อเข่าเทียมของมูลนิธิขาเทียม

กลไกข้อเข่าเทียมซึ่งพัฒนาโดยบริษัท แอสเซียมเมทอล จำกัด ร่วมกับ เนคเทค/สวทช. [11] เป็นกลไกชนิดหลายแกนหมุน (Polycentric Knee Joint) แบบ Four-bar linkage ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กลไกข้อเข่าเทียมพัฒนาโดยบริษัท แอสเซียมเมทอล จำกัด ร่วมกับ เนคเทค/สวทช.

แนวโน้มการพัฒนากลไกข้อเข้าเทียมทางในด้านความเรียบง่ายของกลไกแต่ยังคงใช้งานได้
 อย่างเป็นธรรมชาติและไม่สร้างอาการบาดเจ็บให้กับผู้ใช้ซึ่งน่าจะเหมาะกับประเทศไทยยังไม่ค่อยมี
 ปรากฏให้เห็นนัก อย่างไรก็ตามทีมวิจัยห้องปฏิบัติการ Biomechanical Design and
 Manufacturing ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 ร่วมกับองค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก ในพระบรมราชูปถัมภ์ จึงได้พัฒนากลไกข้อเข้าของขา
 (Prismatic Joint) จึงทำให้มีชิ้นส่วนหลัก (Linkage) ของกลไกเหลือน้อยเพียง 2 ชิ้น และชิ้นส่วน
 ประกอบอื่นๆจำนวนน้อย ส่งผลให้กลไกมีความเรียบง่าย ง่ายต่อการผลิตและบำรุงรักษา ดังแสดงใน
 รูปที่ 2.8 อย่างไรก็ตามหากได้ผ่านการทดสอบภาคสนามเพิ่มเติม จะช่วยให้กลไกดังกล่าว ซึ่งเป็น
 กลไกที่ออกแบบใหม่ และมีรูปแบบที่ไม่เหมือนกับกลไกอื่นๆ พบข้อควรแก้ไขและพัฒนาเพิ่มเติม
 ตลอดจนสร้างความมั่นใจให้แก่ผู้ใช้ในการนำไปใช้งานจริงได้ยิ่งขึ้น



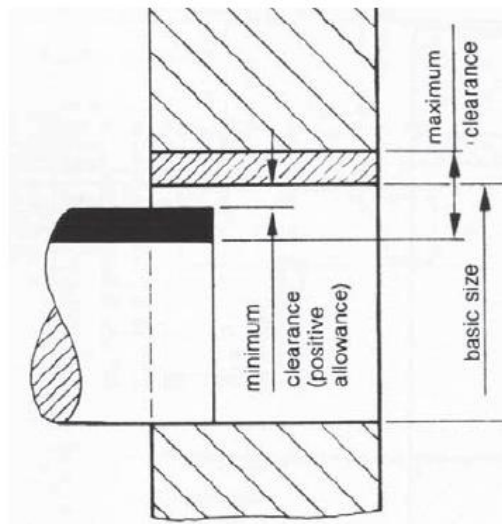
รูปที่ 2.8 กลไกข้อเข้าเทียมโดยคณะวิชา จุฬาฯ ร่วมกับองค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก

2.2 ค่าพิกัดความเผื่อ (Tolerance) [13]

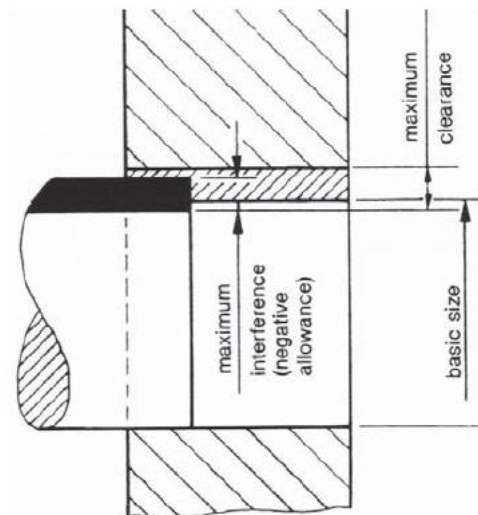
ปัจจุบัน กระบวนการผลิตชิ้นส่วน และผลิตภัณฑ์ต่างๆ จำเป็นต้องมีการนำชิ้นส่วนหลายชิ้น
 มาประกอบเข้าด้วยกัน สำหรับชิ้นงานที่ต้องมีการประกอบเข้าด้วยกัน ขนาดและรูปร่างของชิ้นส่วน
 แต่ละชิ้นมีความสำคัญต่อการใช้งานร่วมกันของชิ้นงาน แต่เนื่องจากการผลิตชิ้นงานจำนวนมากๆ นั้น
 เราไม่สามารถผลิตชิ้นงานได้ตรงพอดีกับค่าที่ต้องการได้ทุกชิ้น ดังนั้นจึงมีการกำหนดพิกัดความเผื่อ
 ของขนาดที่ยอมรับได้จากการผลิต เช่น ขนาดไม่ต่ำกว่าเท่าใดและไม่มากกว่าเท่าใด ซึ่งเรียกว่าค่าพิกัด
 ความเผื่อ การให้ขนาดความเผื่อนี้เมื่อใช้ถูกต้องจะทำให้ได้ชิ้นงานประกอบที่ใช้งานได้ดี โดยพิกัด
 ความเผื่อของขนาดนั้นนิยมใช้กับชิ้นงานที่ต้องสวมเข้าด้วยกัน เช่น เพลา (Shaft) และรู (hole)

2.2.1 ความพอดีในการสวม (Fit)

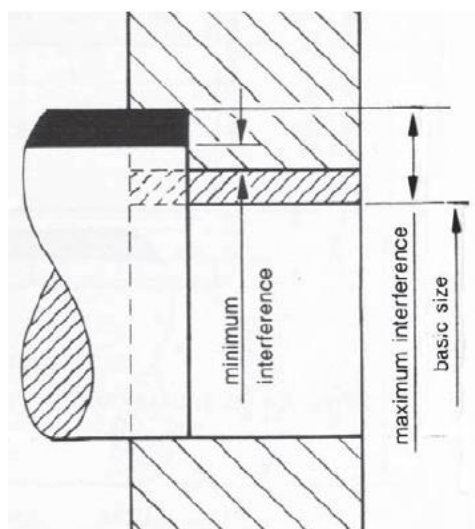
เมื่อชิ้นส่วนสองชิ้นนำมาประกอบกันเช่นเพลากับรู ความแตกต่างของขนาดระหว่างชิ้นส่วน
 ทั้งสองจะเรียกว่าความพอดีในการสวม เราสามารถแบ่งความพอดีในการสวมออกได้เป็นสามแบบคือ
 1. สวมคลอน (Clearance Fit) หมายถึงความเผื่อในการสวมที่ขนาดใหญ่สุดของเพลา มีค่าน้อยกว่า
 ขนาดเล็กสุดของรู 2. สวมพอดี (Transition Fit) หมายถึงความเผื่อในการสวมที่ขนาดใหญ่สุดของ
 เพลา มีค่ามากกว่าขนาดเล็กสุดของรูและขนาดเล็กสุดของเพลา มีค่าน้อยกว่าขนาดใหญ่สุดของรู 3.
 สวมอัด (Interference Fit) หมายถึงความเผื่อในการสวมที่ขนาดเล็กสุดของเพลา มีค่ามากกว่าขนาด
 ใหญ่สุดของรู ดังแสดงในรูปที่ 2.9 - 2.11 ตามลำดับ



รูปที่ 2.9 สวมเผื่อ (Clearance Fit)



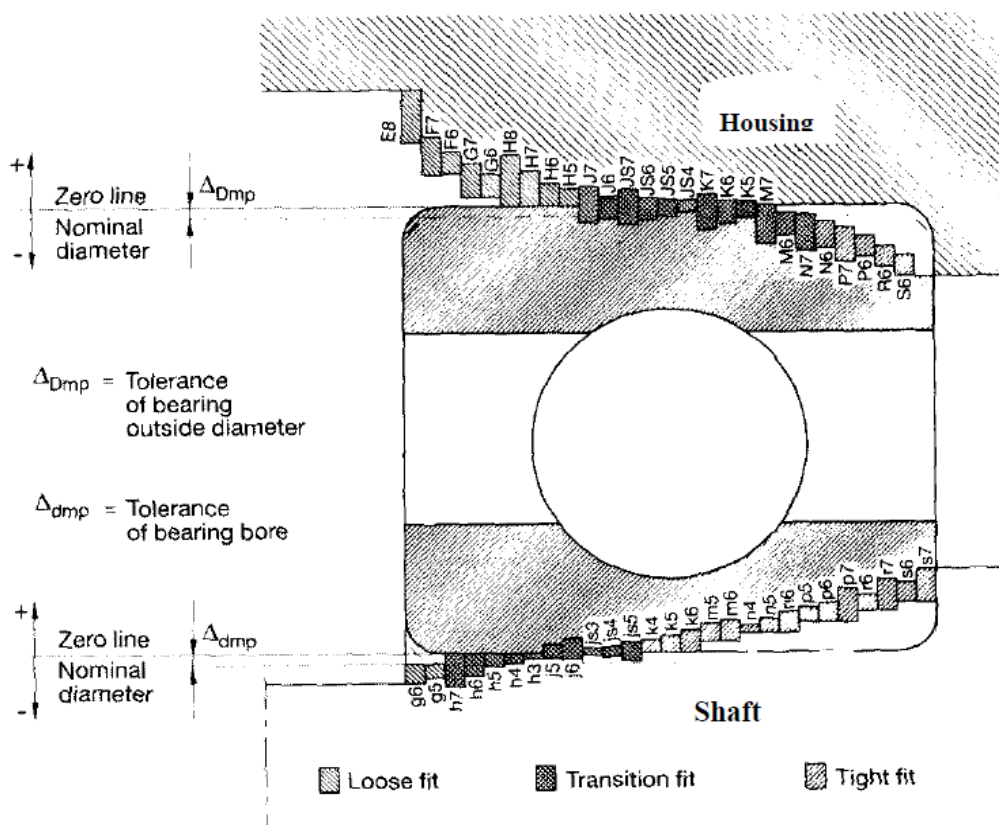
รูปที่ 2.10 สวมพอดี (Transition Fit)



รูปที่ 2.11 สวมอัด (Interference Fit)

2.2.2 มาตรฐานสำหรับระบบพิกัดงานสวมที่เหมาะสม

มาตรฐานสำหรับระบบพิกัดงานสวมที่เหมาะสม ได้แก่ BS 4500, ISO 286 –1, AS 1654 ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งประกอบไปด้วย tolerance zones พื้นฐานต่างๆ ซึ่งเหมาะกับการระบุงานสวมที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.12 Principal Fits for Bearings ISO System of Limits and Fits [14]

2.2.3 ระบบงานสวม

ระบบงานสวมของชิ้นส่วนที่ใช้ประกอบเข้าด้วยกันจำเป็นต้องให้ ชิ้นส่วนชิ้นใดชิ้นหนึ่งเป็นหลัก จากนั้นค่อยปรับชิ้นส่วนอีกชิ้นเพื่อให้สามารถสวมกันได้ ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ งานสวมระบบ Hole-Basis และงานสวมระบบ Shaft-Basis

2.2.3.1 งานสวมระบบ Hole-Basis งานสวมระบบนี้จะต้องกำหนดให้รูคงที่ ซึ่งรูมีพิสัยความเผื่อแสดงด้วยตัวอักษรใหญ่เช่น H เมื่อสวมกับเพลามีพิสัยความเผื่อจาก a ถึง h จะเป็นงานคลอน จาก j ถึง n จะเป็นงานสวมพอดี และจาก p ถึง z จะเป็นงานสวมอัด ดังแสดงค่าพิสัยความเผื่อที่นิยมใช้ในระบบ Hole-Basis ในตารางที่ 2.1

2.2.3.2 งานสวมระบบ Shaft-Basis งานสวมระบบนี้จะต้องกำหนดให้เพลาคงที่ ซึ่งเพลามีพิสัยความเผื่อแสดงด้วยตัวอักษรเล็กเช่น h เมื่อสวมรูคว้านพิสัยความเผื่อจาก A ถึง H จะเป็นงานสวมคลอน จาก J ถึง N จะเป็นงานสวมพอดี และจาก P ถึง Z จะเป็นงานสวมอัด ดังแสดงค่าพิสัยความเผื่อที่นิยมใช้ในระบบ Hole-Basis ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1: ค่าพิสัยความเผื่อที่นิยมใช้ในระบบ Hole-Basis

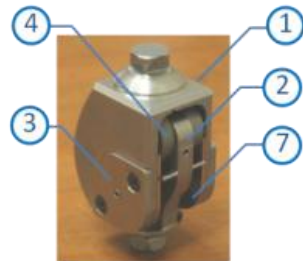
		Clearance						Transition		Interference											
Basic size		H11	H9	H9	H8	H7	H7	H7	n6	p6	s6										
Tolerance unit = 0.001mm		c11	d10	e9	f7	g6	h6	k6	H7	H7	H7										
Basic sizes (mm)		H11-c11		H9-d10		H9-e9		H8-f7		H7-g6		H7-h6		H7-k6		H7-n6		H7-p6		H7-s6	
over	to																				
0	3	+60 -60 0 -120		+25 -20 0 -60		+25 -14 0 -39		+14 -6 0 -16		+10 -2 0 -8		+10 0 0 -6		+10 +6 0 0		+10 +10 0 +4		+10 +12 0 +6		+10 +20 0 +14	
3	6	+75 -70 0 -145		+30 -30 0 -78		+30 -20 0 -50		+18 -10 0 -28		+12 -4 0 -12		+12 0 0 -8		+12 +9 0 +1		+12 +16 0 +8		+12 +20 0 +12		+12 +27 0 +19	
6	10	+90 -80 0 -170		+36 -40 0 -98		+38 -25 0 -61		+22 -13 0 -28		+15 -5 0 -14		+15 0 0 -9		+15 +10 0 +1		+15 +19 0 +10		+15 +24 0 +15		+15 +32 0 +23	
10	18	+110 -95 0 -205		+43 -50 0 -120		+43 -32 0 -75		+27 -16 0 -34		+18 -6 0 -17		+18 0 0 -11		+18 +12 0 +1		+18 +23 0 +12		+18 +29 0 +18		+18 +39 0 +28	
18	30	+130 -110 0 -240		+52 -65 0 -149		+52 -40 0 -92		+33 -20 0 -41		+21 -7 0 -20		+21 0 0 -13		+21 +15 0 +2		+21 +28 0 +15		+21 +35 0 +22		+21 +48 0 +35	
30	40	+160 -120 0 -280		+62 -80 0 -180		+62 -50 0 -112		+39 -25 0 -50		+25 -9 0 -25		+25 0 0 -16		+25 +18 0 +2		+25 +33 0 +17		+25 +42 0 +26		+25 +59 0 +43	
40	50	0 -130 -290																			
50	65	+190 -140 -330		+74 -100 0 -220		+74 -60 0 -134		+46 -30 0 -60		+30 -10 0 -29		+30 0 0 -19		+30 +21 0 +2		+30 +39 0 +20		+30 +51 0 +32		+30 +72 +53	
65	80	0 -150 -340																		+78 +59	
80	100	+220 -170 -390		+87 -120 0 -260		+87 -72 0 -159		+54 -36 0 -71		+35 -12 0 -34		+35 0 0 -22		+35 +25 0 +3		+35 +45 0 +23		+35 +59 0 +37		+35 +93 +101	
100	120	0 -180 -400																		+79 +109	
120	140	+250 -200 -450		+100 -145 0 -305		+100 -84 0 -185		+63 -43 0 -83		+40 -14 0 -39		+40 0 0 -25		+40 +28 0 +3		+40 +52 0 +27		+40 +68 0 +43		+40 +117 +92	
140	160	0 -210 -460																		+125 +100	
160	180	0 -230 -480																		+133 +108	
180	200	+290 -240 -530		+115 -170 0 -355		+115 -100 0 -215		+72 -50 0 -96		+46 -15 0 -44		+46 0 0 -29		+46 +33 0 +4		+46 +60 0 +31		+46 +79 0 +50		+46 +151 +122	
200	225	0 -260 -550																		+159 +130	
225	250	0 -280 -570																		+169 +140	
250	280	+320 -300 -620		+130 -190 0 -400		+130 -110 0 -240		+81 -56 0 -108		+52 -17 0 -49		+52 0 0 -32		+52 +36 0 +4		+52 +66 0 +34		+52 +88 0 +56		+52 +190 +158	
280	315	0 -330 -650																		+202 +170	
315	355	+360 -360 -720		+140 -210 0 -440		+140 -125 0 -265		+89 -62 0 -119		+57 -18 0 -54		+57 0 0 -36		+57 +40 0 +4		+57 +73 0 +37		+57 +98 0 +62		+57 +226 +190	
355	400	0 -400 -760																		+244 +208	
400	450	+400 -440 -840		+155 -230 0 -480		+155 -135 0 -290		+97 -68 0 -131		+63 -20 0 -60		+63 0 0 -40		+63 +45 0 +5		+63 +80 0 +40		+63 +108 0 +68		+63 +272 +232	
450	500	0 -480 -880																		+292 +252	

ตารางที่ 2.2: ค่าพิสัยความเผื่อที่นิยมใช้ในระบบ Shaft-Basis

		Clearance						Transition		Interference	
		C11	D10	E9	F8	G7	H7	K7	N7	h6	h6
Basic size		h11	h9	h9	h7	h6	h6	h6	N7	h6	S7
Tolerance unit = 0.001mm		Coarse tolerance	Loose running fit		Normal running	Precision running, location	Average location	Light push fit		Press fit (ferrous)	Heavy press fit (non-ferrous)
Basic sizes (mm)		C11-h11	D10-h9	E9-h9	F8-h7	G7-h6	H7-h6	K7-h6	N7-h6	P7-h6	S7-h6
over	to										
0	3	+120 0 +60 -60	+60 0 +20 -25	+39 0 +14 -25	+20 0 +6 -10	+12 0 +2 -6	+10 0 0 -6	0 0 -10 -6	-4 0 -14 -6	-6 0 -16 -6	-14 0 -24 -6
3	6	+145 0 +70 -75	+78 0 +30 -30	+50 0 +20 -30	+28 0 +10 -12	+16 0 +4 -8	+12 0 0 -8	+3 0 -9 -8	-4 0 -16 -8	-8 0 -20 -8	-15 0 -27 -8
6	10	+170 0 +80 -90	+98 0 +40 -36	+61 0 +25 -36	+35 0 +13 -15	+20 0 +5 -9	+15 0 0 -9	+5 0 -10 -9	-4 0 -19 -9	-9 0 -24 -9	-17 0 -32 -9
10	18	+205 0 +95 -110	+120 0 +50 -43	+75 0 +32 -43	+43 0 +16 -18	+24 0 +6 -11	+18 0 0 -11	+6 0 -12 -11	-5 0 -23 -11	-11 0 -29 -11	-21 0 -39 -11
18	30	+240 0 +110 -130	+149 0 +65 -52	+92 0 +40 -52	+53 0 +20 -21	+28 0 +7 -13	+21 0 0 -13	+6 0 -15 -13	-7 0 -28 -13	-14 0 -35 -13	-27 0 -48 -13
30	40	+280 0 +120 -160	+180 0 +80 -62	+112 0 +50 -62	+64 0 +25 -25	+34 0 +9 -16	+25 0 0 -16	+7 0 -18 -16	-8 0 -33 -16	-17 0 -42 -16	-34 0 -59 -16
40	50	+290 0 +130 -160									
50	65	+330 0 +140 -190	+220 0 +100 -74	+134 0 +60 -74	+76 0 +30 -30	+40 0 +10 -19	+30 0 0 -19	+9 0 -21 -19	-9 0 -39 -19	-21 0 -51 -19	-42 0 -72 -19
65	80	+340 0 +150 -190									-48 0 -78 -19
80	100	+390 0 +170 -220	+260 0 +120 -87	+159 0 +72 -87	+90 0 +36 -35	+47 0 +12 -22	+35 0 0 -22	+10 0 -25 -22	-10 0 -45 -22	-24 0 -59 -22	-58 0 -93 -22
100	120	+400 0 +180 -220									-66 0 -101 -22
120	140	+450 0 +200 -250									-77 0 -117 -25
140	160	+460 0 +210 -250	+305 0 +145 -100	+185 0 +85 -100	+106 0 +43 -40	+54 0 +14 -25	+40 0 0 -25	+12 0 -28 -25	-12 0 -52 -25	-28 0 -68 -25	-85 0 -125 -25
160	180	+480 0 +230 -250									-93 0 -133 -25
180	200	+530 0 +240 -290									-105 0 -151 -29
200	225	+550 0 +260 -290	+355 0 +170 -115	+215 0 +100 -115	+122 0 +50 -46	+61 0 +15 -29	+46 0 0 -29	+13 0 -33 -29	-14 0 -60 -29	-33 0 -79 -29	-113 0 -159 -29
225	250	+570 0 +280 -290									-123 0 -169 -29
250	280	+620 0 +300 -320	+400 0 +190 -130	+240 0 +110 -130	+137 0 +56 -52	+62 0 +17 -32	+52 0 0 -32	+16 0 -36 -32	-14 0 -66 -32	-36 0 -88 -32	-138 0 -190 -32
280	315	+650 0 +330 -320									-150 0 -202 -32
315	355	+720 0 +360 -360	+440 0 +210 -140	+265 0 +125 -140	+151 0 +62 -57	+75 0 +18 -36	+57 0 0 -36	+17 0 -40 -36	-16 0 -73 -36	-41 0 -98 -36	-169 0 -226 -36
355	400	+760 0 +400 -360									-187 0 -244 -36
400	450	+840 0 +440 -400	+480 0 +230 -155	+290 0 +135 -155	+165 0 +68 -63	+83 0 +20 -40	+63 0 0 -40	+18 0 -45 -40	-17 0 -80 -40	-48 0 -108 -40	-209 0 -272 -40
450	500	+880 0 +480 -400									-229 0 -292 -40

3. การกำหนดค่าความเผื่อสำหรับชิ้นส่วนของข้อเข้าของขาเทียม

ข้อเข้าเทียมที่ทีมวิจัยได้พัฒนาขึ้นนั้น ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลัก (Linkage) ของกลไก 2 ชิ้น ได้แก่ ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลักชิ้นนอก (Case, No.1) และ ชิ้นส่วนหลักชิ้นใน (Inner Body, No.2) และชิ้นส่วนประกอบอื่นๆ ดังแสดงด้วย No.3 ถึง No.8 ดังแสดงในรูปที่ 3.1



No.	Item	Qty.
1	Case	1
2	Inner Body	1
3	Side Cover Plate	2
4	Spring	2
5	Spring Shaft	1
6	Spring for Adjust Damping	1
7	Damping Bronze Bushing	2
8	Pin	2

รูปที่ 3.1 ชิ้นส่วนหลักและชิ้นส่วนประกอบอื่นๆ ของข้อเข้าเทียมที่ทีมวิจัยได้พัฒนาขึ้น

ชิ้นส่วนหลักชิ้นนอก ชิ้นส่วนหลักชิ้นใน และแผ่นปิดด้านข้าง (Case, Inner Body, Side Cover Plate) เหล่านี้สำหรับสปริง (Spring Shaft) ทำจาก Stainless Steel 304 ชิ้นส่วนสปริง และแผ่นสปริงสำหรับปรับความหน่วง (Spring, Spring for Adjust Damping) ทำจากเหล็กสปริง แผ่นสร้างความหน่วง (Damping Bronze Bushing) ทำจากทองเหลืองลายเสือ และสลัก (Pin) ทำจากเหล็กแข็งสีฟ้า (SCM440)

เพื่อให้การผลิตชิ้นส่วนหลักและชิ้นส่วนประกอบอื่นๆ ดังกล่าวข้างต้น สามารถทำการผลิตเป็นจำนวนมากๆ และสามารถประกอบเข้าด้วยกันได้อย่างเหมาะสมกับ Function การใช้งาน ทุกๆ ชิ้นส่วนที่ทำการผลิต ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดพิถีพิถันความเผื่อของขนาดที่ยอมรับได้จากการผลิตของชิ้นส่วนที่มีการสวมประกอบกันซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การกำหนดค่าความเผื่อสำหรับสลัก (Pin) และ Slot ของชิ้นส่วนหลักชิ้นใน

ชิ้นส่วนสลัก (No.8 ในรูปที่ 3.1) ที่ต้องประกอบเข้ากับชิ้นส่วนหลักชิ้นใน (Inner Body) ถือเป็นชิ้นส่วนสำคัญของกลไก เนื่องจากสลักจะต้องกลิ้งและไถลไปใน Slot ของชิ้นส่วนหลักชิ้นในตลอด โดยลักษณะการเคลื่อนที่จะเป็นแบบ Close Running Fit (Fit for running on accurate machines and for accurate location at moderate speeds and journal pressures) ซึ่งการสวมจะต้องไม่หลวมจนเกินไปจนกระทั่งทำให้กลไกคลอนระหว่างเคลื่อนไหว และไม่แน่นจนเกินไปจนกระทั่งกลไกเคลื่อนไหวผิด จึงเลือกใช้ระบบ Hole-Basis ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู Slot เท่ากับ 8 มม. และเป็น Clearance Fit H8/f7 จากตารางที่ 2.1 ในบทที่ 2 จึงทำให้ได้ขนาดค่าความเผื่อ

สำหรับสลักเป็น 8 mm $\begin{matrix} -13 \mu\text{m} \\ -28 \mu\text{m} \end{matrix}$ และขนาดขนาดค่าความเผื่อสำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางรู Slot เป็น 8 mm $\begin{matrix} +22 \mu\text{m} \\ +0 \mu\text{m} \end{matrix}$

3.2 การกำหนดค่าความเผื่อสำหรับความหนาของชิ้นส่วนหลักชิ้นนอก (Case) ชิ้นส่วนหลักชิ้นใน (Inner Body) และแผ่นสร้างความหน่วง (Damping Bronze Bushing)

ชิ้นส่วนหลักชิ้นใน (No.2 ในรูปที่ 3.1) แผ่นสร้างความหน่วง 2 แผ่น (No.7 ในรูปที่ 3.1) จะต้องประกบเข้าด้วยกันก่อนที่จะสวมเข้าไปในช่องของชิ้นส่วนหลักชิ้นนอก (No.1 ในรูปที่ 3.1) ดังแสดงในรูปที่ 3.1

โดยลักษณะการเคลื่อนที่จะเป็นแบบ Close Running Fit (Fit for running on accurate machines and for accurate location at moderate speeds and journal pressures) ซึ่งการสวมจะต้องไม่หลวมจนเกินไปจนกระทั่งทำให้กลไกคลอนระหว่างเคลื่อนไหว และไม่แน่นจนเกินไปจนกระทั่งกลไกเคลื่อนไหวฝืด จึงเลือกใช้ระบบ Hole-Basis ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องชิ้นส่วนหลักชิ้นนอก เท่ากับ 30 มม. และเป็น Clearance Fit H8/f7 จากตารางที่ 2.1 ในบทที่ 2 จึงทำให้ได้ขนาดค่าความเผื่อสำหรับขนาดของร่องของชิ้นส่วนหลักชิ้นนอกเป็น 30 mm $\begin{matrix} +39 \mu\text{m} \\ +0 \mu\text{m} \end{matrix}$ ขนาดค่าความเผื่อสำหรับความหนาของชิ้นส่วนหลักชิ้นในเป็น 26 mm $\begin{matrix} -20 \mu\text{m} \\ -41 \mu\text{m} \end{matrix}$ และขนาดขนาดค่าความเผื่อสำหรับความหนาของแผ่นสร้างความหน่วง เป็น 2 mm $\begin{matrix} -8 \mu\text{m} \\ -16 \mu\text{m} \end{matrix}$ นอกจากนี้กลไกยังมีสกรูด้านข้างช่วยปรับเพิ่มความหน่วงของกลไกอีกด้วย

หมายเหตุ

1. ในส่วนของข้อเสนอแนะจากผู้ประเมินในประเด็นความเหมาะสมของระบบพิกัดงานสวมสามารถอธิบายได้ดังนี้

ในกลไกข้อเข้าของขาเทียมมีส่วนประกอบที่สำคัญจำเป็นต้องเลือกระบบพิกัดงานสวมที่เหมาะสมคือ Tolerance ระหว่างสลักทองเหลือง (pin) กับ Slot ของชิ้นส่วนหลักชิ้นใน (Inner body) ซึ่งปัจจุบันใช้ Clearance Fit H8/f7 ดังได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.1 ส่วนเหตุผลที่ไม่เลือก Clearance Fit H7/g6 (Precision Running) ซึ่งมีค่าค่าความเผื่อสำหรับสลักเป็น 8 mm $\begin{matrix} -5 \mu\text{m} \\ -14 \mu\text{m} \end{matrix}$ และค่าความเผื่อเส้นผ่านศูนย์กลางรู Slot เป็น 8 mm $\begin{matrix} +15 \mu\text{m} \\ +0 \mu\text{m} \end{matrix}$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเผื่อนี้จะทำให้การผลิตชิ้นส่วนทำได้ยากขึ้นมากและต้นทุนการผลิตจะสูงตามมาด้วย

4. การปรับปรุงกระบวนการผลิตชิ้นส่วนของข้อเท้าของขาเทียม

4.1 การปรับปรุงกระบวนการผลิตสลัก (Pin)

ดังได้อธิบายในบทที่ 3 ชิ้นส่วนสลัก (No.8 ในรูปที่ 3.1) จะต้องผลิตให้ได้ขนาดค่าความเผื่อสำหรับสลักเป็น $8\text{ mm} \begin{matrix} -13\text{ }\mu\text{m} \\ -28\text{ }\mu\text{m} \end{matrix}$ การผลิตชิ้นส่วนนี้ได้เลือกใช้เครื่องจักรที่เหมาะสมในการผลิตคือ เครื่องจักร CNC Swiss Type Lathe ดังแสดงในรูปที่ 4.1



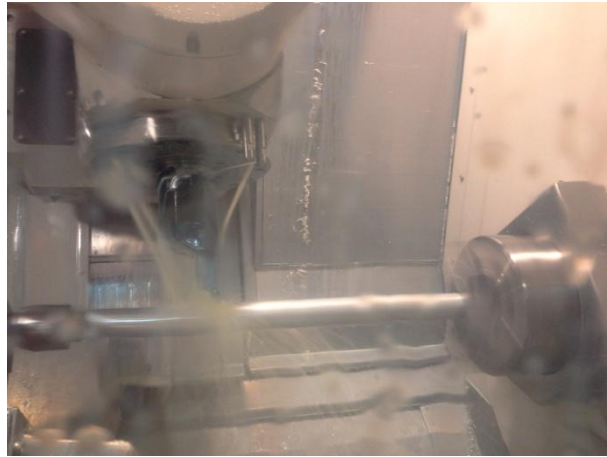
รูปที่ 4.1 เครื่องจักร CNC Swiss Type Lathe

เครื่องจักร CNC ดังกล่าวเป็นเครื่องจักรที่เหมาะสมกับการใช้ผลิตชิ้นส่วนเล็กๆ เช่น รากฟันเทียม ชิ้นส่วนเล็กๆ ในรถยนต์ เป็นต้น เนื่องจากให้ความละเอียดสูงสำหรับชิ้นงานขนาดเล็ก เพราะมีระบบที่แตกต่างกับเครื่องกลึง CNC Lathe ทั่วไปที่เวลากลึงชิ้นงานจะจับชิ้นงานให้นิ่งอยู่กับที่ด้วย 3 Jaw Chuck ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และระหว่างกลึงชิ้นงานจะหมุนอยู่กับที่แล้วมีดกลึงจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยระหว่างกลึงชิ้นงานจะเกิดโมเมนต์ดัดกับชิ้นงานในระหว่างกลึงเนื่องจากแรงกระทำของมีดกลึงกับชิ้นงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกลึงชิ้นงานที่มีลักษณะเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กและยาว โมเมนต์ดัดดังกล่าวจะส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังกลึงไม่ได้ขนาดตามต้องการ

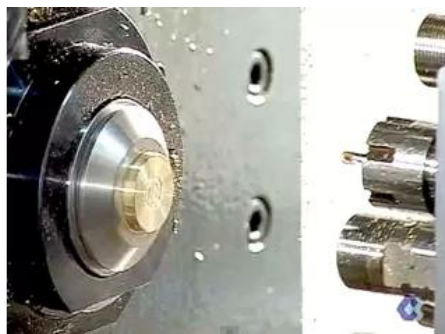


รูปที่ 4.2 3 Jaw Chuck

แต่เครื่องจักร CNC Swiss Type Lathe จะจับยึดชิ้นงานด้วย Finger Chuck ซึ่งระหว่างกลึงป้อนมีดจะอยู่กับที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 ลักษณะการกลึงเครื่องกลึง CNC Lathe ทั่วไป



รูปที่ 4.4 ลักษณะการกลึงชิ้นงานขนาดเล็กด้วยเครื่องกลึง CNC Swiss Type Lathe

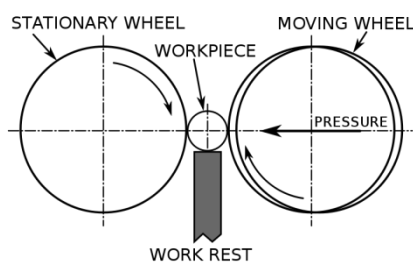
ส่วนการกลึงชิ้นงานขนาดเล็กด้วยเครื่องจักร CNC Swiss Type Lathe นั้น มีดกลึงจะอยู่กับที่โดยมีระยะห่างจาก Chuck เพียงเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 4.4 ส่วนชิ้นงานจะถูก Feed เข้าหาเม็ดกลึงแทน จะเห็นว่าด้วยระบบนี้ที่รักษาระยะระหว่างเม็ดกลึงกับจุดจับชิ้นงานที่ Chuck ให้น้อยและคงที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดในระหว่างกลึงชิ้นงานน้อยกว่าเครื่องกลึงทั่วไป

อย่างไรก็ตามในเบื้องต้นถึงแม้งานวิจัยนี้ได้กลึงสลักด้วยเครื่องจักร CNC Swiss Type Lathe แล้วก็ตาม แต่เมื่อทำการตรวจสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลักที่กลึงได้ด้วยเครื่อง CMM (Coordinate Measuring Machine) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่า ชิ้นงานยังไม่ได้ขนาดค่าความเผื่อสำหรับสลัก 8 mm $\begin{matrix} -13 \mu\text{m} \\ -28 \mu\text{m} \end{matrix}$ ตามต้องการ โดยเกิด Runout ถึง 20% จึงได้ปรับปรุงกระบวนการผลิตสลักโดยการกลึงชิ้นส่วนสลักด้วยเครื่องจักร CNC Swiss Type Lathe ให้มีขนาดใหญ่มากกว่าค่าความเผื่อที่ต้องการ แล้วจึงส่งชิ้นงานไปผ่านการเจียรไร้ศูนย์ (Centerless Grinding) ซึ่งเป็นกระบวนการที่

เจียรเนื้อชิ้นงาน (Abrasive Cutting) ที่มีลักษณะกลม ดังแสดงแผนภาพกระบวนการเจียรไร้ศูนย์ในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 ตรวจสอบเส้นผ่านศูนย์กลางของสลักที่กลึงได้ด้วยเครื่อง CMM



รูปที่ 4.6 แผนภาพกระบวนการเจียรไร้ศูนย์

เมื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตสลักโดยนำสลักที่กลึงได้ไปผ่านกระบวนการเจียรไร้ศูนย์ แล้วตรวจสอบขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางสลักด้วยเครื่อง CMM ผลปรากฏว่า สลักขนาดค่าความเผื่อ $8\text{ mm} -13\text{ }\mu\text{m}$ ถึง $-28\text{ }\mu\text{m}$ มีผลการสู่วัดชิ้นงานจำนวน 20 ชิ้นจาก 150 ชิ้น แสดงในตารางที่ 4.1 โดยค่าในตารางแสดงค่าตัวเลขที่เล็กกว่า Nominal size ของเพลลา (8.00 mm) มีหน่วยเป็น μm จากตารางพบว่าสลักที่ได้จากขบวนการเจียรไร้ศูนย์นี้ มีค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเพลลาเล็กกว่าขนาดของ Nominal size ของอยู่ $-21.7\text{ }\mu\text{m}$ ซึ่งค่านี้อยู่ในช่วงค่าความเผื่อตามต้องการทุกชิ้น

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดชิ้นงานหน่วยเป็น μm (จากการสู่วัดชิ้นงาน 20 ชิ้น)

	ชิ้นงานที่																			
ตำแหน่งการวัด	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
บน	-21	-22	-20	-20	-20	-22	-24	-24	-19	-21	-21	-23	-23	-24	-22	-21	-20	-23	-24	-19
กลาง	-22	-21	-21	-20	-20	-21	-20	-22	-20	-20	-22	-24	-21	-22	-23	-22	-20	-24	-24	-22
ล่าง	-23	-21	-20	-20	-23	-23	-23	-22	-21	-21	-24	-23	-20	-21	-21	-20	-23	-21	-22	-21

4.2 การปรับปรุงกระบวนการผลิต แผ่นสร้างความหน่วง (Damping Bronze Bushing)

ดังได้อธิบายในบทที่ 3 ชิ้นส่วนแผ่นสร้างความหน่วง (No.7 ในรูปที่ 3.1) จะต้องผลิตให้ได้ขนาดค่าความเผื่อความหนาของแผ่นสร้างความหน่วง เป็น $2\text{ mm} \begin{smallmatrix} -8\ \mu\text{m} \\ -16\ \mu\text{m} \end{smallmatrix}$ และเนื่องจากแผ่นสร้างความหน่วงซึ่งวัสดุเป็นทองเหลืองลายเสือนี้จะต้องเสียดสีกับชิ้นส่วนหลักใน (Inner Body) ตลอดการเคลื่อนไหวเพื่อสร้างความหน่วง ดังนั้นตัวแผ่นสร้างความหน่วงจึงต้องผลิตให้มีความเรียบ (Flatness) ที่ดี และมีความหยาบผิว (Roughness) น้อย

สำหรับวัสดุทองเหลืองลายเสือที่มีขายในประเทศนั้นจะมีลักษณะเป็นเพลากลมยาว ไม่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนขาย จึงเลือกซื้อเพลาทองเหลืองลายเสือดังแสดงในรูปที่ 4.7 ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกและเส้นผ่านศูนย์กลางในใหญ่เพียงพอที่จะวางชิ้นงานแผ่นสร้างความหน่วงได้หลายชิ้น



รูปที่ 4.7 วัตถุดิบเพลาทองเหลืองลายเสือ

กระบวนการผลิตจะเริ่มจากนำทองเหลืองลายเสือมา Slit ให้เป็นแผ่นให้ได้ความหนาที่มากกว่าความหนาแผ่นสร้างความหน่วงเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยใช้กระบวนการ Groove บนเครื่องจักร CNC Lathe



รูปที่ 4.8 วัตถุดิบเพลาทองเหลืองลายเสือที่ผ่านกระบวนการ Groove จนได้เป็นแผ่น

จากนั้นจึงนำแผ่นทองเหลืองลายเสือที่ได้มาเจียรผิวหน้าทั้งสองด้านด้วยเครื่องเจียรราบให้ได้ความหนา $2\text{ mm} \begin{smallmatrix} -8\ \mu\text{m} \\ -16\ \mu\text{m} \end{smallmatrix}$ ตามที่ต้องการ แต่เนื่องจากแผ่นทองเหลืองไม่ใช่เหล็กจึงไม่สามารถดูดติดแท่นเจียรราบด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ในขั้นต้นจึงประยุกต์ใช้ถ้วยสุญญากาศ (Vacuum Cup) มาดูดชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.9



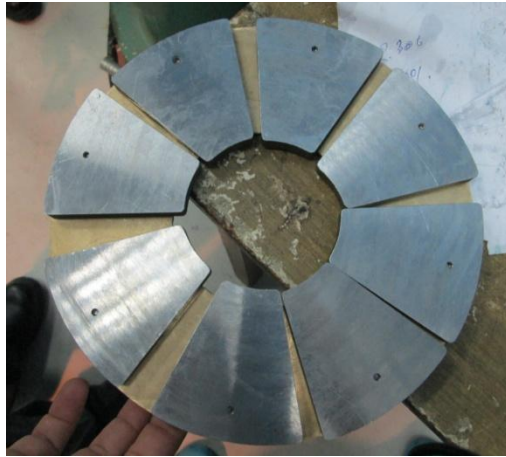
รูปที่ 4.9 ระบบถ้วยสุญญากาศ



รูปที่ 4.10 การยึดแผ่นทองเหลืองเข้ากับระบบสุญญากาศบนแท่นเครื่องเจียรราบ

จากนั้นจึงยึดแผ่นทองเหลืองเข้ากับระบบถ้วยสุญญากาศ แล้วทำการเจียรผิวทั้งสองด้านด้วยเครื่องเจียรราบ (Surface Grinding Machine) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ให้ความหนาตามที่ต้องการ ผลปรากฏว่าขณะที่ยึดแผ่นทองเหลืองเข้ากับระบบถ้วยสุญญากาศแล้วแท่นหินของเครื่องเจียรราบทำงานนั้น แผ่นทองเหลืองมีการแอ่นตัวในบริเวณที่ไม่ได้ถูกรองรับด้วยถ้วยสุญญากาศ ทำให้ได้ความหนาของแผ่นทองเหลืองหลังเจียรราบแล้วไม่สม่ำเสมอ

จึงได้ออกแบบการจับยึดใหม่ โดยสร้าง Jig Fixture จากเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.11 แทน ซึ่ง Jig Fixture นี้จะถูกเจียรให้เรียบและมีความหนาเท่ากัน แล้วจึงเจาะรูแผ่นทองเหลืองแล้วยึดเข้ากับ Jig Fixture ด้วยสกรูหัวจมนำไปยึดติดกับแท่นของเครื่องเจียรราบด้วยระบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 ระบบ Jig Fixture สำหรับยัดแผ่นทองเหลือง

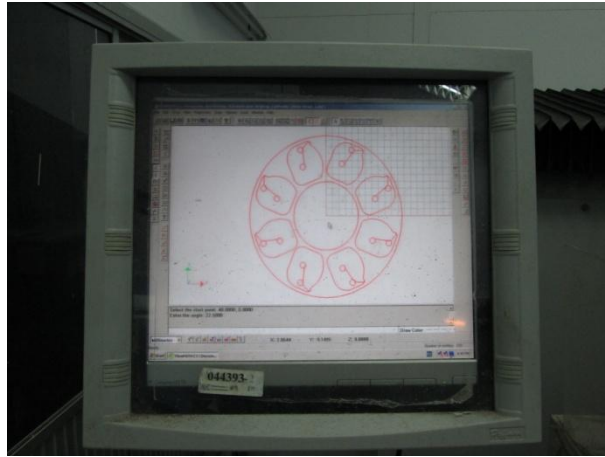


รูปที่ 4.12 การยัดแผ่นทองเหลืองเข้ากับระบบ Jig Fixture บนแท่นเครื่องเจียรราบ

ผลจากการยัดแผ่นทองเหลืองด้วยระบบ Jig Fixture นี้ทำให้ได้ความหนาของแผ่นทองเหลืองสม่ำเสมอ โดยหลังจากเจียรแผ่นทองเหลืองด้วยเครื่องเจียรราบจนได้ค่าความเผื่อตามที่ต้องการแล้ว จึงนำแผ่นทองเหลืองไปตัดด้วยเครื่อง Waterjet ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ให้ได้รูปร่างของแผ่นความหนา 1 มม. โดยโปรแกรมการตัดแผ่นทองเหลือง 1 แผ่นจะตัดได้แผ่นสร้างควมหนาทั้งหมด 8 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 การตัดแผ่นทองเหลืองด้วย Waterjet



รูปที่ 4.14 การโปรแกรมการตัดแผ่นทองเหลืองด้วย Waterjet

4.3 การปรับปรุงกระบวนการผลิต Side Cover Plate

ขั้นตอนการผลิต Side Cover Plate ใช้แผ่นสแตนเลส SS304 หนา 4 mm มาตัดด้วยเครื่องจักร Water jet ให้เป็นรูปร่างดังรูปที่ 4.15 จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปเจาะรู ตัดปเกิลิ้ว และนำชิ้นงานไปตกแต่งลบคมด้วยหินเจียร แล้วนำไปขัดเงาด้วยเครื่องขัดลูกฟักดังแสดงในรูปที่ 4.16 ทำให้ได้ชิ้นงาน Side Cover Plate หลังขัดเงาแล้วดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.15 Side Cover Plate

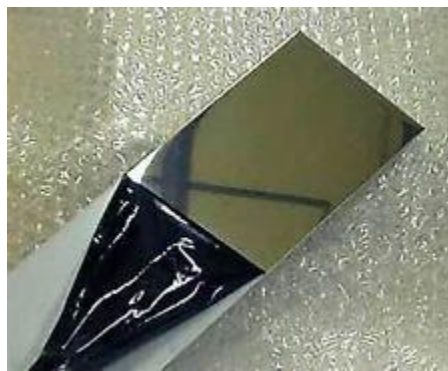


รูปที่ 4.16 เครื่องขัดเงา Side Cover Plate ด้วยลูกฟัก



รูปที่ 4.17 ชิ้นงาน Side Cover Plate ที่ขัดเงาแล้ว

ซึ่งการผลิตชิ้นงาน Side Cover Plate นี้ ใช้เวลาในการผลิตมากในขั้นตอนการตกแต่งลบคม หลังการตัดด้วยเครื่องจักร Water jet และการขัดเงาด้วยลูกผ้าให้ชิ้นงานสวยงามตามต้องการ ดังนั้น เพื่อที่จะลดขั้นตอนดังกล่าวจึงได้ปรับปรุงขบวนการผลิตมาเป็นการใช้แผ่นสแตนเลสชนิดมันเงา ดังแสดงในรูปที่ 4.18 แทนแผ่นสแตนเลส SS304 ที่มีผิวธรรมดา



รูปที่ 4.18 แผ่นสแตนเลสชนิดมันเงา



รูปที่ 4.19 Fixture สำหรับจับยึดแผ่นสแตนเลสชนิดมันเงา

จากนั้นออกแบบ Fixture สำหรับจับยึดแผ่นสแตนเลสชนิดมันเงา เพื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงาน Side Cover Plate ด้วยเครื่องจักร CNC Machining Center ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ซึ่งสามารถโปรแกรมให้เครื่องสามารถตัดชิ้นงานเป็นรูปร่างที่การได้พร้อมตกแต่งลบคมชิ้นงานด้วยการเดิน Contour ด้วยดอกกัด (Cutting tool) ชนิดคมตัดแบบรูปร่าง Fillet ดังแสดงในรูปที่ 4.20 นอกจากนี้

บนเครื่องจักร CNC Machining Center ยังสามารถโปรแกรมเพื่อเจาะรูชิ้นงาน และตัดแปะเกลียวจนได้ชิ้นงานสำเร็จในคราวเดียวกัน และยังไม่ต้องนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปไปขัดเงาต่อด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งจะเป็นการลดขั้นตอนและเวลาในการผลิต Side Cover Plate ได้มาก



รูปที่ 4.20 ดอกกัดชนิดคมตัดรูปร่าง Fillet



(a) Side Cover Plate ชนิดมันเงา
หลังขึ้นรูปแล้วแต่ยังไม่ได้ลอกแผ่นกันขีดข่วน

(b) Side Cover Plate ชนิดมันเงา
ที่ลอกแผ่นกันขีดข่วนแล้ว

รูปที่ 4.21 Side Cover Plate ขึ้นรูปด้วยแผ่นสแตนเลสชนิดมันเงา

4.4 การปรับปรุงกระบวนการผลิตสปริง

สปริงจัดได้ว่าเป็นชิ้นส่วนที่มีความสำคัญมากสำหรับขาเทียมเพราะผู้พิการขาขาดไม่มีกล้ามเนื้อและเส้นเอ็นที่จะบังคับให้ขาเทียมตัวออกไปขณะเดินก้าวเท้าไปข้างหน้าซึ่งในกลไกข้อเข้าของขาเทียมนั้นจะใช้สปริงเป็นอุปกรณ์หลักในการช่วยเหวี่ยงขาออกไปแทนกล้ามเนื้อ ดังนั้นสปริงที่ใช้ต้องสามารถเก็บพลังงานได้มากและมีความแข็งแรงสูงด้วย

4.4.1 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการผลิตสปริงสำหรับข้อเข้าของขาเทียม

โดยปกติสปริงที่สามารถสั่งทำตามร้านรับทำสปริงต่างๆ ภายในประเทศจะมีความแข็งแรงไม่เพียงพอกับการใช้งานเนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำสปริงมีคุณภาพไม่เพียงพอ ดังนั้นในการผลิตสปริงของกลไกข้อเข้าของขาเทียมจึงใช้วิธีเลือกสปริงแทนจากรถบรรทุกซึ่งมีความแข็งแรงสูงดังแสดงในรูปที่ 4.22 มาใช้และทำการทดสอบค่าความแข็งแรงของสปริงแทนด้วยเครื่องดึง Tensile Test Machine ยี่ห้อ Inston ElectroPuls รุ่น E10000 ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ซึ่งสามารถหาค่า Yield Strength ได้

1,307.33 MPa จากค่าเฉลี่ยของการทดสอบชิ้นงาน 3 ชิ้น ดังแสดงชิ้นงานจากวัสดุเหนียวที่ใช้ทดสอบ
ในรูปที่ 4.24 และผลการทดสอบในรูปที่ 4.25



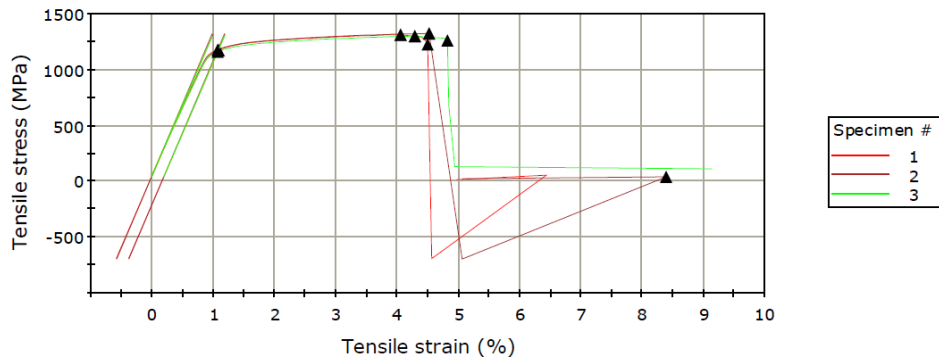
รูปที่ 4.22 สปริงเหนียวจากรถบรรทุก



รูปที่ 4.23 การทดสอบค่าความแข็งแรงของสปริงเหนียวด้วยเครื่องดึง Tensile Test Machine



รูปที่ 4.24 ชิ้นงานจากวัสดุเหนียวที่ใช้ทดสอบ

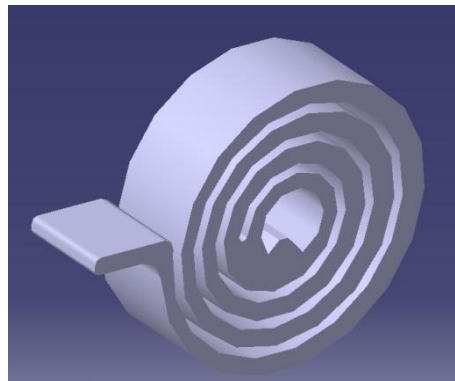


	Modulus (E-modulus) (MPa)	Tensile stress at Yield (Zero Slope) (MPa)	Load at Yield (Zero Slope) (kN)	Tensile stress at Yield (Offset 0.2 %) (MPa)	Load at Yield (Offset 0.2 %) (kN)	Tensile stress at Tensile Strength (MPa)	Load at Tensile Strength (kN)
1	126783.46	1308.59	3.29	1171.95	2.95	1308.59	3.294
2	128856.13	1318.77	3.19	1174.80	2.85	1318.77	3.194
3	126787.42	1294.66	3.27	1157.26	2.92	1294.66	3.272

รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบสปริงจากเหล็กเหนียว

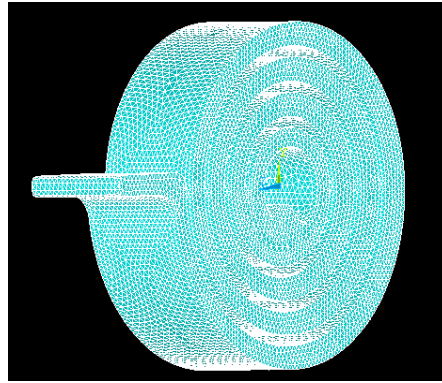
4.4.2 การออกแบบและคำนวณความแข็งแรงของสปริงสำหรับข้อเข้าของขาเทียม

เมื่อได้ค่าคุณสมบัติต่างๆ จากวัสดุสปริงเหนียวแล้ว จึงออกแบบสปริงเป็นรูปแบบ Torsional Spring ดังแสดงในรูปที่ 4.26 จากนั้นนำค่าคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบวัสดุสปริงเหนียวในหัวข้อ 4.4.1 มาใช้ในการคำนวณความแข็งแรงของสปริงที่ออกแบบด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Ansys 12.0 โดยเลือกเอลิเมนต์ชนิด 3D Tetrahedral Element ขนาดของ Element โดยประมาณ 0.4 mm. โดย Model ที่สร้างขึ้นประกอบไปด้วย Node จำนวน 43060 และ Element จำนวน 195392 ดังแสดง Finite Element Model ในรูปที่ 4.27

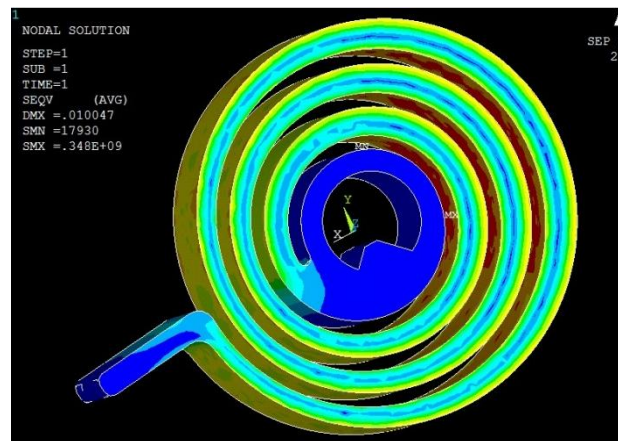


รูปที่ 4.26 รูปแบบ torsional Spring ที่ออกแบบสำหรับข้อเข้าของขาเทียม

จากนั้นใส่ขอบเขตการคำนวณ (Boundary Condition) โดยในรูของ torsional Spring ยึดแน่น (Fix Support) และใส่ภาระในลักษณะการเคลื่อนที่ (Displacement) ของสปริงจนกระทั่งกลไกเข้าสามารถงอได้ 120 องศา ซึ่งผลการคำนวณความแข็งแรงของสปริงของกลไกข้อเข้าด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Ansys 12.0 ดังแสดงในรูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นว่ามีความแข็งแรงเพียงพอโดยเกิด Maximum VonMises Stress 348 Mpa น้อยกว่า Yield Strength ของวัสดุสปริงเหนียว 1,307.33 MPa อยู่ 3.76 เท่า



รูปที่ 4.27 Finite Element Model



รูปที่ 4.28 ผลการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์

4.4.3 การผลิตสปริงสำหรับข้อเข้าของขาเทียม

หลังจากออกแบบเรียบร้อยแล้วนำแผ่นสปริงแบนของรถยนต์มาเจียรระนาบด้วยเครื่องเจียรราบ (Surface Grinding) จนได้ความหนาตามที่ออกแบบแล้วนำไปตัดขึ้นรูปให้เป็นสปริงขด (Torsional Spring) ตามแบบด้วยเครื่องจักร Water jet ดังแสดงในรูปที่ 4.29 จากนั้นนำสปริงที่ได้ไปรมดำเพื่อป้องกันสนิมก็จะได้สปริงของกลไกข้อเข้าของขาเทียมดังแสดงในรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.29 การตัดสปริงตามที่ได้ออกแบบด้วยเครื่อง Waterjet



รูปที่ 4.30 สปริงที่ผ่านการตัดด้วย Waterjet และรมดำจนพร้อมใช้งาน

4.5 แผนการการปรับปรุงกระบวนการผลิต Case และ Inner body

การผลิต Case และ Inner body ปัจจุบันใช้เพลาสแตนเลสสตีลเกรด SS304 ขนาด 3x4 นิ้ว และ 1.5x3 นิ้วตามลำดับ ใช้เป็น Raw material ในการผลิตโดยเริ่มต้นด้วยการตัดเพลาสีเหลี่ยมดังกล่าวเป็นท่อนยาว 8 นิ้วแล้วนำมาขึ้นรูปตัวจับเพื่อยึดกับ Fixture แล้วนำมาตัดด้วย Water jet เพื่อให้ได้รูปร่างที่เรียกว่า Near Net Shape และจากนั้นนำกลับมาขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีกลึงโดยเครื่องจักร CNC Machine Tool อีกครั้งหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 4.31 และได้อธิบายขั้นตอนการผลิตโดยละเอียดไว้ในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ในปีที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นขั้นตอนที่ใช้เวลามากที่สุดในกระบวนการผลิตกลึงข้อเข้าของขาเทียม ดังนั้นแผนงานการปรับปรุง Case และ Inner body นั้นจะเปลี่ยน Raw material ที่ใช้เพลาสแตนเลสสตีลเกรด SS304 มาเป็นสแตนเลสหล่อซึ่งอยู่ระหว่างการศึกษาค้นคว้าและออกแบบรูปร่างสแตนเลสหล่อดังกล่าวให้ได้รูปร่าง Near Net Shape โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการขึ้นรูปตัวจับเพื่อยึดกับ Fixture และกระบวนการตัดด้วย Water jet



รูปที่ 4.31 การเตรียมชิ้นงาน Near Net Shape จากเพลาสแตนเลสสตีลเกรด SS304

ก่อนจะเปลี่ยนกระบวนการมาเป็นการหล่อรูปร่างของชิ้นงาน Case และ Inner body ให้มาเป็นรูปร่าง Near Net Shape จะต้องศึกษาถึงคุณสมบัติของวัสดุ Raw Material ที่จะนำมาใช้

เสียก่อนโดยทางโรงงานหล่อสแตนเลสได้ให้ข้อมูลดังนี้คือสแตนเลส 304 หล่อจะไม่สามารถนำมาใช้ได้เนื่องจากค่าความแข็งแรงของวัสดุจะด้อยกว่าของสแตนเลส 304 แท่งที่ใช้อยู่ในขบวนการผลิตปัจจุบันซึ่งได้จากขบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการรีดโลหะ ดังนั้นทางโรงงานจึงแนะนำวัสดุให้ใหม่แทนคือสแตนเลส 309 ซึ่งมีค่าความแข็งแรงของวัสดุสูงกว่าสแตนเลส 304 ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของวัสดุสแตนเลส 304 และ 309

Grade	Tensile Strength (MPa) min	Yield Strength 0.2% Proof (MPa) min	Hardness (Rockwell B)	Elongation (% in 50mm)
304	515	205	92	40
309	620	310	85	45

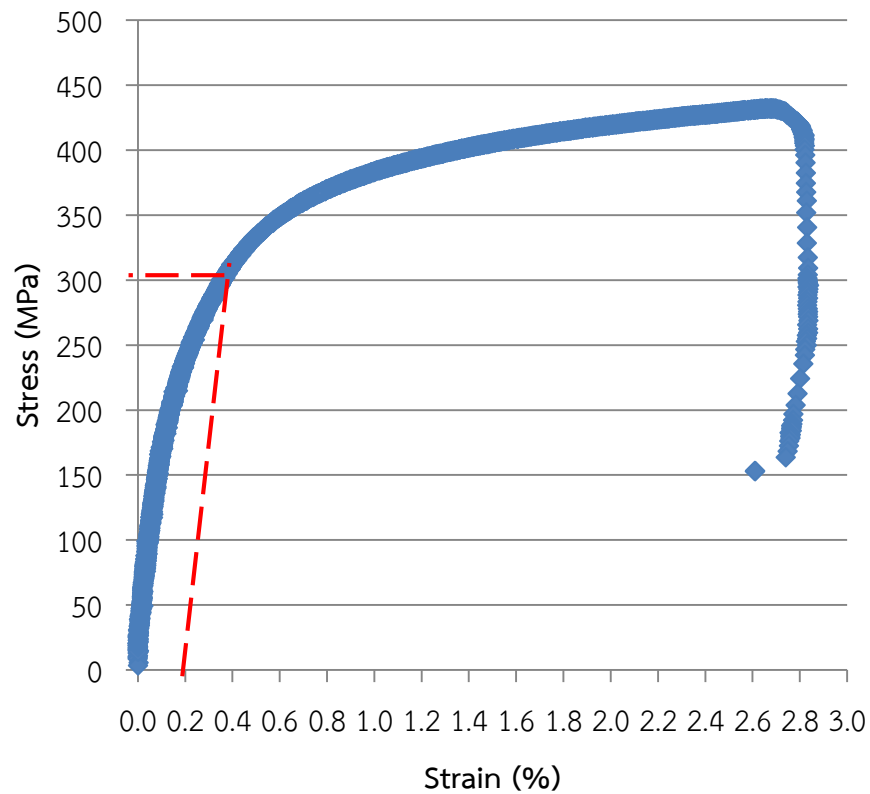
จากนั้นได้ให้ทางโรงงานหล่อขึ้นงานทดสอบเพื่อนำมาทดสอบความแข็งแรงโดยใช้เครื่อง Tensile Test ยี่ห้อ Shimadzu AG-IS 100 KN ทดสอบความแข็งแรงของสแตนเลสหล่อ 309 ดังแสดงในรูปที่ 4.32 พบว่าชิ้นงานทดสอบมีค่าความแข็งแรง Yield Strength ประมาณ 300 MPa ดังแสดงผลการทดสอบในรูปที่ 4.33 ซึ่งดีกว่าค่าความแข็งแรงของสแตนเลส 304 ฉะนั้นจะสามารถใช้งานได้ แต่ก่อนที่จะนำไปใช้งานจริงต้องมีการทดสอบชิ้นส่วนที่ได้จากวิธีการหล่อนี้เสียก่อน



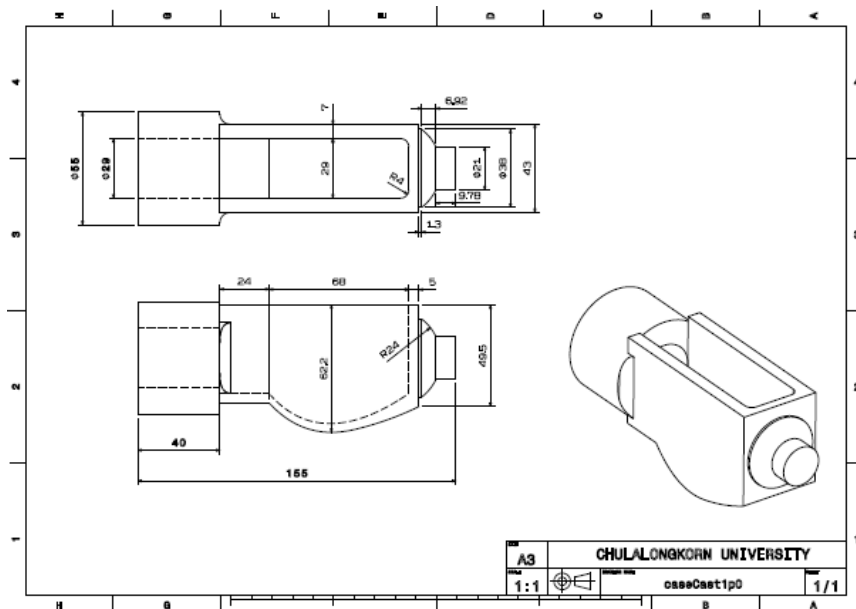
รูปที่ 4.32 การทดสอบความแข็งแรงของสแตนเลสหล่อ 309 โดยใช้เครื่อง Tensile Test

ปัจจุบันที่มวิจัยกำลังดำเนินการออกแบบชิ้นงานรูปร่าง Near Net Shape ของทั้ง Case และ Inner body อยู่โดยชิ้นงานดังกล่าวที่ออกแบบไว้นั้นจะสามารถจับยึดได้กับเครื่องจักร CNC Machine Tool ทันทีเลยไม่ต้องใช้ Fixture ใดๆอีกโดยแบบชิ้นงานที่ออกแบบไว้สำหรับส่งโรงงานหล่อเป็นดังรูปที่ 4.34 สำหรับ Case และรูปที่ 4.35 สำหรับ Inner ตามลำดับ

Stainless Steel (309)



รูปที่ 4.33 ผลการทดสอบสแตนเลสหล่อ 309 ด้วยเครื่อง Tensile Test



รูปที่ 4.34 แบบขึ้นงานหล่อสำหรับ case

5. การทดสอบภาคสนาม

ในปีที่แล้ว(พ.ศ. 2555) ได้ออกแบบและทดสอบกลไกข้อเข้าเทียม ข้อต่อ และหน้าแข้งตามมาตรฐานสากลและได้ทำการผลิตเป็นจำนวน 10 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 แล้วได้นำไปทดสอบภาคสนามกับอาสาสมัครทหารผ่านศึกผู้พิการขาขาดเหนือเข่าผ่านโรงพยาบาลทหารผ่านศึก โดยอาสาสมัครดังกล่าวมีรายนามตามตารางที่ 5.1 เป็นเวลา 6 เดือน ส่วนในปีนี้ได้เริ่มดำเนินการติดตามผลการทดสอบภาคสนามกับอาสาสมัครผู้พิการขาขาดเหนือเข่าต่อเนื่องจากปีที่แล้วไปอีก 2 ครั้ง คือเดือนที่ 10 ถึงเดือนที่ 14 เดือน แล้วพบว่ายังไม่มีความเสียหายใดๆเกิดขึ้นดังแสดงในตารางผลการติดตามผลดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลอาสาสมัครการทดสอบกลไกข้อเข้าของเทียม

อาสาสมัครผู้พิการ	อายุ (ปี)	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	จังหวัด	หมายเหตุ
1. ร.ต. ชูชีพ ศรีงาม	65	60	กรุงเทพฯ	เหนือเข่าซ้าย
2. จ.อ. กิตติธิช เดิมสันเทียะ	53	75	กรุงเทพฯ	เหนือเข่าขวา
3. ร.ท. จลัย ร้องขันแก้ว	56	65	กรุงเทพฯ	เหนือเข่าขวา
4. ส.อ. บรรจง จันทร์แดง	40	70	สระแก้ว	เหนือเข่าซ้าย
5. อส.ทพ. ธนภัทร ศุภรินทร์	57	75	กรุงเทพฯ	เหนือเข่าซ้าย
6. ร.ท.สมชาย จงอยู่สุข	68	76	กรุงเทพฯ	เหนือเข่าซ้าย
7. ร.อ. ปิยะพันธ์ กลัดกลีบ	63	75	กรุงเทพฯ	เหนือเข่าซ้าย
8. ร.ท. ณรงค์พัฒน์ พงษ์พานิช	60	70	กรุงเทพฯ	เหนือเข่าซ้าย
9. พลจ. จลัญ พิมพ์โยยั้ง	47	65	กำแพงเพชร	เหนือเข่าขวา
10. ร.อ. สุมิตร หอมขง	70	70	กรุงเทพฯ	เหนือเข่าขวา



รูปที่ 5.1 แสดงตัวอย่างกลไกข้อเข้าเทียมที่ผลิตขึ้นจำนวน 10 ชุด พร้อมนำไปทดสอบภาคสนาม



รูปที่ 5.2 แสดงตัวอย่างกลไกข้อเข้าเทียมที่ประกอบแล้ว



รูปที่ 5.3 แสดงตัวอย่างอาสาสมัครสวมใส่กลไกข้อเข้าเทียมใช้งานในชีวิตประจำวัน

ตารางที่ 5.2 ผลการติดตามผลการทดสอบภาคสนาม(ปี 2)

อาสาสมัคร	ผลการทดสอบภาคสนาม(สภาพการใช้งาน)		
	เดือนที่ 10	เดือนที่ 14	หมายเหตุ
1. ร.ต.ชูชีพ ศรีงาม	ปกติ	ปกติ	-
2. จ.อ.กิตติธิช เดิม สันเทียะ	ปกติ	ปกติ	-
3. ร.ท.จลัย ร้องขันแก้ว	ปกติ	ปกติ	-
4. ส.อ.บรรจง จันทรแดง	ปกติ	ปกติ	สกรูตั้งความแข็งของสปริงดีด ขามีการคายเล็กน้อยเดือนที่ 14 และได้ทำการปรับตั้งสกรู กลับไปที่ตั้งเดิม ผู้ใช้รู้สึก เดินได้เป็นปกติ
5. อส.ทพ.ธนภัทร ศุ กรินทร์	ปกติ	ปกติ	-
6. ร.ท.สมชาย จงอยู่สุข	ปกติ	ปกติ	
7. ร.อ.ปิยะพันธ์ กลัดกลีบ	ปกติ	ปกติ	-
8. ร.ท.ณรงพัฒน์ พงษ์ พานิช	ปกติ	ปกติ	-
9. พล.จลัญ พิมพ์โยียง	ปกติ	ปกติ	สกรูตั้งความแข็งของสปริงดีด ขามีการคายเล็กน้อยเดือนที่ 14 และได้ทำการปรับตั้งสกรู กลับไปที่ตั้งเดิม ผู้ใช้รู้สึก เดินได้เป็นปกติ
10. ร.อ.สุมิตร หอมขง	ปกติ	ปกติ	-

จากผลการทดสอบภาคสนามโดยให้อาสาสมัครทุกคนได้ใช้งานในชีวิตประจำวันต่อเนื่องอีกเป็นเวลาอีก 8 เดือนนับจากทดสอบภาคสนามมาแล้วเป็นเวลา 6 เดือนในปีที่ 1 พบว่าจากรูปที่ 5.3 และกลไกข้อเข่าเทียมรูปที่ 5.4 ยังอยู่ในสภาพยังใช้งานต่อได้ดี และอาสาสมัครสามารถใช้งานในชีวิตประจำวันตามปกติได้อยู่



รูปที่ 5.4 ตัวอย่างกลไกข้อเข่าเทียมที่ผ่านการใช้งานมาแล้วเป็นระยะเวลา 14 เดือน

จากผลการทดสอบภาคสนามโดยให้อาสาสมัครทุกคนได้ใช้งานในชีวิตประจำวันต่อเนื่องอีกเป็นเวลาอีก 4 เดือนนับจากทดสอบภาคสนามมาไปแล้วเป็นเวลา 14 เดือน พบว่า กลไกข้อเข่าเทียมก็ยังคงอยู่ในสภาพยังใช้งานต่อได้ดี แม้อาสาสมัครบางคนจะเกิดปัญหาสปริงคลายตัวซึ่งทีมวิจัยได้แก้ปัญหาโดยการใส่สกรูตัวหนอนสองตัวทำหน้าที่เป็นการล็อกสองชั้นเพื่อทำให้สปริงไม่คลายตัวขณะใช้งานดังแสดงในรูปที่ 5.5 และอาสาสมัครสามารถใช้งานในชีวิตประจำวันตามปกติได้อยู่ดังแสดงสภาพของกลไกข้อเข่าของขาเทียมดังรูปที่ 5.6 และตารางที่ 5.3 สรุปผลการทดสอบภาคสนามเป็นเวลาทั้งสิ้น 18 เดือน



รูปที่ 5.5 การล็อกสองชั้นเพื่อให้สปริงไม่คายนั้ขณะใช้งาน



รูปที่ 5.6 ตัวอย่างกลไกข้อเข่าเทียมที่ผ่านการใช้งานมาแล้วเป็นระยะเวลา 18 เดือน

ตารางที่ 5.3 ผลการติดตามผลการทดสอบภาคสนาม (ปี 2)

อาสาสมัคร	ผลการทดสอบภาคสนาม(สภาพการใช้งาน)			
	เดือนที่ 10	เดือนที่ 14	เดือนที่ 18	หมายเหตุ
1. ร.ต.ชูชีพ ศรีงาม	ปกติ	ปกติ	ปกติ	-
2. จ.อ.กิตติธิช เดิมสันเทียะ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	-
3. ร.ท.จลัย ร้องขันแก้ว	ปกติ	ปกติ	ปกติ	-
4. ส.อ.บรรจง จันทรแดง	ปกติ	ปกติ	ปกติ	แก้ไขตัวล็อกสปริงแล้วสามารถใช้งานได้ดีสปริงไม่คลายตัว
5. อส.ทพ.ธนภัทร ศุภรินทร์	ปกติ	ปกติ	ปกติ	-
6. ร.ท.สมชาย จงอยู่สุข	ปกติ	ปกติ	ปกติ	-
7. ร.อ.ปิยะพันธ์ กลัดกลีบ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	-
8. ร.ท.ณรงพัฒน์ พงษ์พานิช	ปกติ	ปกติ	ปกติ	-
9. พล.จ.ลัญ พิมพิโยยั้ง	ปกติ	ปกติ	ปกติ	แก้ไขตัวล็อกสปริงแล้วสามารถใช้งานได้ดีสปริงไม่คลายตัว
10. ร.อ.สุมิตร หอมขง	ปกติ	ปกติ	ปกติ	-

หมายเหตุ

- ปีที่ 1 ใช้เวลาผลิตชิ้นงาน 6 เดือน และทดสอบกลไกข้อเข้ากับอาสาสมัครจริงได้แค่ 6 เดือน จากนั้นในปีที่ 2 ได้ทดสอบต่ออีก 12 เดือนรวมเป็นทดสอบต่อเนื่อง 18 เดือน
- ในส่วนของการเสนอแนะจากผู้ประเมินในประเด็นความพึงพอใจในการใช้งานในกรณีการล็อกตัวตั้งความแข็งของสปริงดีดสามารถอธิบายได้ดังนี้ เนื่องจากตัวล็อกมีการคายซึ่งทำให้ผู้ฝึกการเดินได้ไม่เป็นธรรมชาติ ส่วนวิธีการแก้ไขที่นำเสนอคือเพิ่มตัว Set screw เป็นสองตัวเพื่อเป็นการล็อกสองชั้นนั้นสามารถแก้ปัญหาได้แต่ในรายงานได้ติดตามเป็นเวลา 4 เดือนซึ่งจบโครงการพอดี แต่ในความเป็นจริงหลังจากนี้ทีมวิจัยก็ยังคงติดตามผลต่อไปเพื่อเป็นข้อมูลในการปรับปรุงงานในโอกาสต่อไป

6. สรุปผลของโครงการวิจัยปี 2

โครงการวิจัยในปีที่ 2 ได้ปรับปรุงขบวนการผลิตกลไกข้อเท้าเทียมให้ได้คุณภาพและผลิตของขึ้นส่วนของกลไกข้อเท้าเทียมให้ได้เร็วขึ้นผลิตได้เป็นจำนวนมากๆ โดยการปรับปรุงขบวนการผลิตขึ้นส่วนต่างๆ ของข้อเท้าของขาเทียมนี้ ได้แก่สลัก (Pin) แผ่นสร้างความหน่วง (Damping Bronze Bushing) สปริง Side Cover Plate ขึ้นส่วนหลัก Case และ Inner Body นอกจากนี้ยังได้ทำการกำหนดค่าความพิคัดความเผื่อสำหรับขึ้นส่วนของกลไก เพื่อให้การผลิตขึ้นส่วนหลักและขึ้นส่วนประกอบอื่นๆ สามารถทำงานร่วมกันได้เป็นไปตามฟังก์ชันการทำงานของกลไกข้อเท้าที่ได้ออกแบบไว้ และในส่วนของการติดตามผลการทดสอบภาคสนามกับอาสาสมัครผู้พิการขาขาดเหนือเข้าได้ติดตามผลต่อเนื่องจากปีที่ 1 เป็นเวลา 6 เดือน จนมาถึงปีที่ 2 อีกเป็นเวลา 12 เดือน รวมทั้งสิ้น 18 เดือนพบว่ากลไกข้อเท้าของขาเทียมยังสามารถใช้งานได้ปกติอยู่ทุกราย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ตารางสถิติ จำนวนประชากร จำนวนและร้อยละของประชากรที่พิการ จำแนกตามกลุ่มอายุ เพศ และเขตการปกครอง ทัวราชอาณาจักร พ.ศ. 2550, สำนักงานสถิติแห่งชาติ กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศ และการสื่อสาร <http://portal.nso.go.th/otherWS-world-context-root/index.jsp>
- [2] มูลนิธิขาเทียมในสมเด็จพระศรีนครินทราบรมราชชนนี <http://www.prosthesesfoundation.or.th/>
- [3] บริษัทออตโตบ็อก, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://th-new.ottobock.com>
- [4] Virulsri, C., Tangpornprasert, P., Charoenboonvivat S., Prechakithavorn K., Rattanasook N., Wanakosum T., Phucharoen P. and Sukhawathanakarn S., "Design and Manufacturing of the above knee prosthesis for the amputees", the 22th National Mechanical Engineering Conference, Pathumthani, 2008
- [5] Virulsri, C., Tangpornprasert, P., Charoenboonvivat S., "Design and Manufacturing Prototype of Knee Mechanism in Transfemoral Prosthesis II", the 23th National Mechanical Engineering Conference, Chiangmai, 2009
- [6] บริษัท ossur, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.ossur.com>
- [7] US Patent number:5443524 Issue date: Jun 9, 1993
- [8] US Patent number: 5779735 Issue date: Jul 14, 1998
- [9] US Patent number: 6,701,074 B1 Issue date: Mar 16, 2004
- [10] [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://fibo.kmutt.ac.th/thai/index.php?option=content&task=view&id=465>
- [11] [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.most.go.th/technomart/?p=764>
- [12] ISO 10328:2006 Prosthetics - Structural testing of lower-limb prostheses - Requirements and test methods
- [13] เอกสารคำสอนวิชา 2103203 Mech Drawing ผศ.ดร. ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์
- [14] จำรูญ ตันติพิศาลกุล. เขียนแบบวิศวกรรม 2 (เขียนแบบเครื่องกล). พิมพ์ครั้งที่ 11 (ฉบับปรับปรุงใหม่). ห้างหุ้นส่วนจำกัด สามลดตา. 2552