

## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบ และพัฒนาขบวนการผลิตชุดข้อเข่าเทียม และการ  
ทดสอบภาคสนาม ปีที่ ๑ (โครงการต่อเนื่อง ๒ ปี)

Design and manufacturing process development of prosthetic  
knee joint sets and field test (1<sup>st</sup> year of 2 years project)

สัญญาเลขที่ GRB\_APS\_๑๖\_๕๕\_๒๑\_๐๒  
เงินทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วไปรัฐบาล  
งบประมาณแผ่นดิน ปีงบประมาณ ๒๕๕๕

โดย

อ.ดร. ชัญญาพันธ์ วิรุฬห์ศรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มีนาคม ๒๕๕๖

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาล ประจำปีงบประมาณ 2555 และได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดีในการทดสอบภาคสนามจากโรงพยาบาลทหารผ่านศึก องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก ในพระบรมราชูปถัมภ์

## บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัยต่อเนื่อง 2 ปี โดยปีแรกของโครงการวิจัยได้เน้นการออกแบบและพัฒนากระบวนการผลิตข้อต่อและแกนหน้าแข็งของขาเทียมให้มีความแข็งแรง ผลิตได้เองภายในประเทศ สามารถใช้ได้ทั้งกับท่ออลูมิเนียมนำเข้าที่ผู้พิการใช้อยู่ก่อน และท่ออลูมิเนียมที่หาซื้อได้ภายในประเทศ และทำการทดสอบภาคสนามกับอาสาสมัครผู้พิการขาขาดเหนือเข่า และติดตามผลงานวิจัยในปีแรก ได้เริ่มจากการทดสอบความแข็งแรงของกลไกข้อเข่าเทียมที่ทีมวิจัยได้พัฒนาขึ้นตามแนวทางของมาตรฐานสากล ISO 10328:2006 เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความแข็งแรง สามารถสรุปได้ว่ากลไกข้อเข่าเทียมที่ได้ออกแบบนี้มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะใช้ในผู้พิการขาขาดเหนือเข่าได้อย่างมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ซึ่งรับรองทั้งความเสียหายจากแรงกระทำสถิต (Static load) และแรงกระทำพลวัต (Dynamic load) ตามแนวทางมาตรฐานสากล จากนั้นจึงได้ทำการออกแบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Jig-Fixture) และออกแบบการผลิตด้วย CAM (Computer-Aided-Manufacturing) ช่วยในการผลิตข้อเข่าของขาเทียมด้วยเครื่องจักร CNC เป็นจำนวน 10 ชุด แล้วนำไปทดสอบภาคสนามกับอาสาสมัครผู้พิการขาขาดเหนือเข่าจากโรงพยาบาลทหารผ่านศึก ผลปรากฏว่ายังสามารถใช้งานได้ดี และไม่พบความเสียหายใดๆ เกิดขึ้น ซึ่งจะได้ทำการติดตามผลต่อเนื่องไปยังปีที่ 2 ของโครงการ

ด้านการออกแบบและพัฒนากระบวนการผลิตข้อต่อและแกนหน้าแข็งของขาเทียม ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ แกนหน้าแข็ง ข้อต่อชั้นบน และข้อต่อชั้นล่าง ซึ่งแกนหน้าแข็งได้เลือกใช้ท่ออลูมิเนียมเกรด 6061 เนื่องจากเป็นท่ออลูมิเนียมความแข็งแรงสูงกว่าท่ออลูมิเนียมเกรดอื่นที่ผลิตขายภายในประเทศ และสามารถหาซื้อได้ง่าย และมีเส้นผ่านศูนย์กลางรูในใกล้เคียงกับท่ออลูมิเนียมนำเข้าที่ผู้พิการใช้อยู่ก่อน จึงได้ออกแบบข้อต่อให้มีลักษณะสอดเข้าไปในรูในของท่อเพื่อให้สามารถใส่ข้อต่อที่ออกแบบได้กับท่ออลูมิเนียมทั้งที่นำเข้า และซื้อได้ในประเทศ

สำหรับข้อต่อชั้นบนได้ออกแบบให้มีพิกัดความเผื่อ (Tolerancing) ที่เหมาะสมในการสวมอัดเข้ากับแกนหน้าแข็ง โดยได้ทำการทดลองทำการทดลองเพื่อหาค่าพิกัดความเผื่อที่เหมาะสม จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล คณะผู้วิจัยได้เลือกออกแบบข้อต่อชั้นบนให้มีค่าพิกัดความเผื่อแบบสวมอัด (Interference)  $S_6 = +35 - +48 \mu\text{m}$  ซึ่งมีค่าแรงดึงออก (Pull Out strength) สูงมากถึง 2,483 N ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยในการนำไปใช้งาน

ส่วนข้อต่อชั้นล่างต้องออกแบบให้มีกลไกที่สามารถไขเพื่อคลายข้อต่อจากภายนอกได้ง่าย และตำแหน่งยึดระหว่างข้อต่อและเท้าเทียมไม่เสียไป เพื่อความสะดวกแก่นักกายอุปกรณ์ในการจัดตำแหน่งของเท้าสำหรับผู้พิการ และในขณะเดียวกันก็สามารถนำไปใช้กับแกนหน้าแข็งอลูมิเนียมที่นำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางรูในเท่ากัน จึงได้ออกแบบให้ข้อต่อชั้นล่างถูกกลึงให้มีพิกัดความเผื่อในลักษณะสวมคลอน (Clearance) ซึ่งทำให้สามารถสวมข้อต่อชั้นล่างเข้ากับรูในของท่ออลูมิเนียมได้ง่าย แต่มีกลไกที่สามารถขยายขนาดข้อต่อให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้น เพื่อให้เกิดการยึดกันแน่นเพียงพอในระหว่างใช้งาน

## ABSTRACT

This research project is for two years. In the first year of the research project, design and manufacturing process development of tube adapters set were concentrated. The goal of this development is 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. Moreover, the field test and follow up for self manufactured prosthetic knee joint sets were also carried out.

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. The test results were shown that the developed prosthetic knee joint can be sustained both static loading and dynamic loading. This means that it can be used with above knee amputees for long time before failure. 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 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.

The design and manufacturing process development of tube adapters set was divided into three parts, shank, upper connector and lower connector. Aluminum tube grade 6061 was selected as material for shank, since its higher strength than other aluminum tube grade that can be bought within country. Because its inner diameter is close to the size of imported shank, the connectors were then designed to insert to the inner diameter of shank so that both imported and local shank can be used with the designed connectors.

The upper connector was designed with appropriate tolerance for press fitting. The experiment for determining of appropriate tolerance was also performed. From the experiment results and discussions, interference fit  $S_6 = +35 - +48 \mu\text{m}$  was selected as the appropriated tolerance, since its pull out strength was high up to 2,483 N, so they safe for using.

The lower connector was designed to be unlocked or loosening from outside easily. Its position between the lower connector and the artificial foot was not lost for easily adjusting position by the prosthetists. Moreover, it was designed with clearance fitting so that it can be insert and remove easily. The enlarge mechanism for lower connector were developed to securely fitting during use.

## สารบัญเรื่อง

เรื่อง	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	II
บทคัดย่อ	III
ABSTRACT	IV
สารบัญเรื่อง	V
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1. บทนำ	1
บทที่ 2. ทฤษฎีและปริทัศน์วรรณกรรม	4
บทที่ 3. การทดสอบความแข็งแรงของกลไกข้อเข่าเทียม	13
บทที่ 4. การผลิตข้อเข่าของขาเทียมจำนวน 10 ชุด เพื่อนำไปทดสอบภาคสนาม	18
บทที่ 5. ระบบชุดข้อต่อและแกนหน้าแข้งของขาเทียม	37
บทที่ 6. การออกแบบข้อต่อขึ้นบน : ระบบชุดข้อต่อและแกนหน้าแข้งของขาเทียม	39
บทที่ 7. การออกแบบข้อต่อขึ้นล่าง : ระบบชุดข้อต่อและแกนหน้าแข้งของขาเทียม	45
บทที่ 8. การทดสอบภาคสนาม	47
บทที่ 9. สรุปผลปีที่ 1 ของโครงการวิจัย	50
บทที่ 10. เอกสารอ้างอิง	51

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ระยะเวลาแนวแรงในสามมิติตามมาตรฐาน ISO 10328:2006	12
ตารางที่ 3.1 แรงกดที่ใช้ในการทดสอบแบบ Static load test ของกลไกข้อเข้าเทียมและค่าเสียรูปรวม (Deformation) ที่วัดได้	16
ตารางที่ 3.2 แรงกระทำที่ใช้ในการทดสอบ Cyclic load test และผลการทดสอบหลังจากออกแรงครบตามจำนวนรอบที่กำหนดไว้	17
ตารางที่ 6.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูในของท่อ	41
ตารางที่ 6.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพลา (shaft)	42
ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบแรงกดอัดและแรงดึงที่ระบบพิกัดความถี่ต่างๆ	43
ตารางที่ 8.1 ข้อมูลอาสาสมัครการทดสอบกลไกข้อเข้าของเทียม	47
ตารางที่ 8.2 ผลการติดตามผลการทดสอบภาคสนาม	49

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 ข้อเช่าของขาเทียมนำเข้าชนิดหลายจุดหมุน (70,000 บาท)	1
รูปที่ 1.2 ขาเทียมไม้ชนิดแกนหมุนเดียว (20,000-30,000 บาท)	1
รูปที่ 2.1 จังหวะการเดินตามปกติของคน	4
รูปที่ 2.2 ลักษณะ Ground reaction force ขณะเดิน	5
รูปที่ 2.3 แนว Load line ที่กระทำต่อขาในช่วงต่างๆ	6
รูปที่ 2.4 กลไกข้อเช่าแบบ Active knee joint ที่มีขายในท้องตลาด	7
รูปที่ 2.5 กลไกข้อเช่าแบบ Passive knee joint ที่มีขายในท้องตลาด	7
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างตัวอย่างกลไกข้อเช่าของขาเทียมที่ได้จดสิทธิบัตรในต่างประเทศ	8
รูปที่ 2.7 กลไกข้อเช่าของขาเทียมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย	8
รูปที่ 2.8 ขาเทียมแบบปรับอัตราหมุนซึ่งควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์	8
รูปที่ 2.9 กลไกข้อเช่าเทียมของมูลนิธิขาเทียมฯ	9
รูปที่ 2.10 กลไกข้อเช่าเทียมพัฒนาโดยบริษัท แอสเซียมเมทอล จำกัด ร่วมกับ เนคเทค/สวทช.	9
รูปที่ 2.11 กลไกข้อเช่าเทียมโดยคณะวิศวฯ จุฬาฯ ร่วมกับองค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก	9
รูปที่ 2.12 ท่า Heel strike ใน Gait cycle ที่ใช้เป็นตัวแทนในการทดสอบความแข็งแรง	10
รูปที่ 2.13 ท่า Toe off ใน Gait cycle ที่ใช้เป็นตัวแทนในการทดสอบความแข็งแรง	10
รูปที่ 2.14 กราฟแสดงลักษณะของแรงกดเทียบกับเวลาที่ใช้ใน Principal static load test ทั้งจังหวะ Heel strike และ Toe off	11
รูปที่ 2.15 กราฟแสดงลักษณะของแรงกดเทียบกับเวลาที่ใช้ใน Principal cyclic load test ทั้งจังหวะ Heel strike และ Toe off	11
รูป 2.16 การกำหนดทิศที่ออกแรงกระทำต่อกลไกข้อเช่าเทียมในการทดสอบความแข็งแรง	12
รูปที่ 3.1 กลไกข้อเช่าเทียมเมื่อเทียบกับตัวต่อที่ใช้ในการปรับทิศของแนวแรงให้เข้ากับทิศของแนวแรงที่มาตรฐานกำหนด	13
รูปที่ 3.2 กลไกข้อเช่าที่ติดกับเครื่องทดสอบและมีแนวแรงตามมาตรฐานในจังหวะ Heel strike	13
รูปที่ 3.3 กลไกข้อเช่าที่ติดกับเครื่องทดสอบและมีแนวแรงตามมาตรฐานในจังหวะ Toe off	14
รูปที่ 3.4 เครื่องมือไฮดรอลิกส์ที่ใช้ออกแรงกดในการทดสอบกลไกข้อเช่าเทียม	14
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์วัดระยะด้วยแสงเลเซอร์ที่ติดตั้งเพื่อใช้วัดค่ายุบตัวของกลไกข้อเช่าเทียม	15
รูปที่ 3.6 ลูกบาศก์ที่ติดอยู่กับก้านที่ยื่นออกมาจากตัวออกแรงกดเพื่อใช้ในการสะท้อนของแสงเลเซอร์ในการวัดระยะยุบตัวทั้งสามแกน	15

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.1 เครื่องตัดด้วยน้ำแรงดันสูง (Waterjet Cutting Machine)	18
รูปที่ 4.2 9-Axes Multitasking Machine Tool	18
รูปที่ 4.3 ชิ้นส่วนหลักและชิ้นส่วนประกอบอื่นๆ ของข้อเหวี่ยงที่ทีมวิจัยได้พัฒนาขึ้น	19
รูปที่ 4.4 สแตนเลสหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับชิ้นส่วนหลักชิ้นนอก และชิ้นส่วนหลักชิ้นใน	20
รูปที่ 4.5 3 Jaw Chuck	20
รูปที่ 4.6 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่ออกแบบขึ้น	21
รูปที่ 4.7 การอัดชิ้นงานที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าเข้ากับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน	21
รูปที่ 4.8 การใช้เครื่องตัดด้วยน้ำแรงดันสูง (Waterjet Cutting Machine) เตรียมวัตถุดิบ	22
รูปที่ 4.9 ข้อมูล 3 มิติของก้อนวัตถุดิบของชิ้นส่วนหลักชิ้นนอกจากซอฟต์แวร์ CAD	23
รูปที่ 4.10 ข้อมูล 3 มิติของชิ้นส่วนหลักชิ้นนอก (Case) จากซอฟต์แวร์ CAD	23
รูปที่ 4.11 การใช้ดอกมิลลิ่งกัดหยาบกัดส่วนหัวให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอก	24
รูปที่ 4.12 การใช้มีดกลึงกลึงส่วนหัว	24
รูปที่ 4.13 การใช้ดอกมิลลิ่งเอียงทำมุมกัดเพื่อกัดส่วนหัวของชิ้นงานให้เป็นรูปร่างปิรามิด	25
รูปที่ 4.14 การเจาะรูนำศูนย์ที่ปลายหัวปิรามิด	25
รูปที่ 4.15 การกัดเนื้อชิ้นงานด้านข้างทั้งสองด้านออก	26
รูปที่ 4.16 การเจาะรู ตีแปเกลียว และการทำ Circular Milling ที่ผิวด้านข้างของชิ้นงาน	26
รูปที่ 4.17 การขุดเนื้อวัสดุด้วยการทำ Pocket	27
รูปที่ 4.18 ทำขอบมนของชิ้นงานด้วยการใช้ดอกกัด Fillet	27
รูปที่ 4.19 การตัดชิ้นงานออกจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน	28
รูปที่ 4.20 ข้อมูล 3 มิติของก้อนวัตถุดิบของชิ้นส่วนหลักชิ้นในจากซอฟต์แวร์ CAD	29
รูปที่ 4.21 ข้อมูล 3 มิติของชิ้นส่วนหลักชิ้นใน (Inner Body) จากซอฟต์แวร์ CAD	29
รูปที่ 4.22 การใช้ดอกมิลลิ่งกัดหยาบกัดส่วนหัวให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอก	30
รูปที่ 4.23 การใช้มีดกลึงกลึงส่วนหัว	30
รูปที่ 4.24 การใช้ดอกมิลลิ่งเอียงทำมุมกัดเพื่อกัดส่วนหัวของชิ้นงานให้เป็นรูปร่างปิรามิด	31
รูปที่ 4.25 การเจาะรูนำศูนย์ที่ปลายหัวปิรามิด	31
รูปที่ 4.26 การกัดเนื้อชิ้นงานด้านข้างทั้งสองด้านออก	32
รูปที่ 4.27 การกัดร่อง (slot) และการทำ Circular Milling ที่ผิวด้านข้างของชิ้นงาน	32
รูปที่ 4.28 การทำ Chamfer	33
รูปที่ 4.29 การตัดชิ้นงานออกจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน	33
รูปที่ 4.30 การตั้งระดับก้อนวัตถุดิบ (Near Net Shape Stock) ด้วยเครื่องมือ Dial Gauge	34
รูปที่ 4.31 ก้อนวัตถุดิบ (Near Net Shape Stock) ของชิ้นส่วนหลักชิ้นนอก	34
รูปที่ 4.32 ชิ้นส่วนหลักชิ้นนอกหลังขึ้นรูปด้วยเครื่องจักร CNC	35
รูปที่ 4.33 ก้อนวัตถุดิบ (Near Net Shape Stock) ของชิ้นส่วนหลักชิ้นใน	35



รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.34 ชิ้นส่วนหลักชิ้นในหลังขึ้นรูปด้วยเครื่องจักร CNC	35
รูปที่ 4.35 กลไกข้อเหวี่ยงของขาเทียมที่ผลิตขึ้น	36
รูปที่ 4.36 กลไกข้อเหวี่ยงของขาเทียมเมื่อประกอบเข้ากับเบ้า หน้าแข้ง และเท้า	36
รูปที่ 5.1 ระบบชุดข้อต่อและแกนหน้าแข้งของขาเทียม	37
รูปที่ 5.2 ข้อเหวี่ยงของขาเทียมบางรุ่นที่มีชิ้นส่วนของสปริงยื่นออกนอกตัวข้อ	37
รูปที่ 6.1 ข้อต่อขึ้นบนที่ออกแบบ	39
รูปที่ 6.2 แบบวิศวกรรมของข้อต่อขึ้นบน	39
รูปที่ 6.3 การยึดปิรามิดเข้ากับข้อต่อ	40
รูปที่ 6.4 Principal Fits for Bearings ISO System of Limits and Fits	40
รูปที่ 6.5 แสดงลักษณะการสวมข้อต่อขึ้นบน	41
รูปที่ 6.6 การวัดขนาดรูเพลาด้วยเครื่อง CMM	41
รูปที่ 6.7 วัสดุเหล็กเพล่าที่เตรียมขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง	42
รูปที่ 6.8 การทดสอบแรงกดอัดระหว่างรูเพล่ากับเพล่าที่ระบบพิกัดความเผื่อต่างๆ	43
รูปที่ 6.9 การทดสอบแรงกดอัดระหว่างรูเพล่ากับเพล่าที่ระบบพิกัดความเผื่อต่างๆ	43
รูปที่ 7.1 แสดงข้อต่อขึ้นล่างระหว่างข้อเท้าและหน้าแข้ง	45
รูปที่ 7.2 กลไกคานกระดกขยายขนาดข้อต่อทำให้ข้อต่อขึ้นล่างและแกนหน้าแข้งเกิดการยึดกันแน่น	46
รูปที่ 7.3 ภาพประกอบกลไกขยายขนาดข้อต่อขึ้นล่าง	46
รูปที่ 8.1 แสดงตัวอย่างกลไกข้อเหวี่ยงที่ผลิตขึ้นจำนวน 10 ชุด พร้อมนำไปทดสอบภาคสนาม	48
รูปที่ 8.2 แสดงตัวอย่างกลไกข้อเหวี่ยงที่ประกอบแล้ว	48
รูปที่ 8.3 แสดงตัวอย่างอาสาสมัครสวมใส่กลไกข้อเหวี่ยงใช้งานในชีวิตประจำวัน	48
รูปที่ 8.4 ตัวอย่างกลไกข้อเหวี่ยงที่ผ่านการใช้งานมาแล้วเป็นระยะเวลา 6 เดือน	50
รูปที่ 8.5 แสดงสภาพชิ้นส่วนของกลไกข้อเหวี่ยงของขาเทียมหลังทดสอบภาคสนามเป็นเวลา 6 เดือน	50

## 1. บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันจำนวนผู้พิการขาขาดในประเทศไทยมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น โดยจากสถิติของสำนักงานสถิติแห่งชาติ กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร ปีพ.ศ. 2550 พบว่าจำนวนผู้พิการขาขาด/ด้วนในประเทศไทยมีมากกว่า 23,777 คน [1] แม้ว่าในประเทศไทยจะมีองค์กรหรือมูลนิธิต่างๆ ที่ผลิตขาเทียมบริจาคให้แก่ผู้พิการขาขาด ก็ยังไม่สามารถผลิตขาเทียมได้เพียงพอกับความต้องการของผู้พิการซึ่งมีเป็นจำนวนมาก เช่น มูลนิธิขาเทียมในสมเด็จพระศรีนครินทราบรมราชชนนี สามารถผลิตได้ปีละประมาณ 1,000 ขา ถึงแม้ในไลน์การผลิตของมูลนิธิจะมีเครื่องกลึง และเครื่องจักรมากก็ตาม [2]

ในขาเทียมทุกประเภทนั้นจำเป็นต้องใช้ข้อต่อ และแกนหน้าแข้งของขาเทียม ซึ่งในปัจจุบันหน่วยงานของรัฐ เช่น โรงพยาบาลทหารผ่านศึก ยังคงต้องนำเข้าข้อต่อและแกนหน้าแข้งที่มีคุณภาพจากต่างประเทศอยู่ซึ่งมีราคาแพง โดยข้อต่อและแกนหน้าแข้งที่นำเข้าดังกล่าวจะมีลักษณะประกอบข้อต่อและแกนหน้าแข้งมาเสร็จทั้งชุด 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 โดยขาเทียมเนื้อเข้าที่นำเข้าจากต่างประเทศนั้นมีราคาแพง เช่น ข้อเข้าของขาเทียมที่นำเข้าโดยทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 1.1 มีราคาประมาณ 70,000 บาท [3] ทำให้ผู้ด้อยโอกาสในประเทศต้องใช้ขาเทียมที่มีคุณภาพไม่ดันทัก โดยส่วนใหญ่ยังคงเป็นขาเทียมทำด้วยไม้ชนิดแกนหมุนเดียว (Single-axis) ตามรูปที่ 1.2 โดยมีราคาประมาณ 20,000-30,000 บาท ซึ่งมีอายุใช้งานสั้น น้ำหนักสูงมาก เสถียรภาพไม่ดี และทำให้ผู้สวมใส่มีลักษณะการเดินผิดธรรมชาติทำให้เกิดอาการแทรกซ้อนตามมา เช่น อาการปวด

หลัง ปวดสะโพก หรือเป็นข้อเข่าของขาเทียมชนิดหลายจุดศูนย์กลาง แต่วัสดุที่ใช้ยังคงทำด้วย อลูมิเนียม ซึ่งไม่มีความคงทน

ด้วยเหตุนี้ทีมนักวิจัยห้องปฏิบัติการ Biomechanical Design and Manufacturing ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ร่วมกับองค์การสงเคราะห์ทหาร ผ่านศึก ในพระบรมราชูปถัมภ์ จึงได้พัฒนากลไกข้อเข่าของขาเทียม โดยได้รับการสนับสนุนจากมูลนิธิ ส่งเสริมนวัตกรรมวิศวกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งกลไกข้อเข่าของขาเทียมดังกล่าวมีจุดเด่น ดังนี้

- 1) กลไกข้อเข่าเป็นชนิดหลายจุดศูนย์กลางหมุน (Polycentric Knee Joint) ซึ่งส่งผลให้การ เคลื่อนที่ของข้อเข่าหรือการเดินของผู้พิการเหมือนธรรมชาติ
- 2) เป็นกลไกที่ออกแบบใหม่ต่างจากกลไกข้อเข่าที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน กล่าวคือลักษณะของข้อต่อ เป็นแบบข้อต่อเคลื่อนที่ในเชิงเส้น (Prismatic Joint) จึงทำให้มีชิ้นส่วนหลัก (Linkage) ของ กลไกเหลือน้อยเพียง 2 ชิ้น และชิ้นส่วนประกอบอื่นๆจำนวนน้อย ส่งผลให้ง่ายต่อการผลิต และบำรุงรักษา
- 3) วัสดุทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ต้นทุนการผลิตต่ำเพียง 10,000 บาท ในขณะที่ข้อเข่าเทียมรุ่นคุณภาพใกล้เคียงกันที่นำเข้าจากต่างประเทศราคาสูงกว่ามาก ประมาณ 70,000 บาท

โครงการวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาชุดขาเทียมให้สามารถผลิต และใช้วัสดุที่หาได้ ภายในประเทศ โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วนคือ

- 1) ส่วนของข้อต่อ และแกนหน้าแข้งของขาเทียม จะทำการออกแบบและพัฒนากระบวนการผลิต ข้อต่อและแกนหน้าแข้งให้มีความแข็งแรงผลิตได้เองภายในประเทศ และสามารถใช้ได้ทั้งกับท่อ อลูมิเนียมนำเข้าที่ผู้พิการใช้อยู่ก่อน และท่ออลูมิเนียมที่หาได้ในประเทศ
- 2) ส่วนของข้อเข่าของขาเทียม จะนำกลไกข้อเข่าแบบใหม่ ที่ได้พัฒนาขึ้นเองโดยทีมนักวิจัยตามหลัก วิศวกรรมและเวชศาสตร์ฟื้นฟู [4,5] และผ่านการทดลองทดสอบตามมาตรฐานสากลแล้ว มา ทดสอบภาคสนามและปรับปรุงแบบจนมั่นใจ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 ผลิตข้อเข้าของขาเทียมที่ได้ออกแบบและทดสอบตามมาตรฐานสากลเรียบร้อยแล้ว เพื่อทำการทดสอบภาคสนามกับอาสาสมัครผู้พิการขาขาดเหนือเข่า และติดตามผล
- 1.2.2 เพื่อออกแบบและพัฒนาขบวนการผลิตข้อต่อและแกนหน้าแข้งของขาเทียมให้มีความแข็งแรงผลิตได้เองภายในประเทศ

## 1.3 วิธีการดำเนินการวิจัย ปีที่ 1 (โครงการต่อเนื่อง 2 ปี)

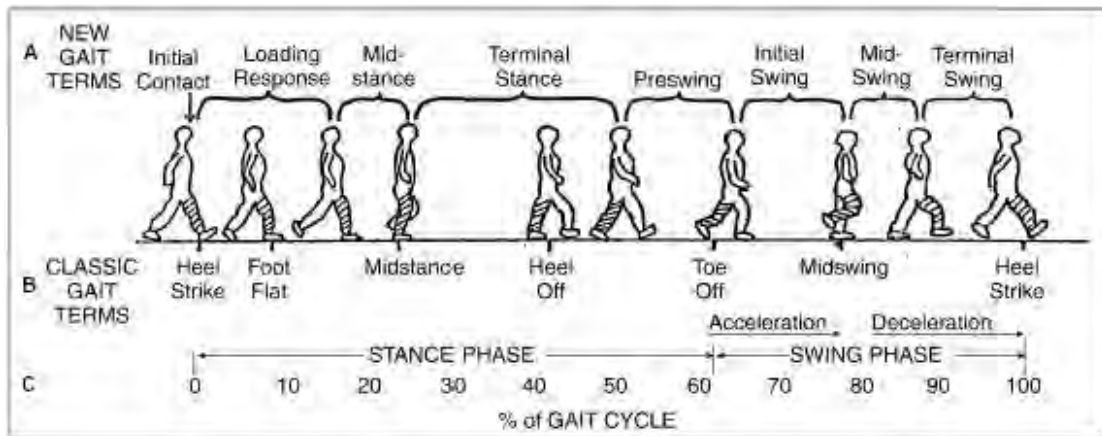
- 1.3.1 ผลิตต้นแบบข้อเข้าของขาเทียมที่ได้ออกแบบและทดสอบตามมาตรฐานสากลเรียบร้อยแล้ว อย่างน้อย 10 ชุด เพื่อทำการทดสอบภาคสนามกับอาสาสมัครผู้พิการขาขาดเหนือเข่า
- 1.3.2 ทดลองต้นแบบข้อเข้าของขาเทียมที่ได้ผลิตขึ้นกับอาสาสมัครผู้พิการขาขาดเหนือเข่า และติดตามผลทุกๆ 2 เดือน 3 ครั้ง รวมเป็นระยะเวลา 6 เดือน โดยทำการสัมภาษณ์อาสาสมัคร ตรวจสอบความเสียหายของชิ้นงาน และวัดขนาดของชิ้นงานเพื่อดูว่ามีการเสียรูปของชิ้นงานหรือไม่ หากติดตามผลเป็นระยะเวลา 6 เดือนแล้วพบว่าไม่มีความเสียหายใดๆเกิดขึ้น จะเว้นระยะการติดตามผลไปยังปีที่ 2 ของโครงการ
- 1.3.3 ศึกษาหาข้อมูลของระบบข้อต่อและแกนหน้าแข้งของขาเทียมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน พร้อมทั้งศึกษาเกี่ยวกับวัสดุ เช่น เพลาลูมิเนียมคุณภาพดี ที่สามารถหาได้ในประเทศ
- 1.3.4 ออกแบบข้อต่อและแกนหน้าแข้งของขาเทียม
- 1.3.5 ผลิตต้นแบบข้อต่อและแกนหน้าแข้งของขาเทียม เพื่อทำการทดสอบความทนทานต่อการใช้งานต่างๆ เช่น Pull out strength เป็นต้น

## 2. ทฤษฎีและปริทัศน์วรรณกรรม

### 2.1 วงจรการเดิน (Gait cycle)

การเดินเป็นการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งโดยเท้า 2 ข้างก้าวสลับกัน ขาทั้ง 2 ข้างจะต้องแข็งแรงมั่นคงจึงสามารถรับน้ำหนักตัวและมีแรงดันให้ลำตัวไปทางด้านหน้า เมื่อถูกตัดขาข้างใดข้างหนึ่งก็จะทำให้เดินไม่ได้ จำเป็นต้องทำขาเทียมมาสวมเพื่อให้อย่างน้อยที่สุดสามารถรับน้ำหนักตัวได้เพื่อจะไม่ต้องใช้ไม้ค้ำยัน เพื่อจะมีมือทั้ง 2 ข้างที่เป็นอิสระที่จะทำงานช่วยเหลือตนเองได้ เมื่อจะนำขาเทียมมาใส่ ขาเทียมนั้นก็จะต้องมีการทำงานให้คล้ายขาจริง คือ รับแรงกระแทก รับน้ำหนักตัว มีแรงส่งต้นลำตัว และก้าวไปข้างหน้าได้ วงจรการเดินประกอบด้วย 2 ช่วง คือ

1. Stance phase เป็นช่วงที่ขาข้างนั้นยันรับน้ำหนักตัวมีอยู่ 60% โดยแบ่งพิจารณาย่อยๆได้เป็นจังหวะดังแสดงในรูปที่ 2.1
2. swing phase เป็นช่วงที่ขาข้างนั้นลอยอยู่ในอากาศ เหวี่ยงจากด้านหลังลำตัวไปข้างหน้าของลำตัว มีอยู่ 40% โดยแบ่งพิจารณาย่อยๆได้เป็นจังหวะดังแสดงในรูปที่ 2.1

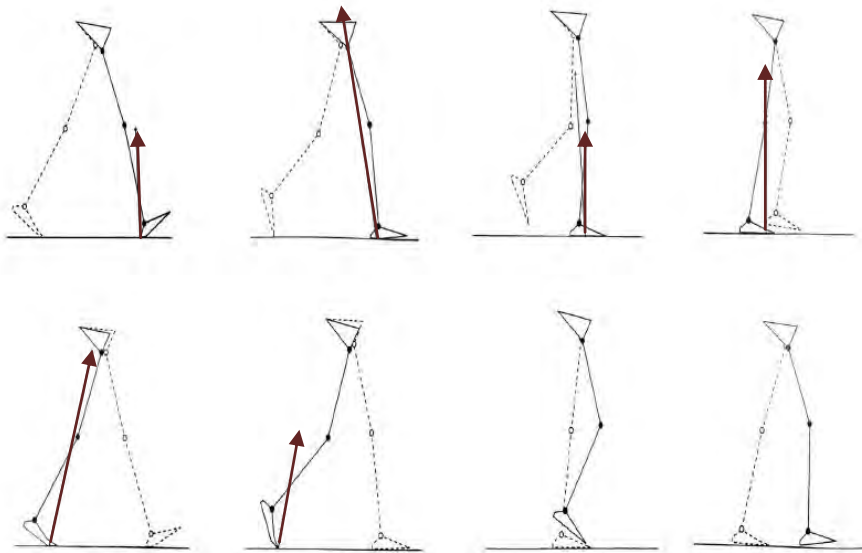


รูปที่ 2.1 จังหวะการเดินตามปกติของคน [6]

ตามรูปที่ 2.1 เริ่มจากขาข้างขวารับน้ำหนักตัว (ช่วง Stance phase) ส้นเท้าจะสัมผัส (Heel strike หรือ Heel contact ตามรูปได้แก่ Initial contact กับพื้น ข้อเท้าจะเหยียดเต็มที่ด้วยการทำงานของกล้ามเนื้อ Quadriceps ลำตัวเคลื่อนมาข้างหน้า ฝ่าเท้าแนบราบไปกับพื้น (Foot flat หรือ ช่วง Loading response) กล้ามเนื้อ Quadriceps จะคอยรั้งป้องกันไม่ให้เข่าเพราะแนวแรงน้ำหนักตัว อยู่บนหรือเหนือขาและเท้าข้างขวา (ช่วง Mid stance) น้ำหนักตัวจะลงบนขาข้างขวาเต็มที่และแนวแรงของน้ำหนักตัวจะเลื่อนมาทางด้านหน้าของจุดหมุนของข้อเท้า ช่วงนี้ข้อเท้าจะไม่พับเพราะเกิดโมเมนต์ที่เหยียดข้อเท้า ลำตัวก็ยังคงเคลื่อนที่ไปข้างหน้าทำให้เท้าอยู่หลังต่อลำตัว จนกระทั่งส้นเท้าถูกดึงให้ลอยพ้นพื้น (Heel off) ลำตัวก็ยังคงเคลื่อนตัวไปข้างหน้า จนกระทั่งปลายเท้าพ้นจากพื้น (Toe off หรือช่วง Terminal stance) แรงเฉื่อยจากการที่ปลายเท้าวัดลงเมื่อเท้าพ้นจากพื้น ร่วมกับการทำงานของกล้ามเนื้อ Hamstring ทำให้ข้อเข่างอยกให้ขาข้างขวาลอยพ้นพื้น เข้าสู่ช่วง Swing phase ระยะนี้ตอนแรกข้อสะโพกจะอยู่ในท่าเหยียด (Extension) ขาข้างขวาอยู่หลังต่อลำตัว กล้ามเนื้อที่เชิงข้อสะโพกคือ Iliopsoas จะดึงต้นขากระดูก Femur มาทางด้านหน้า จังหวะนี้เรียกว่า Acceleration เมื่อเท้าขวาลอยมาอยู่ใต้ลำตัว เรียกว่า Mid swing แรงเฉื่อยของขา

ขาจะทำให้ขาเหวี่ยงไปข้างหน้าต่อไป กล้ามเนื้อที่ใช้ในการเหยียดข้อสะโพกจะต้องคอยดึงไม่ให้ข้อสะโพกงอมาก ป้องกันขาขวาไม่ให้เหวี่ยงไปข้างหน้ามากเกินไป จังหวะนี้เรียกว่า Deceleration และยิ่งช่วยดึงรั้งให้ขาขวากลับลงมาระทบพื้นเกิด Heel contact เข้าสู่ Stance phase ต่อไป ตั้งแต่ส้นเท้าขวาระทบพื้นตอนแรก จนกระทั่งมาระทบพื้นอีกครั้งหนึ่งเป็นการครบวงจรพอดี เราจึงเรียกว่า วงจรการเดิน (Gait cycle) ดังนั้นวงจรการเดินจึงประกอบไปด้วย Stance และ Swing phase ซึ่งมีอัตราส่วน 60% ต่อ 40% เมื่อขาขวาอยู่ใน stance phase ขาซ้ายจะอยู่ใน Swing phase และเมื่อขาซ้ายอยู่ใน Stance phase ขาขวาจะอยู่ใน Swing phase สลับกันไป แต่จะมีช่วงหนึ่งที่เท้าทั้งสองข้างอยู่บนพื้นพร้อมกัน เช่น Heel contact ข้างขวาและ Toe off ข้างซ้ายหรือ Heel contact ข้างซ้ายและ Toe off ข้างขวา ช่วงนี้เราเรียกว่า Double support ซึ่งจะมีอยู่ประมาณ 20% ของ Gait cycle

Ground reaction force หมายถึงแรงซึ่งประกอบไปด้วยขนาดและทิศทางที่พื้นกระทำกับคนจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงจากคนกระทำต่อพื้นแต่ขนาด เราสามารถศึกษาลักษณะของ Ground reaction force ได้จากรูป 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะ Ground reaction force ขณะเดิน

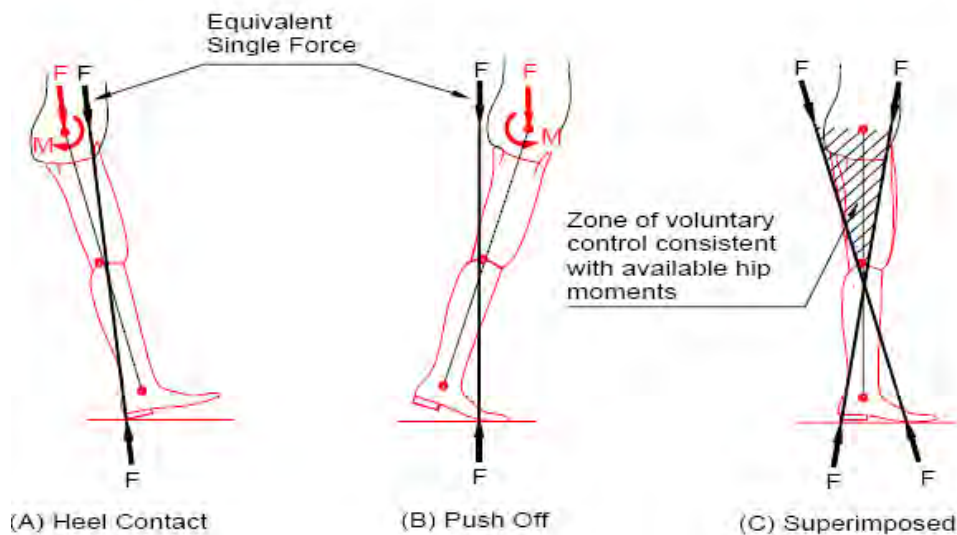
## 2.2 ความมีเสถียรภาพของข้อเข่าเทียม

การรักษาเสถียรภาพ (Stability) ของการเดินและน้ำหนักของขาที่เหลือน้อยมีผลต่อการเดินของผู้พิการที่สวมใส่ขาเทียมเป็นอย่างมาก เนื่องจากการที่ผู้สวมใส่ขาเทียมจะเดินได้อย่างปลอดภัยนั้น ข้อเข่าจะต้องต่อต้านการพังทลายที่เมื่ออยู่ภายใต้แรงกดลง ปัจจัยที่ทำให้เข่ามีเสถียรภาพมีอยู่หลายประการดังนี้ [7]

1. ความยาวและกำลังของตอขาที่เหลือน้อย
2. ความเหมาะสมของพื้นที่ตอขาและเท้าเทียม
3. ตำแหน่งสัมพันธ์ตั้งแต่ข้อสะโพกถึงเข่า และ ข้อเท้า ของผู้พิการ
4. คุณสมบัติเฉพาะของการทำงานของกลไกข้อเข่าและข้อเท้าเมื่อทำงานร่วมกัน

ในช่วงต่างๆของการเดินการรักษาสถียรภาพจะต่างกันไป เช่นในจังหวะ Heel contact ของขาเทียมอาจไม่มีเสถียรภาพหากไม่มีกล้ามเนื้อที่ทำให้สะโพกยึดขึ้นเอง กล่าวคือไม่มี Hip moment นั้นเอง หากไม่มี Hip moment เส้น Load line จากจุดศูนย์กลางที่แรงกระทำบนสันเท้า ขึ้นไปจนถึงข้อต่อสะโพก ซึ่งทำให้ขาไม่มีเสถียรภาพเพราะจุดศูนย์กลางของเข่าอยู่ด้านหลัง Load line ถ้า Load line ผ่านหลังจุดศูนย์กลางของเข่าจะทำให้ขาไม่มีเสถียรภาพ แต่ส่วนมากขาเทียมจะไม่โค้งงอภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ เนื่องจากผู้พิการส่วนมากมีระบบกล้ามเนื้อสะโพกที่สมบูรณ์แม้ว่าจะถูกตัดขา ผู้พิการยังคงควบคุมเสถียรภาพของสะโพกได้เช่นเดียวกับตอนที่ยังไม่ถูกตัดขา

จากรูป 2.3 เส้นหนาแสดงการย้ายของเส้น Load line บนขาเทียม เมื่อผู้พิการเพิ่มโมเมนต์รอบสะโพกในจังหวะ Heel contact การเพิ่มโมเมนต์รอบสะโพกช่วยรักษาการยึดออกของเข่าและขับให้เท้าแตะพื้น แม้ว่าการเปลี่ยนแปลงแรงปฏิกิริยาจากพื้นที่มีน้อย แต่การเปลี่ยนแปลงมุมของแรงปฏิกิริยาจากพื้นเช่นในขณะ Load line อยู่ด้านหน้าจุดหมุนของเข่าจะช่วยรักษาเสถียรภาพของเข่า และ Load line ไม่ได้ผ่านข้อต่อสะโพกเสมอไป แต่จะผ่านเมื่อไม่มี Hip moment เท่านั้น [8]



รูปที่ 2.3 แนว Load line ที่กระทำต่อขาในช่วงต่างๆ [8]

### 2.3 กลไกข้อเข่าของขาเทียม

ข้อเข่าเทียมถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลายาวนานจากลักษณะของข้อที่เพียงเหมือนข้อพับ (Hinge joint) ธรรมดา หรือเรียกว่ากลไกชนิดแกนหมุนเดียว (Single-axis) เมื่อก่อนสงครามโลกครั้งที่ 1 คือเป็นข้อที่รับน้ำหนักตัวได้ งอ-เหยียด เดินได้ แต่จังหวะความเร็วของการเดินมีเพียงจังหวะเดียว (One cadence) มาเป็นข้อที่มีความปลอดภัยสูงคือ ไม้งอพับได้ง่ายในช่วงแรก of Stance phase ซึ่งเรียกว่า Safety knee ซึ่งจะใช้พิจารณาเป็นหลักในที่นี่ กลไกที่มีอยู่ในปัจจุบันจะสามารถแบ่งออกเป็นประเภทหลักๆได้ 2 ประเภท คือ กลไกที่มีระบบไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้อง (Passive knee joint mechanism) และกลไกที่เป็นระบบทางกลเพียงอย่างเดียว (Active knee joint mechanism) โดยที่กลไก Passive knee joint นั้นจะมีระบบอิเล็กทรอนิกส์ช่วยในการควบคุมการเคลื่อนไหวซึ่งสามารถให้อิสระในการการเคลื่อนไหวที่ของผู้ใช้ได้มากกว่ากลไกแบบ Active ยกตัวอย่าง เช่น การเดินบนพื้นต่างระดับ การขึ้นลงบันได รวมถึงการออกกำลังกายเล่นกีฬา เป็นต้น ซึ่งทำให้ราคาของ Passive knee joint ที่ช่วยให้ผู้ใช้สามารถทำกิจกรรมได้หลากหลายมากขึ้นนั้นสูงมาก

ไปตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามลักษณะของกลไกใน Passive knee joint นั้นยังเป็นแบบแกนหมุนเดี่ยวอยู่ ดังรูปที่ 2.18 สำหรับ Active knee joint แล้วมีการออกแบบทั้งแกนหมุนเดี่ยว (Single Axis) และหลายแกนหมุน (Polycentric Knee Joint) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กลไกข้อเข่าแบบ Active knee joint ที่มีขายในท้องตลาด [3], [9]

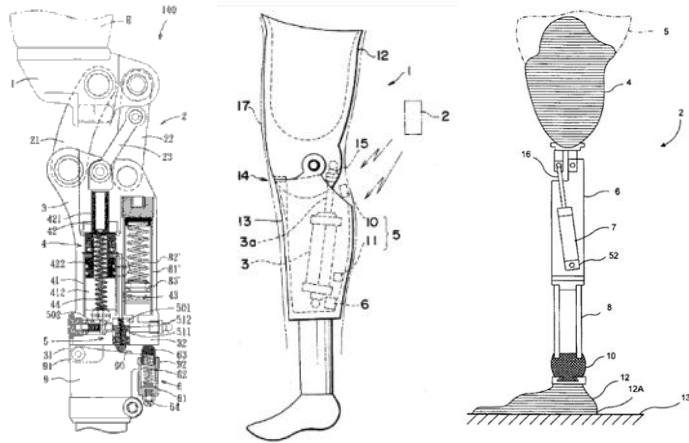


รูปที่ 2.5 กลไกข้อเข่าแบบ Passive knee joint ที่มีขายในท้องตลาด [3], [9]

สำหรับกลไกหลายแกนหมุน (Polycentric Knee Joint) ที่มีขายในท้องตลาดปัจจุบันนั้น นิยมเป็นแบบ Four-bar linkage หรือ Six-bar linkage เพราะนอกจากให้เส้นทางการเคลื่อนที่คล้ายธรรมชาติแล้ว ยังให้มุมข้อเข่า (Knee flexion angle) ที่ค่อนข้างมาก มีความมั่นคง มีเสถียรภาพที่ดี และให้การเดินที่เป็นธรรมชาติ โดยจะสามารถงอได้ประมาณ 160-170 องศา บางแบบมีระบบของไหลสำหรับปรับค่าความหน่วงในระหว่างการดีดกลับของกลไกข้อเข่า ข้อดีอีกข้อสำหรับกลไกหลายแกนหมุนคือในจังหวะ Swing phase จะมีช่องว่างระหว่างพื้นและเท้ามากขึ้นทำให้ลดโอกาสที่จะทำให้ผู้ใช้สะดุดหกล้มเนื่องจากสะดุดสิ่งกีด

อย่างไรก็ตามกลไกข้อเข่าของขาเทียมชนิดหลายจุดศูนย์กลาง (Polycentric knee joint) ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันก็ยังคงมีส่วนประกอบหลายชิ้นดังแสดงในรูปที่ 2.6 [10-12] ซึ่งแสดงตัวอย่างกลไกข้อเข่าของขาเทียมที่ได้จดสิทธิบัตรในต่างประเทศ ตัวกลไกมีความซับซ้อน มีชิ้นส่วนที่ต้องประกอบจำนวนมากหากต้องผลิตขึ้นใช้เอง และยากต่อการซ่อมแซมบำรุงรักษา จะเห็นได้ว่ากลไกข้อเข่าเทียมที่มีขายในท้องตลาดนั้นแม้จะมีให้เลือกหลากหลายตามความเหมาะสมของการทำงานของผู้ใช้แต่ละคน แต่ในส่วนของราคานั้นมีราคาที่สูงมาก ซึ่งเป็นปัญหาของผู้พิการที่ขาดโอกาสในประเทศอย่างมาก ส่วนขาเทียมเหนือเข่าในประเทศไทยที่มีคุณภาพ หรือข้อเข่าของขาเทียมโดยทั่วไปที่นำเข้าจากต่างประเทศนั้นมีราคาแพง เช่น ข้อเข่าของขาเทียมที่นำเข้าจากต่างประเทศดังรูปที่ 2.7 มีราคาประมาณ 70,000 บาท [3]



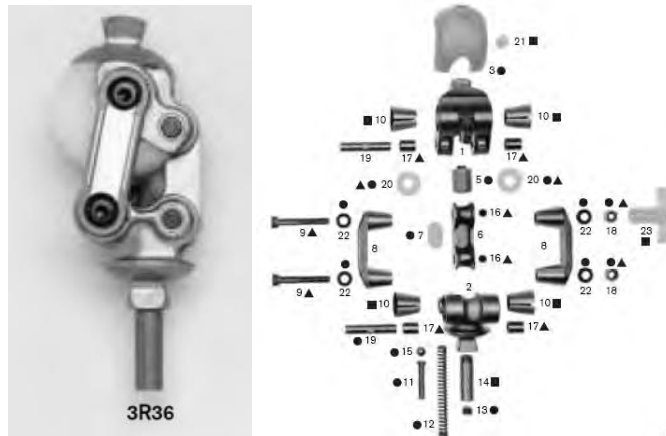


รูปที่ 2.6a [10]

รูปที่ 2.6b [11]

รูปที่ 2.6c [12]

รูปที่ 2.6 ตัวอย่างตัวอย่างกลไกข้อเข่าของขาเทียมที่ได้จดสิทธิบัตรในต่างประเทศ



รูปที่ 2.7 กลไกข้อเข่าของขาเทียมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย [3]

สำหรับงานวิจัยในประเทศที่เกี่ยวข้องกับขาเทียมนั้นมีจำนวนไม่มาก ตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ ดร.ชิต และคณะ เรื่องขาเทียมสำหรับคนพิการแบบปรับอัตราหมุนวงได้ [13] ซึ่งเป็นกลไกแบบแกนหมุนเดียว แต่ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์เข้ามาควบคุมการปรับอัตราหมุนวง ร่วมกับการใช้สปริง ซึ่งจะทำให้สามารถตอบสนองการเดินได้ในจังหวะความเร็วเดินที่หลากหลาย แต่อาจไม่เหมาะสมกับการใช้งานในสภาพที่ถูกรันดาร์ โดยกลไกมีรูปแสดงลักษณะของกลไกข้อเข่าดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ขาเทียมแบบปรับอัตราหมุนวงซึ่งควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์

กลไกข้อเข้าเทียมของมูลนิธิขาเทียม ในสมเด็จพระศรีนครินทราบรมราชชนนี [2] จะเป็นกลไกชนิดหลายแกนหมุน (Polycentric Knee Joint) แบบ Four-bar linkage ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กลไกข้อเข้าเทียมของมูลนิธิขาเทียมฯ

กลไกข้อเข้าเทียมซึ่งพัฒนาโดยบริษัท แอสเซียมเมทอล จำกัด ร่วมกับ เนคเทค/สวทช. [14] เป็นกลไกชนิดหลายแกนหมุน (Polycentric Knee Joint) แบบ Four-bar linkage ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กลไกข้อเข้าเทียมพัฒนาโดยบริษัท แอสเซียมเมทอล จำกัด ร่วมกับ เนคเทค/สวทช.

แนวโน้มการพัฒนากลไกข้อเข้าเทียมทางด้านความเรียบง่ายของกลไกแต่ยังคงใช้งานได้เป็นอย่างดีและไม่สร้างอาการบาดเจ็บให้กับผู้ใช้ซึ่งน่าจะเหมาะกับประเทศไทยยังไม่ค่อยมีปรากฏให้เห็นนัก อย่างไรก็ตามที่วิจัยห้องปฏิบัติการ Biomechanical Design and Manufacturing ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ร่วมกับองค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก ในพระบรมราชูปถัมภ์ จึงได้พัฒนากลไกข้อเข้าของขา (Prismatic Joint) จึงทำให้มีชิ้นส่วนหลัก (Linkage) ของกลไกเหลือน้อยเพียง 2 ชิ้น และชิ้นส่วนประกอบอื่น ๆ จำนวนน้อย ส่งผลให้กลไกมีความเรียบง่าย ง่ายต่อการผลิตและบำรุงรักษา ดังแสดงในรูปที่ 2.11 อย่างไรก็ตามหากได้ผ่านการทดสอบภาคสนามเพิ่มเติม จะช่วยให้กลไกดังกล่าว ซึ่งเป็นกลไกที่ออกแบบใหม่ และมีรูปแบบที่ไม่เหมือนกับกลไกอื่นๆ พบข้อควรแก้ไขและพัฒนาเพิ่มเติมตลอดจนสร้างความมั่นใจให้แก่ผู้ใช้ในการนำไปใช้งานจริงได้ยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.11 กลไกข้อเข้าเทียมโดยคณะวิศวฯ จุฬาฯ ร่วมกับองค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก

## 2.5 การทดสอบความแข็งแรงของกลไกข้อเข่าเทียม

### 2.5.1 การทดสอบความแข็งแรงของกลไกข้อเข่าเทียมในท่าเดิน

โดยยึดตามมาตรฐาน ISO 10328:2006 [15] ซึ่งการทดสอบความแข็งแรงของกลไกข้อเข่าเทียมในท่าเดินจะแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ Principal static load test และ Principal cyclic load test สำหรับจุดประสงค์หลักของการทดสอบทั้งสองประเภทเป็นดังนี้

1. Principal static load test เป็นการทดสอบความสามารถในการรับแรงของกลไก โดยแรงนั้นเป็นแรงที่มากที่สุดที่เป็นไปได้ซึ่งเกิดขึ้นจากกิจกรรมในชีวิตประจำวัน หลังจากผ่านการทดสอบนี้แล้วกลไกข้อเข่าต้องสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ดั้งเดิมและมีค่าเสียรูป (Deformation) น้อยกว่าเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด จึงจะผ่านการทดสอบประเภทนี้
2. Principal cyclic load test เป็นการทดสอบโดยเลียนแบบลักษณะของแรงที่กลไกข้อเข่าต้องได้รับจากการเดินตามปกติในธรรมชาติ ด้วยเหตุว่าแรงที่เกิดขึ้นในธรรมชาติในแต่ละรอบของการเดิน (Gait cycle) มีค่าเท่ากัน ดังนั้นการทดสอบนี้จึงสร้างแรงที่เป็นตัวแทนของแรงในธรรมชาติดังกล่าว หากกลไกข้อเข่าสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบก็จะสรุปได้ว่ากลไกข้อเข่าสามารถทนทานต่อความเสียหายเนื่องจากความล้าและมีอายุการใช้งานที่เหมาะสม

โดยที่แต่ละประเภทรูปแบบ (ทั้ง Principal static load test และ Principal cyclic load test) จะต้องทดสอบในสองท่าหลักที่ใช้รับแรงในการเดินคือจังหวะ Heel strike และจังหวะ Toe off ดังรูปที่ 2.12 และ รูปที่ 2.13 ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองท่านี้จะบอกถึงทิศทางของแรงที่จะส่งไปยังกลไกข้อเข่าเทียมในการทดสอบทั้งสองประเภท และแต่ละประเภทจะมีรายละเอียดของการทดสอบซึ่งจะกล่าวต่อไป

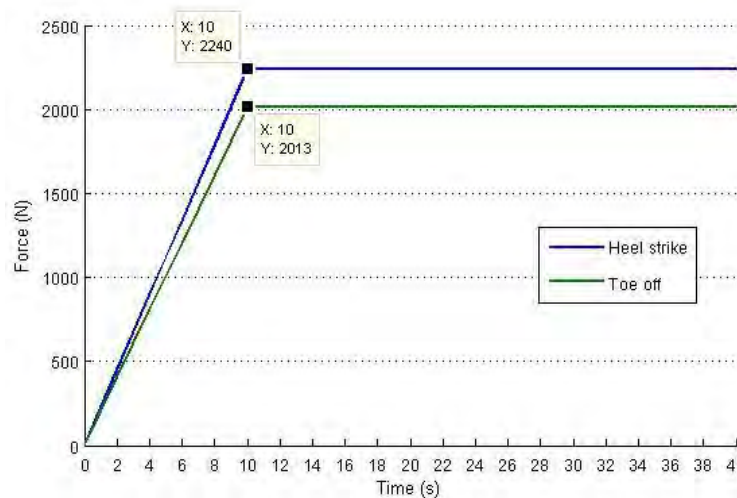


รูปที่ 2.12 ท่า Heel strike ใน Gait cycle ที่ใช้เป็นตัวแทนในการทดสอบความแข็งแรง



รูปที่ 2.13 ท่า Toe off ใน Gait cycle ที่ใช้เป็นตัวแทนในการทดสอบความแข็งแรง

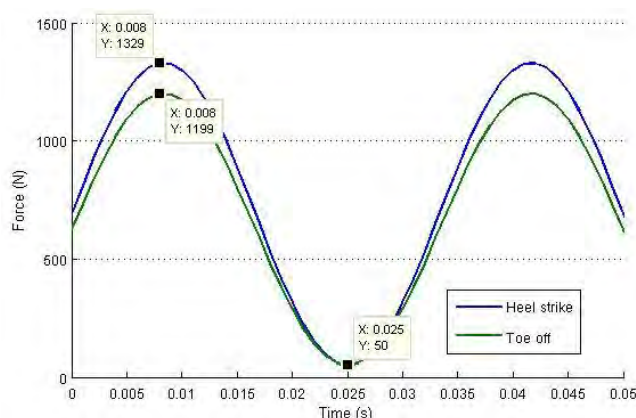
### 2.5.1.1 Principal static load test



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงลักษณะของแรงกดเทียบกับเวลาที่ใช้ใน Principal static load test ทั้งจังหวะ Heel strike และ Toe off

สำหรับการทดสอบความแข็งแรงนี้จะใช้แรงกดเป็นระยะเวลาหนึ่ง คือช่วงแรงจะเป็นการค่อยๆเพิ่มแรงกดจากศูนย์ไปจนถึงแรงกดที่มาตรฐานกำหนดภายในเวลา 10 วินาที จากนั้นออกแรงกดค้างไว้เป็นเวลา 30 วินาที โดยที่แรงกดและเวลาในการกดของทั้งจังหวะ Heel strike และ Toe off จะแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.14 หลังจากที้ออกแรงกดแล้วจึงวัดการเสียรูป (Deformation) ของกลไกหลังจากที่ไม่ใส่แรงกดและทำการวัดภายใน 5 นาที หากค่า Deformation นี้มีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนด (5 mm) และกลไกยังสามารถทำงานได้ตามปกติ โครงสร้างไม่เกิดความเสียหาย ก็จะได้ว่าผ่านการทดสอบ Static load test

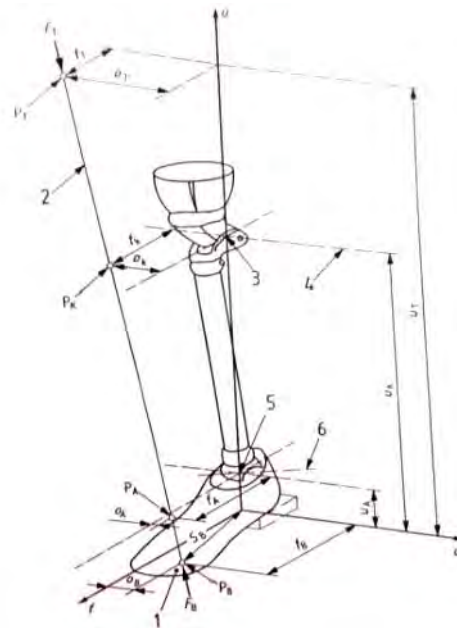
### 2.5.1.2 Principal cyclic load test



รูปที่ 2.15 กราฟแสดงลักษณะของแรงกดเทียบกับเวลาที่ใช้ใน Principal cyclic load test ทั้งจังหวะ Heel strike และ Toe off

การทดสอบนี้จะใส่แรงกดที่กลไกข้อเข่าแตกต่างกับประเภทก่อนหน้านี้คือแรงที่กดจะมีลักษณะเป็นแรงกระเพื่อมขึ้นลงด้วยฟังก์ชันไซน์ (Sine function) โดยมีรายละเอียดซึ่งแสดงได้เป็นกราฟในรูปที่ 2.15 และเนื่องจากการทดสอบนี้มีขึ้นเพื่อทดสอบความทนทานเนื่องความเสียหายจากความล้า ดังนั้นการที่จะผ่านการทดสอบนี้จะกลไกข้อเข่าต้องสามารถทำงานได้ตามปกติ โครงสร้างไม่เกิดความเสียหาย เมื่อทดสอบด้วยแรงดังกล่าวครบตามจำนวนคาบ (Number of cycles) ที่มาตรฐานได้กำหนดเอาไว้ (3,000,000 cycles)

### 2.5.2 การตั้งค่าทิศของแรงที่กระทำต่อกลไกข้อเข่าและเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ



รูป 2.16 การกำหนดทิศที่ออกแรงกระทำต่อกลไกข้อเข่าเทียมในการทดสอบความแข็งแรง

การกำหนดแนวแรงตามมาตรฐาน ISO 10328:2006 กำหนดไว้ จะกำหนดโดยอ้างอิงจากรูป โดยที่ตัวแปรหลักที่ใช้ในการกำหนดทิศจะกำหนดโดยการตั้งแกน  $f$  o  $u$  และจุดกำเนิดของพิกัดคือจุด 3 ในรูป และให้เส้นหมายเลข 4 ในรูปเป็นเส้นที่ลากผ่านจุด ICZV ของกลไก และเพื่อกำหนดทิศของแนวแรงจะใช้ตัวแปรสำหรับจังหวะ Heel strike และ จังหวะ Toe off ทั้งหมด 6 ตัวในแต่ละจังหวะก็จะได้แนวแรงในสามมิติที่กระทำต่อกลไกเข่าเทียมดัง

ตาราง

ตารางที่ 2.1 ระยะแนวแรงในสามมิติตามมาตรฐาน ISO 10328:2006

Offset	Plane	f axis (mm)	o axis (mm)	u axis (mm)
Heel strike	Top	82	-79	150
	Knee	52	-50	0
Toe off	Top	55	-40	150
	Knee	72	-35	0

### 3. การทดสอบความแข็งแรงของกลไกข้อเข่าเทียม

การตั้งค่าเครื่องมือทดสอบก่อนทำการทดสอบนั้นต้องประกอบกลไกข้อเข่าเทียมเข้ากับชิ้นส่วนที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการเปลี่ยนแนวแรงให้เป็นในทิศทางของแนวแรงที่มาตรฐานกำหนด ดังอธิบายในหัวข้อ 2.5 โดยที่ชิ้นส่วนเปลี่ยนแนวแรงนี้ได้ออกแบบสำหรับทำการทดลองทั้งจังหวะ Heel strike และ Toe off โดยที่แต่ละจังหวะจะมีการประกอบเข้ากับกลไกข้อเข่าเทียมดังแสดงในรูปที่ 3.1(a) และ 3.1(b) ตามลำดับเมื่อติดตั้งชุดทดสอบเข้าไปในเครื่องทดสอบไฮดรอลิกส์ก็จะได้การวางตัวที่คล้ายกับลักษณะของการเดินใน Gait cycle คือท่า Heel strike และ Toe off ดังรูปที่ 3.2 และ รูปที่ 3.3 ตามลำดับ

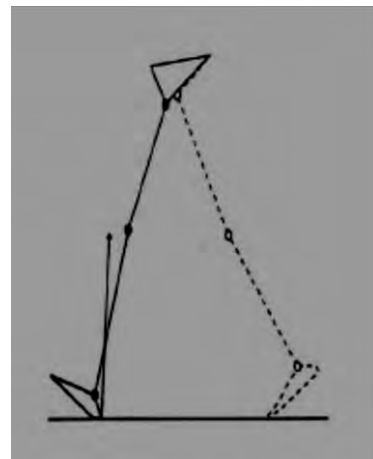


3.1(a) (Heel strike)

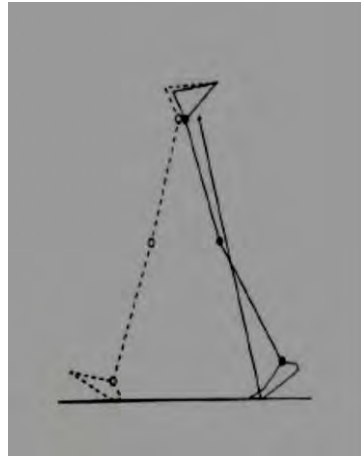


3.1(b) (Toe off)

รูปที่ 3.1 กลไกข้อเข่าเทียมเมื่อต่อกับตัวต่อที่ใช้ในการปรับทิศของแนวแรงให้เข้ากับทิศของแนวแรงที่มาตรฐานกำหนด

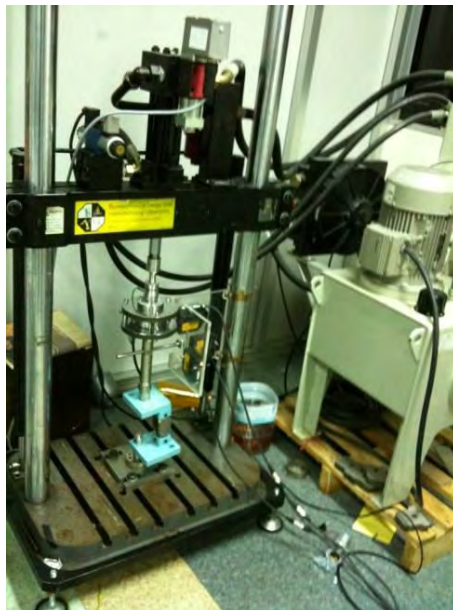


รูปที่ 3.2 กลไกข้อเข่าที่ติดกับเครื่องทดสอบและมีแนวแรงตามมาตรฐานในจังหวะ Heel strike



รูปที่ 3.3 กลไกข้อเข้าที่ติดกับเครื่องทดสอบและมีแนวแรงตามมาตรฐานในจังหวะ Toe off

เครื่องมือที่ใช้ทดสอบความแข็งแรงจะเป็นอุปกรณ์ออกแรงกดโดยใช้ระบบไฮดรอลิกส์ (Hydraulic) ที่สามารถสร้างแรงกดตั้งที่กล่าวมาแล้วได้ในทั้งจังหวะ Heel strike และ Toe off ทั้งนี้ การเสียรูป (Deformation) ที่เกิดขึ้นได้ใช้เซนเซอร์ (Sensors) แบบแสงเลเซอร์ในการวัดเพื่อความแม่นยำ โดยมีลักษณะเครื่องเป็นดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องมือไฮดรอลิกส์ที่ใช้ออกแรงกดในการทดสอบกลไกข้อเข้าเทียม

### 3.1 การตั้งค่าเครื่องมือทดสอบแรงกด

หลังจากที่ได้ออกแบบและสร้างกลไกข้อเข้าเทียม รวมไปถึงชิ้นส่วนต่างๆที่ใช้สำหรับการทดสอบความแข็งแรงของกลไกข้อเข้าเทียม จึงนำกลไกข้อเข้าเทียมที่ใส่ชิ้นส่วนที่สร้างขึ้น เพื่อเปลี่ยนแนวแรงให้เป็นแนวแรงตามที่มาตรฐานกำหนดไว้เรียบร้อยแล้ว มาติดตั้งเข้าไปในเครื่องทดสอบแรงกด ทั้งในจังหวะ Heel strike และ Toe off โดย ในส่วนของการควบคุมแรงกดได้เลือกใช้

คอมพิวเตอร์และการ์ดเก็บข้อมูล (Data acquisition card หรือ DAQ) ร่วมกับโปรแกรมแลปวิว (LabVIEW) ในการควบคุมระบบออกแรงไฮดรอลิกส์ให้ออกแรงตามที่ต้องการ



อุปกรณ์วัดระยะ  
ด้วยแสงเลเซอร์

รูปที่ 3.5 อุปกรณ์วัดระยะด้วยแสงเลเซอร์ที่ติดตั้งเพื่อใช้วัดค่ายุบตัวของกลไกข้อเหวี่ยง



รูปที่ 3.6 ลูกบาศก์ที่ติดอยู่กับก้านที่ยื่นออกมาจากตัวออกแรงกดเพื่อใช้ในการสะท้อนของแสงเลเซอร์ในการวัดระยะยุบตัวทั้งสามแกน

สำหรับ Principal Static load test นั้นต้องทำการควบคุมแรงในการทดสอบให้เป็นไปตามลักษณะของกราฟที่กล่าวไว้ข้างต้นในหัวข้อ 2.5 ของบทที่ 2 (รูปที่ 2.) คือให้แรงกดเริ่มต้นจากประมาณ 50 นิวตันจนถึงแรงกดที่กำหนดภายในเวลา 10 วินาที จากนั้นคงแรงกดนั้นไว้ 30 วินาที แล้วปล่อยแรงกดให้เหลือประมาณ 50 นิวตันเพื่อให้กลไกยังสามารถติดอยู่กับเครื่องทดสอบ มิฉะนั้นหากลดแรงให้เหลือ 0 นิวตันแล้วทั้งชิ้นส่วนกลไกอาจจะหลุดจากเครื่องทดสอบได้เพราะไม่มีแรงกด จากนั้นทำการวัดระยะเสียรูป (Deformation) ของกลไกข้อเหวี่ยง โดยที่อุปกรณ์ที่ใช้วัดระยะยุบตัวเป็นอุปกรณ์วัดระยะด้วยแสงเลเซอร์ ซึ่งมี 3 อันสำหรับการวัดค่ายุบตัวในแต่ละแกนดังรูปที่ แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณให้กลายเป็นค่ายุบตัวที่ต้องการ โดยที่การวัดระยะนั้นจะต้องวัดจากก้านที่ต่อออกมาจากตัวออกแรงกดกลไกข้อเหวี่ยงแล้วมีลูกบาศก์เพื่อสะท้อนแสงเลเซอร์สำหรับการวัดดังรูปที่



ในส่วนของ Principal cyclic load test นั้นแล้วสถานะสำคัญที่ต้องควบคุมระหว่างการทดสอบความแข็งแรงของกลไกข้อเท้าเทียม คือ แรงที่กระทำต่อกลไกข้อเท้า ให้มีค่าเป็นไปตามกราฟฟังก์ชันรูปไซน์ (Sine function waveform) ทั้งในจังหวะ Heel strike และจังหวะ Toe off ซึ่งขนาดของแรงนั้นเป็นไปตามกราฟในรูปที่ 2.1 คือออกแรงที่ความถี่ 30 Hz เป็นคลื่นทั้งหมด 3,000,000 รอบ โดยที่แต่ละรอบต้องควบคุมแรงไม่ให้เกินค่าที่กำหนด หลังจากนั้นจึงนำกลไกข้อเท้าที่ได้มาตรวจสอบความเสียหายโดยการทดสอบการงอของกลไก หากยังสามารถงอได้โดยไม่ติดขัดและไม่มีการเสียรูปทางเรขาคณิตที่สังเกตเห็นได้ชัดก็ถือว่ากลไกข้อเท้าเทียมสามารถทนต่อภาระแรงกระทำซ้ำและถือได้ว่าผ่านการทดสอบมาตรฐานในส่วน Principal cyclic test เป็นที่เรียบร้อย

### 3.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงของกลไกข้อเท้าเทียม

#### 3.2.1 ผลการทดสอบ Principal static load test

หลังจากที่ได้ใช้แรงที่กำหนดไว้ข้างต้นกระทำต่อกลไกข้อเท้าเทียมในทิศทางที่กำหนดไว้ทั้งจังหวะ Heel strike และ Toe off แล้ว จะได้ผลการทดสอบเป็นดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แรงกดที่ใช้ในการทดสอบแบบ Static load test ของกลไกข้อเท้าเทียมและ ค่าเสียรูปรวม (Deformation) ที่วัดได้

Principal static load test	แรงกระทำ (N)	ค่าเสียรูปมากที่สุด ตามที่มาตรฐานกำหนด (mm)	ค่าเสียรูปที่วัดได้(mm)
Heel strike	2240	5	0.48
Toe off	2013	5	0.84

#### 3.2.2 ผลการทดสอบ Principal cyclic load test

ในส่วนของ Principal cyclic load test นั้นจะต้องทดสอบด้วยแรงและความถี่ดังที่กล่าวมาก่อนหน้าได้ผลการทดสอบของทั้งสองจังหวะเป็นดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แรงกระทำที่ใช้ในการทดสอบ Cyclic load test และผลการทดสอบหลังจากออกแรงครบตามจำนวนรอบที่กำหนดไว้

Cyclic load test	แรงกระทำสูงสุด (N)	แรงกระทำต่ำสุด (N)	ความถี่ (Hz)	จำนวนรอบที่มาตรฐานกำหนด (Cycles)	การทำงานของกลไกหลังการทดสอบ
Heel strike	1330	50	30	3,000,000	ใช้งานได้
Toe off	1200	50	30	3,000,000	ใช้งานได้

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความแข็งแรงของกลไกจากทั้ง Principal Static load test และ Principal cyclic load test จึงสามารถสรุปได้ว่ากลไกข้อเท้าเทียมที่ได้ออกแบบนี้มีความแข็งแรงตามแนวทางของมาตรฐาน ISO 10328:2006 ซึ่งรับรองทั้งความเสียหายจากแรงกระทำสถิต (Static load) และแรงกระทำพลวัต (Dynamic load) ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้า (Fatigue damage) ทั้งในจังหวะ Heel strike และ Toe off ซึ่งเป็นจังหวะที่เกิดแรงกระทำมากที่สุดต่อกลไกข้อเท้าในขณะเดิน ดังนั้นแล้วกลไกข้อเท้านี้จึงมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะใช้ในชีวิตประจำวันได้อย่างมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ซึ่งกลไกที่ผ่านการทดสอบความแข็งแรงแล้วนี้จะได้นำไปผลิตเพื่อทำการทดสอบภาคสนาม ดังจะอธิบายถึงขั้นตอนการผลิตกลไกข้อเท้าของขาเทียมในบทที่ 4

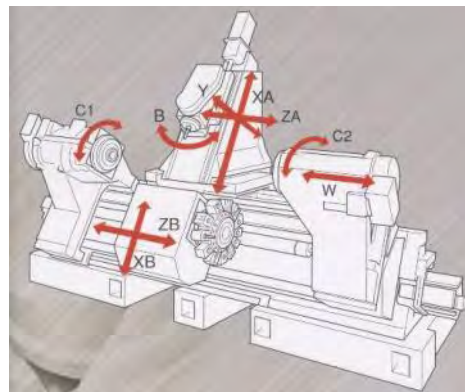
#### 4. การผลิตข้อเหวี่ยงของขาเทียมจำนวน 10 ชุด เพื่อนำไปทดสอบภาคสนาม

##### 4.1 เครื่องจักรหลักที่ใช้ในการผลิต

ในการผลิตข้อเหวี่ยงของขาเทียมสำหรับโครงการนี้ จะเริ่มต้นจากการนำวัสดุดิบ เช่น Stainless steel 316L มาตัดด้วยเครื่องตัดด้วยน้ำแรงดันสูง (Waterjet Cutting Machine) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ให้ได้รูปร่างใกล้เคียงกับชิ้นงานจริง จากนั้นจะนำมาผ่านขบวนการขึ้นรูปด้วยการเครื่องจักร CNC (Computer Numerical Controlled) คือ เครื่องจักรที่ใช้สำหรับกัด ก้อนวัสดุดิบ (Stock) ให้ได้รูปร่าง ตามแบบชิ้นงานที่ได้ออกแบบไว้แล้ว ในการผลิตข้อเหวี่ยงของขาเทียมสำหรับโครงการนี้ จะใช้ขบวนการขึ้นรูปด้วยการกลึง (Turning) และการกัด (Milling) เป็นหลัก โดยใช้เครื่องจักรที่สามารถขึ้นรูปได้ชิ้นงานได้ทั้งขบวนการกลึง และการกัด เรียกว่า Multi-Tasking Machine Tool ดังแสดงในรูปที่ ซึ่งเป็นเครื่องจักร CNC ที่มี 9 แกน ซึ่งจะส่งผลทำให้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานจากวัสดุดิบด้วยการกลึง และกัดจนเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ภายในเครื่องจักรเดียวกัน



รูปที่ 4.1 เครื่องตัดด้วยน้ำแรงดันสูง (Waterjet Cutting Machine)



รูปที่ 4.2 9-Axes Multitasking Machine Tool

รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของเครื่อง CNC แบบ Multi-tasking machine tool ชนิด 9 แกน โดยมีแกนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งอธิบายได้ดังต่อไปนี้

- หัวจับ Cutting Tools ด้านบน (Upper Turrets) จะสามารถเคลื่อนที่ได้ 4 แกน คือ แกน XA, Y, ZA และ B สามารถจับ Cutting tool ได้ทั้งแบบการกลึง (Turning) และ การกัด (Milling)

- หัวจับชิ้นงาน C1 (Head Stock) เป็นตัวจับชิ้นงานหลักอยู่ท้ายซ้ายของเครื่องสามารถหมุนชิ้นงานขณะทำการกลึง และสามารถ Indexing ชิ้นงานขณะทำการกัดได้
- หัวจับชิ้นงาน C2 (Head Stock) ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ในแกน W ได้อีก 1 แกน ทำให้สามารถเคลื่อนที่มาจับชิ้นงานเพื่อทำการ Machine อีกด้านได้ โดยไม่ต้องถอดใส่ชิ้นงาน
- ส่วนหัวจับ Cutting Tools ด้านล่าง (Lower Turrets) จะสามารถเคลื่อนที่ได้ 2 แกน คือ แกน XB และ แกน ZB ซึ่งหัวจับด้านล่างนี้จะช่วยประคองชิ้นงาน และช่วยกลึงชิ้นงานในเวลาเดียวกันกับหัวจับ Cutting Tools ด้านบน (Upper Turrets) ซึ่งจะทำให้สามารถลดเวลาในการ Machine ได้อย่างมาก

#### 4.2 การเตรียมวัสดุ (Materials)

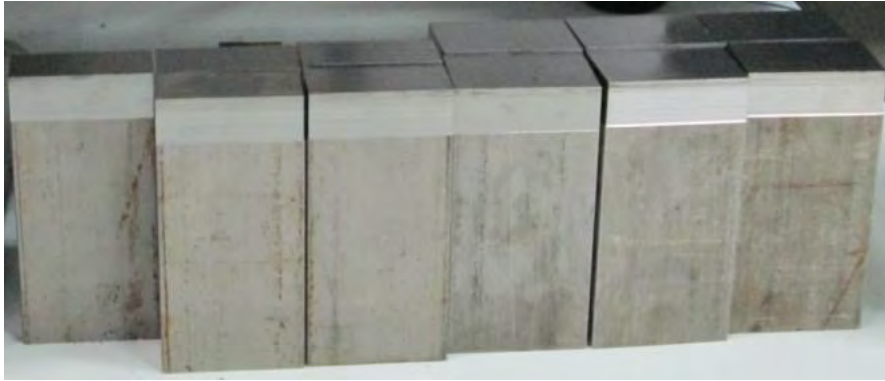
ข้อเข้าเทียมที่ทีมวิจัยได้พัฒนาขึ้นนั้น ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลัก (Linkage) ของกลไก 2 ชั้น ได้แก่ ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลักชั้นนอก (Case, No.1) และ ชิ้นส่วนหลักชั้นใน (Inner Body, No.2) และชิ้นส่วนประกอบอื่นๆ ดังแสดงด้วย No.3 ถึง No.8 ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ชิ้นส่วนหลักและชิ้นส่วนประกอบอื่นๆ ของข้อเข้าเทียมที่ทีมวิจัยได้พัฒนาขึ้น

ชิ้นส่วนหลักชั้นนอก ชิ้นส่วนหลักชั้นใน 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)

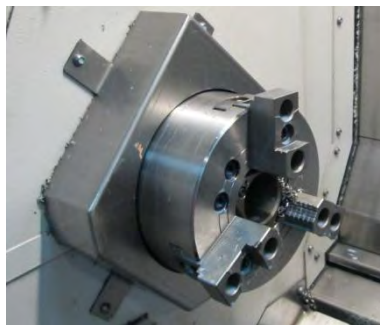
สำหรับชิ้นส่วนหลักชั้นนอก และชิ้นส่วนหลักชั้นในจะต้องมีการกัดเนื้อวัสดุออกมากที่สุด ดังนั้นเพื่อประหยัดเนื้อวัสดุให้ได้มากที่สุด จึงเลือกเตรียมก้อนวัตถุดิบ (Stock) สำหรับชิ้นส่วนหลักเป็นเพลาสแตนเลสหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังแสดงในรูปที่ 4.4 ที่มีขนาดหน้าตัดใกล้เคียงกับขนาดหน้าตัดของชิ้นงาน ส่วนความยาวของเพลาก็จะเตรียมความยาวเพื่อให้มากกว่าขนาดความยาวของชิ้นงานประมาณ 2 นิ้ว เพื่อสำหรับจับด้วย Chuck ของเครื่องจักร CNC และก้านอุปกรณ์จับยึด Cutting Tool (Tool Holder) ขนกับ Chuck ดังนั้นขนาดของวัสดุสำหรับชิ้นส่วนหลักชั้นนอกมีขนาดหน้าตัด 2"x4" ยาว 6" และขนาดของวัสดุสำหรับชิ้นส่วนหลักชั้นในมีขนาดหน้าตัด 1½"x3" ยาว 6"



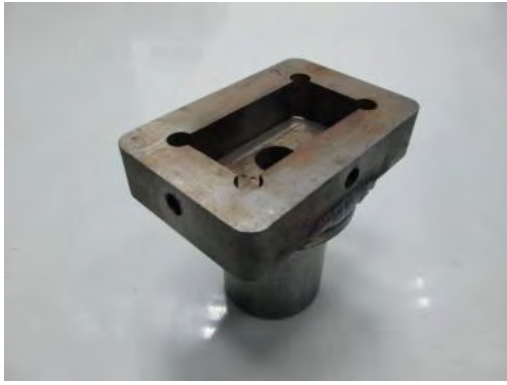
รูปที่ 4.4 สแตนเลสหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับชิ้นส่วนหลักชิ้นนอก และชิ้นส่วนหลักชิ้นใน

### 4.3 การออกแบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Jig-Fixture)

เนื่องจากวัสดุสำหรับชิ้นส่วนหลักทั้งสอง เป็นพลาสติกหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังแสดงในรูปที่ 4.2 แต่เครื่องจักรหลักที่ใช้ผลิตเป็นเครื่องจักร Multi-Tasking Machine Tool ชนิด 9 แกน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งมีการจับยึดชิ้นงานด้วย 3 Jaw Chuck ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ในลักษณะเดียวกันกับเครื่องจักร CNC Turning Machine ซึ่งเป็น Chuck สำหรับจับชิ้นงานเพลาทรงกระบอก ดังนั้นจึงต้องออกแบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Jig-Fixture) ให้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานนี้ได้ออกแบบให้มีด้านหนึ่งเป็นเพลาทรงกระบอก ส่วนอีกด้านทำในลักษณะเป็นร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับอัดชิ้นงานก่อนวัตถุดิบ (Stock) ที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกใส่เข้าไปให้แน่น ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งชิ้นงานก่อนวัตถุดิบ (Stock) ดังกล่าวเมื่อถูกอัดใส่ อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานแล้วจะสามารถนำเข้าไปจับยึดกับ 3 Jaw Chuck ของเครื่องจักร Multi-Tasking Machine Tool ได้



รูปที่ 4.5 3 Jaw Chuck



รูปที่ 4.6 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่ออกแบบขึ้น



รูปที่ 4.7 การอัดชิ้นงานที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าเข้ากับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

#### 4.4 การใช้เครื่องตัดด้วยน้ำแรงดันสูง (Waterjet Cutting Machine) เตรียมวัตถุดิบ

จากวัตถุดิบรูปทรงสี่เหลี่ยมตันดังกล่าวในหัวข้อ 4.3 หากนำขึ้นรูปด้วยเครื่องจักร CNC เพื่อให้รูปร่างชิ้นงานที่ต้องการเลย จะต้องเสียเวลาในการกัดเนื้อวัสดุส่วนที่ไม่ต้องการออกไปมาก และสิ้นเปลือง Cutting Tool มาก จึงนำวัตถุดิบดังกล่าวมาตัดด้วยเครื่องตัดด้วยน้ำแรงดันสูง (Waterjet Cutting Machine) ซึ่งสามารถตัดชิ้นงานในสองมิติ ให้ได้ก้อนวัตถุดิบที่มีรูปร่างใกล้เคียงกับชิ้นงานจริง (Near Net Shape Stock) ดังแสดงในรูปที่ 4.8





รูปที่ 4.8 การใช้เครื่องตัดด้วยน้ำแรงดันสูง (Waterjet Cutting Machine) เตรียมวัตถุดิบ

#### 4.5 การออกแบบการผลิตด้วย CAM (Computer-Aided-Manufacturing)

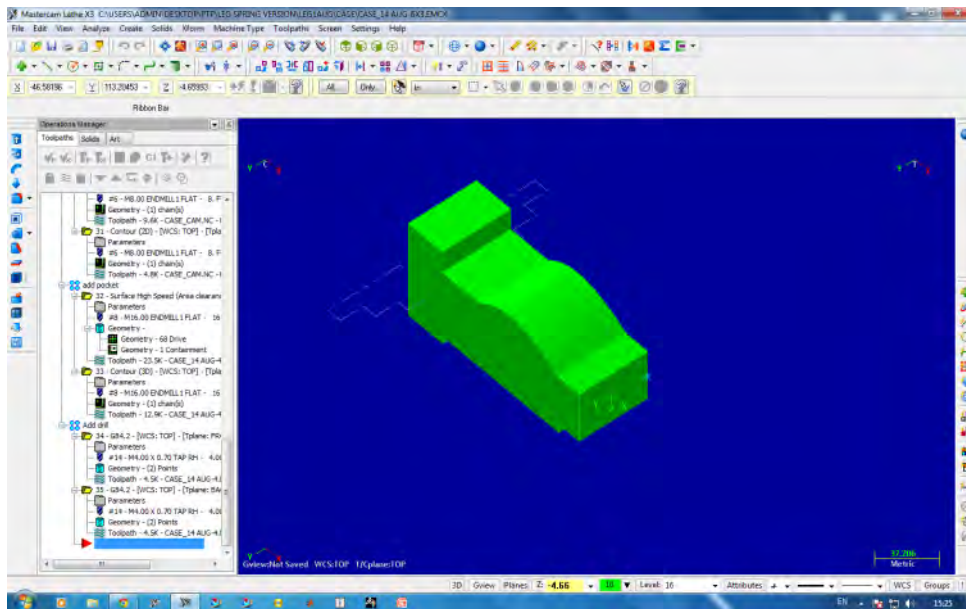
CAM (Computer-Aided-Manufacturing) เป็นการใช้อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต ซึ่งจะใช้ซอฟต์แวร์เพื่อควบคุมเครื่องจักร ให้สามารถสร้างชิ้นงานได้ตามที่ได้ออกแบบรูปร่างด้วย CAD (Computer-Aided-Design) ไว้แล้ว ระบบการใช้อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิตนี้ จะมีซอฟต์แวร์สำหรับงาน CAM ซึ่งมีคุณสมบัติ ได้แก่

- รับข้อมูล 3 มิติจากซอฟต์แวร์ CAD
- เลือก Tool หรือ หัวกัดชิ้นงาน ตามขนาดที่ต้องการ กำหนด การกัดงานด้วยรูปแบบต่างๆ ได้แก่ การกัดหยาบ, กัดละเอียด
- ทดสอบการกัดชิ้นงาน บนจอภาพเพื่อตรวจสอบก่อนการกัดงานจริง
- สร้าง G-code ซึ่งเป็นรหัสเพื่อบอกให้เครื่องจักรทำงานตามขั้นตอนที่กำหนดไว้ได้ถูกต้อง

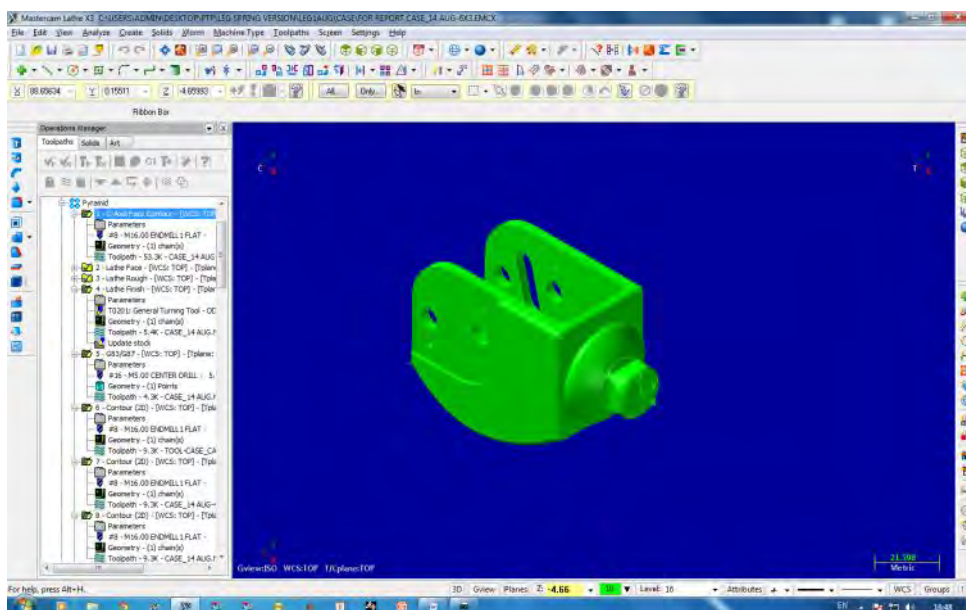
สำหรับโครงการนี้ซอฟต์แวร์ CAM ที่ใช้คือ Mastercam และซอฟต์แวร์ CAD ที่ใช้คือ CATIA โดยจะกล่าวถึงเฉพาะการออกแบบการผลิตด้วย CAM สำหรับชิ้นส่วนหลักนอก และชิ้นส่วนหลักใน ดังต่อไปนี้

#### 4.5.1 การออกแบบการผลิตด้วย CAM สำหรับชิ้นส่วนหลักนอกประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

##### 4.5.1.1 รับข้อมูล 3 มิติจากซอฟต์แวร์ CAD ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 ข้อมูล 3 มิติของก้อนวัตถุดิบของชิ้นส่วนหลักขึ้นนอกจากซอฟต์แวร์ CAD

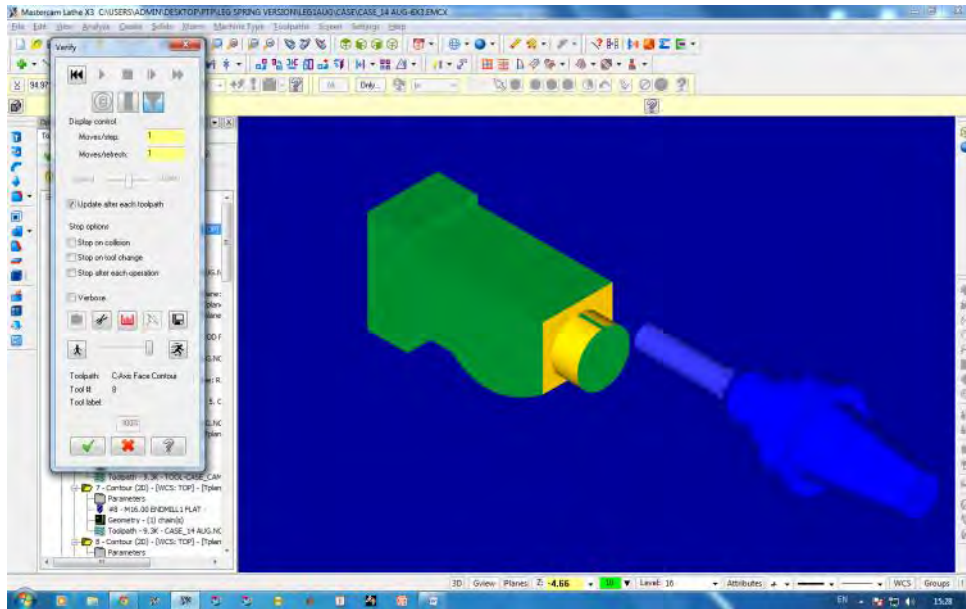


รูปที่ 4.10 ข้อมูล 3 มิติของชิ้นส่วนหลักขึ้นนอก (Case) จากซอฟต์แวร์ CAD

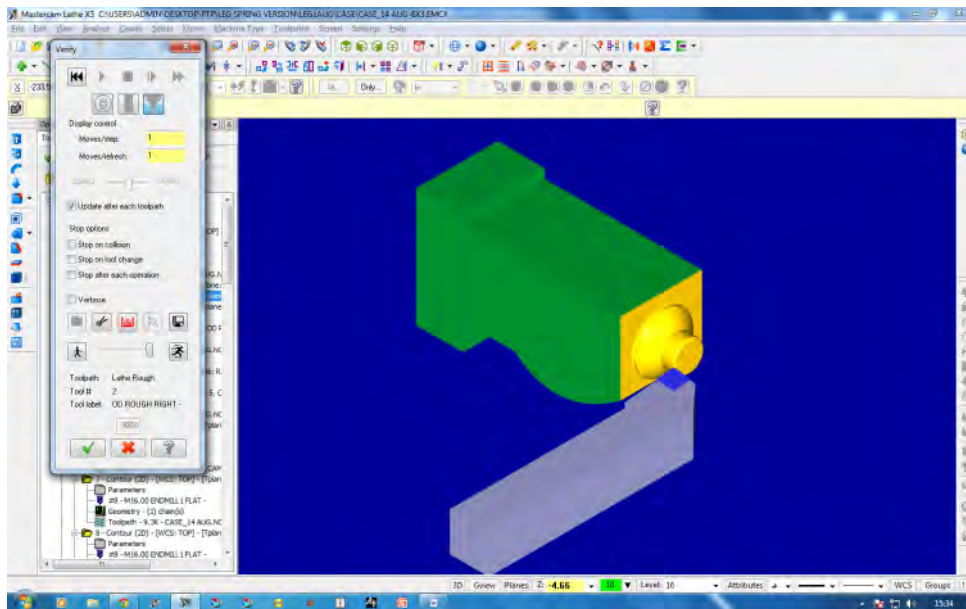
##### 4.5.1.2 ขึ้นรูปส่วนหัว หรือส่วนปริมาตรของชิ้นงาน ด้วยการใช้ออกมิลลิ่งกัดหยาบดอกใหญ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ซึ่งยึดด้วยหัวจับ Cutting Tools ด้านบน (Upper Turrets) กัดส่วนหัว



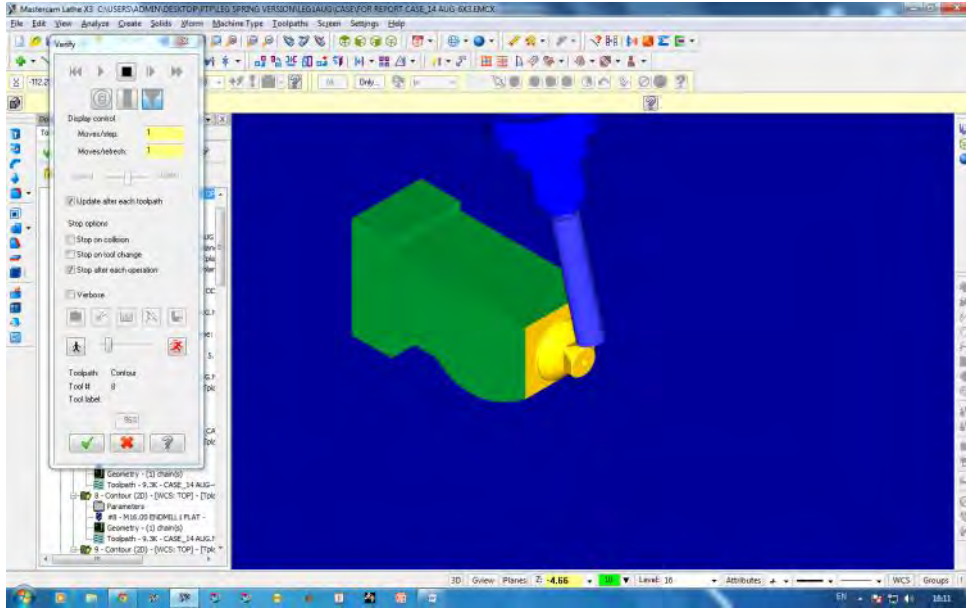
ให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 4.11 ก่อนที่จะใช้มีดกลึง ซึ่งยึดด้วยหัวจับ Cutting Tools ด้านล่าง (Lower Turrets) กลึงส่วนหัวให้ได้รูปร่างดังแสดงในรูปที่ 4.12 แล้วจึงใช้ดอกมีดลึง กัดหยาบดอกใหญ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ซึ่งยึดด้วยหัวจับ Cutting Tools ด้านบน (Upper Turrets) เอียงทำมุมกัดเพื่อกัดส่วนหัวของชิ้นงานให้เป็นรูปร่างปิรามิด ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.11 การใช้ดอกมีดลึงกัดหยาบกัดส่วนหัวให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอก

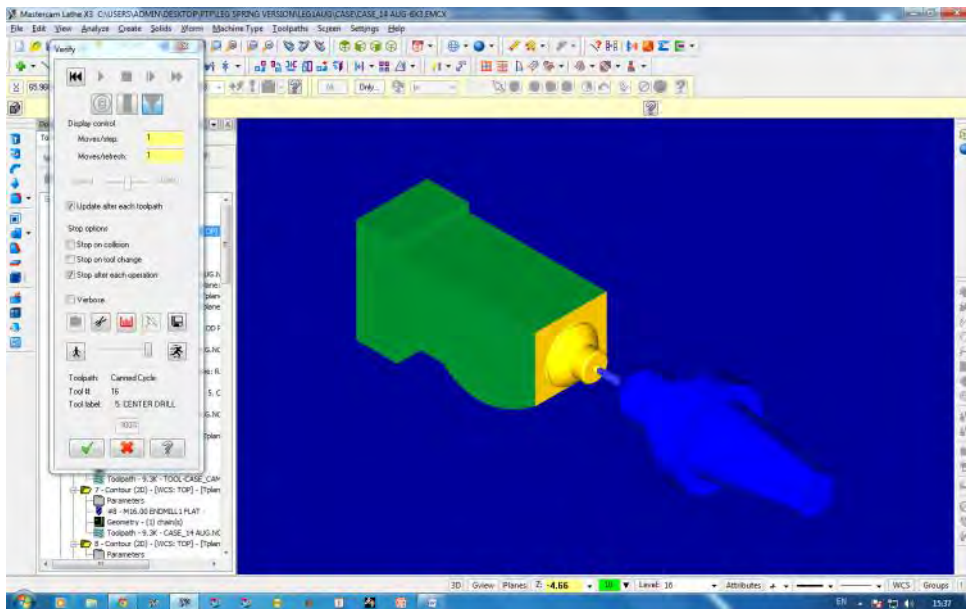


รูปที่ 4.12 การใช้มีดกลึงกลึงส่วนหัว



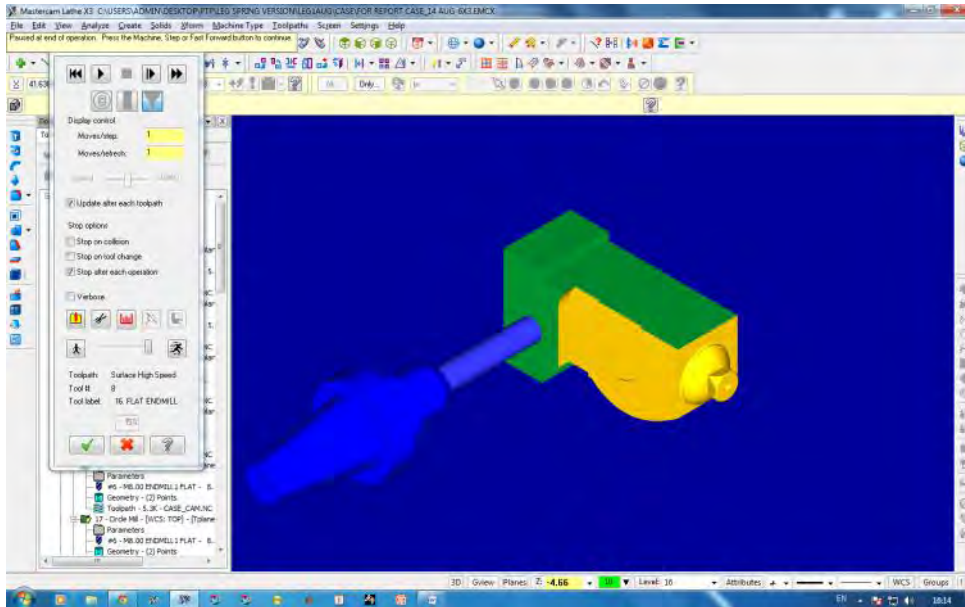
รูปที่ 4.13 การใช้ดอกมิลลิ่งเอียงทำมุมกัดเพื่อกัดส่วนหัวของชิ้นงานให้เป็นรูปร่างปิรามิด

4.5.1.3 เจาะรูนำศูนย์ที่ปลายหัวปิรามิดดังแสดงในรูปที่ 4.14 แล้วใช้ตัวยันศูนย์ท้าย (Tail Stock) ซึ่งยึดด้วยหัวจับ Cutting Tools ด้านล่าง (Lower Turrets) ยันศูนย์ชิ้นงานดังแสดงตัวอย่างการยันศูนย์ชิ้นงานในระหว่างกัดขึ้นรูปในรูปที่ 4.32 การยันศูนย์ดังกล่าวจะช่วยลดการสั่นระหว่างการกัดขึ้นรูปชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานที่กัดขึ้นรูปได้ขนาดแม่นยำตามที่ออกแบบไว้



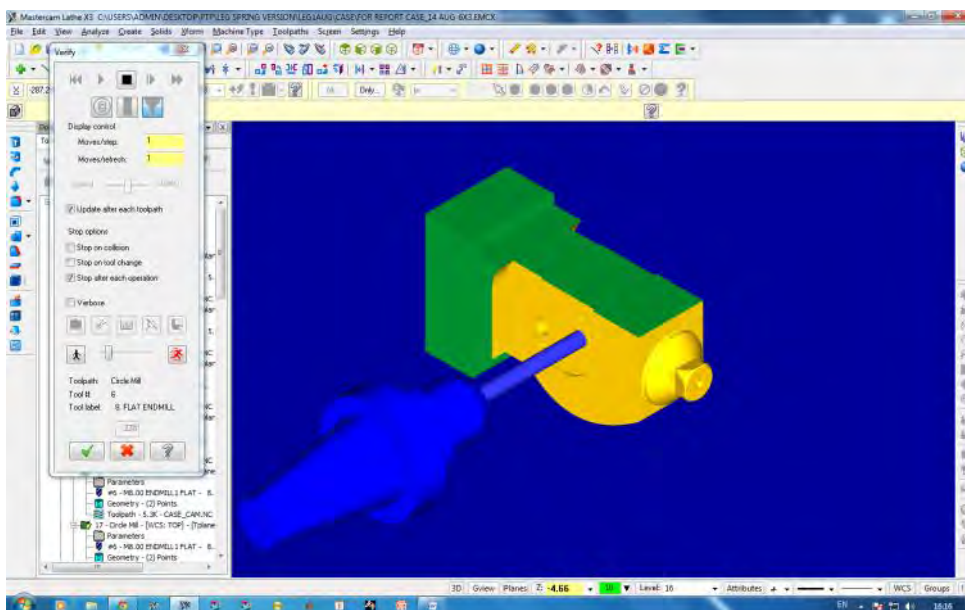
รูปที่ 4.14 การเจาะรูนำศูนย์ที่ปลายหัวปิรามิด

4.5.1.4 กัดเนื้อชิ้นงานด้านข้างทั้งสองด้านออก ด้วยการใช้ออกมิลลิ่งกัดหยาดอกใหญ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.15



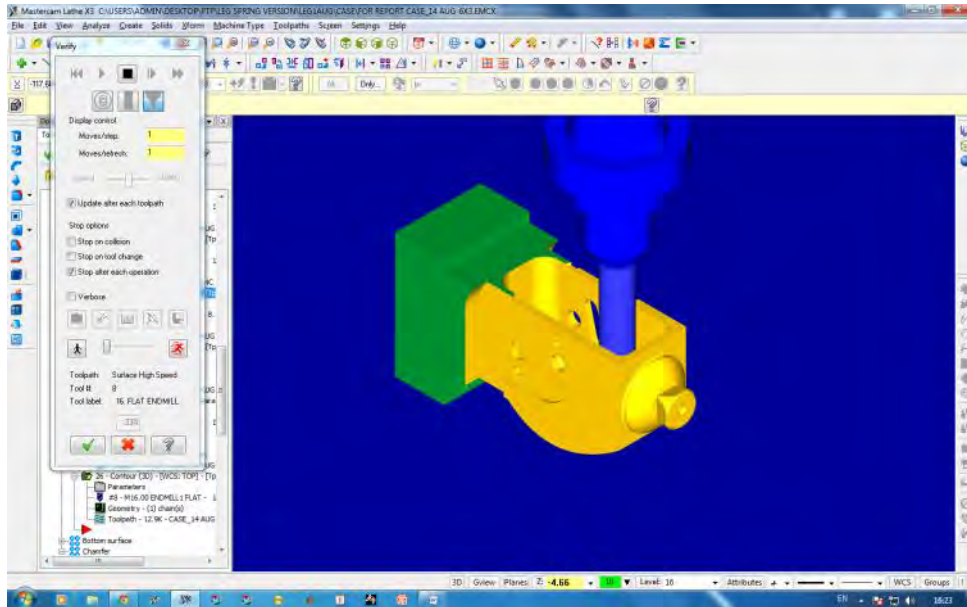
รูปที่ 4.15 การกัดเนื้อชิ้นงานด้านข้างทั้งสองด้านออก

4.5.1.5 เจาะรู ตีแปเกลียว ที่ผิวด้านข้างของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และใช้ดอกมิลลิ่งกัดละเอียดดอกเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรกัดผิวด้านข้าง ด้วยการทำให้ Circular Milling ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ให้ได้ Tolerance 50 ไมครอน สำหรับสวมสลัก (Pin)



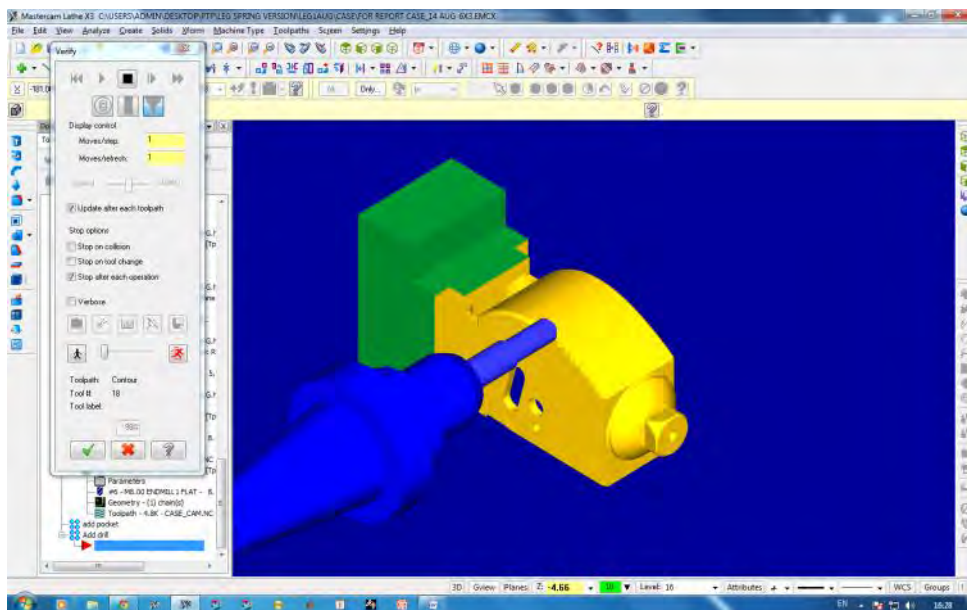
รูปที่ 4.16 การเจาะรู ตีแปเกลียว และการทำ Circular Milling ที่ผิวด้านข้างของชิ้นงาน

4.5.1.6 ขุดเนื้อวัสดุด้วยการทำ Pocket ด้วยการใช้อุปกรณ์กัดหยาบดอกใหญ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.17



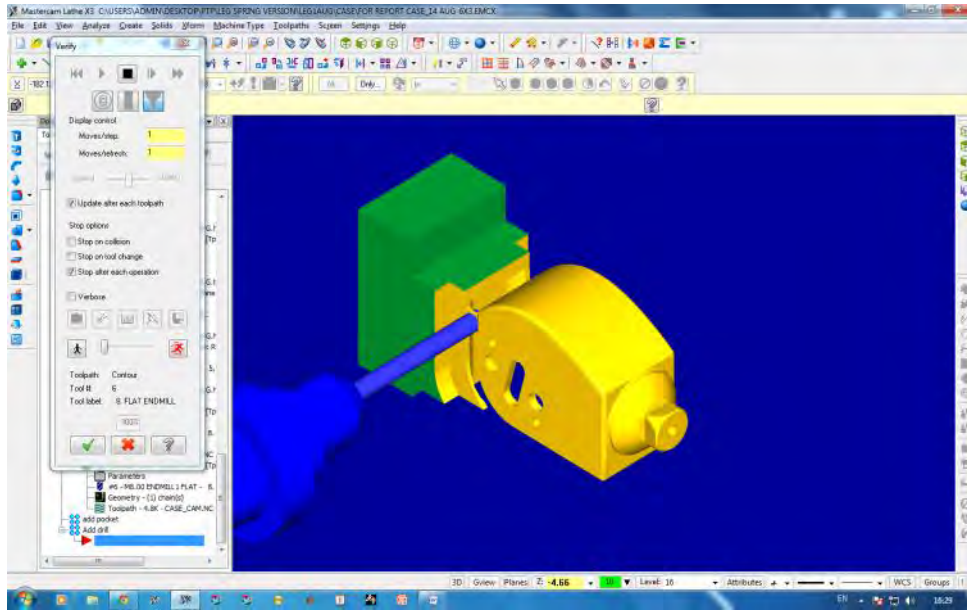
รูปที่ 4.17 การขุดเนื้อวัสดุด้วยการทำ Pocket

4.5.1.7 ทำขอบมนของชิ้นงานด้วยการใช้ดอกกัด Fillet เติน contour รอบขอบชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ทำขอบมนของชิ้นงานด้วยการใช้ดอกกัด Fillet

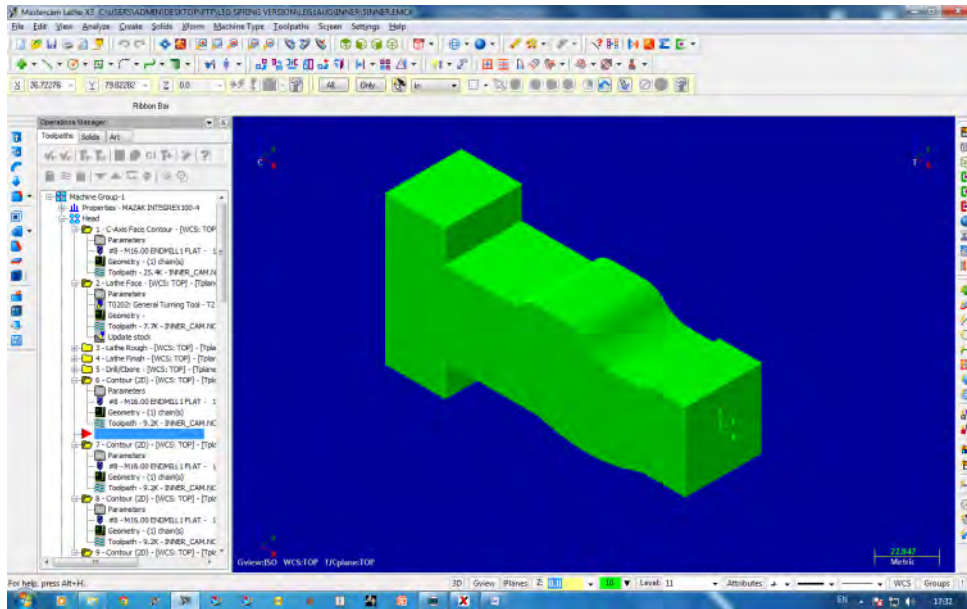
4.5.1.8 ตัดชิ้นงานออกจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ด้วยการใช้ดอกมิลลิ่งกัดหยาบดอกเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร เติน contour จนกระทั่งชิ้นส่วนหลักขึ้นนอกรูปร่างของอุปกรณ์จับยึด ซึ่งจะได้ชิ้นส่วนหลักขึ้นนอกที่กัดขึ้นรูปแล้วดังแสดงในรูปที่ 4.19



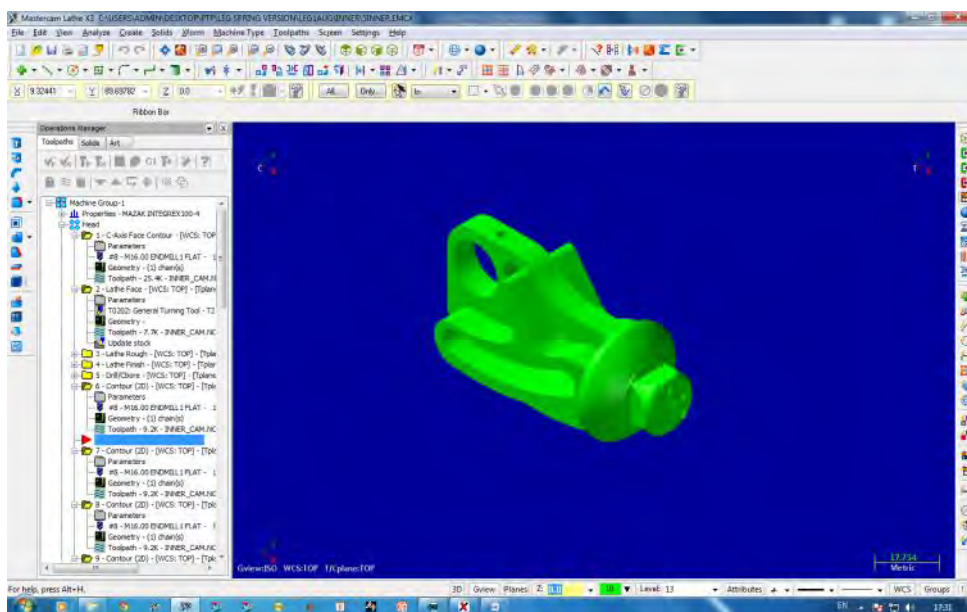
รูปที่ 4.19 การตัดชิ้นงานออกจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

## 4.5.2 การออกแบบการผลิตด้วย CAM สำหรับชิ้นส่วนหลักในประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

### 4.5.2.1 รับข้อมูล 3 มิติจากซอฟต์แวร์ CAD ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21



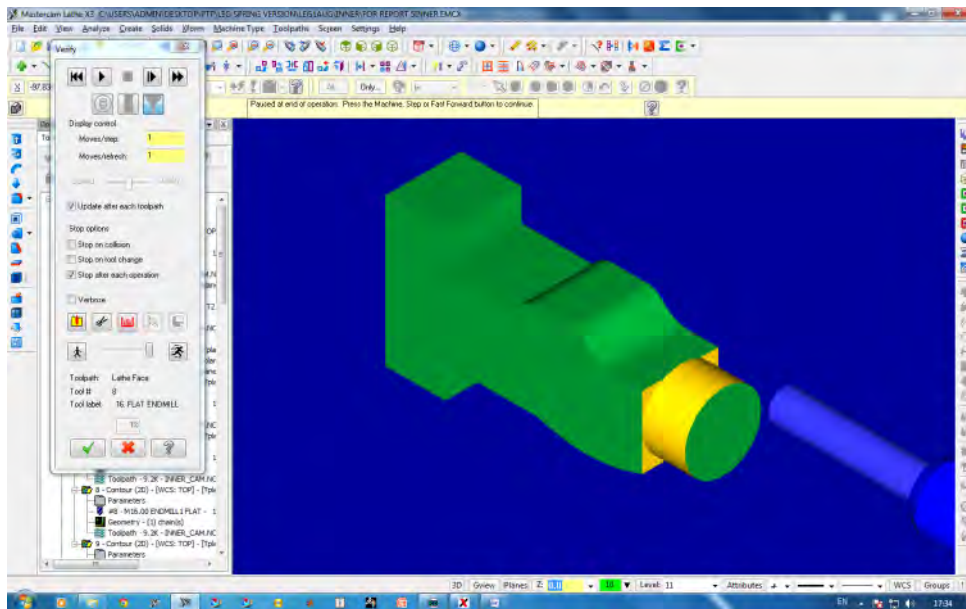
รูปที่ 4.20 ข้อมูล 3 มิติของก้อนวัตถุดิบของชิ้นส่วนหลักชิ้นในจากซอฟต์แวร์ CAD



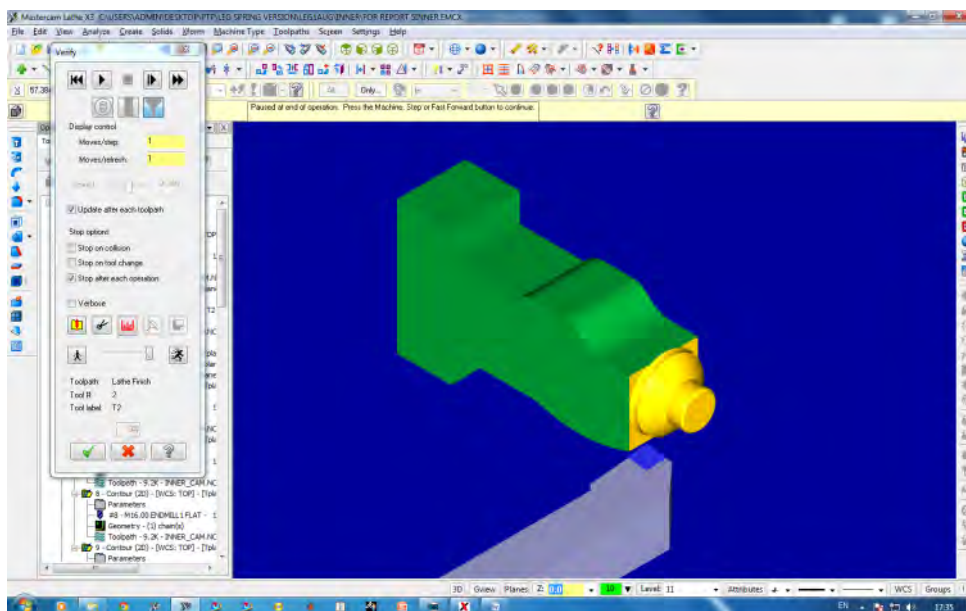
รูปที่ 4.21 ข้อมูล 3 มิติของชิ้นส่วนหลักชิ้นใน (Inner Body) จากซอฟต์แวร์ CAD

4.5.2.2 ขึ้นรูปส่วนหัว หรือส่วนปริมาตรของชิ้นงาน ด้วยการใช้ดอกมิลลิ่งกัดหยาบดอกใหญ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ซึ่งยึดด้วยหัวจับ Cutting Tools ด้านบน (Upper Turrets) กัดส่วนหัว

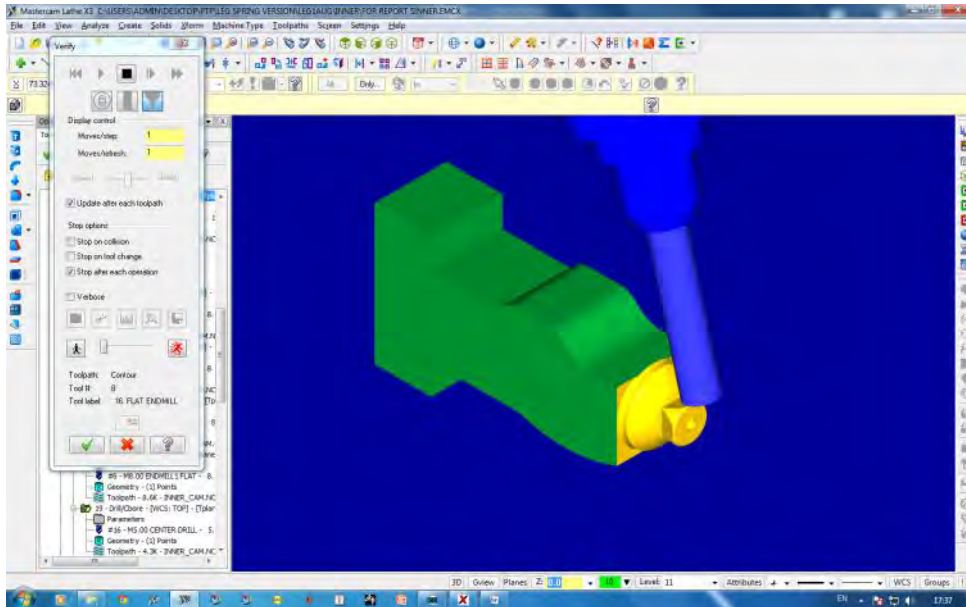
ให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 4.22 ก่อนที่จะใช้มีดกลึง ซึ่งยึดด้วยหัวจับ Cutting Tools ด้านล่าง (Lower Turrets) กลึงส่วนหัวให้ได้รูปร่างดังแสดงในรูปที่ 4.23 แล้วจึงใช้ดอกมีดลึง กัดหยาบดอกใหญ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ซึ่งยึดด้วยหัวจับ Cutting Tools ด้านบน (Upper Turrets) เอียงทำมุมกัดเพื่อกัดส่วนหัวของชิ้นงานให้เป็นรูปร่างปิรามิด ดังแสดงในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.22 การใช้ดอกมีดลึงกัดหยาบกัดส่วนหัวให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอก

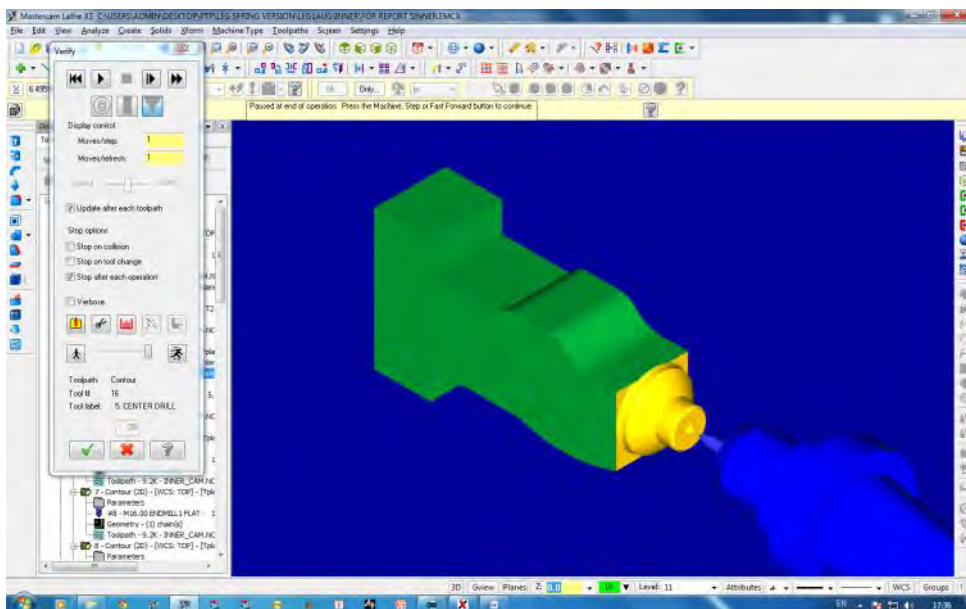


รูปที่ 4.23 การใช้มีดกลึงกลึงส่วนหัว



รูปที่ 4.24 การใช้ดอกมิลลิ่งเอียงทำมุมกัดเพื่อกัดส่วนหัวของชิ้นงานให้เป็นรูปร่างปิรามิด

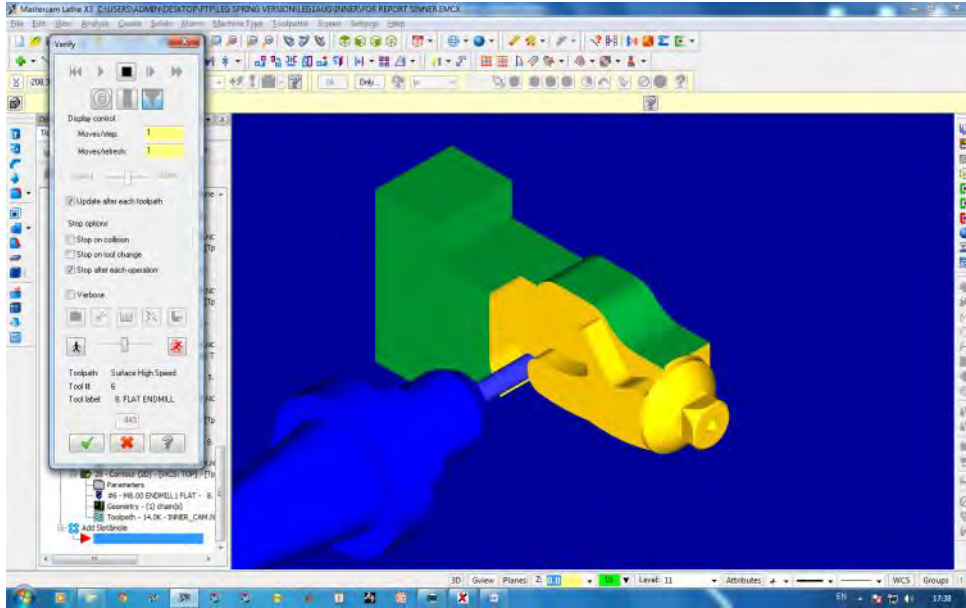
4.5.2.3 เจาะรูนำศูนย์ที่ปลายหัวปิรามิดดังแสดงในรูปที่ 4.25 แล้วใช้ตัวยันศูนย์ท้าย (Tail Stock) ซึ่งยึดด้วยหัวจับ Cutting Tools ด้านล่าง (Lower Turrets) ยันศูนย์ชิ้นงาน การยันศูนย์ดังกล่าวจะช่วยลดการสั่นระหว่างการกัดขึ้นรูปชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานที่กัดขึ้นรูปได้ขนาดแม่นยำตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ 4.25 การเจาะรูนำศูนย์ที่ปลายหัวปิรามิด

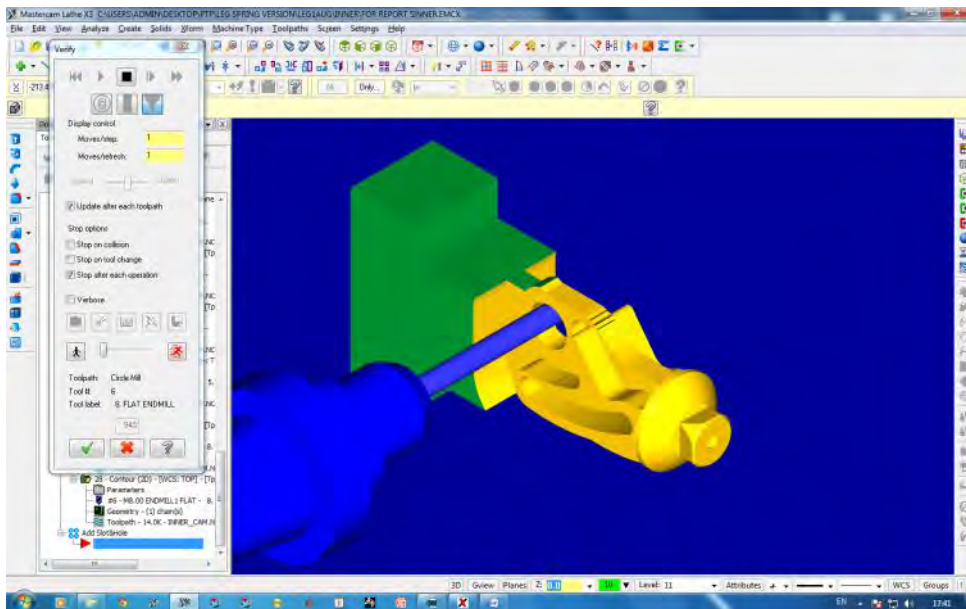
4.5.2.4 กัดเนื้อชิ้นงานด้านข้างทั้งสองด้านออก ด้วยการใช้ดอกมิลลิ่งกัดหยาบดอกเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.26





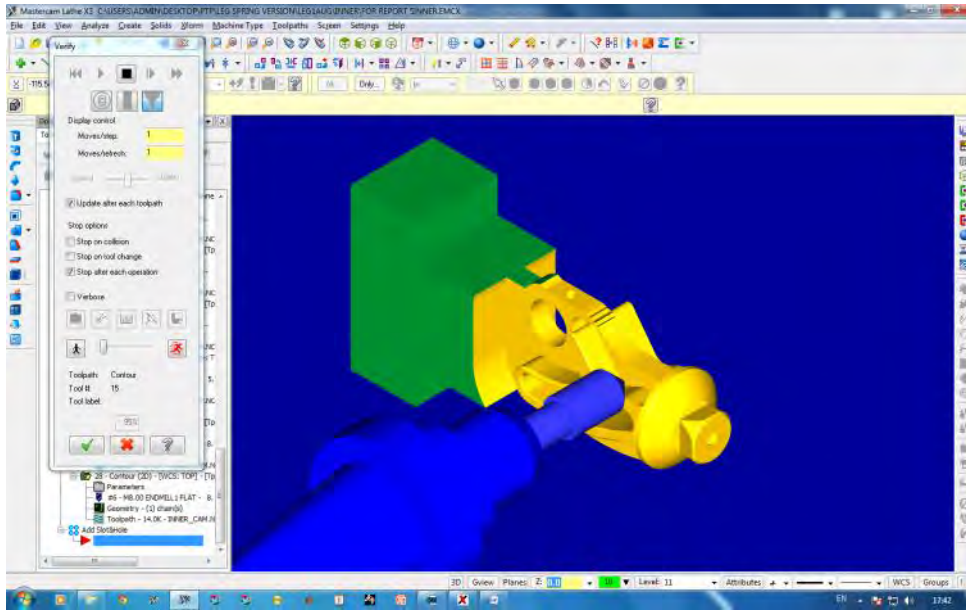
รูปที่ 4.26 การกัดเนื้อชิ้นงานด้านข้างทั้งสองด้านออก

4.5.2.5 ใช้ดอกมิลลิ่งกัดละเอียดดอกเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรกัดร่อง (Slot) ที่ผิวด้านข้างของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ให้ได้ Tolerance 50 ไมครอน สำหรับสวมสลัก (Pin) และทำ Circular Milling เพื่อเป็นช่องสำหรับใส่เพลาสสำหรับสปริง (Spring Shaft)



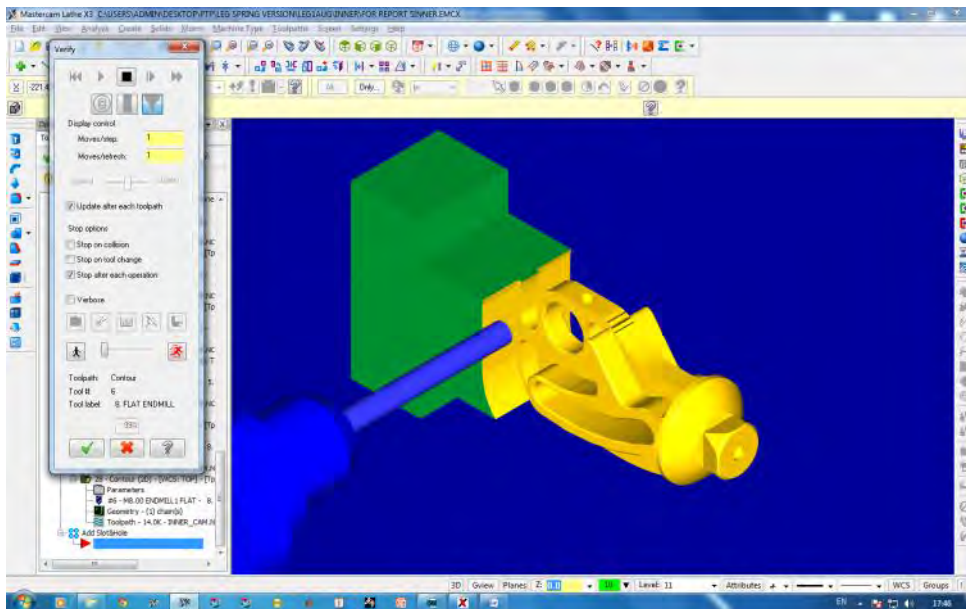
รูปที่ 4.27 การกัดร่อง (slot) และการทำ Circular Milling ที่ผิวด้านข้างของชิ้นงาน

4.5.2.6 ทำขอบ chamfer ของชิ้นงานด้วยการใช้ดอกกัด chamfer เเดิน contour รอบขอบชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 การทำ Chamfer

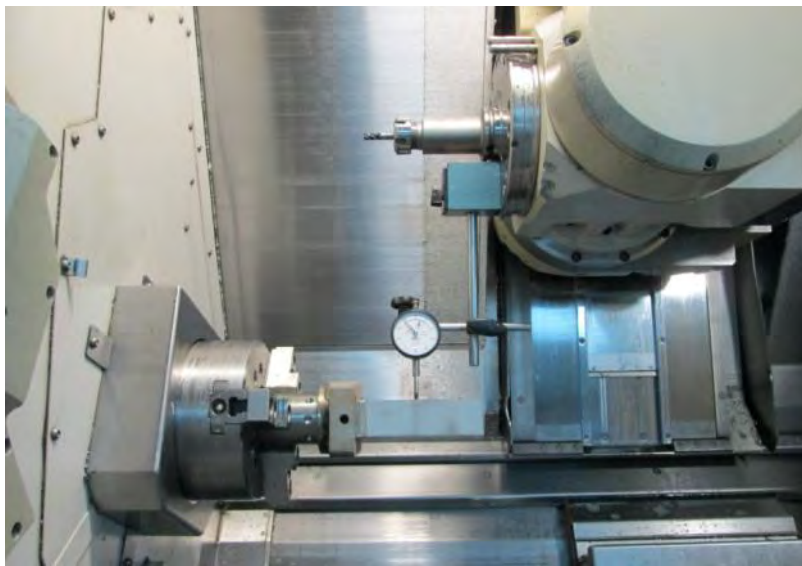
4.5.2.7 ตัดชิ้นงานออกจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ด้วยการใช้ดอกมิลลิ่งกัดหยาบดอกเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรเดิน contour จนกระทั่งชิ้นส่วนหลักขึ้นนอกระยะจากอุปกรณ์จับยึด ซึ่งจะได้ชิ้นส่วนหลักขึ้นในที่เกิดขึ้นรูปแล้วดังแสดงในรูปที่ 4.29



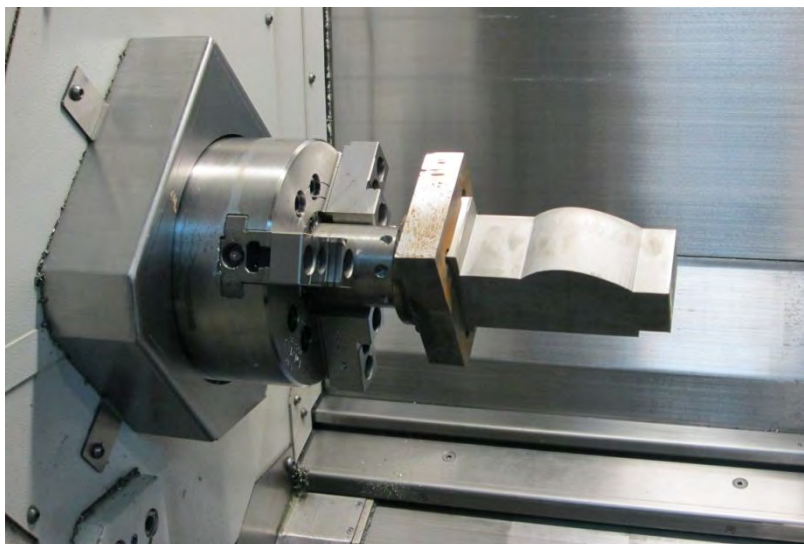
รูปที่ 4.29 การตัดชิ้นงานออกจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

#### 4.6 การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องจักร CNC

หลังจากที่ได้ออกแบบการผลิตด้วย CAM สำหรับชิ้นส่วนหลักชิ้นนอกและชิ้นส่วนหลักชิ้นใน ทุก Operations ดังแสดงในหัวข้อ 4.5 แล้วจึงให้ซอฟต์แวร์สำหรับงาน CAM สร้าง G-code ซึ่งเป็นรหัสเพื่อบอกให้เครื่องจักร CNC ทำงานตามขั้นตอนทุก Operations ที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งก่อนที่จะให้จะเดินเครื่องจักร CNC ทำงานตามรหัส G-code ที่สร้าง จะต้องมีการตั้งระดับของก้อนวัตถุดิบ (Near Net Shape Stock) ซึ่งถูกยึดเข้า 3 Jaw Chuck ด้วยเครื่องมือ Dial Gauge ดังแสดงในรูปที่ 4.30 หลังจากตั้งระดับชิ้นงานแล้วจึงทำการขึ้นรูปชิ้นงาน ดังแสดงตัวอย่างก่อนและหลังขึ้นรูปชิ้นงาน ชิ้นส่วนหลักชิ้นนอกด้วยเครื่องจักร CNC ในรูปที่ 4.31 และ 4.32 และตัวอย่างก่อนและหลังขึ้นรูปชิ้นงานชิ้นส่วนหลักชิ้นในด้วยเครื่องจักร CNC ในรูปที่ 4.33 และ 4.34



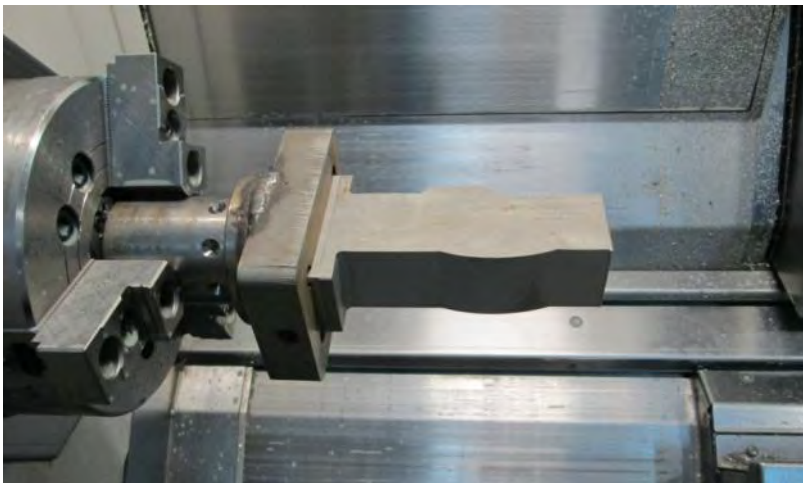
รูปที่ 4.30 การตั้งระดับก้อนวัตถุดิบ (Near Net Shape Stock) ด้วยเครื่องมือ Dial Gauge



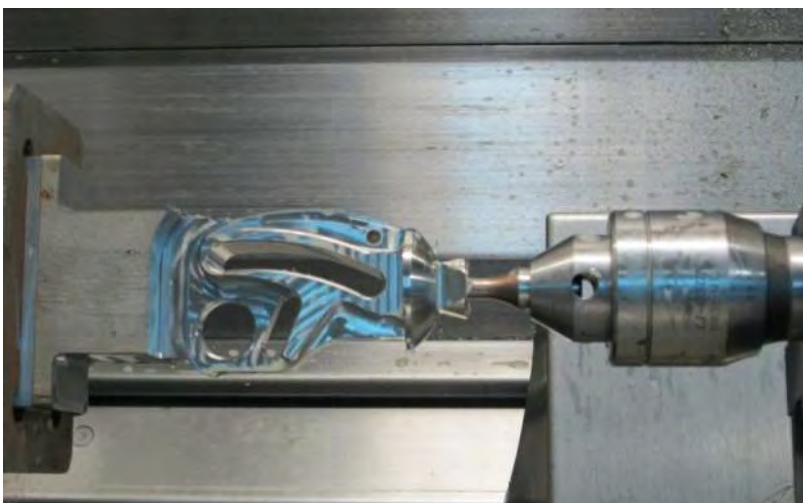
รูปที่ 4.31 ก้อนวัตถุดิบ (Near Net Shape Stock) ของชิ้นส่วนหลักชิ้นนอก



รูปที่ 4.32 ชิ้นส่วนหลักชิ้นนอกหลังขึ้นรูปด้วยเครื่องจักร CNC



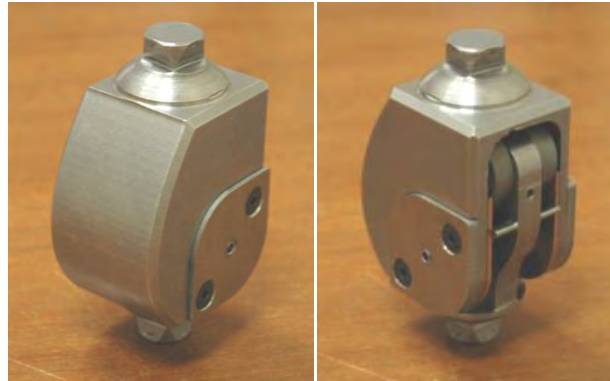
รูปที่ 4.33 ก้อนวัตถุดิบ (Near Net Shape Stock) ของชิ้นส่วนหลักชิ้นใน



รูปที่ 4.34 ชิ้นส่วนหลักชิ้นในหลังขึ้นรูปด้วยเครื่องจักร CNC

#### 4.7 กลไกข้อเข่าของขาเทียมที่ผลิตและประกอบ

สุดท้ายเมื่อผลิตชิ้นส่วนทุกชิ้นครบจึงนำมาประกอบกันเป็นกลไกข้อเข่าเทียมดังแสดงในรูปที่ 4.35 ส่วนของปริมาตรที่ด้านหัว และท้ายของกลไกเมื่อนำไปยึดเข้ากับเบ้าและหน้าแข้งของขาเทียมแล้วจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.36 ซึ่งพร้อมที่จะนำไปทดสอบภาคสนามกับอาสาสมัครผู้พิการขาขาดต่อไป



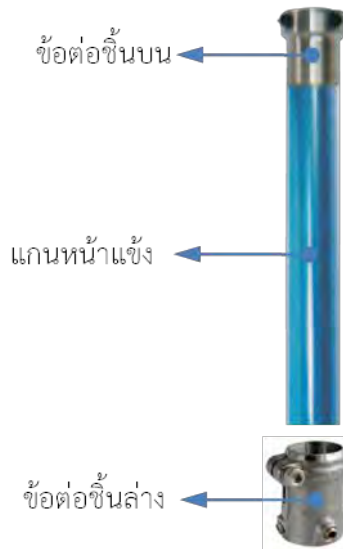
รูปที่ 4.35 กลไกข้อเข่าของขาเทียมที่ผลิตขึ้น



รูปที่ 4.36 กลไกข้อเข่าของขาเทียมเมื่อประกอบเข้ากับเบ้า หน้าแข้ง และเท้า

## 5. ระบบชุดข้อต่อและแกนหน้าแข็งของขาเทียม

ข้อต่อและแกนหน้าแข็งของขาเทียม (Tube Adapters) ที่นำเข้าจากต่างประเทศจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.1 กล่าวคือมีข้อต่อ 2 อัน และแกนหน้าแข็ง 1 อัน โดยข้อต่อชั้นบนใช้สำหรับต่อแกนหน้าแข็งเข้ากับหัวปิรามิดของข้อเท้าเทียมหรือเท้า และข้อต่อชั้นล่างสำหรับต่อแกนหน้าแข็งเข้ากับปิรามิดของเท้าเทียม



รูปที่ 5.1 ระบบชุดข้อต่อและแกนหน้าแข็งของขาเทียม

ข้อต่อชั้นบนและแกนหน้าแข็งจะประกอบสำเร็จเข้าด้วยกัน เวลาใช้จะต้องตัดท่ออลูมิเนียมของแกนหน้าแข็งทิ้งไปบางส่วนให้เข้ากับความสูงของผู้พิการทำให้เสียวัสดุไปโดยเปล่าประโยชน์ และนอกจากนี้จากการสอบถามจากหน่วยงานของรัฐ เช่น โรงพยาบาลทหารผ่านศึก ซึ่งมีการแจกจ่ายชุดข้อต่อและหน้าแข็งที่นำเข้าจากต่างประเทศให้กับผู้พิการอยู่ก่อนแล้วพบว่าหากข้อต่อที่จะพัฒนาขึ้นใหม่สามารถใช้ได้กับแกนหน้าแข็งนำเข้าที่แจกจ่ายให้กับผู้พิการไปแล้ว ก็จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการที่จะต้องซื้อชุดข้อต่อและแกนหน้าแข็งทั้งชุดไปได้ โดยมีความต้องการให้ข้อต่อชั้นบนสามารถใช้กับข้อเท้าของขาเทียมบางรุ่นที่มีชิ้นส่วนของสปริงยื่นออกนอกตัวข้อดังแสดงในรูปที่ 5.2 และต้องการให้ข้อต่อชั้นล่างสามารถใช้ประแจเหลี่ยมเพื่อคลายข้อต่อจากภายนอกได้ง่าย และตำแหน่งยึดระหว่างข้อต่อชั้นล่างและเท้าเทียมไม่เสียไป เพื่อความสะดวกแก่นักกายอุปกรณ์ในการจัดตำแหน่งของเท้าสำหรับผู้พิการ



รูปที่ 5.2 ข้อเท้าของขาเทียมบางรุ่นที่มีชิ้นส่วนของสปริงยื่นออกนอกตัวข้อ

เมื่อนำแกนหน้าแข็งของขาเทียมที่นำเข้าจากต่างประเทศมาวัดขนาดดู พบว่าวัสดุเป็นอลูมิเนียมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 30 มม. และมีเส้นผ่านศูนย์กลางรูในประมาณ 25.7 มม. ส่วนท่ออลูมิเนียมเกรด 6061 ซึ่งเป็นท่ออลูมิเนียมความแข็งแรงสูงกว่าท่ออลูมิเนียมเกรดอื่นที่ผลิตขายภายในประเทศ และสามารถหาซื้อได้ง่าย มีขนาดใกล้เคียงที่ผ่านศูนย์กลางนอก 31.75 มม. (1”2/8”) และมีเส้นผ่านศูนย์กลางรูในประมาณ 25.7 มม.

จะเห็นว่าแกนหน้าแข็งอลูมิเนียมที่นำเข้า และท่ออลูมิเนียมที่ขายในประเทศมีเส้นผ่านศูนย์กลางรูในขนาดเท่ากัน แต่เส้นผ่านศูนย์กลางนอกมีขนาดไม่เท่ากัน ดังนั้นข้อต่อที่ออกแบบหากต้องการให้สามารถใช้ได้ทั้งกับท่ออลูมิเนียมในประเทศ และแกนหน้าแข็งที่นำเข้าแล้ว จะต้องออกแบบให้มีลักษณะสอดเข้าไปในรูในของท่อ ไม่ใช่ลักษณะรัดเข้ากับเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของท่อ ดังแบบข้อต่อชิ้นล่างที่มีขายในต่างประเทศในรูปที่ 5.1

### **แนวความคิดในการออกแบบระบบชุดข้อต่อ และแกนหน้าแข็งของขาเทียม**

จากข้อมูลดังกล่าวเบื้องต้นจึงมีแนวความคิดในการออกแบบดังนี้ คือ

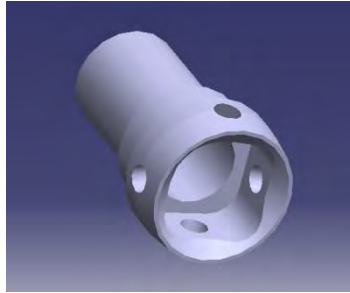
1 ข้อต่อที่ออกแบบ ต้องสามารถใช้ได้กับแกนหน้าแข็งอลูมิเนียมที่นำเข้าจากต่างประเทศได้ เนื่องจากชุดข้อต่อชิ้นบนและแกนหน้าแข็งที่นำเข้าจะประกอบสำเร็จเข้าด้วยกัน เวลาใช้จะต้องตัดท่ออลูมิเนียมของแกนหน้าแข็งทิ้งไปบางส่วนให้เข้ากับความสูงของผู้พิการ ซึ่งแกนหน้าแข็งที่ตัดทิ้งไปหลายชิ้นยังมีความยาวเพียงพอที่จะนำมาใช้กับผู้พิการคนอื่นได้

2 ข้อต่อชิ้นบน ต้องออกแบบให้มีช่องว่างตรงกลางกว้างพอที่จะให้สปริงของข้อเท้าเทียมบางรุ่นที่มีชิ้นส่วนของสปริงยื่นออกนอกตัวข้อต่อลอดทะลุผ่านได้

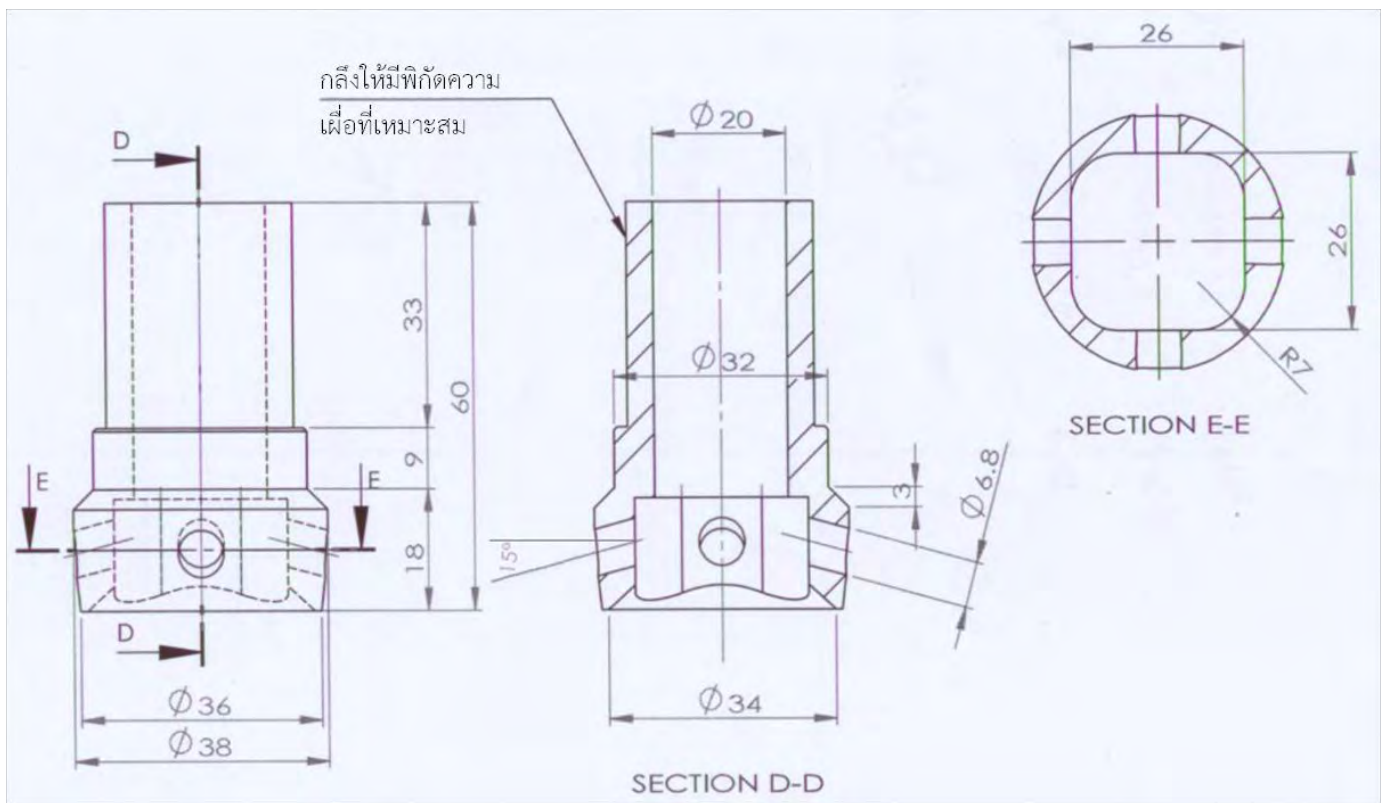
3 ข้อต่อชิ้นล่างสำหรับต่อแกนหน้าแข็งเข้ากับปริมิตของเท้าเทียม ต้องออกแบบให้มีกลไกที่สามารถไขเพื่อคลายข้อต่อจากภายนอกได้ง่าย และตำแหน่งยึดระหว่างข้อต่อและเท้าเทียมไม่เสียไป เพื่อความสะดวกแก่นักกายอุปกรณ์ในการจัดตำแหน่งของเท้าสำหรับผู้พิการ

## 6. การออกแบบข้อต่อชั้นบน : ระบบชุดข้อต่อและแกนหน้าแข็งของขาเทียม

จากแนวคิดในการออกแบบดังแสดงในบทที่ 5 จึงได้ออกแบบให้ข้อต่อชั้นบนถูกกลึงให้มีพิคัดความเพื่อ (Tolerancing) ที่เหมาะสมในการสวมอัดเข้ากับแกนหน้าแข็ง โดยมีลักษณะของข้อต่อดังแสดงในรูปที่ 6.1 และรายละเอียดแบบวิศวกรรม ดังแสดงในรูป 6.2



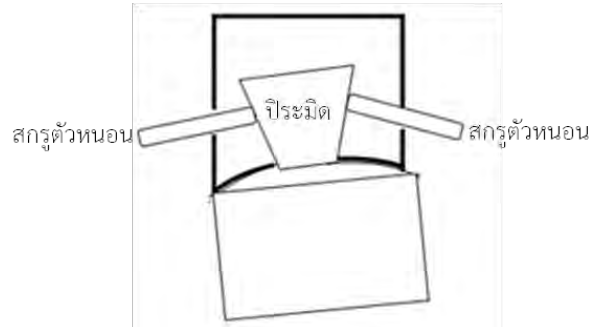
รูปที่ 6.1 ข้อต่อชั้นบนที่ออกแบบ



รูปที่ 6.2 แบบวิศวกรรมของข้อต่อชั้นบน

จากแบบวิศวกรรมของข้อต่อชั้นบน จะเห็นว่าการเจาะรูเพื่อตัดเกลียวทำมุม 15 องศา เพื่อใส่สกรูตัวนอนยึดกับปิรามิดของข้อเข้าเทียมซึ่งทำมุม 15 องศา ดังแสดงการยึดในรูปที่ 6.3

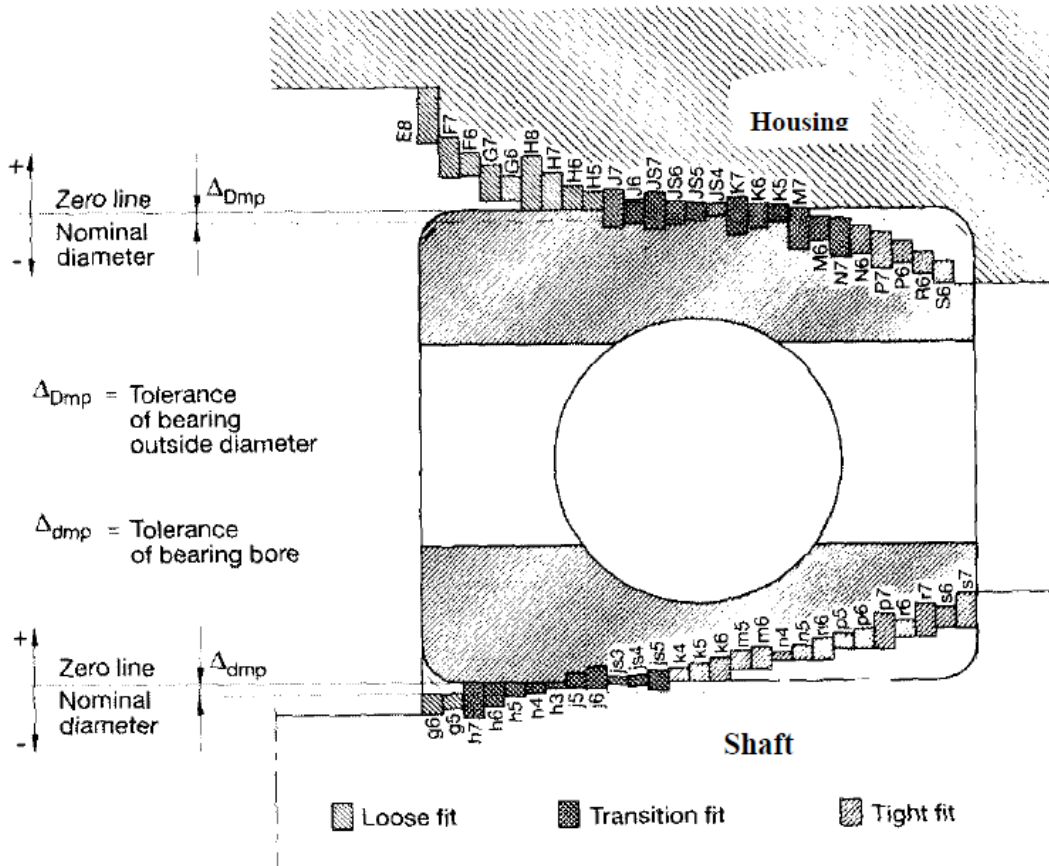




รูปที่ 6.3 การยัดปิระมิดเข้ากับข้อต่อ

ส่วนสำคัญที่สุดของข้อต่อชั้นบนคือ การกำหนดพิคัดความเผื่อที่เหมาะสม เพื่อที่จะได้อัด (Press fit) ชิ้นงานเข้ากับรูในของท่ออลูมิเนียม งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าพิคัดความเผื่อที่เหมาะสมดังแสดงในหัวข้อ 6.2

### 6.1 มาตรฐานสำหรับระบบพิคัดงานสวมที่เหมาะสม [16]

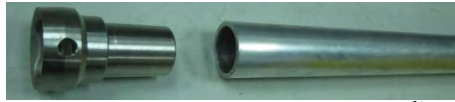


รูปที่ 6.4 Principal Fits for Bearings ISO System of Limits and Fits

มาตรฐานสำหรับระบบพิคัดงานสวมที่เหมาะสม ได้แก่ BS 4500, ISO 286 -1, AS 1654 ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 6.4 ซึ่งประกอบไปด้วย tolerance zones พื้นฐานต่างๆ ซึ่งเหมาะกับการระบุงานสวมที่แตกต่างกัน

## 6.2 การทดลองเพื่อหาค่าพิกัดความเผื่อของข้อต่อชั้นบน

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาดทดลองเกี่ยวกับระบบพิกัดงานสวมที่เหมาะสมตามมาตรฐาน ISO(BS 4500) [16] เพื่อใช้ในการผลิต และนำไปใช้เป็นค่าพิกัดงานสวมข้อต่อชั้นบนดังแสดงในรูปที่ 6.5 เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้พิการที่จะนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในการทดสอบนั้นจะใช้พิกัดความเผื่อแบบสวมพอดี (Transition) k6, n6 และสวมอัด (Interference) s6, p6 สำหรับเพลา (Shaft) โดยให้ขนาดรูเพลา (Hole) เป็นหลัก (Hole-basis)



รูปที่ 6.5 แสดงลักษณะการสวมข้อต่อชั้นบน

### 6.2.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

6.2.1.1 รูเพลาหรือหน้าแข็งเทียม งานวิจัยนี้ได้เตรียมท่ออลูมิเนียมเกรด 6061 จำนวน 12 ชั้น ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูในของท่อที่วัดจากเครื่อง CMM ดังแสดงในรูปที่ 6.6 โดยแบ่งเป็นขนาดที่วัดได้ดังตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.6 การวัดขนาดรูเพลาด้วยเครื่อง CMM

ตารางที่ 6.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูในของท่อ

ชั้นที่	ขนาดรูเพลา mm.
1	25.689
2	25.681
3	25.692
4	25.697
5	25.693
6	25.689
7	25.707
8	25.692
9	25.695
10	25.701
11	25.692
12	25.697

6.2.1.2 เพลา (shaft) หรือข้อต่อระหว่างข้อเข้าและหน้าแข็ง เป็นวัสดุเหล็กเพลาดังแสดง  
 ในรูปที่ 6.7 โดยทำการกลึงส่วนที่จะสวมอัดให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตาม  
 มาตรฐานพิภักความเผื่อแบบสวมพอดี (Transition) k6, n6 และสวมอัด  
 (Interference) s6, p6 จำนวนอย่างละ 3 ชิ้น ด้วยเครื่องกลึง CNC วัดขนาดด้วย  
 เครื่อง CMM โดยแบ่งเป็นขนาดที่วัดได้ดังตารางที่ 6.2



รูปที่ 6.7 วัสดุเหล็กเพล่าที่เตรียมขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 6.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพล่า (shaft)

ระบบมาตรฐาน	ชุดที่	ขนาดรูเพล่า mm.	ขนาดเพล่า (shaft) mm.
สวมพอดี (Transition) k6 = +2 - +15	1	25.689	25.697
	2	25.681	25.688
	3	25.692	25.704
สวมพอดี (Transition) n6 = +15 - +28	4	25.697	25.719
	5	25.693	25.715
	6	25.689	25.715
สวมอัด (Interference) P6 = +22 - +35	7	25.707	25.735
	8	25.692	25.721
	9	25.695	25.724
สวมอัด (Interference) S6 = +35 - +48	10	25.701	25.739
	11	25.692	25.733
	12	25.697	25.742

### 6.2.2 การทดสอบแรงกดอัดและแรงดึงออกในแต่ละพิภัก

ทำการทดสอบแรงกดอัดระหว่างชุดรูเพล่ากับเพล่าที่เตรียมไว้สำหรับการสวมอัดที่  
 ระบบพิภักต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.8 หลังจากนั้นได้นำชุดรูเพล่ากับเพล่าที่ผ่านการสวมอัด  
 แล้วมาทดสอบแรงดึงออก ดังแสดงในรูปที่ 6.9 ซึ่งผลการทดสอบแรงกดอัดและแรงดึงที่  
 ระบบพิภักความเผื่อต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.3



รูปที่ 6.8 การทดสอบแรงกดอัดระหว่างรูเพลากับเพลลาที่ระบบพิกัดความถี่ต่างๆ



รูปที่ 6.9 การทดสอบแรงกดอัดระหว่างรูเพลากับเพลลาที่ระบบพิกัดความถี่ต่างๆ

ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบแรงกดอัดและแรงดึงที่ระบบพิกัดความถี่ต่างๆ

ระบบมาตรฐาน	ชุดที่	พิกัดความถี่ ( $\mu\text{m}$ )	แรงกด (n)	แรงดึง (n)
สวมพอดี (Transition) $k6 = +2 - +15$	1	8	700	700
	2	7	550	600
	3	12	750	750
สวมพอดี (Transition) $n6 = +15 - +28$	4	22	5,000	1,000
	5	22	5,000	1,250
	6	26	7,000	1,250
สวมอัด (Interference) $P6 = +22 - +35$	7	28	7,000	2,000
	8	29	8,000	2,500
	9	29	9,000	2,500
สวมอัด (Interference) $S6 = +35 - +48$	10	38	7,000	2,200
	11	41	8,500	2,500
	12	45	1,1000	2,750

ผลการทดสอบแรงดึงที่ได้จากการทดลองดังกล่าว จะนำมาเปรียบเทียบกับแรงที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 10328 ซึ่งแรงที่มากที่สุดที่ใช้ในการทดสอบเป็น Principal static load test ซึ่งมีค่าประมาณ 2,200 N ซึ่งวิเคราะห์ได้ว่าหากสามารถไปใช้ในสถานการณ์จริงซึ่งขณะที่ Load มาก

ที่สุดเกิดขึ้นนั้น ผู้ใช้เกิดเหตุการณ์ไม่คาดคิด เช่นตกหลุมแล้วเกิดการดึงที่ข้อต่อ การยึดกันระหว่างข้อต่อและท่อลูมิเนียมก็ควรสามารถทนต่อแรง 2,200 N ดังกล่าวนั้นได้ด้วย

จากผลการทดสอบแรงกดอัด และแรงดึงดังแสดงในตารางที่ 6.3 จะเห็นว่าพิกัดความเค้นแบบสวมพอดี (Transition)  $k6 = +2 - +15 \mu\text{m}$  แรงกดอัดและแรงดึงมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าที่ระบบพิกัดความเค้นนี้ ท่อลูมิเนียมยังคงไม่เสียรูปมากนัก และแรงดึงออกเฉลี่ยประมาณ 683 N น้อยกว่า 2,200 N ตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ข้างต้น จึงไม่เลือกนำไปใช้ในสถานการณ์จริง

ส่วนพิกัดความเค้นแบบสวมพอดี (Transition)  $n6 = +15 - +28 \mu\text{m}$  แรงกดอัด มีค่าเฉลี่ย 5,667 N และแรงดึงมีค่าเฉลี่ย 1,500 N จะเห็นว่าระบบพิกัดนี้จะต้องใส่แรงอัดมากกว่าระบบพิกัดความเค้น  $k6$  ถึง 8.5 เท่า อย่างไรก็ตามถึงจะใช้แรงกดอัดมากก็ตาม แรงที่ใช้ในการดึงออกพบว่ามากกว่าความเค้น  $k6$  เพียง 2.2 เท่า และแรงดึงออกดังกล่าวเมื่อเทียบกับค่า 2,200 N ตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ข้างต้นก็ยังไม่เพียงพอที่จะเลือกนำไปใช้ในสถานการณ์จริงได้

พิกัดความเค้นแบบสวมอัด (Interference)  $P6 = +22 - +35 \mu\text{m}$  แรงกดอัด มีค่าเฉลี่ย 8,000 N และแรงดึงมีค่าเฉลี่ย 2,333 N จะเห็นว่าระบบพิกัดนี้แรงที่ใช้ในการดึงออกเมื่อเทียบกับค่า 2,200 N ตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ข้างต้นพบว่าเพียงพอแล้วที่จะเลือกนำไปใช้ในสถานการณ์จริงได้

พิกัดความเค้นแบบสวมอัด (Interference)  $S6 = +35 - +48 \mu\text{m}$  แรงกดอัด มีค่าเฉลี่ย 8,833 N และแรงดึงมีค่าเฉลี่ย 2,483 N จะเห็นว่าระบบพิกัดนี้แรงที่ใช้ในการดึงออกเมื่อเทียบกับค่า 2,200 N ตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ข้างต้นพบว่าเพียงพอที่จะนำไปใช้ในสถานการณ์จริงได้ แต่ต้องใช้แรงกดมากกว่าพิกัดความเค้นแบบสวมอัด (Interference)  $P6$

### 6.2.3 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล คณะผู้วิจัยได้เลือกออกแบบข้อต่อขึ้นบนให้มีค่าพิกัดความเค้นแบบสวมอัด (Interference)  $S6 = +35 - +48 \mu\text{m}$  เนื่องจากในการประกอบข้อต่อขึ้นบนเข้ากับเพลาน้ำแข็งได้ใช้เครื่องไฮดรอลิกส์ซึ่งสามารถสร้างแรงกดอัดได้ถึง 40 ตัน (40,000 N) และจากค่าแรงดึงออกต้องใช้แรงมากที่สุด และมากกว่าค่า 2,200 N ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยในการนำไปใช้งานตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ข้างต้น

แต่อย่างไรก็ตามหากต้องการสร้างเครื่องกดอัดข้อต่อกับเพลาน้ำแข็ง โดยไม่ต้องสร้างแรงอัดมากเกินไปนัก ก็สามารถเลือกใช้พิกัดความเค้นแบบสวมอัด (Interference)  $P6 = +22 - +35 \mu\text{m}$  ซึ่งใช้แรงกดอัดน้อยกว่าระบบ  $S6$  ประมาณ 800 N ในขณะที่แรงดึงออกยังมากกว่าค่า 2,200 N ตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ข้างต้น ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยในการนำไปใช้งาน

## 7. การออกแบบข้อต่อชิ้นล่าง : ระบบชุดข้อต่อและแกนหน้าแข็งของขาเทียม

จากแนวคิดในการออกแบบดังแสดงในบทที่ 5 ที่ต้องออกแบบให้ข้อต่อชิ้นล่างให้มีกลไกที่สามารถไขเพื่อคลายข้อต่อจากภายนอกได้ง่าย และตำแหน่งยึดระหว่างข้อต่อและเท้าเทียมไม่เสียไปเพื่อความสะดวกแก่นักกายอุปกรณ์ในการจัดตำแหน่งของเท้าสำหรับผู้พิการ และในขณะเดียวกันก็สามารถนำไปใช้กับแกนหน้าแข็งอลูมิเนียมที่นำเข้ามาจากต่างประเทศซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางรูในเท่ากัน แต่มีเส้นผ่านศูนย์กลางนอกน้อยกว่าท่ออลูมิเนียมที่หาซื้อได้ในประเทศ จึงได้ออกแบบให้ข้อต่อชิ้นล่างถูกกลึงให้มีพิสัยความเผื่อในลักษณะสวมคลอน (Clearance) ซึ่งทำให้สามารถสวมข้อต่อชิ้นล่างเข้ากับรูในของท่ออลูมิเนียม และสามารถถอดออกเพื่อปรับตำแหน่งได้ง่าย แต่มีกลไกที่สามารถขยายขนาดข้อต่อให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้น เพื่อให้เกิดการยึดกันแน่นเพียงพอในระหว่างใช้งานดังแสดงในรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 แสดงข้อต่อชิ้นล่างระหว่างข้อเท้าและหน้าแข็ง

### 7.1 กลไกขยายขนาดข้อต่อชิ้นล่าง

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบกลไกข้อต่อชิ้นล่างให้สามารถขยายขนาดข้อต่อให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางมากขึ้นได้ทำให้เกิดการยึดกันแน่นเพียงพอในระหว่างใช้งานระหว่างข้อต่อชิ้นล่างกับแกนหน้าแข็งของขาเทียม โดยออกแบบกลไกเป็นลักษณะคานกระดกวางตัวอยู่ในข้อต่อชิ้นล่างดังแสดงในรูปที่ 7.2 และตัวข้อต่อเองก็สามารถขยายขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางได้โดยการผ่าบริเวณที่สวมข้อต่อเข้ากับแกนหน้าแข็งเป็น 2 ส่วนเพื่อให้สามารถขยายขนาดได้โดยใช้ Set Screw เป็นตัวกดกลไกคานกระดกให้ดันบริเวณที่สวมข้อต่อเข้ากับแกนหน้าแข็งให้ขยายตัวออกทำให้เกิดการยึดกันแน่นดังแสดงในรูปที่ 7.3 นอกจากนี้ที่ปลายด้ายบนของข้อต่อยังใส่ Snap Ring เพื่อป้องกันไม่ให้บริเวณที่ผ่าของข้อต่อเสีรูรูปมากเกินไประหว่างใช้งานด้วย



รูปที่ 7.2 กลไกคานกระดกขยายขนาดข้อต่อทำให้ข้อต่อขึ้นล่างและแกนหน้าแข็งเกิดการยึดกันแน่น



รูปที่ 7.3 ภาพประกอบกลไกขยายขนาดข้อต่อขึ้นล่าง

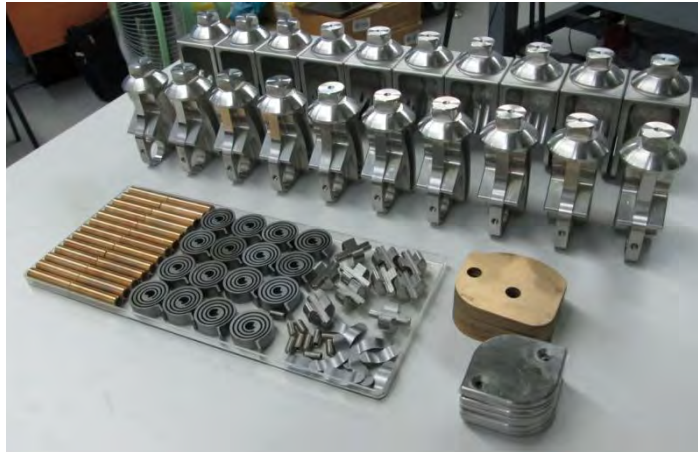
## 8. การทดสอบภาคสนาม

หลังจากออกแบบและทดสอบกลไกข้อเหวี่ยงพร้อมข้อต่อ และหน้าแข็งตามมาตรฐานสากลเรียบร้อยแล้วได้ทำการผลิตตามแบบเดียวกันเป็นจำนวน 10 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 8.1 และรูปที่ 8.2 แสดงตัวอย่างกลไกข้อเหวี่ยงที่ประกอบแล้ว แล้วนำไปทดสอบภาคสนามกับอาสาสมัครทหารผ่านศึกผู้พิการขาขาดเหนือเข่าผ่านโรงพยาบาลทหารผ่านศึกดังแสดงตัวอย่างอาสาสมัครดังแสดงในรูปที่ 8.3 โดยอาสาสมัครดังกล่าวมีรายชื่อดังต่อไปนี้

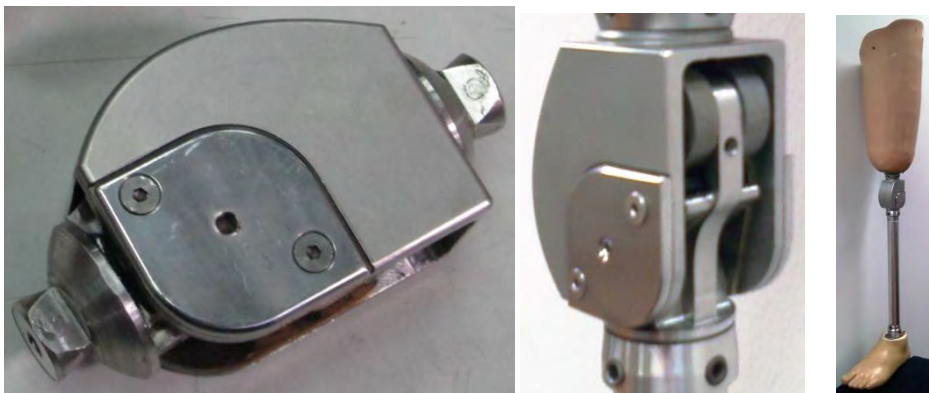
ตารางที่ 8.1 ข้อมูลอาสาสมัครการทดสอบกลไกข้อเหวี่ยงของเทียม

อาสาสมัครผู้พิการ	อายุ (ปี)	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	จังหวัด	หมายเหตุ
1. ร.ต. ชูชีพ ศรีงาม	65	60	กรุงเทพฯ	เหนือเข่าซ้าย
2. จ.อ. กิตติธัช เต็มสันเทียะ	53	75	กรุงเทพฯ	เหนือเข่าขวา
3. ร.ท. จลัย ร้องขันแก้ว	56	65	กรุงเทพฯ	เหนือเข่าขวา
4. ส.อ. บรรจง จันทร์แดง	40	70	สระแก้ว	เหนือเข่าซ้าย
5. อ.ส.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. อนุรักษ์พัฒน์ พงษ์พานิช	60	70	กรุงเทพฯ	เหนือเข่าซ้าย
9. พล.จ. จลัญ พิมพ์ไยยั้ง	47	65	กำแพงเพชร	เหนือเข่าขวา
10. ร.อ. สุมิตร หอมชง	70	70	กรุงเทพฯ	เหนือเข่าขวา





รูปที่ 8.1 แสดงตัวอย่างกลไกข้อเข่าเทียมที่ผลิตขึ้นจำนวน 10 ชุด พร้อมนำไปทดสอบภาคสนาม



รูปที่ 8.2 แสดงตัวอย่างกลไกข้อเข่าเทียมที่ประกอบแล้ว



รูปที่ 8.3 แสดงตัวอย่างอาสาสมัครสวมใส่กลไกข้อเข่าเทียมใช้งานในชีวิตประจำวัน

ต้นแบบข้อเข่าของขาเทียมที่ได้ผลิตขึ้นกับอาสาสมัครผู้พิการขาขาดเหนือเข่าจำนวน 10 คน ได้ทดลองใช้งานในชีวิตประจำวัน และได้ติดตามผลทุกๆ 2 เดือนเป็นเวลา 3 ครั้ง รวมเป็นระยะเวลา 6 เดือน แล้วพบว่าไม่มีความเสียหายใดๆเกิดขึ้นดังแสดงในตารางผลการติดตามผลดังนี้

ตารางที่ 8.2 ผลการติดตามผลการทดสอบภาคสนาม

อาสาสมัคร	ผลการทดสอบภาคสนาม(สภาพการใช้งาน)			
	เดือนที่ 2	เดือนที่ 4	เดือนที่ 6	หมายเหตุ
1. ร.ต.ชูชีพ ศรีงาม	ปกติ	ปกติ	ปกติ	-
2. จ.อ.กิตติธิช เดิม สันเทียะ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	-
3. ร.ท.จลัย ร้องขันแก้ว	ปกติ	ปกติ	ปกติ	-
4. ส.อ.บรรจง จันทรแดง	ปกติ	ปกติ	ปกติ	-
5. อส.ทพ.ธนภัทร ศุ กรินทร์	ปกติ	ปกติ	ปกติ	-
6. ร.ท.สมชาย จงอยู่สุข	ปกติ	ปกติ	ปกติ	รูปร่างข้อเข้าเป็นสี่เหลี่ยม ทำให้บริเวณด้านล่างของ ชิ้นงานตัวนอกหนีบ กางเกงอาสาสมัคร
7. ร.อ.ปิยะพันธ์ กลัดกลีบ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	-
8. ร.ท.ณรงพัฒน์ พงษ์ พานิช	ปกติ	ปกติ	ปกติ	-
9. พลจ.จลัญญ์ พิมพิโยียง	ปกติ	ปกติ	ปกติ	มีเสียงดังเวลาสวิงขา แก้ไขโดยเพิ่ม Absorber ระหว่างชิ้นงานตัวในและ ตัวนอก
10. ร.อ.สุมิตร หอมขง	ปกติ	ปกติ	ปกติ	-

จากผลการทดสอบภาคสนามโดยให้อาสาสมัครทุกคนได้ใช้งานในชีวิตประจำวันเป็นเวลา 6 เดือน พบว่าจากรูปที่ 8.4 กลไกข้อเข้าเทียมยังอยู่ในสภาพดี และอาสาสมัครสามารถใช้งานในชีวิตประจำวันตามปกติได้ดีอยู่ ส่วนรูปที่ 8.5 แสดงชิ้นส่วนของกลไกข้อเข้าขาเทียมที่ผ่านการทดสอบภาคสนามดังกล่าวแล้วพบว่าแต่ละชิ้นส่วนก็ยังคงอยู่ในสภาพที่ดีอยู่ ถึงแม้แผ่นสร้างความหน่วง (Damping Bronze Bushing) ซึ่งทำจากทองเหลืองลายเสือจะมีร่องรอยของการสึกหรอบ้าง แต่ก็ยังคงเรียบอยู่ยังสามารถทำหน้าที่สร้างความหน่วงได้โดยไม่สะดุดเวลาใช้งาน และปัจจุบันก็ยังคงให้

อาสาสมัครใช้งานอยู่ เนื่องจากยังไม่พบว่ามีความเสียหายใดๆ เกิดขึ้น และจะเว้นระยะการติดตามผล ไปยังปีที่ 2 ของโครงการ



รูปที่ 8.4 ตัวอย่างกลไกข้อเข้าเทียมที่ผ่านการใช้งานมาแล้วเป็นระยะเวลา 6 เดือน



รูปที่ 8.5 แสดงสภาพชิ้นส่วนของกลไกข้อเข้าเทียมหลังทดสอบภาคสนามเป็นเวลา 6 เดือน

## 9. สรุปผลปีที่ 1 ของโครงการวิจัย

ผลิตต้นแบบข้อเข้าของขาเทียมที่ได้ออกแบบ และทำการทดสอบตามแนวทางมาตรฐานสากล ISO 10328 ซึ่งผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่ากลไกข้อเข้าเทียมที่ได้ออกแบบนี้มีความแข็งแรงตามแนวทางของมาตรฐานสากล และได้ทำการออกแบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Jig-Fixture) และออกแบบการผลิตด้วย CAM (Computer-Aided-Manufacturing) ช่วยในการผลิตข้อเข้าของขาเทียมด้วยเครื่องจักร CNC เป็นจำนวน 10 ชุด จากนั้นได้ทำการออกแบบ ทดสอบ และผลิตระบบชุดข้อต่อและแกนหน้าแข้งของขาเทียมที่มีความแข็งแรงผลิตได้เองภายในประเทศ และตรงกับความต้องการของผู้นำไปใช้ โดยชุดข้อเข้าของขาเทียมที่ผลิตขึ้นทั้งหมด 10 ชุดนั้นได้นำไปทำการทดสอบภาคสนามกับอาสาสมัครผู้พิการขาขาดเหนือเข่า ผลปรากฏว่ายังสามารถใช้งานได้ดี และไม่พบความเสียหายใดๆ เกิดขึ้น ซึ่งจะได้ทำการติดตามผลต่อเนื่องไปยังปีที่ 2 ของโครงการ

## 10. 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] บริษัท ออโตโต บ็อก [http://th-new.ottobock.com/cps/rde/xchg/ob\\_th\\_th/hs.xsl/218.html?id=254](http://th-new.ottobock.com/cps/rde/xchg/ob_th_th/hs.xsl/218.html?id=254)
- [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] Cuccurullo S, editor. (2004). Physical Medicine and Rehabilitation Board Review. New York: ISBN-10: 1-888799-45-5. Demos Medical Publishing.
- [7] Rose, J. and Gamble, G.J. (1994). Human Walking, 2nd edition, ISBN: 0-683.07360-5 Williams & Wilkins, Maryland.
- [8] Charles W. Radcliffe, “Biomechanics of Knee Stability Control with Four-Bar Prosthetic Knees”, ISPO Australia Annual Meeting, Melbourne, November 2003
- [9] บริษัท ossur, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.ossur.com/?PageID=12643>
- [10] US Patent number:5443524 Issue date: Jun 9, 1993
- [11] US Patent number: 5779735 Issue date: Jul 14, 1998
- [12] US Patent number: 6,701,074 B1 Issue date: Mar 16, 2004
- [13] [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://fibo.kmutt.ac.th/thai/index.php?option=content&task=view&id=465>
- [14] [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.most.go.th/technomart/?p=764>
- [15] ISO 10328:2006 Prosthetics - Structural testing of lower-limb prostheses - Requirements and test methods
- [16] จำรูญ ตันติพิศาลกุล. เขียนแบบวิศวกรรม 2 (เขียนแบบเครื่องกล). พิมพ์ครั้งที่ 11 (ฉบับปรับปรุงใหม่). ห้างหุ้นส่วนจำกัด สามลดตา. 2552.