

บทที่ 4

การออกแบบใหม่ของกลไก

4.1 ภาพรวมการออกแบบใหม่

หลังจากที่ได้ทดสอบสร้างกลไกในการออกแบบเบื้องต้นดังที่กล่าวไว้บทที่แล้ว แต่กลไกนั้นถึงแม้จะสามารถทำงานได้ตามจุดประสงค์ที่ได้ตั้งเอาไว้แต่ก็ยังมีจุดด้อยดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.3 ซึ่งทำให้ไม่สามารถนำกลไกข้อเข่านี้ไปใช้งานในชีวิตประจำวันของผู้ป่วยได้ จึงสมควรออกแบบกลไกแบบใหม่โดยที่ขั้นตอนในการออกแบบของกลไกจะเป็นดังนี้

1. หาข้อมูลเส้นทางการเคลื่อนที่เพิ่มเติม เพิ่มจำนวนข้อมูลที่ต้องเก็บจากอาสาสมัครเพื่อเป็นตัวแทนสำหรับการหาเส้นทางการเคลื่อนที่ที่เป็นธรรมชาติในการเดิน และหาเส้นทางการเคลื่อนที่ของเข่าในจังหวะงอเข่าเพื่อให้กลไกข้อเข่าให้สามารถงอได้อย่างเป็นธรรมชาติและมีมุมงอเข่ามากที่สุด (Max flexion angle) เหมาะสมคือ 120 องศา [4]
2. ออกแบบกลไกแบบใหม่ที่ให้ลักษณะการเคลื่อนที่แบบหลายจุดหมุน (Polycentric) แต่มีขนาดและน้ำหนักที่เหมาะสม กะทัดรัดขึ้นกว่าเดิม และลดจำนวนชิ้นส่วนของกลไกให้น้อยลง
3. ปรับปรุงการทำงานของกลไกให้สามารถตอบสนองต่อการใช้งานของผู้ใช้ได้ดียิ่งขึ้น เช่น เปลี่ยนแบบสปริงให้มีค่าคงตัวที่เหมาะสม ปรับปรุงระบบการปรับอัตราหมุน และ ลดเสียงรบกวนในจังหวะติดกลับของกลไก
4. วิเคราะห์เบื้องต้นถึงความแข็งแรงของกลไกด้วยระเบียบวิธี FEM เพื่อปรับปรุงขนาดมิติ (Dimension) เพื่อลดกระบวนการในการออกแบบซ้ำก่อนนำไปทดสอบความแข็งแรงตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

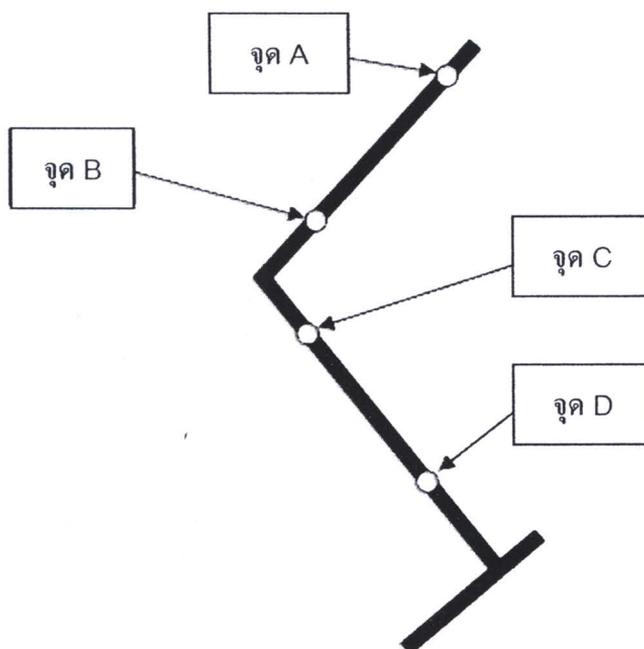
4.2 การเก็บข้อมูลเส้นทางการเคลื่อนที่ของข้อเท้าเพิ่มเติม

4.2.1 การติดจุดอ้างอิงและเก็บภาพเคลื่อนไหวของข้อเท้าสำหรับการเดินตามธรรมชาติ

เมื่อพิจารณาขาของคนปกติซึ่งมีท่อนขาส่วนบนและท่อนขาส่วนล่าง และมีข้อเท้าซึ่งเป็นจุดที่บอกถึงความสัมพันธ์ของลักษณะการเคลื่อนที่ของขาทั้งสองท่อน ฉะนั้นในการหาว่าเข่าตามธรรมชาติกำหนดลักษณะการเคลื่อนที่ของขาอย่างไรจึงต้องพิจารณาโดยภาพรวมดังนี้

เมื่อกำหนดให้ขาท่อนบนอยู่กับที่ (Fix) แล้วลองเคลื่อนที่ขาท่อนล่างใน Sagittal plane จะพบว่าขาท่อนล่างจะมีลักษณะการเคลื่อนที่แบบการเคลื่อนที่แบบทั่วไป (General motion) ด้วยเหตุนี้หากกำหนดแกนพิกัดเคลื่อนที่ (Inertial coordinate system) ติดไว้บนขาท่อนล่างและกำหนดแกนพิกัดอ้างอิง (Reference coordinate system) ติดไว้บนขาท่อนบน ก็จะได้ลักษณะการเคลื่อนที่ของขาท่อนล่างเทียบกับขาท่อนบนเพื่อนำไปเป็นข้อมูลสำหรับสังเคราะห์กลไกข้อเท้าเทียมในการเลียนแบบข้อมูลนี้ ต่อไปจะเป็นส่วนรายละเอียดของการหาข้อมูลดังกล่าว

สำหรับการหาเส้นทางการเคลื่อนที่ของข้อเท้าในธรรมชาติ เริ่มต้นโดยจัดอุปกรณ์เพื่อถ่ายภาพเคลื่อนไหวของขาอาสาสมัครเพื่อเก็บข้อมูลการเดินและการงอขาจากพิกัดของตำแหน่งติดจุดอ้างอิงที่ติดไว้บนขา โดยลักษณะการการติดตำแหน่งจุดอ้างอิงจะเป็นไปดังรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 ตามลำดับ เมื่อถ่ายภาพเคลื่อนไหวแล้วจึงนำภาพที่ได้ไปประมวลผลเพื่อหาพิกัดตำแหน่งของจุดอ้างอิงที่ติดไว้ทั้ง 4 จุด



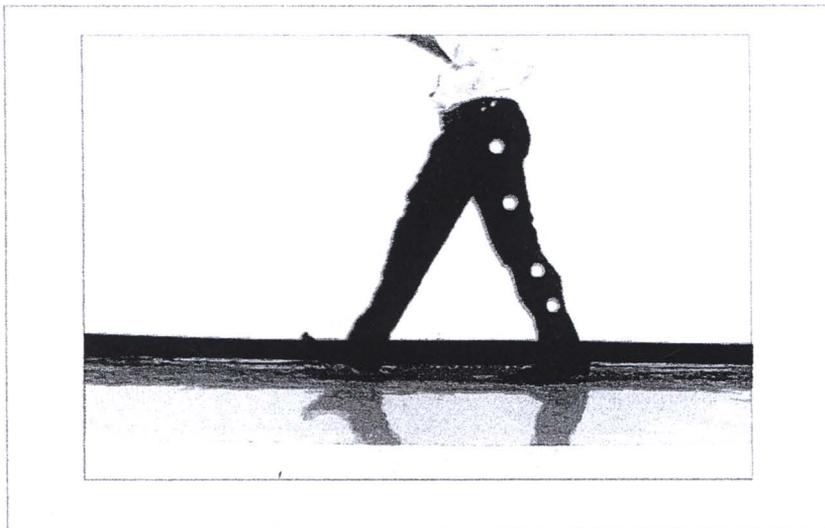
รูปที่ 4.1 ลักษณะการติดจุดอ้างอิงบนขา



รูปที่ 4.2 ขาของอาสาสมัครเมื่อติดจุดอ้างอิงแล้ว

4.2.2 การประมวลผลภาพเคลื่อนไหวที่ได้ให้เป็นข้อมูลพิกัดตำแหน่ง

หลังจากที่ได้ภาพเคลื่อนไหวของอาสาสมัครมาแล้วจึงนำไปประมวลผลภาพ (Image processing) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [16] เพื่อให้ได้มาซึ่งพิกัดของจุดอ้างอิงในแต่ละ Frame ของภาพเคลื่อนไหว โดยเริ่มจากหาจุดวงกลมที่เป็นตำแหน่งอ้างอิงที่ติดไว้บนขาในภาพทั้ง 4 จุด จากนั้นจึงหาจุดศูนย์กลางของจุดวงกลมเหล่านั้นเพื่อให้ได้มาซึ่งพิกัดของตำแหน่งจุดอ้างอิงที่ต้องการ ซึ่งผลจากการประมวลด้วยโปรแกรมจะเป็นไปดังรูปที่ 4.3 และได้พิกัดมาในรูปที่ 4.4

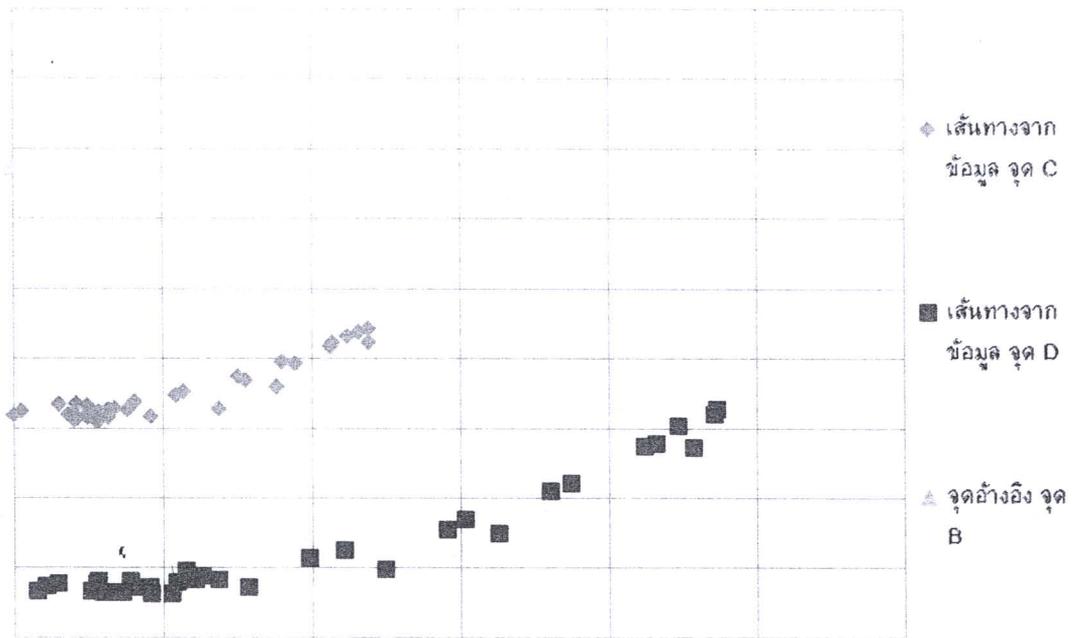


รูปที่ 4.3 การหาจุดอ้างอิงทั้ง 4 จุดบน Frame ด้วยการประมวลผลภาพ (Image processing)



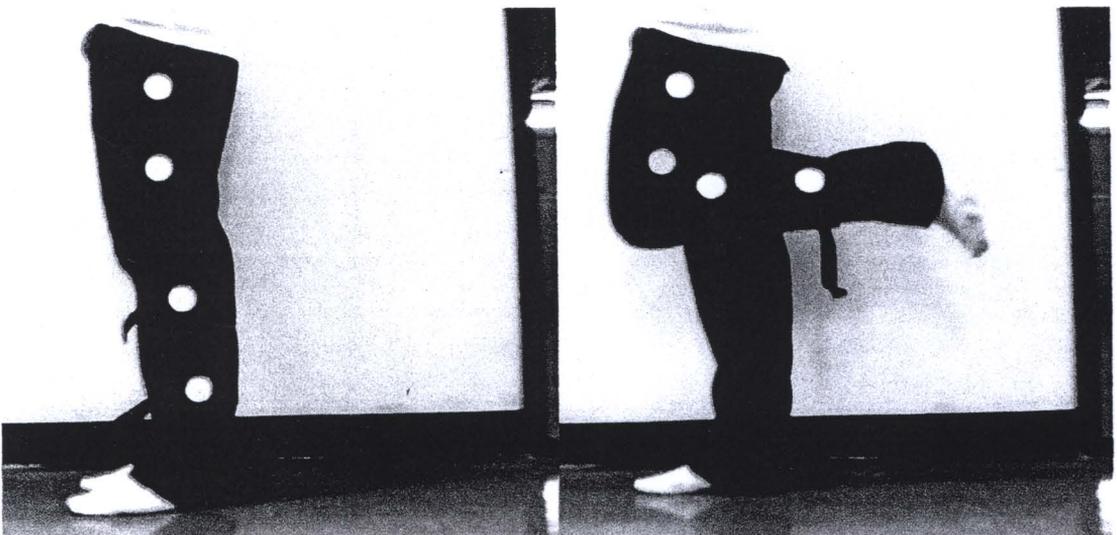
รูปที่ 4.4 ประมวลผลภาพเพื่อให้ได้มาซึ่งตำแหน่งของจุดอ้างอิงแต่ละ Frame

เมื่อได้พิกัดของจุดอ้างอิงทั้ง 4 จุดในแต่ละ frame ของภาพเคลื่อนไหวทั้งหมดแล้วต่อไป นำตำแหน่งทั้งหมดนี้ไปทำการ Coordinate transformation เพื่อให้จุดอ้างอิงทั้งสองจุดบนขาที่อนบน (จุด A และจุด B ในรูปที่ 4.1) ใน frame อื่นๆมาอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งของจุด A และจุด B ของ frame แรก (frame แรกของภาพเคลื่อนไหวนับจากขณะที่เริ่ม heel strike ซึ่งมีมุม knee flexion angle เท่ากับ 0 องศา) ก็จะได้ตำแหน่งของจุด C และ D ของทุก frame โดยที่มีแกนอ้างอิง (coordinate system) ที่มีจุดกำเนิด (Origin) และการวางตัว (Orientation) ที่กำหนดด้วยจุด A และจุด B ของ frame แรก เมื่อนำพิกัดของจุด C และ D มาซ้อนกันทั้งหมดจะได้เส้นทางการเคลื่อนที่ของเขาได้ดังรูปที่ 4.5



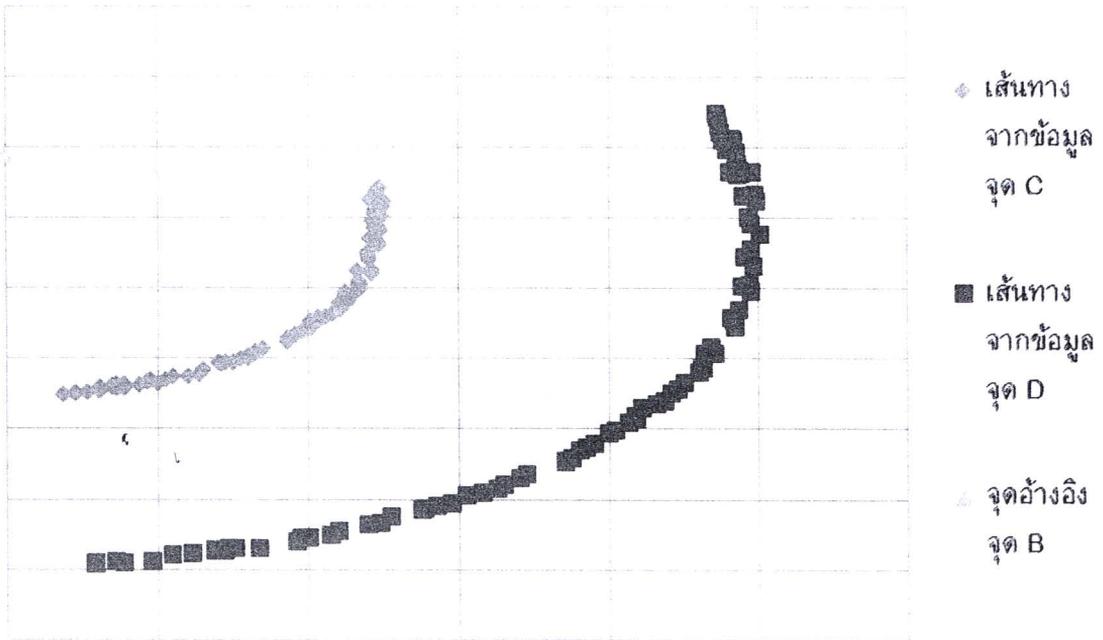
รูปที่ 4.5 เส้นทางการเคลื่อนที่ที่ได้จากภาพเคลื่อนไหวระหว่างเดิน

แต่เนื่องจากข้อมูลเส้นทางการเคลื่อนที่ของเข่าจากการเดินอย่างเดียวไม่สามารถบอกถึงลักษณะของเข่าในขณะที่ยืนมากที่สุดได้ (มุม Knee flexion ที่มากที่สุด) โดย หากกลไกข้อเข่ามีมุมนี้มากเท่าไรก็จะให้ผู้ใช้มีความสะดวกในการนั่งในสภาวะแวดล้อมต่างๆมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นจึงเก็บภาพเคลื่อนไหวเพิ่มเติมโดยจากเดิมที่ให้อาสาสมัครเดินแล้วถ่ายภาพเปลี่ยนเป็นให้อาสาสมัครยืนตรงและค่อยๆงอเข่าจนสุดดังรูปที่ 4.6

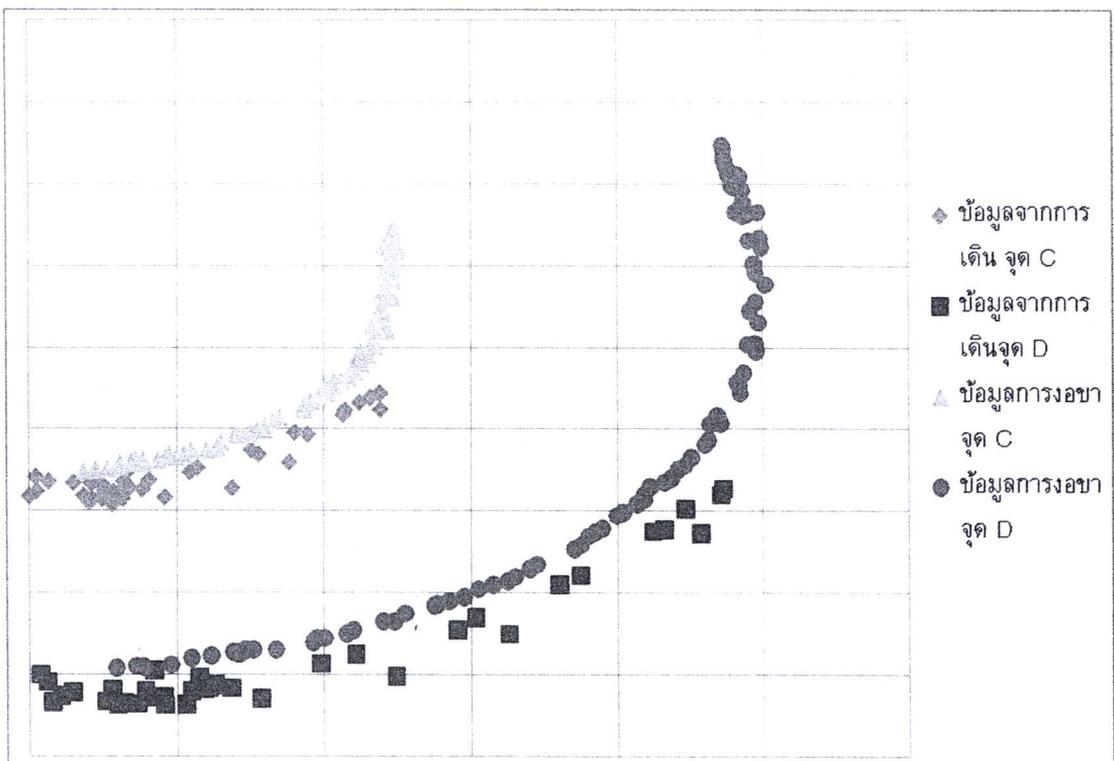


รูปที่ 4.6 ภาพเคลื่อนไหวที่เก็บเพิ่มเพื่อหามุม Knee flexion มากสุด

แล้วนำไปประมวลผลเพื่อหาเส้นทางการเคลื่อนที่ของเข่าด้วยวิธีการข้างต้น ก็จะได้มาซึ่งเส้นทางการเคลื่อนที่ของเข่าตั้งแต่ขาเหยียดตึงจนถึงงอมากที่สุดดังรูปที่ 4.7

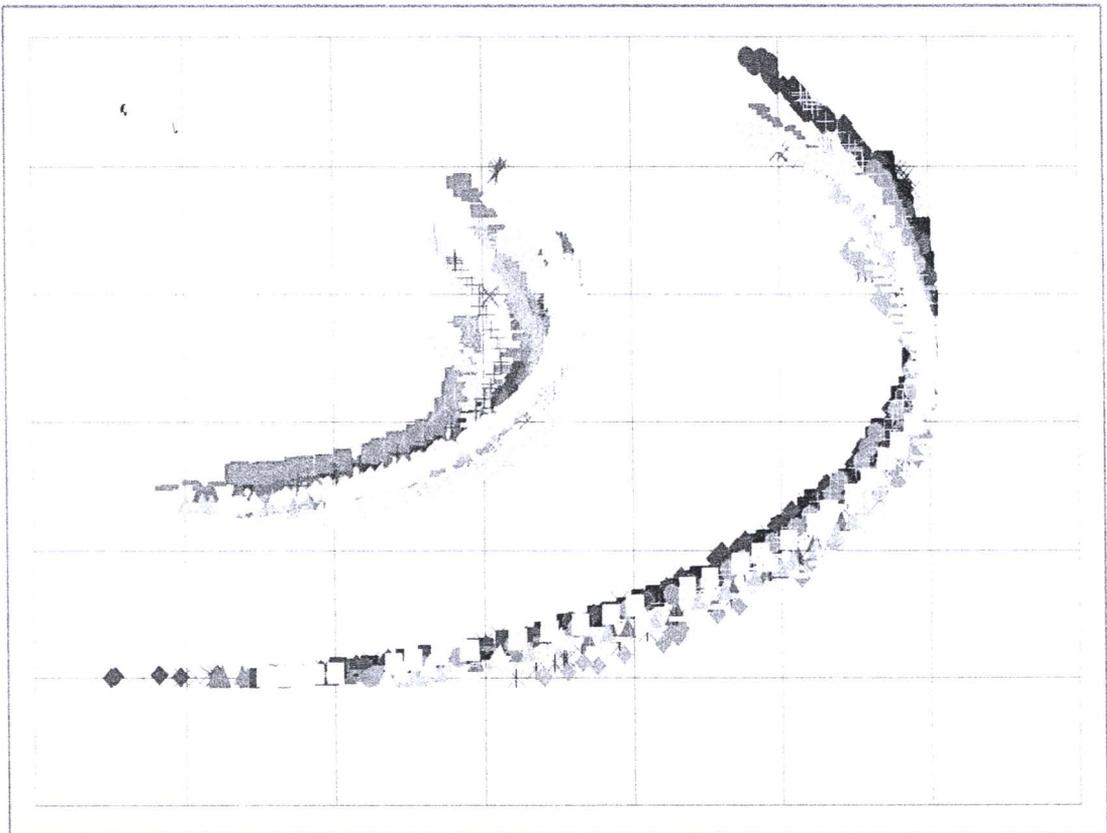


รูปที่ 4.7 ตัวอย่างเส้นทางการเคลื่อนที่จากภาพเคลื่อนไหวแบบเต็มช่วงการงอเข่า



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ได้จากการเดินและการนั่งงอเข่า

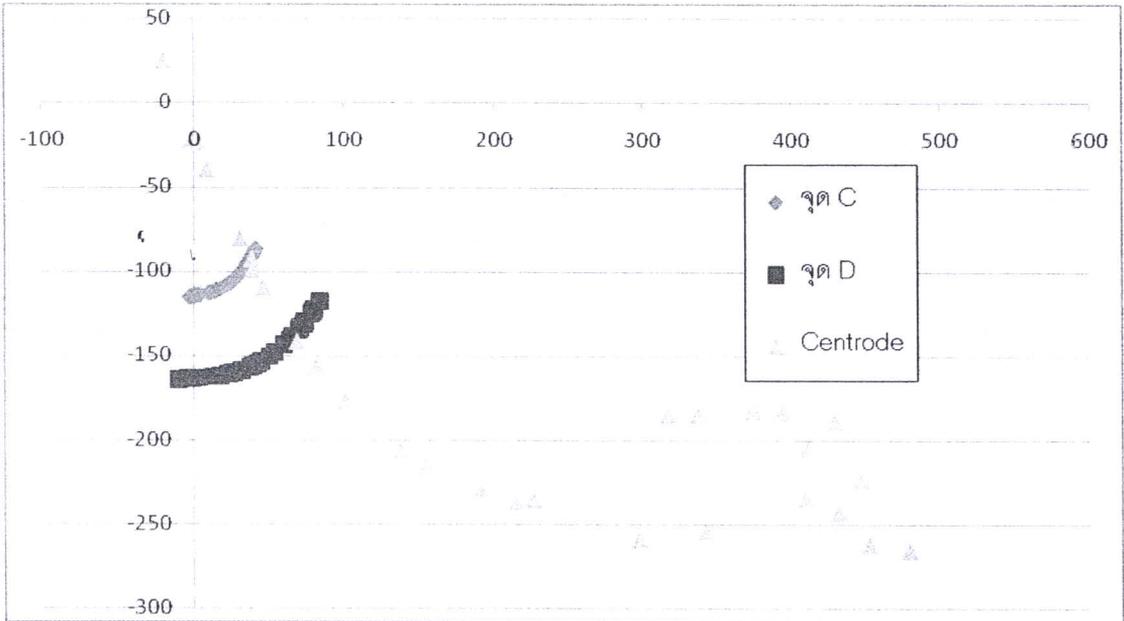
เมื่อได้กราฟข้อมูลของการเดินและการยืนงอขา เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันแล้วจะเห็นว่า ข้อมูลที่ได้มีแนวโน้มของการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.8 แต่ข้อมูลที่ได้จากการทำยืนงอขา เป็นข้อมูลของเข่าที่ให้ค่าพิสัยละเอียดมากกว่าท่าเดิน ดังนั้นสำหรับการสังเคราะห์กลไกจะใช้ ข้อมูลจากทำยืนงอขาเพื่อหา Kinematic diagram และต่อมาหาข้อมูลของอาสาสมัครเพิ่มเติม โดยเก็บข้อมูลทั้งหมดจากอาสาสมัครชาย 10 คน หญิง 10 คน สุดท้ายนำข้อมูลทั้งหมดที่ได้มา แสดงในกราฟเดียวกันดังรูปที่ 4.9 เพื่อดูแนวโน้มในการเลือกตัวแทนข้อมูล สำหรับนำไป สังเคราะห์กลไกข้อเข่าเทียมต่อไป



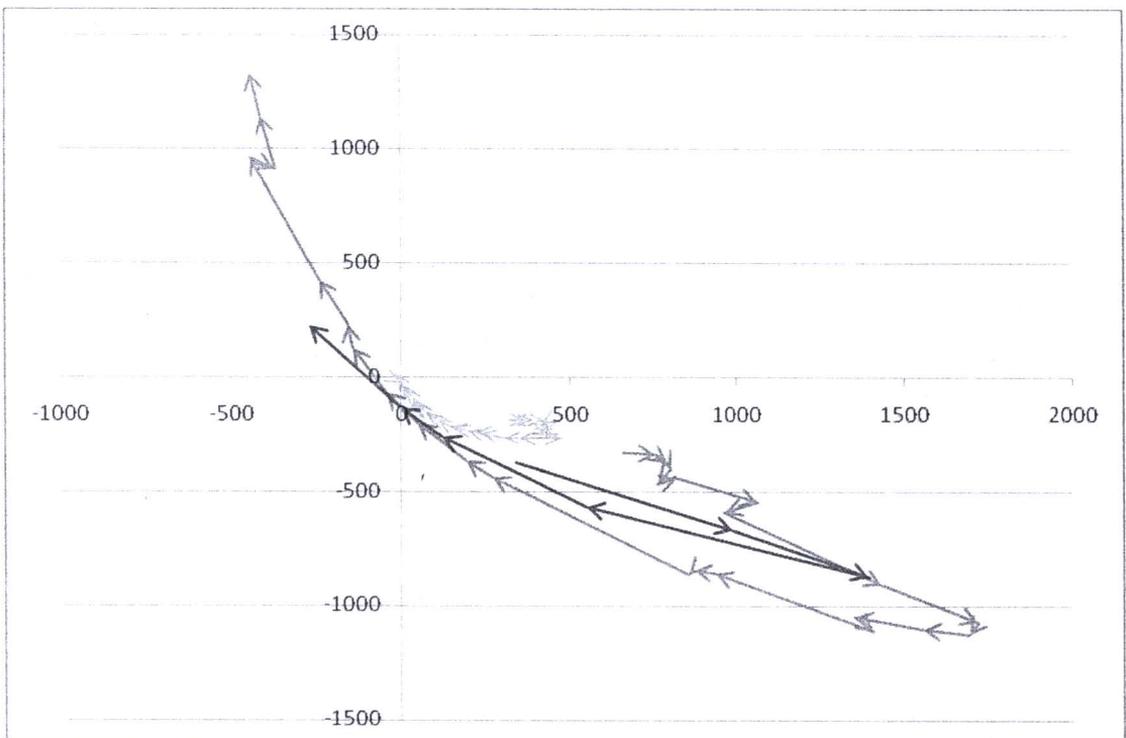
รูปที่ 4.9 ข้อมูลเส้นทางการเคลื่อนที่จากการงอขาของอาสาสมัครทั้งหมด

การเคลื่อนที่ของขาที่นอนบน (ติดจุดอ้างอิง A และ B) และขาที่นอนล่าง (ติดจุดอ้างอิง C และ D) ดังรูปที่ 4.1 นั้นเป็นการเคลื่อนที่แบบทั่วไป (General motion) การที่จะเปรียบเทียบข้อมูล เส้นทางการเคลื่อนที่ของเข่าระหว่างกันและกันของอาสาสมัครทั้งหมดนั้น จะต้องเปรียบเทียบโดยการนำข้อมูลของอาสาสมัครแต่ละคนไปหาเส้นทางการเคลื่อนที่ของจุด ICZV ตั้งแต่ Flexion angle 0 องศาจนถึง Flexion angle มากสุดของแต่ละคน เส้นทางการเคลื่อนที่ของจุด ICZV ของเข่านี้จะเรียกว่า Centrode

แต่จากลักษณะของการเก็บข้อมูลด้วย Image processing ที่ใช้อุปกรณ์ที่มีความละเอียดของการเก็บข้อมูลไม่เพียงพอ (Low resolution) ข้อมูล Centrode ที่คำนวณออกมาได้นั้นคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง โดยที่มีกราฟแสดงข้อมูลเส้นทางการเคลื่อนที่ของอาสาสมัครที่คู่กับ Centrode ดังรูปที่ 4.10 ถึงแม้เส้นทางการเคลื่อนที่ของจุด C และจุด D ที่หามาได้จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งเรียบสวยงาม



รูปที่ 4.10 ตัวอย่าง Centrode เปรียบเทียบกับตำแหน่งของข้อมูลการเคลื่อนที่ของเข้า



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบแนวโน้มลักษณะของ Centrode ที่หาได้จากข้อมูลของอาสาสมัคร

เมื่อเปรียบเทียบ Centrode ของอาสาสมัครพบว่าถึงแม้ Centrode ที่หามาได้จะไม่ซ้อนทับกัน ขนาดไม่เท่ากัน แต่ลักษณะทางเรขาคณิตของเส้น Centrode นั้นมีรูปร่างคล้ายกัน โดยที่การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุด ICZV นั้นจะวนตามทิศของลูกศรบนเส้น Centrode เมื่อ Flexion angle ของเข่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.11

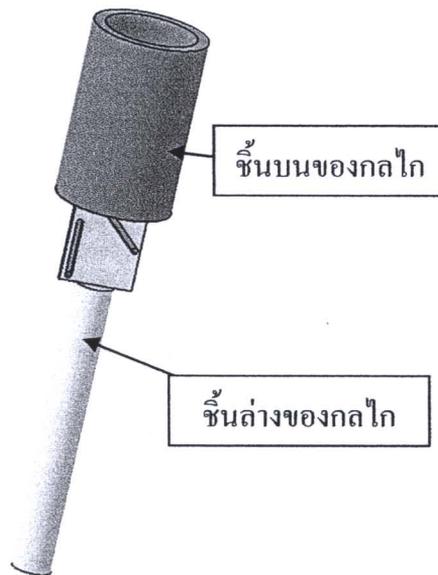
ดังนั้นด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลจึงสรุปพอสังเขปได้ว่า หาก Centrode ของอาสาสมัครมีลักษณะทางเรขาคณิตคล้ายกันดังรูปที่ 4.11 และข้อมูลเส้นโค้งเส้นทางการเคลื่อนที่ของจุด C และ D ที่หามาได้จากอาสาสมัครทั้ง 20 คนมีความคล้ายกันดังในรูปที่ 4.9 แล้ว ถึงแม้อาสาสมัครแต่ละคนมีความแตกต่างกันของความยาวขา การเคลื่อนที่ของเข่าในธรรมชาติจะมีความคล้ายกันในกลุ่มตัวอย่างอาสาสมัครทั้งชายและหญิง กล่าวคือ ถึงแม้จะเลือกข้อมูลใดข้อมูลหนึ่งซึ่งเป็นตัวแทนที่ใช้ในการสังเคราะห์กลไกข้อเข่า กลไกข้อเข่าที่ได้นั้นก็จะสามารถนำไปใช้งานได้กับผู้ใช้ที่มีความยาวขาแตกต่างกัน

สำหรับการเลือกตัวแทนข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการ Optimization นั้น เนื่องจากข้อมูลที่เก็บได้ทั้งหมดมีแนวโน้มลักษณะของการโค้งของเส้นใกล้เคียงกัน ดังนั้นการเลือกตัวแทนอาสาสมัครจึงเลือกจากข้อมูลการเคลื่อนที่ที่มีเส้นโค้งเรียบและการกระจายตัวของจุดข้อมูลดีที่สุด เพื่อให้ง่ายต่อการนำไป Minimize sum square error ที่เป็น Objective function ในกระบวนการ Optimization ต่อไป

4.3 แนวคิดหลักในการออกแบบกลไก

4.3.1 การออกแบบ Conceptual design

ลักษณะของกลไกที่ต้องการมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลการเคลื่อนที่ของเข็มนั้นต้องการกลไกที่เรียบง่ายแต่ยังสามารถให้ลักษณะการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้มาให้มากที่สุด หลังจากพิจารณาข้อมูลที่ได้มาจะเห็นว่าเส้นทางการเคลื่อนที่มีลักษณะเป็นส่วนของวงรี ทำให้กลไกที่จะนำมาประยุกต์กับข้อมูลต้องเป็นกลไกหลายจุดหมุน (Polycentric mechanism) ดังนั้นจึงเลือกกลไกแบบ 4 ก้านต่อ (Four-bar linkage mechanism) ในการออกแบบ แต่เนื่องจาก Four-bar linkage ที่มี Joint ทั้งหมดเป็น Revolute joint นั้นจะต้องใช้จำนวน Linkage ทั้งหมด 4 Linkage ซึ่งหากใช้กลไกแบบนี้กลไกจะต้องมีชิ้นส่วนโครงสร้างถึง 4 ชิ้น แต่หากว่ารวม Joint สอง Joint เข้าด้วยกันแล้วเป็นชิ้นเดียว จะสามารถลดการใช้ชิ้นส่วนลงไปได้ 1 ชิ้นส่วนดังนั้นเมื่อจับคู่ Revolute joint 4 joint แล้วเปลี่ยนเป็น Slot joint (Revolute & prismatic) 2 joint ก็จะทำให้ใช้ชิ้นส่วนกลไกเพียง 2 ชิ้นส่วนเท่านั้น ประกอบด้วย ชิ้นบนของกลไก และ ชิ้นล่างของกลไก ที่มีลักษณะรูปร่างดังรูปที่ 4.12

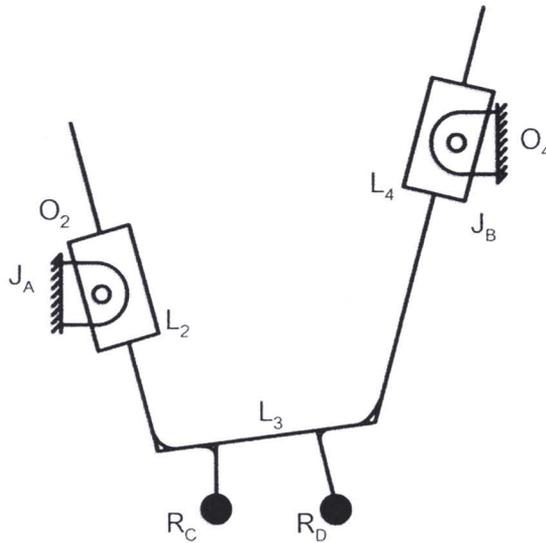


รูปที่ 4.12 แบบในแนวคิดของกลไกที่ออกแบบ

4.3.2 การหา Kinematic diagram ของกลไก

ต่อไปคือการกำหนดขนาดมิติของกลไกที่ได้ออกแบบไว้เพื่อเขียนแบบข้อมูลดังกล่าว ทำนองเดียวกับหัวข้อ 3.2.2 แต่เปลี่ยนลักษณะของ Kinematic diagram เริ่มทำโดยกำหนดให้ชิ้น

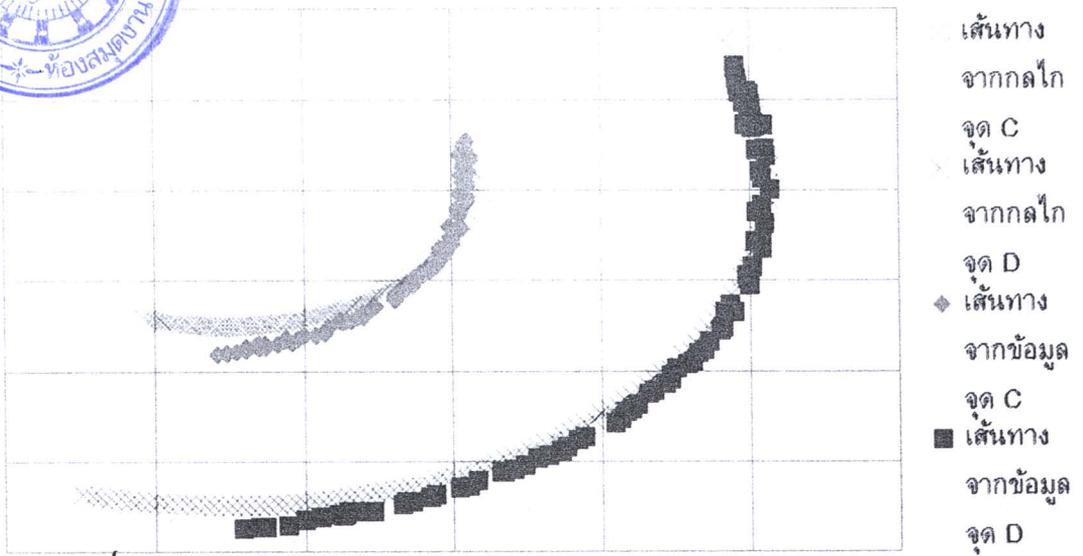
บนของกลไกเป็นชิ้นที่อยู่นิ่งและติดแกนอ้างอิงไว้ จากนั้นกำหนดตำแหน่งอ้างอิง 2 ตำแหน่ง (จุด R_C และ จุด R_D) ดังรูปที่ 4.13 ไว้บนชิ้นล่างของกลไกแล้วคำนวณตำแหน่ง 2 ตำแหน่งนั้นในขณะที่กลไกทำงานก็จะได้มาซึ่งเส้นทางการเคลื่อนที่ของกลไก โดยมี Linkage L_1 เป็น Ground linkage O_2 และ O_4 (Revolute joint) เป็น Ground pivot ส่วนสำหรับ Moving pivot คือ joint J_A และ J_B ตามลำดับ สุดท้ายมีจุดที่อยู่บน Linkage L_3 สองจุดสำหรับใช้เขียนแบบการเคลื่อนที่เข้าคือ R_C และ R_D



รูปที่ 4.13 Kinematic diagram ของกลไกข้อเข้าที่ออกแบบ

เมื่อเปรียบเทียบเส้นทางจากกลไกและเส้นทางจากข้อมูลหากว่าไม่ใกล้เคียงกันก็ให้กำหนดขนาดมิติของกลไกใหม่ ด้วยการทำซ้ำเช่นนี้จึงใช้หลักการ Optimization (หาค่าแบบ Newton) เข้ามาช่วยในการหาค่าขนาดมิติของกลไกที่ดีที่สุด ดังแผนภาพซึ่งแสดงในรูปที่ 3.7

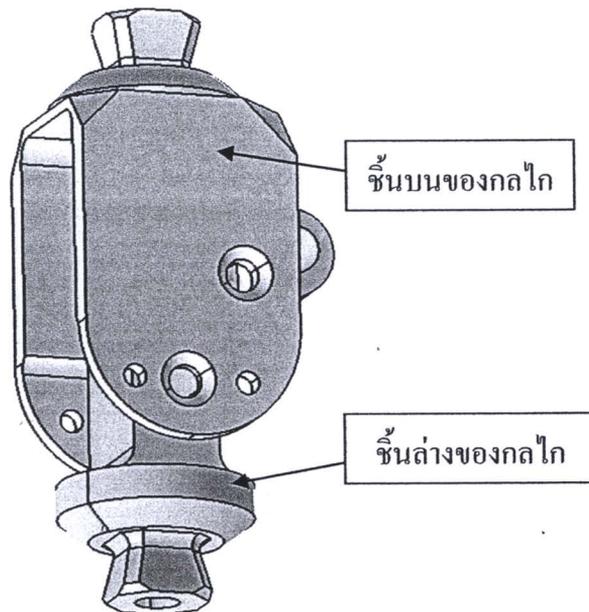
โดยการที่จะพิจารณาว่าเส้นทางจากกลไกและเส้นทางจากข้อมูล มีลักษณะ ตำแหน่งใกล้เคียงกันหรือไม่ ใช้หลักการของ Sum square error มาช่วย เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ Optimization โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้วก็จะได้กลไกที่ดีที่สุดออกมา ซึ่งอยู่ในรูปของแผนผังจลนศาสตร์ (Kinematic diagram) สำหรับเขียนแบบการเคลื่อนที่ และเมื่อเปรียบเทียบเส้นทางจากกลไกและเส้นทางจากข้อมูลจะได้กราฟแสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบเส้นทางที่ได้จากกลไกและเส้นทางที่ได้จากข้อมูล

4.3.3 การออกแบบ Detailed design

เมื่อได้แบบแผนผังจลนศาสตร์ (Kinematic diagram) แล้ว จึงนำไปออกแบบรายละเอียด (Detail design) เริ่มจากออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างทั้งสองชิ้นให้เป็นไปตาม Kinematic diagram ดังรูปที่ 4.15



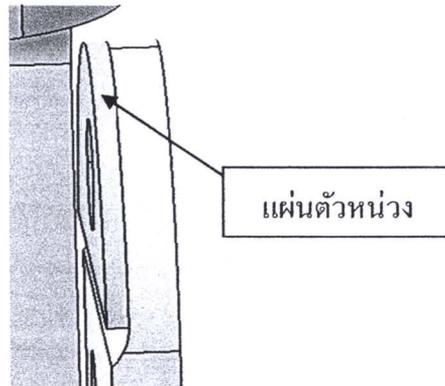
รูปที่ 4.15 แบบรายละเอียดของกลไกที่ออกแบบขึ้น

การควบคุมการทำงานของกลไกว่าจะมีผลตอบสนอง (Response) ตามที่ผู้ใช้แต่ละคนต้องการหรือไม่ จำเป็นจะต้องทำให้กลไกนี้สามารถปรับการตอบสนองได้ด้วย เหตุนี้จึงต้อง

ออกแบบตำแหน่งที่จะใส่สปริง (Spring) และแผ่นตัวหน่วง (Frictional damping pad) ที่สามารถปรับค่าได้เข้าไปในกลไก เพื่อปรับแต่งค่า Pre-tension และ Damping ratio สำหรับการใช้งานของผู้ใช้แต่ละคน จึงมีตำแหน่งสำหรับใส่ตัวหน่วงและสปริง อยู่ที่ชั้นบนและชั้นล่างของกลไก ดังรูปที่ 4.16 และ รูปที่ 4.17 ตามลำดับ โดยที่ค่าคงตัวของสปริงที่ทดลองเลือกมีค่าเท่ากับ 1545 N/m

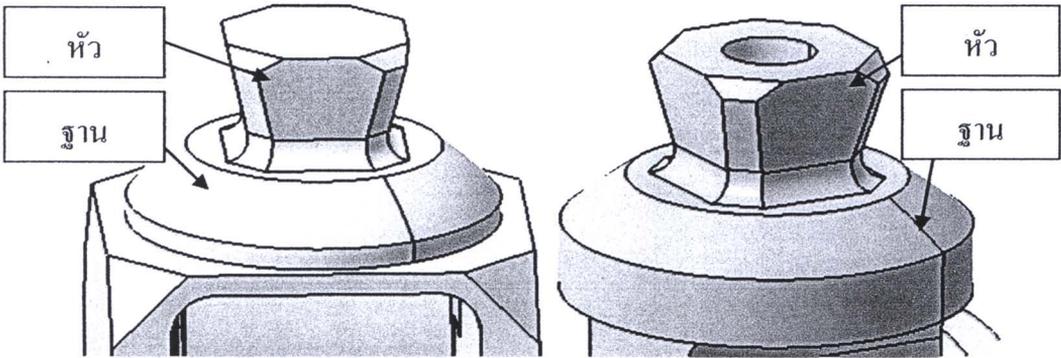


รูปที่ 4.16 ตำแหน่งสำหรับใส่สปริงในกลไกชั้นล่าง



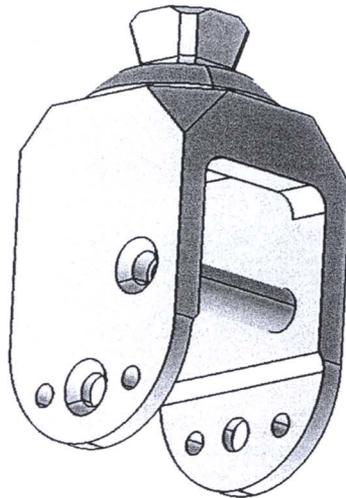
รูปที่ 4.17 ตำแหน่งสำหรับติดแผ่นตัวหน่วง

การประกอบกลไกข้อเข้าเทียมเข้ากับส่วนเบ้าและส่วนแข้ง อุปกรณ์มาตรฐานที่ใช้อยู่ทั่วไปในการยึดเบ้ากับข้อเข้าคือข้อต่อพีระมิดซึ่งปรับแนวขา (Alignment) ได้ แสดงดังรูปที่ 4.18 ส่วนฐานของพีระมิดและส่วนฐานของแท่นส่วนบนรองรับพีระมิดจะต้องมีลักษณะเป็นส่วนโค้งรองรับกัน คือ ส่วนฐานของพีระมิดจะต้องโค้งนูนเพื่อไปดันส่วนโค้งเว้าของฐานของแท่นส่วนบนรองรับพีระมิดให้แนบสนิทกัน ดังนั้นส่วนโค้งทั้ง 2 ต้องมีรัศมีความโค้งที่เท่ากัน



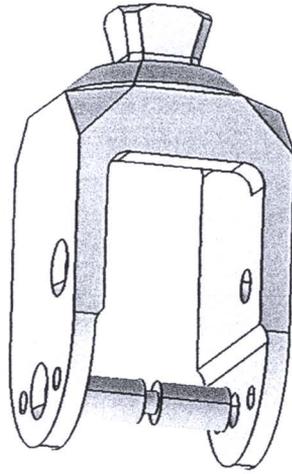
รูปที่ 4.18 ลักษณะพีระมิดที่ใช้ยึดกับเบ้าชาเทียมและแข้ง

ยังต้องมีชิ้นส่วนของเสาสำหรับเคลื่อนที่ในร่องเพื่อให้กลไกสามารถทำงานได้ โดยเสานี้มีทั้งหมด 2 เสาสำหรับ 2 ร่อง ทั้งสองเสามีลักษณะไม่เหมือนกัน โดยที่เสาหนึ่งออกแบบให้เป็นเพลลาเรียบและเจาะรูทำเกลียวทั้งสองด้านเพื่อสำหรับยึดกับชิ้นส่วนบนของกลไก ซึ่งเสานี้มีลักษณะดังรูปที่ 4.19



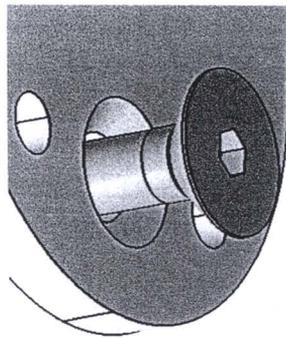
รูปที่ 4.19 เสาเรียบที่ใช้ใน Joint หนึ่งของกลไก

ส่วนอีกเสาหนึ่งต้องมีสปริงยึดติดอยู่จึงต้องออกแบบเป็นเพลลาต่างระดับ (Step shaft) แต่การเจาะรูทำเกลียวยังต้องเป็นแบบเดิม ก็จะได้ลักษณะของเสาอันที่สองนี้เป็น ดังรูปที่ 4.20



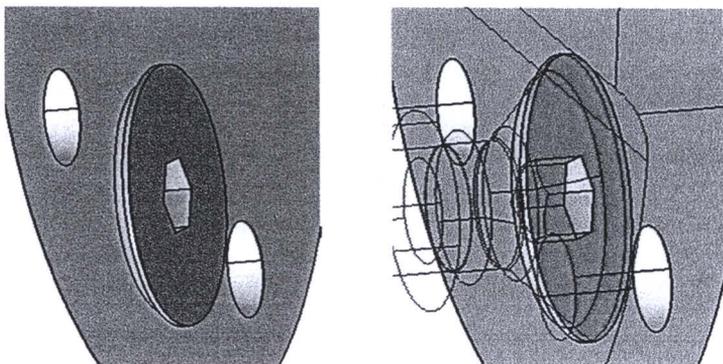
รูปที่ 4.20 เสาคัดระดับสำหรับอีก Joint หนึ่งของกลไก

น็อตที่ใช้ยึดเสาคัดระดับทั้งสองกับชิ้นล่างของกลไกนั้นต้องช่วยให้เสาคัดระดับทั้งสองมีแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาคัดระดับตรงกันกับจุดศูนย์กลางของรูที่เจาะไว้บนชิ้นล่างของกลไก จึงได้เลือกใช้ น็อตแบบ Counter sunk head ที่มีมุมของหัวน็อตเป็นมุม 90 องศา ดังรูปที่ 4.21



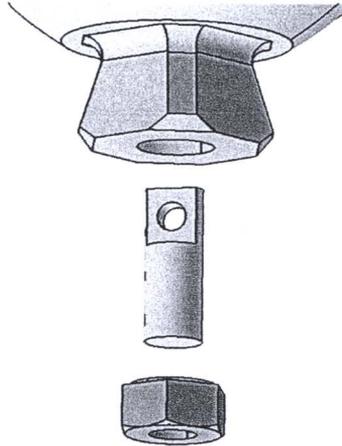
รูปที่ 4.21 น็อตที่ใช้สำหรับยึดเสาคัดระดับทั้งสอง

เพราะเมื่อขันน็อตจนสุดแล้วบริเวณที่เป็นส่วนของกรวยของน็อตจะไปเข้ากับรู Counter sunk ที่ทำไว้ในชิ้นล่างของกลไก ก็จะทำให้แนวเส้นดังกล่าวทับกันพอดี ดังรูปที่ 4.22



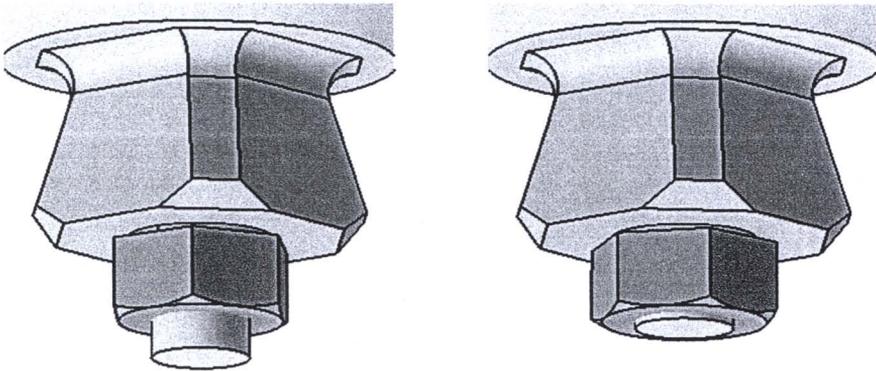
รูปที่ 4.22 ลักษณะของน็อตเมื่อขันเข้าไปเรียบร้อยแล้ว

ในการปรับค่า Pre-tension ของสปริงที่ใส่ในนั้นต้องมีชิ้นส่วนอีกชิ้นที่ทำงานโดยจะอยู่ที่ชิ้นส่วนล่างของกลไก ชิ้นส่วนนี้จะมีรูด้านหนึ่งสำหรับใช้เกี่ยวกับสปริงที่นำมาใส่ ส่วนอีกด้านจะทำเกลียวสำหรับยึดน็อตสำหรับปรับค่าโดยค่า Pre-tension ดังรูปที่ 4.23



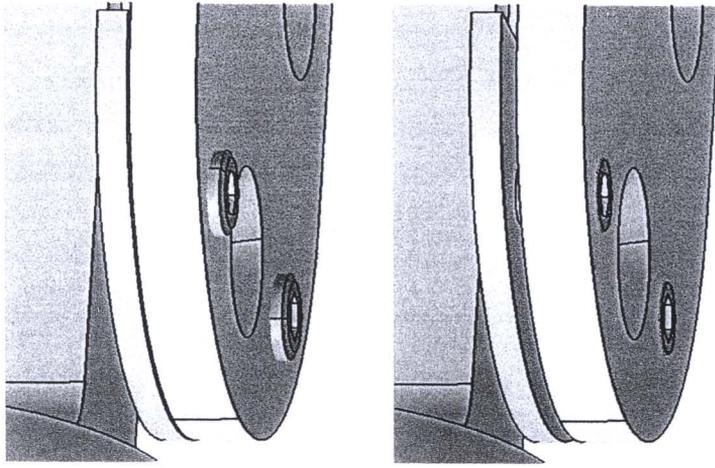
รูปที่ 4.23 ชิ้นส่วนสำหรับยึดสปริงที่อยู่บนชิ้นส่วนบนของกลไก

สำหรับค่า Pre-tension ของสปริงนั้นจะแปรผันตรงกับ Initial extension distance ของสปริง จึงออกแบบให้สามารถปรับโดยหมุนน็อตที่อยู่ปลายเกลียวก็จะทำให้ Initial extension distance เปลี่ยนค่าได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.24



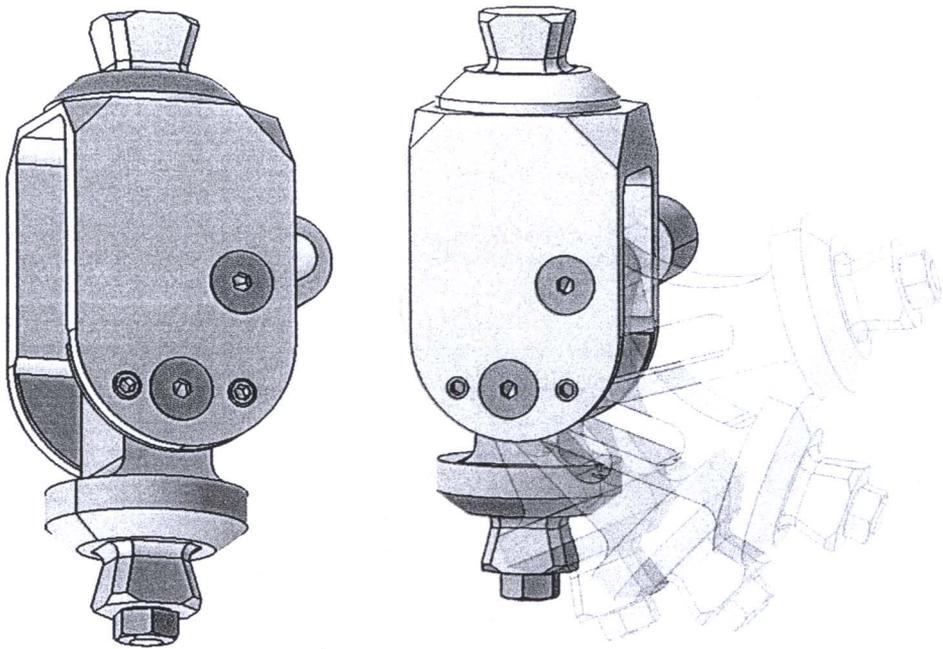
รูปที่ 4.24 การปรับค่า Pre-tension ของสปริง

ส่วนการปรับค่าอัตราหน่วงของการดีดกลับของกลไกนั้นทำได้โดยขันน็อตบริเวณชิ้นส่วนบนของกลไกที่คอยกแผ่นตัวหน่วง เมื่อขันแล้วตัวหน่วงจะออกแรงกดชิ้นส่วนล่างของกลไกมากขึ้น ก็จะทำให้ระหว่างที่กลไกทำงานก็จะมีคามฝืดมากขึ้น ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 การปรับค่าความเด้งของแผ่นตัวห่วง

สุดท้ายก็จะได้แบบโดยละเอียดของกลไกข้อเข้าเพื่อนำไปสร้างจริงโดยเมื่อประกอบกันทั้งหมดแล้วจะได้กลไกดังรูปที่ 4.26 แต่เนื่องจากแบบนี้ยังไม่ได้ถูกนำไปสร้างและทดลองใช้งานจริง ดังนั้นจะเรียกแบบของกลไกนี้ว่า DOSL1 หลังจากนั้นจะนำแบบที่ได้ไปทดลองสร้างกลไกต่อไป

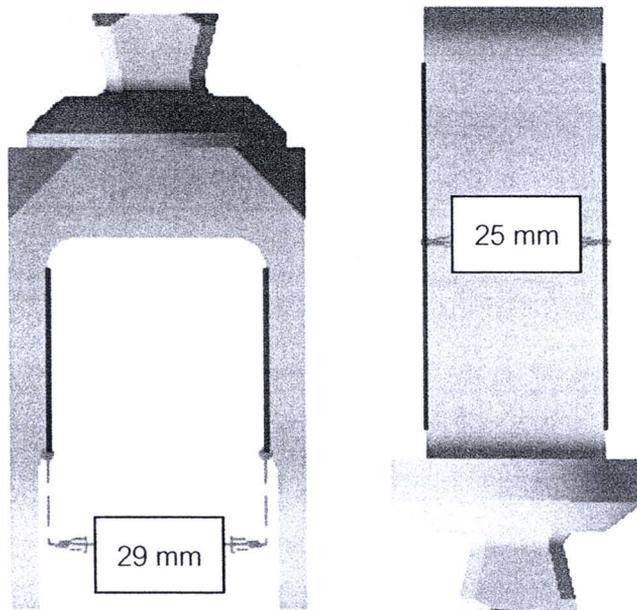


รูปที่ 4.26 กลไกที่ประกอบเรียบร้อยแล้วเรียกแบบที่ได้ว่า DOSL1

4.4 การสร้างกลไกเพื่อทดสอบและออกแบบใหม่

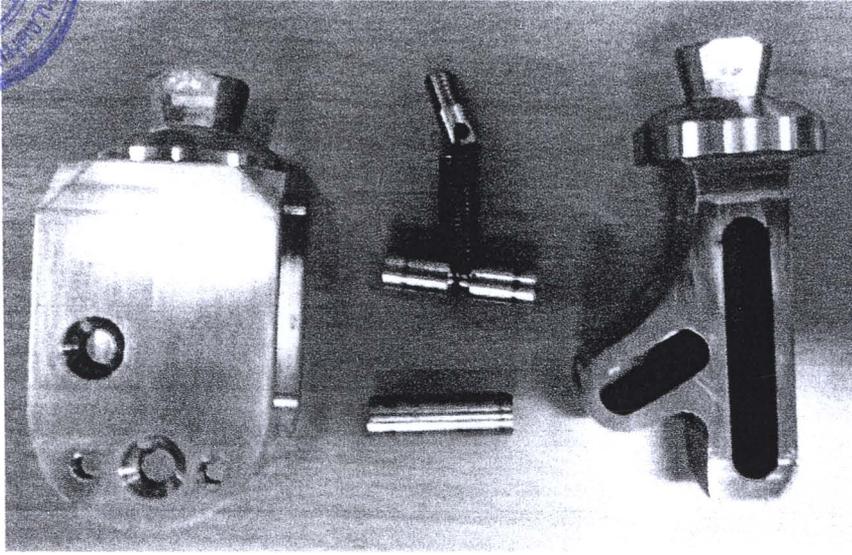
4.4.1 การสร้างกลไก DOSL1

หลังจากที่ได้ออกแบบกลไกเป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงนำกลไกนี้มาสร้างจริง โดยเลือกใช้วัสดุทั้งหมด เป็น SS304 เพราะมีความคงทนแข็งแรง สวยงาม ราคาถูก หาได้ทั่วไป และไม่เป็นสนิม ชิ้นส่วนเกือบทุกชิ้นส่วนต้องการความแม่นยำของขนาดมิติ เช่น ความขนานของชิ้นบนของกลไก คือจำเป็นต้องมีระยะห่างของแนวเส้นสีแดงเท่ากันตลอด ดังแสดงในรูปที่ 4.27 เป็นต้น



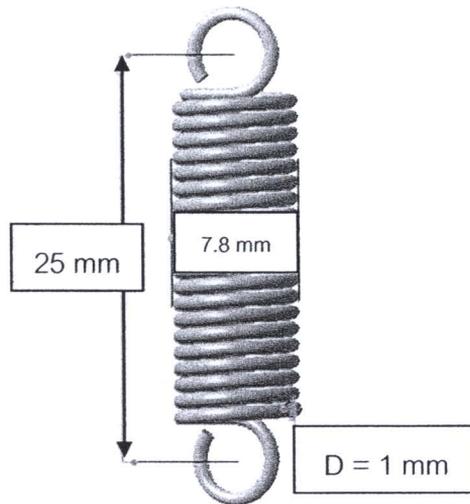
รูปที่ 4.27 ตัวอย่างบริเวณที่ต้องการความแม่นยำของขนาดมิติ

ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องใช้เครื่อง CNC (Computer Numerical Control) เข้ามาช่วยในการผลิต นอกจากนี้ยังช่วยลดเวลาในการสร้างต้นแบบเพื่อนำมาทดลองใช้อีกด้วย สำหรับเครื่อง CNC ที่ใช้ผลิตต้นแบบนี้เป็นเครื่อง MAZAK INTEGREX 100-IV ก็จะกัดขึ้นรูปได้ชิ้นงานแต่ละชิ้นออกมาดังรูปที่ 4.28



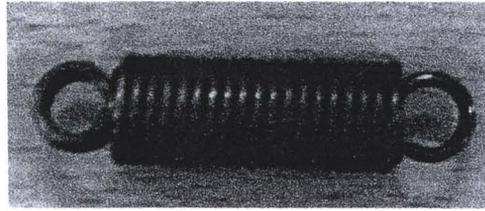
รูปที่ 4.28 ชิ้นงานที่กัดได้จากเครื่อง CNC

ในส่วนของการผลิตสปริงได้กำหนดขนาดและลักษณะของสปริงโดยมีความยาวจากจุดกึ่งกลางของวงกลมหูสปริงจากหัวถึงท้ายยาว 25 mm ใช้ลวดสปริงเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm มีจำนวนขดทั้งหมด 20 ขด และ เส้นผ่านศูนย์กลางนอก 7.8 mm ซึ่งทำให้ได้มาซึ่งค่าคงตัวสปริงที่ต้องการ ดังรูปที่ 4.29

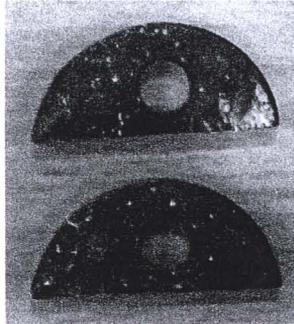


รูปที่ 4.29 ขนาดมิติสปริงที่ได้ออกแบบไว้

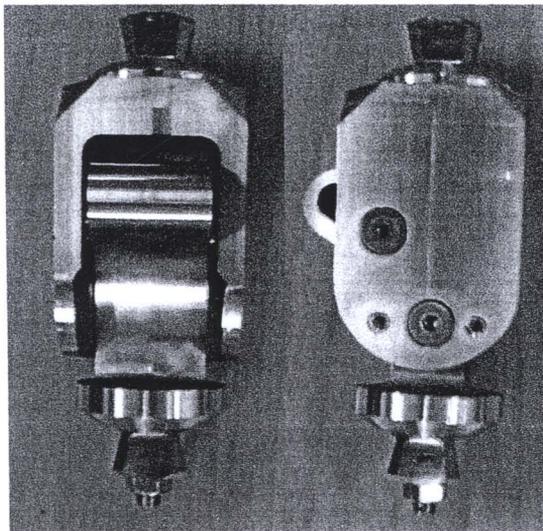
เมื่อสั่งทำก็จะได้สปริงออกมาเป็นดังรูปที่ 4.30 สำหรับแผ่นตัวหน่วงเลือกใช้วัสดุหุ้มล้อ (Brake pad) ของจักรยานยนต์ตัดและเจาะตามออกแบบไว้ก็จะได้ตัวหน่วงออกมาดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.30 สปริงที่ได้จากการสั่งทำ



รูปที่ 4.31 แผ่นตัวหน่วงที่ทำจาก Brake pad



รูปที่ 4.32 กลไกเมื่อผลิตและประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว

สุดท้ายเมื่อได้ชิ้นส่วนทุกชิ้นครบจึงนำมาประกอบกันเป็นกลไกข้อเท้าเทียมดังแสดงในรูปที่ 4.32 โดยที่กลไกนี้จะทำงานใน Sagittal plane ของข้อเท้า สามารถปรับ Alignment สำหรับขาของผู้ใช้ที่ต่างกันได้ ให้เส้นทางการเคลื่อนที่เลียนแบบขาในธรรมชาติจากข้อมูลที่ได้เก็บมาจากอาสาสมัคร มีมุมงอเข้ามากที่สุดเท่ากับ 120 องศา (เริ่มนับจากขาเหยียดตั้ง) สามารถปรับค่า Pre-tension ของสปริงและค่าอัตราหน่วงการตีกลับของกลไกได้ตามที่ออกแบบไว้ข้างต้น กลไกข้อเข้านี้ก็พร้อมสำหรับนำกลไกนี้ไปทดสอบเดินจริงกับผู้ใช้ต่อไป

4.4.2 การทดสอบใช้งานจริงของ DOSL1

เมื่อนักกลไกข้อเข่าแบบ DOSL1 ที่สร้างขึ้นไปประกอบกับขาเทียมส่วนเข้าและส่วนแข้ง โดยตั้ง Alignment ให้เหมาะสมกับผู้ทดสอบ ก็จะได้ลักษณะขาเทียมที่สมบูรณ์ ต่อไปจึงให้อาสาสมัครจากโรงพยาบาลทหารผ่านศึกช่วยทดสอบกลไก พบว่าผู้ใช้สามารถเดินได้ตามจุดประสงค์ที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่จากการสัมภาษณ์ผู้ใช้พบว่ากลไกข้อเข่านี้ให้แรงของสปริงในจังหวะที่ขาต้องติดกลับน้อยเกินไป ทำให้จังหวะการเดินผิดไปเล็กน้อย แผ่นตัวหน่วงมีความยืดมากเกินไป เมื่อขันทนอตที่กดแผ่นตัวหน่วงเพียงเล็กน้อยแต่ให้ความยืดมาก (มี Sensitivity ของการปรับค่าอัตราหน่วงมาก) แต่ในด้านของรูปลักษณะ ขนาด น้ำหนัก และเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นที่พอใจของผู้ใช้แล้ว และจากการทดสอบเดินได้ภาพของแต่ละจังหวะในการเดินออกมาดังรูปที่

4.33

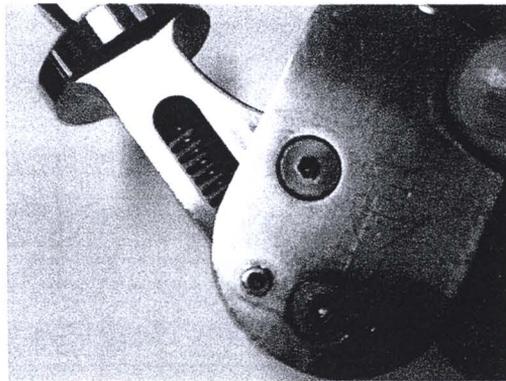


รูปที่ 4.33 กลไกข้อเข่าแบบ DOSL1 ที่นำไปทดสอบใช้งาน

4.4.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทดสอบใช้งานของแบบ DOSL1

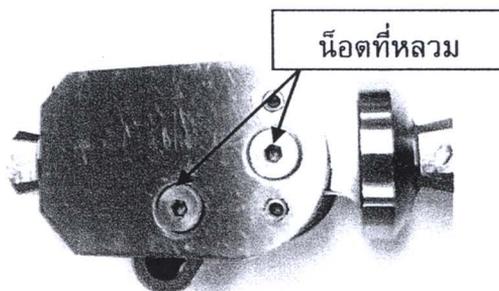
กลไกข้อเข้าเทียมที่ได้ออกแบบนั้นแม้ว่าจะสามารถทำงานได้ตามจุดประสงค์หลักที่ตั้งเอาไว้ เพื่อให้แน่ใจว่าในการใช้งานจริงจะไม่เกิดปัญหาที่อาจคาดไม่ถึง ดังนั้นจึงนำกลไกข้อเข้าเทียมที่ได้สร้างขึ้นไปทดสอบใช้งานจริงโดยมีอาสาสมัครจากโรงพยาบาลทหารผ่านศึกเป็นผู้ทดสอบเบื้องต้น หลังจากที่ได้นำกลไกที่ได้ออกแบบไปทดสอบและปรึกษากับผู้ทดสอบพบว่า มีปัญหาที่ต้องการการแก้ไขดังนี้

1. ค่าคงตัวของสปริงในขาเทียม (รูปที่ 4.34) นั้นมีค่าน้อยเกินไปทำให้จังหวะการดีดกลับของกลไกในช่วง Swing phase ผู้ทดสอบต้องออกแรงจากสะโพกเพื่อช่วยในการดีดกลับจึงทำให้การเดินไม่เป็นธรรมชาติเท่าที่ควรถึงแม้จะมีเส้นทางการเคลื่อนที่ของกลไกที่เป็นธรรมชาติ



รูปที่ 4.34 ตำแหน่งของสปริงที่อยู่ในกลไกข้อเข้าเทียม

2. เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งน็อตที่ใช้ยึดอยู่ที่เสาทั้งสี่ตัว ดังรูปที่ 4.35 จะเกิดหลวม คลายตัว ออกเองทำให้เกิดการสั่นคลอนของกลไกตามมา ซึ่งการสั่นคลอนของกลไกนี้ส่งผลกระทบต่อความมั่นใจของผู้ใช้ระหว่างการเดินเป็นอย่างมาก

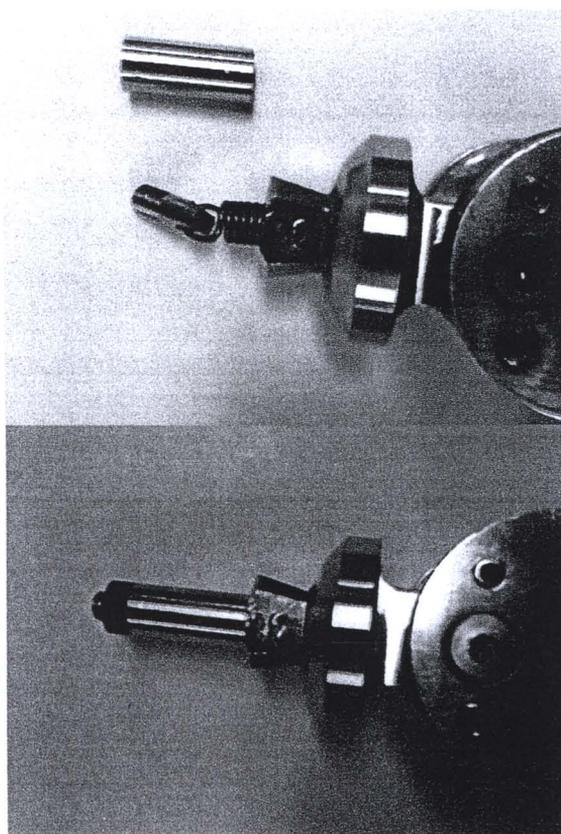


รูปที่ 4.35 น็อตที่ใช้ยึดเสาที่สามารถคลายหลวมขณะใช้งาน

3. Brake pad ที่ใช้เป็นแผ่นตัวหน่วง เกิดการสึกหรอมากไม่คงทนและมีขนาดเล็ก ซึ่งด้วยทั้งสองปัจจัยนี้จึงส่งผลกระทบต่อการทำงานของกลไกในแนวระนาบ Coronal ของเขา อีกทั้งยังยากต่อการปรับค่าอัตราหน่วงให้ได้ค่าที่ต้องการเนื่องจากต้องขันน็อตที่ออกแรงถึง 4 จุด
4. กลไกต้องการตัวหยุดเพื่อรับแรงในจังหวะที่กลไกเข้าอยู่ในท่ายืนตรงคือมุมงอเข่าเหยียดสุด (Full knee extension) ซึ่งจะช่วยลดเสียงในจังหวะตีกลับของ Swing phase ในช่วงก่อนสัมผัสเท้าแตะพื้น Heel strike ซึ่งหากไม่มีตัวหยุดรับแรงก็จะทำให้ทุกครั้งที่ก้าวเดิน กลไกจะส่งเสียงดังในจังหวะ Heel strike

4.5 การแก้ไขแบบครั้งที่ 1

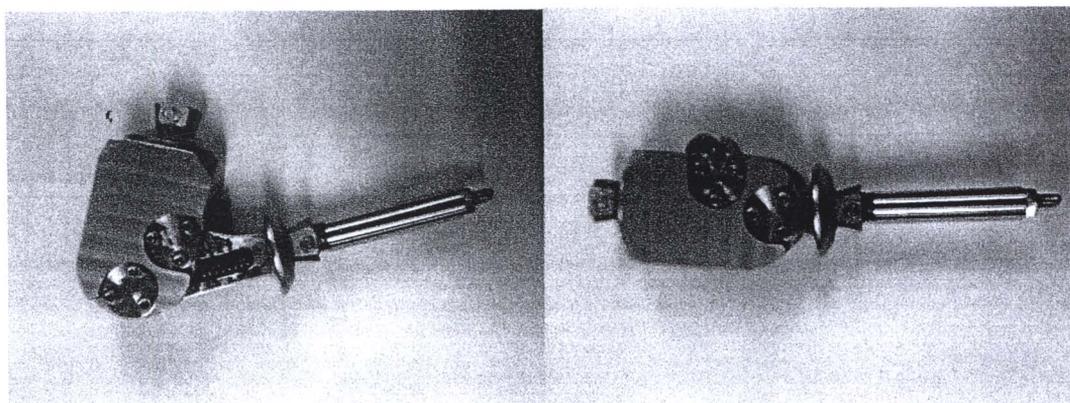
สำหรับปัญหาเรื่องสปริงที่มีค่าคงตัวน้อยเกินไปสามารถแก้ไขโดยปรับแบบสปริงให้มีจำนวนขดและเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดสปริงเพิ่มขึ้นแต่จะทำให้ตัวสปริงมีความยาวเพิ่มมากขึ้น จึงต้องมีชิ้นส่วนคือรังสปริงเพิ่มเติมดังรูปที่ 4.36



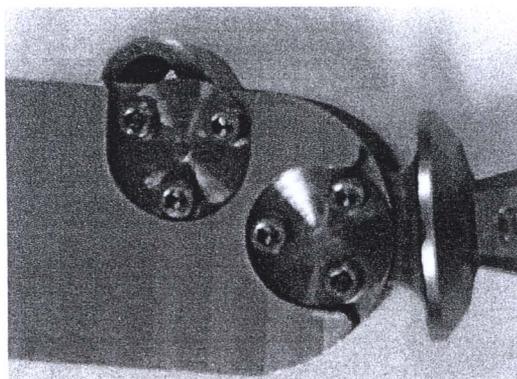
รูปที่ 4.36 สปริงที่ยาวเกินออกมาและการติดตั้งรังสปริง

ค่าคงตัวสปริงนั้นจากการสืบค้นข้อมูลพบว่าค่าคงตัวสปริงที่เหมาะสมสำหรับกลไกเขานั้นควรมีค่าประมาณ 0.25 N.m/deg [6] ซึ่งเมื่อนำไปคำนวณกับระยะของจุด ICZV ของกลไกที่ได้ ออกแบบที่ตำแหน่งการงอขาต่างๆ จะสามารถหาค่าประมาณของค่าคงที่สปริงได้เท่ากับ 6 N/mm ดังนั้นแล้วจึงออกแบบสปริงให้มีค่าคงที่สปริงค่าดังกล่าวแล้วนำมาใส่ในกลไกดังรูปที่ 4.37

ในส่วนของน็อตที่ยึดกับกลไกที่สามารถหลวมได้เองนั้น แก้ไขได้โดยออกแบบชิ้นส่วนเสานิวใหม่ ให้เสายึดติดกับชิ้นส่วนโครงสร้างดังรูปที่ 4.38 ก็จะทำให้เมื่อกลไกทำงานจะสามารถมั่นใจได้ว่าเสายึดจะอยู่กับที่สัมพันธ์กับชิ้นส่วนโครงสร้างตลอดเวลา



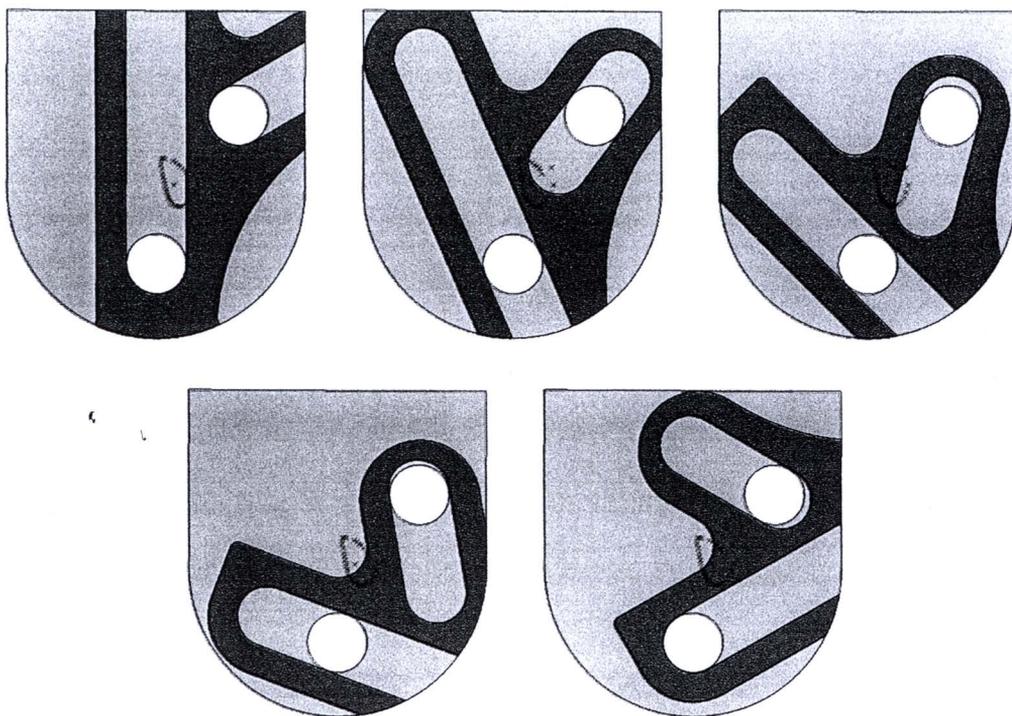
รูปที่ 4.37 กลไกข้อเข่าเทียมที่ประกอบและใส่สปริงที่มีค่าคงตัวเหมาะสมแล้ว



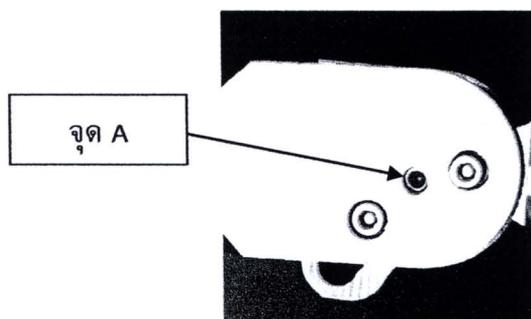
รูปที่ 4.38 การออกแบบเสานิวแบบใหม่ซึ่งทำให้ไม่เกิดการหลวมคลาย

ในส่วนของการปรับอัตราห้วงของกลไกนั้นยังคงใช้การสร้างอัตราห้วงจากแรงเสียดทานแต่ได้เปลี่ยนมาใช้แผ่นทองเหลืองที่มีพื้นที่มากขึ้นกว่าเดิมและให้มีจุดที่ใช้สำหรับปรับค่าอัตรห้วงเป็นการขันน็อตที่ตำแหน่งเดียวเท่านั้น ซึ่งจะง่ายกว่าการปรับค่าอัตราห้วงแบบเดิม โดยที่จุดที่ใช้สำหรับขันน็อตเพื่อสร้างแรงกดตั้งฉาก (Normal force) เพื่อปรับแรงเสียดทานนี้จะเป็นตำแหน่งที่เป็นตัวแทนของพื้นที่ที่แผ่นทองเหลืองสัมผัสกับชิ้นล่างของกลไก ซึ่งคือพื้นที่สีแดงในรูปที่ 4.39

เมื่อหาพื้นที่ที่ทุกองศาการเคลื่อนที่ทุกองศาของขาเทียมจะได้ Centroid of contact area ซึ่งคือจุด A ในรูปที่ 4.40

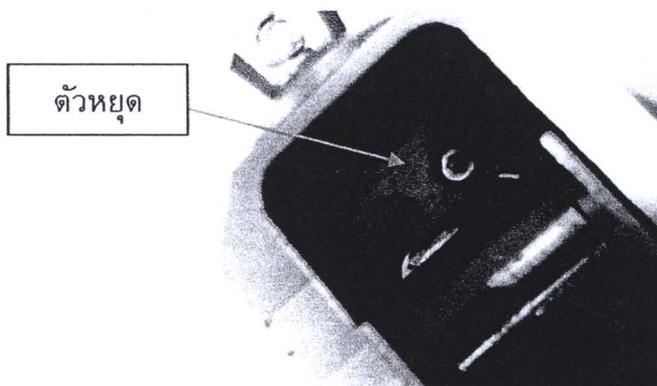


รูปที่ 4.39 ตัวอย่างพื้นที่ที่ใช้หาจุด Centroid สำหรับจุดที่จะใช้ปรับค่าอัตราหมุนของกลไกข้อเข่า



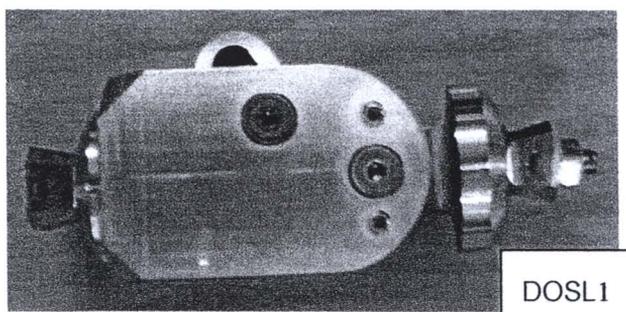
รูปที่ 4.40 ตำแหน่งที่ใช้สำหรับขั้นตอนเพื่อปรับอัตราหมุนของกลไก

แบบกลไกข้อเข่าเทียมที่ได้ปรับใหม่มีการใส่ตัวหยุดซึ่งทำจากวัสดุโพลียูรีเทน (Polyurethane) ซึ่งช่วยรับแรงกระแทกและทนต่อการสึกหรอได้ดี ดังรูปที่ 4.41 สำหรับตำแหน่งที่ใส่ตัวหยุดจะเป็นตำแหน่งทำให้เข่าเกิดมุมงอ Flexion เล็กน้อย โดยในตำแหน่งนี้แรงกระแทกทั้งหมดในช่วง Swing phase จะถูกดูดซับไว้ด้วยโพลียูรีเทนซึ่งจะทำให้ลดเสียงดังที่เกิดจากการกระแทกกันของส่วนโครงสร้างกลไก

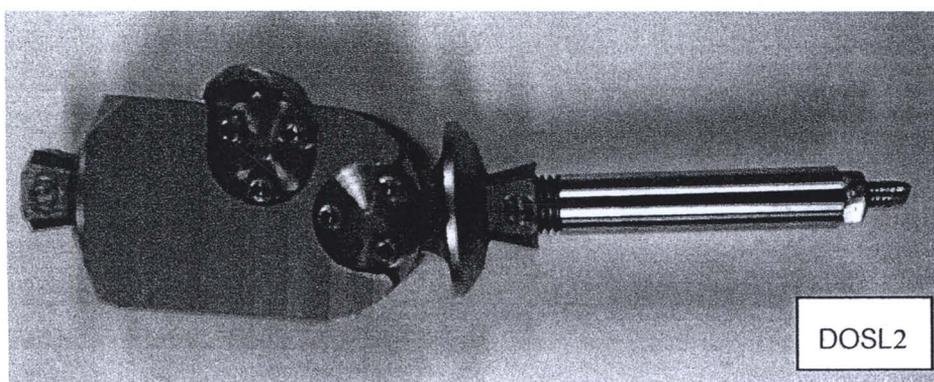


รูปที่ 4.41 ตัวหยุดที่อยู่ด้านในของกลไกทำหน้าที่รับแรงกระแทกและรับแรงกดในขณะยื่น

เมื่อทำการแก้ไขปัญหาและข้อเสนอแนะจาก DOSL1 แล้วก็จะได้กลไกที่มีการเส้นทางการเคลื่อนที่ตามธรรมชาติ มีมุมมองมากที่สุดเท่ากับ 120 องศา มีการดีดกลับที่เหมาะสมด้วยแรงจากสปริง ชิ้นส่วนยึดแน่นไม่หลุดหลวม มีอัตราการหมุนที่ดี และไม่มีเสียงรบกวนขณะทำงาน และจะเรียกแบบของกลไกนี้ว่า DOSL2 โดยที่กลไกจะมีขนาดยาวกว่าเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับแบบ DOSL1 ดังรูปที่ 4.42 และกลไกมีการทำงานที่ดีเมื่อนำไปทดสอบโดยอาสาสมัครจากโรงพยาบาลทหารผ่านศึกได้ผลดังรูปที่ 4.43

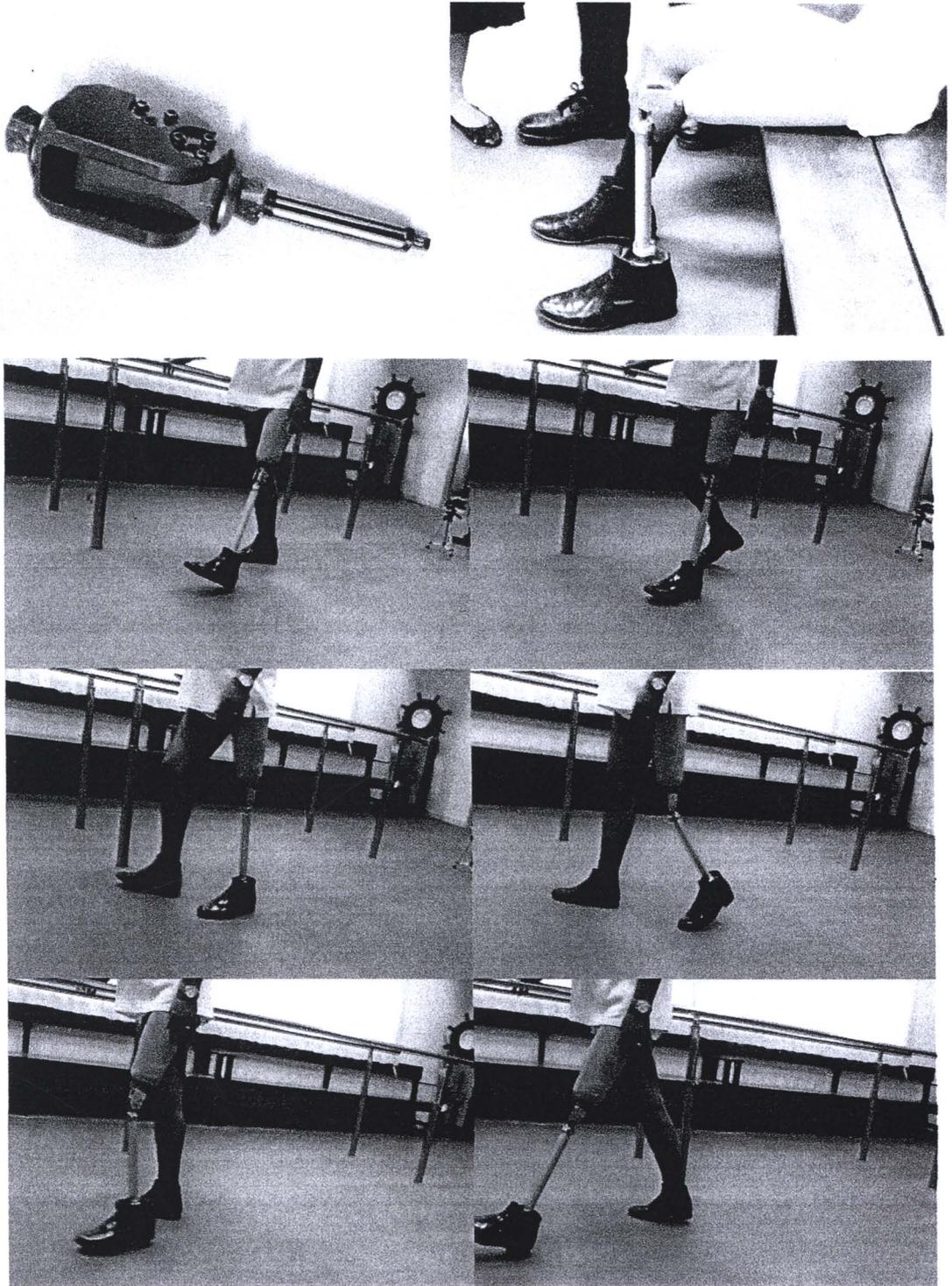


DOSL1



DOSL2

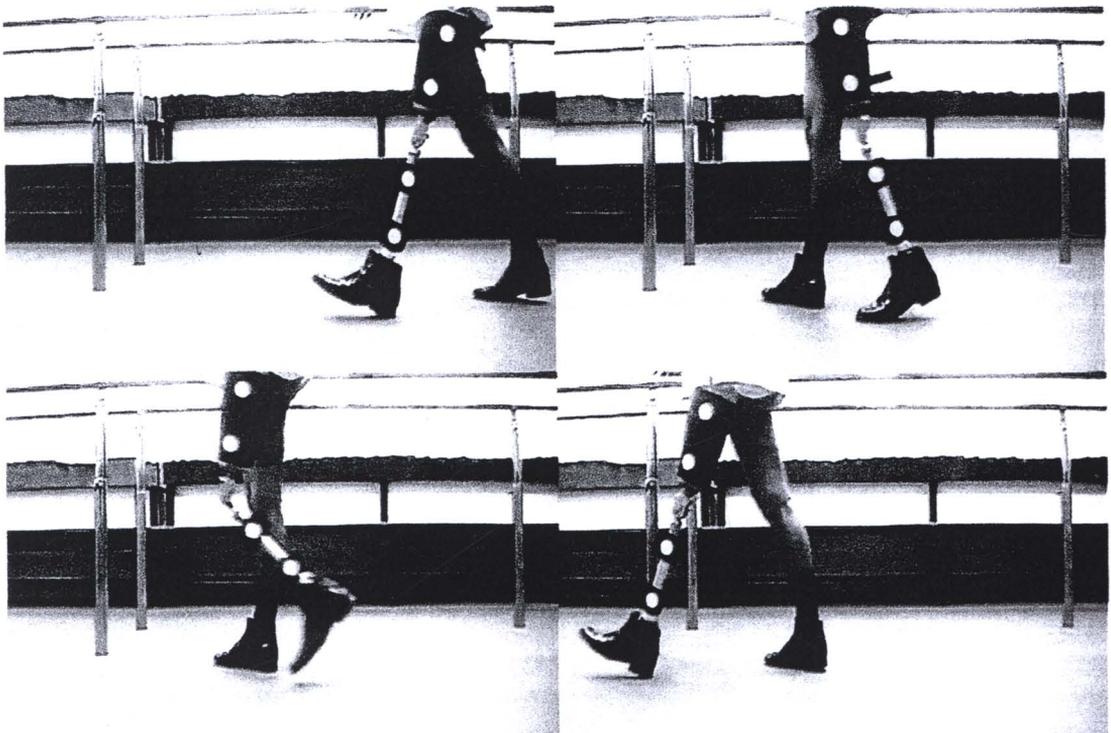
รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบขนาดกลไกข้อเข้าเทียมแบบ DOSL1 และแบบ DOSL2



รูปที่ 4.43 กลไกข้อเข่าเทียมที่แก้ไขแล้ว (แบบ DOSL2) ที่นำไปทดสอบกับอาสาสมัครจาก
โรงพยาบาลทหารผ่านศึก

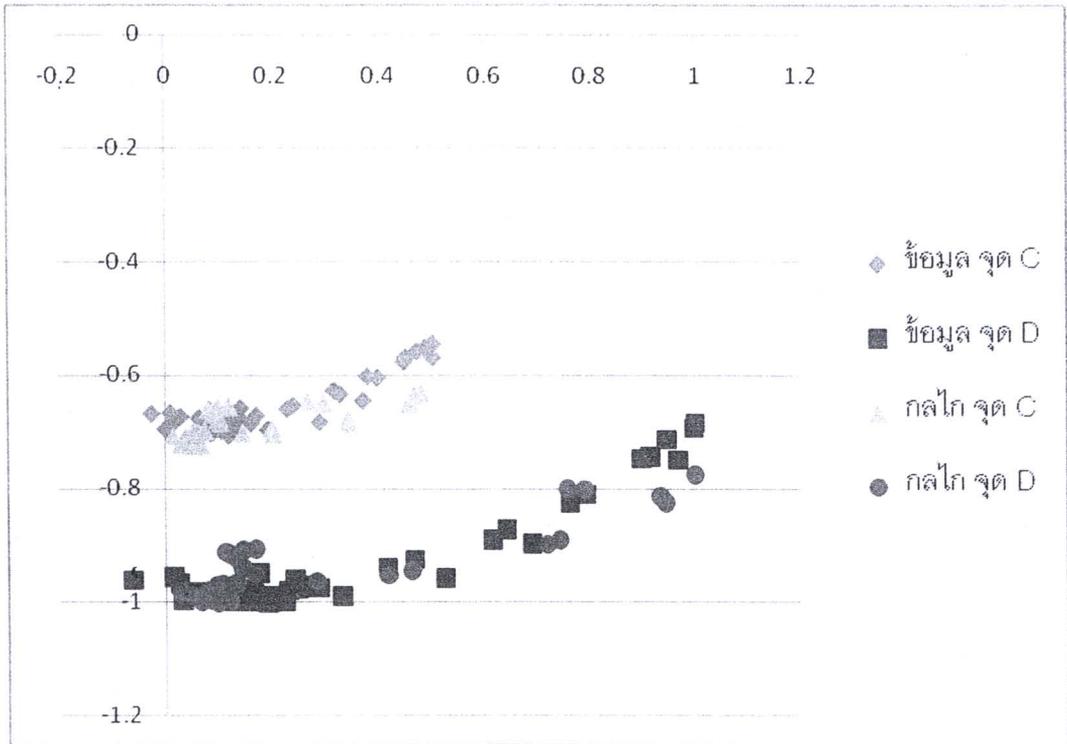
4.6 การตรวจสอบความคล้ายของเส้นทางการเคลื่อนที่จากกลไก

และถึงแม้ว่ากลไกข้อเข่าเมื่อนำไปประกอบกับเท้าเทียมและหน้าแข้งจะสามารถทำให้ผู้ใช้สามารถเดินได้อย่างเป็นธรรมชาติและมีเสถียรภาพแต่เพื่อความมั่นใจจึงนำวิธีการเดียวกับการเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่ที่กล่าวไว้ข้างต้นในหัวข้อ 4.2 ดังรูปที่ 4.44 มาหาข้อมูลเส้นทางการเคลื่อนที่ของกลไกเมื่อนำไปใช้เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ



รูปที่ 4.44 การหาเส้นทางการเคลื่อนที่จากกลไกเพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ใช้สังเคราะห์กลไก

ซึ่งเมื่อทำการ Normalize ให้ตัวแปร R_C และ R_D อยู่ในรูป Dimensionless แล้วจะได้กราฟของข้อมูลทั้งสองชุดเปรียบเทียบกันออกมาเป็นกราฟดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.45 ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่ากลไกข้อเข่าที่ได้ออกแบบขึ้นมีลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายกับเข่าในการเดินตามธรรมชาติ เนื่องจากมีเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มต้น Gait cycle จนจบจึงยืนยันได้อีกครั้งว่ากลไกข้อเข่าเทียมนี้มีเสถียรภาพในทุกจังหวะของการเดิน



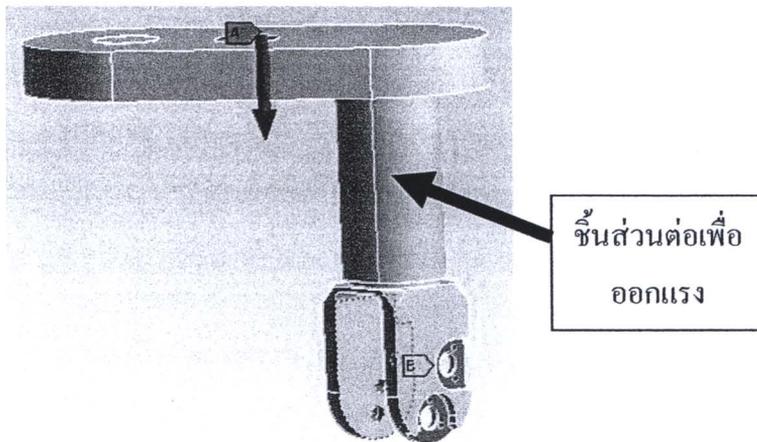
รูปที่ 4.45 ข้อมูลเส้นทางการเคลื่อนที่จากกลไกเทียบกับข้อมูลที่ใช้สังเคราะห์กลไก

4.7 การคำนวณความแข็งแรงเบื้องต้นของกลไกข้อเข้าโดยใช้โปรแกรม FEM

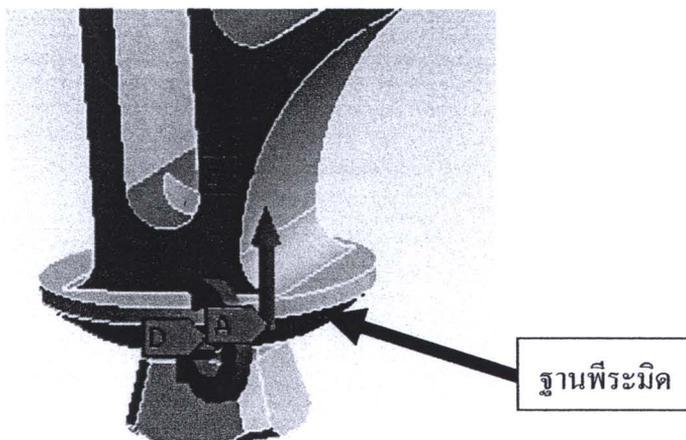
นอกเหนือจากการออกแบบใหม่ (Redesign) กลไกดังกล่าวแล้วยังเพิ่มความหนาในบางส่วนของชิ้นด้านในและชิ้นด้านนอกเพื่อเสริมความแข็งแรงในจุดวิกฤติ เนื่องจากกลไกข้อเข้าเทียมจะต้องถูกทดสอบด้วยแรงที่มีขนาดและทิศตามมาตรฐาน ISO 10328:2006 เพื่อรับรองว่ากลไกจะสามารถทำงานได้โดยมีความน่าเชื่อถือของความแข็งแรงตามมาตรฐานสากล โดยการคำนวณจะเริ่มจากนำชิ้นส่วนโครงสร้างหลักสองชิ้นมาทำการคำนวณด้วยแรงตามมาตรฐานทั้งในรูปแบบ Static load และ Fatigue load ในท่า Heel strike และ Toe off ซึ่งด้วยคุณสมบัติของวัสดุที่กำหนดให้กับ SS304 คุณสมบัติสำคัญคือ Tensile yield strength (S_y) ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาเนื่องจากกลไกข้อเข้าเทียมต้องไม่เสียรูปเนื่องจากแรงตามมาตรฐานที่มากกระทำต่อกลไก และจะใช้ Von Mises equivalent stress (σ_e) [14] จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม FEM จาก ANSYS workbench [17] ในการหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนโครงสร้างของกลไก และสุดท้ายใช้ทฤษฎีความล้าของ Solderberg [14] ในการพิจารณาความเสียหายเนื่องจากความล้า โดยการหาตัวประกอบความปลอดภัย (SF: Safety factor) ที่เปรียบเทียบมาจากอัตราส่วน

ระหว่าง σ_e กับ S_u และเนื่องจากเป็นทฤษฎีของ Solderberg เป็นทฤษฎีที่มุ่งเน้นความปลอดภัยของชิ้นงานเป็นหลักสำคัญ จึงทำให้มั่นใจได้มากที่สุดว่าหากชิ้นงานสามารถผ่านการคำนวณด้วยทฤษฎีนี้ก็จะมีโอกาสมากกว่าในการผ่านการทดสอบความแข็งแรง และกำหนดให้ S_u ของ SS304 มีค่าเท่ากับ 207 MPa สำหรับการใส่ทิศของแรงกระทำทั้งในจังหวะ Heel strike และ Toe off นั้นจะมีทิศของการออกแรงเช่นเดียวกับที่ ISO 10328:2006 กำหนด ซึ่งการบอกทิศของแรงดังกล่าวมีรายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ก

ในส่วนของการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ของการวิเคราะห์ความแข็งแรง จะพิจารณาชิ้นส่วนกลไกสองชิ้นหลักและแยกคำนวณเป็นชิ้นเดียว สำหรับชิ้นบนของกลไกนั้นจะมีชิ้นส่วนต่อเพิ่มเพื่อให้สามารถออกแรงได้ตามทิศที่มาตรฐานกำหนด ดังรูปที่ 4.46 ต่างจากชิ้นล่างของกลไกซึ่งไม่ต้องมีชิ้นส่วนมาต่อเพิ่มแต่จะใช้แรงปฏิกิริยาและโมเมนต์ที่ส่งผ่านมายังบริเวณฐานของหัวพีระมิด ดังรูปที่ 4.47

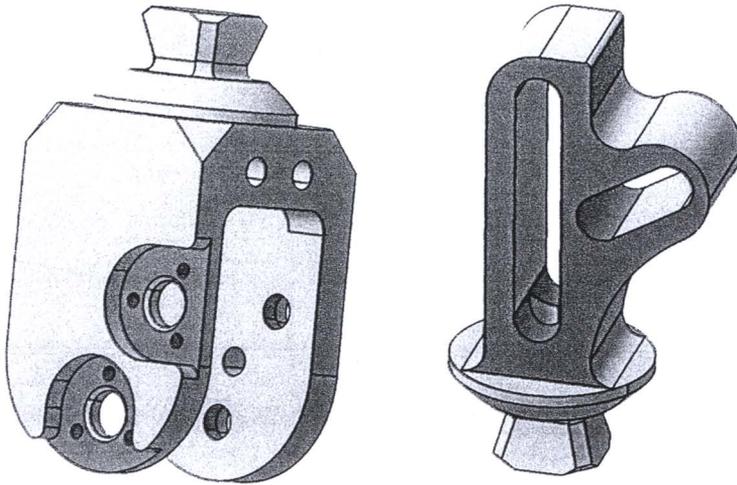


รูปที่ 4.46 ชิ้นบนและชิ้นส่วนต่อเพิ่มสำหรับใส่แรงตามแนวแรงมาตรฐาน ISO



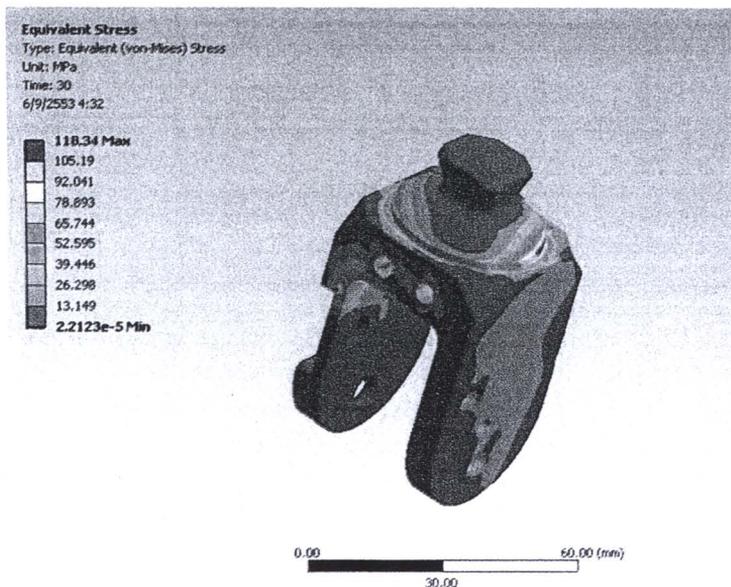
รูปที่ 4.47 ฐานของพีระมิดของชิ้นล่างของกลไกที่ใช้ใส่แรงปฏิกิริยาและโมเมนต์ปฏิกิริยา

สำหรับการกำหนด Support ให้กับชิ้นส่วนบนและชิ้นส่วนล่างของกลไกนั้น จะกำหนดบริเวณที่เป็น Fix support คือบริเวณที่แรงสำหรับชิ้นบนและชิ้นล่างดังรูปที่ 4.48

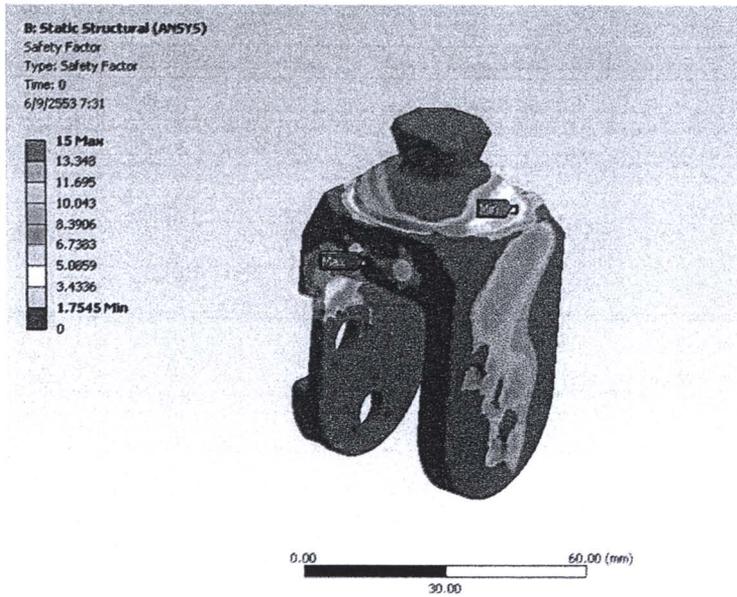


รูปที่ 4.48 บริเวณที่กำหนดเงื่อนไขขอบให้เป็น Fixed support

ต่อมาเริ่มต้นการคำนวณด้วยการคำนวณชิ้นบนของกลไก (รูปที่ 4.15) ในจังหวะ Heel strike จะได้ผลการคำนวณหา σ_e และ SF ได้ผลออกมาเป็นรูปที่ 4.49 และ รูปที่ 4.50 ตามลำดับ

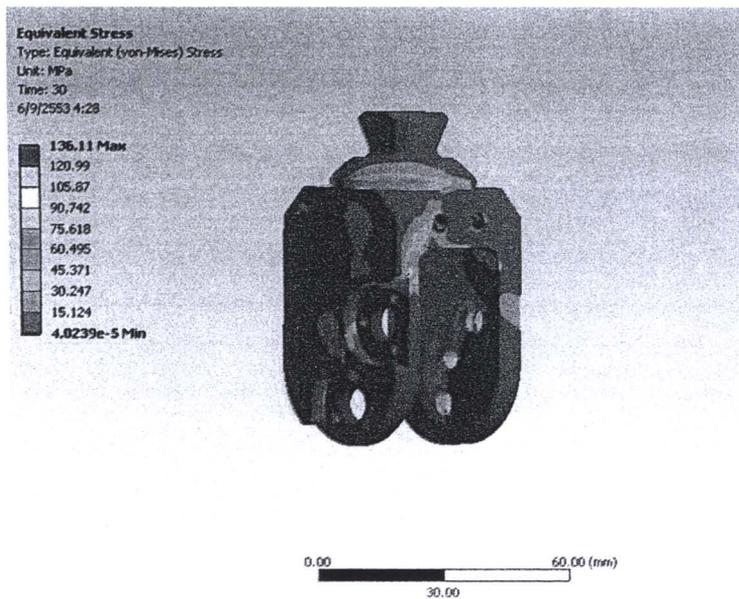


รูปที่ 4.49 σ_e ของชิ้นบนของกลไกในจังหวะ Heel strike

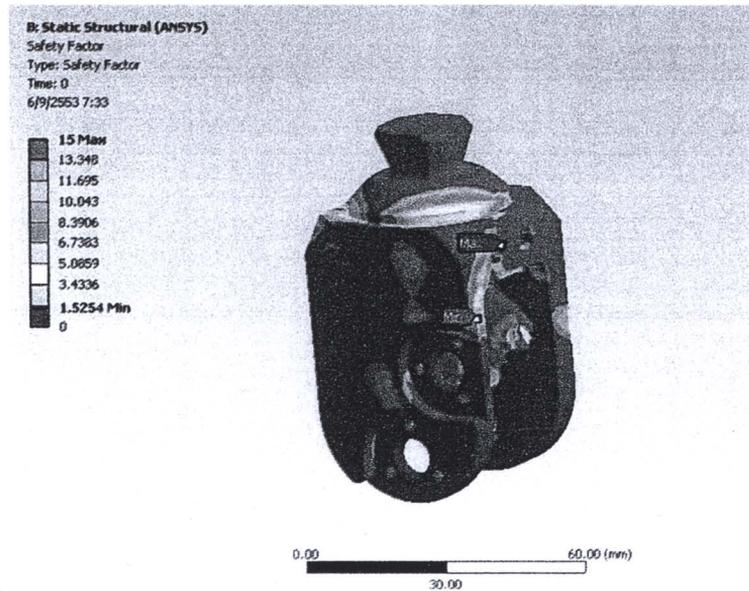


รูปที่ 4.50 SF ของพื้นบนของกอลไกในจังหวะ Heel strike

และในจังหวะ Toe off ของพื้นบนของกอลไกจะได้ผลการคำนวณหา σ_e และ SF ได้ผลออกมาเป็นดังรูปที่ 4.51 และ รูปที่ 4.52 ตามลำดับ



รูปที่ 4.51 σ_e ของพื้นบนของกอลไกในจังหวะ Toe off



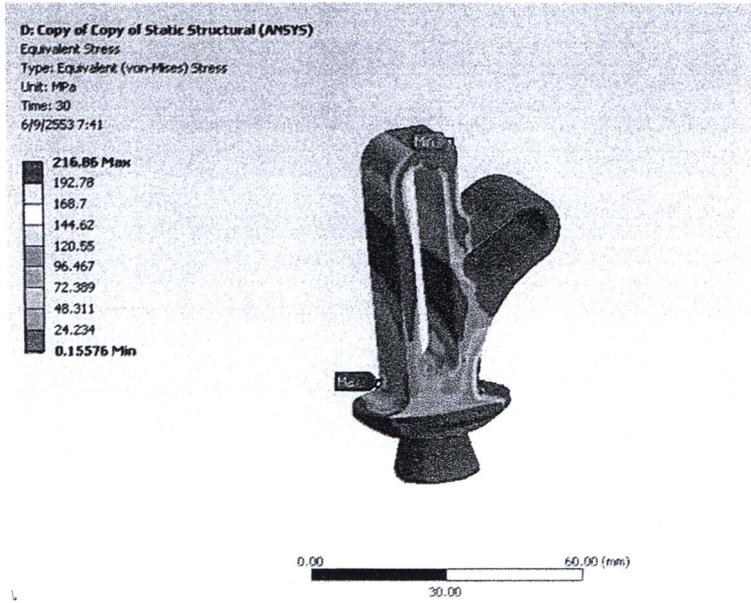
รูปที่ 4.52 SF ของชั้นบนของกลไกในจังหวะ Toe off

ค่าที่มากที่สุดของ σ_e มีค่าเท่ากับ ซึ่งน้อยกว่า S_t และค่าของ SF มีค่ามากกว่า 1 ตลอดชั้นงาน ทั้งในจังหวะ Heel strike และจังหวะ Toe off ดังนั้นชั้นส่วนบนของกลไกนี้ไม่จำเป็นต้องมีการออกแบบใหม่ (Redesign) สำหรับการทดสอบความแข็งแรงซึ่งสำหรับชั้นส่วนบนของกลไกนี้ จะสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FEM ได้ดังตารางที่ 4.1

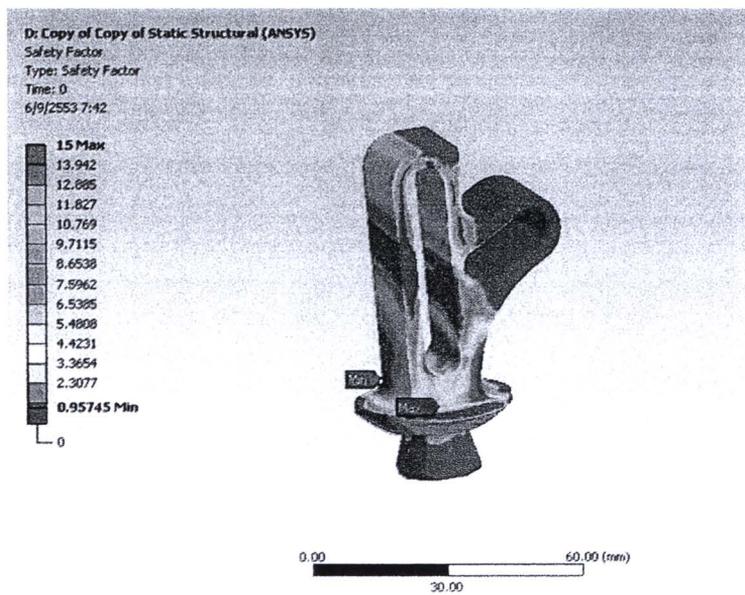
ตารางที่ 4.1 สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FEM ของชั้นส่วนบนของกลไก

SS304 $S_t = 207 \text{ MPa}$	Heel strike	Toe off
Max. von mises stress σ_e	118.34	136.11
Min. SF	1.75	1.53

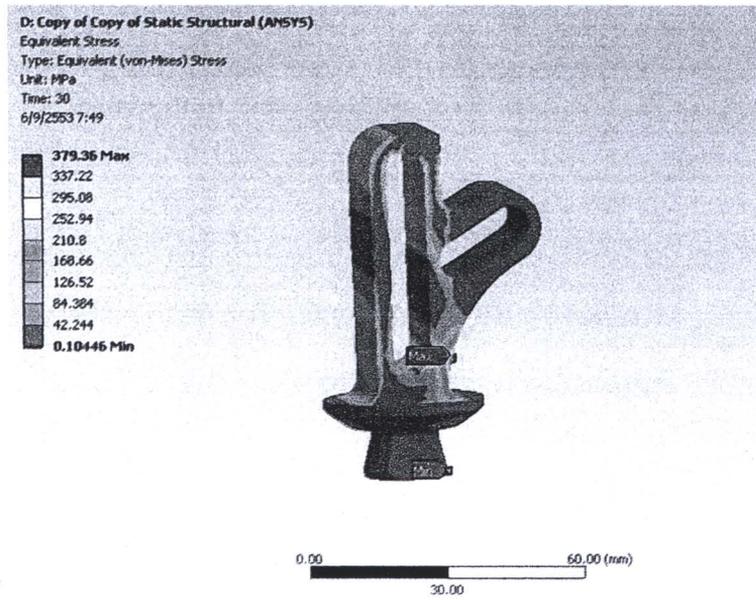
ต่อมาเป็นการคำนวณของชั้นล่างของกลไก (รูปที่ 4.15) โดยทำนองเดียวกันจะได้ผลการคำนวณในท่า Heel strike ในการหา σ_e และ SF ได้ผลออกมาเป็นดังรูปที่ 4.53 และ รูปที่ 4.54 ตามลำดับ และจังหวะ Toe off ของชั้นล่างของกลไกจะได้ผลการคำนวณหา σ_e และ SF ได้ผลออกมาเป็นดังรูปที่ 4.55 และ รูปที่ 4.56 ตามลำดับสำหรับการทดสอบความแข็งแรงซึ่งสำหรับชั้นส่วนล่างของกลไกนี้จะสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FEM ได้ดังตารางที่ 4.2



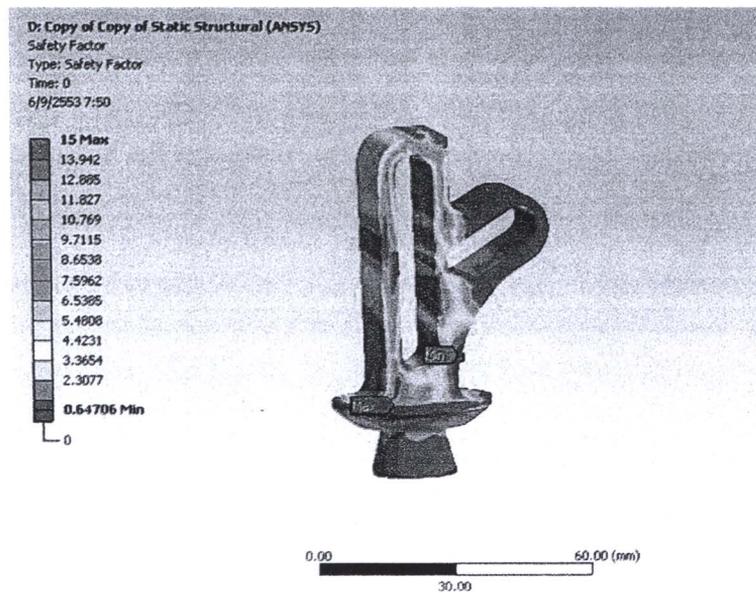
รูปที่ 4.53 σ_e ของชั้นล่างของกอลไกในจังหวะ Heel strike



รูปที่ 4.54 SF ของชั้นล่างของกอลไกในจังหวะ Heel strike



รูปที่ 4.55 σ_e ของชิ้นล่างของกอลไกในจังหวะ Toe off

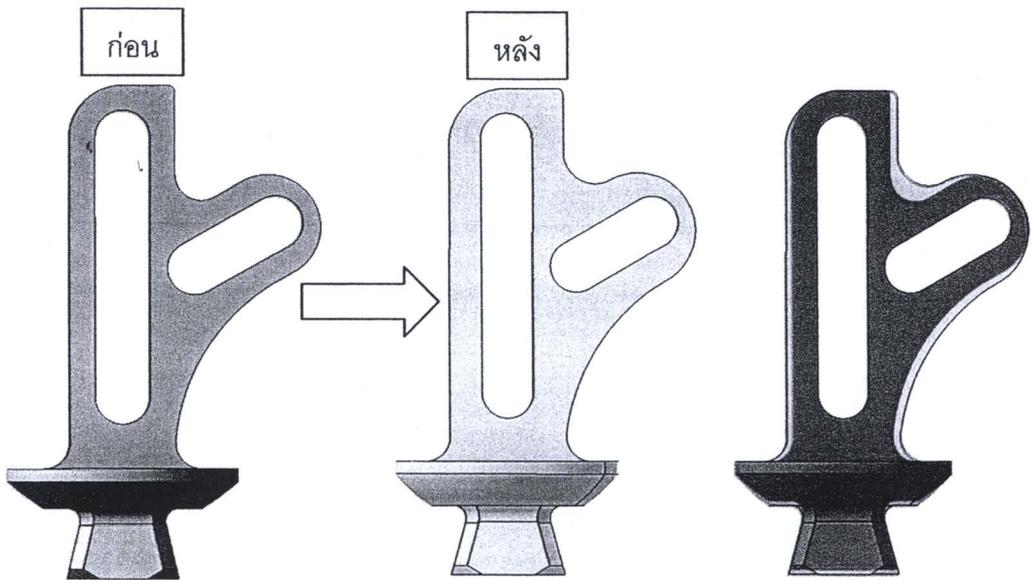


รูปที่ 4.56 SF ของชิ้นล่างของกอลไกในจังหวะ Toe off

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FEM ของชิ้นส่วนล่างของกอลไก

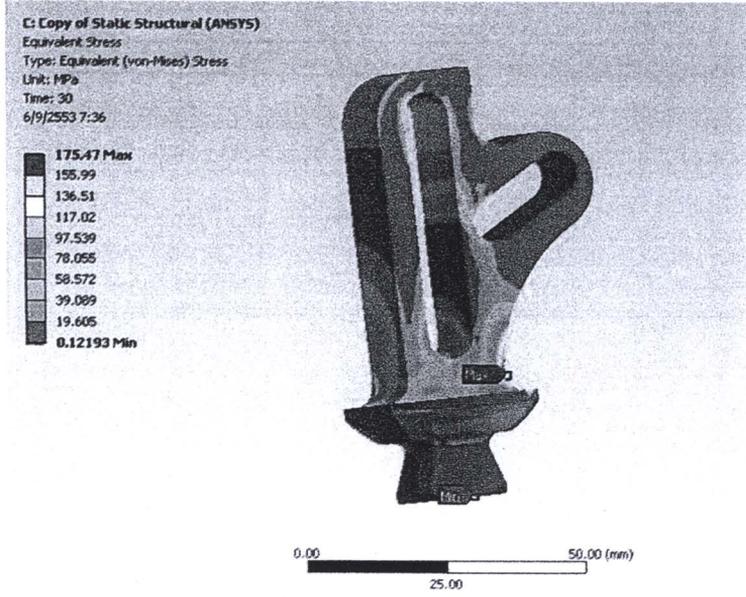
SS304 $S_t = 207 \text{ MPa}$	Heel strike	Toe off
Max. von mises stress σ_e	216.86	379.36
Min. SF	0.96	0.65

เมื่อพิจารณาค่าของ σ_e และ SF ที่คำนวณได้จากโปรแกรม FEM ของชิ้นล่างของกลไกนั้น จะเห็นได้ว่าค่า σ_e ในบางบริเวณมีค่ามากกว่า S_t และ SF ในบางบริเวณมีค่าน้อยกว่า 1 จากผลการคำนวณทั้งสองท่า ดังนั้นแล้วจึงต้องมีการเปลี่ยนค่าขนาดมิติของชิ้นล่างของกลไกในบางตำแหน่งที่เกิดความเค้นสะสมมากคือบริเวณสีแดง-ส้มในรูปที่ 4.53 ถึง รูปที่ 4.56 ให้สามารถทนทานต่อความเค้นได้ดีขึ้น โดยทำการปรับแบบให้มีความหนาขึ้นดังรูปที่ 4.57

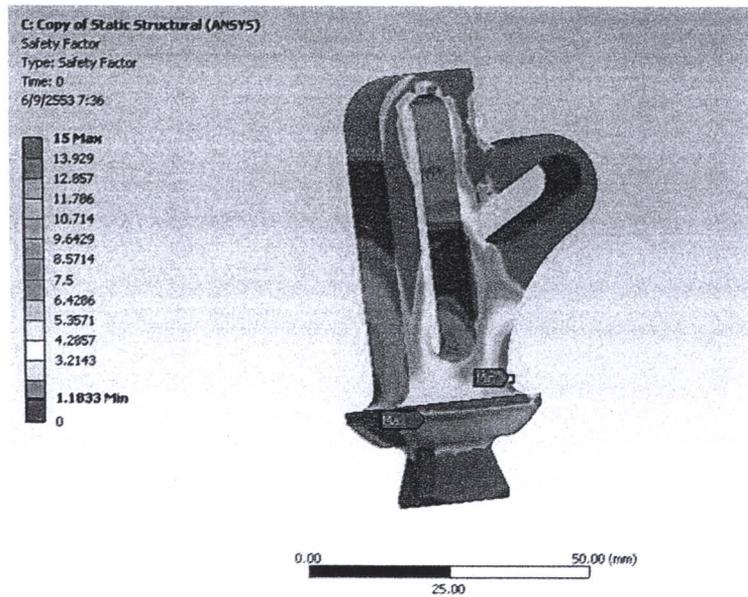


รูปที่ 4.57 ชิ้นล่างของกลไกที่ถูกออกแบบใหม่ให้มีความหนาของเนื้อวัสดุบางส่วนมากขึ้น

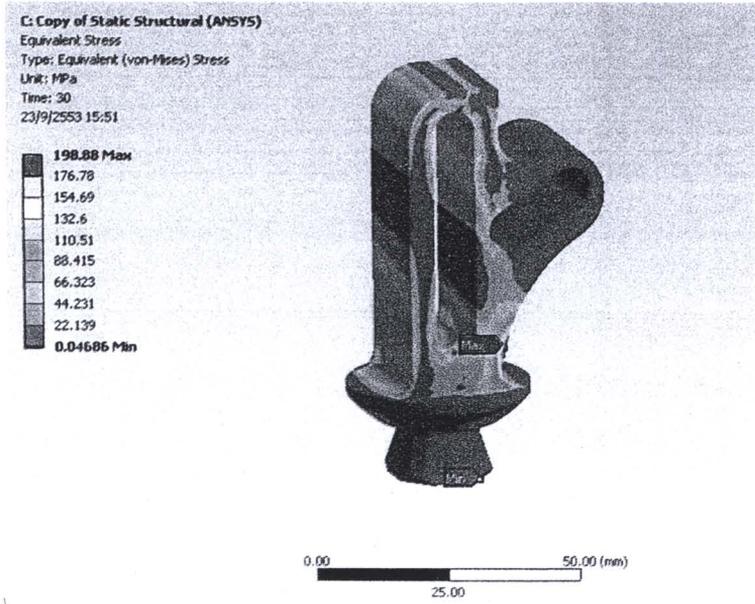
หลังจากที่ออกแบบใหม่ชิ้นล่างของกลไกแล้ว จึงนำแบบที่ได้มาคำนวณความแข็งแรงด้วยโปรแกรม FEM อีกครั้ง ซึ่งได้ผลของการคำนวณทั้ง 4 แบบออกมาเรียงลำดับตั้งแต่รูปที่ 4.58 ถึง รูปที่ 4.61 และสำหรับการทดสอบความแข็งแรงซึ่งสำหรับชิ้นส่วนล่างของกลไกที่ออกแบบใหม่นี้ จะสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FEM ได้ดังตารางที่ 4.3



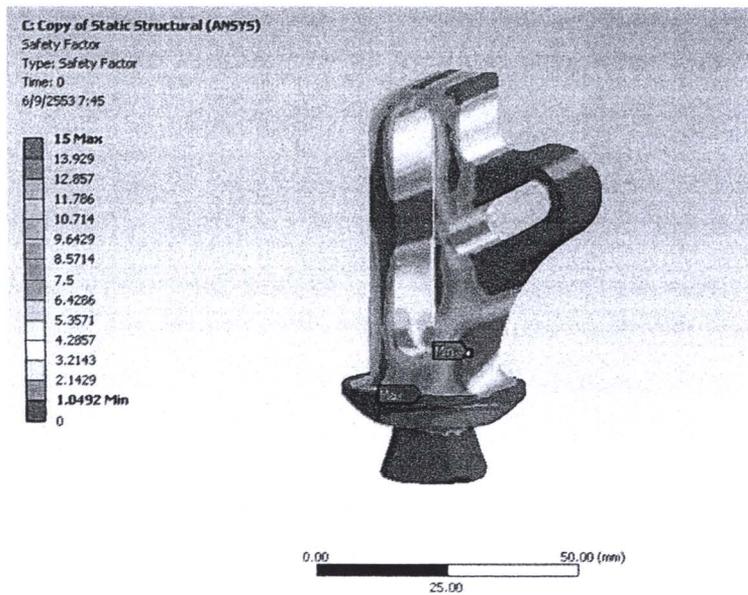
รูปที่ 4.58 σ_e ของชั้นล่างของกบเท้าที่ออกแบบใหม่แล้วในจังหวะ Heel strike



รูปที่ 4.59 SF ของชั้นล่างของกบเท้าที่ออกแบบใหม่แล้วในจังหวะ Heel strike



รูปที่ 4.60 σ_e ของชั้นล่างของกบเท้าที่ออกแบบใหม่แล้วในจังหวะ Toe off



รูปที่ 4.61 SF ของชั้นล่างของกบเท้าที่ออกแบบใหม่แล้วในจังหวะ Toe off

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FEM ของชั้นส่วนล่างของกบเท้าที่ออกแบบใหม่

SS304 $S_t = 207 \text{ MPa}$	Heel strike	Toe off
Max. von mises stress σ_e	175.47	198.88
Min. SF	1.18	1.05

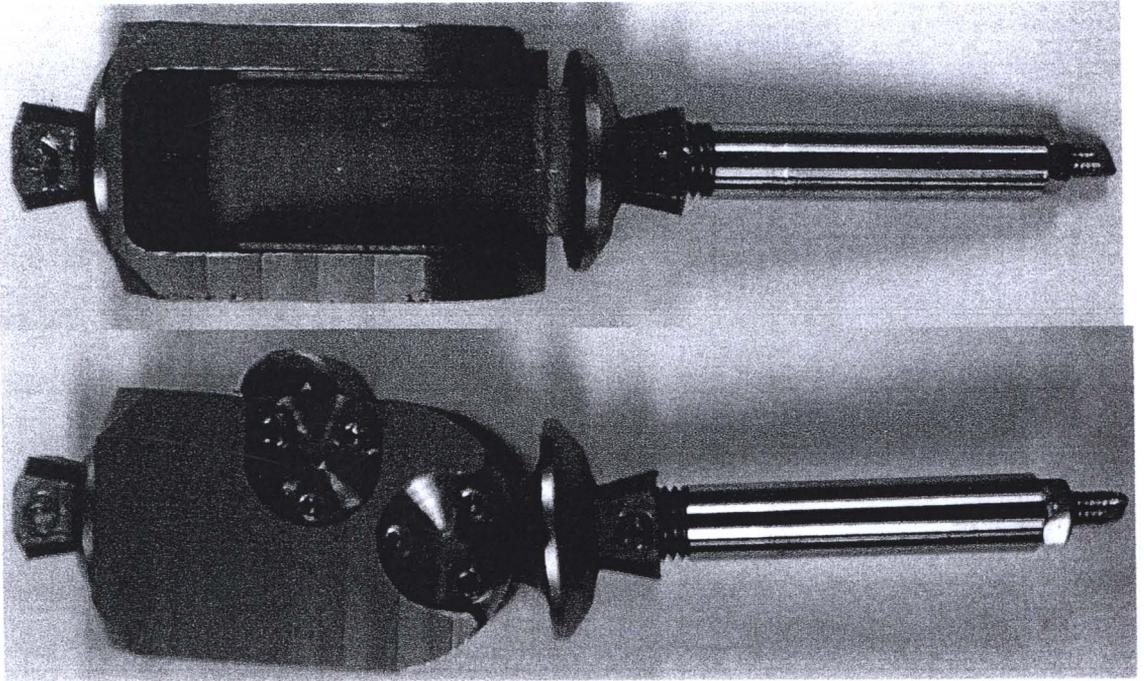
จากตารางที่ 4.3 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FEM นั้นแสดงให้เห็นว่าชิ้นส่วนล่างที่ได้ออกแบบใหม่มีแนวโน้มที่จะผ่านการทดสอบ สุดท้ายจะได้ชิ้นส่วนโครงสร้างหลักทั้งสองชิ้นที่สามารถทนต่อแรงตามมาตรฐาน และพร้อมที่จะนำไปทดสอบกับเครื่องออกแรงกดจริง สุดท้ายจะเรียกแบบที่ออกแบบใหม่ล่าสุดนี้ว่า แบบ DOSL3 และจะเป็นการออกแบบใหม่ครั้งสุดท้ายในการวิจัยครั้งนี้หากผ่านทดสอบความแข็งแรงตามมาตรฐาน

4.8 เปรียบเทียบกลไก แบบ DOSL3 กับกลไกหลายจุดหมุนที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ

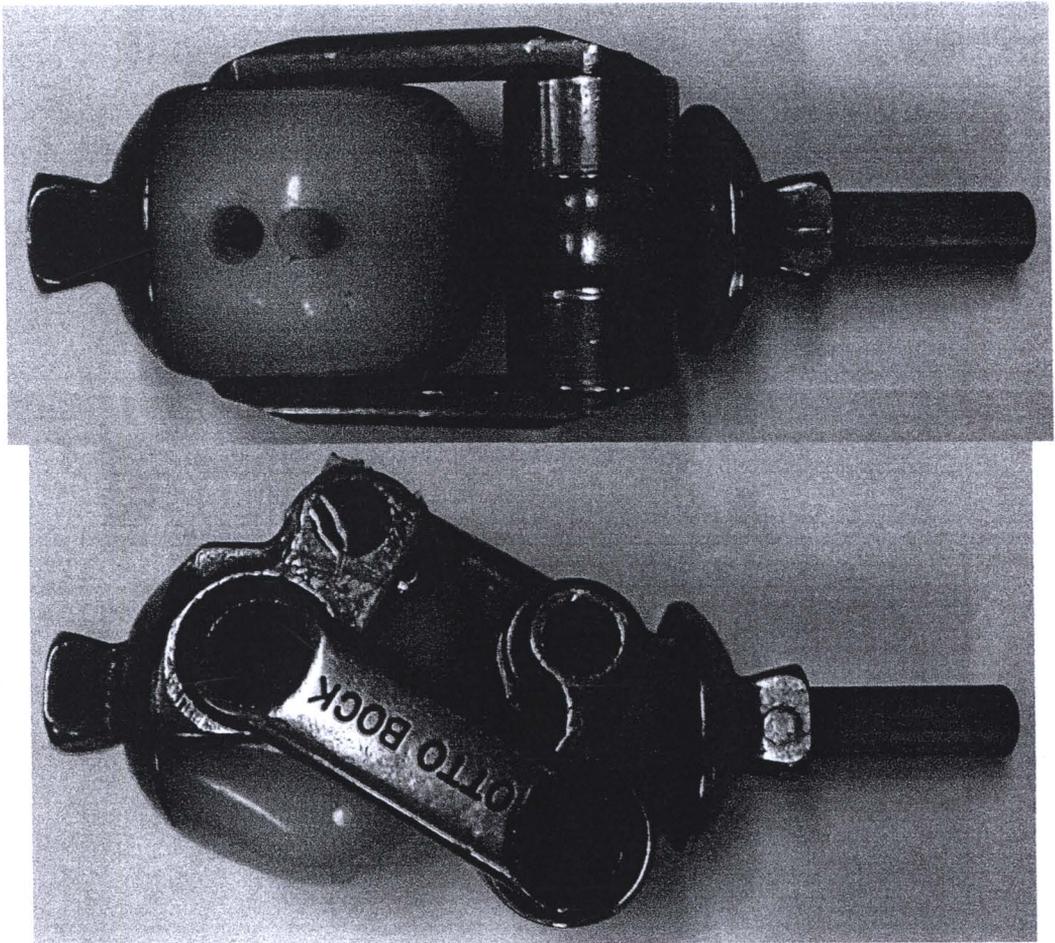
หลังจากการออกแบบใหม่จนได้กลไกที่ต้องการคือแบบ DOSL3 (รูปที่ 4.62) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกลไกข้อเท้าที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ บริษัท Otto Bock (รูปที่ 4.63) โดยเปรียบเทียบตาม ขนาดมิติ น้ำหนัก ลักษณะการทำงาน จะได้ผลเปรียบเทียบเป็นตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติในการใช้งานของกลไกข้อเท้าเทียมที่ออกแบบกับกลไกข้อเท้าเทียมที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ

คุณสมบัติที่เปรียบเทียบ	กลไกที่สร้างขึ้น	กลไกของ Otto Bock
ขนาดมิติ (Dimensions) (mm)	40 X 48 X 160	58 X 68 X 130
น้ำหนักของกลไก (g)	650	600
มุมงอเข้ามากที่สุด (Maximum knee flexion) (degree)	120	130
ระบบดีดกลับ	สปริงยืด (Extension spring)	สปริงกด (Compression spring)
การปรับค่า Pre-tension ของสปริง	ขันน็อตเพื่อเปลี่ยนค่า Pre-tension	ขันน็อตเพื่อเปลี่ยนค่า Pre-tension
ระบบอัตราหน่วง	แรงเสียดทาน Frictional damping	แรงเสียดทาน Frictional damping
การประกอบกับเท้าและหน้าแข้ง	น็อตยึด 4 จุด	น็อตยึด 4 จุด
ระบบการตั้ง Alignment ของขาเทียม	ส่วนโค้งและพีระมิดคว่ำ	ส่วนโค้งและพีระมิดคว่ำ



รูปที่ 4.62 กลไกข้อเข้าเทียมที่เสริจสมบูรณ์แบบ DOSL3



รูปที่ 4.63 กลไกข้อเข้าเทียมแบบหลายแกนหมุนที่ต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ

จากตารางจะเห็นได้ว่ากลไกข้อเช่าเทียมที่ได้ออกแบบขึ้นนี้ในเบื้องต้นสามารถใช้งานทดแทนกลไกข้อเช่าเทียมที่ต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศได้ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกันในหลายด้านและทุกชิ้นส่วนสามารถสร้างและประกอบขึ้นใช้เองภายในประเทศ หากในอนาคตมีการทดลองการใช้งานในชีวิตประจำวันและติดตามผล ปรับแบบเพิ่มเติม อาจจะนำกลไกนี้มาใช้ทดแทนกลไกแบบหลายแกนหมุนจากต่างประเทศที่ใช้อยู่ส่วนใหญ่ได้

4.9 อภิปรายผลการออกแบบและทดสอบการเดินของกลไกข้อเข้าสำหรับขาเทียม

หลังจากที่ได้สร้างกลไกในการออกแบบเบื้องต้นในบทที่ 3 และการออกแบบใหม่ พบว่าการใช้วิธีสังเคราะห์กลไกจากข้อมูลเส้นทางการเคลื่อนที่ที่เก็บมาได้แล้วนำไปทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) นั้นสามารถให้กลไกที่เคลื่อนที่คล้ายกับการเคลื่อนที่ของเข่าเป็นอย่างดี เพราะเมื่อเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ได้จากกลไกกับเส้นทางของข้อมูลได้เส้นทางที่ใกล้เคียงกันทั้งตอนสังเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการตรวจสอบจากวิธีการเก็บภาพเคลื่อนไหว แต่ถึงอย่างไรก็ตามการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดนั้นระเบียบวิธีที่ใช้ยังไม่เป็นระเบียบวิธีที่สมบูรณ์ นอกจากจะพิจารณาค่า Sum square error เป็นหลักแล้วยังต้องใช้ในการเปรียบเทียบเส้นกราฟกับข้อมูลที่ได้ด้วยการปรับค่าตัวแปรที่ใช้ในการหาค่าแบบทดลองสุ่มเพื่อให้เส้นกราฟมีลักษณะใกล้เคียงกันมากที่สุดอยู่ดังใน รูปที่ 3.8 และ รูปที่ 4.14 ซึ่งอาจจะยังไม่ใช่วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดอย่างสมบูรณ์แต่ก็สามารถใช้งานได้ดี

ในการออกแบบรายละเอียด (Detail design) นั้น วัสดุที่เหมาะสมกับการนำมาสร้างเป็นแต่ละชิ้นส่วนนั้นยังมีความเป็นไปได้ที่จะใช้วัสดุอื่นอีกนอกเหนือจาก SS304 สำหรับส่วนโครงสร้างและทองเหลืองสำหรับส่วนแผ่นปรับอัตราหมุน แต่กลไกข้อเข้าก็ผ่านการคำนวณด้วยโปรแกรม FEM ซึ่งอาจมีการพัฒนาปรับเปลี่ยนวัสดุในกลไกรุ่นต่อไป

สำหรับการออกแบบสปริงให้มีค่าคงตัวสปริงที่อยู่ในช่วงใช้งานนั้น ผลที่ได้ทำให้ต้องใช้สปริงดึง (Extension spring) ที่มีความยาวเริ่มต้นถึง 55 mm เพื่อให้มีระยะยืดของสปริง 40 mm จึงทำให้กลไกมีรั้งสปริงที่ยาวออกมามีรูปที่ 4.42 แต่อย่างไรก็ตามโดยปกติจุดที่เชื่อมต่อกับหน้าแข้งจะมีช่องเพื่อให้รั้งสปริงนี้ฝังตัวอยู่ภายในหน้าแข้งได้ซึ่งไม่ทำให้เกิดปัญหา เช่นเดียวกับแบบกลไกที่สั่งซื้อจากต่างประเทศก็มีรั้งสปริงที่ยื่นยาวออกมาเช่นเดียวกัน การปรับค่า Pre-tension ของสปริงเพื่อให้แรงเริ่มต้นในการงอตัวของกลไกต่างกันในตัวใช้แต่ละรายใช้การปรับโดยการหมุนน็อตที่บริเวณปลายรั้งสปริงซึ่งอาจจะปรับได้ยากแต่ก็สามารถใช้งานได้ระดับหนึ่ง

ในด้านการผลิตและประกอบกลไกข้อเข้าเทียมนี้ให้ความเรียบง่ายของการผลิตโดยมีชิ้นส่วนโครงสร้างหลักเพียง 2 ชิ้นส่วน แต่ละชิ้นส่วนสามารถใช้เครื่องมือกัดโลหะทั่วไปเพื่อขึ้นรูปได้โดยไม่ลำบากนัก และถึงแม้การสร้างชิ้นงานกลไกข้อเข้าที่นำไปทดสอบโดยอาสาสมัครนั้นจะสร้างอย่างไม่ประณีตนักในด้านของขนาดมิติ Dimension แต่กลไกก็ยังสามารถทำงานได้ตาม

จุดประสงค์และไม่ติดขัดระหว่างการทดสอบ แต่ในทางปฏิบัติสำหรับการสร้างกลไกที่จะนำไปใช้งานต่อไปการให้ความสำคัญกับขนาดมิติของการสร้างกลไกจึงเป็นเรื่องที่ไม่ควรละเลย

เมื่อใช้ขาเทียมที่มีกลไกข้อเท้าซึ่งออกแบบและผลิตให้มีเส้นทางการเคลื่อนที่เลียนแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของขาในธรรมชาติแล้ว ขณะใช้งานผู้ใช้มีลักษณะของท่าทางการเดินคล้ายกับท่าทางการเดินของคนปกติ และในจังหวะของการเดินที่ขาข้างที่รับน้ำหนักตัวทั้งหมดเป็นขาข้างที่ใส่ขาเทียมผู้ใช้สามารถทั้งน้ำหนักตัวทั้งหมดลงไปที่ขาข้างนั้นได้ ลักษณะของการเดินที่เหมือนธรรมชาติของอาสาสมัครนอกจากตัวกลไกข้อเท้ามีเส้นทางการเคลื่อนที่เหมือนเข้าจริงตามธรรมชาติแล้ว ทักษะและประสบการณ์ของผู้ใช้ก็เป็นส่วนที่ทำให้การเดินได้สวยงาม

ผลการคำนวณทาง FEM นั้นเป็นเพียงเครื่องมือที่ช่วยในการลดขั้นตอนของการออกแบบใหม่ก่อนที่จะนำกลไกที่สร้างขึ้นไปทดสอบโดยเครื่องมือทดสอบแรงเท่านั้นเนื่องจากการทดสอบจริงแต่ละครั้งใช้เวลามากและหากเกิดความเสียหายขึ้นกับกลไกที่ทำการทดสอบอยู่จำเป็นต้องกัดชิ้นงานต้นแบบใหม่ซึ่งจะทำให้เสียเวลาในการสร้างชิ้นงานอีก ดังนั้นด้วยการทำ FEM และการออกแบบใหม่ก่อนสร้างต้นแบบเพื่อนำไปทดสอบจึงทำให้มั่นใจได้ระดับหนึ่งว่ากลไกข้อเท้าเทียมจะมีโอกาสสูงในการผ่านการทดสอบความแข็งแรงตามมาตรฐาน

4.10 สรุปผลการออกแบบและทดสอบกลไกข้อเท้าเทียม

กลไกข้อเท้าเทียมที่ได้จากการออกแบบนี้มีเส้นทางการเคลื่อนที่เหมือนการเคลื่อนที่ของขาในการเดินตามธรรมชาติ มีเสถียรภาพที่ดีในระหว่างการเดินทดสอบ สามารถปรับ Pre-tension และอัตราหน่วง เพื่อให้ผลตอบสนอง (Response) ของการดีดกลับเป็นที่พอใจกับผู้ใช้แต่ละคนได้ กลไกสามารถทำงานได้โดยไม่มีชิ้นส่วนใดหลุดหลวมระหว่างการทดสอบเดิน และสามารถนั่งงอเข้าได้ 120 องศาตามที่ได้ออกแบบไว้ แต่อย่างไรก็ตามกลไกข้อเท้านี้ยังไม่ได้ผ่านการทดสอบความแข็งแรงตามมาตรฐานซึ่งเป็นจุดประสงค์สุดท้ายของงานวิจัย โดยการทดสอบความแข็งแรงตามมาตรฐาน ISO 10328:2006 นี้จะอธิบายในหัวข้อถัดไป