



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
การพัฒนากล้ามเนื้อเทียมแบบแมคคิบบนจากยางธรรมชาติ

โดย

ดร. ณัฐพงศ์ นิธิอุทัย และคณะ

30 มีนาคม 2551

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนากล้ามเนื้อเทียมแบบแมคคิบีนจากยางธรรมชาติ

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. ดร. ณัฐพงศ์ นิธิอุทัย	ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
2. รศ.ดร.สถาพร ลักษณะเจริญ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
3. เกวลิน แผ่นทอง	ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
4. กิตติ ทัดระเบียบ	ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
5. เดชพล รุ่งนภาพร	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
6. วาสนา เจริญวัย	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชุดโครงการ โครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเป็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร

การพัฒนากล้ามเนื้อเทียมแบบแมคคิบเบนจากยางธรรมชาติ

Development of McKibben artificial muscle from natural rubber

ดร. ณัฐพงศ์ นิธิอุทัย

ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี อ.เมือง จ. ปัตตานี 94000

โทรศัพท์ 073-313930-50 ext. 1863, โทรสาร 073-331099

E-mail: nattapong@cirrpe.org

นักศึกษาหรือนักวิจัย : เกวลิน แผ่นทอง, กิตติ ทัดระเบียบ, เฉลพล รุ่งนภาพร, วาสนา เจริญวัย

ระยะเวลาดำเนินงาน 9 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2550 ถึงวันที่ 30 มีนาคม 2551

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

ในปัจจุบันหุ่นยนต์ได้ถูกใช้ในงานที่มีความซ้ำซากและต้องการความแม่นยำสูง ซึ่งพบมากในอุตสาหกรรมยานยนต์ และอิเล็กทรอนิกส์ ในการที่ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีหุ่นยนต์ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น การเกษตร ก่อสร้าง กิจกรรมการสำรวจ หรือ แม้กระทั่งอุตสาหกรรมการแพทย์ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาหุ่นยนต์ที่สามารถรองรับการใช้งานในสภาวะที่ไม่มีการควบคุมได้ดีขึ้น แนวทางดังกล่าวคือการพัฒนาหุ่นยนต์ตามแนวทางที่เรียกว่าหุ่นยนต์ชีวภาพ (biorobotic) ในตัวขับที่หลากหลายในงานหุ่นยนต์ชีวภาพ ตัวขับหรือกล้ามเนื้อเทียมแบบแมคคิบเบนมีความโดดเด่นที่สุดในแง่ของการใช้งานในด้านการแพทย์ ด้วยการทำงานที่ใกล้เคียงกับการทำงานของกล้ามเนื้อของมนุษย์มากที่สุด ทั้งในด้านความนุ่มนวล น้ำหนักที่เบากว่าตัวขับแบบอื่น ๆ กล้ามเนื้อเทียมแบบแมคคิบเบน ประกอบด้วยท่ออย่างหุ้มด้วยท่อถัก โดยการทำงานของกล้ามเนื้อเทียมคืออัดความดันเข้าไปในท่อกล้ามเนื้อ ซึ่งจะทำให้ท่อขยายตัวในทิศทางตามแนวรัศมีที่กำหนดไว้โดยท่อถัก ทำให้กล้ามเนื้อเทียมดังกล่าวหดตัวตามแนวยาว สมบัติของกล้ามเนื้อเทียมที่ได้ขึ้นกับขนาด ความยาว และชนิดของท่อที่ใช้ ประเภทของยางที่ใช้ก็ได้แก่ ยางซิลิโคน ยางสไตรีน-บิวทาไดอีน และยางธรรมชาติ เป็นต้น ได้มีการศึกษาถึงผลของขนาด ความยาว และชนิดของยางต่อประสิทธิภาพของกล้ามเนื้อมาบ้างแล้ว จะพบว่าท่อที่ทำจากยางธรรมชาติมีความได้เปรียบในด้านความทนทานต่อการใช้งานที่สูงกว่ายางอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม อายุใช้งานของกล้ามเนื้อเทียมชนิดนี้ยังสั้นกว่าตัวขับประเภทอื่น และสั้นกว่ากล้ามเนื้อจริง ๆ อยู่มาก จึงมีความพยายามที่จะพัฒนากล้ามเนื้อเทียมที่มีอายุการใช้งานที่สูงขึ้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพัฒนาสูตรยางที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานกล้ามเนื้อเทียม
2. เพื่อศึกษาพัฒนาสูตรยางที่มีอายุการใช้งานเป็นกล้ามเนื้อเทียมที่สูงขึ้น

3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของมิติของท่อยาง กล่าวคือ เส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว และความหนา ต่อการใช้งานเป็นกล้ำมเนื้อเทียม และอายุการใช้งาน
4. เพื่อส่งเสริมความร่วมมือกับนักวิจัยในสาขาอื่นในการวิจัยร่วมในโครงการขางพารา

ผลการดำเนินงาน

การเตรียมท่อยางสำหรับกล้ำมเนื้อเทียมแบบแมคคิบเบนในงานวิจัยนี้พบว่า ลักษณะการวัลคาไนซ์ของท่อยางมีความสำคัญมากต่ออายุการใช้งานของกล้ำมเนื้อเทียม ปริมาณกำมะถันที่ให้อายุการใช้งานสูงที่สุดคือ 1.25 phr เมื่อใช้ระบบสารตัวเร่งเดี่ยวประเภท Ultra-accelerator คือ ZDBC การเพิ่มปริมาณสารตัวเร่ง และ สารกระตุ้น ZnO มีแนวโน้มจะทำให้อายุใช้งานเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามใช้ระบบวัลคาไนซ์ร่วมที่ช้าลงระหว่าง ZDEC และ ZMBT ร่วมกับการเพิ่มปริมาณสารกระตุ้นจะสามารถเพิ่มอายุใช้งานได้อย่างเห็นได้ชัด ระดับการวัลคาไนซ์มีความสัมพันธ์อย่างมากต่ออายุใช้งานโดยการบ่มน้ำยางเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจะมีอายุใช้งานสูงกว่า 12 ชั่วโมงอย่างเห็นได้ชัด และที่การบ่มน้ำยาง 12 ชั่วโมงนั้นเวลาในการวัลคาไนซ์จะช่วยเพิ่มอายุใช้งาน ในขณะที่เมื่อบ่มเร่ง 24 ชั่วโมงนั้นเริ่มเห็นการรีเวอร์ชันเมื่อเวลาการวัลคาไนซ์เพิ่มเป็น 25 และ 30 นาที การวิจัยนี้สามารถเตรียมท่อยางที่มีอายุใช้งานสูง ระยะหดตัวสูงกว่าที่มีการเตรียมมาโดยสภาพ (สภาพ ลักษณะเจริญ และ สุนทร วงษ์ศิริ 2546), (Laksanacharoen 2002) และ Klute (Klute and Hannaford 1998) และพบว่าสามารถเปรียบเทียบอายุการใช้งานแบบ Uniaxial Tension ของท่อยางกับอายุการใช้งานของท่อยางที่ได้จากการใช้งานจริงได้ โดยอายุการใช้งานที่ได้จากการคำนวณมีค่าผลต่างสัมบูรณ์เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ $\pm 1,000$ ครั้ง เมื่อกำหนดให้ค่าคงที่ของวัสดุเท่ากับ 1.7

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าควรวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยุคสู่ภาคปฏิบัติจริง

- ถึงแม้ว่าอายุการใช้งานยังสั้นเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ขับเคลื่อนอื่น ถ้าหากมีการพัฒนาเพิ่มเติมให้สามารถเปลี่ยนใส่ได้ง่ายก็จะพัฒนาเพื่อใช้งานได้ในระดับหนึ่ง
- น่าจะมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาสู่การประยุกต์ใช้งานในระดับเบื้องต้น ที่ไม่ติดข้อจำกัดเรื่องอายุการใช้งานมากนัก เช่น การใช้งานเป็นระยะ ๆ หรือ การใช้งานที่ไม่ต่อเนื่อง เป็นต้น เพื่อค้นหามีการใช้งานจริง ได้การตอบรับจากผู้ใช้เพื่อพัฒนาต่อไป
- น่าจะมีการศึกษาพัฒนาระบบขนาดเล็กเพื่อพกพา เมื่อมีการพัฒนาไปสู่ระบบที่ต้องมีการเคลื่อนย้าย แหล่งอากาศอัดจะเป็นข้อจำกัดที่สำคัญ

บทคัดย่อ

กล้ามเนื้อเทียมแบบแมคคิบเบนเป็นอุปกรณ์แบบนิวเมติก ที่ประกอบด้วยส่วนของท่อทางด้านในและส่วนปลอกด้านนอกที่มีลักษณะเป็นท่อถัก การทำงานของกล้ามเนื้อเทียมชนิดนี้มีการตอบสนองต่อแรงดึงคล้ายกับกล้ามเนื้อของมนุษย์ เมื่อมีการอัดอากาศเข้าไปในท่อของกล้ามเนื้อเทียม จะทำให้ท่อทางด้านในขยายตัวในแนวรัศมี ในขณะที่ท่อถักด้านนอกบังคับให้ความยาวในแนวแกนหดสั้นลง การเตรียมท่อจากยางธรรมชาติสำหรับกล้ามเนื้อเทียมแบบแมคคิบเบนในงานวิจัยนี้พบว่า การวิจัยนี้สามารถเตรียมท่อที่มีอายุใช้งานสูงพร้อมกับระยะหดตัวสูง ลักษณะการวัลคาไนซ์ของท่อที่มีความสำคัญมากต่ออายุการใช้งานของกล้ามเนื้อเทียม ระยะหดตัวไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก ปริมาณกำมะถันที่ให้อายุการใช้งานสูงที่สุดคือ 1.25 phr เมื่อใช้ระบบสารตัวเร่งเดี่ยวประเภท Ultra-accelerator คือ ZDBC การเพิ่มปริมาณสารตัวเร่ง และ สารกระตุ้น ZnO มีแนวโน้มจะทำให้อายุใช้งานเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามใช้ระบบวัลคาไนซ์ร่วมที่ช้าลงระหว่าง ZDEC และ ZMBT ร่วมกับการเพิ่มปริมาณสารกระตุ้นจะสามารถเพิ่มอายุใช้งานได้อย่างเห็นได้ชัด ระดับการวัลคาไนซ์มีความสัมพันธ์อย่างมากต่ออายุใช้งานโดยการบ่มน้ำยางเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจะมีอายุใช้งานสูงกว่า 12 ชั่วโมงอย่างเห็นได้ชัด และที่การบ่มน้ำยาง 12 ชั่วโมงนั้นเวลาในการวัลคาไนซ์จะช่วยเพิ่มอายุใช้งาน ในขณะที่เมื่อบ่มเร่ง 24 ชั่วโมงนั้นเริ่มเห็นการรีเวอร์ชันเมื่อเวลาการวัลคาไนซ์เพิ่มเป็น 25 และ 30 นาที และพบว่าสามารถเปรียบเทียบอายุการใช้งานแบบ Uniaxial Tension ของท่อเข้ากับอายุการใช้งานของท่อที่ได้จากการใช้งานจริงได้ โดยอายุการใช้งานที่ได้จากการคำนวณมีค่าผลต่างสัมบูรณ์เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ $\pm 1,000$ ครั้ง เมื่อกำหนดให้ค่าคงที่ของวัสดุเท่ากับ 1.7

Abstract

McKibben Artificial muscle is a pneumatic actuator which composes of rubber inner bladder sheathed with a double helical weave outer tube. Working characteristic of this type of artificial muscle is close to human muscle. When artificial muscle is inflated with compressed air, rubber inner bladder expands in radial direction while outer weave tube restricts the movement and contract lengthwise. In this research, preparation of inner rubber bladder using natural rubber, high service life with high contraction ratio can be prepared. It was found that vulcanization characteristic of rubber bladder is closely related to service life of artificial muscle. Contraction ratio is not very sensitive. In single ultra-accelerator system using ZDBC, Sulphur 1.25 phr gives highest service life. Increasing accelerator and activator, ZnO, increase service life a little. ZDEC/ZMBT accelerators system, which is a slower system, in combination with high amount of activator significantly increase service life of rubber bladder. Level of prevulcanized relate closely to service life as well, 24 hrs maturation time significantly increase service life compare to 12 hrs maturation. Service life is increase with vulcanization time in the case of 12 hrs maturation however for 24 hrs maturation reversion is observed at 25, 30 min of vulcanization. It was also found that fatigue test using uniaxial tension can be used to approximate service life of artificial muscle. Predicted service life has absolute differences within $\pm 1,000$ cycles when material constant 1.7 being used.

ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย

กล้ามเนื้อเทียมแบบแมคคิบบนเป็นอุปกรณ์แบบนิวเมติก ที่ประกอบด้วยส่วนของท่อทางด้านในและส่วนปลอกด้านนอกที่มีลักษณะเป็นท่อถัก การทำงานของกล้ามเนื้อเทียมชนิดนี้ทำงานเหมือนกับกระบอกสูบที่ทำงานทางเดียว มีการตอบสนองต่อแรงดึงคล้ายกับกล้ามเนื้อของมนุษย์ เมื่อมีการอัดอากาศเข้าไปในท่อของกล้ามเนื้อเทียม จะทำให้ท่อทางด้านในขยายตัวในแนวรัศมีในขณะที่ท่อถักด้านนอกบังคับให้ความยาวในแนวแกนหดสั้นลง จึงทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในแนวแกน สำหรับวัสดุที่ใช้ในการทำท่อนั้นมีการใช้ยางธรรมชาติ (Lake 1983) ยางเอสปีอาร์ (Baramboim 1964) หรือ ยางซิลิโคนโดยยางธรรมชาติมีอายุการใช้งานนานกว่ายางประเภทอื่นอย่างมีนัยสำคัญ (Klute and Hannaford 1998) ในประเทศไทยได้มีความพยายามนำกล้ามเนื้อเทียมประเภทนี้มาประยุกต์ใช้โดยนักวิจัยชาวไทยในรูปของน้ำยางพริ้วคลาไนซ์ (Laksanacharoen 2004), (สถาพร ลักษณะเจริญ และ สุนทร วงษ์ศิริ 2546) และใช้งานสำหรับแขนเทียมในผู้ป่วย (Wongsiri and Laksanacharoen 2003) อย่างไรก็ตามท่อที่ใช้มีข้อจำกัดในด้านระยะการหดตัว และอายุการใช้งานที่ค่อนข้างสั้น ในการวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงการเตรียมท่อจากน้ำยางพริ้วคลาไนซ์แทนการใช้น้ำยางพริ้วคลาไนซ์ เนื่องจากความสามารถในการปรับเปลี่ยนตัวแปรในการผลิตได้หลากหลายกว่าน้ำยางพริ้วคลาไนซ์ เช่น สูตรน้ำยางคอมปาวด์ การบ่มน้ำยาง เวลาในการวัลคาไนซ์ เป็นต้น เพื่อปรับปรุงข้อจำกัดในด้านระยะหดตัว และอายุการใช้งานเป็นสำคัญ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพัฒนาสูตรยางที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานกล้ามเนื้อเทียม
2. เพื่อศึกษาพัฒนาสูตรยางที่มีอายุการใช้งานเป็นกล้ามเนื้อเทียมที่สูงขึ้น
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของมิติของท่อยาง กล่าวคือ เส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว และความหนา ต่อการใช้งานเป็นกล้ามเนื้อเทียม และอายุการใช้งาน
4. เพื่อส่งเสริมความร่วมมือกับนักวิจัยในสาขาอื่นในการวิจัยร่วมในโครงการขางพารา

ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

ประสิทธิภาพการทำงานของกล้ามเนื้อเทียมจะขึ้นอยู่กับแรงที่กล้ามเนื้อเทียมจะดีหรือไม่จะขึ้นกับตัววัดผลหลายประการกล่าวคือ แรงที่กล้ามเนื้อเทียมทำได้ที่มีความดันต่าง ๆ ที่ระยะหดตัวต่าง ๆ ระยะหดตัวสูงสุด ต่าง ๆ เหล่านี้ขึ้นอยู่กับสมบัติต่าง ๆ ของท่อยาง และท่อถัก โดยสมบัติของท่อยางจะประกอบด้วย โมดูลัสของยาง ขนาดความยาว และความหนาของท่อยาง เป็นต้น ในการวิจัยนี้จะเตรียมท่อจากยางธรรมชาติจากวิธีการจุ่ม โดยมีการแปรขนาด และความยาวของท่อยาง แปรความหนาของท่อยางโดยแปรปริมาณความเข้มข้นของสารจับตัว และระยะเวลาการจุ่ม แปรโมดูลัสของยางด้วยแปรสูตรยาง โดยสารเคมีที่จะทำการศึกษา คือ ซิงค์ออกไซด์ สารตัวเร่งหลัก และสารตัวเร่งเสริม สารตัวเติม กำมะถัน นอกจากนี้ตัวแปรในการผลิตเช่น อุณหภูมิบ่ม ระยะเวลาในการบ่มแรงน้ำยาง ก็จะนำมาเป็นตัวแปรที่จะศึกษาอีกด้วย ท่อยางที่ได้จะนำมาทดสอบสมบัติพื้นฐาน เช่น สมบัติความต้านทานแรงดึง สมบัติการบ่มเร่ง สมบัติความต้านทานต่อการยืดซ้ำ ๆ เป็นต้น และสมบัติการใช้งานการเป็นกล้ามเนื้อเทียม เช่น สมบัติการรับแรงต่อระยะการหดตัว ระยะหดตัวสูงสุด อายุการใช้งาน เป็นต้น

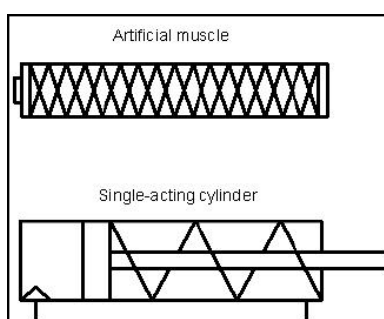
ผลลัพธ์ที่ได้คือสูตรยางและวิธีการเตรียมท่อที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมกล้ามเนื้อเทียมแบบแมคคิบบนทั้งในด้านประสิทธิภาพและอายุใช้งาน รวมถึงทราบถึงปัจจัยด้านมิติของท่อยางที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพ

การใช้กล้ามเนื้อเทียม นอกจากนี้จะเป็นการบูรณาการงานวิจัยจากหลายสาขาเพื่อพัฒนาการใช้งานทางการแพทย์ในประเทศไทย

กล้ามเนื้อเทียมแมคคิบเบน (McKibben)

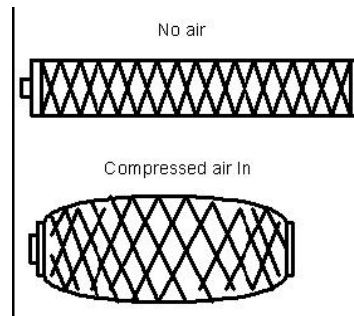
กล้ามเนื้อเทียมแมคคิบเบนนี้ได้ถูกริเริ่มขึ้นเมื่อประมาณปี ค.ศ. 1950 โดย Gaylord ต่อมา นายแพทย์แมคคิบเบน ได้นำมาประดิษฐ์ใช้เป็นเครื่องช่วยเหลือผู้ป่วยโพลิโอ ให้สามารถขยับและ เคลื่อนไหวมือได้สะดวกขึ้น ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกกล้ามเนื้อเทียมนี้ว่า กล้ามเนื้อเทียมแมคคิบเบน โดยการออกแบบเบื้องต้นของนายแพทย์แมคคิบเบนนั้น เป็นการออกแบบอย่างง่าย ใช้ท่อยางอยู่ภายใน ห่อหุ้มด้วยปลอกฉักที่มีลักษณะคล้ายเปียเกลียวห่อหุ้มอยู่ภายนอก โดยกล้ามเนื้อเทียมนี้จะถูกปิดที่ปลายทั้งสองด้าน ปลายด้านหนึ่งใช้ยึดกับส่วนที่ต้องการให้เคลื่อนที่ ส่วนอีกด้านหนึ่งยึดติดอยู่กับที่ และมีท่อเพื่อให้อากาศอัดเข้า เมื่อมีอากาศอัดเข้าไปในท่อยางซึ่งบรรจุอยู่ภายในปลอกฉัก ท่อยางดังกล่าวจะเกิดการขยายตัวออก สัมผัสกับปลอกฉักที่ห่อหุ้มอยู่ภายนอกซึ่งมีคุณสมบัติไม่ขยายตัวตามยาว โดยท่อยางที่อยู่ภายในปลอกฉักดังกล่าวเมื่อได้รับอากาศอัด จะเกิดการขยายตัวโป่งออกและบีบบังคับให้เกิดการขยายตัวออกด้านข้าง ทำให้ระยะความยาวนั้นหดสั้นลง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือทำให้เกิดแรงดึงขึ้น ถ้าที่ปลาย ด้านหนึ่งต่อกับกลไกอื่น ด้วยคุณสมบัตินี้เองทำให้กล้ามเนื้อเทียมดังกล่าว มีค่าความยืดหยุ่นคล้ายกับสปริง แต่ค่าคงที่ความยืดหยุ่นนี้มีได้แปรผันเป็นเส้นตรงคล้ายในสปริง ทั้งนี้เพราะ ประกอบไปด้วยยางที่มีสมบัติยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้ชุดขับเคลื่อนหรือกล้ามเนื้อเทียมดังกล่าวยังมีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับชุดขับเคลื่อนแบบอื่นๆ ต่อมา บริษัท Bridgestone ประเทศญี่ปุ่น ได้นำไปทำการวิจัยค้นคว้าต่อ ทำการทดลองขึ้น โดยใช้กล้ามเนื้อเทียม เป็นชุดขับเคลื่อน ทำการติดตั้ง กล้ามเนื้อเทียม สองด้านตรงข้ามกัน เพื่อขับเคลื่อนที่ในการหมุน 1 องศาอิสระ ซึ่งจุดเด่นของ ชุดขับเคลื่อนกล้ามเนื้อเทียมนี้ คือมีน้ำหนักเบา แต่สามารถยกน้ำหนักได้สูงกว่า 10 เท่า ของน้ำหนักตัวเอง ต่อมาทางบริษัท Bridgestone และงานวิจัยอื่นๆ ได้นำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างหุ่นยนต์ (สถาพร และ สุนทร, 2546)

จากการศึกษาของ สถาพร ลักษณะเจริญ และ สุนทร วงษ์ศิริ ซึ่งได้ทำการออกแบบงานวิจัยเบื้องต้น โดยใช้หลักเกณฑ์เดียวกันกับนายแพทย์แมคคิบเบน คือ ใช้ท่อยางที่เตรียมจากยางธรรมชาติพรีวัลคาไนซ์เป็นส่วนอยู่ภายใน เพื่อให้มีการขยายตัวเมื่อมีอากาศอัด และเปลือกฉักห่อหุ้มอยู่ภายนอก เพื่อจำกัดการขยายตัว มิให้เกิดการแตกระเบิดของยาง ซึ่งมีข้อแตกต่างคือ เปลือกหุ้มภายนอก มีคุณสมบัติที่เหนียวทนกว่า โดยในรูปที่ 1 แสดงลักษณะการทำงานของกล้ามเนื้อเทียม



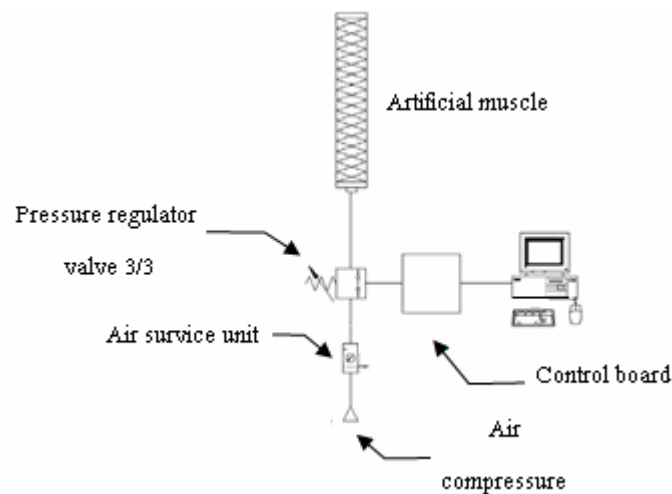
รูปที่ 1 แสดงลักษณะการทำงานของกล้ามเนื้อเทียม
คล้ายคลึงกับในกระบอกสูบทางเดียว

ในรูปที่ 2 แสดงการทำงานของกล้ามเนื้อเทียมที่สร้างขึ้น โดยรูปบน เมื่อยังไม่มีอากาศอัด และรูปด้านล่าง เมื่อมีอากาศอัดเข้าไป ในกล้ามเนื้อเทียม โดยขนาดของกล้ามเนื้อเทียมนี้ มีขนาดความยาวประมาณ 100 มม. มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง วัดที่ เปลือกหุ้มด้านนอกประมาณ 12.7 มม. และมีน้ำหนักเพียง 19 กรัม ไม่นับรวมกับอุปกรณ์ ข้อต่อ สายลมที่มาต่อด้วย

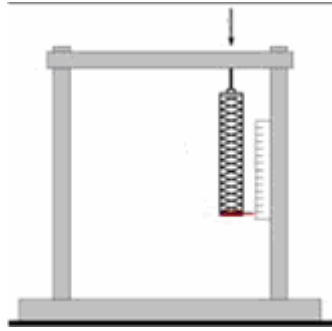


รูปที่ 2 แสดงการทำงานของกล้ามเนื้อเทียม

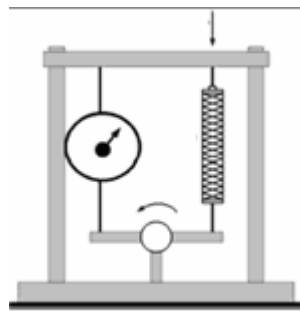
โดยในการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของ กล้ามเนื้อเทียมที่สร้างขึ้นนี้ ได้ มีการจัดทำ ชุดทดสอบเพื่อทำการเก็บค่าคุณสมบัติของกล้ามเนื้อเทียม โดยมีวิธีการจัดวางเครื่องมือดังรูปที่ 3 อันประกอบไปด้วย คอมพิวเตอร์ต่อกับ ชุดแปลงสัญญาณดิจิทัลอะนาล็อก เพื่อ ส่งไปยัง วาล์วควบคุมการจ่ายลมให้กับ กล้ามเนื้อเทียม โดยการวัดการเคลื่อนที่เชิงเส้นเมื่อไม่มีภาระ โหลดแสดงดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 แสดงการวัดแรงดึงของกล้ามเนื้อเทียม



รูปที่ 3 แสดงการจัดวางเครื่องมือควบคุม



รูปที่ 4 แสดงการวัดการเคลื่อนที่เชิงเส้นของกล้ามเนื้อเทียม



รูปที่ 5 แสดงการวัดแรงดึงของกล้ามเนื้อเทียม

จากการทดสอบของทั้งสองพบว่า เมื่อมีการจ่ายอากาศอัด เข้าไปในกล้ามเนื้อเทียม จะมีการขยายตัวตามแนวเส้นรอบวง ทำให้เกิดการหดตัวตามแนวยาว โดยพบว่าที่ความดัน 3 บาร์ เป็นความดันสูงสุดที่กล้ามเนื้อเทียมที่สร้างขึ้นวัดได้ เนื่องจากการเสียหายที่จุดข้อต่อตรงปลายทั้งสองข้างของกล้ามเนื้อเทียม ทำให้ ขางภายในหลุดออกจากเปลือกถักหุ้มอยู่ภายนอก อนึ่ง การทดสอบครั้งนี้ ยังประสบปัญหาเมื่อทดลองเพื่อวัดค่าแรงดึงของกล้ามเนื้อเทียม ข้อต่อตรงปลาย ก็ประสบปัญหาขางภายในแยกออกจาก เปลือกถักหุ้มภายนอกเช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามยังสามารถ วัดค่าแรงดึงก่อนที่จะประสบปัญหาได้ ประมาณ 70 นิวตัน และจากการทดลองพบว่าการใช้ยางธรรมชาติจะให้ค่าอัตราส่วนโดยประมาณของแรงต่อน้ำหนักของกล้ามเนื้อเทียมได้สูงถึงประมาณ 3000 นิวตัน อีกทั้งยังมีน้ำหนักเบา แต่การใช้ยางธรรมชาติจะประสบกับปัญหาคือ มีการเสียหายที่จุดข้อต่อตรงปลายทั้งสองข้างของกล้ามเนื้อเทียม ทำให้ ขางภายในหลุดออกจากเปลือกถักหุ้มอยู่ภายนอก ซึ่งเป็นจุดสำคัญที่ควรมีการพัฒนาต่อไป

วิธีการ

น้ำยางธรรมชาติชั้นชนิดแอมโมเนียค่า และสารเคมีสำหรับยางที่ใช้ทั้งหมดเป็นเกรดที่ใช้สำหรับอุตสาหกรรมยาง ตารางที่ 1 แสดงสูตรผสมเคมียางที่ใช้ในการวิจัย ดิสเพอร์สชันเตรียมโดยการบดด้วยบอลมิลล์ เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง ยกเว้นกำมะถันที่จะบดเป็นเวลา 96 ชั่วโมง ใส่สารช่วยในการกระจายตัว (Dispersing Agents) คือ วัลทามอล (Vultamol) และเบนโทไนท์เคลย์ (Bentonite Clay) ในปริมาณอย่างละร้อยละสองโดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับสารเคมีที่ต้องการบด เตรียมน้ำยางคอมเปาต์ตามสูตรในตารางที่ 1 และปรับปริมาณของแข็งทั้งหมด (TSC) ด้วยการเติมน้ำให้เป็นร้อยละ 50 ทำการบ่มน้ำยางคอมเปาต์ไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 1 สูตรผสมเคมียาง

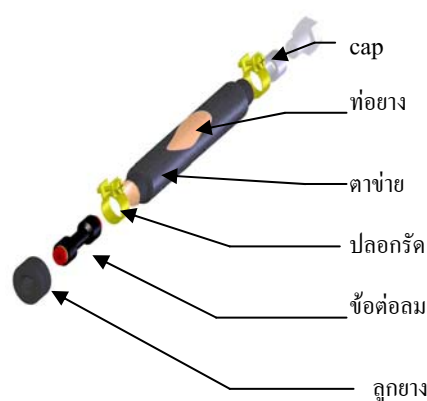
ส่วนผสม	ปริมาณ (phr)						
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
60% LA Latex	100	100	100	100	100	100	100
10% KOH	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2	0.5
20% Potassium Oleate	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.6	0.25
50% Sulphur	0.5	1.25	2.0	2.0	2.0	2.0	2.5
40% ZDBC	0.75	0.75	0.75	1.0	1.0	-	0.5
50% ZDEC	-	-	-	-	-	0.9	-
50% ZMBT	-	-	-	-	-	0.1	-
50% Wingstay L	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50% ZnO	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	5.0	1.0

ZDBC = Zinc-N-Dibuthyl Dithiocarbamate

ZDEC = Zinc-N-Diethyl Dithiocarbamate

ZMBT = Zinc-2-mercaptobenzothiazole

ท่อยางจะเตรียมโดยจุ่มพิมพ์รูปแท่งทรงกระบอกทำด้วยเซรามิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15, 20 และ 30 มม. ยาว 100-140 มม. ลงในสารละลายช่วยจับตัวเคลือบในเตา (20% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) เป็นเวลา 5 วินาทีแล้วเป่าพดลมให้แห้งเป็นเวลา 4 นาที หลังจากนั้นจุ่มแบบพิมพ์ลงในน้ำยางคอมเพาต์เป็นระยะเวลา 2 นาที จากนั้นนำมาวัดคาโนซในเตาอบความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นจึงถอดจากแบบพิมพ์และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ

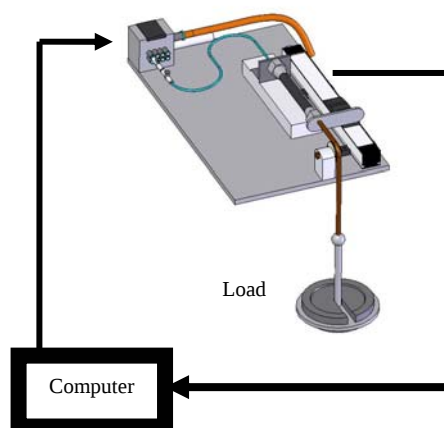


รูปที่ 6 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของกล้ำเนื้อเทียม

ท่อยางที่เตรียมได้จะนำไปประกอบเป็นกล้ำเนื้อเทียม โดยส่วนประกอบของกล้ำเนื้อเทียมแสดงในรูปที่ 1

1 นำกล้ำเนื้อเทียมที่ได้ไปทดสอบอายุการใช้งานและระยะหาคัดด้วยเครื่องทดสอบการใช้งานของกล้ำเนื้อ

เทียบที่แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งระยะหัดจะรายงานเป็นร้อยละการหัดตัวเมื่อเทียบกับความยาวเริ่มต้นของกล้ามเนื้อ เทียม น้ำหนักถ่วง (Load) ที่ใช้คือ 2 กิโลกรัม และความดันอากาศที่ใช้เท่ากับ 2 psi



รูปที่ 7 เครื่องทดสอบการใช้งานของกล้ามเนื้อเทียม

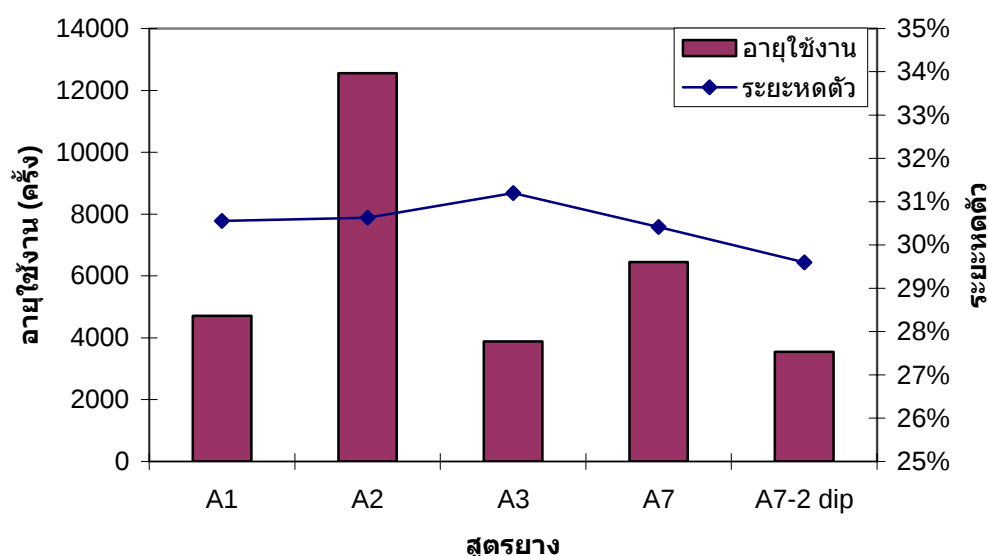
ผลการวิจัย และวิจารณ์ผล

การทดสอบผลของมิติของท่อต่อการใช้งาน

ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่มีขนาด 15, 20 และ 30 มม. ที่ความยาวของชิ้นทดสอบเดียวกันคือ 140 มม. โดยใช้สูตร A1 พบว่าเมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจะทำให้มีเปอร์เซ็นต์การหัดตัวที่สูงขึ้นและให้ค่า tensile force ที่สูงขึ้น โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 และ 30 มม. อย่างไรก็ตามด้วยขนาด 15 มม. เป็นขนาดที่กระทัดรัดและให้ระยะหัดตัวใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ต้องการคือ 30% ด้วยการให้แรงดันอากาศที่ต่ำเพียงพอคือ 2 บาร์จึงเลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. มาพัฒนาต่อไป ในขณะที่ผลการทดลองขนาดความยาวของท่อ 100-140 มม. พบว่าท่อที่ยาวขึ้นส่งผลให้ระยะหัดตัวของกล้ามเนื้อเทียมเพิ่มสูงขึ้นจึงเลือกความยาว 140 มม. ในการพัฒนาในขั้นตอนต่อไป (ความยาวของเป้าหมายคือ 140 มม.) ในขณะที่ความหนาโดยประมาณของท่อคือ 0.4 มม. โดยเมื่อเพิ่มความหนาสูงขึ้นส่งผลให้ระยะหัดตัวของกล้ามเนื้อเทียมลดลง ในขณะที่ท่อที่มีความหนาดำมีแนวโน้มอายุใช้งานที่สั้นลง

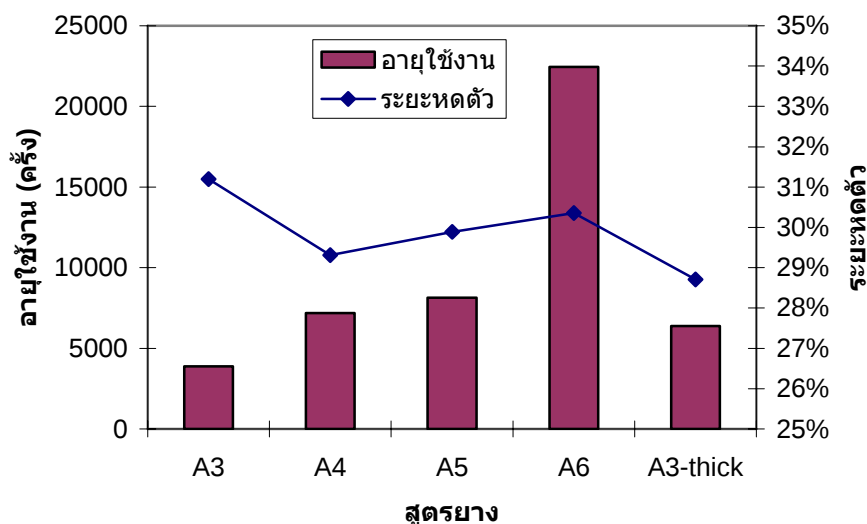
จะสังเกตเห็นว่าทางคณะวิจัยเลือกตัวแปรในการใช้งานบางตัวแปรเป็นข้อกำหนดหลักในการพัฒนากล้ามเนื้อเทียม ทั้งนี้โดยมีเป้าหมายสำคัญในการพัฒนาเพื่อไปสู่การประยุกต์ใช้งานจริงในอนาคต กล้ามเนื้อเทียมที่มีคุณภาพควรจะต้องการแรงดันอากาศที่ต่ำเพื่อความสะดวกในการใช้งานในสถานพยาบาลหรือบ้านเรือนโดยมีอันตรายจากการระเบิดของท่ออย่างน้อยที่สุด และสามารถพัฒนาระบบอัดอากาศแบบพกพาได้ง่ายในอนาคต ในที่นี้จะกำหนดแรงดันอยู่ที่ 2 บาร์ ซึ่งผลของแรงดันที่ใช้คือเมื่อเพิ่มแรงดันจะทำให้ค่าการหัดตัวสูงขึ้นและให้ค่า tension force มากขึ้น (Laksanacharoen 2002) ในขณะที่ค่าการหัดตัวนั้นได้ตั้งค่าเป้าหมายไว้ที่ 30% (รูปที่ 4) เนื่องจากระยะหัดตัวที่สูงจะทำให้กล้ามเนื้อเทียมยึดหยุ่นในการติดตั้งใช้งานมากขึ้น การออกแบบด้านเครื่องกลจะสามารถทำได้ง่ายขึ้น ในขณะที่อายุการใช้งานจะลดลงเป็นอย่างมาก (Klute and Hannaford 1998) ด้วย

สาเหตุนี้ในเบื้องต้นจึงได้เลือกพัฒนาท่อยางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. ยาว 140 มม. และมีความหนา 0.4 มม. เป็นหลัก



รูปที่ 8 อายุการใช้งานและระยะหัดตัวเมื่อใช้ปริมาณกำมะถันต่าง ๆ

ผลของปริมาณกำมะถันต่ออายุการใช้งานและระยะหัดตัวของกล้ามเนื้อเทียมแสดงในรูปที่ 8 จากสูตรยาง A1, A2, A3 และ A7 ที่มีปริมาณกำมะถัน 0.5, 1.25, 2.0 และ 2.5 phr ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าระยะหัดตัวของกล้ามเนื้อเทียมไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในขณะที่อายุการใช้งานเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณกำมะถันเพิ่มขึ้นจาก 0.25 phr เป็น 1.25 phr โดยที่สูตร A2 (กำมะถัน 1.25 phr) แสดงอายุการใช้งานสูงที่สุด แต่กลับมีอายุการใช้งานลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถันเป็น 2.0 phr (สูตร A3) จากการสังเกตพบว่าความเสียหายของท่อยางอยู่บริเวณส่วนปลายของท่อ จึงมีแนวความคิดที่จะเสริมความแข็งแรงในส่วนบริเวณปลายด้วยการจุ่มน้ำยาง 2 ครั้งในบริเวณปลายท่อ ยางเป็นระยะ 30 มม. จากส่วนปลายพิมพ์เป็นระยะเวลา 20 วินาที ก่อนที่จะจุ่มพิมพ์ท่อยางทั้งหมดอีกครั้งตามเวลาที่กำหนด ทำให้ท่อยางที่ได้มีบริเวณส่วนปลายที่มีความหนาเป็นพิเศษ อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 8 (A7-2 dip) พบว่าการจุ่ม 2 ครั้งกลับทำให้มีอายุการใช้งานที่ต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัดคาดว่า การที่มีส่วนปลายที่หนากลับทำให้มีน้ำหนักบนผิวยางสูงขึ้นส่งผลให้อายุการใช้งานต่ำลง อีกทั้งมีระยะหัดตัวที่ต่ำซึ่งเป็นเพราะท่อยางมีความหนาที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 9 อายุใช้งานและระยะหัดตัวของท่อยางสูตรต่าง ๆ

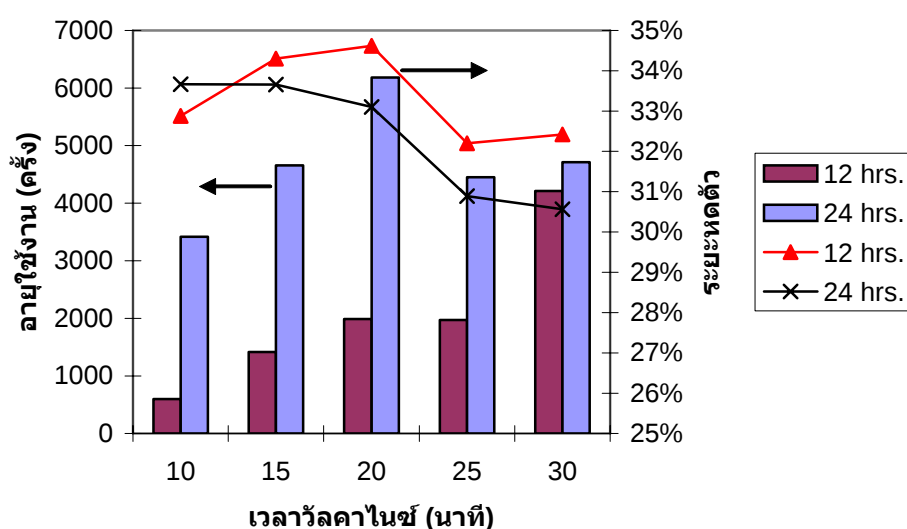
จากรูปที่ 9 สูตร A3 และ A4 จะพบว่า การเพิ่มปริมาณสารตัวเร่ง ZDBC โดยใช้กัมมะถันคงที่ที่ 2 phr ทำให้ระยะหัดตัวลดลงในขณะที่อายุใช้งานเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO ในสูตร A4 และ A5 จะพบว่าอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นพร้อม ๆ กับระยะหัดตัวที่เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย ในการจุ่มพิมพ์เป็นระยะเวลา 2 นาทีนั้นจะทำให้ได้ท่อยางที่มีความหนาประมาณ 0.4 มม. และเมื่อจุ่มพิมพ์เป็นระยะเวลานานขึ้นเพื่อให้ท่อยางมีความหนาประมาณ 0.5 มม. เมื่อนำมาทดสอบเปรียบเทียบกับสูตร A3 และ A3-thick จะพบว่าอายุการใช้งานเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยในขณะที่ระยะหัดตัวลดลงค่อนข้างสูง

ที่ผ่านมาในสูตร A3, A4 และ A5 นั้นจะใช้ตัวเร่งที่จัดอยู่ในกลุ่ม Ultra-accelerator และใช้ปริมาณ ZnO ที่ค่อนข้างต่ำคือ 1.0 และ 2.0 จึงได้เปลี่ยนระบบมาเป็นระบบที่ใช้สารตัวเร่งร่วมโดยร่วมกับสารตัวเร่งในกลุ่มไฮโอโซลคือ ZMBT ร่วมกับสารตัวเร่งที่ช้าลงเล็กน้อยในกลุ่มคาร์บาเมตคือ ZDEC และเพิ่มปริมาณสารกระตุ้น ZnO เป็น 5 phr (สูตร A6) จากรูปที่ 9 พบว่าการใช้ระบบการวัลคาไนซ์ที่ช้าลงเล็กน้อยพร้อมกับเพิ่มปริมาณสารกระตุ้นที่มากขึ้น จะทำให้ท่อยางมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยระยะหัดตัวอยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูง ทำให้คิดว่าอัตราการวัลคาไนซ์ หรือระดับการวัลคาไนซ์ของท่อยางเป็นส่วนสำคัญของสมบัติด้านอายุการใช้งาน

ในขั้นตอนต่อมาจึงได้นำสูตรยาง A1 ซึ่งมีปริมาณกัมมะถันต่ำใช้สารตัวเร่งเดี่ยวที่รวดเร็วและใช้ปริมาณสารกระตุ้นน้อย มาศึกษาความแตกต่างของ ลักษณะการวัลคาไนซ์ของแผ่นฟิล์มยาง โดยแบ่งช่วงในการวัลคาไนซ์ของน้ำยางออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงแรกคือการพรีวัลคาไนซ์อนุภาคยางในช่วงการบ่มน้ำยางคอมพาวด์ อนุภาคยางที่มีระดับพรีวัลคาไนซ์ต่ำน่าจะมีแพร่ของโมเลกุลยางเข้าหากันได้ดีทำให้แผ่นฟิล์มยางมีความแข็งแรงสูงขึ้น ในขณะที่อนุภาคยางที่มีระดับพรีวัลคาไนซ์ที่สูงมากจะทำให้การแพร่ของโมเลกุลยางที่บริเวณผิวของอนุภาคยางเกิดฟิล์มเกิดขึ้นได้น้อยทำให้ฟิล์มยางไม่แข็งแรง ช่วงที่สองคือการวัลคาไนซ์หลักด้วยอากาศร้อน เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงและระบบสารตัวเร่งที่รวดเร็วจะทำให้เกิดการวัลคาไนซ์จากภายนอกเข้าสู่ภายในของอนุภาคยางที่ยึดตัวเป็นแผ่นฟิล์ม (Ho and Khew 1999) ถ้าหากอัตราการวัลคาไนซ์สูงมากกว่าอัตราการแพร่ของสารวัลคาไนซ์เข้าสู่อนุภาคยางจะทำให้เกิดลักษณะของอนุภาคยางที่มีความแข็งแรงบริเวณภายนอกและอ่อนนุ่ม

บริเวณภายในที่มีการวัดคาบในซัปดาห์ว่า ระยะเวลาการวัดคาบในซัปดาห์ที่แตกต่างกันจะทำให้สมบัติของแผ่นฟิล์มแตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อแปรระยะเวลาการบ่มน้ำยางคอมเพาต์ร่วมกับระยะเวลาการวัดคาบในซัปดาห์จะทำให้สามารถเข้าใจถึงผลของการเกิดแผ่นฟิล์มและการวัดคาบในซัปดาห์ต่อการเตรียมตัวอย่างได้ดียิ่งขึ้น

ทำการทดลองโดยการแบ่งน้ำยางคอมเพาต์ สูตร A1 เป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มแรกบ่มน้ำยางที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง และกลุ่มที่สองบ่มเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นในการเตรียมตัวอย่างแปรระยะเวลาในการอบวัดคาบในซัปดาห์เป็น 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างไปทดสอบอายุการใช้งานและระหัดตัว ซึ่งผลการทดลองแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ผลของระยะเวลาการบ่มน้ำยางคอมเพาต์และระยะเวลาการวัดคาบในซัปดาห์ต่ออายุใช้งานและระหัดตัวของน้ำยางสูตร A1

จากรูปที่ 10 จะเห็นว่าเมื่อบ่มน้ำยางเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง อายุใช้งานจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเวลาในการวัดคาบในซัปดาห์เพิ่มขึ้น ระหัดตัวจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ก่อนที่จะลดลงเมื่อระยะเวลาวัลคาไนซ์เพิ่มเป็น 25 และ 30 นาทีตามลำดับ และเมื่อการบ่มเร่งเพิ่มเป็น 24 ชั่วโมงจะเห็นว่าอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในทุก ๆ ระยะเวลาในการวัดคาบในซัปดาห์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการพรีวัลคาไนซ์หรือการที่มีการแพร่ของสารวัลคาไนซ์เข้าสู่อนุภาคยางมีส่วนสำคัญต่ออายุการใช้งานของตัวอย่าง และเมื่อพิจารณาระยะเวลาการวัดคาบในซัปดาห์จะพบว่าอายุการใช้งานจะเพิ่มขึ้นก่อนที่จะค่อย ๆ ลดลงที่ระยะเวลา 25 และ 30 นาที ซึ่งอาจจะเป็นเพราะการรีเวอร์ชันของสูตรยางระหัดตัวของตัวอย่างค่อย ๆ ลดลงเมื่อระยะเวลาการวัดคาบในซัปดาห์เพิ่มขึ้น และที่การบ่ม 24 ชั่วโมงจะมีระหัดตัวที่ต่ำกว่าการบ่มที่ 12 ชั่วโมงเล็กน้อย

จากการวิจัยนี้จะเห็นว่าตัวอย่างมีอายุใช้งานค่อนข้างสูงตั้งแต่ค่าประมาณ 5000, 6000 ครั้ง ไปจนถึง 12000, 22000 ครั้ง ขึ้นกับสูตรและวิธีการเตรียมตัวอย่าง ในขณะที่ระหัดตัวมีค่าสูงกว่า 30% ด้วยความดันอากาศ 2 psi เมื่อเปรียบเทียบกับผลงานที่ผ่านมาที่เตรียมด้วยยางธรรมชาติพรีวัลคาไนซ์ (สถาพร ลักษณะเจริญ และ สุนทร วงษ์ศิริ 2546), (Laksanacharoen 2002) จะสามารถหัดตัวได้เพียง 15-25% เท่านั้น ในขณะที่อายุใช้งานมีค่าสูงกว่าที่มีการวิจัยผ่านมาในระหัดตัวที่สูงในระดับนี้ (Klute and Hannaford 1998) ซึ่งที่ผ่านมานั้นที่ระหัดตัว 25% นั้นมีอายุใช้งานเพียงประมาณ 4000 ครั้งเท่านั้น และเมื่อระหัดตัวสูงขึ้นอายุใช้งานจะหัดสั้นลงอีก

การเกิดความล้าเชิงกลในกล้ามเนื้อเทียมแมคคิบเบน

ในปี ค.ศ. 1998 Klute and Hannaford (Klute and Hannaford, 1998) ได้อธิบายการเกิดความล้าเชิงกลที่เกิดขึ้นในวัสดุยาง ซึ่งสามารถใช้อธิบายการเกิดความล้าเชิงกลในกล้ามเนื้อเทียมแมคคิบเบนได้ โดยได้อธิบายการเกิดความล้าเชิงกลว่าเกิดจากการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ รอบๆ บริเวณที่ถูกกระทำหรือเกิดการผิดรูปขึ้นในชิ้นงาน โดยจุดเริ่มต้นของการขยายตัวของรอยแตกเกิดจากรอยตำหนิภายในวัสดุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ แม้จะมีขนาดเพียง 10 ไมครอน ก็สามารถเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดการขยายตัวของรอยแตกได้ โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการขยายตัวของรอยแตก มีดังนี้

เชิงกล : ขนาดและทิศทางของแรงที่กระทำหรือการผิดรูป

เคมี : การสัมผัสกับผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม

สิ่งแวดล้อม : อุณหภูมิ, โอโซน และการได้รับรังสีอัลตราไวโอเลต

อีกทั้งยังได้ทำการเปรียบเทียบอายุการใช้งาน (จำนวนรอบการใช้งาน) ของตัวอย่างในลักษณะการทำงานจริงของกล้ามเนื้อเทียมแบบแมคคิบเบนกับการทดสอบในลักษณะ Uniaxial ซึ่งจากการทดลองพบว่า อายุการใช้งาน (จำนวนรอบการใช้งาน) ของตัวอย่างในลักษณะการทำงานจริงของกล้ามเนื้อแบบแมคคิบเบนกับการทดสอบในลักษณะ Uniaxial Tension มี อายุการใช้งาน (จำนวนรอบการใช้งาน) มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการทดสอบในลักษณะ Uniaxial สามารถนำมาใช้ในการเปรียบเทียบอายุการใช้งานของตัวอย่างในกล้ามเนื้อเทียมแบบแมคคิบเบนได้ โดยจะใช้สมการที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้ในการคำนวณอายุการใช้งาน แล้วนำไปเปรียบเทียบกับการใช้งานจริง โดยสมการดังกล่าวคือ

$$\frac{N_{McK}}{N_{UT}} = \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{\lambda_{1,UT}}} \right)^\beta}{\left(\sqrt{9.6 - 8.6\lambda_{1,McK}^2} \right)^\beta} \quad (1)$$

โดยที่ N_{McK} คือ จำนวนรอบการใช้งานสำหรับกล้ามเนื้อเทียมแมคคิบเบน

N_{UT} คือ จำนวนรอบการใช้งานสำหรับ Uniaxial Tension

$\lambda_{1,UT}$ คือ สัดส่วนการยืดออกตามแนวยาวของชิ้นทดสอบสำหรับ
Uniaxial Tension (ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2)

$\lambda_{1,McK}$ คือ สัดส่วนการยืดออกตามแนวยาวของชิ้นทดสอบสำหรับ
กล้ามเนื้อเทียมแมคคิบเบน (ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.7)

β คือ ค่าคงที่ของวัสดุ (ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3)

ในการวิจัยนี้เนื่องจากมิติของตัวอย่างและท่อลัทธิที่แตกต่างกัน จึงต้องปรับเทียบค่าคงที่ของสมการที่ได้จากการคำนวณขึ้นมาใหม่เพื่อใช้สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ โดยสมการที่ได้คือ

$$\frac{N_{McK}}{N_{UT}} = \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{\lambda_{1,UT}}} \right)^\beta}{\left(\sqrt{7.00 - 6.00\lambda_{1,McK}^2} \right)^\beta} \quad (2)$$

สำหรับค่าคงที่ของวัสดุ (β) ได้มีการอธิบายถึงค่าดังกล่าวว่า ค่าคงที่ของวัสดุจะมีค่าเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับระดับความเครียด(strain level) และอัตราความเครียด(strain rate) ที่ใช้ในการทดลอง โดยค่าคงที่ของวัสดุของยางธรรมชาติจะอยู่ในช่วง 1.08 ถึง 2.38 สำหรับที่ระดับความเครียดต่ำ และจะอยู่ในช่วง 3.2 ถึง 4.6 สำหรับที่ระดับความเครียดสูง (Gent, 1992) สำหรับในวัสดุหรือยางชนิดอื่นๆ ก็จะมีค่าคงที่ของวัสดุที่มีค่าที่แตกต่างกัน ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

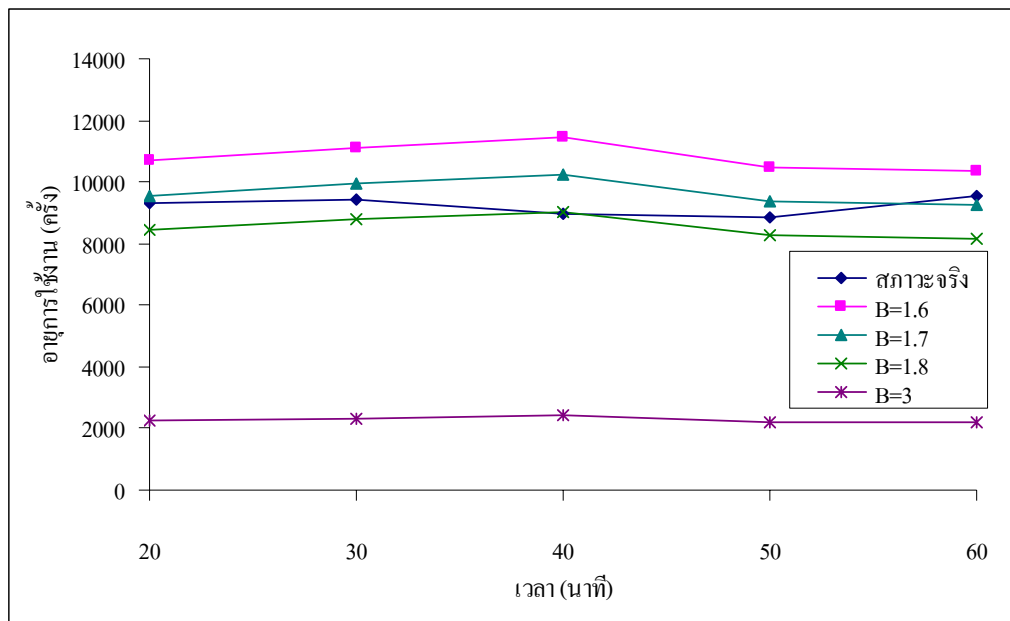
ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของวัสดุ (β) ของยางชนิดต่างๆ

ชนิดยาง	ไม่ผสมสารเคมี	ผสมสารเคมี
NR	2.0	2.0
IR	3.8	2.0
SBR	2.3	2.4
BR	3.6	3.0
NBR	2.7	2.8
CR	1.7	3.4
EPDM	3.4	3.2

ผลของการเปรียบเทียบอายุการใช้งานของท่อยางด้วยการดึงแบบแนวเดียวกับแบบแมคคิบเบน (สภาวะจริง)

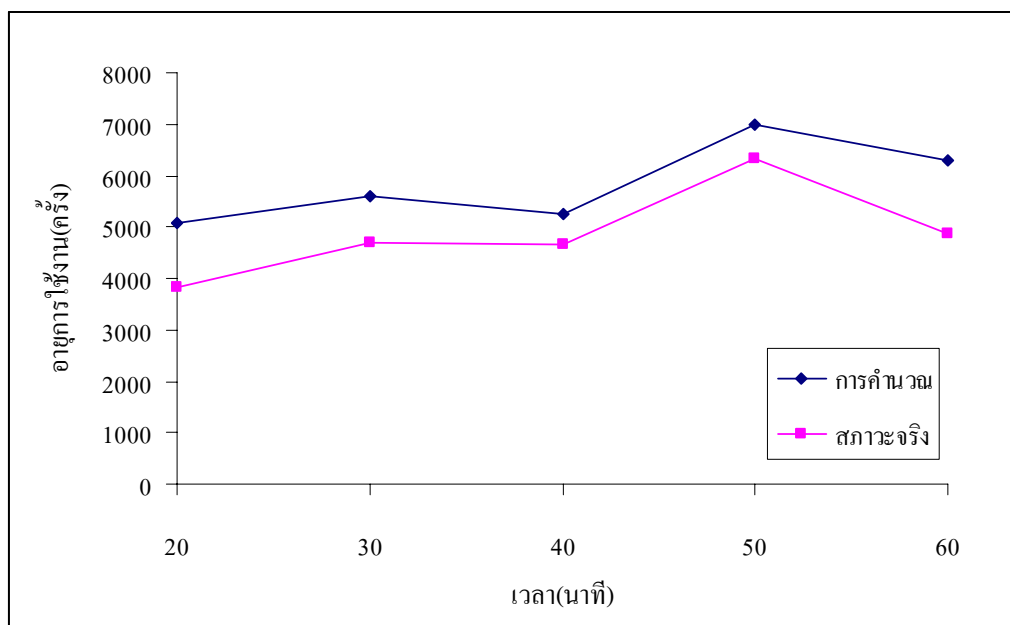
ใช้น้ำยางสูตร A6 (ตารางที่ 1) โดยการนำท่อยางที่ได้จากการจุ่มมาทดสอบการความล้าด้วยการดึง สำหรับในขั้นตอนการทดสอบจะต้องทำการยึดแผ่นฟิล์มออกเป็น 2 เท่า ซึ่งเทียบเท่ากับการหัดตัวของท่อยาง 30% เมื่อทดสอบแบบแมคคิบเบน (Klute and Hannaford, 1998) ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้ โดยหลังจากที่ได้ทำการทดสอบแล้วนำค่าที่ได้มาแทนค่าในตัวอย่างอายุการใช้งานสำหรับ Uniaxial Tension(N_{UT}) ในสมการที่ 2 เพื่อคำนวณหาอายุการใช้งานสำหรับกล้ามเนื้อเทียมแมคคิบเบน(N_{McK}) แล้วนำค่า N_{McK} ที่ได้มาเปรียบเทียบกับอายุการใช้งานที่ได้จากการทดสอบกับเครื่อง Artificial Muscle Test

สำหรับค่าคงที่ของวัสดุ (β) ซึ่งในงานวิจัยข้างต้น(Klute and Hannaford, 1998) จะใช้ค่าคงที่ของวัสดุ (β) เท่ากับ 3 แต่ในการทดลองครั้งนี้ศึกษาเพื่อหาค่าคงที่ของวัสดุ (β) ที่ให้ค่าอายุการใช้งานที่สอดคล้องกับผลการทดลองในครั้งนี้โดยทำการทดสอบเพื่อสร้างข้อมูลพื้นฐานโดยแปรระยะเวลาวัลคาไนซ์ 20-60 นาที ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 11 โดยจะพบว่าค่าคงที่ของวัสดุ (β) ที่เหมาะสมสำหรับสูตรยางที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้คือ 1.7 และจะใช้ค่านี้ในการคำนวณอายุการใช้งานในสมการที่ 2 ต่อไป

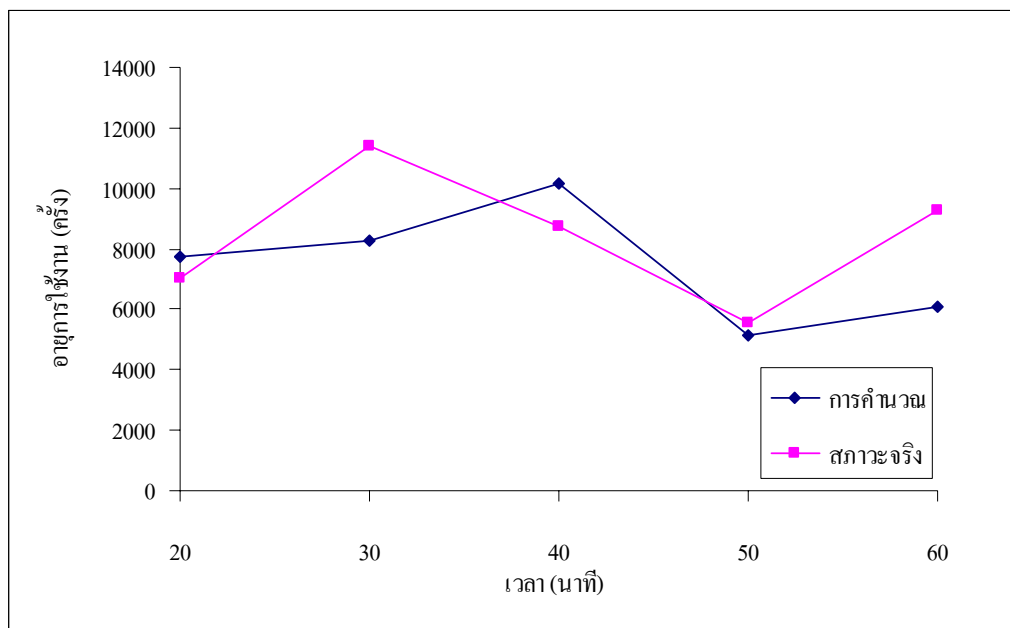


รูปที่ 11 ผลของเวลาในการวัดคาบไชน์ที่อุณหภูมิ 110°C ที่มีผลต่ออายุการใช้งานของท่ออย่างที่กำลังที่ของวัสดุ (β) ต่างๆ

หลังจากนั้นเพื่อศึกษาความแม่นยำของโมเดลในการประมาณอายุการใช้งานของกล้ามเนื้อเทียมแบบแมคคิบบนโดยใช้การทดสอบความล้าด้วยการดึงแบบ uniaxial tension จึงทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้ขั้นตอนการเตรียมท่ออย่างเช่นเดิมแต่แปรอุณหภูมิและเวลาในการวัดคาบไชน์เป็น 90 และ 100 องศาเซลเซียสตามลำดับ



รูปที่ 12 ผลของเวลาในการวัดคาบไชน์ที่อุณหภูมิ 90°C ที่มีผลต่ออายุการใช้งานท่ออย่างที่ได้จากการคำนวณจากสมการ 2 และจากการทดสอบด้วยเครื่อง Artificial Muscle Test (สภาวะจริง)



รูปที่ 13 ผลของเวลาในการวัดคาบไชนซ์ที่อุณหภูมิ 100°C ที่มีผลต่ออายุการใช้งานต่ออย่างที่ได้จากการคำนวณจากสมการ 2 และจากการทดสอบด้วยเครื่อง Artificial Muscle Test (สภาวะจริง)

จากการศึกษาผลของการเปรียบเทียบอายุการใช้งานของท่ออย่างแบบ Uniaxial Tension กับแบบแมคคิบเบน (สภาวะจริง) ในรูปที่ 12-13 พบว่า อายุการใช้งานของท่ออย่างที่ได้ทดสอบทั้งสองแบบโดยส่วนใหญ่ค่อนข้างสอดคล้องกัน กล่าวคือ สามารถนำอายุการใช้งานของท่ออย่างทั้งสองแบบมาเปรียบเทียบกันได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อแทนค่าอายุการใช้งานของท่ออย่างแบบ Uniaxial Tension ในสมการ 2 จะสามารถทราบค่าอายุการใช้งานแบบแมคคิบเบน (สภาวะจริง) โดยประมาณได้ โดยอายุการใช้งานที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด มีค่าผลต่างสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ $\pm 1,145$ ครั้ง เมื่อกำหนดให้ค่าคงที่ของวัสดุเท่ากับ 1.7

สรุปผล

การเตรียมท่ออย่างสำหรับกล้ามเนื้อเทียมแบบแมคคิบเบนในงานวิจัยนี้พบว่า ลักษณะการวัดคาบไชนซ์ของท่ออย่างมีความสำคัญมากต่ออายุการใช้งานของกล้ามเนื้อเทียม ปริมาณกำมะถันที่ให้อายุการใช้งานสูงที่สุดคือ 1.25 phr เมื่อใช้ระบบสารตัวเร่งเดี่ยวประเภท Ultra-accelerator คือ ZDBC การเพิ่มปริมาณสารตัวเร่ง และ สารกระตุ้น ZnO มีแนวโน้มจะทำให้อายุการใช้งานเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามใช้ระบบวัดคาบไชนซ์ร่วมที่ช้าลงระหว่าง ZDEC และ ZMBT ร่วมกับการเพิ่มปริมาณสารกระตุ้นจะสามารถเพิ่มอายุการใช้งานได้อย่างเห็นได้ชัด ระดับการพรีวัลคาไนซ์มีความสัมพันธ์อย่างมากต่ออายุการใช้งานโดยการบ่มน้ำยางเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจะมีอายุใช้งานสูงกว่า 12 ชั่วโมงอย่างเห็นได้ชัด และที่การบ่มน้ำยาง 12 ชั่วโมงนั้นเวลาในการวัดคาบไชนซ์จะช่วยเพิ่มอายุการใช้งาน ในขณะที่เมื่อบ่มเร่ง 24 ชั่วโมงนั้นเริ่มเห็นการรีเวอร์ชันเมื่อเวลาการวัดคาบไชนซ์เพิ่มเป็น 25 และ 30 นาที การวิจัยนี้สามารถเตรียมท่ออย่างที่มีอายุใช้งานสูง ระยะหาค่าสูงกว่าที่มีการเตรียมมาโดยสภาพ (สภาพ ลักษณะเจริญ และ สุนทร วงษ์ศิริ 2546), (Laksanacharoen 2002) และ Klute (Klute and Hannaford 1998) และพบว่าสามารถเปรียบเทียบอายุการใช้งานแบบ Uniaxial Tension ของท่ออย่างกับอายุการใช้งานของท่ออย่างที่ได้จากการใช้งานจริงได้ โดยอายุการใช้งานที่ได้จากการคำนวณมีค่าผลต่างสัมบูรณ์เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ $\pm 1,000$ ครั้ง เมื่อกำหนดให้ค่าคงที่ของวัสดุเท่ากับ 1.7

ข้อเสนอแนะ

- ถึงแม้ว่าอายุการใช้งานยังสั้นเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ขับเคลื่อนอื่น ถ้าหากมีการพัฒนาเพิ่มเติมให้สามารถเปลี่ยนใส่ได้ง่ายก็จะพัฒนาเพื่อใช้งานได้ในระดับหนึ่ง
- น่าจะมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาสู่การประยุกต์ใช้งานในระดับเบื้องต้น ที่ไม่คิดข้อจำกัดเรื่องอายุการใช้งานมากนัก เช่น การใช้งานเป็นระยะ ๆ หรือ การใช้งานที่ไม่ต่อเนื่อง เป็นต้น เพื่อค้นหามีการใช้งานจริง ได้การตอบรับจากผู้ใช้เพื่อพัฒนาต่อไป
- น่าจะมีการศึกษาพัฒนาระบบขนาดเล็กเพื่อพกพา เมื่อมีการพัฒนาไปสู่ระบบที่ต้องมีการเคลื่อนย้าย แหล่งอากาศอัดจะเป็นข้อจำกัดที่สำคัญ

เอกสารอ้างอิง

สถาพร ลักษณะเจริญ และ สุนทร วงษ์ศิริ (2546). การออกแบบสร้างและศึกษาถึงคุณสมบัติของกล้ามเนื้อเทียมที่ผลิตจากยาง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17, จังหวัดปราจีนบุรี.

Baramboim, N. K. (1964). Mechanochemistry of Polymers. London, Maclaren.

Ho, C. C. and M. C. Khew (1999). "Surface Morphology of Prevulcanized Natural Rubber Latex Films by Atomic Force Microscopy: New Insight into the Prevulcanization Mechanism." Langmuir 15: 6208-6219.

Klute, G. K. and B. Hannaford (1998). Fatigue Characteristics of McKibben Artificial Muscle Actuators. 1998 Proceeding in IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robotics and Systems, Victoris, B. C., Canada.

Lake, G. J. (1983). Progress of Rubber Technology 45: 89.

Laksanacharoen, S. (2004). Artificial Muscle Construction Using Natural Rubber Latex in Thailand. Proceeding in The 3rd Thailand and Material Science and Technology Conference, Miracle Grand Hotel, Bangkok, Thailand.

Wongsiri, S. and S. Laksanacharoen (2003). Design and Construction of An Artificial Limb Driven by Artificial Muscles for Amputees. Proceeding in PSU-UNS International Conference 2003: Energy and the Environment, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkla, Thailand, Prince of Songkla University, Hat Yai Campus.

คำชี้แจงการแก้ไขรายงานฉบับสมบูรณ์

ผู้ทรงคุณวุฒิ : 1. ตรวจสอบเรื่องของการย่อหน้าในรายงาน

นักวิจัย : 1. ตรวจสอบและแก้ไขให้ไปในทิศทางเดียวกันแล้ว

ผู้ทรงคุณวุฒิ : 2. เป็นรายงานที่ดี ได้ข้อมูลชัดเจน สามารถเขียน paper ได้

นักวิจัย : 2. ได้มีการนำเสนอในการประชุมวิชาการ International Rubber Conference 2008 ที่ประเทศ
มาเลเซียแล้ว