

การศึกษาอายุการเก็บรักษาของยางคอมพาวด์บีที่มีผลต่อคุณสมบัติของฉนวนยางในมอเตอร์ จรวด

Studying the Effect of Compound B Lifetime to Rubber Compound Properties in a Rocket Motor

ไพศาล อภินิหพัฒน์^{1*} วสันต์ คุ่มชู²

¹ฝ่ายวิจัยและพัฒนา สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ อาคารสำนักงานปลัดกระทรวงกลาโหม (แจ้งวัฒนะ) จ.นนทบุรี

²ฝ่ายโรงปฏิบัติการ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ อ.พยุหะคีรี จ.นครสวรรค์

E-mail: paisan.a@dti.or.th*

บทคัดย่อ

ฉนวนกันความร้อนในมอเตอร์จรวดเชื้อเพลิงแข็งทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของแท่งดินขับทำลายท่อจรวด ฉนวนที่ดีควรมีน้ำหนักเบา ยืดหยุ่น ฉนวนยางเป็นวัสดุที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน มีส่วนผสมของยาง เส้นใย และสารเติมแต่ง ในการผลิตส่วนผสมต่างๆ มาตีเข้าด้วยกันแล้วรีดเป็นแผ่นเรียกว่ายางคอมพาวด์บี ยางนี้ยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้ต้องนำไปวัลคาไนซ์หรืออบให้ยางสุกพร้อมขึ้นรูปจึงได้เป็นฉนวนยาง ยางคอมพาวด์บีเมื่อเก็บไว้นาน จะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางในเนื้อยางทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนไปจนอาจทำให้ไม่สามารถนำยางคอมพาวด์บีดังกล่าวไปวัลคาไนซ์เป็นฉนวนยางได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอายุการเก็บรักษาของยางคอมพาวด์บีที่ยังสามารถนำไปอบขึ้นรูปเป็นฉนวนยางโดยยังคงคุณสมบัติทางกายภาพและอัตราการเสื่อมถอยที่ยังใช้งานได้ ในการทดลอง ยางคอมพาวด์บีถูกเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นระยะเวลา 45, 70, 123, 203 วัน ตามลำดับ จากนั้นนำยางคอมพาวด์บีแต่ละช่วงเวลาไปวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง MDR พบว่าสมบัติการไหลใกล้เคียงกับตอนเริ่มต้น อีกส่วนหนึ่งทำเป็นแผ่นฉนวนยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์เพื่อทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ Tensile Strength, Elongation และค่า Erosion Rate พบว่ายางคอมพาวด์บีที่เก็บในช่วงเวลา 0-203 วันให้ค่า Tensile Strength ค่า Elongation และค่า Erosion Rate ใกล้เคียงกับตอนเริ่มต้น

คำหลัก: ฉนวนกันความร้อน, ฉนวนยาง, ยางคอมพาวด์บี, คุณสมบัติทางกายภาพ

Abstract

Insulation in a solid rocket motor is a material for inhibiting heat of burning propellant grain and protecting rocket body tube damage. An advantageous insulation should have light weight and good elasticity. Rubber insulation is an optimal material. It is a mixture of rubbers, fibers and additives. All raw materials are mixed, knead, and laid on a flat sheet. This product is called "compound B". The Compound B is transported to the production area and then cured by vulcanization process to be a rubber insulation. Normally, compound B has a short period of time for storing because of continuous cross link reaction of rubber chains. Finally, this reaction leads to the useless compound B. This problem is the objective of this paper for studying the effect of compound B lifetime to rubber compound properties used in the rocket motor that still keeps unchanged physical properties of rubber insulation. Compound B was stored at 25 C and kept in a period of 45, 70, 123, 203 days respectively. Then rheological behavior was studied while compound B was vulcanized in MDR machine. It was found that rheology properties were rarely changed. Slap sheet of compound rubber after vulcanization was studied for the physical properties and erosion rate. It was found that tensile strength, elongation and erosion rate were not changed when compared with the original.

Keywords: Insulation, Rubber Insulation, Compound B, Physical Properties

1 บทนำ

ฉนวนกันความร้อนในมอเตอร์จรวดเชื้อเพลิงแข็งทำหน้าที่ป้องกันความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของแท่งดินขับ ที่ให้ก๊าซร้อนและมีอุณหภูมิสูงมายังท่อจรวด ฉนวนต้องมีสมบัติทางด้านกายภาพที่เหมาะสม ยึดติดกับผิวท่อมอเตอร์จรวดได้ดี และทนต่อการกัดกร่อน ตำแหน่งของฉนวนอยู่ระหว่างผิวของท่อจรวดและดินขับ มีหน้าที่หลักคือป้องกันการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในขณะเผาไหม้ดินขับ และป้องกันความร้อนที่เกิดขึ้นถ่ายเทไปยังท่อมอเตอร์จรวดและมีอุณหภูมิสูงจนเกิดการหลอมละลาย นอกจากนี้ยังมีหน้าที่ป้องกันการเผาไหม้ของแท่งดินขับที่อาจเกิดการเผาไหม้ผิดปกติจากที่ออกแบบไว้ การเป็นตัวกั้นชนในการส่งถ่ายความเครียดของท่อไปยังแท่งดินขับ การป้องกันก๊าซจากการเผาไหม้เข้าไปที่ผิวท่อมอเตอร์ การทำหน้าที่เป็นตัวอุดรอยต่อของท่อมอเตอร์เพื่อป้องกันการทำลายจากผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ที่ร้อน และการช่วยปรับทิศทางของก๊าซจากการเผาไหม้ให้ไหลออกทางรูท้ายจรวดด้วยการไหลที่ราบเรียบที่สุด [1]

นอกจากการป้องกันความร้อนแล้ว ฉนวนยังทำหน้าที่ห่อหุ้มดินขับและลดความเค้น (Stress Relief) อันเกิดจากการยึดหดตัวของดินขับเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ความเค้นหลักเกิดตามแนวรัศมีของแท่งดินขับและเกิดมากที่บริเวณหัวและท้ายแท่งดินขับ ฉนวนการติดฉนวนจึงเน้นติดที่ด้านหัวและท้ายของท่อมอเตอร์จรวด ฉนวนที่ติดมีสองชั้น ชั้นนอกติดอยู่กับท่อ ส่วนอีกชั้นติดกับดินขับ ด้านของฉนวนทั้งสองแผ่นนี้ที่อยู่ภายในท่อจะเชื่อมติดกัน แต่ด้านที่อยู่ปลายท่อจะไม่เชื่อมติดกัน ดังนั้นเมื่อดินขับหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิลดลง ดินขับจะดึงให้ฉนวนชั้นในหดตัวตามมาได้อย่างอิสระโดยไม่เกิดแรงดึงต่อฉนวนชั้นนอกที่ติดกับท่อจรวดซึ่งตัวท่อจะมีการหดตัวที่น้อยกว่าดินขับที่อุณหภูมิเดียวกัน

ฉนวนที่ดีควรมีน้ำหนักเบา สามารถขึ้นรูปยึดติดกับวัสดุอื่นได้ วัสดุฉนวนกันความร้อนที่มีประสิทธิภาพมักเป็นวัสดุชนิดคอมโพสิต มีการศึกษาวิจัยการใช้วัสดุฟีนอลิกเรซิน (Phenolic Resin) [2] ซึ่งมีสมบัติทนต่อความร้อนได้ดี มีความเสถียรทางเคมี และมีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อน ฟีนอลิกเรซินมีความหนาแน่นการเชื่อมขวางสูง (High-Crosslinking) ดังนั้นฟีนอลิกเรซินจึงถูกเลือกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมทางด้านจรวดและกระสวยอวกาศ อย่างไรก็ตาม วัสดุคอมโพสิตชนิดฟีนอลิกเรซินผสมเส้นใยต้องมีการบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อนทำให้การนำไปใช้งานในท่อมอเตอร์จรวดค่อนข้างยุ่งยาก และวัสดุชนิดนี้มีความแข็งและไม่ค่อยมีความยืดหยุ่น จึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานเป็น

ฉนวนกันความร้อนในมอเตอร์จรวดที่ต้องการยึดติดกับท่อจรวดและยึดติดกับดินขับ จึงเลือกวัสดุคอมโพสิตชนิดที่เป็นส่วนผสมของยางและเส้นใยซึ่งเรียกว่ายางคอมพาวด์ (Compound Rubber) ซึ่งมีความยืดหยุ่นมากกว่า

ฉนวนกันความร้อนชนิดยางคอมพาวด์ในช่วงเริ่มต้นสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศได้รับการถ่ายทอดความรู้ด้านฉนวนยางที่เป็นยางชนิด NBR (Acrylonitrile Butadiene Rubber) และใช้เส้นใยเป็นแร่ใยหิน อย่างไรก็ตามได้มีประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง บัญชีรายชื่อวัตถุอันตราย พ.ศ. 2538 ได้กำหนดให้แร่ใยหินประเภทโครโซไทล์ (Chrysotile) เป็นวัตถุอันตรายชนิดที่ 3 ซึ่งพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 มาตรา 18 กำหนดให้เป็นวัตถุอันตรายชนิดที่ 3 ในการผลิต การนำเข้า การส่งออก หรือการมีไว้ในครอบครองต้องได้รับใบอนุญาต ดังนั้นสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศจึงได้ทำการวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีฉนวนกันความร้อนที่ใช้วัสดุเส้นใยชนิดอื่นทดแทนแร่ใยหิน จากการค้นคว้าพบว่าหลายๆ ประเทศได้เลือกใช้ฉนวนกันความร้อนโดยใช้ยางคอมพาวด์ที่เป็นส่วนผสมหลักของยาง EPDM [3] ร่วมกับเส้นใยอะรามิดและสารหน่วงไฟ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศจึงได้มีการวิจัยพัฒนาสูตรฉนวนยางกันความร้อน โดยพิจารณาสมบัติทางกายภาพอันได้แก่ ความหนาแน่น Tensile Strength, Elongation อัตราการเสียดกร่อน (Erosion Rate) ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญมากต่อการทนต่อความร้อน เนื่องจากอัตราการเสียดกร่อนที่มีค่าน้อยจะใช้ฉนวนยางที่บางลงได้ ทำให้อายุของฉนวนยางน้อยลงส่งผลให้จรวดมีน้ำหนักเบาลง เป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของจรวดด้วยอีกทางหนึ่ง

ในกระบวนการผลิตยางคอมพาวด์ ส่วนผสมต่างๆ ที่ถูกผสมจนเข้ากันดีแล้วเรียกว่ายางคอมพาวด์บี (Compound B) จากนั้นจึงนำไปทำการวัลคาไนซ์หรืออบให้ยางสุก จึงได้เป็นยางคอมพาวด์ตามที่ต้องการ ยางคอมพาวด์บีนี้ ผู้ผลิตแจ้งให้เก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำและควรเก็บไว้ได้ไม่เกิน 2 สัปดาห์ หลังจากนั้นยางจะเริ่มเกิดปฏิกิริยา cross link ทำให้ยางคอมพาวด์บีเริ่มแข็งตัวมากขึ้นเรื่อยๆ จนไม่สามารถนำไปวัลคาไนซ์หรืออบให้ยางสุกได้ จำเป็นต้องทิ้งไป อย่างไรก็ตาม ในบางครั้งแผนการผลิตมีการเปลี่ยนแปลงทำให้ต้องเก็บยางคอมพาวด์บีเป็นเวลานานกว่าที่ผู้ผลิตแจ้งไว้

ดังนั้นเพื่อให้เกิดความมั่นใจในการนำยางคอมพาวด์บีที่เก็บไว้นานกว่า 2 สัปดาห์ไปผลิตเป็นฉนวนยางกันความร้อน และเป็นการลดปริมาณของเสียในกระบวนการ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอายุการเก็บรักษายางคอมพาวด์บีที่ยังสามารถนำไปอบขึ้นรูปเป็นฉนวนยางกันความร้อนในมอเตอร์

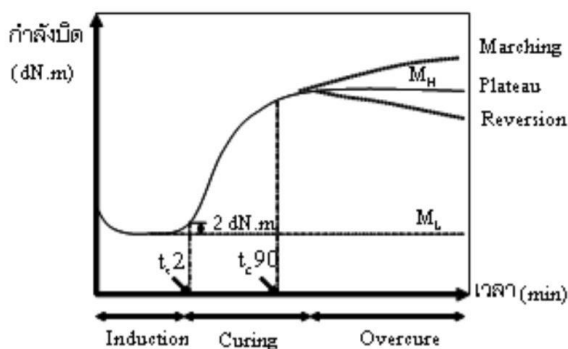
จรวด โดยยังคงให้คุณสมบัติทางกายภาพและอัตราการเสียด
กร่อนของฉนวนยางกันความร้อนที่เป็นปกติ

2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การผลิตยางคอมพาวด์และการติดในท่อมอเตอร์จรวด

ฉนวนยางกันความร้อนชนิดยางคอมพาวด์มีส่วนประกอบหลักได้แก่ยางพื้นฐาน ซึ่งจะใช้เป็นยางชนิดใดขึ้นอยู่กับสมบัติที่ต้องการ ส่วนใหญ่นิยมใช้ยางธรรมชาติ (National Rubber, NR) เป็นยางพื้นฐาน นอกจากนี้จะใช้ยางสังเคราะห์อีกชนิดเข้ามาช่วยปรับสมบัติให้ดีขึ้น ในที่นี้ได้เลือกใช้ยางสังเคราะห์ชนิด EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) ซึ่งมีคุณสมบัติที่ทนความร้อนสูงกว่ายางพื้นฐานหลายๆ ชนิด [4,5] มีการเติมเส้นใยเพื่อช่วยในเรื่องความแข็งแรง มีการเติมสารหน่วงไฟเพื่อช่วยในการทนความร้อน นอกจากนี้ยังมีสารเติมแต่งอื่นๆ ซึ่งทำหน้าที่แตกต่างกันไปเช่น สารป้องกันกร่อนสภาพ สารทำให้ยางนิ่ม สารช่วยทำให้ยางคงรูป สารเชื่อมต่อ เป็นต้น [6]

ในการผสมยางคอมพาวด์ เริ่มจากการนำส่วนผสมของยางที่เตรียมไว้ใส่ในเครื่องนวดยางหรือนิดเดอร์ (Kneader) จากนั้นนำยางไปนวดในเครื่องผสมแบบเปิดสองลูกกลิ้ง (Two-Roll Mill) [7,8] ที่อุณหภูมิห้อง ริดยางให้เป็นแผ่นหนาประมาณ 2 mm เนื่องจากในส่วนผสมมีเส้นใยอยู่ด้วย ทิศทางการริดยางจึงส่งผลต่อทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย และส่งผลต่อค่า Tensile และค่า Elongation ของยางด้วย ยางที่ผ่านการผสมถึงขั้นตอนนี้เรียกว่ายางคอมพาวด์บี เป็นยางที่ยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ต้องผ่านการวัลคาไนซ์เซชัน (Vulcanization) หรืออบให้ยางสุกก่อน ในระหว่างการอบยางจะสามารถไหลได้และเริ่มทำปฏิกิริยาเชื่อมขวางกันมากขึ้น ยางก็จะค่อยๆ แข็งขึ้นจนยางสุก การไหลของยางในรูปของกำลังบิดระหว่างการวัลคาไนซ์เซชันแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การไหลของยางในรูปของกำลังบิดระหว่างการวัลคาไนซ์เซชัน [9]

การไหลของยางในระหว่างการวัลคาไนซ์เซชัน ศึกษาได้จากค่า M_L , M_H , T_{c2} และ T_{c90} ช่วงเริ่มต้นเมื่อยางได้รับความร้อน ยางจะนิ่มลงทำให้ค่าแรงบิดน้อยลงจนเข้าสู่แรงบิดที่ต่ำสุดในช่วงเวลาหนึ่ง แรงบิดดังกล่าวเรียกว่า M_L หลังจากนั้นความหนืดของยางจะเริ่มสูงขึ้น แรงบิดจะสูงขึ้นตามไปด้วย การบิดใช้มุมแกว่ง 3 องศา ระยะเวลาที่ทำให้แรงบิดเพิ่มขึ้นมาถึงจุดต่ำสุด 2 เดซินิวตันเมตรเรียกว่า t_{c2} หรือระยะเวลาสกอร์ช (scorch time) เมื่อวัดแรงบิดสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดสูงสุดเรียกว่า M_H หรือระยะเวลาที่ทำให้ยางสุกไปร้อยละ 90 ซึ่งเพียงพอที่จะทำให้ยางมีสมบัติทางกลที่ดีที่ระยะเวลา t_{c90}

ในห้องปฏิบัติการ ยางคอมพาวด์บีจะถูกวัลคาไนซ์เพื่อทำสมบัติการไหลของยาง และยางคอมพาวด์บีอีกส่วนหนึ่งจะถูกวัลคาไนซ์ให้ยางสุกโดยอัดขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างที่ความดันและอุณหภูมิค่าหนึ่ง ชิ้นงานตัวอย่างต้องมีการกำหนดทิศทางของการริดของยางอย่างชัดเจน ทิศทางที่ต่างกันส่งผลต่อค่าแรงดึงและการยืดตัวของชิ้นงานที่แตกต่างกัน ชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ถูกนำไปใช้ในการทดสอบสมบัติทางกายภาพและอัตราการเสียดกร่อนของฉนวนกันความร้อนชนิดยางคอมพาวด์ต่อไป

สำหรับฉนวนกันความร้อนชนิดยางคอมพาวด์ที่ใช้ในท่อมอเตอร์จรวดจะใช้วิธีนำแผ่นยางคอมพาวด์บีติดเข้าไปในท่อมอเตอร์จรวด มีการคำนวณเพื่อกำหนดความหนาของแผ่นยาง ตัดแผ่นยางให้มีความกว้างและความยาวตามที่กำหนด ทา Primer และกาารรองพื้นท่อมอเตอร์เพื่อช่วยการยึดติดกันระหว่างท่อและแผ่นยาง นำแผ่นยางแปะที่ผิวด้านในของท่อนำอุปกรณ์ช่วยดันแผ่นยางให้ติดอยู่กับผิวท่อและสามารถอัดความดันได้ นำท่อมอเตอร์ดังกล่าวไปอบที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 30 นาที จนกระทั่งยางถูกวัลคาไนซ์จนยางสุก นำออกมาทิ้งไว้ให้เย็นและตัดแต่งชิ้นงานตามที่ต้องการได้ ลักษณะของฉนวนยางกันความร้อนในท่อมอเตอร์จรวดเป็นดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะของฉนวนยางกันความร้อนในท่อมอเตอร์จรวด

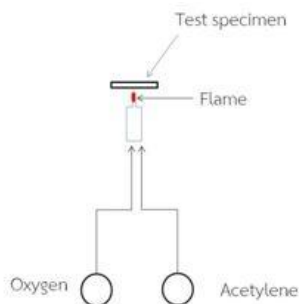
2.2 อัตราการเสียดกร่อนทางความร้อน

อัตราการเสียดกร่อนทางความร้อน (Erosion rate) เป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณออกแบบความหนาของฉนวนกันความร้อนในมอเตอร์จรวด สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$d = t \cdot r_e \cdot f \quad (1)$$

โดยที่ d คือความหนาของฉนวนกันความร้อนในมอเตอร์จรวด t คือระยะเวลาในการเผาไหม้เชื้อเพลิงดินขับ r_e คือค่าอัตราการเสียดกร่อน และ f คือ safety factor (อยู่ในช่วง 1.2 ถึง 2.0)

อัตราการเสียดกร่อนทางความร้อน ทดสอบด้วยวิธี Ablation test มีการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างขนาด 10x10 ซม. หนา 6 มม. ใส่ในกรอบยึดชิ้นงานตัวอย่าง ทำการเผาด้วยเปลวไฟก๊าซอะเซทิลีนผสมกับก๊าซออกซิเจนตามสัดส่วนที่กำหนดไว้แล้วจับเวลาที่ชิ้นงานตัวอย่างสามารถทนไฟได้ก่อนที่ชิ้นงานจะถูกเผาไหม้จนเปลวไฟทะลุไปยังอีกด้านของชิ้นงานตัวอย่าง การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E285 ลักษณะการทดสอบเป็นดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะการทดสอบ Ablation Test

3 วิธีดำเนินการ

3.1 การกำหนดสูตรฉนวนกันความร้อน

สูตรฉนวนกันความร้อนที่ทำการศึกษาเป็นสูตรที่นำมาใช้งานจริงกับมอเตอร์จรวดที่ผลิตโดยสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ มีส่วนประกอบของยางพื้นฐานได้แก่ยาง NR 13 phr ยาง EPDM ที่มีชื่อทางการค้าว่า NORDEL IP 4640

20 phr และยาง NR ที่อยู่ใน Kevlar EE# 1F722 สัดส่วน 77% คิดเป็น 67 phr รวมยางทั้งสองชนิดซึ่งทำหน้าที่เป็น Polymer Base เท่ากับ 100 phr เส้นใยที่ใช้เป็นเส้นใยอะรามิตผสมอยู่ใน Kevlar EE# 1F722 สัดส่วน 23% คิดเป็น 20 phr สารหน่วงไฟคือ Dechlorane Plus 515 และ Antimony Trioxide (SB203) และสารเติมแต่งอื่นๆ ได้แก่ สารตัวเติม สารทำให้ยางนิ่ม สารช่วยให้ยางคงรูป สารเชื่อมต่อการวัลคาไนซ์ยางใช้ระบบเปอร์ออกไซด์ในการทำใหยางสุก มีสารหน่วงไฟ (Dechlorane Plus 515, Antimony Trioxide) ส่วนผสมของฉนวนยางแสดงในตารางที่ 1 [10]

ตารางที่ 1 ส่วนผสมฉนวนกันความร้อนที่ใช้ในมอเตอร์จรวด

ส่วนผสม	ปริมาณ, phr
NR	13
NORDEL IP 4640	20
Kevlar EE# 1F722	87*
Dechlorane Plus 515	40
Antimony Trioxide (SB203)	20
สารเติมแต่งอื่นๆ	21
Total	201

หมายเหตุ * มีเส้นใยอะรามิต 23% ยาง NR 77%

3.2 สมบัติการไหลของฉนวนยางในการวัลคาไนซ์ยางคอมพาวด์บีที่อายุการเก็บรักษาต่างๆ กัน

ยางคอมพาวด์บีที่ได้จากข้อ 3.1 จะถูกนำไปวัดสมบัติการไหลของยางด้วยเครื่องทดสอบคุณสมบัติการคงรูปของยาง (Moving Die Rheometer, MDR) ในการวัดสมบัติของยางจะได้ผลของแรงบิดที่เวลาใดๆ

ตัวอย่างยางคอมพาวด์บีที่ใช้ศึกษานี้อ้างอิงจากกระบวนการผลิตฉนวนกันความร้อนในโรงปฏิบัติการ ซึ่งยางคอมพาวด์บีถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C และจากการที่ผู้ผลิตได้แจ้งว่าไม่ควรเก็บยางคอมพาวด์บีเกิน 2 สัปดาห์ แต่พบว่าหลังจากนั้นสภาพของยางคอมพาวด์บีที่ตรวจสอบด้วยสายตาไม่เปลี่ยนแปลง จึงได้ออกแบบการทดลองโดยกำหนดอายุในการเก็บรักษาให้อยู่ในช่วงประมาณ 6 เดือน ระยะเวลาดังกล่าวจะเพียงพอสำหรับการนำยางคอมพาวด์บีไปใช้งานหมดในแต่ละรอบของการสั่งซื้อมาใช้งาน ในการทดลอง ยางคอมพาวด์บีมีอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 45, 70, 123, 203 วัน ตามลำดับ ผลของคุณสมบัติการไหลของฉนวนยางในการวัลคาไนซ์ยางที่อายุการเก็บรักษาต่างๆ แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติการไหลของฉนวนยางในการวัลคาไนซ์ยาง
คอมพาวด์บีที่ช่วงอายุการเก็บรักษาต่างๆ

สมบัติ	0 วัน	45 วัน	70 วัน	123 วัน	203 วัน
ML (min. Torque)	27.3	24.7	27.6	27.9	26.7
MH (max. Torque)	61.4	58.8	61.8	59.7	51.0
T _{s2} , sec.	37	38	44	44	41
T _{c90} , sec.	429	480	483	475	297

3.3 สมบัติทางกายภาพของฉนวนยางกันความร้อนจาก ยางคอมพาวด์บีที่เวลาการเก็บรักษาต่างๆ

เมื่อทำการผสมยางจากข้อ 3.1 จนได้เป็นยางคอมพาวด์บีแล้ว ตัวอย่างที่ได้ส่วนหนึ่งถูกทำให้เป็นแผ่นฉนวนยางกันความร้อน โดยนำไปอัดในแม่พิมพ์ที่ความดัน 0.15 MPa อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 15 นาที จึงได้แผ่นชิ้นงานฉนวนยางกันความร้อน นำแผ่นชิ้นงานที่ได้ไปตัดเป็นตัวอย่างสำหรับหาค่าสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ค่า Tensile Strength, Elongation ทั้งแนวนานกับเส้นใยและแนวตั้งฉากกับเส้นใย ชิ้นงานอีกส่วนนำไปทดสอบหาค่า Erosion rate

อ้างอิงจากคุณสมบัติของฉนวนกันความร้อนสำหรับมอเตอร์จรวดโครงการจรวดขนาด 300 มม. ระยะยิง 180 กม. ได้กำหนดคุณสมบัติไว้ดังนี้ ค่า Tensile strength (แนวตั้งฉาก) ≥ 2 MPa, ค่า Elongation (แนวตั้งฉาก) $\geq 150\%$, และค่า Erosion rate ≤ 0.20 mm/s

ผลของสมบัติทางกายภาพของฉนวนยางจากยางคอมพาวด์บีที่อายุการเก็บรักษาต่างๆ แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของฉนวนยางจากยางคอมพาวด์บีที่อายุการเก็บรักษาต่างๆ

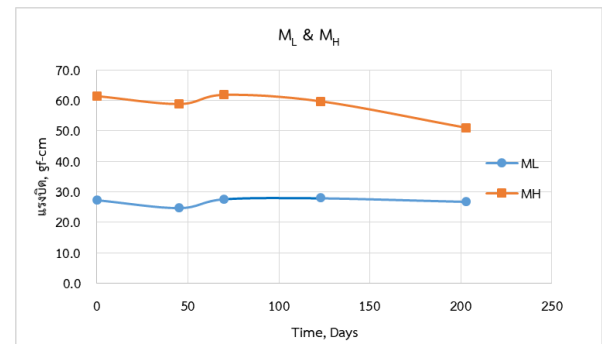
สมบัติ	0 วัน	45 วัน	70 วัน	123 วัน	203 วัน
Tensile Strength, แนวนาน, MPa (ASTM D412)*	16.9	16.5	17.5	17.6	17.4
Elongation, แนวนาน, % (ASTM D412)*	8	11	12	12	12
Tensile Strength, แนวตั้งฉาก, MPa (ASTM D412)*	5.1	4.7	6.1	6.4	4.6
Elongation, แนวตั้งฉาก, % (ASTM D412)*	78	81	93	136	98
Erosion rate, mm/sec	0.19	0.35	0.26	0.14	0.16

หมายเหตุ * อัตราการดึง 500 มม./วินาที

4 ผลการดำเนินการและวิเคราะห์ผล

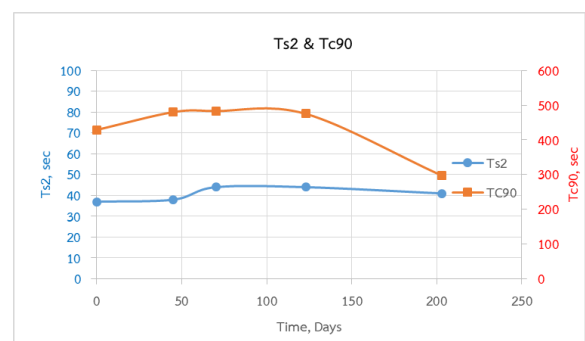
4.1 สมบัติการไหลของฉนวนยางในการวัลคาไนซ์ยางคอมพาวด์บีที่อายุการเก็บรักษาต่างๆ กัน

จากผลของสมบัติการไหลของยางคอมพาวด์บีตามตารางที่ 2 นำมาแสดงในรูปกราฟได้ดังรูปที่ 4 และ 5



รูปที่ 4 ค่า M_L และ M_H ของยางคอมพาวด์บีที่อายุการเก็บรักษาต่างๆ กัน

จากกราฟรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาค่า M_L ของฉนวนยางพบว่า ยางคอมพาวด์บีที่ช่วงเวลากการเก็บรักษา 0-203 วัน ให้ค่าเฉลี่ย 26.8 Kgf-cm มีค่า SD 1.3 Kgf-cm ค่าดังกล่าวไม่มีความแตกต่าง แสดงว่าช่วงอายุดังกล่าวยางคอมพาวด์บียังไม่ค่อยมีการทำปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลมากนัก เมื่อพิจารณาค่า M_H ของฉนวนยางกันความร้อนพบว่า ยางคอมพาวด์บีที่เวลาการเก็บรักษาในช่วงเวลา 0-203 วัน ให้ค่าเฉลี่ย 58.6 Kgf-cm มีค่า SD 4.4 Kgf-cm ค่าดังกล่าวไม่มีความแตกต่าง แต่ที่เวลา 203 วัน ค่า M_H ลดลงเล็กน้อย แสดงถึงว่ายางถูกทำให้สุกโดยใช้แรงบิดลดลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่าที่ลดลงดังกล่าวไม่ได้ส่งผลต่อลักษณะการวัลคาไนซ์เซชันของยางอย่างมีนัยยะสำคัญ



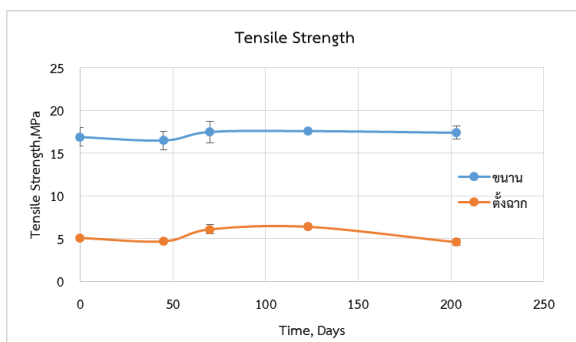
รูปที่ 5 ค่า T_{s2} และ T_{c90} ของยางคอมพาวด์บีที่อายุการเก็บรักษาต่างๆ กัน

จากกราฟรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาค่า T_s หรือค่า scorch time ของฉนวนยางพบว่า ยางคอมพาวด์บีในช่วงเวลาการเก็บรักษา 0-203 วัน ให้ค่าเฉลี่ย 41 วินาที มีค่า SD 3 วินาที ค่าดังกล่าวไม่แตกต่างกัน แสดงว่าคุณสมบัติของยางคอมพาวด์บีไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่า ML ประกอบด้วย ค่าทั้งสองก็มีแนวโน้มที่ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงเมื่อช่วงอายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น พิจารณาค่า T_c90 ซึ่งแสดงถึงเวลาที่ยางถูกทำให้สุกแล้วนั้น พบว่าในช่วงเวลาการเก็บรักษา 0-203 วัน มีค่าเฉลี่ย 433 วัน และมีค่า SD 79 วินาที เห็นได้ชัดว่าในช่วงอายุการเก็บรักษาเป็น 203 วัน ค่า T_c90 ลดลงอย่างชัดเจน โดยเวลาที่ยางถูกทำให้สุกนั้นลดลงเหลือเพียง 297 วินาที สิ่งนี้บ่งบอกว่ายางคอมพาวด์บีมีคุณสมบัติที่สามารถวัดค่าในเชิงให้สุกโดยใช้เวลาที่สั้นลง เป็นการเปลี่ยนแปลงในทางที่เป็นประโยชน์กับกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาคุณสมบัติของฉนวนยางที่ได้ด้วยว่าลดลงหรือไม่

4.2 สมบัติทางกายภาพของฉนวนยางกันความร้อนจาก

ยางคอมพาวด์บีที่อายุการเก็บรักษาต่างๆ กัน

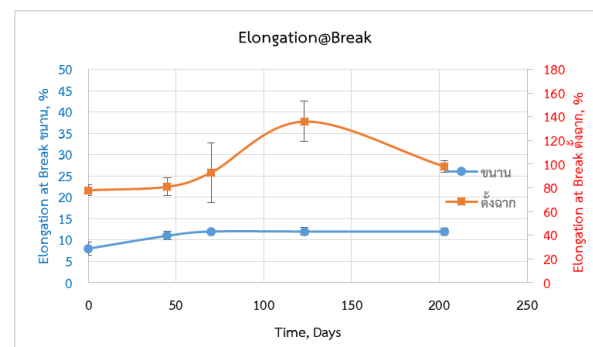
จากกราฟรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาค่า Tensile Strength ของฉนวนยางกันความร้อนทั้งแนวขนานกับเส้นใยและแนวตั้งฉากกับเส้นใยพบว่า ฉนวนยางกันความร้อนที่เวลาการเก็บรักษายางคอมพาวด์บีในช่วงเวลา 0-203 วัน ให้ค่าที่ค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าในแนวขนานเฉลี่ย 17.2 MPa มีค่า SD 0.5 MPa และค่าในแนวตั้งฉากเฉลี่ย 5.4 MPa มีค่า SD 0.8 MPa แสดงว่าฉนวนยางกันความร้อนที่ได้มีค่า Tensile Strength ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงอายุการเก็บรักษาที่ทดลอง



รูปที่ 6 ค่า Tensile Strength ของฉนวนยางกันความร้อนจากยางคอมพาวด์บีที่อายุการเก็บรักษาต่างๆ กัน

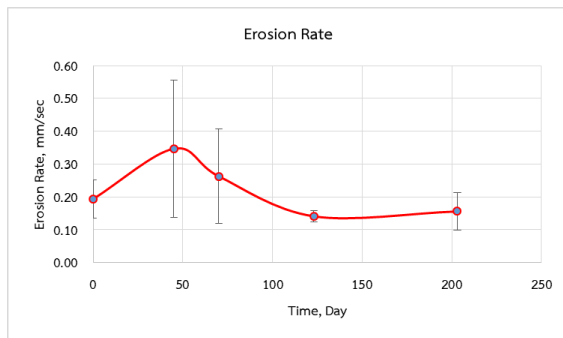
จากกราฟรูปที่ 7 เมื่อพิจารณาค่า Elongation ของฉนวนยางกันความร้อนทั้งแนวขนานกับเส้นใยและแนวตั้งฉากกับเส้นใยพบว่า ฉนวนยางกันความร้อนที่ช่วงเวลาการเก็บ

รักษายางคอมพาวด์บี 0-203 วัน โดยแนวขนานให้ค่าเฉลี่ย 11% ค่า SD 2% และค่าในแนวตั้งฉาก 97% ค่า SD 23% ค่า Elongation ในแนวขนานมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เช่นเดียวกับค่า Elongation ในแนวตั้งฉาก ยกเว้นที่อายุการเก็บ 123 วัน ที่มีค่าสูงเกินค่าเฉลี่ยบวกกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน แต่จากลักษณะกราฟแสดงว่าฉนวนยางกันความร้อนยังคงให้ค่า Elongation ที่ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงอายุการเก็บรักษาดังกล่าว



รูปที่ 7 ค่า Elongation ของฉนวนยางกันความร้อนจากยางคอมพาวด์บีที่อายุการเก็บรักษาต่างๆ กัน

จากกราฟรูปที่ 8 เมื่อพิจารณาค่า Erosion Rate ของฉนวนยางกันความร้อนเทียบกับช่วงเวลาการเก็บรักษายางคอมพาวด์บี 0-203 วัน พบว่าค่าเฉลี่ยเป็น 0.22 mm/sec ค่า SD 0.09 mm/sec และยังพบว่าค่า Erosion rate ของอายุการเก็บที่ช่วงเวลา 45 วัน และ 70 วัน มีความเบี่ยงเบนสูงถึง 0.21 mm/s และ 0.14 mm/s ตามลำดับ และค่าที่ช่วงเวลา 45 วันยังมีค่าที่เกินค่าเฉลี่ยบวกกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ทำให้ค่าที่เวลาทั้งสองมีความน่าเชื่อถือน้อย แต่ในช่วงอายุการเก็บรักษาที่ 123 วัน และ 203 วัน ค่า Erosion Rate มีค่าเบี่ยงเบนเพียง 0.02 mm/sec และ 0.06 mm/sec และค่า Erosion rate ก็มีค่าที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น ค่าที่ต่ำลงแสดงว่าฉนวนยางสามารถทนต่อการเสียดกร่อนทางความร้อนได้มากขึ้น ดังนั้นผลจากกราฟจึงแสดงว่าฉนวนยางกันความร้อนมีแนวโน้มป้องกันความร้อนได้ดีใกล้เคียงกับตอนเริ่มต้น



รูปที่ 8 ค่า Erosion Rate ของฉนวนยางกันความร้อน
จากยางคอมพาวด์บีที่อายุการเก็บรักษาต่างๆ กัน

5 สรุป

- 5.1 ยางคอมพาวด์บีที่เก็บไว้ในช่วงเวลา 0-203 วัน มีสมบัติการไหลใกล้เคียงกับตอนเริ่มต้น ไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้งาน
- 5.2 ยางคอมพาวด์บีที่เก็บไว้ในช่วงเวลา 0-203 วัน ให้ค่า Tensile Strength ที่ใกล้เคียงกับตอนเริ่มต้น
- 5.3 ยางคอมพาวด์บีที่เก็บไว้ในช่วงเวลา 0-203 วัน ให้ค่า Elongation ใกล้เคียงกับตอนเริ่มต้น
- 5.4 ยางคอมพาวด์บีที่เก็บไว้ในช่วงเวลา 0-203 วัน ให้ค่า Erosion Rate ใกล้เคียงกับตอนเริ่มต้น

6 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
กระทรวงกลาโหม ที่ให้การสนับสนุนบทความวิจัยนี้

7 เอกสารอ้างอิง

- [1] NASA space vehicle design criteria (Chemical propulsion) (1976). *Solid rocket motor Internal Insulation*, National aeronautics and space administration, United State.
- [2] สุวิชา จันทน์กะพ้อ, ไพศาล อภินพพัฒน์ และ เจษฎา ศิริรัฐนิคม (2554), การผลิตต้นแบบฉนวนกันความร้อนสำหรับมอเตอร์จรวดจากฟีนอลิก, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, จังหวัดกระบี่
- [3] Guillot et al., EPDM Rocket Motor Insulation. United State Patent, Patent No. US 7,371,784 B2, May 13, 2008
- [4] พงษ์ธร แซ่ฮุย (2547). ยางชนิด สมบัติ และการใช้งาน, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, พิมพ์ครั้งที่ 1

- [5] บัญชา ชุมทสวัสดิกุล (2557). โลกของยาง, กรุงเทพฯ, อินสปายร์, พิมพ์ครั้งที่ 1
- [6] พงษ์ธร แซ่ฮุย (2550). สารเคมียาง, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, พิมพ์ครั้งที่ 2
- [7] พงษ์ธร แซ่ฮุย และชาคริต สิริสิงห์ (2550). ยาง: กระบวนการผลิตและการทดสอบ, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, พิมพ์ครั้งที่ 1
- [8] วราภรณ์ ขจรไชยกูล (2554), ผลิตภัณฑ์ยาง: กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, พิมพ์ครั้งที่ 2
- [9] สถาบันพลาสติก, เทคโนโลยีการผลิตยางคอมพาวด์, โครงการพัฒนาอุตสาหกรรมยางคอมพาวด์ เพื่อยกระดับมูลค่าผลิตภัณฑ์ เพื่อสนับสนุนอุตสาหกรรม ยานยนต์ และ เครื่องมือแพทย์ ข้อมูลจาก <http://rubber.oie.go.th/box/Article/25239/เทคโนโลยีการผลิตยางคอมพาวด์.pdf> (วันที่สืบค้นข้อมูล 8 มกราคม 2564)
- [10] ไพศาล อภินพพัฒน์, สุชัชชัย นวลคล้าย (2564).ผลของการเติมเส้นใยและสารหน่วงไฟที่มีต่อสมบัติของฉนวนกันความร้อนชนิดยางคอมพาวด์ในมอเตอร์จรวด, การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, จังหวัดสงขลา