

การศึกษาผลของอายุการเก็บรักษาไลน์เนอร์ก่อนการหล่อดินขับ ที่มีต่อการยึดเกาะกันระหว่างวัสดุทั้งสอง

ไพศาล อภิณพพัฒน์^{1*} และ สุรัชชัย นวลคล้าย²

วันที่รับ 21 สิงหาคม 2568 วันที่แก้ไข 13 มีนาคม 2569 วันที่ตอบรับ 17 มีนาคม 2569

บทคัดย่อ

มอเตอร์จรวดเชื้อเพลิงแข็งเป็นที่นิยมในการใช้งานเป็นยุทธโธปกรณ์ทางการทหารและความมั่นคงของประเทศ วัสดุในมอเตอร์จรวดประกอบด้วยท่อมอเตอร์ ฉนวนกันความร้อน ไลน์เนอร์และแท่งดินขับ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการยึดเกาะกันระหว่างวัสดุแต่ละชนิดขึ้นกับกระบวนการผลิต อายุการเก็บรักษา การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม หากการยึดเกาะกันโดยเฉพาะไลน์เนอร์กับดินขับไม่ดี อาจส่งผลให้การทำงานของมอเตอร์จรวดไม่เป็นไปตามที่ออกแบบจนเสียหายได้ ในกระบวนการผลิตมอเตอร์จรวดบางครั้งพบว่าเมื่อบ่มไลน์เนอร์แล้วอาจต้องใช้เวลาหลายสัปดาห์จึงสามารถหล่อดินขับได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอายุการเก็บรักษาไลน์เนอร์ก่อนการหล่อดินขับในมอเตอร์จรวดเชื้อเพลิงแข็งที่มีต่อความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างวัสดุทั้งสอง มีการพิจารณาสัดส่วนหมู่ฟังก์ชัน (Rt) ที่ต่างกันจากสมบัติของโพลียูรีเทน และศึกษาสมบัติด้านความหนาแน่น ความต้านทานต่อแรงดึง และ % ระยะยึดตัวก่อนขาดของชิ้นงานไลน์เนอร์ที่ Rt ระหว่าง 1.10-1.50 จากนั้นจึงทำการทดสอบการยึดเกาะระหว่างไลน์เนอร์และดินขับ ตัวอย่างไลน์เนอร์มีอายุการเก็บรักษาที่เวลา 3, 7, 10 และ 15 วัน ก่อนหล่อดินขับ และเร่งอายุชุดทดสอบเทียบเท่า 3 ปี ผลการทดลองพบว่าไลน์เนอร์ที่มี Rt ไม่ต่ำกว่า 1.20 ให้สมบัติทางกลที่เหมาะสม และผลการทดสอบค่าการยึดเกาะระหว่างไลน์เนอร์และดินขับอยู่ในช่วง 0.76-1.06 MPa ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ที่ 0.50 MPa แสดงให้เห็นว่าการเก็บรักษาไลน์เนอร์ภายใน 15 วันก่อนหล่อดินขับไม่ส่งผลเสียต่อความสามารถในการยึดเกาะ งานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและควบคุมคุณภาพกระบวนการผลิตมอเตอร์จรวดเชื้อเพลิงแข็งให้มีความเชื่อถือได้และปลอดภัยสูงขึ้นได้ต่อไป

คำสำคัญ: มอเตอร์จรวดเชื้อเพลิงแข็ง, การยึดเกาะ, ไลน์เนอร์, สัดส่วนหมู่ฟังก์ชัน, โพลียูรีเทน

¹ ฝ่ายวิจัยและพัฒนา, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

² ฝ่ายปฏิบัติการวิจัยและพัฒนา, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: paisan.a@dti.or.th

A Study of the Effect of Liner Aging on Adhesion with Propellant Materials

Paisan Apinhat^{1*} and Suchuchchai Nuanklai²

Received 21 August 2025 Revised 13 March 2026 Accepted 17 March 2026

Abstract

Solid rocket motors are widely used in military and defense applications due to their simplicity and high reliability. These motors typically consist of a motor case, thermal insulation, liner, and solid propellant grain. The strength of adhesion for each material in the solid rocket motor depends on processing, storage duration, and environmental changes. The quality of adhesion, especially between the liner and the propellant, play a role in ensuring proper motor performance. Poor bonding may lead to structural failure from design and performance. In a production line after curing liner already, there are a long period of times for waiting of propellant casting. The objective of this paper is to investigate the effect of liner aging on adhesion with propellant casting on the interfacial adhesion between the liner and the propellant in composite solid rocket motors.

The research considers various functional group ratios (Rt) in polyurethane formulations, Physical properties including density, Tensile Strength, and Elongation Rate are analyzed. Liner samples with Rt values ranging from 1.10 to 1.50 are produced and tested. Adhesion is evaluated using bonded rectangular specimens. The liner samples are stored for 3, 7, 10, and 15 days before propellant casting. The liner-propellant rectangular in each specimen is accelerated aging equivalent to 3 years of storage life. Experimental results show that liners with Rt at least 1.20 exhibited optimal mechanical properties. The bond strength of liner-propellant ranged from 0.76 to 1.06 MPa, which significantly exceed the design requirement of 0.50 MPa. This result indicates that storing the liner for up to 15 days prior to casting does not degrade adhesion quality. This research supports more flexible production timelines and enhances quality assurance in manufacturing of solid rocket motors.

Keywords: electrical analysis, Vetronics, weapon control system, multiple rocket and missile launcher

¹ Research and Development Department, Defence Technology Institute

² Research and Development Workshop Department, Defence Technology Institute

* Corresponding author: paisan.a@dti.or.th

1. บทนำ

มอเตอร์จรวดเชื้อเพลิงแข็งชนิดดินขับคอมโพสิตเป็นที่นิยมในการผลิตเพื่อใช้งานเป็นยุทธโธปกรณ์ทางด้านการทหารและความมั่นคงของประเทศ โดยทั่วไปหลังจากผลิตเป็นมอเตอร์จรวดแล้ว มักนำไปเก็บรักษาไว้เป็นเวลานาน และอาจมีการขนส่งเพื่อนำไปประกอบรวมหรือเก็บรักษาไว้อีกสถานที่หนึ่ง ดังนั้น เพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน จำเป็นต้องพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์จรวดอันเนื่องมาจากปัจจัยด้านเวลา การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมอย่างรอบคอบ

ส่วนประกอบภายในหลัก ๆ ของมอเตอร์จรวดประกอบด้วยท่อมอเตอร์ ฉนวน เส้นเนอร์ (Liner) ดินขับ และส่วนประกอบย่อยอื่น ๆ โดยทั่วไปมอเตอร์ผลิตจากวัสดุโลหะหรือคอมโพสิตซึ่งทำหน้าที่คงรูปร่างของดินขับและรับความดันจากการเผาไหม้ดินขับชั้นถัดไปเป็นฉนวนทำจากวัสดุยาง มีหน้าที่ป้องกันความร้อนจากการเผาไหม้ดินขับไม่ให้ไปถึงท่อมอเตอร์จรวด มักติดตั้งบริเวณด้านหัวและท้ายของท่อมอเตอร์จรวดเพราะเป็นตำแหน่งที่รับภาระกรรมด้านความร้อนค่อนข้างสูง ชั้นถัดเข้ามาจากฉนวนเป็นเส้นเนอร์ ซึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็น โพลียูรีเทน (Polyurethane) ทำหน้าที่ป้องกันความร้อนและช่วยในการยึดเกาะกับท่อมอเตอร์และ/หรือฉนวนในด้านหนึ่ง และช่วยยึดเกาะกับดินขับในอีกด้านหนึ่ง ถัดจากชั้นเส้นเนอร์เป็นแท่งดินขับซึ่งมีส่วนประกอบที่เป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตจากผงโลหะ สารออกซิไดซ์ที่นิยมใช้เป็นแอมโมเนียมเปอร์คลอเรต (Ammonium Perchlorate) และตัวประสานมักเป็นพอลิเมอร์ (Polymer) ชนิดโพรพิลีน ในการศึกษาการยึดเกาะกันของวัสดุแต่ละชนิดภายในมอเตอร์จรวด มีการพิจารณาการยึดเกาะกัน 3 แบบ ได้แก่ การยึดเกาะกันของดินขับและเส้นเนอร์ เส้นเนอร์และฉนวน ฉนวนและท่อโลหะ

โพลียูรีเทนที่ใช้ในดินขับและเส้นเนอร์เป็นพอลิเมอร์มาจากสารตั้งต้นระหว่าง HTPB และ TDI ขั้นตอนการผสมและการขึ้นรูปเป็นแท่งดินขับส่งผลต่อสมบัติของดินขับ และขั้นตอนดังกล่าวส่งผลต่อสมบัติของเส้นเนอร์เช่นกัน นอกจากนี้ เวลาและ

สภาพแวดล้อมในการเก็บรักษายังส่งผลต่อสมบัติของวัสดุทั้งสองด้วย ด้วยการใช้ตัวประสานชนิดเดียวกัน ทำให้เส้นเนอร์และดินขับ ยึดเกาะกันได้ดี ช่วยให้โครงสร้างของวัสดุในมอเตอร์จรวดส่วนนี้มีความแข็งแรง ช่วยให้ดินขับสามารถเผาไหม้ตามรูปร่างที่ได้ออกแบบไว้ และยังเป็นอีกประเด็นสำคัญในการพิจารณาประเมินอายุการใช้งานของมอเตอร์จรวดอีกด้วย ในทางตรงกันข้าม การไม่ยึดเกาะกันระหว่างวัสดุอาจเกิดขึ้นได้ มีหลายสาเหตุอันได้แก่สภาพแวดล้อมในการเก็บรักษาเช่น อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป และสภาพการใช้งานของมอเตอร์จรวดได้แก่ แรงกระทำจากความดันที่เปลี่ยนไปเมื่อดินขับเกิดการเผาไหม้ แรงกระทำจากความเร่งในการเคลื่อนที่เมื่อจรวดถูกยิงออกไป และแรงกระทำจากการกระแทกระหว่างการขนส่ง ดังนั้น เส้นเนอร์และดินขับต้องมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและแรงกระทำต่าง ๆ วัสดุต้องสามารถรับค่าความเค้นและความเครียดที่สูงกว่าแรงกระทำที่เกิดขึ้น วัสดุนั้นจึงไม่เกิดความเสียหายหรือฉีกขาด

ในกระบวนการผลิตมอเตอร์จรวด หลังจากติดฉนวนเข้ากับท่อมอเตอร์แล้ว ทำการเทเคลือบเส้นเนอร์ และเมื่อบ่มเส้นเนอร์ได้ที่แล้วจึงทำการหล่อดินขับลงในท่อมอเตอร์จรวด อย่างไรก็ตาม กระบวนการอาจมีการติดขัดหรือไม่ต่อเนื่อง เมื่อบ่มเส้นเนอร์เรียบร้อยแล้วอาจต้องใช้เวลาหลายสัปดาห์จึงสามารถหล่อดินขับได้ ด้วยช่วงระยะเวลาที่ต้องรอการหล่อดินขับอาจส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานระหว่างเส้นเนอร์กับดินขับ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลของอายุเส้นเนอร์ก่อนการหล่อดินขับที่มีต่อการยึดเกาะกันระหว่างวัสดุทั้งสอง โดยพิจารณาการยึดเกาะกันของวัสดุทั้งสองผ่านการเพิ่มอายุมอเตอร์จรวดเป็น 3 ปีรวมด้วย

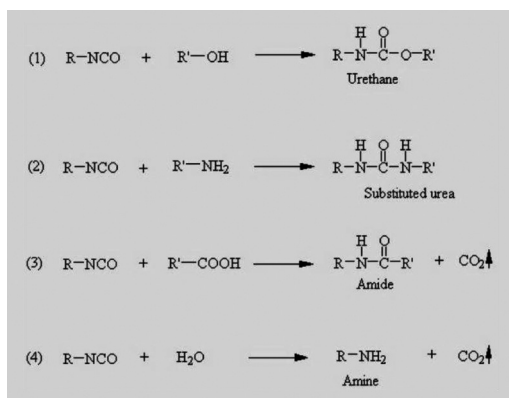
2. ทบทวนวรรณกรรม

2.1 เส้นเนอร์

เส้นเนอร์ในมอเตอร์จรวดเชื้อเพลิงแข็งมีหน้าที่ยึดเกาะกับผิวท่อมอเตอร์และฉนวนอย่างเหนียวแน่นตามสมบัติของตัวมัน และในอีกด้านหนึ่งก็ยึดเกาะกับ

ดินขับ ทำให้ดินขับและท่อมอเตอร์เป็นเสมือนวัสดุขึ้นเดียวกัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเกิดการหดและขยายตัวของดินขับและวัสดุอื่น ๆ วัสดุแต่ละชนิดมีการหดหรือขยายตัวในอัตราที่ไม่เท่ากัน โล้นเนอร์มีการหดและขยายตัวได้มากกว่าดินขับ [1] ด้วยสมบัตินี้โล้นเนอร์เข้าไปช่วยพยุงการหดหรือขยายตัวของดินขับเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการแตกร้าวรวมถึงยังลดแรงอันเกิดจากการกระแทกการสั่นจากภายนอก ซึ่งนำไปสู่การแตกร้าวและการหลุดออกของดินขับในท่อมอเตอร์ได้อีกด้วย

โล้นเนอร์ประกอบสารเคมีที่ทำหน้าที่เป็น Binder, Curing Agent, Plasticizer, Accelerator, Filler สารเคมีหลักมี 2 ชนิดได้แก่กลุ่มของ Isocyanates ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชัน $-NCO$ และอีกกลุ่มคือ Polyols ซึ่งเป็นสารประกอบของ Polyhydroxy ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชัน $-OH$ ผสมกันตามอัตราส่วนที่เหมาะสม เกิดการเชื่อมขวาง (Crosslink) เปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นของแข็ง เกิดเป็นโพลิเมอร์ชนิดโพลียูรีเทน ที่ทนความร้อนได้สูงและมีสมบัติยึดเกาะกับวัสดุต่าง ๆ ได้อย่างเหนียวแน่น รูปที่ 1 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาเป็นโพลิเมอร์ชนิดโพลียูรีเทนและสารข้างเคียง การทำปฏิกิริยาเป็นโพลิเมอร์ชนิดโพลียูรีเทนอาจเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงได้หากมีสิ่งเจือปน เช่นเมื่อมีน้ำผสมเกิดเป็นเอมีน (Amine) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นควรทำการไล่ความชื้นก่อนนำมาใช้งาน



รูปที่ 1 กลไกปฏิกิริยาเกิดเป็นโพลิเมอร์ชนิดโพลียูรีเทนและสารข้างเคียง [2]

อีกประการหนึ่ง ส่วนผสมระหว่างโล้นเนอร์กับดินขับมีส่วนประกอบที่คล้ายคลึงกัน เพียงแต่โล้นเนอร์ไม่มีการใส่สารเคมีที่เป็นเชื้อเพลิงและสารออกซิไดซ์ ทำให้สมบัติทางกายภาพของเนื้อโล้นเนอร์ใกล้เคียงกับเนื้อของดินขับ ช่วยทำให้การยึดเกาะกันกับดินขับดียิ่งขึ้น ปริมาณของส่วนผสมต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของสมบัติที่ต้องการ สมบัติหลักของโล้นเนอร์ได้แก่ ความหนาแน่น ความต้านทานต่อแรงดึง และ % ระยะยึดตัวก่อนขาด

2.2 การยึดเกาะกันของโล้นเนอร์และดินขับในมอเตอร์จรวด

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติได้แก่กระบวนการในการผลิตฉนวน โล้นเนอร์ ดินขับและการหล่อดินขับ [3]-[5] ฉนวนทำมาจากยางและวัสดุต่างๆ ที่ต้านทานการติดไฟ ปริมาณน้ำและสมบัติการดูดซึมของสารทำให้แข็งตัวส่งผลต่อสมบัติการยึดเกาะกัน Byrd และ Walters [6] ได้เสนอว่าวัสดุ 2 ชนิดที่เชื่อมติดกันด้วยโล้นเนอร์ พบว่าการยึดเกาะพื้นผิวระหว่างโล้นเนอร์และดินขับ มีความแข็งแรงน้อยกว่าการยึดเกาะพื้นผิวระหว่างโล้นเนอร์-ฉนวน แสดงว่าพื้นผิวโล้นเนอร์และดินขับมีแนวโน้มที่แยกตัวได้ง่ายกว่า ดังนั้นกาวหรือตัวยึดที่เข้ากันได้กับดินขับจึงถูกเลือกเป็นส่วนประกอบของโล้นเนอร์

ในระหว่างการบ่มให้แข็งตัวของโล้นเนอร์ ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันหลักเกิดขึ้นที่หมู่ฟังก์ชัน $-NCO$ และหมู่ฟังก์ชัน $-OH$ ต้องมีปริมาณหมู่ฟังก์ชัน $-NCO$ เพียงพอที่ทำปฏิกิริยาในดินขับหรือในฉนวน เพื่อให้ได้ความแข็งแรงของพันธะที่เพียงพอ ดังนั้นสารที่ทำให้แข็งตัวที่มากเพียงพอจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมี และความสามารถในการยึดเกาะกันที่พื้นผิววัสดุ [7] ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาในระหว่างบ่มโล้นเนอร์สมบัติทางเคมีของดินขับ และแรงยึดกันระหว่างโมเลกุลกับอนุภาคนิวเคลียสออกซิไดซ์ล้วนมีผลกระทบโดยตรงต่อการยึดเกาะของโล้นเนอร์ หมู่ฟังก์ชัน $-NCO$ ที่เพียงพอช่วยให้เกิดปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชัน $-OH$ รวมถึงความชื้นที่ช่วยปรับสมดุลของหมู่ฟังก์ชัน $-NCO$ ในดินขับด้วยการออกแบบเชิงสมดุลมวลสาร โดยป้องกันการอ่อนตัวของพื้นผิวสัมผัสของดินขับ การเติมสารออกซิไดซ์ลงในสาร

ยึดเกาะของไลน์เนอร์ หรือการเติมสารที่มีหมู่พันธะที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ เป็นการช่วยเพิ่มความแข็งแรงของพันธะในไลน์เนอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [8] อย่างไรก็ตาม ก็อาจส่งผลให้ระหว่างบ่มดินขับทำให้ดินขับอ่อนตัวลงได้ ความสามารถในการยึดเกาะยังได้รับผลกระทบอย่างมีนัยจากกระบวนการโหลดของมอเตอร์เร็ว และกระบวนการป้องกันความชื้นของมอเตอร์ เพราะสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของท่อมอเตอร์มีค่าต่ำกว่าของโพลีเมอร์ ดังนั้นค่าความแข็งแรงต่อความต้านทานแรงดึงของไลน์เนอร์ควรสูงกว่าของแท่งดินขับ และค่าความยึดตัวของไลน์เนอร์ควรสูงกว่าด้วย Wingborg [9] และ Haska et al. [10] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาพอลิยูรีเทน (PU) อีลาสโตเมอร์ โดยใช้ HTPB-IPDI มีการพิจารณาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลระหว่าง [NCO] และ [OH] ในช่วง 0.9 ถึง 1.3 ที่มีต่อสมบัติทางกลของ HTPB-IPDI และ PU ในการวิจัยนี้ ได้มีการทดสอบผลกระทบของการใช้ TDI ซึ่งเป็นสารทำให้แข็งตัวของไลน์เนอร์ ที่ต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะ โดยได้ทำการทดสอบค่าความแข็งแรงของพันธะที่สัดส่วนของ TDI ค่าต่างๆ เริ่มต้นที่อัตราส่วนสมมูล [NCO]/[OH] เป็น 1.035 โดยพบว่า ค่าความแข็งแรงของการยึดเกาะขึ้นกับสมบัติทางกลของแท่งดินขับและไลน์เนอร์ อย่างไรก็ตาม ค่า S_m และ E_m ของไลน์เนอร์ควรสูงกว่าของแท่งดินขับ ดังนั้น ความแข็งแรงของการยึดเกาะควรขึ้นอยู่กับค่า S_m ของแท่งดินขับ ค่าที่สูงกว่า 8 kg/cm^2 สามารถช่วยป้องกันปัญหาได้

Chih [11] ได้ศึกษาความแข็งแรงของแรงยึดเกาะระหว่างผิวของดินขับและไลน์เนอร์ โดยแรงยึดเกาะที่ผ่านเกณฑ์ต้องมากกว่า 8 kg/cm^2 ได้ศึกษาสัดส่วน TDI ในไลน์เนอร์ซึ่งใช้เป็นสารทำให้แข็งตัวในปริมาณ 0, 2, 5, 10 และ 15% ซึ่งทำให้ค่า NCO/OH มีค่าเป็น 1.035, 1.057, 1.087, 1.144 และ 1.187 ตามลำดับ แรงยึดเกาะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ HTPB ที่ให้ความร้อนกับทำสุญญากาศ และเติม TDI เป็น 10%

2.3 การเพิ่มอายุดินขับ

ดินขับที่เก็บรักษานานเสื่อมสภาพไปเรื่อย ๆ จนไม่สามารถนำไปใช้งานได้ สมบัติทางกล การออกแบบ

รูปร่างดินขับ สภาพแวดล้อมและการใช้งานเป็นปัจจัยที่มีผลต่ออายุของดินขับที่ยังสามารถใช้งานได้ ดินขับที่เสื่อมสภาพมีสาเหตุจากกระบวนการทางเคมี ได้แก่ สายโซ่ในโพลีเมอร์ถูกออกซิไดซ์ทำให้สายโซ่สั้นลง, สารป้องกันการออกซิไดซ์เสื่อมสภาพ, ตัวประสานถูกออกซิไดซ์ กระบวนการทางกายภาพ เช่นสาร plasticizer เสื่อมสภาพหรือเคลื่อนที่ออกมาที่ผิว, เกิดความชื้น, ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของเหลวเคลื่อนที่ออกมาที่ผิว, เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส กระบวนการทางกล ได้แก่ การสั่นสะเทือน, การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ, การเกิดความเค้นมากขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

สองกระบวนการแรกสัมพันธ์กับเรื่องของ การเกิดปฏิกิริยาและการแพร่ซึ่งเป็นกระบวนการของ จลนพลศาสตร์ กระบวนการถูกเร่งจากการเพิ่มอุณหภูมิ การเกิดออกซิเดชันเกิดขึ้นตั้งแต่กระบวนการผลิต ความเสียหายนี้เริ่มจากระดับเล็ก ๆ จนขยายกลายเป็นความเสียหายระดับใหญ่ได้ ดังนั้นการจำลองสภาพดินขับตลอดอายุการใช้งานจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ โดยการเตรียมดินขับที่อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิควบคุมวิธีการโดยทั่วๆ ไปในการทำนายอายุดินขับคือการใช้สมการ Arrhenius โดยสมการมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในรูปของ $\exp(-E_a/RT)$ โดย E_a คือพลังงานกระตุ้น R คือค่าคงที่ของก๊าซ K เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ ในหน่วย K ด้วยวิธีการนี้จึงสามารถทำนายพฤติกรรมของวัสดุโดยใช้เวลาสั้นลงได้ สมมติฐานในการใช้สมการนี้คือกระบวนการทางเคมีเกิดมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตามสมมติฐานนี้ไม่ได้สมบูรณ์มากนัก และการประมาณการข้อมูลนอกช่วงที่กำหนดไว้ยังแตกต่างกับผลที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ

ประเด็นของการเร่งอายุดินขับคือเพื่อประเมินสภาพของดินขับเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น ได้นำความสัมพันธ์นี้ไปออกแบบเพื่อกำหนดอายุหรือช่วงเวลาการใช้งานของดินขับต่อไป มีนักวิจัยทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของการเร่งอายุดินขับ [12]-[15] พบว่าการเปลี่ยนแปลงด้านสมบัติทางกลได้แก่แรงดึงและความเครียดถูกอธิบายด้วยความสัมพันธ์ดังนี้

$$\left(\frac{dP(t,T)}{dt}\right)_T = \frac{S_p(T)}{t} \quad (1)$$

P = สมบัติที่เวลา t (ส่วนใหญ่เป็นสมบัติทางกล)

S_p = พารามิเตอร์การสเกล

T = อุณหภูมิที่เร่งอายุ

ทำการอินทิเกรตสมการที่ (1) ได้

$$P(t,T) = P_0(t_0) + S_p(T)c \log\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad (2)$$

P_0 = สมบัติที่เวลา t_0

t_0 = เวลาเริ่มต้น (หลังจากเริ่มบ่มดินขับ)

c = $\ln(10)$

จากสมการที่ (2) มีความเป็นไปได้ต่อผลของพฤติกรรมของวัสดุและทำนายค่าต่าง ๆ ที่อายุดินขับมาก ๆ โดยการสมมติค่า P สามารถสมมติค่า t_0 โดยการเร่งอายุ และหลังจากผ่านไปเวลา t_n ตามธรรมชาติได้ว่า $P(t_w T_0) = P(t_w T_n)$ และ $P_0(t_0 T_a) = P_0(t_0 T_n)$ สมการก่อนหน้านี้นี้เขียนได้เป็น

$$t_n(T_n) = t_0 \left(\frac{t_a(T_a)}{t_0}\right)^{\frac{S_p(T_a)}{S_p(T_n)}} \quad (3)$$

ความสัมพันธ์นี้เรียกว่าแบบจำลอง Layton [12] ใช้เร่งอายุและทำนายช่วงอายุดินขับได้ ตัวแปร k ในแบบจำลองเป็นตัวแปรไร้หน่วย ในที่นี้ใช้เป็น S

เพื่อทำการเร่งอายุดินขับในรูปของเวลา-อุณหภูมิ ข้อมูลจากสูตรเอ็มไพริคัล [16] สามารถนำมาประยุกต์ใช้การเร่งอายุโดยอ้างอิงจากปฏิกิริยาเคมีได้ตั้งสมการที่ (4)

$$t_E[y] = t_T[d] \times F^{\frac{T_T - T_E}{\Delta T_F}} \times \frac{1}{365.25} \quad (4)$$

t_E = เวลาในหน่วยปีที่อุณหภูมิ TE (°C)

t_T = เวลาการทดสอบหน่วยวัน ที่อุณหภูมิการทดสอบ T_T

F = แฟกเตอร์อัตราเร่งปฏิกิริยาทุก ๆ 10°C

มีค่า 2-5

ΔT_F = อุณหภูมิภายในสำหรับค่าแท้จริง (ใช้ค่า 10°C)

ค่า F เป็นฟังก์ชันกับค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของการเร่งอายุ มีค่าที่ 80-120 kJ/mol และอุณหภูมิอยู่ในช่วง 20-90°C ค่า F เป็น 3 การมีสารต้านออกซิเดชันและออกซิเจนอยู่ในเนื้อดินขับมีค่าพลังงานกระตุ้นที่ 90-130 kJ/mol คำนวณ F เป็น 3 [17]

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สมบัติโพลียูรีเทนที่ Rt ต่างๆ

ตัวประสานทั้งในไลน์เนอร์และดินขับมีส่วนประกอบที่เป็นโพลีเมอร์ชนิดโพลียูรีเทนซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชัน -NCO ใน TDI และหมู่ฟังก์ชัน -OH ใน HTPB กำหนดให้ Rt คือสัดส่วนระหว่าง -NCO/-OH ปฏิกิริยาที่สมดุลกัน Rt มีค่าเป็น 1.0 ในการทดลองทำการผสม TDI และ HTPB ที่ Rt ต่าง ๆ กัน แล้วนำโพลียูรีเทนที่ได้มาวิเคราะห์สมบัติทางด้านกายภาพ ทำการทดลองที่ Rt มีค่าเป็น 1.00, 1.05, 1.10, 1.15 และ 1.20 ตามลำดับ

ชิ้นงานถูกเตรียมให้มีความหนาประมาณ 2.0 มม. เพื่อนำไปทดสอบค่าความหนาแน่น ความต้านทานต่อแรงดึง และ % ระยะยืดตัวก่อนขาดต่อไป ค่าความแข็งจะให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความต้านทานแรงดึง จึงไม่นำมาเสนอในงานวิจัยนี้

3.2 สมบัติของไลน์เนอร์ที่ Rt ต่าง ๆ

สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ได้ทำการวิจัยต้นแบบไลน์เนอร์ที่มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานในมอเตอร์จรวด โดยได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีของจรวดโครงการจรวดขนาด 300 มม. ระยะยิง 180 กม. ซึ่งมีข้อกำหนดตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของไลน์เนอร์สำหรับมอเตอร์จรวดโครงการจรวดขนาด 300 มม. ระยะยิง 180 กม.

การทดสอบ	ค่าที่กำหนด
ความหนาแน่น, ASTM D792, at 20°C, g/cm ³	≤1.2
ความต้านทานต่อแรงดึง, ASTM D412, at 20°C, 100mm/min., MPa	≥1.2
% ระยะยืดตัวก่อนขาด, ASTM D412, at 20°C, 100mm/min., %	≥150

กระบวนการผลิตไลน์เนอร์เริ่มจากนำ HTPB ซึ่งผ่านการกวนภายใต้สุญญากาศที่อุณหภูมิ 60°C ผสมสารช่วยเพิ่มความเป็นพลาสติก สารเติมแต่ง ตัวเร่งปฏิกิริยา และขั้นตอนสุดท้ายเติม TDI กวนให้เข้ากันและนำไปเทในแม่พิมพ์ นำตัวอย่างไว้ภายใต้สุญญากาศเพื่อไล่ฟองในเนื้อไลน์เนอร์จนไม่มีฟองเกิดขึ้น ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้ไลน์เนอร์เกิดการแข็งตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ไลน์เนอร์ที่ได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีมีสูตรที่แน่นอน เมื่อคำนวณย้อนกลับพบว่า R_t มีค่าประมาณ 1.50 จึงได้ทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์สมบัติของไลน์เนอร์ในช่วง 1.00-1.50 กำหนดการทดสอบที่ R_t เป็น 1.10, 1.20, 1.30, 1.40 และ 1.50 ตามลำดับ ชิ้นงานถูกเตรียมให้มีความหนาประมาณ 2.0 มม. เพื่อนำไปทดสอบค่าความหนาแน่น ความต้านทานต่อแรงดึง และ % ระยะยืดตัวก่อนขาดต่อไป

3.3 การทดสอบการยึดเกาะกันของไลน์เนอร์และดินขับ

ชิ้นงานทดสอบการยึดเกาะเรียกว่าชิ้นงาน Rectangular [11], [18] วัสดุเป็น AISI4130 พื้นที่ในการหล่อไลน์เนอร์เป็น 25x100 มม. ขั้นตอนการเตรียมจนถึงการทดสอบการยึดเกาะไลน์เนอร์และดินขับแสดงในรูปที่ 2 เริ่มจากการนำชิ้นงานปรับผิวให้หยาบด้วยการพ่นขัดผิวโลหะ ใช้เม็ดกรวดเหล็กเกรด SAE GH-40 ขนาดประมาณ 0.7 มม. เครื่องพ่นเม็ดขัดผิวโลหะรุ่น SD-1002-1-SD ความดันในการพ่นเป็น 8.3-8.5 บาร์ จากนั้นนำไปทำความสะอาดโดยใช้แปรงพลาสติกจุ่ม

อะซิโตนแล้วขัดล้างให้ทั่ว ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 1 ชั่วโมง

เมื่อชิ้นงานแห้งดีแล้วนำไปวัดค่าสนิมโดยใช้ก้านไม้พ่นสาลีชุบคลอโรฟอร์มเช็ดผิวชิ้นงานจุ่มลงในกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง และนำตัวอย่างมาผสมร่วมกับสารละลาย Sulfosalicylic acid และแอมโมเนียเจือจาง สารละลายที่ได้จะมีสีเหลือง จากนั้นนำไปวัดความเข้มข้นของสีด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ยี่ห้อ Agilent รุ่น Cary60 โดยเครื่องจะคำนวณเปรียบเทียบกับกราฟปริมาณสนิมมาตรฐานที่ใส่ข้อมูลไว้ก่อนหน้านี้แสดงผลออกมาเป็นหน่วย mg/L

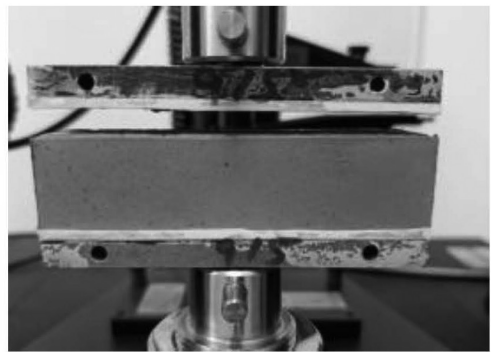
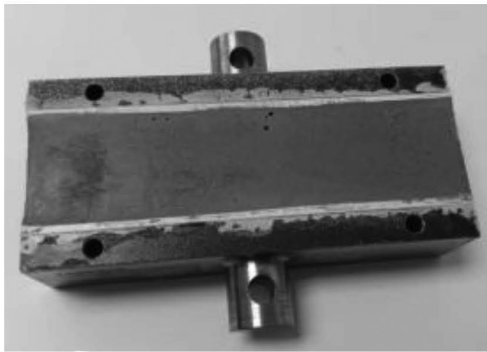
ทำการวัดค่าความหยาบ (Roughness) โดยใช้เครื่องวัด SurfTest รุ่น SJ-210 ทดสอบตามมาตรฐาน JIS-B0601-2001 หลังจากนั้นจึงทา Primer ที่ผิวชิ้นงานเพื่อช่วยการยึดเกาะระหว่างผิวโลหะกับไลน์เนอร์ ขั้นตอนต่อไปทำการเทหล่อไลน์เนอร์หนา 2 มม. บนผิวชิ้นงาน และแบ่งชิ้นงานเป็น 4 ชุด ชุดละ 5 คู่ แต่ละชุดเก็บไว้ในโถดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3, 7, 10 และ 15 วัน ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงนำมาประกอบเป็นชุด Rectangular ทำการผสมดินขับสูตร A4 และหล่อดินขับลงในชุด Rectangular ดินขับมีความหนา 20 มม. ทำการบ่มให้ดินขับแข็งตัวประมาณ 5 วันนำไปอบแรงอายุดินขับที่ 70°C ให้มีอายุ 3 ปี เมื่อคำนวณจากสมการ (4) ใช้เวลาในการอบแรงอายุดินขับที่ 7.8 วัน จากนั้นจึงนำมาตัดแต่งและนำไปทดสอบการยึดเกาะต่อไป



รูปที่ 2 ขั้นตอนในการเตรียมจนถึงการทดสอบการยึดเกาะไลน์เนอร์และดินขับ

ลักษณะของชุด Rectangular ที่นำไปทดสอบ การยึดเกาะทั้งก่อนและหลังการทดสอบเป็นดังรูป ที่ 3 เครื่องทดสอบแรงดึง Introl รุ่น 5965 ถูกใช้

ในการทดสอบการยึดเกาะของชิ้นงานตัวอย่าง Rectangular



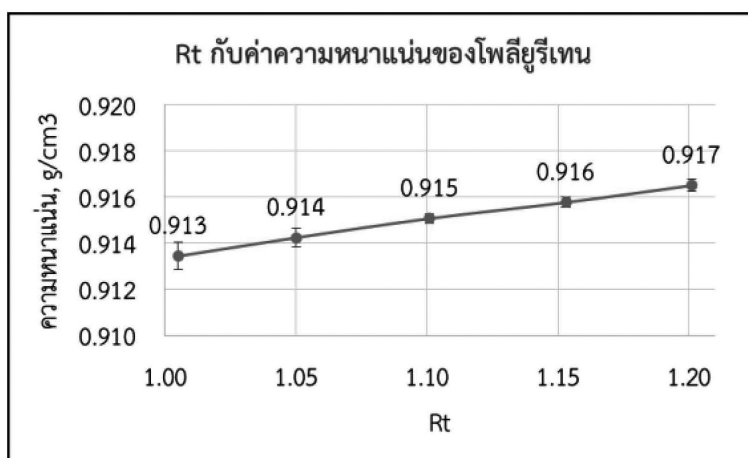
รูปที่ 3 ชุดทดสอบ Rectangular สำหรับทดสอบการยึดเกาะระหว่างไลน์เนอร์และดินซับก้อน และหลังการทดสอบการดึง

4. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 สมบัติโพลียูรีเทนที่ Rt ต่าง ๆ

ในการทดลองช่วงเริ่มต้น มีการผสมโพลียูรีเทน ที่ Rt น้อยกว่า 1.0 พบว่าชิ้นงานที่ได้ไม่แข็งตัวเพียงพอ จึงไม่นำมาทดสอบต่อ ผลการทดสอบค่าความหนาแน่น ความต้านทานต่อแรงดึง และ % ระยะยึดตัวก่อนขาด ของโพลียูรีเทนที่ Rt เป็น 1.00-1.20 แสดงในรูป

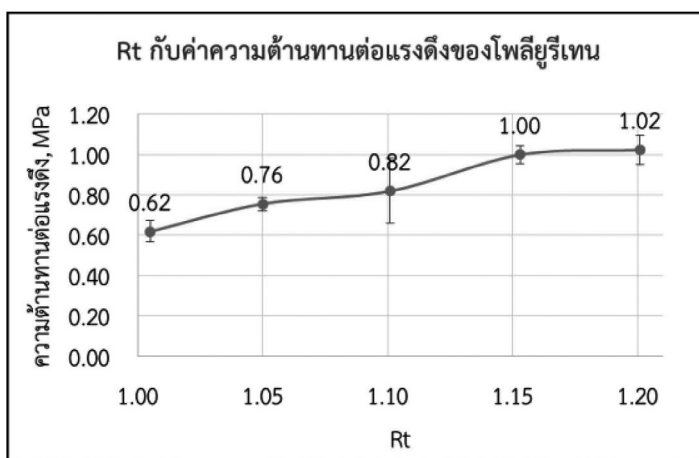
ที่ 4-6 ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นที่ได้อยู่ในช่วง 0.913-0.917 g/cm³ เมื่อ Rt สูงขึ้นค่าความหนาแน่น ก็สูงขึ้นตาม ทั้งนี้ค่าความหนาแน่นของ HTPB เป็น 0.901 g/cm³ ส่วนค่าความหนาแน่นของ TDI เป็น 1.21 g/cm³ ดังนั้นเมื่อ Rt สูงขึ้น หมายถึงว่ามีปริมาณ TDI สูงขึ้นจึงทำให้ความหนาแน่นของโพลียูรีเทน มีค่าสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 4 ค่าความหนาแน่นของโพลียูรีเทนที่ Rt ต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานต่อแรงดึง พบว่า ได้ค่าเป็น 0.62, 0.76, 0.82, 1.00 และ 1.02 MPa ตามลำดับ หรือคิดเป็น 61, 75, 80, 98 และ 100% เมื่อเทียบกับ Rt 1.20 เห็นได้ว่าเมื่อ Rt สูงขึ้น ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้นตาม และเห็นได้ว่าที่ Rt 1.15 และ 1.20 ผลที่ได้เป็น 1.00 และ 1.02 MPa ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่างกันเพียง 2% ในขณะที่ผลของ Rt อื่นๆ มีความแตกต่างกันมากกว่า ในการวิเคราะห์เป็นไปได้ว่าที่ Rt ที่ 1.00 ปริมาณ -NCO ส่วนหนึ่ง

เกิดปฏิกิริยาเป็นสารข้างเคียงจึงทำให้ได้โพลียูรีเทนไม่เต็มที ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ แต่เมื่อ Rt สูงขึ้น ปริมาณ -NCO มีมากขึ้นทำให้ได้โพลียูรีเทนมากขึ้นด้วย ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้น จนถึง Rt ที่ประมาณ 1.15 -NCO จะเริ่มมีปริมาณมากเกินไป ประกอบกับสัดส่วนของ TDI ในสูตรมีปริมาณเล็กน้อยจึงทำให้แม้ Rt สูงขึ้นไปอีกก็ทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

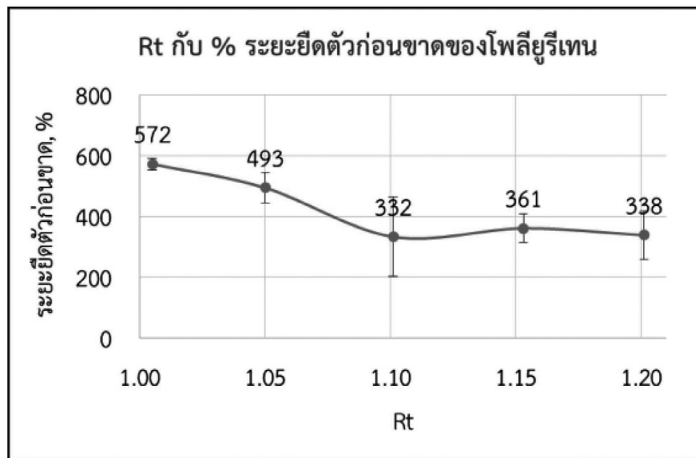


รูปที่ 5 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโพลียูรีเทนที่ Rt ต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาค่า % ระยะเวลาตัวก่อนขาด โดยหลักการค่า % ระยะเวลาตัวก่อนขาดแปรผกผันกับค่าความต้านทานต่อแรงดึง พบว่าผลที่ได้มีค่าเป็น 572, 493, 332, 361 และ 338% ตามลำดับ หรือคิดเป็น 169, 146, 98, 107 และ 100% เมื่อเทียบกับ Rt 1.20 เห็นได้ว่าเมื่อ Rt สูงขึ้น % ระยะเวลาตัวก่อนขาดมีค่าต่ำลงซึ่งสอดคล้องกับหลักการ และที่ Rt 1.10-1.20 ค่า % ระยะเวลาตัวก่อนขาดมีความแตกต่างเพียง 2% และ 7% เท่านั้นเมื่อเทียบกับค่าอื่นๆ ในการวิเคราะห์เช่นเดียวกับค่าความต้านทานต่อแรงดึง เมื่อ Rt เป็น 1.00 -NCO ใน DTI ส่วนหนึ่งเกิดปฏิกิริยาเป็นสารข้างเคียงที่ไม่ใช่โพลียูรีเทน ทำให้มี -OH ใน HTPB มีมากเกินไป ทำให้

% ระยะเวลาตัวก่อนขาดจึงยังมีค่าสูง แต่เมื่อ Rt สูงขึ้น จนถึง 1.10 -NCO ใน DTI จะมีปริมาณพอดีกับ -OH ใน HTPB จึงทำให้ได้โพลียูรีเทนมากที่สุด เป็นผลให้ค่า % ระยะเวลาตัวก่อนขาดจึงเริ่มต่ำลง ประกอบกับสัดส่วนของ TDI ในสูตรมีปริมาณเล็กน้อยจึงทำให้แม้ Rt สูงขึ้นไปอีก ก็ทำให้ค่า % ระยะเวลาตัวก่อนขาดมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

จากการวิเคราะห์เห็นได้ว่า Rt ช่วงที่ควรนำไปพิจารณาต่อควรมีค่าที่มากกว่า 1.10 ขึ้นไป เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่มีค่าสูงและ % ระยะเวลาตัวก่อนขาดที่ไม่ต่ำเกินไป

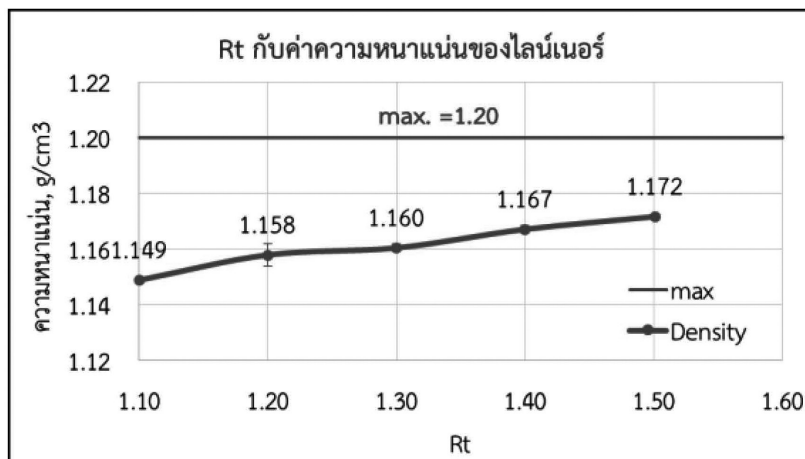


รูปที่ 6 ค่า % ระยะเวลาตัวก่อนขาดของโพลียูรีเทนที่ Rt ต่าง ๆ

4.2 สมบัติของไลน์เนอร์ที่ Rt ต่างๆ

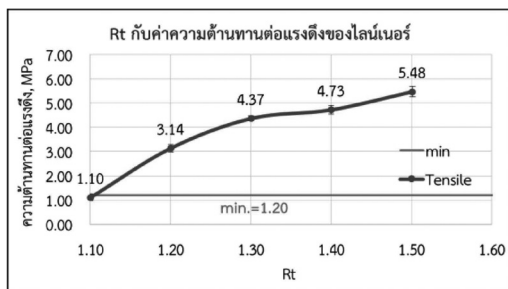
ในการทดลองได้เลือกผลการทดสอบค่าความหนาแน่น ความต้านทานต่อแรงดึง และ % ระยะเวลาตัวก่อนขาดของไลน์เนอร์ตามสูตรที่ได้รับการถ่ายทอดจากมิตรประเทศโดยเลือก Rt เป็น 1.10-1.50 ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 7-9 ตามลำดับ เนื่องจากไลน์เนอร์มีส่วนผสมอื่น ๆ

เข้ามา ฉะนั้นผลการทดสอบที่ได้จึงมีความแตกต่างกับผลการทดสอบของโพลียูรีเทน แต่ควรมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นพบว่าค่าที่ได้อยู่ในช่วง 1.149-1.172 g/cm³ โดยมีค่าในการออกแบบไม่เกิน 1.20 g/cm³ แสดงให้เห็นว่า Rt ตลอดช่วงการทดสอบผ่านเกณฑ์ค่าที่ออกแบบไว้



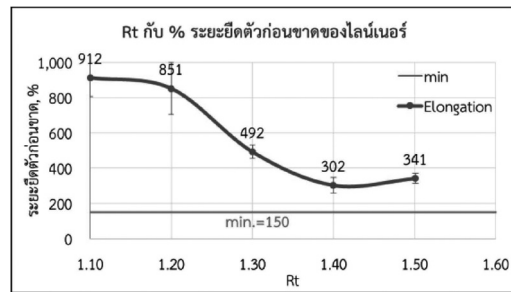
รูปที่ 7 ค่าความหนาแน่นของไลน์เนอร์ที่ Rt ต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานต่อแรงดึง พบว่าค่าที่ได้อยู่ในช่วง 1.10-5.48 MPa โดยมีค่าในการออกแบบไม่ต่ำกว่า 1.2 MPa มีเพียงไลน์เนอร์ที่ Rt 1.10 ที่มีค่า ความต้านทานต่อแรงดึงต่ำกว่าค่าที่ออกแบบเพียงตัวอย่างเดียว นอกจากนี้จากแนวโน้มที่เกิดขึ้นหาก Rt สูงขึ้นกว่านี้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงก็น่าสูงขึ้นตามไปด้วยแต่ต้องพิจารณาถึงค่าความหนาแน่นและค่า % ระยะยืดตัวก่อนขาดที่ต้องไม่ให้เกินค่าที่ออกแบบไว้ด้วย



รูปที่ 8 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของไลน์เนอร์ที่ Rt ต่าง ๆ

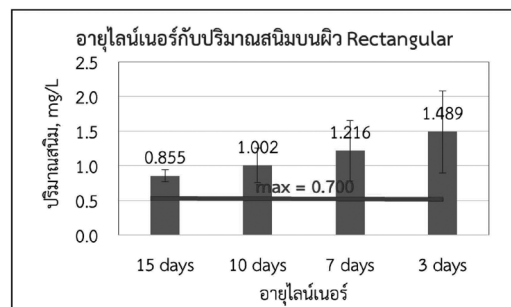
เมื่อพิจารณาค่า % ระยะยืดตัวก่อนขาด พบว่าค่าที่ได้อยู่ในช่วง 302-912% โดยมีค่าในการออกแบบไม่ต่ำกว่า 120% แสดงให้เห็นว่า Rt ตลอดช่วงการทดสอบผ่านเกณฑ์ค่าที่ออกแบบไว้ อย่างไรก็ตาม จากกราฟเห็นได้ว่า ช่วง Rt เป็น 1.4 และ 1.5 ค่า % ระยะยืดตัวก่อนขาด มีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าในช่วงของ Rt 1.10-1.30 หากเพิ่ม Rt แล้วค่า % ระยะยืดตัวก่อนขาดยังไม่ต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้ ควรจะทำให้ได้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงขึ้นกว่าเดิมอีกเล็กน้อย แต่ต้องพิจารณาร่วมกับค่าความหนาแน่นที่สูงขึ้นและไม่ให้เกินค่าที่ออกแบบไว้ด้วย



รูปที่ 9 ค่า % ระยะยืดตัวก่อนขาดของไลน์เนอร์ที่ Rt ต่าง ๆ

4.3 การทดสอบการยึดเกาะกันของไลน์เนอร์และดินขับ

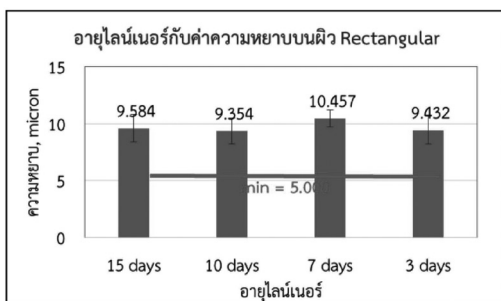
ชิ้นงาน Rectangular ก่อนนำไปติดไลน์เนอร์ผ่านการพ่นขัดผิวโลหะและทำความสะอาดเพื่อปรับผิวให้มีความขรุขระเพิ่มการยึดเกาะกับไลน์เนอร์ มีการวัดค่าสนิมและความหยابบนผิวชิ้นงาน Rectangular ค่าสนิมในการออกแบบกำหนดเกณฑ์ไว้ที่ไม่เกิน 0.700 mg/L ผลที่วัดได้เป็นดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ค่าปริมาณสนิมบนชิ้นงาน Rectangular

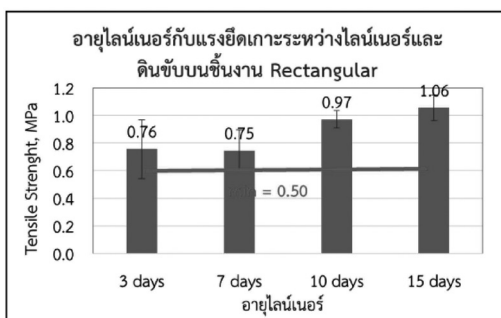
พบว่าค่าสนิมอยู่ในช่วง 0.855-1.489 mg/L เกินกว่าค่าที่ออกแบบไว้ อย่างไรก็ตามผลในครั้งนี้พบว่าทุกชิ้นขาดที่รอยต่อระหว่างไลน์เนอร์และดินขับ แสดงว่าค่าสนิมที่สูงกว่าเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ยังส่งผลให้การยึดเกาะกันระหว่างผิวโลหะและไลน์เนอร์ดีกว่าการยึดเกาะกันระหว่างไลน์เนอร์และดินขับ นอกจากนี้การที่มี primer ทาระหว่างชิ้นงาน Rectangular กับไลน์เนอร์ยังเป็นอีกส่วนที่ช่วยให้การยึดติดกันมีประสิทธิภาพดีขึ้นจนทำให้ปริมาณสนิมที่เกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไม่ใช่ปัจจัยหลัก

เมื่อพิจารณาความหยาบของผิว ผลที่ได้แสดงดังในรูปที่ 11 พบว่าค่าที่ได้อยู่ในช่วง 9.354-10.457 ไมครอน ค่าทั้งหมดสูงกว่าค่าขั้นต่ำในการออกแบบที่ไม่น้อยกว่า 5.000 ไมครอน เป็นผลทำให้มีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะกันระหว่างผิวโลหะและไลน์เนอร์สูงขึ้น ประกอบกับการช่วยให้มี primer เกาะอยู่บนพื้นผิวโลหะได้มากขึ้น เป็นการช่วยให้การยึดเกาะระหว่างวัสดุทั้งสองดีขึ้น จึงมั่นใจได้ว่าการยึดเกาะกันระหว่างผิวโลหะและไลน์เนอร์มีประสิทธิภาพดี



รูปที่ 11 ค่าความหยาบของผิวชิ้นงาน Rectangular

ผลการทดสอบการยึดเกาะระหว่างไลน์เนอร์และดินขับโดยวิเคราะห์จากค่าความต้านทานต่อแรงดึงของชุด Rectangular เปรียบเทียบอายุของไลน์เนอร์ก่อนหล่อดินขับในช่วง 3-15 วัน และดินขับถูกอบเร่งอายุให้มีอายุ 3 ปี โดยมีเกณฑ์ของค่าที่ออกแบบไว้ต้องไม่น้อยกว่า 0.50 MPa แสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ค่าแรงยึดเกาะระหว่างไลน์เนอร์และดินขับเทียบกับอายุไลน์เนอร์ก่อนหล่อดินขับ

จากผลการทดสอบพบว่า ค่าทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.756-1.06 MPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่ออกแบบไว้นอกจากนี้หากเป็นชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบเร่งอายุมาก่อน ค่าการยึดเกาะระหว่างไลน์เนอร์และดินขับควรมีค่าสูงกว่านี้อีกเล็กน้อย ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอายุของไลน์เนอร์ช่วง 3 - 15 วันก่อนหล่อดินขับยังให้ประสิทธิภาพในการยึดเกาะกับดินขับได้สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ฉะนั้นหากในกระบวนการผลิตมีความจำเป็นต้องทั้งช่วงการผสมและหล่อดินขับภายใน 15 วันก็ยังสามารถใช้ท่อมอเตอร์ที่ติดไลน์เนอร์ไว้แล้วทำการหล่อดินขับต่อไปได้

5. สรุปผลการวิจัย

5.1 โพลียูรีเทนที่ให้สมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมควรมี Rt ไม่น้อยกว่า 1.10

5.2 ไลน์เนอร์ที่ให้สมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมควรมี Rt ไม่ควรมีน้อยกว่า 1.20

5.3 การหล่อไลน์เนอร์ทิ้งไว้ก่อนหล่อดินขับในช่วง 3-15 วันยังคงให้ค่าการยึดเกาะระหว่างไลน์เนอร์และดินขับที่มีความแข็งแรงเพียงพอเมื่อเทียบกับค่าที่ออกแบบไว้ที่ไม่น้อยกว่า 0.5 MPa

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 จากการทดลองพบว่าไลน์เนอร์ที่มีสมบัติตามเกณฑ์มี Rt 1.20-1.50 หากทำการทดลองเพิ่มเติมอาจมีสมบัติตามเกณฑ์ที่ Rt สูงกว่า 1.50 ได้อีกเล็กน้อย

6.2 การเตรียมชิ้นงาน Rectangular พบว่าค่าสั่นเกินกว่าเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ทั้งหมด จึงเป็นประเด็นที่น่าจะศึกษาหาวิธีการปรับปรุงชิ้นงานให้มีค่าสั่นที่ลดลงต่อไป

6.3 ในการทดลอง ชิ้นงานถูกเก็บไว้ในโถดูดความชื้น แต่กระบวนการผลิตติดไลน์เนอร์ในท่ออาจมีสภาพที่ต่างออกไป ซึ่งความชื้นมีผลต่อปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของไลน์เนอร์และดินขับมาก อาจต้องจำลองสภาวะให้เหมือนกับการผลิตจริงให้มากขึ้น นำมาซึ่งผลการทดลองที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงมากที่สุด

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยการสนับสนุนด้านบุคลากร วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้จากฝ่ายวิจัยและพัฒนา และฝ่ายโรงปฏิบัติการวิจัยและพัฒนา สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศกระทรวงกลาโหม

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. P. Sutton and O. Biblarz, "Liners, Insulators, and Inhibitors," in *Rocket Propulsion Elements*, 8th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010, pp. 526-529.
- [2] "Polyurethane chemistry," Available: <https://sunilbhargale.tripod.com/pu.html>. [Accessed: Jul. 21, 2025].
- [3] A. M. Pang and J. Zheng, "Prospect of the Research and Development of High Energy Solid Propellant Technology," *Journal of Solid Rocket Technology*, vol. 27, no. 4, pp. 289-293, 2004.
- [4] Z. Wirpsza, *Polyurethanes: Chemistry, Technology and Applications*. New York, NY, USA: E. Horwood, 1993, pp. 354-355.
- [5] G. Oertel, *Polyurethane Handbook*, 2nd ed. Munich, Germany: Hanser Publishers, 1994, pp. 136-137.
- [6] J. D. Byrd and P. B. Walters, "Case Bonding Considerations for Large Rocket Motors," in *Proc. AIAA Paper*, 1976, p. 638.
- [7] Z. P. Huang, H. Y. Nie, Y. Y. Zhang, L. M. Tan, H. L. Yin, and X. G. Ma, "Migration Kinetics and Mechanisms of Plasticizers and Stabilizers at Interfaces of NEPE Propellant/HTPB Liner/EPDM Insulation," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 251-252, pp. 251-257, 2012, doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.05.103.
- [8] J. A. Condon and J. R. Osborn, "Effect of Oxidizer Particle Size Distribution on the Steady and Nonsteady Combustion of Composite Propellants," *School of Mechanical Engineering, Purdue Univ., Lafayette, IN, USA*, AFRPL-TR-78-17, 1978.
- [9] N. Wingborg, "Increasing the Tensile Strength of HTPB with Different Isocyanates and Chain Extenders," *Polymer Testing*, vol. 21, no. 3, pp. 283-287, 2002, doi: 10.1016/S0142-9418(01)00083-6.
- [10] S. B. Haska, E. Bayramli, F. Pekel, and S. Ozkar, "Mechanical Properties of HTPB-IPDI-Based Elastomers," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 64, no. 12, pp. 2347-2354, 1997, doi: 10.1002/(SICI)1097-4628(19970620)64:12<2347::AID-APP9>3.0.CO;2-L.
- [11] C. Y. Liao and S. Lee, "Improving Bond Strength at Propellant-Liner Interfaces," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 31, no. 5, pp. 1452-1457, Sep. 2015.
- [12] L. H. Layton, *Chemical Structural Aging Studies on an HTPB Propellant*, AFRPL-TR-75-13, 1975.
- [13] F. Lillo, B. D'Andrea, G. Marcelli, and A. Sebastia, "Long-Term Aging of Aerospace and Tactical SRM: Experimental Study," in *Proc. 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. Exhibit*, Salt Lake City, UT, USA, Jul. 8-11, 2001.
- [14] E. Sbriccoli, R. Salterelli, and S. Martinucci, "Comparison Between Accelerated and Natural Aging," in *Proc. 20th Int. Annu. Conf. ICT and 18th Tech. Meeting GUS*, Karlsruhe, Germany, Jun. 27-30, 1989.

- [15] M. Kivity, G. Hartman, and A. M. Achlama, "Aging of HTPB Propellant," in Proc. 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. Exhibit, Tucson, AZ, USA, Jul. 10-13, 2005.
- [16] M. A. Bohn, "Prediction of Equivalent Time-Temperature Loads for Accelerated Ageing to Simulate Preset In-Storage Ageing and Time-Temperature Profile Loads," in Proc. 40th Int. Annu. Conf. ICT, Karlsruhe, Germany, Jun. 23-26, 2009, pp. 78.1-78.28.
- [17] S. Cerri, M. A. Bohn, K. Menke, and L. Galfetti, "Ageing Behaviour of HTPB-Based Rocket Propellant Formulations," Central European Journal of Energetic Materials, vol. 6, no. 2, pp. 149-165, 2009.
- [18] Q. Zhou, J. Xu, X. Chen, J. Zheng, and C. Zhou, "Stress Singularity in a Rectangular Bond Specimen of a Solid Rocket Motor: Effects and Elimination," International Journal of Adhesion and Adhesives, vol. 63, pp. 57-65, Dec. 2015.