

การศึกษาความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างวัสดุ โลหะ-ยาง ภายใต้อิทธิพลของลักษณะพื้นผิว วัสดุโดยใช้แบบจำลองรอยต่อรูปคลื่นไซน์

Numerical Investigation of Interfacial Strength in Metal–Rubber Bonding Influenced by Substrate Surface Topography Using a Sine Wave Interface Model

หยก นุสม^{1*}, เยี่ยมพล นครามอนตรี², จุฑาณี พรหมจันทร์³ และ วิฑูร อุทัยแสงสุข³

Yok Nusom^{1*}, Yeampon Nakaramontri², Juthanee Phromjan³ and Vitoon Uthaisangsuk³

¹หลักสูตรเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์, ปทุมธานี, 13180, ประเทศไทย

²ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,
กรุงเทพมหานคร, 10140, ประเทศไทย

³ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,
กรุงเทพมหานคร, 10140, ประเทศไทย

¹Major of Mechanical Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology,
Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, Pathum Thani, 13180, Thailand

²Department of Chemistry, Faculty of Science,
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140, Thailand

³Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140, Thailand

*Corresponding Author E-mail: yok.nu@vru.ac.th

รับบทความ (Received) : November 7, 2025 /ปรับปรุงแก้ไข (Revised) : December 21, 2025 /ตอบรับบทความ (Accepted) : December 25, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความแข็งแรงรอยต่อระหว่างโลหะและยางภายใต้อิทธิพลของลักษณะพื้นผิวด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) โดยใช้แบบจำลอง RVE (representative volume element) ของรอยต่อแบบสองมิติ ร่วมกับแบบจำลอง CZM (cohesive zone model) ซึ่งใช้กฎ TSL (traction-separation law) เพื่อจำลองความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ การศึกษาจะใช้การเทียบเคียงความขรุขระหรือความหยาบผิวของโลหะด้วยรูปคลื่นไซน์ (sine wave) โดยเปรียบเทียบผลของรูปคลื่นภายใต้การเปลี่ยนแปลงของความสูงและความยาวคลื่นซึ่งเปรียบเสมือนรูปทรงและค่าความหยาบผิวที่เปลี่ยนแปลงไป รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นของวัสดุอย่างส่งผลต่อความแข็งแรงรอยต่ออีกด้วย จากการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงของความหยาบผิวโลหะจะส่งผลกระทบต่อการยึดติดระหว่างวัสดุอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมอดูลัสของ

สภาพยึดหยุ่นของยางสูงกว่า 50 MPa เมื่อเปรียบเทียบความหยาบผิวด้วยความสูงและความยาวคลื่น ความแข็งแรงรอยต่อจะเพิ่มขึ้นประมาณ 152 % เมื่อความสูงคลื่นเพิ่มจาก 0.002 เป็น 0.02 mm. และเพิ่มขึ้นประมาณ 325% เมื่อความยาวคลื่นถูกลดจาก 0.1 mm. เป็น 0.01 mm. ที่มอดูลัสของสภาพยึดหยุ่นของยางเท่ากับ 1000 MPa

คำสำคัญ : การยึดติดโลหะ-ยาง, ความแข็งแรงรอยต่อ, ลักษณะพื้นผิว, รูปทรงคลื่น

Abstract

This research investigates the interfacial strength between metal and rubber under the influence of surface topography by means of the finite element method. A two-dimensional representative volume element (RVE) model of the joint was developed in conjunction with a cohesive zone model (CZM) employing the traction–separation law (TSL) to simulate interfacial damage and failure. The surface roughness of the metal substrate was modeled using sinusoidal wave geometries to examine the effects of wave amplitude and wavelength on the surface profile. Additionally, the elastic modulus of the rubber was varied to evaluate its impact on overall interfacial strength. Results indicate that variations in metal surface roughness significantly affect interfacial adhesion when the elastic modulus of the rubber exceeds 50 MPa. Specifically, at a rubber elastic modulus of 1000 MPa, interfacial strength increased by 152% as wave height increased from 0.002 mm to 0.02 mm, and by approximately 325% as the wavelength decreased from 0.1 mm to 0.01 mm.

Keywords : Metal–rubber bonding; Interfacial strength; Surface topography; Waveform morphology

บทนำ

การยึดติด (adhesion / bonding) ระหว่างวัสดุต่างชนิดถือว่าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการพัฒนาวัสดุผสม ชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ หรือโครงสร้างที่ประกอบด้วยวัสดุต่างประเภทเข้าด้วยกัน โดยเฉพาะการยึดติดระหว่างโลหะ เช่น อะลูมิเนียม กับ ยาง หรือพอลิเมอร์ประเภทอื่นๆ ซึ่งพบในผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย เช่น ยางรถยนต์แบบไร้ลม ซีลกันรั่ว ยางรองแท่นเครื่อง ชิ้นส่วนกันสั่นสะเทือนดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นต้น ความแข็งแรงของรอยต่อวัสดุ (interfacial strength) มีอิทธิพลโดยตรงต่อสมรรถนะโดยรวมของโครงสร้าง ดังนั้นการยึดติดที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการพัฒนาชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์เหล่านั้น [1,2] โดยทั่วไปแล้วสมบัติของการยึดติดของรอยต่อวัสดุนั้นขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวทั้งทางกายภาพ (physical bonding) ทางเคมี (chemical bonding) รวมถึงการยึดเกาะเชิงกล (mechanical Interlocking) ในส่วนของการเกาะยึดเชิงกลนั้น ได้มีการพัฒนาเทคนิคต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเหนี่ยวของพื้นผิววัสดุ ผ่านกระบวนการปรับสภาพผิว (surface treatment) เช่น การเพิ่มความหยาบผิวด้วยกระบวนการเชิงกล (mechanical roughening) การกัดกร่อนทางเคมี (chemical treatment) และการทำพื้นผิวด้วยเลเซอร์ (laser texturing) [3–5] เป็นต้น

จากการศึกษาที่ผ่านมาจะเห็นว่าลักษณะพื้นผิววัสดุมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการยึดเป็นอย่างยิ่ง การศึกษารูปแบบยึดติดในสัดส่วนระดับจุลภาคหรือไมโครสเกล (micro-scale) และ เมโสสเกล (meso-scale) จะสามารถแสดงให้เห็นพฤติกรรมของวัสดุและนำมาวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบได้ เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมและความเสียหายของรอยต่อระหว่างโลหะและยางเมื่อมีแรงกระทำ งานวิจัยนี้จึงนำแบบจำลอง RVE แบบ 2 มิติ ในระดับเมโสสเกล ซึ่งมีความซับซ้อนน้อยกว่าแบบ 3 มิติ มาเป็นแบบจำลองตั้งต้นเพื่อศึกษาอิทธิพลของลักษณะหรือรูปแบบพื้นผิวต่อการยึดติดระหว่างโลหะและยางซึ่งใช้รูปแบบคลื่นไซน์ (sine

wave) เป็นตัวแทนของลักษณะผิวโลหะ ร่วมกับแบบจำลอง CZM และกฎ TSL ปัจจัยหลักที่ทำการศึกษาคือรูปทรงและค่าความหยาบผิวที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งอยู่ในรูปของความสูงและความยาวคลื่น นอกจากนี้ยังศึกษาปัจจัยด้านสมบัติวัสดุเช่นการเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นของวัสดุยางที่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยต่ออีกด้วย



รูปที่ 1 ชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ที่มีการยึดติดระหว่างโลหะและยาง [6,7]

1. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.1 เพื่อศึกษาความแข็งแรงรอยต่อระหว่างวัสดุโลหะและยางที่เป็นผลมาจากลักษณะพื้นผิวของวัสดุ
- 1.2 เพื่อเข้าใจพฤติกรรมการยึดติด การเปลี่ยนรูป และการเกิดความเสียหายระหว่างรอยต่อวัสดุ

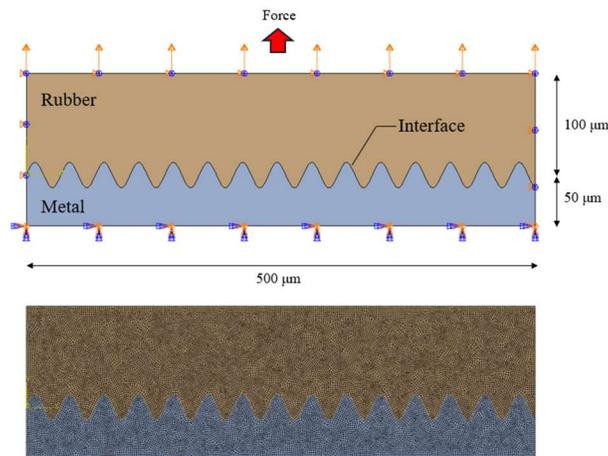
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาด้านวัสดุวิศวกรรม แบบจำลอง RVE (Representative Volume Elements) ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานจำลองเชิงตัวเลข (numerical modeling) เพื่อการวิเคราะห์และทำนายสมบัติเชิงกล (effective mechanical properties) ของวัสดุต่างๆ ทั้งโลหะ พอลิเมอร์ วัสดุคอมโพสิต และวัสดุชนิดอื่น ๆ โดยสามารถศึกษาลักษณะการเสียรูปเชิงกลในระดับจุลภาค (micro-mechanical deformation) ของวัสดุที่ทำการวิเคราะห์ได้ [8,9] สำหรับกรณีของการยึดติดวัสดุต่างชนิด การเกิดความเสียหายหรือการแยกตัวที่รอยต่อ (interface failure / delamination) ก็สามารถอธิบายได้ด้วยการจำลอง RVE เช่นกัน ซึ่ง O'Dwyer et al. [10] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างชั้นกาวกับวัสดุคอมโพสิตโดยใช้แบบจำลอง RVE ซึ่งประกอบด้วยชั้นของคอมโพสิตและชั้นกาว และมีการนิยามกฎ traction-separation law (TSL) ที่รอยต่อระหว่างวัสดุทั้งสอง ซึ่งได้มีการพิจารณาการรับแรงในทิศตั้งฉากกับรอยต่อ (normal mode / Mode I) และแรงเฉือน (shear mode / Mode II) จากการศึกษาพบว่า การที่มีแรงยึดติดระหว่างวัสดุต่ำจะทำให้เกิดความเสียหายแบบแยกตัวระหว่างระหว่างวัสดุ (bond line delamination) ขณะที่เมื่อเพิ่มแรงยึดติดที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ความเสียหายเกิดขึ้นภายในเนื้อคอมโพสิตแทน ในทำนองเดียวกัน Hirsch และ Kästner [11] ได้เสนอวิธีการจำลองแบบ RVE เพื่อศึกษาความแข็งแรงรอยต่อระหว่างโลหะและพอลิเมอร์ โดยใช้แบบจำลอง cohesive zone model (CZM) ร่วมกับกฎ TSL โดยจำลองให้โลหะมีความหยาบผิวและกำหนดให้มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) ส่วนของพอลิเมอร์นิยามด้วยพฤติกรรมวัสดุแบบพลาสติก (plasticity model) ร่วมกับสมการความเสียหายแบบเหนียว (ductile damage model) เพื่อให้แบบจำลองสามารถเกิดความเสียหายในเนื้อวัสดุได้ รูปแบบความหยาบผิวของรอยต่อถูกแทนด้วยรูปทรงสามเหลี่ยมหลายลักษณะ และทำการศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการหลุดออกของ

รอยต่อ (adhesive failure / delamination) และการเสียหายในเนื้อวัสดุ (cohesive failure) ต่อมาแบบจำลองดังกล่าวได้ถูกพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมและวัสดุคอมโพสิตประเภทอีพ็อกซีเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber reinforced epoxy; GFRP) โดยใช้หน้าตัดความหยาบผิวแบบสุ่ม (random roughness profiles) ซึ่งถูกสร้างขึ้นด้วยอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ [12] ผลลัพธ์จากการจำลองพบว่า การเพิ่มความหยาบผิววัสดุเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างวัสดุ

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษานี้ได้มีการนำแบบจำลอง RVE (representative volume element) แบบ 2 มิติมาใช้ในการศึกษาผลกระทบของรูปแบบรอยต่อระหว่างวัสดุต่อประสิทธิภาพการยึดติดระหว่างวัสดุโลหะและยางเพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองและให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ของรูปแบบความหยาบผิวต่อประสิทธิภาพการยึดติดระหว่างวัสดุได้ง่ายขึ้นและอาศัยรูปแบบผิวรูปคลื่นไซน์ (sine wave) [13,14] ทดแทนลักษณะความหยาบผิวโลหะ แบบจำลองดังกล่าวได้ดำเนินการและประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ Abaqus ซึ่งขนาดสัดส่วนของแบบจำลองอยู่ในระดับเมโสสเกล (meso-scale) โดยมีแรงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับรอยต่อระหว่างชิ้นงาน (Mode I: normal) ดังแสดงในรูปที่ 2 แบบจำลองมีขนาด $500 \times 150 \mu\text{m}^2$ ประกอบด้วย 2 วัสดุ ได้แก่ โลหะและวัสดุยาง และกำหนดให้เป็นเอลิเมนต์แบบ plane strain ขนาด 0.002 mm จากขอบเขตของแบบจำลอง (model boundary) ขอบล่างซึ่งเป็นวัสดุโลหะจะถูกยึดไว้ไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ในขณะที่แรงกระทำ (load) จะอยู่ที่ขอบบนของวัสดุยาง



รูปที่ 2 แบบจำลอง RVE ของรอยต่อสำหรับการยึดติดระหว่างวัสดุโลหะ-ยาง

1. แบบจำลองรูปคลื่นไซน์

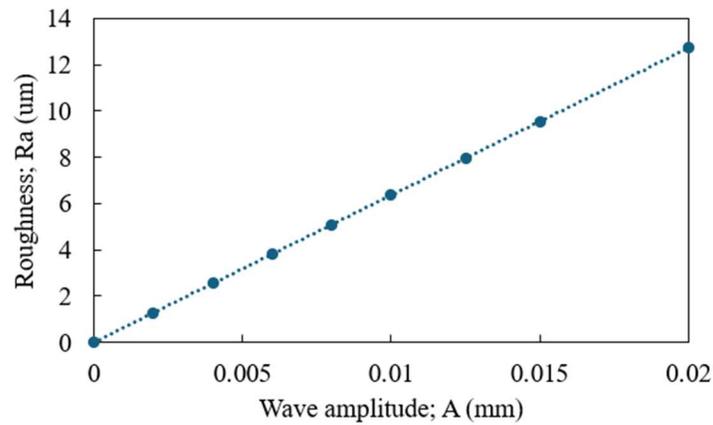
รอยต่อระหว่างโลหะและยางมีรูปร่างตามลักษณะของความหยาบผิววัสดุซึ่งสามารถลดความซับซ้อนเชิงรูปร่างลงโดยใช้คลื่นไซน์ (sine wave) [13,14] ดังสมการที่ (1) มาเป็นตัวแทน

$$z(x) = A \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (1)$$

โดย A (Amplitude) คือ ความสูงของคลื่น และ λ (Wavelength) คือความยาวคลื่น ซึ่งค่าความหยาบผิว Ra มีความสัมพันธ์กับความสูงของคลื่นดังสมการที่ (2) เมื่อแทนค่า Ra ลงในสมการคลื่นไซน์จะได้สมการความสัมพันธ์ของคลื่นไซน์และความหยาบผิวดังสมการที่ (3) และสามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบได้ดังแสดงในรูปที่ 3

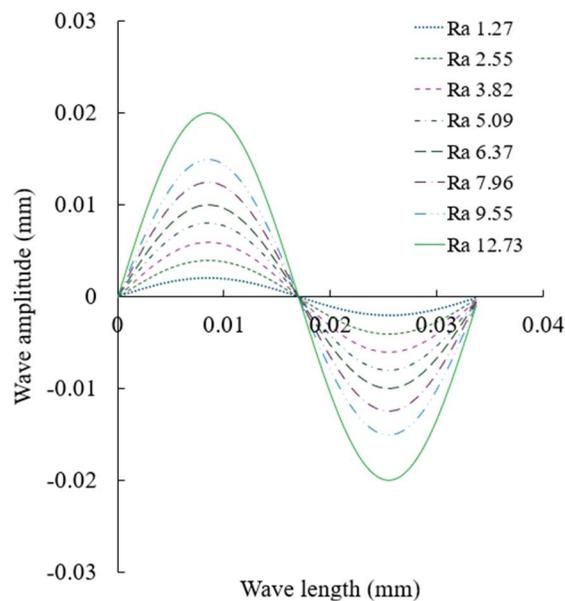
$$Ra = \frac{2A}{\pi} \tag{2}$$

$$z(x) = \left(\frac{\pi Ra}{2}\right) \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \tag{3}$$

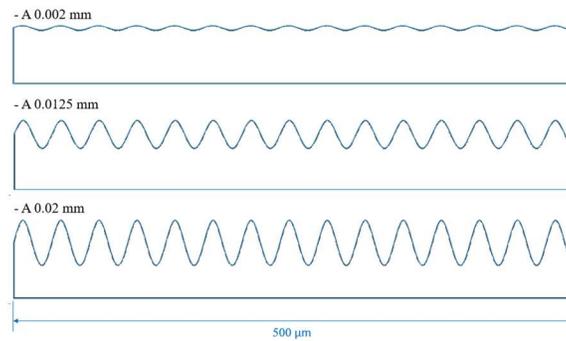


รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของคลื่นไซน์และความหยาบผิว

ดังนั้นในการศึกษานี้ได้นำแบบจำลองรูปคลื่นไซน์ (sine wave model) มาใช้เพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์หาค่าจากปัจจัยต่างๆ โดยใช้ความสูงคลื่นตั้งแต่ 0.002 – 0.02 mm. ดังกราฟในรูปที่ 4 ซึ่งครอบคลุมความหยาบผิว Ra 1.27 – 12.73 μm โดยกำหนดให้ความยาวคลื่นเท่ากับ 0.034 mm. ตัวอย่างผิวดังกล่าวได้แสดงดังรูปที่ 5

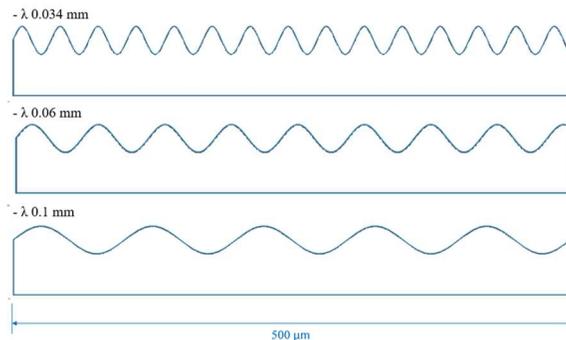


รูปที่ 4 กราฟแสดงคลื่นไซน์ของแต่ละความหยาบผิว



รูปที่ 5 หน้าตัดรูปคลื่นที่มีความสูงคลื่นแตกต่างกันโดยมีความยาวคลื่นขนาด 0.034 mm.

ถึงแม้ว่าความยาวคลื่น λ จะไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหยาบผิวดังแสดงในสมการ (3) แต่ก็มีผลต่อรูปร่างของความหยาบผิว ดังนั้นความยาวคลื่นที่ระยะ 0.01 – 0.1 mm. ดังแสดงตัวอย่างหน้าตัดรูปคลื่นในรูปที่ 6 ได้ถูกนำมาพิจารณา ร่วมกับความสูงคลื่น 0.0125 mm. หรือ Ra ขนาด 7.96 μm เพื่อศึกษาอิทธิพลของการยึดติดอีกด้วย



รูปที่ 6 หน้าตัดรูปคลื่นที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันโดยมีความสูงคลื่นขนาด 0.0125 mm.

2 แบบจำลองสมบัติวัสดุ

แบบจำลองสมบัติวัสดุ (material model) ของทั้งวัสดุโลหะและยางได้ถูกกำหนดให้มีสมบัติความยืดหยุ่นแบบคงที่ (linear elastic) โดยใช้สมบัติวัสดุดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งวัสดุโลหะมีความแข็งแรงกว่าวัสดุยางมากดังนั้นโลหะจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแต่อย่างใดแต่จะเกิดการยึดตัวในวัสดุยางแทน อย่างไรก็ตามเนื่องจากการศึกษานี้มีการวิเคราะห์ถึงผลกระทบจากการยึดตัวของวัสดุยาง จึงกำหนดให้ยางมีสมบัติแบบยืดหยุ่นคงที่เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองและการวิเคราะห์หลัง

ระหว่างวัสดุทั้งสองถูกขึ้นด้วยรอยต่อ (interface) ซึ่งนิยามสมบัติของรอยต่อด้วย cohesive zone model (CZM) เพื่อกำหนดให้รอยต่อสามารถเกิดความเสียหายขึ้นได้ซึ่งทำให้ชิ้นงานหลุดออกจากกัน (delamination) โดยใช้กฎ traction-separation law (TSL) ซึ่งพฤติกรรมความยืดหยุ่นของรอยต่อได้แสดงในสมการ (4)

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = K\delta \quad (4)$$

เมื่อ t_i คือ stress components, t_i คือ strain components และ K คือ elastic stiffness of cohesive layer
 t_i เกณฑ์ความเสียหายของรอยต่อแบบผสม (mixed mode) ของแต่ละทิศทางถูกนิยามด้วยเกณฑ์ quadratic stress criterion [15–17] ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่ทำให้เกิดเริ่มต้นของการหลุดออกของสองวัสดุที่แสดงในสมการ (5)

$$\left\{\frac{t_n}{t_n^0}\right\}^2 + \left\{\frac{t_s}{t_s^0}\right\}^2 + \left\{\frac{t_t}{t_t^0}\right\}^2 = 1 \quad (5)$$

เมื่อ t_n^0 , t_s^0 และ t_t^0 คือ ความแข็งแรงของรอยต่อในทิศตั้งฉากกับแนวแรงและแนวเฉือน
นอกจากนั้นการลามของการหลุดออกของรอยต่อถูกควบคุมด้วย critical energy (G^c) ซึ่งเป็นผลจากเกณฑ์ Benzeggagh-Kenane (B-K) ตามสมการที่ (6) ได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษานี้

$$G_n^c + (G_s^c - G_n^c) \left\{\frac{G_s + G_t}{G_n + G_s + G_t}\right\}^\eta = G^c \quad (6)$$

เมื่อ G_n^c และ G_s^c คือ Critical fracture energies ในทิศตั้งฉากและแนวเฉือน และ h คือ ค่าคงที่ของ Cohesive factor ของรอยต่อของวัสดุตามสมการ B-K criterion โดยสมบัตินี้รอยต่อระหว่างวัสดุถูกสมมติค่าเพื่อใช้ในการศึกษาดังแสดงใน

ตารางที่ 2

ตารางที่ 1 สมบัติโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่นของวัสดุ

Material	Elastic modulus; E (MPa)
Metal	70,000
Rubber	1-1000

ตารางที่ 2 สมบัตินี้รอยต่อระหว่างวัสดุ

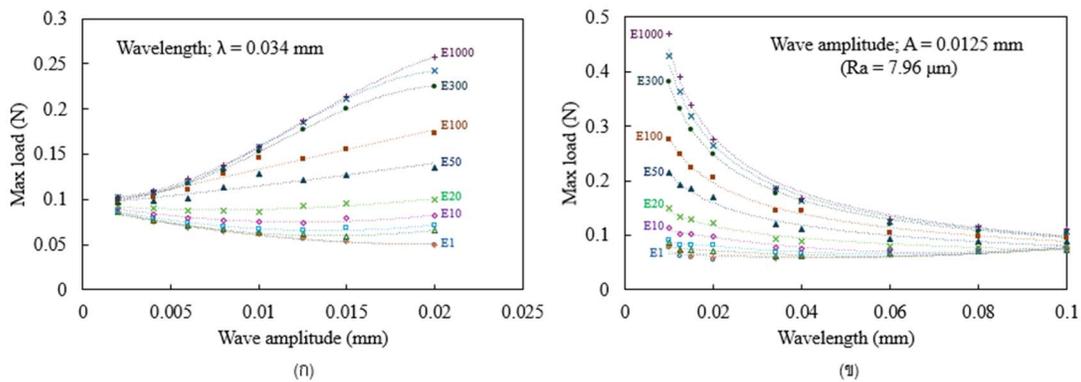
Cohesive zone parameter	Value
t_n^0 (MPa)	0.2
t_s^0 (MPa)	0.2
K (MPa)	2000
G_n^c (mJ/mm ²)	0.05

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. ความแข็งแรงยึดติดระหว่างวัสดุ

ผลลัพธ์จากแบบจำลอง RVE ในรูปที่ 7 (ก) เป็นการแสดงแรงสูงสุดที่กระทำตั้งฉากกับรอยต่อระหว่างวัสดุ (Mode I; Normal) ที่มีความขนาด 500 μm เมื่อมีความสูงคลื่น (wave amplitude; A) ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยกำหนดให้ความยาวคลื่น (Wavelength; λ) มีขนาด 0.034 mm. จากกราฟได้แสดงให้เห็นว่าความสูงของคลื่นซึ่งเป็นตัวแทนของความหยาบผิวนั้นส่งผล

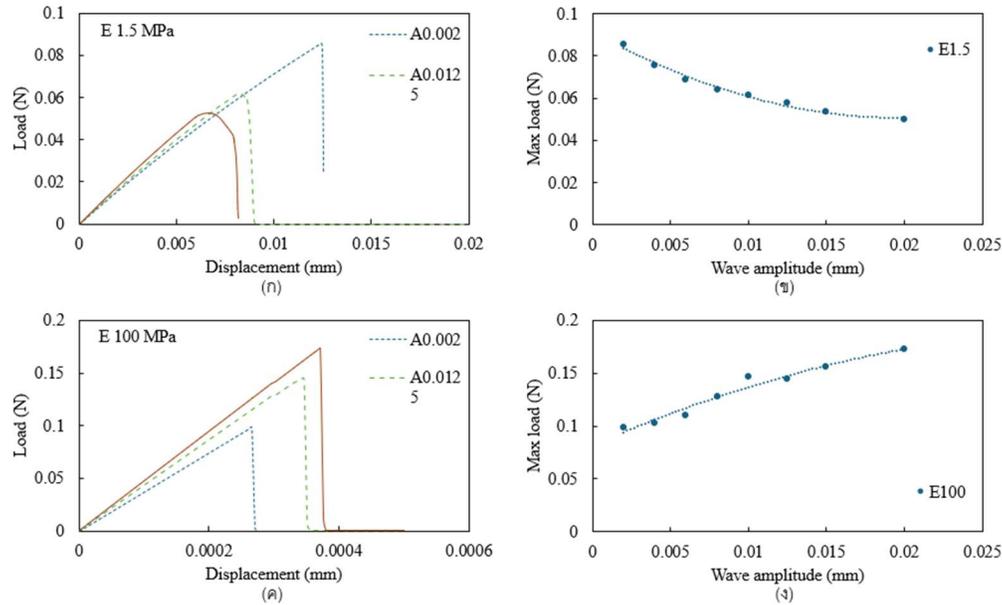
กระทบโดยตรงต่อแรงยึดติดของวัสดุ อย่างไรก็ตามตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดผลกระทบร่วมคือสมบัติทางกลของวัสดุยาง ซึ่งในที่นี้มีการเปรียบเทียบแรงยึดติดที่มีค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (elastic modulus) ตั้งแต่ 1-1000 MPa ที่ค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นต่ำซึ่งหมายถึงวัสดุที่มีความแข็งต่ำและมีความอ่อนตัวได้มาก เช่นในช่วง 1-1.5 MPa แรงยึดติดของวัสดุมีแนวโน้มที่ค่อยๆ ลดลงเล็กน้อยเมื่อความสูงคลื่นหรือความหนาผิวสูงขึ้น เมื่อมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นหรือวัสดุที่มีความแข็งมากขึ้น เช่น ตั้งแต่ 3-20 MPa แรงกระทำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความสูงคลื่นเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.0125 mm เป็นต้นไป อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าแรงยึดติดของวัสดุที่มีความสูงคลื่นหรือความหนาผิวที่แตกต่างกันในช่วงมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 1 – 20 MPa มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาได้ว่าความหนาผิวไม่ได้ส่งผลต่อแรงยึดติดของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญเมื่อวัสดุมีค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นที่ต่ำกว่า 20 MPa ตั้งแต่มอดูลัส 50 MPa แรงยึดติดจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความสูงคลื่นเพิ่มมากขึ้น และแนวโน้มความชันการเพิ่มขึ้นของแรงยึดติดยิ่งมากขึ้นเมื่อวัสดุมีความแข็งมากขึ้น ในการศึกษาี้แรงยึดติดสูงสุดที่เป็นผลมาจากการเพิ่มขนาดความสูงคลื่นจาก 0.002 ถึง 0.02 mm. เกิดขึ้นเมื่อมีมอดูลัสสูงสุด 1000 MPa ซึ่งเพิ่มขึ้น 152% ที่ความความหนาผิวสูงสุดโดยมีความสูงคลื่นขนาด 0.02 mm



รูปที่ 7 ผลลัพธ์แรงกระทำสูงสุดใน Mode I (Normal) จากแบบจำลองรูปคลื่นที่มี (ก) ความสูงคลื่นที่แตกต่างกัน และ (ข) ความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน

จากกราฟเปรียบเทียบ Load-displacement ในรูปที่ 8 ซึ่งให้เห็นความแตกต่างของพฤติกรรมการยึดติดเมื่อมีความสูงคลื่นเพิ่มขึ้นทั้งในวัสดุอ่อน (รูปที่ 8 (ก)) และวัสดุแข็ง (รูปที่ 8 (ค)) จากที่กล่าวข้างต้น ที่วัสดุอ่อนจะทำให้แรงยึดติดลดต่ำลงเล็กน้อยเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความสูงคลื่น แต่ในทางกลับกันแรงยึดติดจะสูงขึ้นเมื่อวัสดุแข็งขึ้นหรือมีค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นตั้งแต่ 20 MPa ขึ้นไป อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของความสูงคลื่นจะมีผลต่อความชันกราฟ กล่าวคือความชันกราฟจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงคลื่นมีมากขึ้นทั้งในวัสดุอ่อนและวัสดุแข็งซึ่งหมายถึง Stiffness ของการยึดติดซึ่งเป็นสมบัติหนึ่งของรอยต่อนั้นเพิ่มขึ้นด้วย

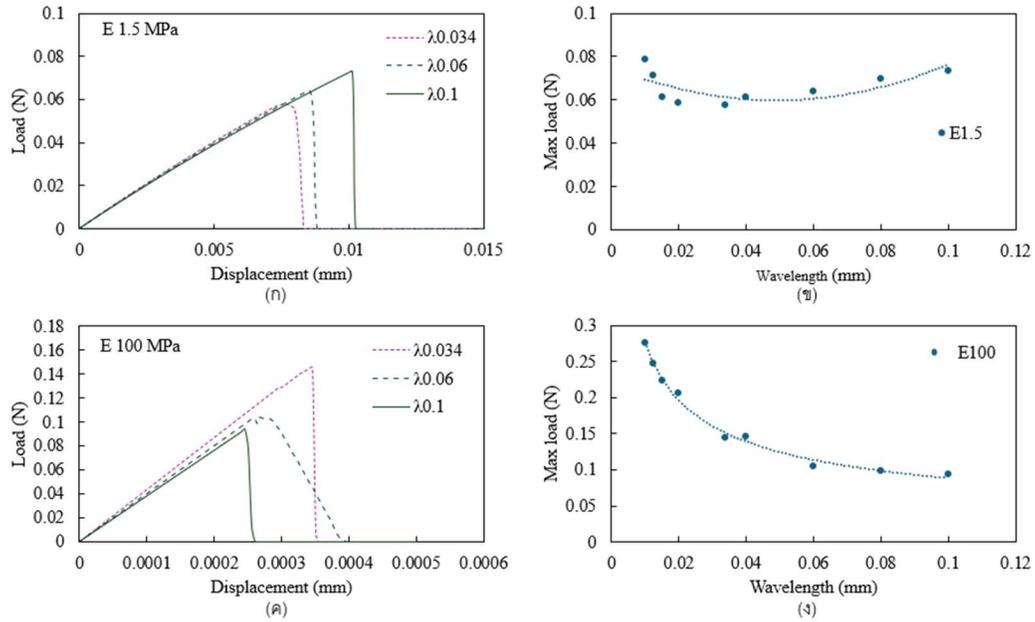
ความยาวคลื่นก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการยึดติดเนื่องจากทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของคลื่นกราฟดังแสดงในรูปที่ 7 (ข) เปรียบเทียบแรงยึดติดของวัสดุที่มีค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นแตกต่างกันซึ่งเป็นผลมาจากความยาวคลื่นโดยที่ความสูงคลื่นถูกกำหนดให้มีขนาด 0.0125 mm. หรือเทียบเท่าความหนาผิว Ra ขนาด 7.96 μm และความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.01 – 0.1 mm. จากกราฟในรูปที่ 7 (ข) แสดงให้เห็นว่าความยาวคลื่นยิ่งน้อยประสิทธิภาพการยึดติดของวัสดุยิ่งเพิ่มมากขึ้นซึ่งความแตกต่างมากที่สุดเกิดขึ้นเมื่อวัสดุยางมีมอดูลัสของยึดหยุ่นสูงสุดคือที่ 1000 MPa โดยมีความแตกต่างประมาณ 325% เมื่อความยาวคลื่นถูกลดจาก 0.1 mm. เป็น 0.01 mm.



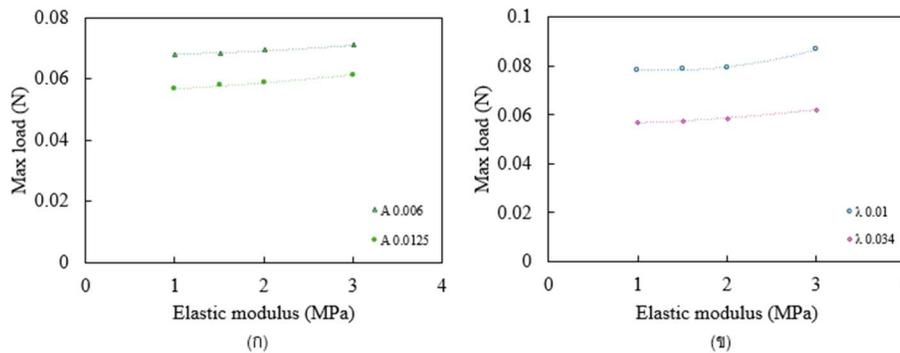
รูปที่ 8 ผลการจำลองใน Mode I ที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความสูงคลื่น (ก) กราฟ Load-displacement เมื่อวัสดุขงมีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 1.5 MPa, (ข) แรงยึดติดสูงสุดเมื่อวัสดุขงมีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 1.5 MPa, (ค) กราฟ Load-displacement เมื่อวัสดุขงมีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 100 MPa, (ง) แรงยึดติดสูงสุดเมื่อวัสดุขงมีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 100 MPa

ดังแสดงในรูปที่ 9 (ก) และ (ค) การเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นส่งผลต่อความชันของกราฟเพียงเล็กน้อยไม่ว่าจะในวัสดุที่มีความแข็งมากหรือน้อยซึ่งแตกต่างจากการเปลี่ยนแปลงของความสูงคลื่น นั่นหมายความว่าความยาวคลื่นไม่มีอิทธิพลต่อ Stiffness ของผิวยึดติดอย่างมีนัยสำคัญ

จากที่กล่าวในข้างต้นจะเห็นว่าสมบัติทางกลของขงมีผลกระทบต่อแรงยึดติดระหว่างวัสดุเป็นอย่างมาก ในกรณีนี้วัสดุมีความแข็งน้อยหรือมีความอ่อนตัวสูงเช่นมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นอยู่ในช่วง 1 – 3 MPa การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของวัสดุขงในช่วงนี้มีผลต่อประสิทธิภาพการยึดติดของวัสดุขงค่อนข้างน้อยดังแสดงในรูปที่ 10 แต่เมื่อขงมีความแข็งมากขึ้นตามข้อมูลจากกราฟในรูปที่ 7 ยิงทำให้มีสมบัติการยึดติดระหว่างวัสดุขงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย หากพิจารณาโดยที่คลื่นไซน์ที่มีความสูงคลื่นขนาด 0.02 mm. และความยาวคลื่นขนาด 0.034 เมื่อวัสดุขงมีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 1000 MPa จะทำให้แรงยึดติดเพิ่มขึ้น 421% หรือที่ความสูงคลื่นขนาด 0.0125 mm. ซึ่งเทียบเท่ากับความหยาบผิว Ra 7.96 μm และความยาวคลื่นขนาด 0.01 mm. แรงยึดติดระหว่างวัสดุขงจะมีความแตกต่างสูงถึง 499%



รูปที่ 9 ผลการจำลองใน Mode I ที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่น (ก) กราฟ Load-displacement เมื่อวัสดุขงมีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 1.5 MPa, (ข) แรงยึดติดสูงสุดเมื่อวัสดุขงมีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 1.5 MPa, (ค) กราฟ Load-displacement เมื่อวัสดุขงมีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 100 MPa, (ง) แรงยึดติดสูงสุดเมื่อวัสดุขงมีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 100 MPa



รูปที่ 10 ผลลัพธ์แรงกระทำสูงสุดใน Mode I (Normal) ที่เป็นผลมาจากสมบัติวัสดุ (ก) เปรียบเทียบตามความสูงคลื่น และ (ข) เปรียบเทียบตามความยาวคลื่น

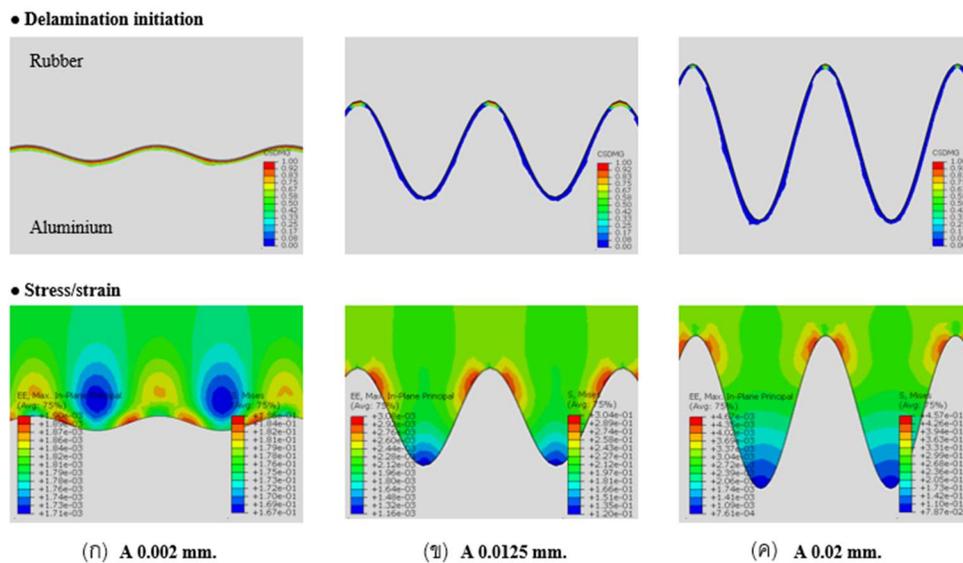
2. ความเสียหายของรอยต่อระหว่างวัสดุ

ความเสียหายจากการหลุดออกจากกันของรอยต่อระหว่างวัสดุ (interfacial delamination) ขึ้นอยู่กับรูปร่างของคลื่นจากการส่งผ่านแบบจำลองที่วัสดุขงมีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 100 MPa ดังแสดงใน รูปที่ 11 และ รูปที่ 12 ซึ่งแสดงการหลุดออกของรอยต่อและการกระจายตัวของความเค้น-ความเครียดในเนื้อวัสดุ นั้นชี้ให้เห็นว่าโดยปกติแล้วจุดเริ่มต้นของการหลุดของรอยต่อ (delamination initiation) มักจะเกิดที่ปลายยอดของวัสดุที่แข็งกว่า (ยอดคลื่น) และลามตามรอยต่อของวัสดุไปยังบริเวณอื่นจนกระทั่งหลุดออกอย่างสมบูรณ์ (completed delamination) เนื่องจากปลายยอดของวัสดุแข็งจะเป็นจุดที่มีความ

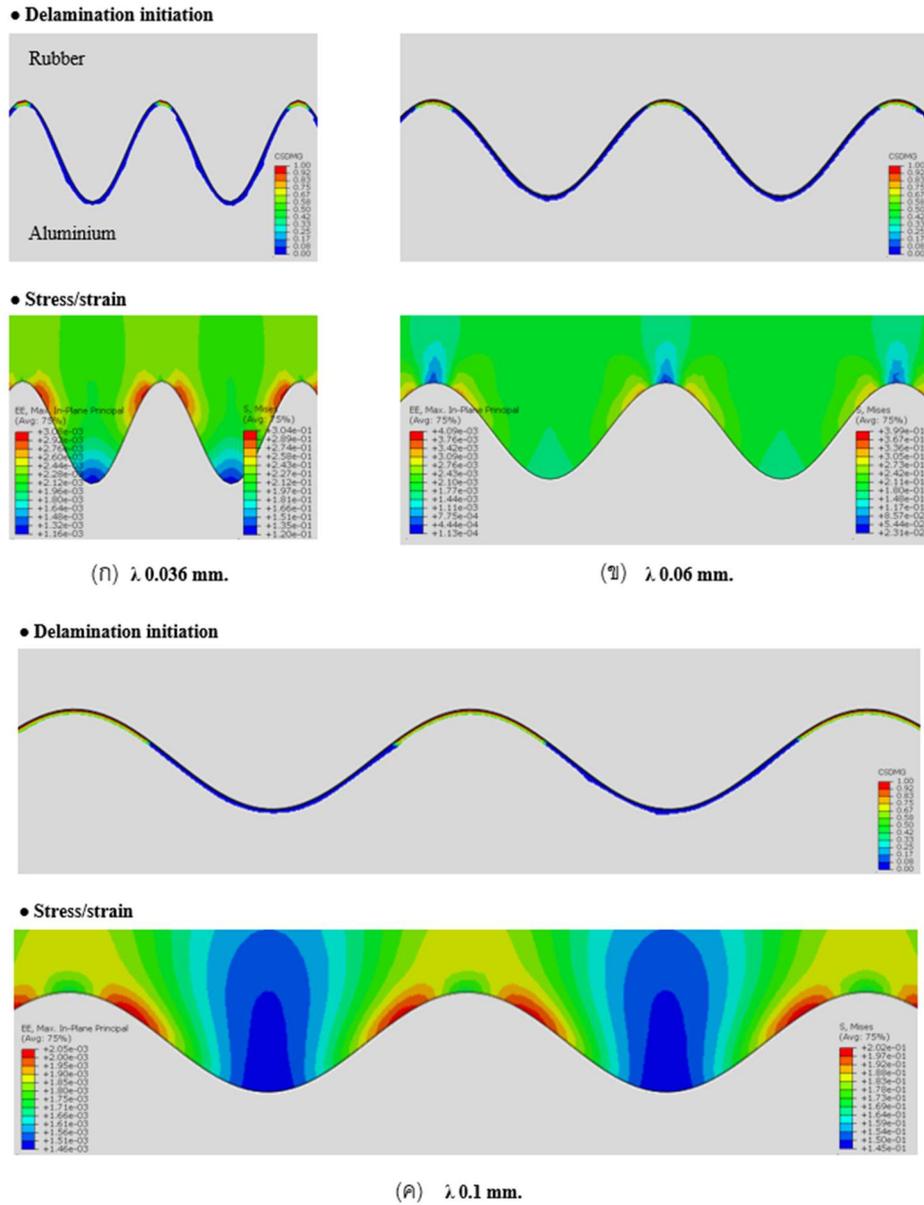
หนาแน่นของความเค้น (stress concentration) ดังนั้นเมื่อมีแรงกระทำ ความเค้นบริเวณปลายยอดคลื่นจะกระจายตัวและส่งผลกระทบต่อบริเวณต่อทำให้เกิดการหลุดออกดังกล่าว

ในกรณีที่ความหยาบพื้นผิวของโลหะมีมากซึ่งหมายถึงมีความสูงคลื่นมากขึ้นทำให้ยอดคลื่นมีลักษณะเป็นมุมแหลมซึ่งส่งผลต่อทิศทางแรงที่กระทำก็บรรอยต่อเป็นแบบผสม (mixed mode) ผนวกกับการเพิ่มขึ้นของความสูงคลื่นทำให้พื้นที่ยึดติดมากขึ้นซึ่งมีผลทำให้สามารถต้านทานต่อการหลุดออกได้มากขึ้นดังอธิบายโดย Nusom et al. [18] ในขณะที่การลดลงของความยาวคลื่นก็เป็นการทำให้มุมยอดคลื่นลดลงเช่นกันจึงเป็นสาเหตุให้มีแรงยึดติดระหว่างวัสดุเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

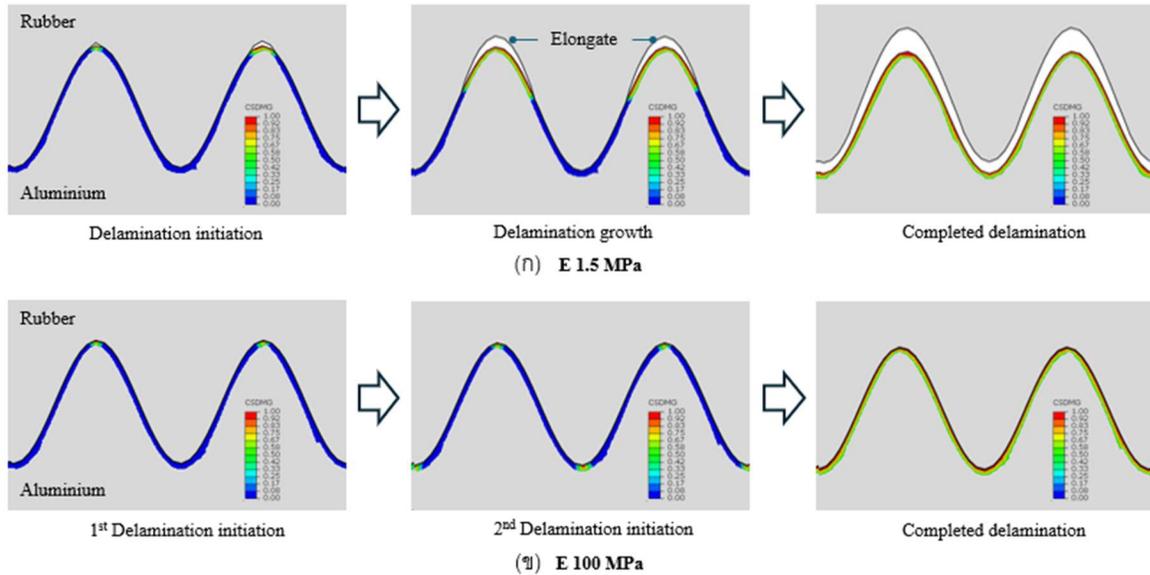
จากรูปที่ 13 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของการหลุดออกของรอยต่อระหว่างวัสดุเมื่อวัสดุขงมีสมบัติทางกลแตกต่างกัน ในที่นี้เป็นการเปรียบเทียบขงที่มีความอ่อนตัวมากขงเช่นมีมอดูลัสขงสภาพยืดหยุ่น $E = 1.5 \text{ MPa}$ และขงที่มีความแข็ง $E = 100 \text{ MPa}$ ในวัสดุขงที่มีความอ่อนมกขง ยางจะสมารถยึดตัวได้ดี ในจุดขงที่มีแรงกระทำมกขง ยางจะเกิดการยึดตัวเยาะกว่บริเวณอื่นและทำให้ความเค้นกระจายได้ไม่ดีและส่งผลให้ความเค้นเกิดการสะสมตัวมกขงในบางจุด ซึ่งจากการอธิบายในก่อนหน้าความเค้นจะเกิดการสะสมอยู่บริเวณปลายยอดคลื่นและทำให้เกิดการเริ่มต้นขงการหลุดออก (delamination initiation) ดังนั้นวัสดุขงที่อ่อนกว่จึงสมารถเกิดการเริ่มต้นการหลุดออกได้ง่ายกว่วัสดุแข็งซึ่งสมารถกระจายความเค้นได้ดีกว่ หลังจากขงที่ยางหลุดออกจากรอยยึดติดแล้วขงที่มีความอ่อนตัวมกขงจะเกิดการยึดตัวเป็นอย่งมกขงซึ่งทำให้เกิดการตั้งรับบริเวณรอยต่อขงเกิดการหลุดออกในช่วงต้นจนเกิดการลาม (delamination growth) จนกระทั่งหลุดออกโดยสมบูรณ์ (completed lamination) ดังแสดงในรูปขงที่ 13 (ก) ส่วนในวัสดุขงที่มีความแข็งกว่ดังแสดงในรูปขงที่ 13 (ข) จะเห็นว่าขงจะมีการยึดตัวขงที่ต่ำมกขง การจะกระจายตัวขงความเค้นขงที่ตีทำให้สมารถส่งต่อแรงกระทำไปขงรอยต่อขงวัสดุได้ใกล้เคียงกันจึงทำรอยต่อขงมีความแข็งแรงและยากต่อขงการหลุดออกได้ดีกว่วัสดุขงที่อ่อนตัวกว่



รูปที่ 11 แสดงการหลุดออกของรอยต่อระหว่างวัสดุและการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดสูงสุดที่มีความสูงคลื่นแตกต่างกันเมื่อความยาวคลื่นมีขนาด 0.034 mm และวัสดุขงมีค่ามอดูลัสขงสภาพยืดหยุ่น 100 MPa (ก) A 0.002 mm., (ข) A 0.0125 mm. และ (ค) A 0.02 mm.



รูปที่ 12 แสดงการหลุดออกของรอยต่อระหว่างวัสดุและการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดสูงสุดที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันเมื่อความสูงคลื่นมีขนาด 0.0125 mm และวัสดุยางมีค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 100 MPa (ก) λ 0.002 mm., (ข) λ 0.0125 mm. และ (ค) λ 0.02 mm.



รูปที่ 13 ผลลัพธ์จากแบบจำลองแสดงพฤติกรรมการหลุดออกของรอยต่อระหว่างวัสดุเมื่อวัสดุมีสมบัติทางกลแตกต่างกัน (ก) E 1.5 MPa และ (ข) E 100 MPa

สรุปผลการวิจัย

วัสดุยางที่มีค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นที่ต่ำกว่า 20 MPa การเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวจะไม่ส่งผลต่อแรงยึดติดระหว่างวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่มอดูลัสสูงกว่า 50 MPa นั้นแรงยึดติดจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความหยาบผิวมากขึ้น ซึ่งเมื่อมีมอดูลัส 1000 MPa ความแข็งแรงรอยต่อจะเพิ่มขึ้น 152% เมื่อความสูงคลื่นเพิ่มจาก 0.002 เป็น 0.02 mm. ในส่วนของความยาวคลื่นนั้นมีผลกระทบต่อแรงยึดติดเช่นกัน กล่าวคือเมื่อความยาวคลื่นสั้นลงทำให้ประสิทธิภาพการยึดติดของวัสดุยิ่งเพิ่มมากขึ้น ซึ่งความแตกต่างมากที่สุดเกิดขึ้นเมื่อวัสดุยางมีมอดูลัสของยืดหยุ่นสูงสุดคือที่ 1000 MPa โดยมีความแตกต่างประมาณ 325% เมื่อความยาวคลื่นถูกลดจาก 0.1 mm. เป็น 0.01 mm. ซึ่งจากการสังเกตจากผลที่ได้จากแบบจำลองวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยทำให้เกิดการยึดตัวในแต่ละจุดไม่เท่ากันส่งผลให้เกิดการสะสมของความเค้นบริเวณรอยต่อเฉพาะจุดและทำให้เกิดการหลุดออกของรอยต่อบริเวณนั้นๆได้ง่าย ในขณะที่วัสดุที่แข็งแรงกว่าสามารถกระจายความเค้นได้ดีกว่าจึงทำให้มีความแข็งแรงรอยต่อที่มากกว่า ซึ่งหากพิจารณาโดยที่คลื่นไซน์ที่มีความสูงคลื่นขนาด 0.02 mm. และความยาวคลื่นขนาด 0.034 เมื่อวัสดุมีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 1000 MPa จะทำให้แรงยึดติดเพิ่มขึ้นถึง 421%

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาปัจจัยในการยึดติดระหว่างวัสดุเบื้องต้นเพื่อให้เห็นผลกระทบจากรูปแบบพื้นผิวโลหะโดยใช้คลื่นรูปไซน์เป็นตัวแทนความหยาบผิว อย่างไรก็ตามลักษณะผิวโลหะจริงนั้นจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งอาจทำให้ผลการศึกษาเกิดการคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นการวิจัยในครั้งต่อไปควรมีการทดสอบการยึดติดและสร้างแบบจำลองจากผิวชิ้นงานจริงเพื่อเปรียบเทียบ รวมถึงพิจารณาคลื่นรูปแบบอื่นในการศึกษาเพื่อให้เห็นทิศทางในการปรับปรุงรูปแบบพื้นผิวโลหะให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการยึดติดกับวัสดุยาง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของ “โครงการวิจัยการออกแบบพื้นผิวโลหะสำหรับยึดติดทางกายภาพกับยางธรรมชาติคอมโพสิตและเทอร์โมพลาสติกยางธรรมชาติเพื่อไม่ใช้ตัวประสาน” ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย ประจำปีงบประมาณ 2567 ตามสัญญาเลขที่ 008/2567

เอกสารอ้างอิง

- [1] Pan, W., Sun, L., Mu, A., & Lv, W. (2023). Interface constitutive modeling and failure propagation mechanisms of integrated polymer–metal hybrid (PMH) structures. *Composite Structures*, 306, 116593.
- [2] Jespersen, K. M., Ota, H., Harada, K., Hosoi, A., & Kawada, H. (2020). Experimental measurement of mode-I fracture toughness of dissimilar material joints with thermal residual stresses. *Engineering Fracture Mechanics*, 238, 107249.
- [3] Ji, C., Wang, B., Hu, J., Zhang, C., & Sun, Y. (2020). Effect of different preparation methods on mechanical behaviors of carbon fiber-reinforced PEEK–titanium hybrid laminates. *Polymer Testing*, 85, 106462.
- [4] Wannapa, N., & Uthaisangskuk, V. (2020). Experimental and numerical failure analyses of dissimilar material joints between aluminium and thermoplastic. *Composite Structures*, 252, 112762.
- [5] Tan, C., Su, J., Feng, Z., Liu, Y., Chen, B., & Song, X. (2021). Laser joining of CFRTP to titanium alloy via laser surface texturing. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34, 103–114.
- [6] Karpenko, M., Prentkovskis, O., & Skačkauskas, P. (2023). Comparison analysis between pneumatic and airless tires by computational modelling for avoiding road traffic accidents. In *Reliability and statistics in transportation and communication* (pp. 295–305). Springer International Publishing.
- [7] Vishal Rubber. (n.d.). Rubber to metal bonded parts. <https://www.vishalrubber.com/products/rubber-to-metal-bonded-parts/28>
- [8] Ormsuptave, N., & Uthaisangskuk, V. (2017). Modeling of bake-hardening effect for fine grain bainite-aided dual phase steel. *Materials & Design*, 118, 314–329.
- [9] Srithananan, P., Kaewtatip, P., & Uthaisangskuk, V. (2016). Micromechanics-based modeling of stress–strain and fracture behavior of heat-treated boron steels for hot stamping process. *Materials Science and Engineering: A*, 667, 61–76.
- [10] O’Dwyer, D. J., O’Dowd, N. P., & McCarthy, C. T. (2013). Micromechanical investigation of damage processes at composite–adhesive interfaces. *Composites Science and Technology*, 86, 61–69.
- [11] Hirsch, F., & Kästner, M. (2017). Microscale simulation of adhesive and cohesive failure in rough interfaces. *Engineering Fracture Mechanics*, 178, 416–432.
- [12] Hirsch, F., Natkowski, E., & Kästner, M. (2021). Modeling and simulation of interface failure in metal–composite hybrids. *Composites Science and Technology*, 214, 108965.
- [13] Teague, E. C., Scire, F. E., & Vorburger, T. V. (1982). Sinusoidal profile precision roughness specimens. *Wear*, 83, 61–73.
- [14] Vorburger, T. V., Gilsinn, D. E., Scire, F. E., McLay, M. J., Giaque, C. H. W., & Teague, E. C. (1986). Optical measurement of the roughness of sinusoidal surfaces. *Wear*, 109, 15–27.
- [15] Zhang, S., Xu, Y., & Zhang, W. (2023). Experimental and numerical study on the influence of cure process on the bridging traction mechanism of z-pins. *International Journal of Mechanical Sciences*, 245, 108096.