

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุเชิงประกอบ (Composite Material)

2.1.1 ความหมายของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบ คือ ระบบของวัสดุที่ประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนหรือมากกว่า มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ วัสดุหลักและสารเสริมแรง [12] สำหรับความหมายเชิงวิศวกรรมของวัสดุเชิงประกอบ หมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปโดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้น การทำนายหรือคาดคะเนสมบัติของวัสดุเชิงประกอบจึงไม่สามารถทำนายได้จากวัสดุที่เป็นองค์ประกอบชนิดใดเพียงชนิดเดียว [13] วัสดุเชิงประกอบ ประกอบด้วย

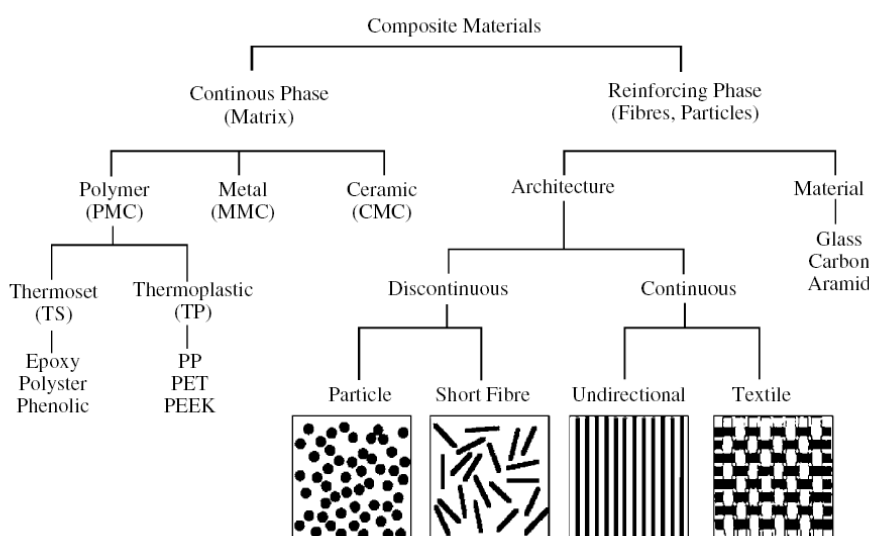
- วัสดุหลัก (Matrix) หรือเนื้อพื้น เป็นส่วนที่เป็นเฟสหลัก ที่ห่อหุ้มและยึดส่วนที่เป็นสารตัวเติม (Filler) เข้าด้วยกัน รวมทั้งป้องกันไม่ให้สารตัวเติมเสียสภาพอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อม วัสดุหลักเป็นเฟสต่อเนื่อง ทำหน้าที่ถ่ายเทแรงที่ได้รับไปยังส่วนเสริมแรง วัสดุหลักมักจะมีความแข็งแรงต่ำกว่าสารเสริมแรง [12]

- สารตัวเติม (Filler) เป็นส่วนที่ให้ความแข็งแรงกับวัสดุเชิงประกอบหรือปรับปรุงสมบัติด้านอื่นๆตามสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นสารตัวเติม สมบัติของวัสดุเชิงประกอบจะขึ้นอยู่กับสมบัติ ปริมาณ และลักษณะทางกายภาพของสารตัวเติม ซึ่งสามารถมีได้หลายลักษณะ อาทิเช่น เส้นใยแบบสั้น เส้นใยแบบยาว แบบอนุภาค แบบแผ่น หรืออาจจะมีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน โดยสารตัวเติมเหล่านี้จะมีโครงสร้างและการจัดเรียงตัวของสารเสริมแรงแตกต่างกันไป [12] ในส่วนของสารตัวเติม สามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้ [14]

1. จำแนกตามรูปร่างของสารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นอนุภาค เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา ทัลก์ สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใยเช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เป็นต้น
2. จำแนกตามประเภทของสารเคมี เช่น สารตัวเติมประเภทสารอินทรีย์ สารตัวเติมประเภทสารอนินทรีย์ เป็นต้น
3. จำแนกตามความสามารถในการช่วยปรับปรุงสมบัติ เช่น สารตัวเติมประเภทที่ช่วยเสริมความแข็งแรง (Reinforcement) หรือช่วยเพิ่มความสามารถในการนำความร้อน เช่น ซิลิกา อะลูมินา เป็นต้น

2.1.2 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบสามารถจำแนกตามชนิดของวัสดุหลักออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composite, PMC) วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal Matrix Composite, MMC) และ วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic Matrix Composite, CMC) และสามารถจำแนกย่อยต่อไปได้อีกตามลักษณะของสารเสริมแรงได้แก่ สารเสริมแรงที่เป็นอนุภาค (Particle) โดยอนุภาคเสริมแรงจะมีลักษณะเป็นเม็ดหรือผง เช่น ผงถ่านดำ และ ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น และสารเสริมแรงที่เป็นเส้นใย (Fiber) [15] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 สารเสริมแรงที่เป็นเส้นใยใช้การพิจารณาอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect Ratio) โดยต้องมีอัตราส่วนดังกล่าวมากกว่า 100 ขึ้นไป [16] สารเสริมแรงที่เป็นเส้นใยอาจจำแนกตามความยาวเป็นเส้นใยต่อเนื่อง (Continuous Fiber) และเส้นใยไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Fiber) และยังสามารถจำแนกเส้นใยไม่ต่อเนื่องด้วยอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางได้เป็นเส้นใยยาว (Long Fiber) ซึ่งมีอัตราส่วนมากกว่า 1,000 ขึ้นไป และเส้นใยสั้น (Short Fiber) ซึ่งมีอัตราส่วนน้อยกว่า 1,000 [17] เส้นใยมีทั้งที่เป็นเส้นใยอินทรีย์และเส้นใยอนินทรีย์ ตัวอย่างเส้นใยอินทรีย์เช่น เส้นใยอะรามิด เส้นใยเซลลูโลสเป็นต้น ส่วนเส้นใยอนินทรีย์อาจเป็นเส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน หรือเส้นใยโลหะ (เส้นใยโลหะเช่น เส้นใยโบรอน เส้นใยทองแดง เป็นต้น) ส่วนวิสเกอร์ (Whisker) เป็นลักษณะของเส้นใยขนาดเล็กมากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในหน่วยไมโครเมตรและความยาวเพียงไม่กี่มิลลิเมตร ซึ่งเกิดจากการก่อตัวทางยาวของผลึกเดี่ยว (Elongated Single Crystal) จึงมีแนวโน้มที่จะเป็นผลึกสมบูรณ์ที่ปราศจากดิสโลเคชัน (Dislocation) ทำให้วิสเกอร์มีความแข็งแรงสูงมาก เช่น วิสเกอร์ซิลิกอนคาร์ไบด์ [16] เป็นต้น ในที่นี้จะขออธิบายถึงเนื้อพื้น และสารตัวเติมในประเภทที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย นั่นคือ เนื้อพื้นพอลิเมอร์ และสารตัวเติมชนิดอนุภาค



รูปที่ 2.1 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของวัสดุหลักและลักษณะของสารตัวเติม [18]

2.1.2.1 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composite, PMC)

วัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิเมอร์เป็นเนื้อพื้น ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีสมบัติที่ดีที่อุณหภูมิห้อง ง่ายต่อการผลิต และมีราคาถูกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบชนิดอื่น ในวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์นั้นพอลิเมอร์จะต้องประสานและเข้ากันได้ดีกับสารตัวเติม หรือสารเสริมแรง เพื่อที่จะทำหน้าที่ในการโอนถ่ายแรงหรือความเค้นภายนอกกระจายไปสู่สารตัวเติม หรือสารเสริมแรง โดยตัวพอลิเมอร์จะรับแรงกระทำเพียงเล็กน้อยเท่านั้น [15] ข้อดีของพอลิเมอร์ในงานด้านการสึกหรอคือ พอลิเมอร์ส่วนใหญ่มีความสามารถในการหล่อลื่นตัวเอง มีน้ำหนักเบา มีความต้านทานต่อการกัดกร่อน ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน [19] ในที่นี้งานวิจัยได้ใช้วัสดุเนื้อพื้นเป็นพอลิเมอร์ชนิดพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนซึ่งจะอธิบายลักษณะทั่วไปของพอลิเมอร์ชนิดนี้ในหัวข้อ 2.2.1

2.1.2.2 สารตัวเติมชนิดอนุภาค

สารตัวเติมชนิดอนุภาคที่ได้เข้าไปในพอลิเมอร์ช่วยเพิ่มสมบัติทางไตรโบโลยีและมีผลในการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเชิงกล วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่เติมสารตัวเติมประเภทนี้มักจะนิยมนำมาขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูป มีการศึกษาสมบัติทางไตรโบโลยีของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่เติมสารตัวเติมแบบอนุภาคอย่างกว้างขวาง โดยได้แบ่งตามลักษณะของสารตัวเติมได้ 2 ประเภท [20] ได้แก่ การเติมสารตัวเติมวัสดุที่แข็งลงในวัสดุหลักที่มีความอ่อนนุ่ม (Hard and Strong Phases in a Soft Matrix) และการเติมสารตัวเติมเป็นวัสดุที่อ่อนนุ่มหรือมีสมบัติเป็นสารหล่อลื่นในวัสดุหลักที่มีความแข็ง (Soft and Lubricating Phases in a Harder Matrix) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การเติมวัสดุที่แข็งลงในวัสดุหลักที่มีความอ่อนนุ่ม

การเติมวัสดุที่แข็งลงในวัสดุหลักที่มีความอ่อนนุ่ม ยกตัวอย่างเช่น วัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (เส้นใยแก้ว (Glass Fiber; GF), เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber; CF), เส้นใยอะรามิด (Aramid Fiber; AF)) หรือวัสดุประเภทเซรามิกส์ที่มีลักษณะเป็นอนุภาค (อะลูมิเนียมออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ เป็นต้น) ซึ่งเป็นวัสดุที่แข็งลงไปใน PTFE, Polyamides (Nylon), Polyetheretherketone (PEEK) เป็นต้น การเติมวัสดุในลักษณะนี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรง (Stiffness) ให้กับวัสดุเชิงประกอบ ส่วนสมบัติทางไตรโบโลยีนั้นพบว่า อัตราการสึกหรอจะมีค่าลดลงเนื่องจากวัสดุที่แข็งเมื่อกระจายตัวในเนื้อวัสดุหลักจะช่วยรับแรงกระทำแทนวัสดุหลักขณะได้รับแรงกด ซึ่งสารตัวเติมดังกล่าวจะมีความแข็งและค่ามอดุลัสที่มากกว่าวัสดุหลัก สารตัวเติมเหล่านี้จะยับยั้งการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของวัสดุหลักที่อยู่ใกล้อนุภาคและวัสดุหลักจะส่งผ่านแรงหรือความเค้นเข้าสู่อนุภาคสารตัวเติม ส่วนความเสียหายจะถูกควบคุมด้วยค่าความเสียหายของวัสดุหลัก

2. การเติมวัสดุที่อ่อนนุ่มหรือมีสมบัติเป็นสารหล่อลื่นในวัสดุหลักที่มีความแข็ง

การเติมวัสดุประเภทนี้ลงไปวัสดุหลักมีวัตถุประสงค์เพื่อให้วัสดุหลักที่ทำการเติมวัสดุที่อ่อนนุ่มลงไปลดแรงเสียดทานจากวัสดุคู่สัมผัส หรือช่วยเพิ่มสมบัติการหล่อลื่นให้กับวัสดุหลัก การเติมสารตัวเติมลักษณะนี้ส่วนมากแล้วไม่จำเป็นที่จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้วัสดุหลัก วัสดุอ่อนนุ่มได้แก่ การเติม PTFE และแกรไฟต์ ลงใน Polyetheretherketone (PEEK) และ Polyamides (Nylon) เป็นต้น ซึ่งข้อดีของการเติมวัสดุที่อ่อนนุ่มหรือมีสมบัติเป็นสารหล่อลื่น คือการลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ส่วนอัตราการสึกหรอจะมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนที่เติมลงไปวัสดุหลักอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม

อย่างไรก็ตามระดับความสามารถในการเสริมแรงหรือปรับปรุงสมบัติทางกลจะขึ้นอยู่กับการยึดเกาะที่แข็งแรงระหว่างรอยต่อของสารตัวเติมและพอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุหลัก และยังขึ้นอยู่กับการกระจายตัวและปริมาณของสารตัวเติมอนุภาค ซึ่งได้กล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อ 2.4.1.2 ในที่นี้งานวิจัยได้ใช้สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นอนุภาค นั่นคือ อนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ในหัวข้อ 2.2.2 และ 2.2.3

2.1.3 การยึดเกาะระหว่างวัสดุหลักและสารตัวเติมของวัสดุเชิงประกอบ

ในวัสดุเชิงประกอบ การยึดเกาะกันระหว่างวัสดุหลักและสารตัวเติมที่บริเวณผิวสัมผัสสามารถยึดเกาะกันด้วยกลไกหลัก 5 กลไก ดังต่อไปนี้

2.1.3.1 การดูดซับ และการเปียก (Adsorption and Wetting)

เกิดเมื่อพื้นผิว 2 พื้นผิวที่ไม่มีประจุไฟฟ้าอยู่ใกล้กันมากพอจะเกิดแรงดึงดูดเชิงกล เช่น การเปียกของของเหลวบนพื้นของแข็ง ในกรณีของของแข็ง 2 ชนิดอยู่ใกล้กันมากในระดับจุลภาค ความขรุขระของพื้นผิวจะขัดขวางไม่ให้เกิดการยึดเกาะ ในความเป็นจริงแรงนี้จะมีค่าต่ำมาก เนื่องจากพื้นผิวของสารเสริมแรงอาจสกปรก หรือเกิดการหลุดตัวของวัสดุหลักทำให้เกิดช่องว่างระหว่างวัสดุหลักและสารเสริมแรงการเปียกนั้นส่งผลทำให้ค่าพลังงานอิสระ (Free Energy) ของระบบลดลง [21]

2.1.3.2 การแพร่เข้าหากัน (Interdiffusion)

การยึดเกาะของพื้นผิวพอลิเมอร์สามารถเกิดได้ ถ้าโมเลกุลพอลิเมอร์ที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสมีการแพร่เข้าหากัน โดยความแข็งแรงในการยึดเกาะจะขึ้นกับปริมาณการพันกันของสายโซ่โมเลกุล การใช้ตัวทำละลายทาที่บริเวณพื้นผิวทำให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ไต่อย่างขึ้นและมีความสามารถในการแพร่เข้าหากันเพิ่มขึ้น เกิดการพันกันของสายโซ่โมเลกุลมากขึ้น ทำให้มีความแข็งแรงในการยึดเกาะสูง กลไกการยึดเกาะนี้สามารถเกิดกับสารเสริมแรงที่มีการปรับปรุงพื้นผิวก่อนการผสมกับวัสดุหลัก ไม่เกิดกับวัสดุเชิงประกอบที่มีพื้นผิวของสารเสริมแรงแข็งที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล [22]

2.1.3.3 แรงดึงดูดของประจุหรือไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Attraction)

เกิดเมื่อพื้นผิวสองชนิดที่มีประจุต่างกันมาอยู่ใกล้กัน ความแข็งแรงของการยึดเกาะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของประจุ แรงดึงดูดชนิดนี้ไม่ใช่แรงยึดเกาะหลัก แต่เกิดร่วมกับกลไกการยึดเกาะประเภทอื่นช่วยให้เกิดการยึดเกาะดีขึ้น [23]

2.1.3.4 พันธะเคมี (Chemical Bonding)

เกิดเมื่อสารเสริมแรงที่เติมเข้าไปมีหมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวและวัสดุหลักมีหมู่ฟังก์ชันเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมี ก่อให้เกิดเป็นพันธะเคมีที่เป็นการยึดเกาะที่แข็งแรง ซึ่งความแข็งแรงจะขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนของพันธะที่เกิดขึ้น [24]

2.1.3.5 การยึดเกาะทางกล (Mechanical Interlocking)

เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูป กล่าวคือวัสดุหลักอยู่ในสภาพของไหลสามารถที่จะแทรกตัวไปตามพื้นผิวที่ขรุขระหรือช่องว่างของสารเสริมแรงแล้วแข็งติดอยู่กับพื้นผิวของสารเสริมแรง โดยความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับความสามารถในการเปียกผิว ความสามารถในการแทรกตัวของวัสดุหลัก และความขรุขระของผิวสารเสริมแรง [25]

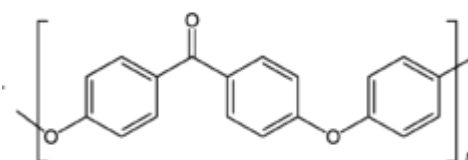
2.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2.2.1 พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (Polyetheretherketone ; PEEK)

พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนเป็นวัสดุพอลิเมอร์กึ่งผลึก ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางเนื่องจากมีคุณสมบัติที่สำคัญ นั่นคือ มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี ได้แก่ มีความแข็งแรงและความเหนียวสูง ทนต่อความล้าได้ดี มีสมบัติทางความร้อนที่ดี ทนต่อสารเคมี มีอัตราการคืบต่ำ ๓ อุณหภูมิมากกว่า 250 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 2.1 มีความต้านทานต่อการสึกหรอสูง และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ [2, 26-27] ซึ่งโครงสร้างทางเคมีจะแสดงในรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 สมบัติของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน [28]

Properties	Unit	PEEK
Density	kg/m ³	1320
Young's Modulus	GPa	3.6
Tensile Strength	MPa	90-100
Notch Test	kJ/m ²	55
Glass Temperature	°C	143
Melting Point	°C	343



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน [28]

จากสมบัติที่กล่าวมาพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ทำเป็นแบร็ง และวงแหวนลูกสูบ และนำมาใช้แทนชิ้นส่วนโลหะในอุตสาหกรรมยานยนต์ เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอ อีกทั้งยังมีน้ำหนักเบา และขึ้นรูปง่ายกว่าโลหะ [29] นอกจากนี้นำมาใช้งานด้านป้องกันการกัดกร่อน พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ไม่ได้เติมสารเสริมแรงนิยมใช้เป็นวัสดุที่เป็นฉนวนสำหรับสายเคเบิล ท่อน้ำ เพราะทนต่ออุณหภูมิที่สูงและทนต่อการกัดกร่อนได้ดี [30] อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความแข็งแรง โดยการเติมสารตัวเติมต่างๆ ลงไปด้วย อาทิเช่น เส้นใยคาร์บอน อะลูมิเนียมออกไซด์ แกรไฟต์ เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และซิลิคอนไดออกไซด์ เป็นต้น [3-7]

2.2.2 เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ (Hexagonal Boron Nitride ; h-BN)

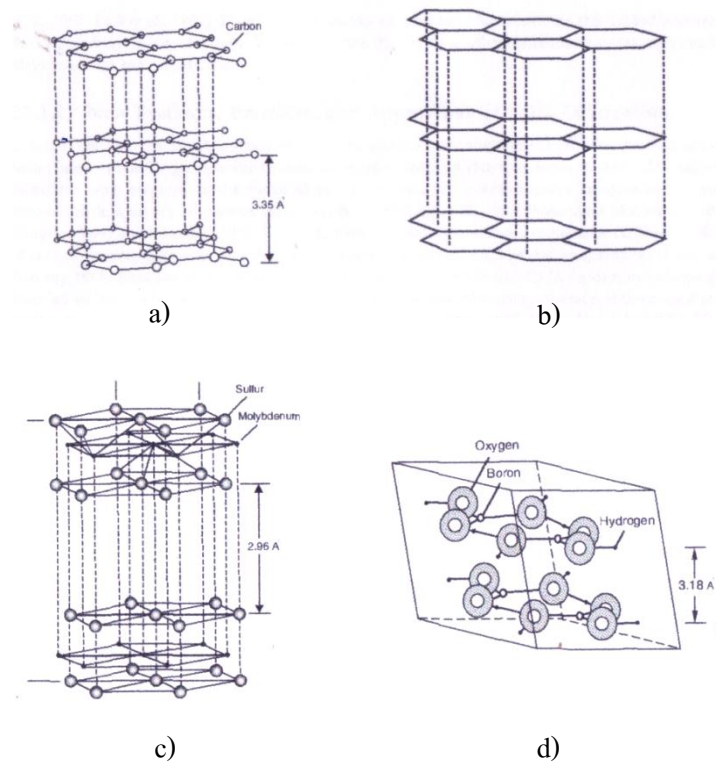
โบรอนไนไตรด์เป็นวัสดุประเภทเซรามิกมีโครงสร้างผลึก 2 แบบ คือ คิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Cubic Boron Nitride, c-BN) และ เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ (Hexagonal Boron Nitride, h-BN) เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) คล้ายกับโครงสร้างของแกรไฟต์ดังแสดงในรูปที่ 2.5b โดยจะมีโครงสร้างเป็นแบบชั้นๆ ของโครงตาข่ายวงแหวน (BN)₃ ภายในชั้นโบรอนและไนโตรเจนจะยึดเกาะกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ และระหว่างชั้น

ของโบรอนและไนโตรเจนจะยึดเกาะกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ซึ่งเป็นแรงยึดเกาะระหว่างพันธะอย่างอ่อนๆ จึงง่ายต่อการลื่นไถลเมื่อมีวัสดุอื่นมาเคลื่อนที่สัมผัสทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำโดยมีค่าประมาณ 0.2 – 0.3 เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิไม่เกิน 700 องศาเซลเซียส แต่โดยทั่วไปแล้วนั้นเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์สามารถใช้งานได้โดยยังคงสภาพความเป็นสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิสูงถึง 1000 องศาเซลเซียส [8,9,31] เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์มีสีขาวจึงเรียกว่าแกรไฟต์ขาว (White Graphite) และด้วยเหตุที่เป็นสีขาวนี้เองเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์จึงถูกเรียกว่าเป็น “Clean Lubricant” และถูกนำมาใช้แทนแกรไฟต์และโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในงานที่ต้องการความสะอาด โบรอนไนไตรด์จะผลิตจากการเกิดปฏิกิริยาของ B_2O_3 กับยูเรียหรือก๊าซแอมโมเนีย ที่อุณหภูมิสูงโดยเกรดที่ได้จากการผลิตจะแตกต่างกันไปตามปัจจัยที่ใช้ในการผลิต อาทิ เกรด Turbostatic, Quasi-Turbostatic, Meso-Graphitic และ Graphitic ซึ่งเกรดที่มีสมบัติเป็นสารหล่อลื่นคือ เกรด Graphitic ซึ่งจะเป็นผงที่มีความละเอียดสูง มีความบริสุทธิ์มากที่สุด มีความสามารถในการหล่อลื่นได้

h-BN สามารถอัดตัวกันให้มีความหนาแน่นมากขึ้นเป็นก้อนของแข็งโดยการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนหรือสามารถใช้ผสมลงเป็นโครงสร้างร่วมกับวัสดุเชิงประกอบ [8] งานวิจัยของ Westergard และคณะ [32] ได้ศึกษาสมบัติทางไทรโบโลยีของวัสดุเชิงประกอบ Si_3N_4/SiC โดยเติม h-BN ในปริมาณร้อยละ 0-8 โดยน้ำหนัก ทำการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน พบว่า h-BN ช่วยให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลงจาก 0.4-0.9 เป็น 0.02-0.1 จากการวิเคราะห์พบว่าขณะที่เกิดการไถลบนผิววัสดุ ผิววัสดุจะเกิดไทรโบฟิล์มที่บาง (Tribofilm) ปกคลุมผิววัสดุซึ่งเป็นส่วนที่ช่วยปรับปรุงสมบัติทางไทรโบโลยี นอกจากนั้นยังสามารถใช้เทคนิคการเคลือบด้วยเปลวพลาสมา ทำการสร้างผิวเคลือบที่มีสมบัติเป็นสารหล่อลื่นในตัว ในปัจจุบันโดยการนำผง h-BN มาผสมกับ Ni แล้วนำไปเคลือบเพื่อให้ได้ผิวเคลือบที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำ และทนต่อการสึกหรอภายใต้สภาวะที่ไม่มีสารหล่อลื่น แรงกดสูงและอุณหภูมิสูง [33] Kimura และคณะ [10] ได้ศึกษาการใช้ h-BN เป็นสารตัวเติมในน้ำมัน (Oils) และจาระบี (Greases) พบว่า การเติม h-BN ในปริมาณเล็กน้อยเพียงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก จะส่งผลทำให้การสึกหรอของแบร้งเหล็กที่เคลื่อนที่สัมผัสกันมีค่าลดลง และถ้าเพิ่มปริมาณ h-BN ขึ้นก็จะสามารถลดการสึกหรอได้มากขึ้นด้วย เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Denton [34] ที่เติม h-BN ลงในจาระบีทำให้ลดการสึกหรอและความเสียดทาน

Buckley [35] ได้ศึกษาสภาพความเป็นสารหล่อลื่นของ h-BN ในสภาวะทดสอบต่างๆ พบว่า h-BN จะสูญเสียสภาพความเป็นสารหล่อลื่นเมื่อทำการทดสอบการลื่นไถลในสภาวะสุญญากาศ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 1 จากนั้นเมื่อทำการเติมอากาศในเข้าไปในระบบทดสอบ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าลดลงเท่ากับ 0.2 Donet และคณะ [36] ได้ทดสอบในสภาวะ

สูญญากาศเช่นกัน ภายใต้แรงดัน (10^{-8} Pa) ที่มีการเติม CO, C₃H₈, H₂O, อากาศที่มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นเท่ากับ 50, N₂ และ O₂ พบว่าการทดสอบในสภาวะดังกล่าวมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.1-0.7 ดังแสดงในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของสารหล่อลื่นของแข็งที่มีโครงสร้างแบบชั้น a) Graphite

b) Hexagonal Boron Nitride c) Molybdenum Disulfide d) Boric Acid [8]

ตารางที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของ h-BN ในสภาวะต่างๆกัน [35, 36]

Environment	Steady-State Friction Coefficient
UHV, 10^{-8} Pa	0.6-0.7
CO, C ₃ H ₈ , H ₂ O, air (50% RH) ; 10^{-3} Pa	0.6-0.7
CO, N ₂ , O ₂ ; 10 Pa	0.6-0.7
Air (50% RH) ; 10 Pa	0.4
C ₃ H ₈ ; 10 Pa	0.4
Air (50% RH) ; 10^{-5} Pa	0.2
Air (50% RH) ; Atmospheric Pressure	0.1

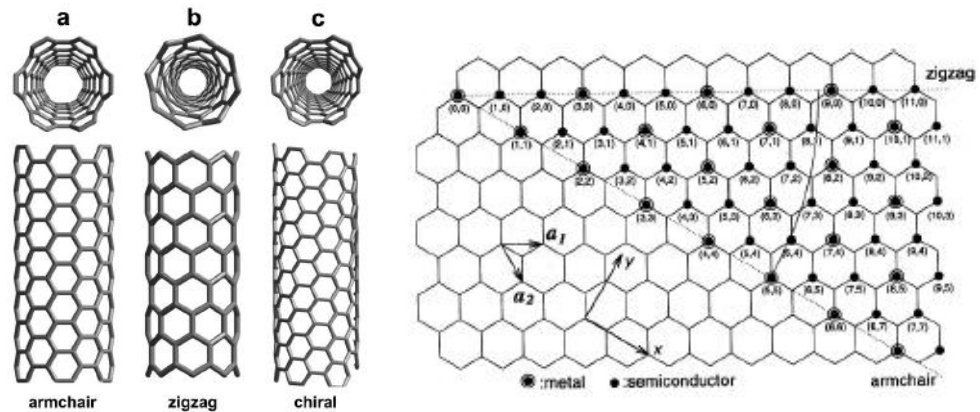
2.2.3 คาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon Nanotube ; CNT)

คาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon Nanotube) มีรูปร่างเป็นโครงตาข่ายของคาร์บอน ม้วนเชื่อมติดกันเป็นรูปทรงกระบอก และมีเส้นผ่าศูนย์กลางเพียงไม่กี่นาโนเมตร คาร์บอนนาโนทิวป์มีคุณสมบัติที่แข็งแรงและเหนียวกว่าเหล็กกล้า สามารถนำไฟฟ้า หรือกลายเป็นฉนวน (ไม่นำไฟฟ้า) ได้ ขึ้นอยู่กับทิศทางของแนวการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนบนผนังท่อคาร์บอน คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นสายไฟขนาดเล็กในเครื่องใช้ไฟฟ้า (Nanoelectronics) ใช้ทอเป็นเส้นใยที่มีความละเอียดสูงและทนทานกว่าใยเทเนียม หรือผลิตเป็นแบตเตอรี่ที่มีอายุการใช้งานนานนับสิบปี นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบา เป็นต้น โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์สามารถสังเคราะห์ได้โดยแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ แบบมีผนังชั้นเดียวหรือผนังเดี่ยว (Single Wall Carbon Nanotube : SWCNT) และแบบที่เป็นผนังหลายชั้น (Multi-wall Carbon Nanotube : MWCNT) ซึ่งคล้ายกับการเอาท่อเล็กซ้อนกันเป็นท่อใหญ่หลายๆ ชั้น [37, 38] ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ [37]

คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถพิจารณาได้จากการม้วนของแผ่นแกรไฟต์ที่พันธะด้านซ้ายมาบรรจบกับด้านขวาพอดี ลักษณะการม้วนของการม้วนเกลียวมีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ในลักษณะที่การม้วนระนาบในแนวนอน ($\theta = 0$) ท่อจะถูกเรียกว่าท่อซิกแซก (Zig-Zag) แต่หากกรณีเป็นการม้วนที่ทำมุม $\theta = 45$ และ 90 ท่อที่ได้จะถูกเรียกว่าท่อ Armchair และ Chiral ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 คาร์บอนนาโนทิวป์มีสมบัติเชิงกลที่ดีดังแสดงในตารางที่ 2.3 คาร์บอนนาโนทิวป์จึงเป็นวัสดุที่ถูกนำมาเป็นสารเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากท่อคาร์บอนนาโนทิวป์เดี่ยวๆ จะส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติที่เป็นที่ขอมรับ เนื่องด้วยมี Elastic Modulus ที่สูงและมีสมบัติต้านทานการสึกหรอและแรงเสียดทานที่ดีอีกด้วย [38, 39]



รูปที่ 2.5 การม้วนของแผ่นแกรไฟต์ [37]

ตารางที่ 2.3 สมบัติเชิงกลของคาร์บอนนาโนทิวบ์และวัสดุอื่นๆ [37]

Material	Young's modulus (GPa)	Tensile Strength (GPa)	Density (g/cm ³)
Single wall nanotube	1054.000	150.000	
Multiwall nanotube	1200.000	150.000	2.600
Steel	208.000	0.400	7.800
Epoxy	3.500	0.005	1.250
Wood	16.000	0.008	0.600

2.3 ไตรโบโลยี (Tribology)

ไตรโบโลยี (Tribology) เกิดจากคำสองคำ คือคำว่า “Tribos” ซึ่งเป็นรากศัพท์มาจากภาษากรีก หมายถึง การขัดสี หรือขัดถู และมารวมกับคำว่า “Logy” ซึ่งหมายถึง วิชา ดังนั้นคำว่า ไตรโบโลยี จึงหมายถึง วิชาที่เกี่ยวกับการศึกษาถึงการขัดสี ขัดถู ของวัสดุใดๆ โดยปกติแล้วผิวของวัสดุที่มากกว่า 2 ชนิดมีการเคลื่อนที่สัมผัสกันจะเกิดการเสียดทานระหว่างผิว ทำให้เกิดการสึกหรอ เพื่อเป็นการลดการเสียดทานและการสึกหรอที่เกิดขึ้น จึงเป็นที่มาของการหล่อลื่นและสารหล่อลื่น ดังนั้นการศึกษาวิชาไตรโบโลยี จึงเป็นการศึกษาองค์ประกอบใหญ่ๆ 3 เรื่อง ได้แก่ สารหล่อลื่น (Lubricant) แรงเสียดทาน (Friction) และ การสึกหรอ (Wear) [40] ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1 สารหล่อลื่น (Lubricant)

สารหล่อลื่น คือ สารที่นำมาใช้ทำหน้าที่หลักคือการหล่อลื่น ลดแรงเสียดทาน สารหล่อลื่นเมื่อแบ่งตามสถานะจะแบ่งได้เป็น 3 ประเภท นั่นคือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ แต่การใช้งานสารหล่อลื่น

ทางด้านไทรโบโลยีส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้สารหล่อลื่นของเหลวหรือจาระบีเพื่อลดการสึกหรอและความเสียดทาน อย่างไรก็ตามเมื่อนำสารหล่อลื่นของเหลวเหล่านั้นใช้งานในสภาวะที่รุนแรง เช่น ที่อุณหภูมิสูง สภาวะสุญญากาศ และสภาวะที่มีความเข้มข้นของรังสี หรือมีการแรงดันสูง เป็นต้น สารหล่อลื่นของเหลวจะไม่สามารถคงสภาพความหล่อลื่นได้ ดังนั้นสารหล่อลื่นของแข็ง (Solid Lubrication) จึงเป็นตัวเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้งานเพื่อลดการสึกหรอและความเสียดทาน ซึ่งข้อดีของมันคือสามารถคงสภาพได้ดีกว่าในสภาวะรุนแรงเมื่อเปรียบเทียบกับสารหล่อลื่นของเหลว ดังแสดง ความแตกต่างของสารหล่อลื่นของแข็งและของเหลวในตารางที่ 2.4 ดังนั้นสารหล่อลื่นของแข็งจึงเป็นวัสดุที่ถูกสนใจมาก นอกจากนั้นข้อดีอีกประการของสารหล่อลื่นของแข็งก็คือมีความสะอาดมากกว่าสารหล่อลื่นชนิดของเหลว [8, 41]

ตารางที่ 2.4 ความแตกต่างของสารหล่อลื่นของแข็งและของเหลว [8, 41-45]

การใช้งาน/สภาวะแวดล้อม	สารหล่อลื่นของแข็ง	สารหล่อลื่นของเหลว
ระบบสุญญากาศ	สามารถคงสภาพการเป็นสารหล่อลื่นได้ดีในสภาวะสุญญากาศหรือมีอากาศเพียงเล็กน้อย	สารหล่อลื่นของเหลวจะเกิดการระเหย (Evaporate) ยกเว้น PFPE และ PAO
ความดัน	คงสภาพความเป็นสารหล่อลื่นที่ความดันสูง	ไม่สามารถคงสภาพความเป็นสารหล่อลื่นได้ที่ความดันสูง หากไม่มีสารแต่งเติม (Additive) ชนิดอื่นร่วม
อุณหภูมิ	คงสภาพความเป็นสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิสูงและต่ำมาก และแม้กระทั่งความร้อนที่เกิดจากแรงเฉือน	ไม่สามารถคงสภาพความเป็นสารหล่อลื่นเนื่องจากเกิดการแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำมาก และเกิดการเสียดสีหรือเกิดการออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิสูงมาก
แรงเสียดทาน	มีความเป็นไปได้น้อยกว่าที่จะมีความเสียดทานที่ต่ำในทุกสภาวะ	ความเสียดทานมักจะขึ้นกับความหนืดและอุณหภูมิที่เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

ตารางที่ 2.4 ความแตกต่างของสารหล่อลื่นของแข็งและของเหลว [8, 41-45] (ต่อ)

การใช้งาน/สภาวะแวดล้อม	สารหล่อลื่นของแข็ง	สารหล่อลื่นของเหลว
การนำความร้อน	จะนำความร้อนได้ดีเมื่อเป็นสารหล่อลื่นของแข็งประเภทโลหะ แต่จะนำความร้อนได้ไม่ดีนักเมื่อเป็นสารหล่อลื่นของแข็งประเภทอโลหะหรือสารหล่อลื่นของแข็งโครงสร้างแบบชั้น	นำความร้อนได้ดีกว่า

สารหล่อลื่นของแข็งเมื่อแบ่งตามโครงสร้างจะแบ่งได้หลายประเภทดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ประเภทสารหล่อลื่นของแข็ง [8]

ประเภทสารหล่อลื่นของแข็ง	ตัวอย่าง	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ($\approx$)
สารหล่อลื่นของแข็งโครงสร้างแบบชั้น (Lamellar Solids)	MoS ₂	0.002-0.25
	WS ₂	0.01-0.2
	h-BN	0.150-0.2
	Graphite	0.07-0.5
	Graphite Fluoride	0.05-0.15
	H ₃ BO ₃	0.02-0.2
โลหะอ่อนนิ่ม (Soft Metals)	Ag	0.2-0.35
	Pb	0.15-0.2
	Au	0.2-0.3
	In	0.15-0.25
	Sn	0.2
สารประกอบออกไซด์ร่วม (Mixed Oxides)	CuO-Re ₂ O ₇	0.3-0.1
	CuO-MoO ₃	0.35-0.2
	PbO-B ₂ O ₃	0.2-0.1
	CoO-MoO ₃	0.047-0.2

ตารางที่ 2.5 ประเภทสารหล่อลื่นของแข็ง [8] (ต่อ)

ประเภทสารหล่อลื่นของแข็ง	ตัวอย่าง	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ($\approx$)
สารประกอบออกไซด์ (Single Oxides)	B_2O_3	0.1
	Re_2O_7	0.1-0.6
	MoO_3	0.2
ฮาไลด์และซัลเฟตของโลหะหมู่ 2 ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (Halides and Sulfates of Alkaline Earth Metals Carbon-based Solids)	CaF_2, BaF_2, SrF_2	0.2-0.4
	$CaSO_4, BaSO_4, SrSO_4$	0.15-0.2
	Diamond	0.02-1
	Diamond-like Carbon	0.03-0.5
	Hollow Carbon Nanotube	-
	Carbon-carbon and Carbon-graphite-based Composites	0.05-0.3
วัสดุอินทรีย์/พอลิเมอร์ (Organic Materials/Polymers)	Zinc Stearite	0.1-0.2
	Waxes	0.2-0.4
	Soaps	0.15-0.25
	PTFE	0.04-0.15

ในที่นี้จะขออธิบายลักษณะและกลไกของสารหล่อลื่นของแข็ง (Solid Lubrication) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้นั้นคือ สารหล่อลื่นของแข็งโครงสร้างแบบชั้น

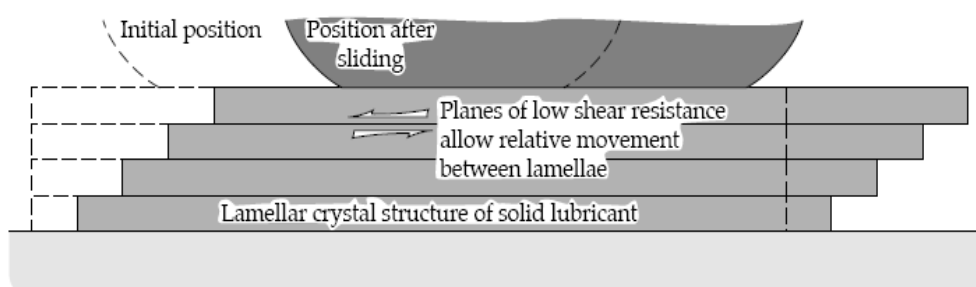
2.3.1.1 สารหล่อลื่นของแข็งโครงสร้างแบบชั้น (Lamellar Solids)

2.3.1.1.1 ลักษณะสารหล่อลื่นของแข็งโครงสร้างแบบชั้น

สารหล่อลื่นของแข็งที่มีโครงสร้างแบบชั้น ได้แก่ แกรไฟต์ เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ บอริกแอซิด หรือ โลหะทรานซิชัน Dichalcogenides (MX_2) เป็นต้น ซึ่ง M ได้แก่ Molybdenum, Tungsten หรือ Niobium ส่วน X คือ Sulfur, Selenium หรือ Tellurium โครงสร้างของสารหล่อลื่นของแข็งที่มีโครงสร้างแบบชั้นจะแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.3 วัสดุเหล่านี้มีค่าความเสียดทานที่ต่ำมาก แต่อย่างไรก็ตามสารหล่อลื่นของแข็งที่มีโครงสร้างแบบชั้นยังมีจุดอ่อน กล่าวคือ สารหล่อลื่นประเภทนี้จะมีการนำความร้อนไม่ดียกเว้นโลหะอ่อนนุ่ม (Soft Metals) ดังนั้นมันจึงไม่สามารถนำความร้อนออกจากผิวสัมผัสได้มาก และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอาจจะมีค่าสูงและเกิดการผิวนวนซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อมและสภาวะขณะที่ทำการทดสอบ [8]

2.3.1.1.2 กลไกการเคลื่อนที่ของสารหล่อลื่นของแข็งโครงสร้างแบบชั้น

การหล่อลื่น (Lubrication) จะเกี่ยวข้องกับการยึดติด (Adhesion) ของผิววัสดุคู่สัมผัส เมื่อผิวสัมผัสเกิดการยึดติดจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างคู่สัมผัสนั้นมีค่าสูง เพราะวัสดุจะเกิดการต้านแรงเฉือนที่มากกับผิวสัมผัส แต่สารหล่อลื่นของแข็งโครงสร้างแบบชั้น จะเป็นวัสดุที่มีสมบัติขึ้นอยู่กับทิศทาง (Anisotropy) เมื่อเกิดการสัมผัสกับผิววัสดุที่มีโครงสร้างแบบชั้นบางในทิศทางขนานกับชั้นบางในแต่ละแผ่น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างคู่สัมผัสจะมีค่าต่ำ เนื่องจากทิศทางดังกล่าวเป็นทิศทางที่เกิดการเคลื่อนที่ได้ง่าย ณ แรงเฉือนเฉือนต่ำ และเกิดแรงต้านเฉือนที่น้อยกับผิวสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เป็นกลไกการเคลื่อนที่ของสารหล่อลื่นของแข็งที่มีโครงสร้างแบบชั้นบางซึ่งได้ถูกอธิบายโดย Bragg ได้ทำการยกตัวอย่างการเคลื่อนที่ของแกรไฟต์ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นของแข็งโครงสร้างแบบชั้นบางที่นิยมนำมาใช้งาน [41] การเคลื่อนที่ของสารหล่อลื่นของแข็งที่มีโครงสร้างแบบชั้นบาง (Lamellar) มีการเรียงตัวของแผ่นชั้นบางที่ยึดติดกันด้วยพันธะอย่างอ่อนและโครงสร้างแบบชั้นบางในแต่ละแผ่นจะสามารถเลื่อนผ่านกันได้ง่ายถึงแม้จะถูกแรงเฉือนต่ำ ซึ่งเป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานบนผิวหน้าวัสดุต่ำด้วยสารหล่อลื่นของแข็งที่มีโครงสร้างแบบชั้นที่มีสมบัติดังที่กล่าวมาข้างต้นจึงถูกเรียกว่า สารหล่อลื่นของแข็งที่เป็นวัสดุหล่อลื่นในตัว (Self Lubricating)



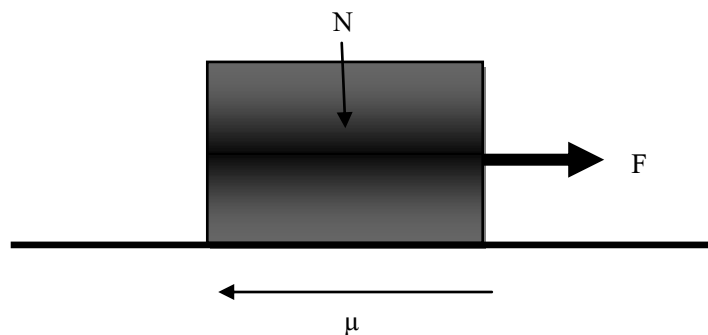
รูปที่ 2.6 กลไกการเคลื่อนที่ของสารหล่อลื่นของแข็งที่มีโครงสร้างแบบชั้นบาง [41]

2.3.2 แรงเสียดทาน (Friction)

แรงเสียดทาน คือ แรงที่ต้านการเคลื่อนที่ของวัสดุเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุสองชิ้น มีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศการเคลื่อนที่ของวัสดุ ลักษณะของการเคลื่อนที่อาจเป็นการลื่นไถล (Sliding) หรือการกลิ้ง (Rolling) [46] ของผิวหนึ่งไปบนอีกผิวหนึ่งซึ่งอาจจะสัมผัสกันโดยตรงหรือมีของเหลวอยู่ระหว่างผิวที่มีการเคลื่อนที่สัมผัส ปัญหาที่สำคัญของการเกิดเสียดทาน คือ เกิดการสูญเสียพลังงานเพื่อเอาชนะแรงเสียดทาน พลังงานที่สูญเสียไปนี้ เมื่อนำมารวมกัน พบว่ามีมูลค่ามหาศาล การศึกษาโดยมุ่งเน้นการลดแรงเสียดทานจึงมีความสำคัญในวิทยาการสมัยใหม่ แรงเสียดทานของวัสดุแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับผิวสัมผัสของวัสดุคู่สัมผัส การเตรียมผิววัสดุ และสภาวะขณะที่เกิดการเคลื่อนที่

สัมผัส ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสามารถคำนวณได้ตามรูปที่ 2.7 และแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.3.2.1 ยกตัวอย่างเช่น แรงเสียดทานแบ่งออกเป็น 2 ประเภท [47] คือ

1. แรงเสียดทานสถิต (Static Friction) เป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะวัตถุสองชนิดเคลื่อนที่มาสัมผัสกันเมื่อมีแรงมากระทำ วัตถุจะอยู่นิ่งไม่เคลื่อนที่ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนคือ f_s และจะมีค่ามากที่สุดเมื่อวัตถุเริ่มเคลื่อนที่ เรียกว่าแรงเสียดทานสถิตสูงสุดใช้สัญลักษณ์ f_{sMAX}
2. แรงเสียดทานจลน์ (Kinetic Friction) เป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเมื่อผิวของวัตถุทั้งสองชนิดมีแรงมากระทำ และวัตถุจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่คงที่ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนคือ f_k



รูปที่ 2.7 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

2.3.2.1 การคำนวณเกี่ยวกับแรงเสียดทาน

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of Friction) เป็นค่าตัวเลขที่แสดงถึงการเกิดแรงขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของวัตถุสองชนิด สัญลักษณ์ที่ใช้แทนคือ μ (มิว)

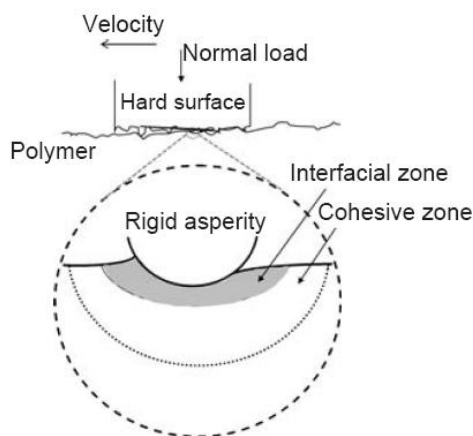
$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน } (\mu) = \frac{\text{แรงที่ดึงให้วัตถุเคลื่อนที่ (N)}}{\text{แรงที่กดทับบนผิวสัมผัส (N)}} = \frac{f}{N} \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

$$f = \mu N \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

2.3.2.2 แรงเสียดทานของพอลิเมอร์

กลไกการเกิดแรงเสียดทานสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลไก นั่นคือ แรงเสียดทานที่เป็นผลจากการเกิด Interfacial และ Cohesive บนผิวพอลิเมอร์ ซึ่งมีสมมติฐานว่าวัสดุที่สัมผัสกับผิวพอลิเมอร์จะต้องมีความแข็งแรง ทนต่อแรงและไม่เกิดการเสียรูปแม้โดนแรงกระทำเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูป 2.8 เป็นรูปจำลองของกระบวนการเกิดความเสียหายและการสึกหรอจากกลไกที่ได้กล่าวข้างต้น แรงเสียดทานทั้งหมดเกิดจากการรวมกันของพลังงานที่สูญเสียจากกลไก Interfacial และ Cohesive โดยความแตกต่างของกลไกทั้งสองประเภทนั้นจะต่างกันที่การสูญเสียพลังงานจากการเสียรูปที่ต่างกัน โดย

กลไกแบบ Interfacial พลังงานที่สูงสูญเสียส่วนใหญ่เป็นพลังงานที่สูงสูญเสียจากการเสีรูปที่เกิดขึ้นจากการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส ความเสียหายที่เกิดจากกลไกแบบ Interfacial ปริมาณของความเสียหายนั้นมักจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยร่วมด้วย เช่น ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ โครงสร้างโมเลกุล อุณหภูมิ การเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่นหรืออุณหภูมิการเกิดผลึก ความหนาผิว ปฏิกริยาเคมีและไฟฟ้าระหว่างวัสดุสัมผัสและพอลิเมอร์ ตัวอย่างของการเกิดกลไกแบบ Interfacial เช่น วัสดุพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ กึ่งผลึก (Semi Crystalline) และชนิดอสัณฐาน (Amorphous) ชนิดที่เป็นกึ่งผลึกจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำ เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลมีความสามารถในการยึดตัวได้ง่ายในทิศทางที่เคลื่อนที่ตามแรงเฉือน เป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพอลิเมอร์ชนิดกึ่งผลึกมีค่าต่ำ ส่วนพอลิเมอร์ชนิดอสัณฐาน วัสดุประเภทอีลาสโตเมอร์เป็นวัสดุที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น (Glass Transition Temperature, T_g) ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง วัสดุจึงมีความอ่อนนุ่มมากเมื่อเคลื่อนที่สัมผัสกับวัสดุอื่น จะเกิดการยึดติดที่สูงมาก ส่งผลทำให้มีความเสียหายที่สูง โดยอีลาสโตเมอร์จะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงที่สุด [48] ส่วนกลไกแบบ Cohesive ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นพลังงานที่สูงสูญเสียจากการเสีรูปจากการยึดติดและการบดขีดยของผิวสัมผัสร่วมกัน โดยเฉพาะการบดขีดยแบบ Plowing นอกจากนั้นการสูญเสียพลังงานจะขึ้นอยู่กับ Tensile Strength, Elongation Before Fracture หรือค่า Toughness ของพอลิเมอร์ และความสูงมุมตัด (Cutting Angle) ของยอดแหลม (Asperities) ของผิวสัมผัสวัสดุ [49] โดยปกติข้อมูลจากการทดสอบจะไม่สามารถแยกได้ว่าความเสียหายจากการทดสอบนั้นเกิดจากกลไกแบบ Interfacial หรือ Cohesive ดังนั้นแล้วข้อมูลส่วนมากในการทดสอบจะเป็นข้อมูลที่เกิดจากการรวมกัน 2 กลไก และการทดลองนั้นๆ จะทำการกำหนดปัจจัยคงที่และปัจจัยที่เปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นปัจจัยที่เราจะต้องทราบว่ามีผลต่อความเสียหายอย่างไร เพื่อนำมาเป็นข้อสรุป ตัวอย่างของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอของพอลิเมอร์บางชนิด แสดงในตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.8 การเกิด Interfacial และ Cohesive บนผิวพอลิเมอร์ [49]

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอของพอลิเมอร์บางชนิด [48]

Polymer	Coefficient of Friction	Specific Wear Rate ($\times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$)
PMMA	0.48	1315.9
PEEK	0.32	31.7
UHMWPE	0.19	15.5
POM	0.32	168.2
Epoxy	0.45	3506.6

ความเสียดทานจากการขีดขีด ตามทฤษฎีการขีดขีดของแรงเสียดทานของ Bowden และ Tabor กล่าวถึงนิยามของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน [50] ไว้ดังสมการ (2.3)

$$\mu = \tau / P_y \quad \text{สมการที่ 2.3}$$

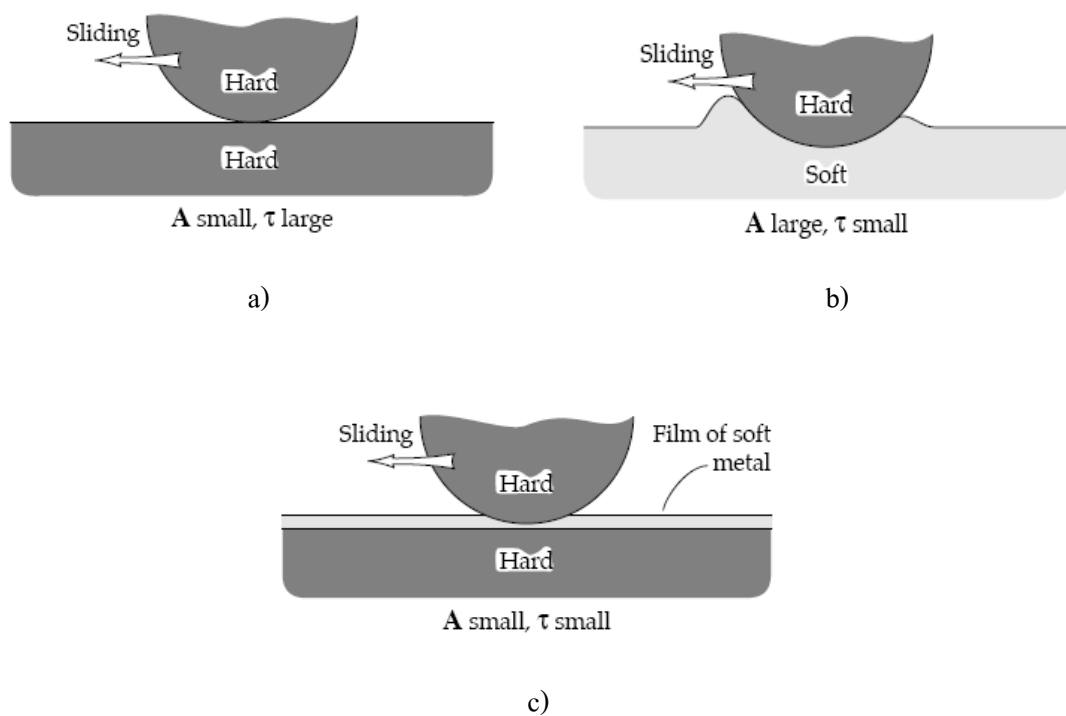
โดย τ เป็นความเครียดเฉือน (Shear Stress) ของวัสดุหน่วยเป็นปาสคาล (Pa)
 P_y เป็นความเครียดที่ทำให้เกิดการไหลของพอลิเมอร์ (Plastic Flow Stress) ของวัสดุ
 หน่วยเป็นปาสคาล (Pa)

นอกจากนั้นแล้วยังมีทฤษฎีว่าด้วยความสัมพันธ์ของ True Contact Area ; τ และ Shear Strength ; A ของวัสดุ กรณีแรก (รูปที่ 2.9a) เมื่อวัสดุที่มีความแข็งเคลื่อนที่สัมผัสกับวัสดุที่แข็งซึ่งจะมีค่า Shear Strength สูง เมื่อวัสดุทั้งสองสัมผัสกันด้วยแรงกด ค่า True Contact Area จะมีค่าน้อย การที่ Shear Strength สูง จะส่งผลให้แรงเสียดทานสูง กรณีที่สอง (รูปที่ 2.9b) เมื่อวัสดุที่มีความแข็งเคลื่อนที่สัมผัสกับวัสดุที่อ่อนนุ่มซึ่งจะมีค่า Shear Strength ต่ำ เมื่อวัสดุทั้งสองสัมผัสกันด้วยแรงกด ค่า True Contact Area จะมีค่ามากส่งผลให้แรงเสียดทานสูง ดังนั้นจึงมีการสร้างผิวเคลือบที่อ่อนนุ่มซึ่งจะมีค่า Shear Strength ต่ำ เคลือบลงบนวัสดุที่มีความแข็งซึ่งจะช่วยรับแรงกดทำให้ ค่า True Contact Area มีค่าน้อย (รูปที่ 2.9c) การสร้างผิวเคลือบดังกล่าวจึงทำให้แรงเสียดทานมีค่าต่ำนั่นเอง [41] ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวไว้ดังสมการ 2.4 และรูปที่ 2.9

$$F = A \times \tau$$

สมการที่ 2.4

โดย F เป็นแรงเสียดทาน (N)
 τ เป็น Shear Strength ของวัสดุที่อ่อนนุ่มกว่า (N/m^2)
 A เป็น True Contact Area (m^2)



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของ True Contact Area และ Shear Strength ของวัสดุ [41]

2.3.3 การสึกหรอ (Wear)

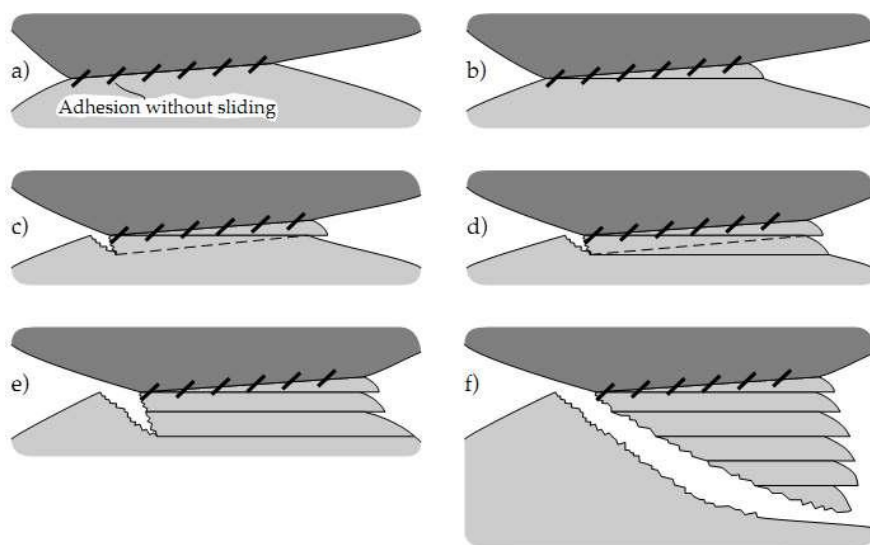
2.3.3.1 ความหมายและประเภทของการสึกหรอ

การสึกหรอ หมายถึงการสูญเสียเนื้อสารจำนวนหนึ่งออกไปจากชิ้นวัตถุ สาเหตุของการสึกหรอมีหลายประการ และมักจะเกิดจากหลายสาเหตุพร้อมๆ กัน การสึกหรอสามารถแบ่งได้ตามสาเหตุเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear)

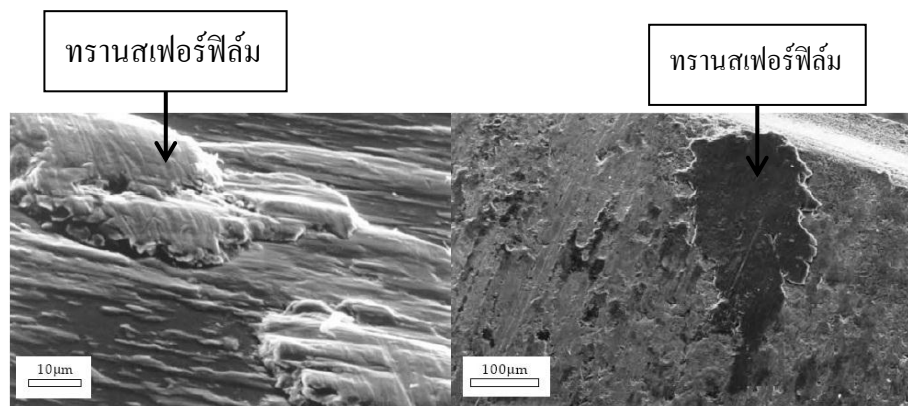
การสึกหรอประเภทนี้เกิดจากการสัมผัสกันของยอดแหลมของเนื้อวัสดุมาสัมผัสกัน ซึ่งทำให้เกิดส่วนของเนื้อวัสดุที่เชื่อมติดเข้าด้วยกัน เมื่อเกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันจะเกิดการยึดติดขึ้น เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) ในส่วนที่เชื่อมติดกัน กลไกที่เกิดขึ้นนี้ประกอบด้วย การเฉือน (Shearing) และการแตก (Cracking) จนหลุดออกจากผิววัสดุกลายเป็นอนุภาค

ที่สึกหรอ (Wear Debris) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 กลไกสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการสึกหรอและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคือ สมบัติการยึดติดและสมบัติการไหลตัวของ Interfacial Layer หรือ Transfer Film ในกลไกแบบ Interfacial ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.3.2.2 Transfer Film เกิดจากเศษวัสดุที่เป็นอนุภาคของการสึกหรอและการแตกเศษดังกล่าวจะติดอยู่บนผิววัสดุในรอยสึกหรอเกิดเป็นชั้นใหม่ที่เรียกว่า ทรานสเฟอร์ฟิล์ม จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า เมื่อนำทองเหลืองมาถูกับเหล็กกล้า จะเกิดทรานสเฟอร์ฟิล์มของทองเหลืองปกคลุมอยู่บริเวณจุดที่มีการสัมผัสกัน [51, 52] ตัวอย่างของการเกิดทรานสเฟอร์ฟิล์มของโลหะแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) [52]

ถ้า Transfer Film ที่เกิดขึ้นมีการยึดเกาะที่ดีและมีความเหนียว อัตราการสึกหรอจะมีค่าลดลง เนื่องจาก Transfer Film ดังกล่าวจะลดการสึกหรอแบบยึดติด แต่ถ้าส่วนของพอลิเมอร์มีความแข็งแรง (Strength) ต่ำกว่าฟิล์มที่เกิดขึ้นอัตราการสึกหรอก็จะมีค่าสูง เนื่องจาก Transfer Film จะยึดเกาะได้ไม่ดีจนสามารถหลุดออกมาเป็นเศษสึกหรอได้ง่าย ปัจจัยที่สำคัญ ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของฟิล์มคือ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสของพอลิเมอร์และวัสดุคู่สัมผัส [51] การสึกหรอแบบติดกันมักเกิดในสถานะที่ไม่มีสารหล่อลื่น แต่อย่างไรก็ตามสถานะที่มีสารหล่อลื่นก็อาจเกิดได้เช่นกัน เนื่องจากสารหล่อลื่นที่เป็นสารอินทรีย์ที่มีขี้จะถูกดซับไว้บนผิวหน้าของวัสดุ ทำให้ลดความเสียดทานและการยึดติดกันระหว่างผิววัสดุทั้งสองที่มีการสัมผัสกัน อาทิเช่น สารหล่อลื่นของเหลวประเภทน้ำมัน



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างทรานสเฟอร์ฟิล์มของโลหะ [51]

การสึกหรอแบบยึดติด ถูกอธิบายโดย Archard [53] ซึ่งประยุกต์มาจากทฤษฎีของ Semi-Empirical Holm [53] ที่กล่าวถึงการหลุดออกของวัสดุไปติดที่หัวกด Archard ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาตรการสึกหรอ น้ำหนักกด และความแข็ง ดังสมการ 2.5

$$V = k \frac{NL}{H} \quad \text{สมการที่ 2.5}$$

โดย V คือ ปริมาตรการสึกหรอ (mm^3)
 k คือ อัตราการสึกหรอจำเพาะ (mm^3/Nm)
 N คือ น้ำหนักกดในการทดสอบ (N)
 L คือ ระยะทางในการทดสอบ (m)
 H คือ ความแข็งของวัสดุสึกหรอ

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการสึกหรอแบบยึดติดอีก ได้แก่ แรงดึงดูดระหว่างอะตอมตรงรอยต่อจุดสัมผัสที่ผิวของวัสดุที่เสวยรูปขณะที่ทำการทดสอบ การแตกหักของรอยต่อเมื่อเกิดแรงเฉือน สมบัติทางด้านการเปียก (Wetting) พันธะเคมีบริเวณรอยสัมผัสของวัสดุคู่สัมผัส และการยึดเกาะกันภายในวัสดุ เป็นต้น

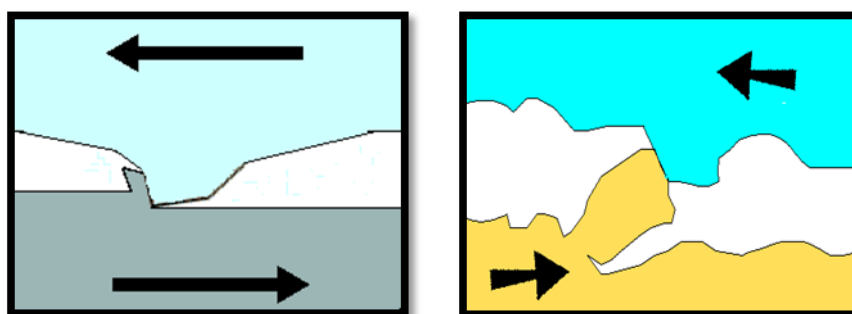
2. การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) [53]

เกิดจากการสัมผัสของวัสดุที่มีขูดแหลมมาสัมผัสกันหรือมีชิ้นส่วนของแข็งขนาดเล็กหลุดเข้าไปในบริเวณผิวสัมผัส และครูดไถไปบนผิวหน้าที่อาจจะอ่อนกว่า ชิ้นส่วนของแข็งนี้อาจจะเป็นสิ่งแปลกปลอมจากภายนอกหรือเศษที่แตกหักมาจากการสึกหรอนั่นเอง ในกรณีที่วัสดุมีความเหนียว (Ductile Material) อนุภาคที่มีความแข็งเหล่านี้จะเป็นผลให้เกิดการไหลและเสียรูปถาวร (Plastic Flow) ในวัสดุที่มีความอ่อนนุ่มกว่า ส่วนวัสดุที่มีความเปราะ (Brittle Material) การสึกหรอจะเกิดจาก

การแตกหักบนผิวสึกหรอ (Worn Surface) จะมีรอยแตกอยู่บนผิว โดยทั่วไปแล้วลักษณะการสึกแบบขัดถูจะเกิดได้ 2 ลักษณะ นั่นคือการการสึกขัดถู Two-Body และ Three-Body [50] โดยมีรายละเอียดดังนี้

- Two-body Abrasive Wear

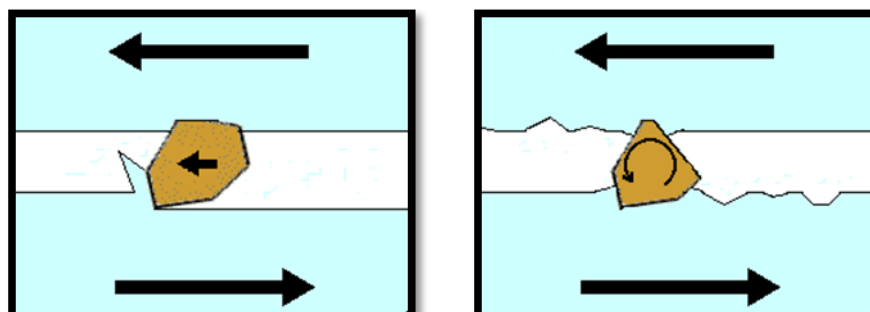
การสึกหรอแบบ Two-body Abrasive คือการที่ผิววัสดุขรุขระสองผิวเคลื่อนที่เสียดสีกัน ทำให้เกิดการสึกหรอแบบขัดถู ตัวอย่างของ Two-body Abrasive ที่พบบ่อย คือ การกลิ้งไสวัสดุ การเจียรใน การขัดผิววัสดุด้วยกระดาษทราย การสึกหรอแบบ Two-body Abrasive แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การสึกหรอแบบ Two-Body Abrasive [54]

- Three-body Abrasive Wear

ลักษณะการสึกหรอแบบ Three-body Abrasive คือ การที่มีอนุภาคของแข็ง หรือเศษจากการสึกหรอ ถูกกักอยู่ระหว่างผิวของวัสดุ 2 ผิว โดยอนุภาคเหล่านั้นเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ การเคลื่อนที่อาจเป็นการไถลหรือหมุนกลิ้งไปบนผิวหน้าวัสดุ แสดงดังรูปที่ 2.13 ซึ่งการสึกหรอแบบ Three-body Abrasive Wear อาจจะช้ากว่าแบบ Two-body Abrasive Wear ได้ถึง 10 เท่า

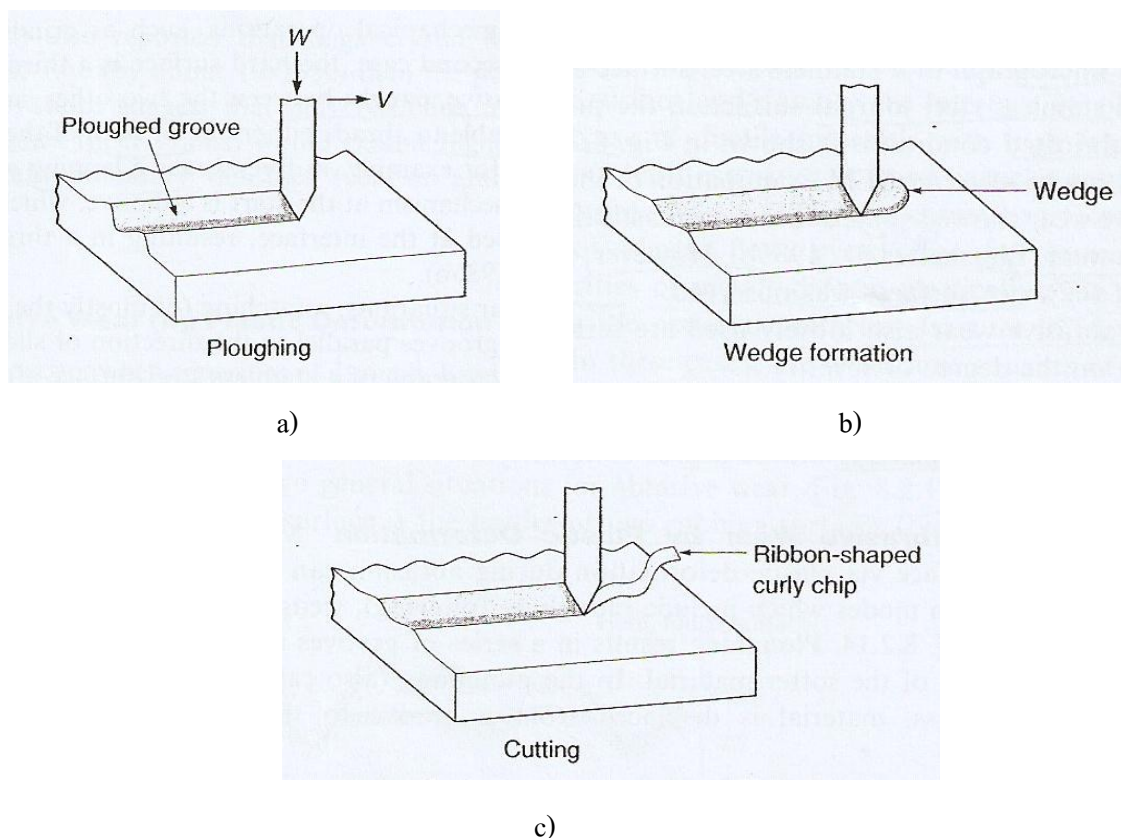


รูปที่ 2.13 การสึกหรอแบบ Three-body Abrasive [54]

การที่วัสดุเกิดการสึกหรอแบบขัดถูจะทำให้ผิวชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) และแบบแตกหัก (Fracture) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การสึกหรอแบบการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) เป็นการสึกหรอในลักษณะที่มักเกิดใน โลหะ พอลิเมอร์ หรือวัสดุผสม ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะมีสมบัติด้านความยืดหยุ่นดี (Ductile) การเกิดการสึกหรอในลักษณะนี้แบ่งตามความรุนแรงได้ 3 แบบ [53] แสดงดังรูป 2.14 อธิบายได้ดังนี้

1. Ploughing เป็นการสึกหรอแบบไม่สูญเสียเนื้อวัสดุ แต่ให้แรงกระทำบนผิววัสดุจนเกิดการผิดรูปบนผิววัสดุ ดังรูปที่ 2.14a
2. Wedge เป็นการสึกหรอแบบที่มีการสูญเสียวัสดุไปเพียงเล็กน้อยและยังเกิดการเสียรูปแบบพลาสติกบนผิววัสดุร่วมด้วย ดังรูปที่ 2.14b
3. Cutting เป็นการสึกหรอในแบบที่มีการสูญเสียวัสดุไปมากที่สุด โดยเนื้อวัสดุที่หลุดออกมาจะมีรูปร่างลักษณะคล้ายริบบิ้น (Ribbon Shaped) ดังรูปที่ 2.14c



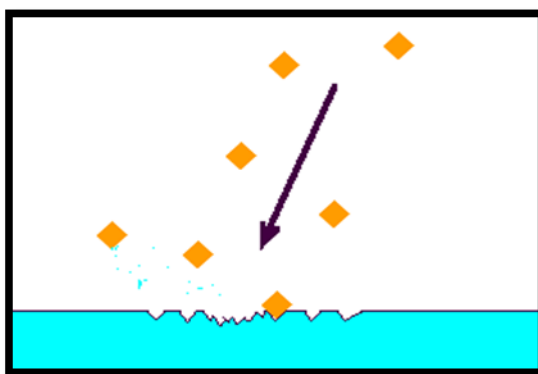
รูปที่ 2.14 การสึกหรอแบบการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) [46]

การสึกหรอแบบแตกหัก (Fracture) เป็นการสึกหรอที่มักเกิดกับวัสดุประเภทเซรามิก ที่มีสมบัติแข็งเปราะ (Brittle) และมีช่วงการแปรรูปแบบพลาสติกน้อยมาก เมื่อให้แรงกระทำกับวัสดุจำพวกนี้จนมากพอวัสดุจะเกิดการแตกหักออก กลไกการแตกหักเกิดขึ้นเมื่อให้แรงกระทำบนผิววัสดุแล้วเคลื่อนที่

ผ่านไป วัสดุที่รับแรงมากพอจะมีรอยร้าว (Crack) เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ ต่อมาวัสดุจะเกิดรอยร้าวขึ้นบริเวณขนานกับผิววัสดุลงไปในเรื่องเรียกว่า Lateral Crack ซึ่งจะเคลื่อนที่ออกสู่บริเวณผิวของวัสดุจนทำให้วัสดุบริเวณนั้นหลุดออกหรือแตกออก [55]

3. การสึกหรอแบบกัดเซาะ (Corrosive Wear)

การสึกหรอแบบกัดเซาะ เป็นการสึกหรอที่เกิดจากอนุภาคของแข็งหรือของเหลวพุ่งเข้ากระแทกกับผิววัสดุ แล้วเคลื่อนที่เสียดสีไปบนผิววัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 กลไกการสึกหรอแบบกัดเซาะนั้นมีโอกาสเกิดได้จากหลายกลไก โดยมีปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวควบคุมแต่ละกลไก คือ มุมตกกระทบที่อนุภาคกระทำต่อชิ้นงาน ความเร็วในการตกกระทบ และขนาดอนุภาคที่ตกกระทบ

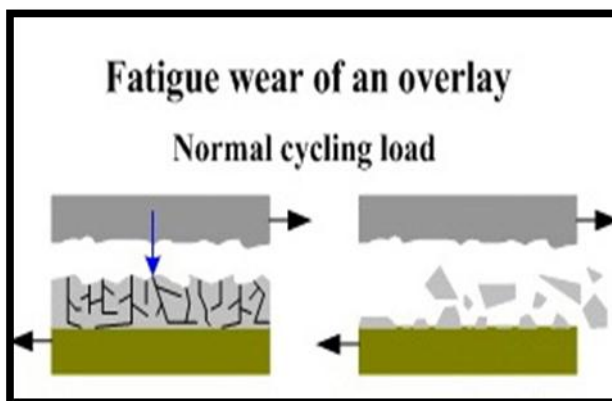


รูปที่ 2.15 การสึกหรอแบบกัดเซาะ (Corrosive Wear) [54]

4. การสึกหรอแบบปฏิกิริยาไตร โบเคมีคอล (Tribochemical Reaction) เกิดจากการที่ผิวสัมผัสเกิดการขัดสีและเกิดผลพวงจากปฏิกิริยาทางเคมี โดยเฉพาะ “ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation)” บางครั้งอาจเรียกว่า การสึกหรอจากการกัดกร่อน (Corrosive Wear) ยกตัวอย่างเช่น การเกิดสนิมในเหล็ก เป็นต้น

5. การสึกหรอจากความล้า (Fatigue Wear)

ซึ่งจะเห็นว่าผิวของวัสดุมีหลุม รอยแตกหรือรอยแยก (Spalling and Fissuring or Cracking) อันเป็นผลมาจากการเสียรูปทั้งแบบถาวรและแบบคืนรูปร่างเดิมได้ (Plastic and Elastic Deformation) การล้าตัวของวัสดุมักเกิดกับชิ้นส่วนที่ต้องรับภาระสลับ (Cyclic Load) เป็นเวลานาน [56] รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะการสึกหรอแบบการล้าตัว



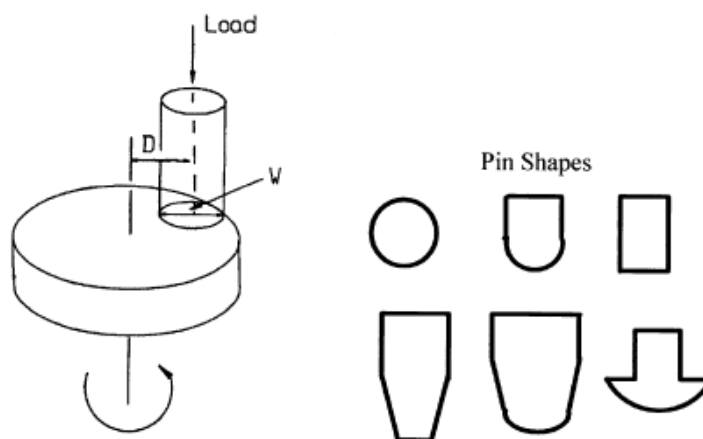
รูปที่ 2.16 การสึกหรอจากความล้า (Fatigue Wear) [55]

2.3.3.2 การทดสอบการสึกหรอ

วิธีและเครื่องมือที่ใช้ทดสอบการสึกหรอที่มีอยู่ในมาตรฐาน ASTM และรูปแบบการทดสอบ สามารถจัดกลุ่มตามรูปแบบการสึกหรอ ลักษณะการสัมผัสกันของชิ้นงานทดสอบได้เป็น 4 กลุ่ม คือ การทดสอบแบบลื่นไถล (Sliding Test) การทดสอบแบบขัดถู (Abrasion Test) การทดสอบความล้าแบบหมุน (Rolling-contact Fatigue Test) และการทดสอบการกัดเซาะจากอนุภาคของแข็ง (Solid-particle Erosion Test) [56] ในงานวิจัยนี้จะขออธิบายถึงการทดสอบแบบ Pin-on-Disc

2.3.3.2.1 การทดสอบการสึกหรอแบบลื่นไถลชนิดหัวกดบนแผ่นทดสอบแบบ Pin-on-Disc

เครื่องมือทดสอบแบบ Pin-on-Disc เป็นการทดสอบการสึกหรอแบบลื่นไถล ที่จัดให้ผิวสัมผัส 2 ผิวเคลื่อนที่สัมผัสกัน วัสดุชิ้นหนึ่งไถลไปบนอีกชิ้นหนึ่ง ทำได้โดย Pin ถูกยึดให้อยู่กับที่ ส่วนชิ้นงานจะหมุนในแนวราบ เมื่อมีแรงมากระทำจะทำให้เกิดการขัดสีระหว่างชิ้นงานทั้งสอง โดยหัวกดมีได้หลายรูปแบบเพื่อให้การทดสอบมีความสอดคล้องกับสถานะการใช้งานดังรูปที่ 2.17 ในการทดสอบนี้ ชิ้นงานทดสอบที่มีรูปร่างเหมือน Pin สามารถเปลี่ยนเป็นรูปทรงกลม จะเรียกการทดสอบว่า Ball-on-Disc เครื่องทดสอบนี้ใช้ในการทดสอบการสึกหรอแบบลื่นไถล (Sliding) และหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน [2]



รูปที่ 2.17 เครื่องมือทดสอบแบบ Pin-on-Disc และหัวกดแบบต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ [57]

2.3.3.2.2 การวัดความเสียหายจากการสึกหรอ

ปริมาณการสึกหรอส่วนใหญ่วัดได้จากมวลหรือน้ำหนักที่สูญเสียไป ซึ่งวิธีนี้เหมาะกับการสึกหรอที่มีอัตราสูง เพราะเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ เช่น เครื่องชั่ง ก็มีใช้กันอยู่ทั่วไป แต่จะถูกต้องนำเชื้อถื่อเมื่อวัสดุที่นำมาวัด และเปรียบเทียบต้องมีความหนาแน่นเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน เนื่องจากถ้านำวัสดุที่มีความหนาแน่นต่างกันมาเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอ ผลการเปรียบเทียบจากน้ำหนักที่เสียไปจะไม่ใช้ค่าที่แท้จริง นอกจากนี้การสึกหรอที่เกิดขึ้นต้องไม่มีการถูกแทนที่หรือเกิดการถ่ายโอนจากวัสดุที่เป็นตัวกดในการทดสอบ ซึ่งไม่ได้นำมาชั่งน้ำหนักด้วย และถ้ากลไกการสึกหรอเป็นแบบที่มีการเสียรูปแบบพลาสติก อาจมีการเปลี่ยนรูปของผิวไปมาก และมีอนุภาคส่วนเกินมาฝังตัวอยู่ ซึ่งไม่เหมาะที่จะใช้การตรวจสอบด้วยวิธีชั่งน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีวิธีวัดการสึกหรอวิธีอื่นอีก เช่น การวัดปริมาตรที่หายไปหรือถูกแทนที่ วัดความลึกของหลุมหรือร่องรอยจากการสึกหรอ การสังเกตรูปร่างลักษณะพื้นผิวที่สึกหรอ และยังมีการวัดปริมาณการสึกหรอโดยทางอ้อม เช่น การวัดการสึกหรอจากเวลาที่ใช้ในการสึกหรอของผิวเคลือบ หรือใช้วิธีวัดแรงกดที่ใช้ในการทดสอบที่ทำให้เกิดการสึกหรอหรือเปลี่ยนแปลงบนผิวหน้าวัสดุ [56]

2.3.3.2.3 อัตราการสึกหรอ

การคำนวณหาอัตราการสึกหรอ (Wear Rate) ของวัสดุ สามารถหาได้ตามสมการของ Archard ซึ่งกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับน้ำหนักที่กระทำกับวัสดุ ดังสมการต่อไปนี้ [58]

$$Q = kW$$

สมการที่ 2.6

เมื่อพิจารณาค่าความแข็ง ปริมาตร หรือ น้ำหนักของวัสดุที่หายไปจะได้ดังสมการ

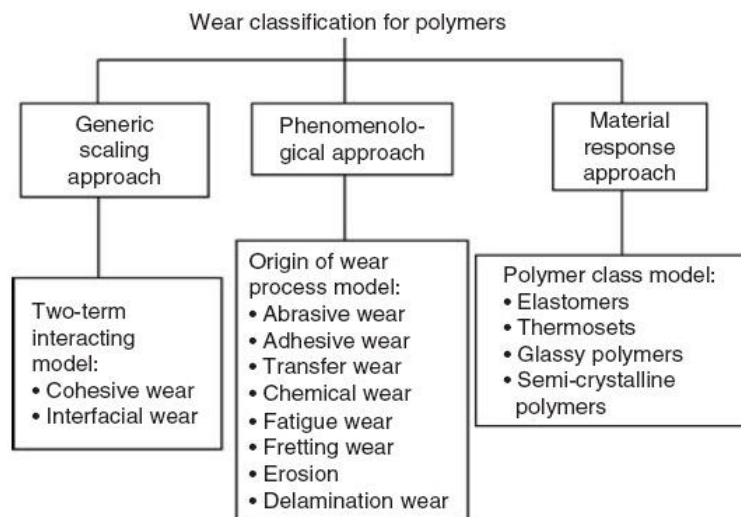
$$Q = k \frac{V}{H} \quad \text{สมการที่ 2.7}$$

$$\text{หรือ } Q = \frac{V}{L} \quad \text{สมการที่ 2.8}$$

โดย	Q	คือ	อัตราการสึกหรอ (Wear Rate, mm^3/m)
	k	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of Friction)
	W	คือ	น้ำหนักที่กระทำกับวัสดุ (Load, N)
	H	คือ	ค่าความแข็งของวัสดุ (Hardness, HV)
	V	คือ	ปริมาตรหรือน้ำหนักของวัสดุที่สึกหรอ (Volume Loss, mm^3)
	L	คือ	ระยะทางการเคลื่อนที่บนผิววัสดุ (Sliding Distance, m)

2.3.3.3 การสึกหรอของพอลิเมอร์

การสึกหรอของพอลิเมอร์เป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและการอธิบายกลไกการสึกหรอสามารถพิจารณาได้จากชนิดของพอลิเมอร์และชนิดของการสึกหรอ เช่น Abrasive หรือ Adhesive [49] เป็นต้น การจำแนกประเภทการสึกหรอของพอลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 2.18 ได้แก่



รูปที่ 2.18 การจำแนกประเภทการสึกหรอของพอลิเมอร์ [49]

- Generic Scalling Approach

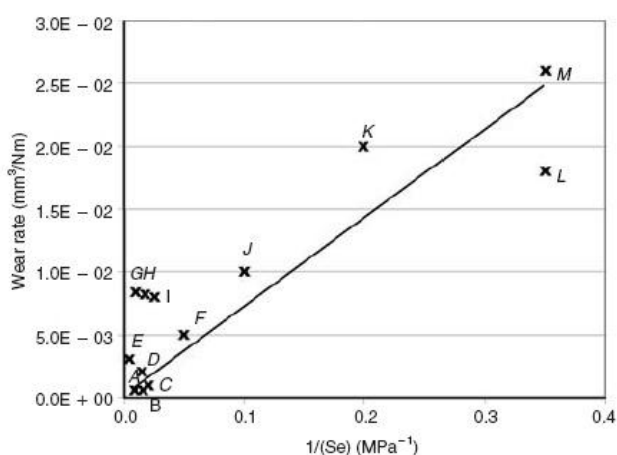
เป็นการแบ่งการสึกหรอจากการเกิดปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของผิวสัมผัส 2 ผิวที่เคลื่อนที่สัมผัสกัน ซึ่งแบ่งได้ 2 ชนิด ได้แก่ Cohesive Wear และ Interfacial Wear ซึ่งได้กล่าวถึงลักษณะการเกิดการสึกหรออย่างละเอียดในหัวข้อที่ 2.3.2.2

- Phenomenological Approach

เป็นการแบ่งการสึกหรอจากกระบวนการหรือกลไกของการสึกหรอ ซึ่งได้กล่าวถึงลักษณะการเกิดการสึกหรอชนิดหลักๆ อย่างละเอียดในหัวข้อที่ 2.3.3.1

- Material Respond Approach

เป็นการแบ่งการสึกหรอจากชนิดและสมบัติของวัสดุ โดยปกติถ้าพอลิเมอร์มีค่า Tensile Strength และ Elongation สูง จะทำให้พอลิเมอร์นั้นมีความต้านทานการสึกหรอสูง นอกจากนั้นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างกิ่งผลึกจะมีความต้านทานการสึกหรอที่ดีกว่าพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน นอกจากนั้นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งสูงจะมีความต้านทานการสึกหรอที่ดี เนื่องจากพอลิเมอร์ที่มีความแข็งสูงนั้นมีความเหนียวต่ำ ตัวอย่างอัตราการสึกหรอของพอลิเมอร์แสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 อัตราการสึกหรอของพอลิเมอร์ Semi-crystalline Polymer : (A) Poly(ethylene)

(B) Nylon 66 (C) PTFE (D) Poly(propene) (E) High density poly(ethylene)

(F) Acetal (G) Poly(carbonate) (H) Poly(propylene) (I) Poly(ethylene terephthalate glycol) (J) Poly(vinylchloride) Amorphous Polymer: (K) PMMA (L) Poly(styrene)

(M) PMMA [49]

เทอร์โมพลาสติกมีหลายชนิดที่ถูกนำมาใช้ในงานด้านไทรโบโลยี แสดงในตารางที่ 2.7 ซึ่งสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันไป ยกตัวอย่างเช่น

- Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) ใช้ทำแบริ่งในข้อเข่าเทียมเพราะมีความเข้ากันได้ดีกับร่างกายมนุษย์และมีความต้านทานต่อการสึกหรอสูง
- PEEK เป็นพอลิเมอร์ที่ทนอุณหภูมิและการสึกหรอได้สูงมาก แต่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานค่อนข้างสูงประมาณ 0.3 โดย PEEK มักนำมาใช้เป็นวัสดุหลักในวัสดุเชิงประกอบที่มีความต้านทานการสึกหรอที่สูงมาก
- Nylons ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุในงานด้านไทรโบโลยีเนื่องจากมีค่าแรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอที่ต่ำ
- PTFE เป็นพอลิเมอร์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำมาก เนื่องจากมีโครงสร้างโมเลกุลที่ผลึกมีการเลื่อนไถลได้ดี ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของพอลิเมอร์ชนิดนี้ ทำให้มักถูกใช้เป็น Solids Lubricant และใช้ในรูปแบบของวัสดุเชิงประกอบ [59]

ตารางที่ 2.7 สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ประเภทต่างๆ [2]

Polymer	Upper Service Temperature (°C)	Thermal Conductivity (°C)	Thermal Expansivity ($K^{-1} \times 10^{-6}$)	Tensile Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)*
Polycarbonate	125	0.2	70	2.4	65
Polyamide (nylon 6)	110-180	0.25	90	3.3	82
Polyetheretherketone	250	0.25	60	2.2	85
UHMWPE	95	0.45	170	0.2-1.2	20
Polyimide (Kapton)	250-320	0.2	50	2.5	70
Polytetrafluoroethylene	260	0.25	130	0.5	10

*อาจมีค่าที่แตกต่างกันเมื่อทดสอบในสภาวะอื่นๆ

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติไทรโบโลยีของพอลิเมอร์และวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์
ปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ปัจจัยที่เกิดจากวัสดุที่ทำการทดสอบ และปัจจัยที่เกิดจากสภาวะที่ใช้ในการทดสอบ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1 ปัจจัยที่เกิดจากวัสดุที่ทำการทดสอบ

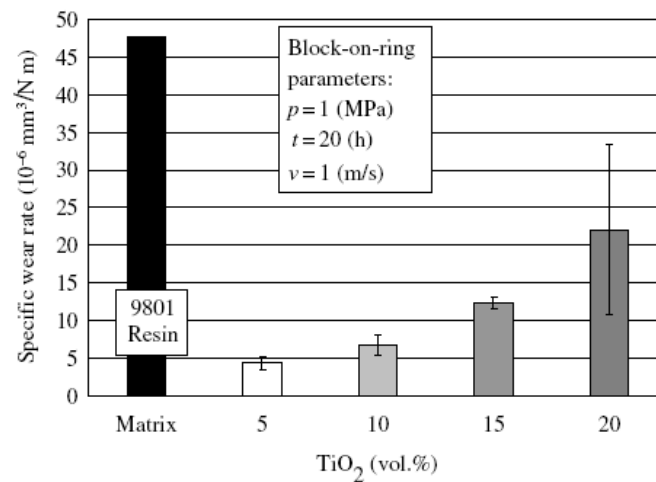
ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3.3.3 วัสดุพอลิเมอร์มีสีกหรือที่แตกต่างกันออกไปแล้วแต่สมบัติและชนิดของพอลิเมอร์ ในหัวข้อนี้จึงขอกล่าวถึงปัจจัยจากวัสดุทดสอบที่มีอิทธิพลต่อสมบัติไตรโบโลยีของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1.1 อิทธิพลของชนิดสารตัวเติม

สารตัวเติมที่ทำการเติมลงไปในพอลิเมอร์นั้นมีทั้งที่ลักษณะเป็นผงและเส้นใย ซึ่งลักษณะที่เป็นผงนั้นมีทั้งขนาดใหญ่และเล็ก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติที่ต้องการและความต้องการที่จะนำไปใช้งาน โดยสามารถแบ่งกลุ่มสารตัวเติมที่นิยมเติมลงไปปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ได้ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ สารตัวเติมอินทรีย์ (Organic Filler) สารตัวเติมอนินทรีย์ (Inorganic Filler) และสารตัวเติมเส้นใย ซึ่งสารตัวเติมแต่ละประเภทจะส่งผลต่อค่าความต้านทานการสึกหรอที่แตกต่างกันไปตามชนิดของสารตัวเติม [60]

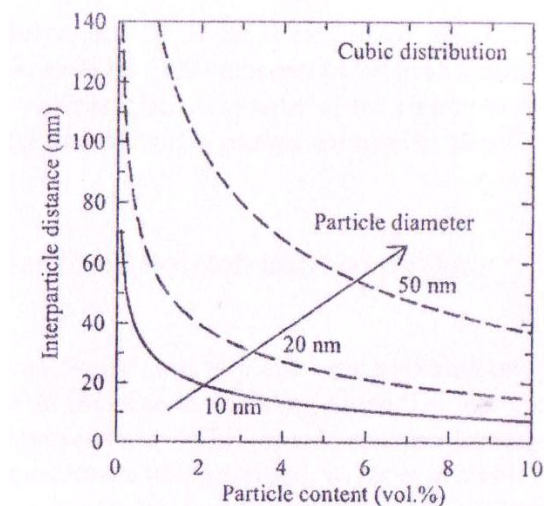
2.4.1.2 อิทธิพลของขนาดและปริมาณสารเสริมแรง

ขนาดของอนุภาคสารเสริมแรงที่ต่างกันย่อมส่งผลให้ค่าการสึกหรอแตกต่างกันด้วย เป็นที่ทราบกันดีว่าอนุภาคที่เป็นสารอนินทรีย์จะเติมลงไปปรับปรุงสมบัติทางไตรโบโลยีของพอลิเมอร์ ยกตัวอย่างเช่น สารประกอบคอปเปอร์ (CuO , CuS , CuF_2), SiC , TiO_2 และ ZrO_2 ซึ่งถูกนำมาเติมลงไปพอลิเมอร์ เช่น PEEK, PA และ PPS เป็นต้น พบว่าขนาดของอนุภาคมีความสำคัญที่จะช่วยปรับปรุงความต้านทานการสึกหรอ โดยอนุภาคขนาดนาโนเมตรถูกตั้งสมมติฐานว่ามีความสามารถลดการสึกหรอได้มาก แต่อย่างไรก็ตามการเติมสารตัวเติมที่มีขนาดเล็กจะต้องคำนึงถึงปริมาณที่เติมลงไปด้วย [18] ยกตัวอย่างเช่น การศึกษาการเติมอนุภาค TiO_2 ขนาดนาโนเมตรลงในอีพอกซี พบว่าอัตราการสึกหรอจำเพาะของการเติมอนุภาค TiO_2 ดังรูปที่ 2.20 จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ TiO_2 จากร้อยละ 5-20 โดยปริมาตร เนื่องจากการที่สารตัวเติมที่เพิ่มมากขึ้นอนุภาคจะเกิดการเกาะกลุ่มกัน (Agglomerate) [62] ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสิ่งสำคัญของการเติมสารตัวเติมที่เป็นอนุภาคขนาดเล็กคือจะต้องมีการจัดเรียงตัวที่จะกระจายตัวได้ดีในวัสดุหลักมากกว่าการจัดเรียงตัวที่เกาะกลุ่มกัน



รูปที่ 2.20 อัตราการสึกหรอจำเพาะของการเติมอนุภาค TiO₂ [62]

การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคถูกนำมาพิจารณาว่าเป็นปัญหาสำคัญที่มักจะเกิดขึ้นกับวัสดุเชิงประกอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.21 เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Interparticle Distance และปริมาณสารตัวเติม (Particle Content) โดยอนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงกลม พบว่าการเกาะกลุ่มกันจะเกิดขึ้นได้ง่ายมากในอนุภาคมีขนาดเล็กที่สุด (10 nm) เพียงแค่มีการเพิ่มปริมาณเพียงเล็กน้อยค่า Interparticle Distance ก็จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว [63]



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Interparticle Distance และปริมาณสารตัวเติม (Particle Content) [63]

สำหรับวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์อีโตนที่มีสารตัวเติมขนาดนาโนเมตร อาทิเช่น อนุภาค Si_3N_4 , CNF, SiC หรือ ZrO_2 เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2.8 พบว่าสามารถลดอัตราการสึกหรอเมื่อเปรียบเทียบกับ PEEK ที่ไม่เติมสารตัวเติม กลไกการสึกหรอที่ทำให้เกิดผลดังกล่าวนี้คือการสึกหรอจะเปลี่ยนจากกลไก Adhesive และ Fatigue เป็น Abrasive เมื่อทำการเติมอนุภาคเหล่านั้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอนุภาคมากเกินไปจนจุดเหมาะสมอนุภาคเหล่านั้นก็จะเปลี่ยนกลไกการสึกหรอเป็นแบบ Abrasive ที่มีความรุนแรงมากจนทำให้เกิดการสึกหรอที่เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการเติมสารตัวเติมดังกล่าวจะต้องหาปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้ได้มาซึ่งสมบัติที่ดีที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2.9 โดยเป็นตัวอย่างปริมาณสารตัวเติมที่เหมาะสมสำหรับวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่มีการเติมสารตัวเติมขนาดอนุภาคนาโนเมตร [47]

ตารางที่ 2.8 อัตราการสึกหรอ (Wear Rate) เมื่อเติมสารตัวเติมอนุภาคนาโนเมตรที่แตกต่างกัน [61]

Matrix/Nanosize Particle	Lowest Wear Rate ($\times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$)
PEEK	195 [82]
PEEK/ Si_3N_4	1.3
PEEK/CNF	0.1-0.2
PEEK/SiC	3.4
PEEK/ ZrO_2	3.9

ตารางที่ 2.9 ตัวอย่างปริมาณสารตัวเติมที่เหมาะสมสำหรับวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่มีการเติมสารตัวเติมขนาดอนุภาคนาโนเมตร

[Ref.]	Matrix	Filler Material	Size of Filler Material (nm)	Optimum Filler Content		Coefficient of Friction			Specific Wear Rate ($\times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{nm}$)			Equipment Used, Counterface Material, Load/Pressure Used, Sliding Velocity.
				With Lowest COF	With Lowest Wear	Without Filler	With Filler	Change (%)	Without Filler	With Filler	Change (%)	
[64]	PTFE	ZnO	50	15 wt%	15 wt%	0.202	0.209	+3.4	1125.3	13	-98.8	Block-on-Ring, Stainless Steel, 200N, 0.431 m/s
[65]	PTFE	AlO ₃	40	20 wt%	20 wt%	0.152	0.219	+44.1	715	1.2	-99.8	Reciprocating Tribometer, Stainless Steel, 260N, 50 mm/s
[66]	PTFE	CNT	20-30	30 vol%	20 wt%	0.2	0.17	-15.0	800	2-3	-99.6	Block-on-Ring, Stainless Steel, 200N.
[67]	PTFE	Nano-attapulgit	10-25	5 wt%	5 wt%	0.22	0.2	-9.1	625.8	31.2	-95	Block-on-Ring, Stainless Steel. 200N, 0.42 m/s
	PTFE	2M Acid Treated Attapulgit	10-25	5 wt%	5 wt%	0.22	0.2	-9.1	625.8	4.9	-99.2	
[68]	Epoxy	TiO ₂	10	7 wt%	3 wt%	0.54	0.4	-25.9	26x10 ³	1.63x10 ³	-93.7	Pin-on-Disc, Carbon Steel, 1 MPa, 0.4 m/s
[69]	Epoxy	TiO ₂	300	-	4 vol%	-	-	-25.9	40	14	-65	Pin-on-Disc, Carbon Steel, 1 MPa, 1 m/s
[70]	Epoxy	Al ₂ O ₃	13	-	2 vol%	-	-	-25.9	5.9	3.9	-33.9	Pin-on-Disc, Carbon Steel, 1 MPa, 0.4 m/s
[71]	Epoxy	Si ₃ N ₄	<20 nm	0.8 vol%	0.8 vol%	0.57	0.38	-33.3	38	2	-94.7	Pin-on-Disc, Carbon Steel, 1 MPa, 1 m/s

ตารางที่ 2.9 ตัวอย่างปริมาณสารตัวเติมที่เหมาะสมสำหรับวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่มีการเติมสารตัวเติมขนาดอนุภาคนาโนเมตร (ต่อ)

[Ref]	Matrix	Filler Material	Size of Filler Material (nm)	Optimum Filler Content		Coefficient of Friction			Specific Wear Rate ($\times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{nm}$)			Equipment Used, Counterface Material, Load/Pressure Used, Sliding Velocity.
				With Lowest COF	With Lowest Wear	Without Filler	With Filler	Change (%)	Without Filler	With Filler	Change (%)	
[72]	PEEK	Si_3N_4	<50	7.5 wt%	7.5 wt%	0.38	0.25	-34.2	7	1.3	-81.4	Block-on-Ring, Plain Carbon Steel, 196N, 0.445 m/s
[73]	PEEK	ZrO_2	10	7.5 wt%	7.5 wt%	0.38	0.29	-23.7	7.5	3.9	-48	Block-on-Ring, Plain Carbon Steel, 196N, 0.445 m/s
[74]	PEEK	SiO_2	<100	7.5 wt%	7.5 wt%	0.37	0.21	-43.2	7.5	1.4	-81.3	Block-on-Ring, Plain Carbon Steel, 196N, 0.445 m/s
[75]	PEEK	SiC	<100	20 wt%	10 wt%	0.38	0.2	-47.4	7.5	3.4	-54.7	Block-on-Ring, Plain Carbon Steel, 196N, 0.445 m/s
[76]	PEEK	CNF	150	-	10 wt%	-	-	-	2-3	0.1-0.2	-94	Ball-on-Prism, Carbon Steel, 21.2N, 28.2 m m/s
[77]	PEEK	Al_2O_3	15	5 wt%	5 wt%	0.32	0.35	+9.4	13	3.5	-73.1	Block-on-Ring, Medium Carbon Steel, 196N, 0.42m/s
[78]	PPESK	TiO_2	40	1 vol%	1.75 vol%	0.55	0.43	-21.8	80.12	4.86	-93.9	Block-on-Ring, Mild Steel, 200N, 0.43 m/s
[79]	UHMWPE	CNT	10-50	0.5 wt%	0.5 vol%	0.05	0.11	+120	0.35 mg	0.02 mg	-94.3	Ball-on-Disc, Si_3N_4 , 5 MPa, 0.5 m/s

2.4.2 ปัจจัยที่เกิดจากสภาวะที่ใช้ในการทดสอบ

ปัจจัยจากสภาวะแวดล้อมเป็นปัจจัยที่ผู้ทดสอบกำหนดขึ้นมาหรือเกิดจากสิ่งแวดล้อมนั้นๆ ปัจจัยดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางไครโพลีหลากหลายปัจจัย ซึ่งมีปัจจัยต่างๆดังต่อไปนี้

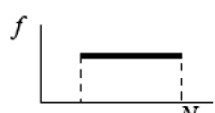
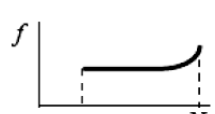
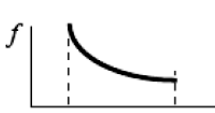
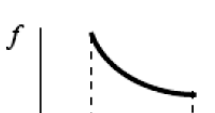
2.4.2.1 อิทธิพลของระยะทางทดสอบ

ปัทมชานิต แสงวิทยากร [80] พบว่า ผิวเคลือบพอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตน และพอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ผสมอะลูมิเนียมออกไซด์ มีการสึกหรอมากขึ้น เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของณัฐณิ อินทวงศ์ [81] และนริศดา น้อยน้ำ [82] พบว่าวัสดุเชิงประกอบเถ้าลอย/พอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ได้จากการพ่นเคลือบและการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน ตามลำดับ มีอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระยะทางทดสอบ

2.4.2.2 อิทธิพลของน้ำหนักกด

ผลของน้ำหนักกดที่มีต่อแรงเสียดทานนั้นเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าแรงเสียดทานมักจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักกดที่ใช้ในการทดสอบซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของพอลิเมอร์ โดยมี 2 ลักษณะ คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่และไม่คงที่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกด ดังแสดงในตารางที่ 2.10 แสดงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อทดสอบด้วยหัวกดลูกบอลเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.35 มิลลิเมตร ลื่นไถลบนพอลิเมอร์ พบว่า ภายใต้น้ำหนักกด 2-15 นิวตัน PTFE, PTFCE, PVC, PVDC และ PE จะมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ นอกจากนี้ PTFE และ PE รวมถึง PMMA และ PS ยังคงมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ภายใต้น้ำหนักกด 10-40 นิวตัน รวมทั้ง PTFE, PMMA, PVC, PE และ Nylon เป็นต้น จะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ ภายใต้น้ำหนักกด 10 – 100 นิวตัน ด้วย จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและน้ำหนักกด พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าไม่คงที่เมื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกด เช่น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มน้ำหนักกด ซึ่งพฤติกรรมลักษณะนี้จะอธิบายโดยการเสียรูปแบบไม่ถาวร (Elastic Deformation) ของขอดแหลมบนผิววัสดุ โดยมักจะเกิดกับวัสดุประเภทยางซึ่งเป็นวัสดุที่มีการยืดหยุ่นและเกิดการเสียรูปแบบไม่ถาวรในช่วงกว้าง นอกจากนั้นยังพบอีกว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มน้ำหนักกด โดยพฤติกรรมลักษณะนี้จะอธิบายได้ว่าวัสดุเกิดการเสียรูปแบบถาวร (Plastic Deformation) ของขอดแหลมบนผิววัสดุ แต่อย่างไรก็ตามเราควรจะคำนึงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพอลิเมอร์ซึ่งมักเปลี่ยนแปลงจากความร้อนที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกด โดยเฉพาะอย่างยิ่งพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเป็น Visco-elastic จะสามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติตามความร้อนที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการเพิ่มของน้ำหนักกดขณะทดสอบ [83]

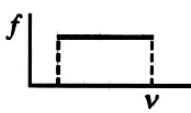
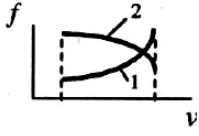
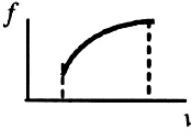
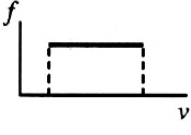
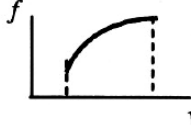
ตารางที่ 2.10 ผลของน้ำหนักกดที่มีต่อแรงเสียดทานตามชนิดของพอลิเมอร์และสถานะต่างกัน [83]

Author(s)	Materials and load	Graphical representation
Bowers, Clinton, Zisman ⁵⁶	2–15 N Steel–polymer (PTFE, PFCE, PVC, PVDC, PE)	
Shooter, Thomas ⁵⁷	10–40 N Steel–polymer (PTFE, PE, PMMA, PC)	
Shooter, Tabor ⁵⁵	10–100 N Steel–polymer (PTFE, PE, PMMA, PVC, Nylon)	
Rees ⁵⁸	Steel–polymer (PTFE, PE, Nylon)	
Bartenev ⁵⁴ , Schallamach ⁶⁵	Theory Steel–rubber	
Kragelskii ⁴	Theory Steel–rubber	

2.4.2.3 อิทธิพลของความเร็วในการทดสอบ

สมบัติทางไทรโบโลยีโดยเฉพาะแรงเสียดทานมักจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการทดสอบ แต่โดยตามทฤษฎีแล้วแรงเสียดทานจะไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วในการทดสอบหากไม่มีความร้อนในการทดสอบเข้ามาเกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตามขณะทดสอบการสีกหรือมักจะเกิดความร้อนจากการเสียดสี (Frictional Heating) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานและความเร็วในการทดสอบจึงจะขึ้นอยู่กับความร้อนหรืออุณหภูมิ ณ จุดสัมผัสขณะทำการทดสอบด้วย ถ้าอุณหภูมิ ณ จุดสัมผัสมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วจนเข้าใกล้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ความเร็วในการทดสอบก็จะมีผลต่อความเสียดทานอย่างเห็นได้ชัด และในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิ ณ จุดสัมผัสมีค่าต่ำมาก ค่าความเสียดทานแทบจะไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วในการทดสอบเลย จึงเป็นเรื่องยากมากที่จะแยกผลจากปัจจัยที่เกิดจากความเร็วในการทดสอบและอุณหภูมิ ณ จุดสัมผัสต่อแรงเสียดทานออกจากกัน และผลที่เกิดขึ้นจะมีความหลากหลายมาก ดังแสดงในตาราง 2.11 โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ณ จุดสัมผัสที่ต่ำสุด (Low Temperature; f) และความเร็วในการทดสอบที่เปลี่ยนแปลง [83]

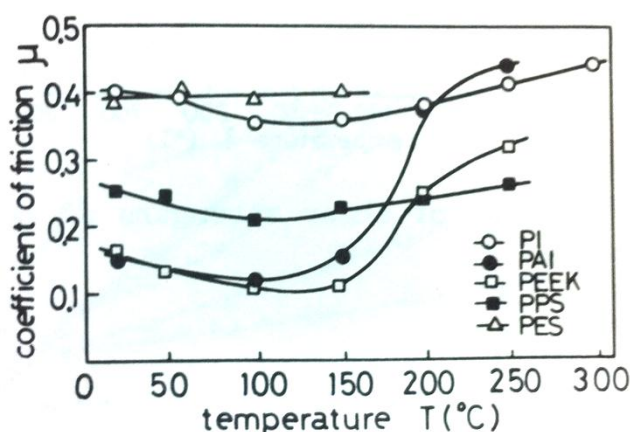
ตารางที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ณ จุดสัมผัสที่ต่ำสุด (Low Temperature; f) และความเร็วในการทดสอบที่เปลี่ยนแปลง [83]

Author(s)	Materials and sliding velocity	Graphical representation
Shooter, Thomas ⁵⁷	0.01–1.0 cm/s Steel–polymer (PTFE, PE, PMMA, PC)	
Milz, Sargent ⁶⁶	4 – 183 cm/s Polymer–polymer 1 – Nylon, 2 – PC	
Fort ⁶⁸	10 ⁻⁵ –10 cm/s Steel–polymer (PTFE)	
White ⁶⁴	0.1 – 10 cm/s Steel–polymer (1 – PTFE, 2 – Nylon)	
Flom, Porile ^{62,63}	1.1– 180 cm/s Steel–polymer (PTFE)	
Oloffson, Gralben ⁶⁰	1.5 cm/s Polymer–polymer (fibers)	
Bartenev and Lavrentiev ⁵⁴ , Schallamach ⁵⁹	Theory Steel–rubber	

2.4.2.4 อิทธิพลของอุณหภูมิในการทดสอบ

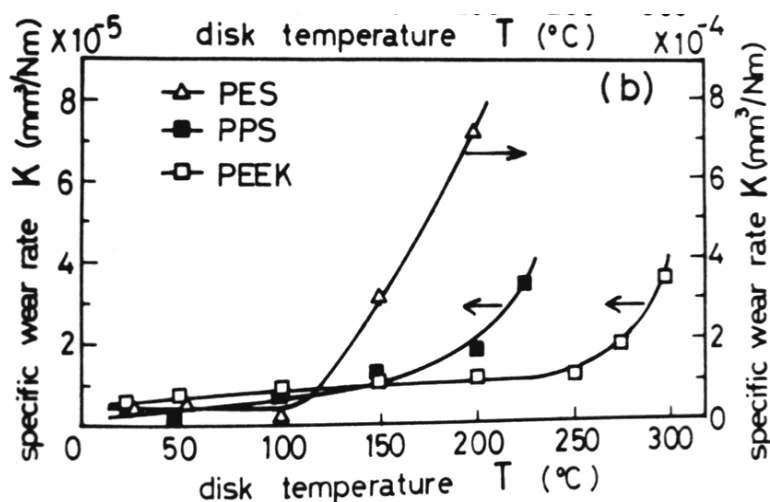
พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานด้านทนต่อการสึกหรอมักจะถูกจำกัดการใช้งานเนื่องจากการสูญเสียสภาพ (Decomposition) เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง ในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาพอลิเมอร์ให้มีสมบัติทนต่อความร้อน (Heat Resistance) ยกตัวอย่างเช่น พอลิไอไมด์ พอลิเอไมด์-ไอไมด์ และพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน เป็นต้น พอลิเมอร์เหล่านี้มักจะมีค่าความเสียดทานและการสึกหรอแตกต่างกันออกไปตามชนิดของพอลิเมอร์ ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะหาความเสียดทานและการสึกหรอของพอลิเมอร์แต่ละชนิด เพื่อที่จะศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความเสียดทานและกลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์ จากการวิจัยโดยทั่วไป พบว่า ความเสียดทานของพอลิเมอร์ที่มีสมบัติทนต่อความร้อนดังที่กล่าวข้างต้น ส่วนใหญ่แล้วค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าลดต่ำลงเมื่ออุณหภูมิขณะทำการทดสอบสูงกว่า 150

องศาเซลเซียส จากรูปที่ 2.22 เมื่อทดสอบการสึกหรอโดยใช้หัวกดลูกบอลทรงกลมไกลบนชิ้นงานพอลิเมอร์ที่เป็นแผ่น ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอุณหภูมิทดสอบที่น้ำหนักกด 8 นิวตัน พบว่า PI และ PES จะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สูงในทุกๆ อุณหภูมิทดสอบ แต่ PAI และ PEEK จะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำกว่า PI และ PES และมีแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิทดสอบสูงกว่า 150 องศาเซลเซียส นั่นก็เนื่องมาจากมีการเสียดรูปเพิ่มขึ้นใน PAI และ PEEK ส่วนผลของอุณหภูมิที่มีต่อการสึกหรอของพอลิเมอร์ที่มีสมบัติทนต่อความร้อน พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบจะเป็นการเพิ่มความอ่อนตัวจากความร้อน (Thermal Softening) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้อัตราการสึกหรอมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงรูปที่ 2.23 เป็นค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ จะเห็นได้ว่า PEEK, PPS และ PES จะมีค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทดสอบ แต่ PES จะมีค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะสูงที่สุด นั่นก็เนื่องจากว่า PES เป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นอสัณฐานและอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจะมีค่าที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ PEEK และ PPS จึงง่ายที่เกิดการอ่อนตัวจากความร้อนทำให้อัตราการสึกหรอจำเพาะสูง [84]



รูปที่ 2.22 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพอลิเมอร์ ณ อุณหภูมิการทดสอบต่างๆ [84]

นอกจากนั้น วัสดุประเภทพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีสมบัติเป็น Visco-elacticity และสามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติเมื่อเปลี่ยนจากสถานะของแข็งเป็นสถานะคล้ายยาง (Rubbery State) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสถานะคล้ายยางจะมีผลต่อความเสียดทานโดยมีผลใกล้เคียงกับวัสดุประเภทยาง โดยพบว่า มีความเสียดทานสูงขึ้น เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่ขด (Coiled) และเกี่ยวพันกันยุ่งเหยิง (Tangled) เมื่อมีแรงกระทำต่อวัสดุทำให้มีความเครียดในวัสดุที่สูง ด้านแรงที่กระทำก่อนที่จะเกิดการสูญเสียของวัสดุ [46]



รูปที่ 2.23 อัตราการสึกหรอจำเพาะ (Specific Wear Rate) ที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ ในพอลิเมอร์ต่างชนิด [84]

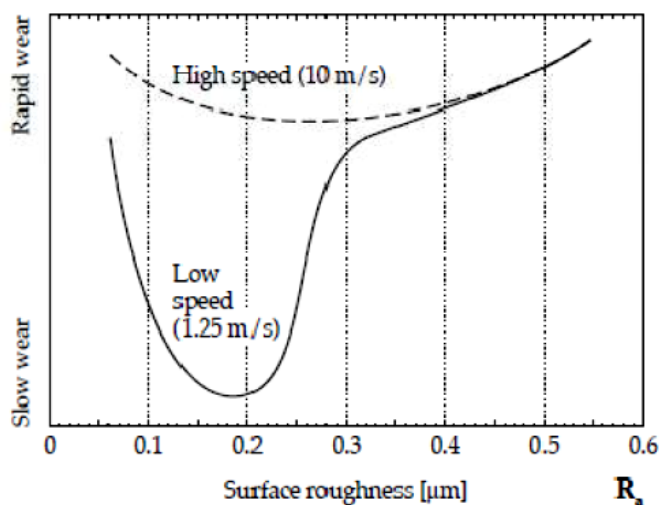
2.4.2.5 อิทธิพลของการใช้และไม่ใช้สารหล่อลื่น

Wang และคณะ [85] ทำการเติมซิลิกอนไนไตรด์ลงในพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน และทดสอบการสึกหรอที่ปราศจากสารหล่อลื่น และที่สภาวะใช้น้ำเป็นสารหล่อลื่น พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสภาวะที่ปราศจากสารหล่อลื่นลดลงเมื่อปริมาณของซิลิกอนไนไตรด์เพิ่มขึ้น แต่ที่ใช้น้ำเป็นสารหล่อลื่นแสดงผลในทางตรงข้าม กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของซิลิกอนไนไตรด์เพิ่มขึ้น และอัตราการสึกหรอมีค่าลดลงจนถึง 1×10^{-6} ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนิวตันเมตร เมื่อทดสอบในสภาวะปราศจากสารหล่อลื่นที่มีปริมาณซิลิกอนไนไตรด์ร้อยละ 3 โดยปริมาตร ในสภาวะใช้น้ำเป็นสารหล่อลื่นอัตราการสึกหรอลดลงเล็กน้อยที่ร้อยละ 0.2-0.5 และเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอนุภาคตัวเติมเพิ่มขึ้น ทั้งยังพบว่าการใช้น้ำเป็นสารหล่อลื่นจะให้ค่าอัตราการสึกหรอสูงกว่าที่สภาวะปราศจากสารหล่อลื่นไม่ว่าจะเติมหรือไม่เติมอนุภาคเสริมแรงก็ตาม

2.4.2.5 อิทธิพลของวัสดุคู่สัมผัส (Counterface)

1. ความขรุขระของผิววัสดุคู่สัมผัส (Counterface Roughness)

ความขรุขระของผิววัสดุคู่สัมผัสส่งผลซับซ้อนอย่างมากต่อการสึกหรอของพอลิเมอร์ โดยทั่วไปควรมีความขรุขระน้อย เพื่อลดการขัดสีกับเนื้อพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังมีการใช้วัสดุคู่สัมผัสที่มีผิวขรุขระมาก อย่างไรก็ตาม ผิวของวัสดุคู่สัมผัสควรมีความขรุขระในระดับที่จำกัด ผลจากความขรุขระของผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นวัสดุคู่สัมผัสกับ UHMWPE มีผลต่ออัตราการสึกหรอ ดังรูปที่ 2.24 พบว่าความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ 1.25 เมตรต่อวินาที เหมาะสมกับการทดสอบที่ผิวมีความขรุขระในช่วง 0.1-0.2 ไมโครเมตร แต่ที่ความเร็ว 10 เมตรต่อวินาที พบว่าความขรุขระไม่ส่งผลต่ออัตราการสึกหรอ ซึ่งเกิดจากกลไกการสึกหรอที่เปลี่ยนไปเมื่อเพิ่มความเร็วสูงขึ้น [2]



รูปที่ 2.24 ผลจากความขรุขระของผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นวัสดุคู่สัมผัสกับ UHMWPE ที่มีผลต่อ อัตราการสึกหรอ [2]

2. ความแข็งของวัสดุคู่สัมผัส (Counterface Hardness)

โดยทั่วไปแล้ววัสดุคู่สัมผัสเป็นเหล็กชุบแข็งมีความแข็งมากกว่าพอลิเมอร์ วัสดุคู่สัมผัสควรจะมี ความแข็งเพียงพอที่จะไม่ถูกขัดสีจากสิ่งแปลกปลอม เช่น ทราย เพื่อไม่ให้เกิดผิวขรุขระและมาขัดสีเนื้อ พอลิเมอร์ ความแข็งของวัสดุคู่สัมผัสที่ 700 วิกเกอร์ เป็นค่าความแข็งที่นิยมใช้ในการศึกษาการสึก หรอของพอลิเมอร์ และยังเป็นค่าความแข็งที่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานต่างๆ [2]

อย่างไรก็ตามการใช้งานวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ไม่สามารถที่จะมองปัจจัยเพียงปัจจัยเดียวเพื่อจะ นำมาวิเคราะห์ถึงกลไกการสึกหรอหรือความเสียหายที่เกิดขึ้น การวิเคราะห์ผลดังกล่าวจะต้องรวม ปัจจัยหลายๆปัจจัยเข้าด้วยกัน อาทิเช่น การหาขีดจำกัดการอ่อนตัวของพอลิเมอร์ จะต้องคำนึงถึงค่า P_v limit ดังตารางที่ 2.12 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของสภาวะในการทดสอบและค่า P_v limit ของ PEEK ค่า P_v limit บ่งบอกถึงขีดจำกัดในการหลอมตัวของวัสดุที่เกิดจากแรงดันในการเสียดสีใน บริเวณผิวสัมผัส ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญประการหนึ่งที่ต้องพิจารณาในการสึกหรอของพอลิเมอร์ การใช้งาน พอลิเมอร์ที่สภาวะหนึ่งจะมีค่า P_v limit ค่าหนึ่ง ดังนั้นถ้าพอลิเมอร์มีการใช้งานเกินค่า P_v limit อุณหภูมิบริเวณผิวสัมผัสจะสูงขึ้น ทำให้พอลิเมอร์อ่อนตัวลง และอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นอย่าง รวดเร็ว [86] ค่า P_v limit สามารถหาได้จากสมการที่ 2.9

$$Pv \text{ limit} = P \times v$$

สมการที่ 2.9

โดย P คือ แรงกดในการทดสอบ (MPa)

V คือ ความเร็วในการทดสอบ (m/s)

ตารางที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของสภาวะในการทดสอบและค่า Pv limit ของ PEEK [86]

วัสดุพอลิเมอร์	ความหยาบผิว (ไมโครเมตร)	ความเร็วในการ ทดสอบ (m/s)	แรงกดในการ ทดสอบ (MPa)	อุณหภูมิทดสอบ (C°)
PEEK	-	1	1	20
PEEK	0.05	0.5	5	-

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hong และคณะ [3] ได้ศึกษาหาค่าความเสียหายและอัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนที่มีการเติมอะลูมินาขนาดนาโนและไมโครเมตรในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งผสมพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนในปริมาณร้อยละ 0 และ 10 โดยน้ำหนัก ผสมด้วยวิธีทางกล และขึ้นรูปด้วยวิธีอัดขึ้นรูปร้อน ทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วยวิธี Block-on-Ring พบว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนที่เติม Al_2O_3 โดยไม่ผสมพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนจะมีค่าความเสียหายลดลง โดยจะลดลงมากที่สุดเมื่อผสม Al_2O_3 ขนาด 15 นาโนเมตร และความเสียหายจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขนาดเป็น 90 และ 500 นาโนเมตร ตามลำดับ นอกจากนั้นยังพบว่าเมื่อเติมพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนลงไปวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนกับ Al_2O_3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอจะมีค่าต่ำกว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนกับ Al_2O_3 ที่ไม่มีการเติมพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน เมื่อศึกษารอยสึกหรอจาก SEM พบว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนกับ Al_2O_3 ที่มีการเติมพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนจะเกิดทรานสเฟอฟิล์มบริเวณผิวคู่สัมผัสทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอมีค่าต่ำลง

Geraldine และคณะ [87] ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนกับเส้นใยคาร์บอน โดยทำการเติมพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน และ MoS_2 หรือ แกรไฟต์ ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นของแข็ง ขึ้นรูปโดยวิธีฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) และทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วยวิธี Pin-on-Disc โดยทดสอบในสภาวะสุญญากาศ ซึ่งกำหนดปัจจัยทดสอบ คือ น้ำหนักกด 1 และ 7 เมกะพาสคัล ความเร็วในการทดสอบ 0.01, 0.1 และ 1 เมตร/

วินาที พบว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนกับเส้นใยคาร์บอนที่มีการเติม MoS_2 จะเกิดทรานสเฟอฟิล์มบริเวณผิวคู่สัมผัส เป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอจะมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มแรงกดและความเร็วในการทดสอบ

Long และคณะ [88] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกล สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่มีการผสมแกรไฟต์และ MoS_2 ในปริมาณร้อยละ 8 และทำการเติม Ekonal ซึ่งเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกเหมือนกับแกรไฟต์ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นของแข็ง ในปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 40 โดยทำการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 380 – 390 องศาเซลเซียส และทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วยวิธี Block-on-Ring พบว่าการเติม Ekonal ลงไปในพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่มีการผสมแกรไฟต์และ MoS_2 สามารถเพิ่มความแข็งแรงกดอัดสูงสุดที่ปริมาณ Ekonal ร้อยละ 25 นอกจากนั้นแล้ว Ekonal ยังช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอ เมื่อเพิ่มปริมาณ Ekonal มากถึงร้อยละ 35 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า Ekonal ที่เติมลงไปในพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่มีการผสมแกรไฟต์และ MoS_2 ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นของแข็ง เหมือนกับแกรไฟต์และ MoS_2

Kimura และคณะ [9] ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอของวัสดุคู่สัมผัสแบบรีงที่มีคู่สัมผัสได้แก่ Steel กับ Steel และ Steel กับ Cast Iron (Steel เป็นโลหะชนิดเดียวกันมีความแข็ง 750 Hv และ Cast Iron มีความแข็ง 215 Hv) โดยใช้ น้ำมันหล่อลื่นที่มีการเติมเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ลงไป โดยการทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วยวิธี Ring-on-Roller พบว่า แบบรีงที่มีผิวคู่สัมผัส Steel กับ Cast Iron ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ แต่แบบรีงที่มีคู่สัมผัสเป็น Steel กับ Steel ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ เนื่องจากโบรอนทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็น B_2O_3 มากจนทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราการสึกหรอจะมีค่าลดลงทั้งแบบรีงที่มีผิวคู่สัมผัส Steel กับ Cast Iron และ Steel กับ Steel เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์

Tharajak และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาดังอิทธิพลของปริมาณเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่มีผลต่อผิวเคลือบเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน โดยใช้กระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความร้อนแบบ LVOF ลงบนชิ้นงานรองรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ พบว่าค่าความแข็งและปริมาณความเป็นผลึกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณการเติมเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์เพิ่มขึ้น และที่ปริมาณการเติมเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำที่สุด อีกทั้งค่าอัตราการสึกหรอจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์เช่นกัน