

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

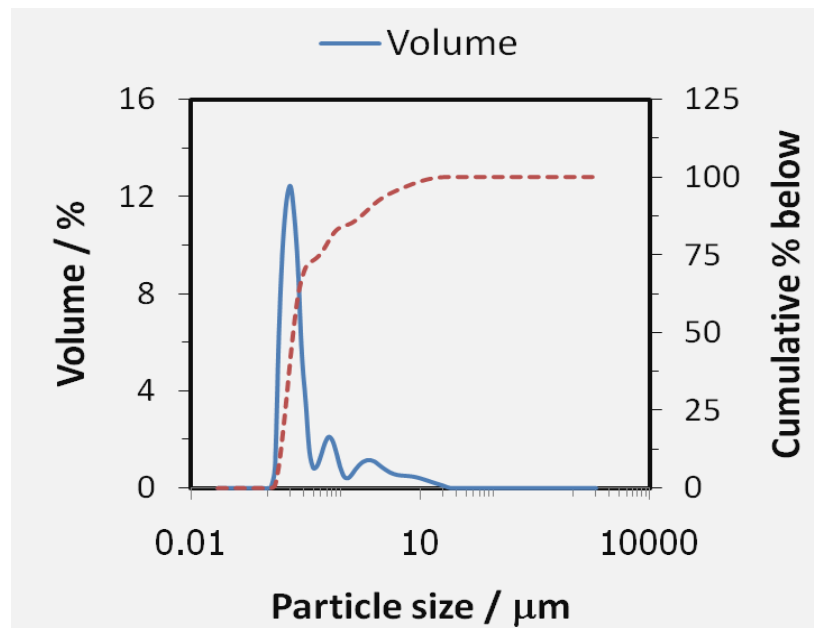
4.1 ลักษณะทางกายภาพ และโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ

4.1.1 ผงเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์

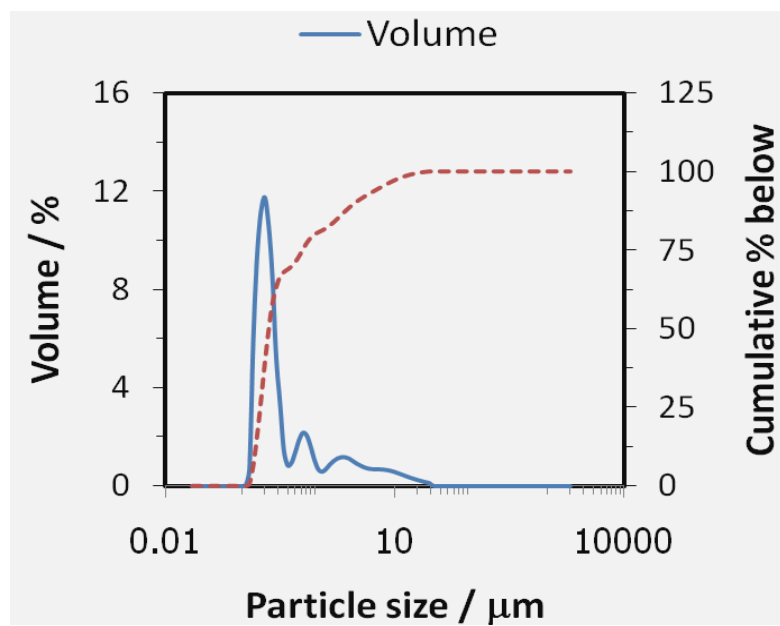
การกระจายตัวของอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ (h-BN) (Particle Size Distribution) แสดงดังรูปที่ 4.1 ลักษณะการกระจายตัวของผงทั้ง 2 ขนาดมีการกระจายตัวอยู่ในช่วงที่แคบคล้ายกัน ดังจะเห็นได้จากลักษณะของกราฟที่ค่อนข้างแคบและสูงจากการตรวจสอบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคดังตารางที่ 4.1 พบว่าผงขนาด 0.1 ไมโครเมตร มีความคลาดเคลื่อนสูง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตรมักจะมีการเกาะกลุ่มกัน ดังนั้นในการวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคจึงมีขนาดใหญ่กว่าความเป็นจริง ในส่วนของอนุภาคขนาด 1.5 ไมโครเมตร มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคจริง โดยทั้งนี้ได้ทำการตรวจสอบลักษณะของอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ขนาด 0.1 ไมโครเมตรและ 1.5 ไมโครเมตรด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ดังรูปที่ 4.2a และ 4.2b ตามลำดับพบว่าอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ทั้ง 2 ขนาด มีลักษณะเป็นแผ่นบาง (Plate-like) เกาะกลุ่มกันโดยในรูปที่ 4.2a เป็นอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ขนาด 0.1 ไมโครเมตรพบว่าอนุภาคผงมีขนาดเล็กมากและจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนจึงยากต่อการตรวจสอบการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคผง ในรูปที่ 4.2b เป็นอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ขนาด 1.5 ไมโครเมตรมีขนาดของอนุภาคค่อนข้างสม่ำเสมอ

4.1.2 ผงพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของผงพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าผงพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนจะมีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน (ดังรูปที่ 4.3a) และไม่มีรูพรุน ซึ่งมีขนาดที่แตกต่างกัน นอกจากนั้นเมื่อตรวจสอบภาคตัดขวางของผงพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าผงพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันทั้งก้อน มีขอบค่อนข้างมน และรูปร่างไม่สมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3b เมื่อทำการวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (Particle Size Distribution) พบว่าผงพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 23.19 – 111.45 ไมโครเมตร ขนาดเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 63.15 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.4



a)



b)

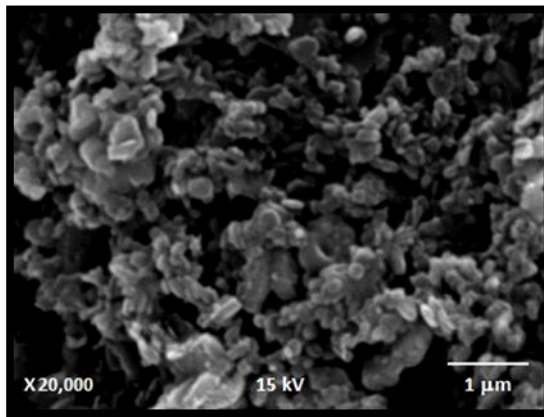
รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของอนุภาคผงเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์

a) ขนาด 0.1 ไมโครเมตร

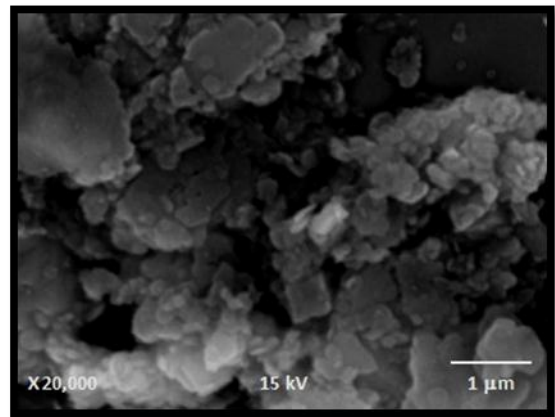
b) ขนาด 1.5 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคต่างๆ

Particle size	Size distribution range	Average diameter
0.1 ไมโครเมตร	0.15 - 2.18 ไมโครเมตร	0.89 ไมโครเมตร
1.5 ไมโครเมตร	0.15 – 3.03 ไมโครเมตร	1.23 ไมโครเมตร



a)

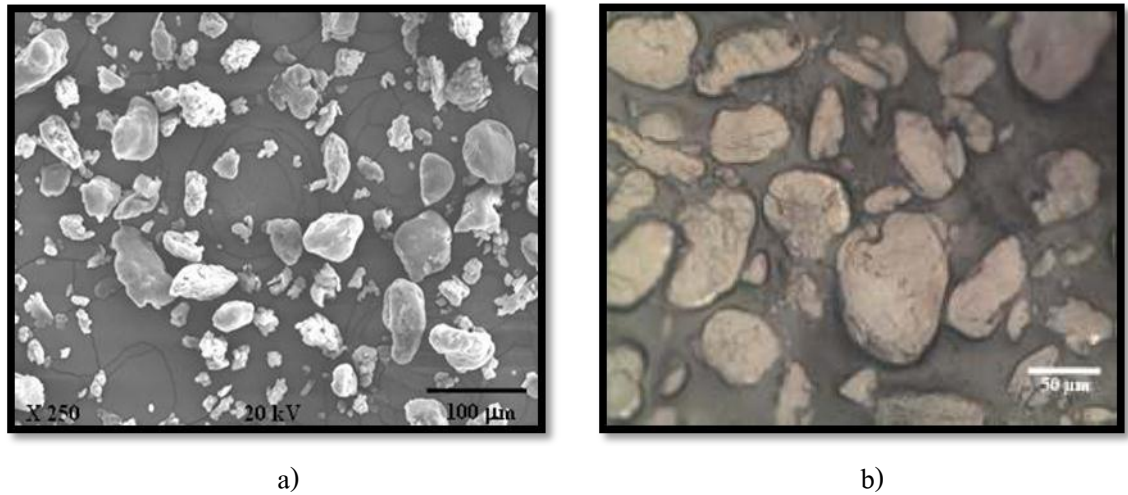


b)

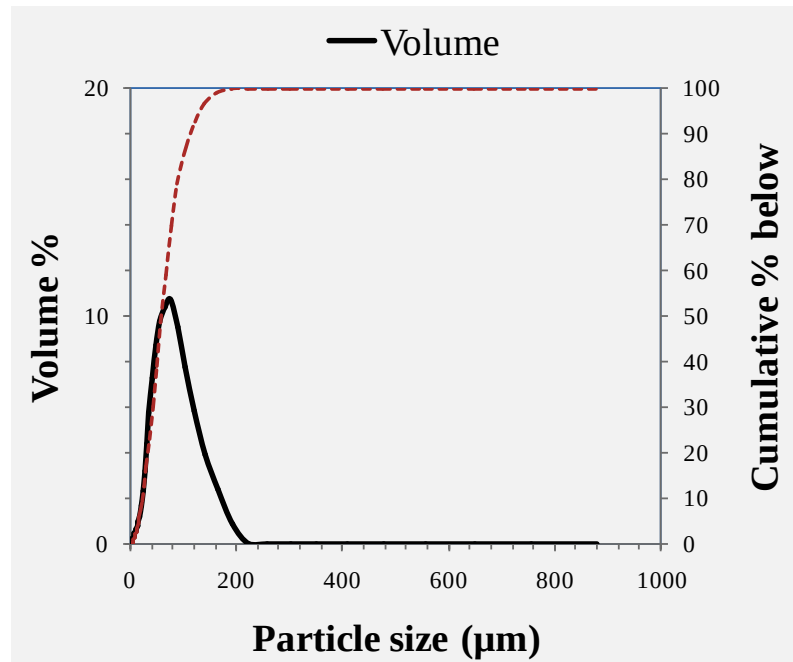
รูปที่ 4.2 ลักษณะของผงเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

a) ผง h-BN ขนาด 0.1 ไมโครเมตร

b) ผง h-BN ขนาด 1.5 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.3 ลักษณะของพอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตน a) ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) b) ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสง [82]

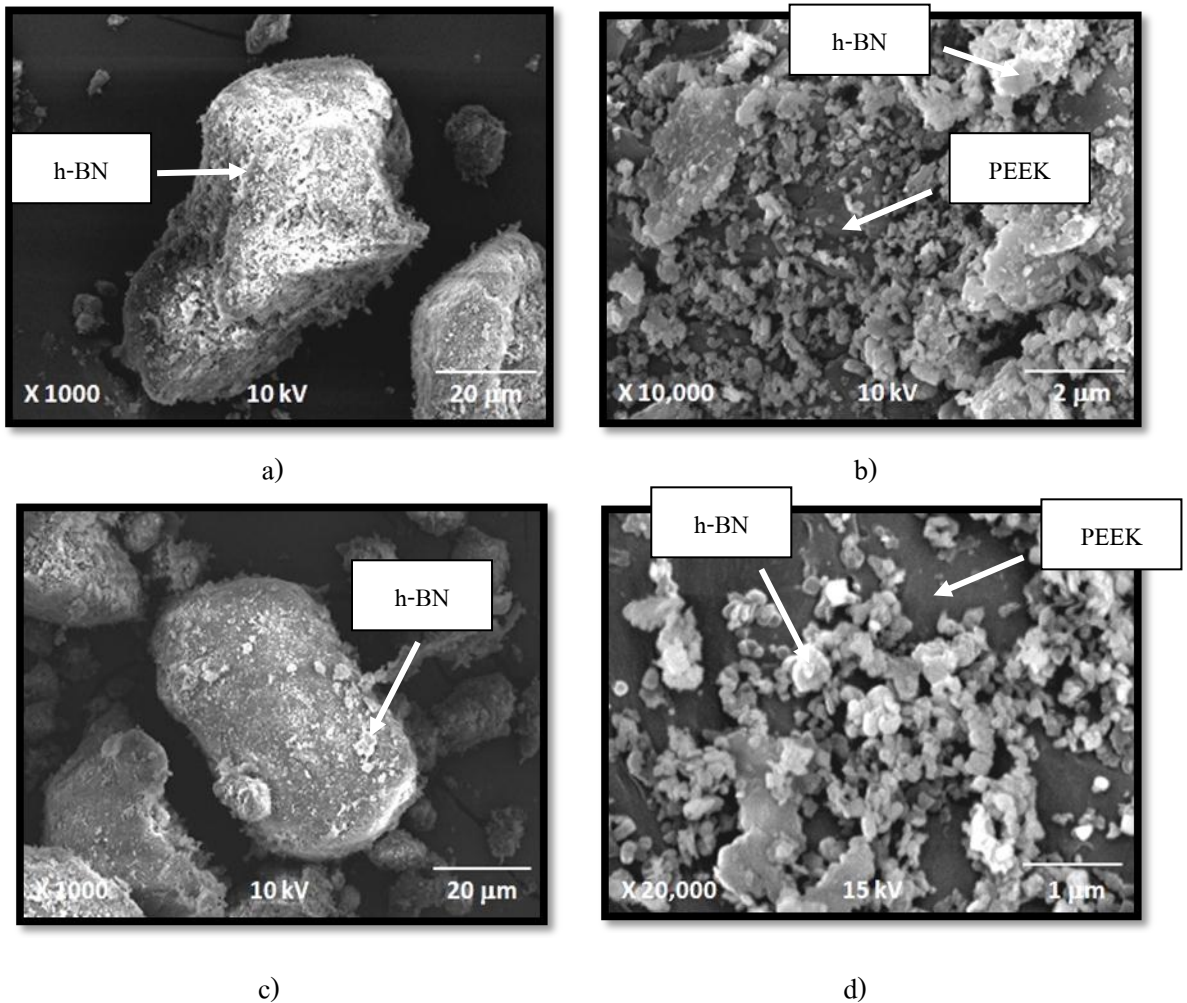


รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของอนุภาคพอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตน [82]

4.1.3 วัสดุเชิงประกอบเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์/ผงพอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตน

หลังจากผสมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ลงในผงพอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตนในเอทานอลด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer) โดยได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3 ได้ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของอนุภาคผงเชิงประกอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าผงเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ทั้งขนาด 0.1 และ 1.5 ไมโครเมตร กระจายตัวได้ดีและผงบางส่วนเกาะอยู่บริเวณผิวและซอกมุมของพอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตน ดังรูปที่ 4.5a และ 4.5c ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มกำลังขยายสูงขึ้นพบว่าหลังจากการผสมผงเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์บางส่วนจะเกิดการเกาะกลุ่มกัน

(Agglomerate) ทำให้เกิดขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นมากกว่าขนาดเดิม ดังแสดงในรูป 4.5b และ 4.5d ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ลักษณะการเกาะของอนุภาคเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์ (10 wt%) บนผิวพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนจากการผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก a) และ b) อนุภาคเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์ขนาด 0.1 ไมโครเมตร c) และ d) อนุภาคเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์ขนาด 1.5 ไมโครเมตร

4.2 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์/พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

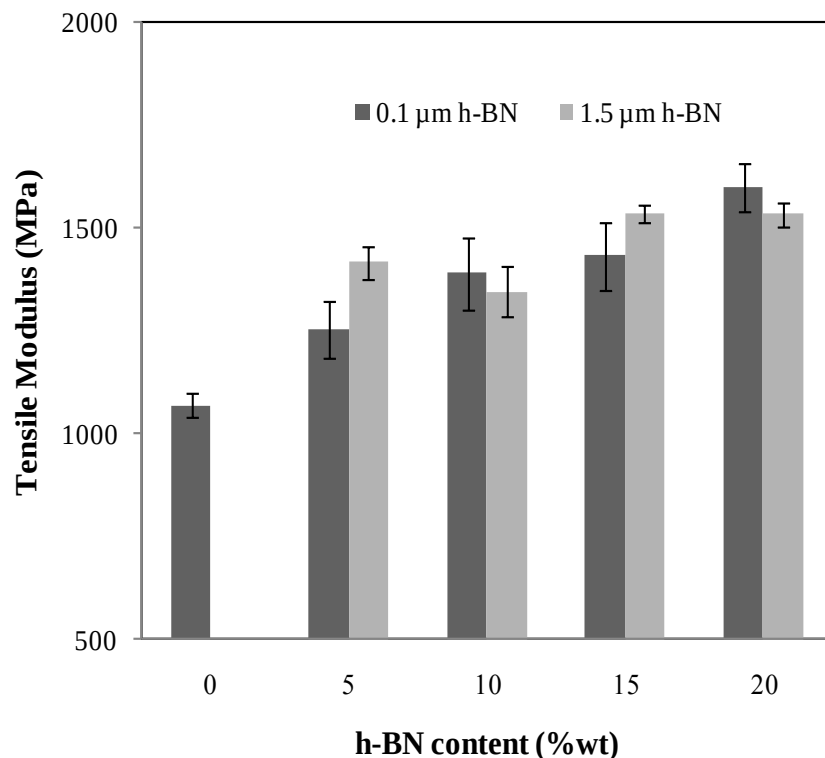
ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์/พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนและพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ไม่ได้เติมอนุภาคเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล 3 ประเภทได้แก่ความแข็ง (Hardness) ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) และความต้านทานแรงดัดงอ (Flexural Strength) เพื่อศึกษาผลของการเติมอนุภาคเสกชะโกนอลโบรอน

ไนไตรด์ทั้ง 2 ขนาด ได้แก่ขนาด 0.1 และ 1.5 ไมโครเมตร ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลด้านต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ทำการเติมปริมาณผงเฮกซะโกนอนโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักและวัสดุพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ไม่ได้ทำการเติมผงเฮกซะโกนอนโบรอนไนไตรด์

4.2.1 อิทธิพลของปริมาณและขนาดของอนุภาคเฮกซะโกนอนโบรอนไนไตรด์ที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

4.2.1.1 ค่าอิลาสติคโมดูลัส

จากรูปที่ 4.6 แสดงผลการศึกษาค่าอิลาสติคโมดูลัส พบว่า ค่าอิลาสติคโมดูลัสของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอนโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 5 ถึง 20 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากการเติมอนุภาคที่มีความแข็งทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ขณะที่ได้รับแรง ทำให้ค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) ของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าอิลาสติคโมดูลัสของวัสดุมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mishra และคณะ [92] ที่ศึกษาการเติมอนุภาคเซอร์โคเนียในพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน พบว่า ค่าอิลาสติคโมดูลัสจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเซอร์โคเนียและยังเป็นผลให้ความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลงด้วย



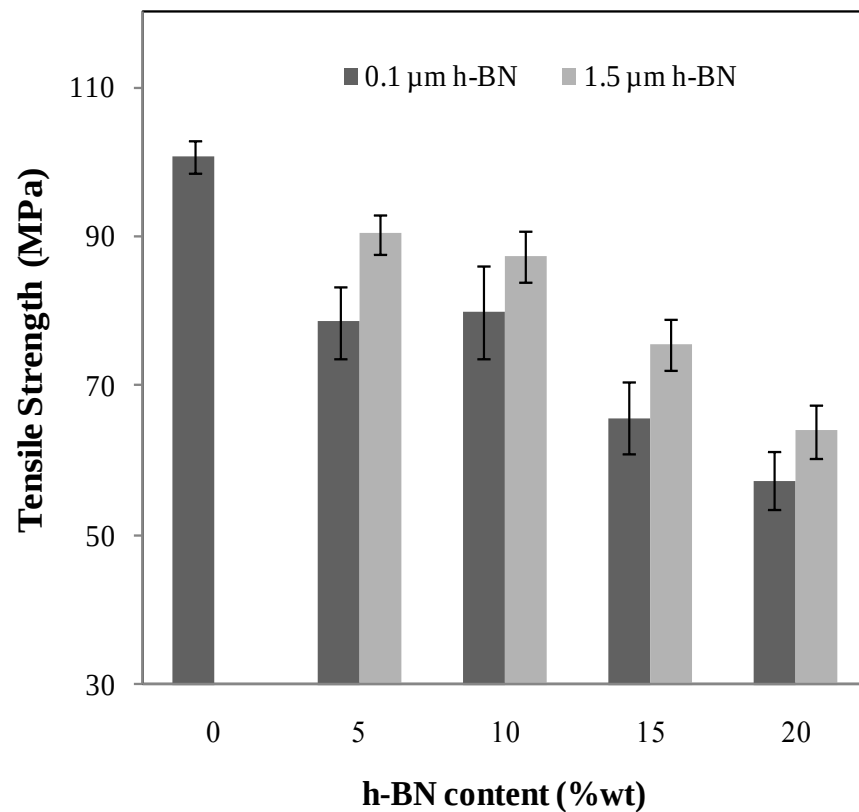
รูปที่ 4.6 อิลาสติคโมดูลัสของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

สำหรับการศึกษาผลของขนาดอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์พบว่า ขนาดของอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ทั้ง 2 ขนาด จะส่งผลทำให้ค่าอัสติกมอดุลัสของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์อีโตนแตกต่างกันเล็กน้อย

4.2.1.2 ความต้านทานแรงดึง

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบแรงดึง พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์อีโตนมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 5 ถึง 20 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์เป็นการลดปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของวัสดุหลัก นั่นคือพอลิอีเทอร์อีเทอร์อีโตน ซึ่งเป็นส่วนที่รับแรงของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์อีโตน นอกจากนี้การเติมปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์เพิ่มขึ้นจะไปขัดขวางการส่งผ่านแรงของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์อีโตน รวมถึงอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ไม่ได้เป็นสารเสริมแรงในวัสดุหลัก [93] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kuo และคณะ [94] ศึกษาการเติมอนุภาคซิลิกาขนาด 30 นาโนเมตร ลงในพอลิอีเทอร์อีเทอร์อีโตน พบว่า เมื่อเติมอนุภาคซิลิกาในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่า Ultimate Tensile Strength (UTS) มีค่าลดลง ดังนั้นเมื่อมีการให้แรงกับพอลิอีเทอร์อีเทอร์อีโตนที่มีการเติมอนุภาคอนุภาคซิลิกาจะทำให้วัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์อีโตนไม่แข็งแรงและขาดออกจากกันง่าย เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Wang และคณะ [95] ศึกษาการเติมไฮดรอกซีแอปาไทต์ลงใน พอลิอีเทอร์อีเทอร์อีโตนที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล พบว่า การเติมไฮดรอกซีแอปาไทต์ลงในพอลิอีเทอร์อีเทอร์อีโตน ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลง เนื่องจากอนุภาคเหล่านั้นขัดขวางการส่งผ่านแรงของวัสดุเชิงประกอบ

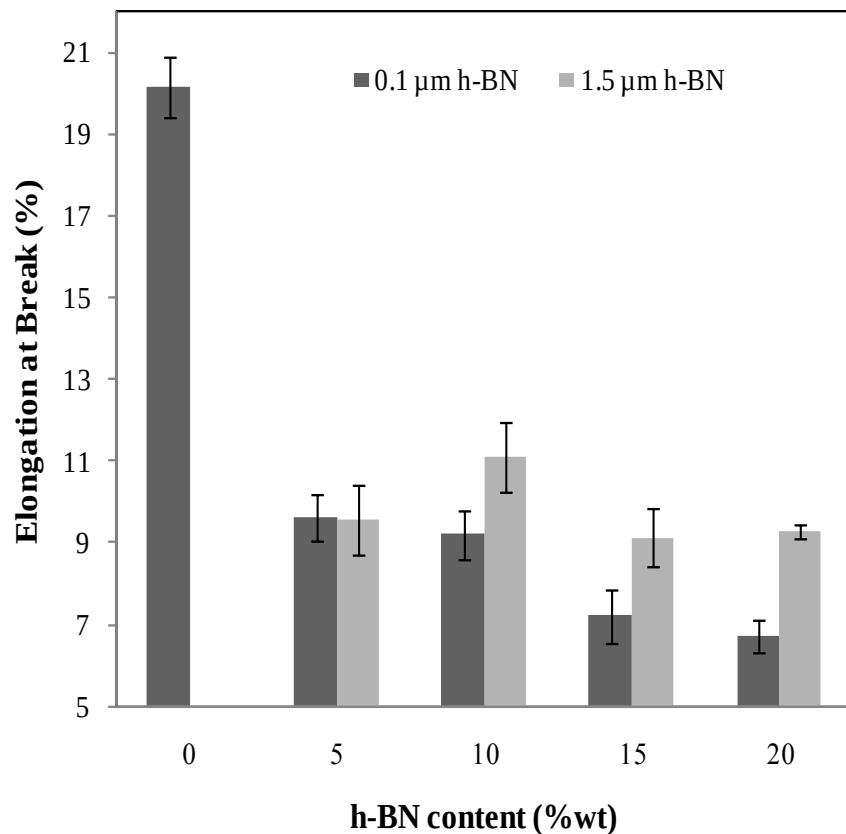
สำหรับการศึกษาผลของขนาดอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ พบว่า อนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ขนาด 1.5 ไมโครเมตร จะส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์อีโตนมีความต้านทานแรงดึงสูงกว่าอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ขนาด 0.1 ไมโครเมตร ทั้งนี้เนื่องจากการอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ขนาด 0.1 ไมโครเมตรซึ่งมีขนาดเล็กมาก จะเกิดการเกาะกลุ่มกัน (Agglomerate) ทำให้เกิดอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่ใหญ่ขึ้นและกระจายตัวได้ไม่ดีในวัสดุหลัก ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 4.1.3



รูปที่ 4.7 ความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

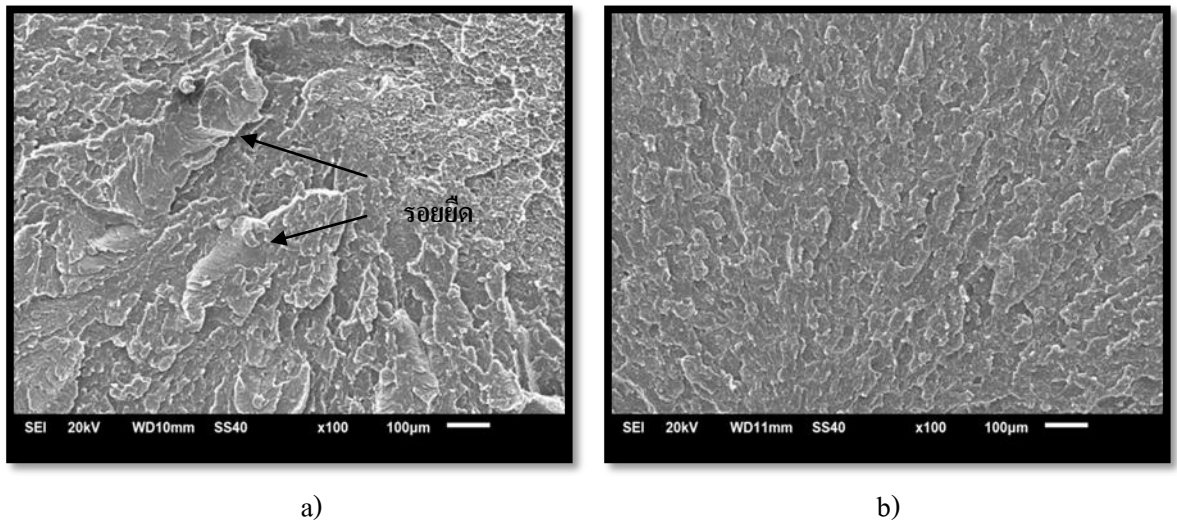
4.2.1.3 ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด

จากรูปที่ 4.8 แสดงร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน พบว่า ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 5 ถึง 20 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่เติมลงไปจะขัดขวางการยืดหยุ่นของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนก่อนที่จะเกิดการแตกหัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lai และคณะ [96] ได้ศึกษาการเติมอนุภาคนาโนซิลิกาในพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน พบว่า ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคนาโนซิลิกาจากร้อยละ 2 ถึง 10 โดยน้ำหนัก และงานวิจัยของ Wang และคณะ [95] ซึ่งศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่มีการเติมไฮดรอกซีเอปาทาइटพบว่าวัสดุเชิงประกอบเติมไฮดรอกซีเอปาทาइट/พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนมีความยืดหยุ่นลดลง นอกจากนั้นยังสอดคล้องกับค่าอึลาสติคโมดูลัสที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้นดังที่กล่าวไว้ข้างต้นด้วย



รูปที่ 4.8 ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

จากการตรวจสอบบริเวณรอยแตกหักบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงานพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ไม่มีการเติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ พบว่า รอยแตกบริเวณจุดขาดจะแสดงลักษณะรอยขีดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพอลิเมอร์ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก ดังแสดงในรูปที่ 4.9a เมื่อเติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์จะทำให้วัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนมีความเปราะสูงขึ้น รอยแตกบริเวณจุดขาดจะไม่มีรอยขีดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งเป็นลักษณะการแตกหักแบบเปราะดังแสดงในรูปที่ 4.9b จากการศึกษากการเติมอนุภาคเถ้าลอยในพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน พบว่า การเติมอนุภาคเถ้าลอยทำให้วัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนมีความเปราะ (Brittle) มากขึ้น [82]



รูปที่ 4.9 ลักษณะรอยแตกบริเวณจุดขาดจากการทดสอบความต้านทานแรงดึง

- a) รอยแตกบริเวณจุดขาดของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ไม่มีการเติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์
- b) รอยแตกบริเวณจุดขาดของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่มีการเติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์

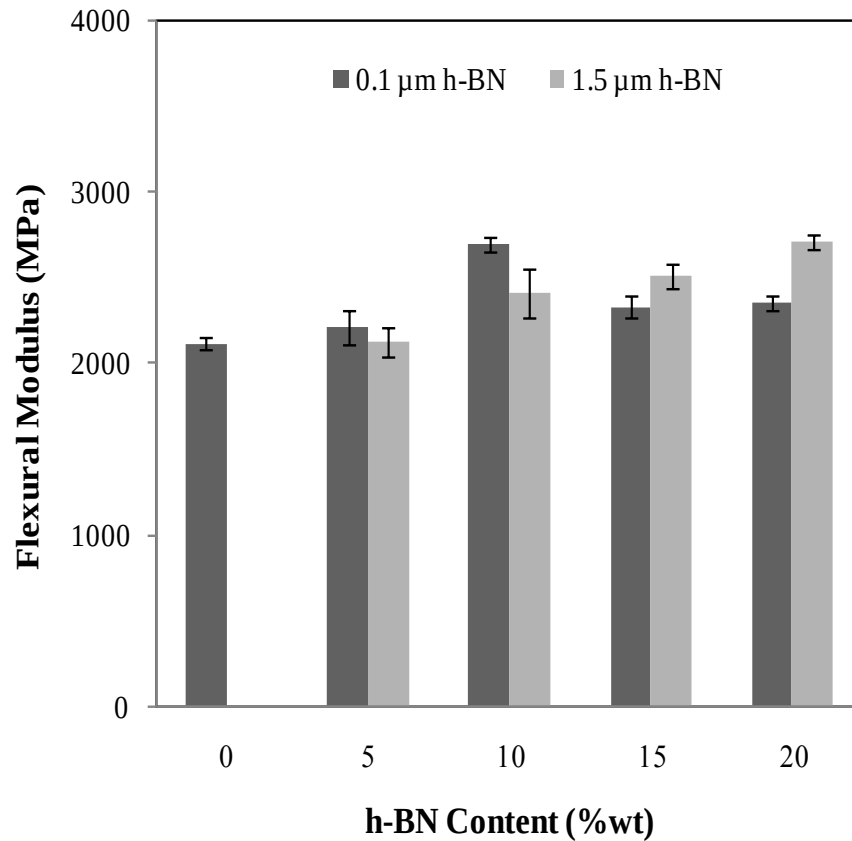
สำหรับการศึกษาผลของขนาดอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ พบว่า อนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ขนาด 1.5 ไมโครเมตร จะส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนมีร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดสูงกว่าอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ขนาด 0.1 ไมโครเมตร เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ขนาด 0.1 ไมโครเมตร ทำให้เกิดอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่ใหญ่ขึ้นและกระจายตัวได้ไม่ดีในวัสดุหลัก

4.2.2 อิทธิพลของปริมาณและขนาดของอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่มีผลต่อความต้านทานต่อการดัดงอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

4.2.2.1 ค่ามอดุลัสการดัดงอ

จากรูปที่ 4.10 แสดงผลการศึกษามอดุลัสการดัดงอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน พบว่ามอดุลัสการดัดงอมีแนวโน้มเดียวกับค่าอิลาสติกมอดุลัสซึ่งเหตุผลเหมือนกัน ดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2.1.1 นั่นคือ ค่ามอดุลัสการดัดงอมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mishra และคณะ [92] ที่ศึกษาการเติมอนุภาคเซอร์โคเนียในพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน พบว่าเมื่ออนุภาคกระจายตัว (Dispersion) ในวัสดุหลัก ค่ามอดุลัสการดัดงอของวัสดุเชิงประกอบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น สำหรับการศึกษาลักษณะของขนาดอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์

ไทรด์ พบว่า ขนาดของอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนในไทรด์ทั้ง 2 ขนาด จะส่งผลทำให้ค่ามอดูลัสการดัดงอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนแตกต่างกันเล็กน้อย

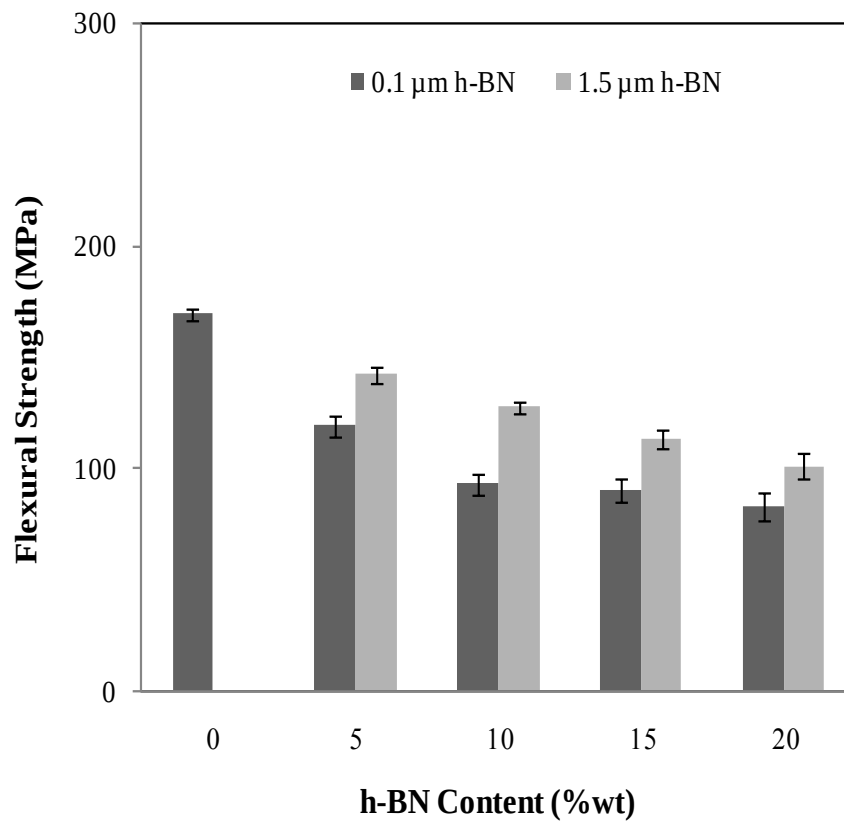


รูปที่ 4.10 ค่ามอดูลัสการดัดงอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

4.2.2.2 ความต้านทานต่อการดัดงอ

จากรูปที่ 4.11 แสดงผลการศึกษาความต้านทานต่อการดัดงอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน พบว่า ความต้านทานต่อการดัดงอมีผลแนวโน้มเดียวกับค่าความต้านต่อแรงดึง ดังที่กล่าวในหัวข้อ 4.2.1.2 นั่นคือการเพิ่มปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนในไทรด์เป็นการลดปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของวัสดุหลักที่เป็นส่วนสำคัญในการรับแรง และจะไปขัดขวางการส่งผ่านแรงของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนจนทำให้ค่าความต้านทานต่อการดัดงอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนมีค่าลดลง สำหรับการศึกษาผลของขนาดอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนในไทรด์ พบว่า อนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนในไทรด์ขนาด 1.5 ไมโครเมตร จะส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนมีความต้านทานต่อการดัดงอสูงกว่าอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนในไทรด์ขนาด 0.1 ไมโครเมตร ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนในไทรด์ขนาด 0.1

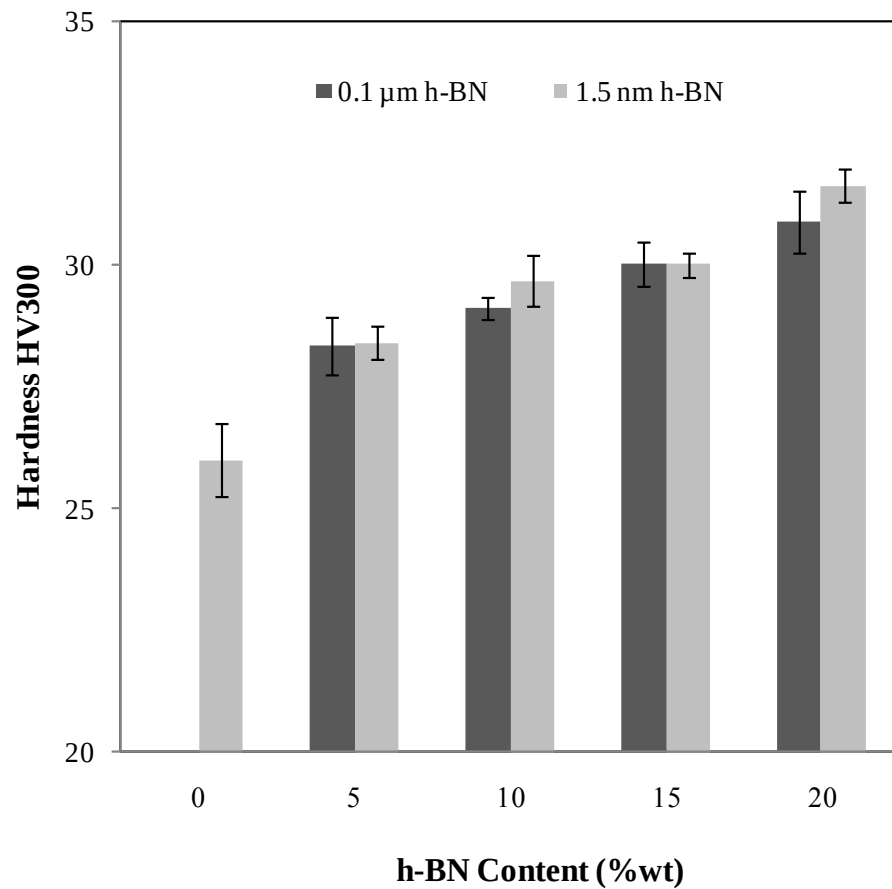
ไมโครเมตรซึ่งมีขนาดเล็กมาก จะเกิดการเกาะกลุ่มกัน ทำให้เกิดอนุภาคเฮกซะโกนอนโบรอนในไตรด์ที่ใหญ่ขึ้นและกระจายตัวได้ไม่ดีในวัสดุหลัก



รูปที่ 4.11 ความต้านทานต่อการดัดงอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตน

4.2.1 อิทธิพลของปริมาณและขนาดของอนุภาคเฮกซะโกนอนโบรอนในไตรด์ที่มีผลต่อความแข็งของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตน

จากการทดสอบความแข็งระดับจุลภาคของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตน พบว่า การเติมอนุภาคเฮกซะโกนอนโบรอนในไตรด์ส่งผลให้ความแข็งของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนมีความแข็งสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเฮกซะโกนอนโบรอนในไตรด์ร้อยละ 5 ถึง 20 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคเฮกซะโกนอนโบรอนในไตรด์เป็นวัสดุที่มีความแข็งสูงเท่ากับ 1500 HV [97] เมื่อกระจายตัวอยู่ในวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนจะสามารถช่วยรับแรงได้ดีส่งผลทำให้ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเติมอะลูมินา เซอร์โคเนีย อนุภาคซิลิกา อนุภาคแก้วลอย และซิลิกอนไนไตรด์ ลงในพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตน ซึ่งพบว่าความความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น [3, 5, 81, 82, 89]



รูปที่ 4.12 ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

สำหรับการศึกษาผลของขนาดอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ พบว่า ขนาดของอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ทั้ง 2 ขนาด จะส่งผลทำให้ค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนแตกต่างกันเล็กน้อย

4.3 สมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์/พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

ในการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เติมและไม่เติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ ผลการทดสอบแบ่งได้เป็น 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอจากอิทธิพลของการไม่เติมและเติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ทั้ง 2 ขนาดที่ปริมาณร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักลงในพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน ส่วนที่สองเป็นอิทธิพลของการเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบที่มีผลต่อพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เติมและไม่เติมอนุภาค

เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ และในส่วนที่สามเป็นผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอจากอิทธิพลของการเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงในวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่มีปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก สำหรับปัจจัยในการทดสอบของทั้ง 3 ส่วน ได้แก่ น้ำหนักกด และระยะทางในการทดสอบ ซึ่งจะแตกต่างกันไปในแต่ละส่วนดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.1 โดยก่อนทดสอบได้ทำการขัดผิวชิ้นงานให้มีความหยาบผิว (Ra) ประมาณ 0.08 – 0.12 ไมโครเมตร จากนั้นทำการทดสอบการสึกหรอแล้วหาอัตราการสึกหรอจากชิ้นงานเป็นปริมาตรของวัสดุที่หายไปต่อระยะทางการทดสอบ โดยผลการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.1 ความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์/พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

ในการทดสอบส่วนแรกจะใช้ปัจจัยการทดสอบ ได้แก่ น้ำหนักกดเท่ากับ 10, 20 และ 30 นิวตัน และระยะทางการทดสอบเท่ากับ 1 และ 2 กิโลเมตร ทำการทดสอบความต้านทานการสึกหรอที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

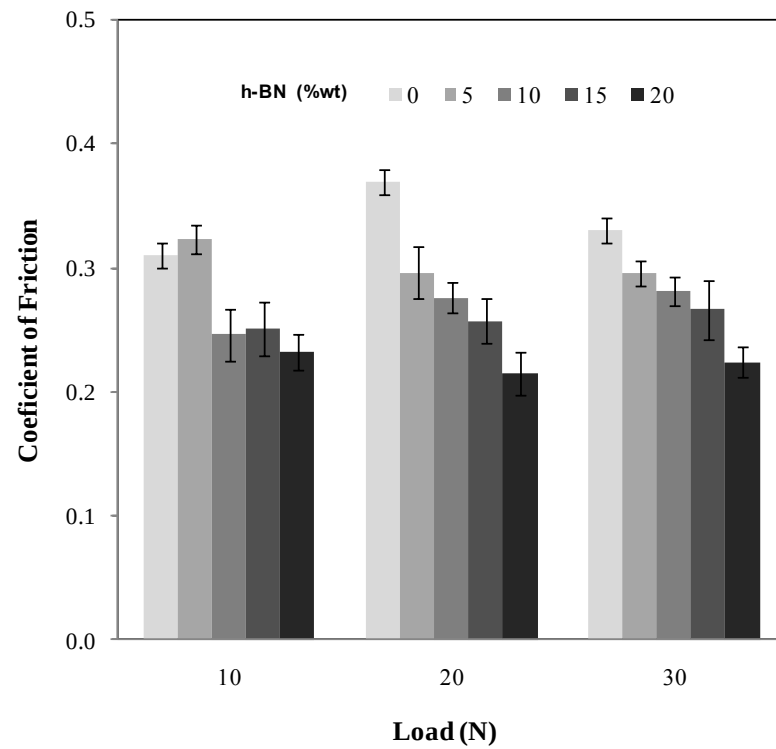
4.3.1.1 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

4.3.1.1.1 ผลของปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์

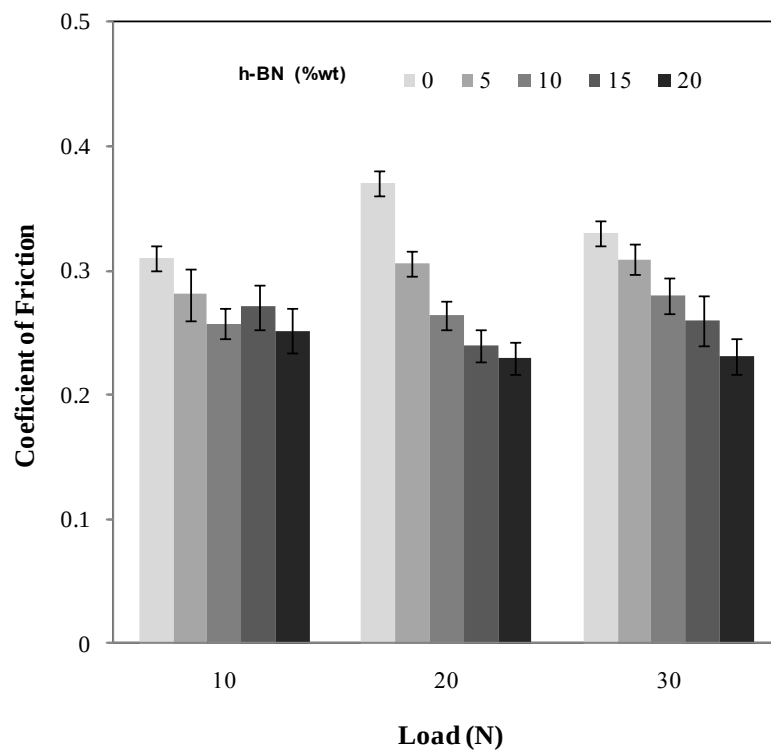
เมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ในพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากรูปที่ 4.13 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่น้ำหนักกดต่างกันพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่น้ำหนักกด 10, 20 และ 30 นิวตัน มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ ซึ่งจะเห็นได้ชัดที่น้ำหนักกด 20 และ 30 นิวตัน ทั้งนี้เนื่องจากน้ำหนักกดที่สูงนั้นจะทำให้อนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์จำนวนมากหลุดออกมาบริเวณวัสดุคู่สัมผัสระหว่างที่ทำการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ ซึ่งอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่หลุดออกมานั้น เป็นวัสดุประเภทเซรามิกสังเคราะห์ที่มีคุณสมบัติเป็นสารหล่อลื่นของแข็งมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ [8] จะส่งผลทำให้แรงเสียดทานระหว่างวัสดุคู่สัมผัส (Counterpart Material) มีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Samyn และคณะ [98] ที่ศึกษาสมบัติทางไทรโบโลยีของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอไมด์โดยการเติมอนุภาคแกรไฟต์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกและสมบัติการเป็นสารหล่อลื่นของแข็งเหมือนกับอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ พบว่า สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแกรไฟต์ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ในพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนมากขึ้น อนุภาคเหล่านั้นก็จะมีโอกาสหลุดออกมาอยู่บริเวณวัสดุคู่สัมผัสได้มากและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะลดลงมากขึ้น

ด้วยเช่นกัน ส่วนที่น้ำหนักกด 10 นิวตัน คาดว่าจะเป็นน้ำหนักคนน้อยเกินกว่าจะทำให้อนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์หลุดออกมาจากพอที่จะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน ดังนั้นจึงจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่น้ำหนักกด 10 นิวตัน จะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์และแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ นอกจากนั้นยังพบว่า การเติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์จะทำให้ความแข็งบริเวณผิวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ขนาด 1.5 ไมโครเมตรในพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ในการทดสอบที่ระยะทางต่างกันพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ระยะทางการทดสอบ 1 และ 2 กิโลเมตร จะมีแนวโน้มเดียวกัน นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ ดังแสดงในรูป 4.14

การเติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์นอกจากจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลงแล้วยังพบว่า การเติมอนุภาคดังกล่าวยังส่งผลทำให้การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีระยะ Runing-in State ในช่วงเท่ากับ 50-80 เมตร ซึ่งระยะดังกล่าวเป็นระยะที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุมีค่าเพิ่มสูงขึ้นต่อเนื่องก่อนที่จะเข้าสู่ระยะที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าคงที่ (Steady State) ดังแสดงในรูปที่ 4.15b, c, d และ e นอกจากนั้นยังพบว่า ระยะ Runing-in State ของวัสดุเชิงประกอบที่เติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์มีระยะที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะ Runing-in State ของวัสดุที่ไม่เติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ซึ่งมีระยะ Runing-in State เท่ากับ 200 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.15a



a)

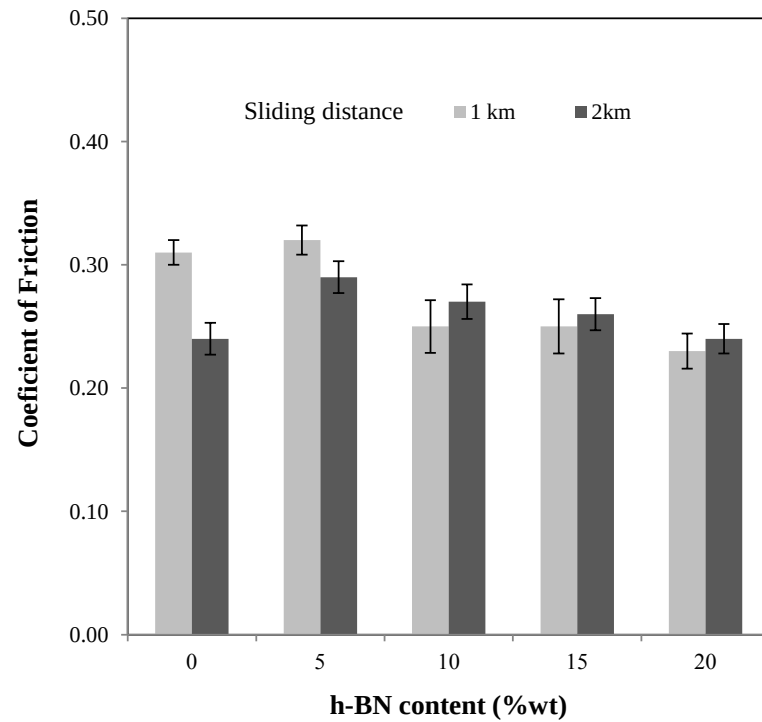


b)

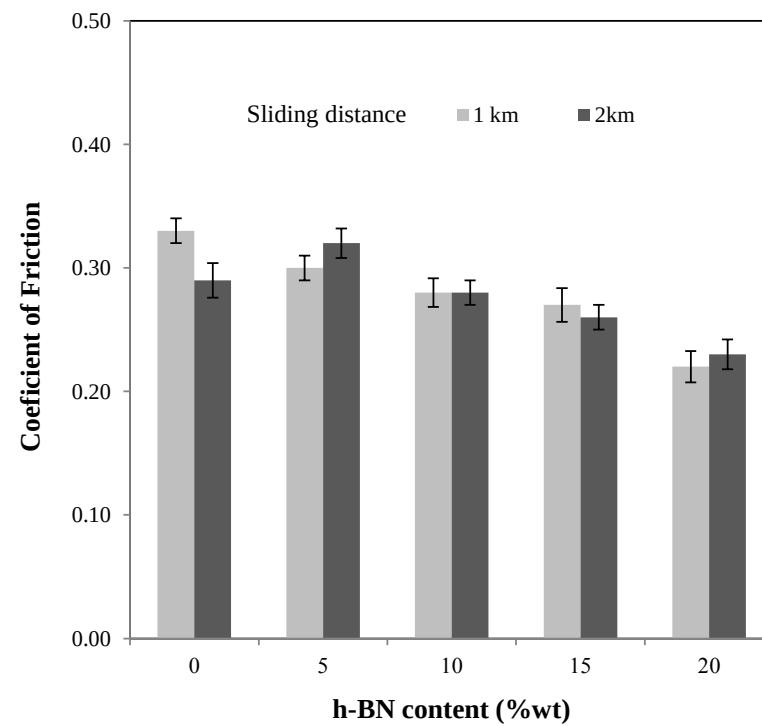
รูปที่ 4.13 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์อีโตน

a) อนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ขนาด 0.1 ไมโครเมตร

b) อนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ขนาด 1.5 ไมโครเมตร



a)

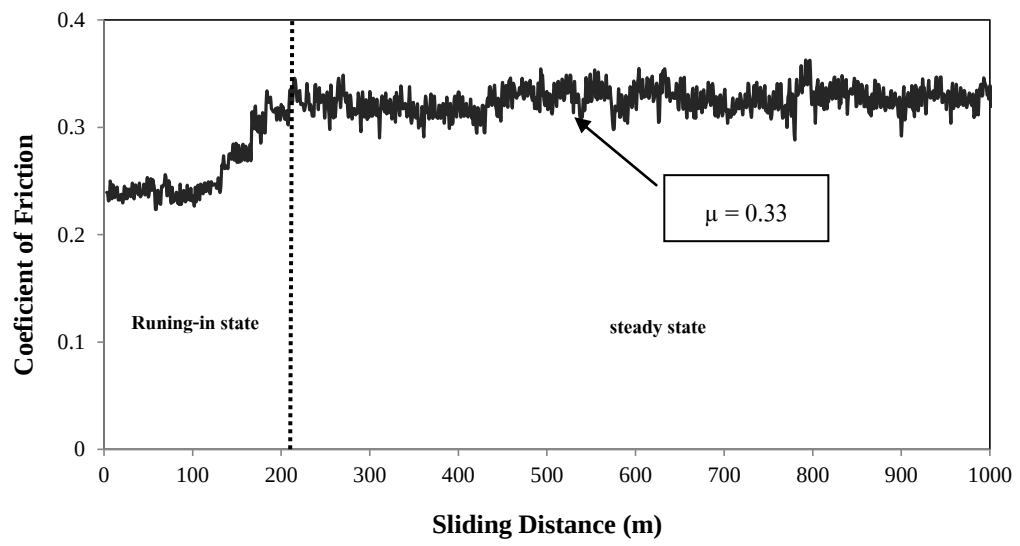


b)

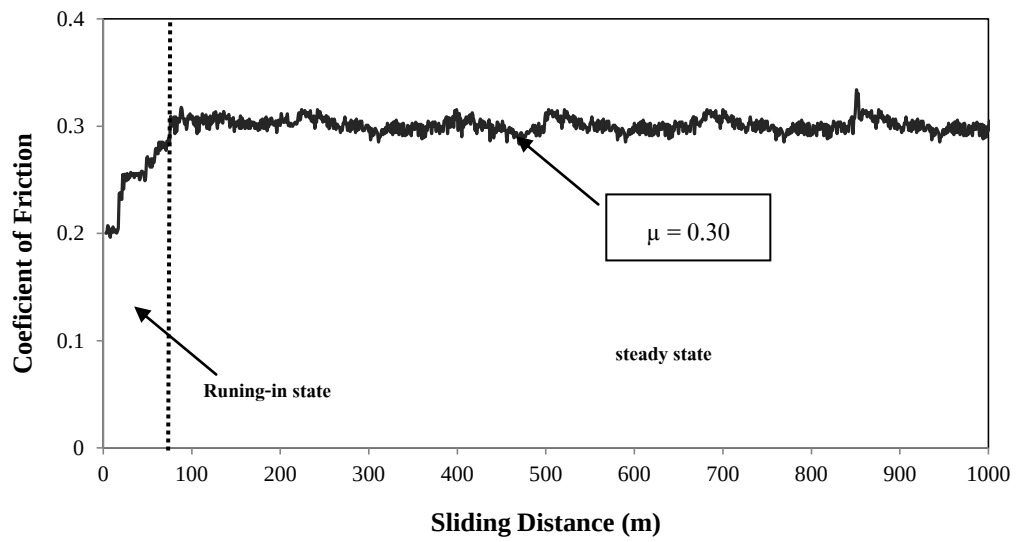
รูปที่ 4.14 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตน

a) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่น้ำหนักกด 10 N

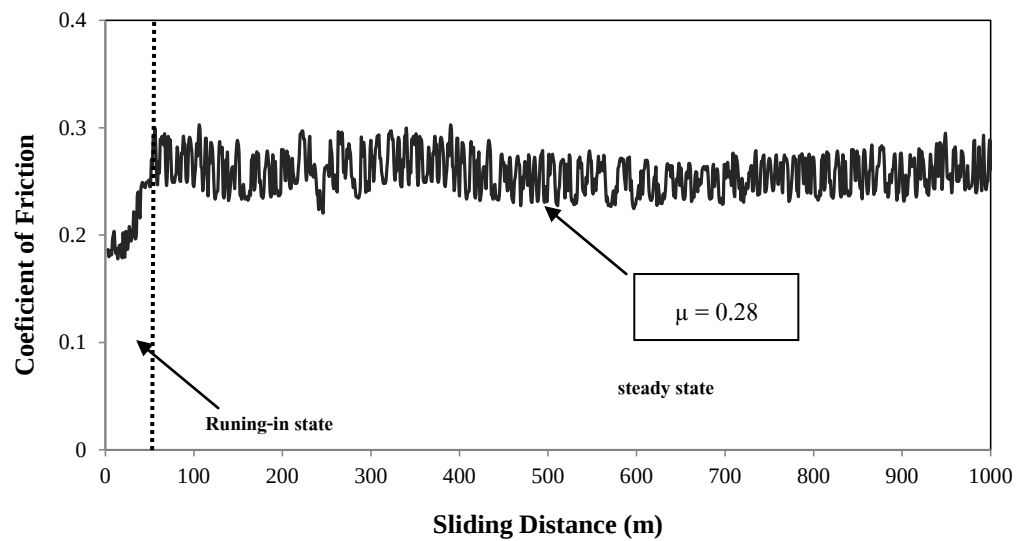
b) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่น้ำหนักกด 30 N



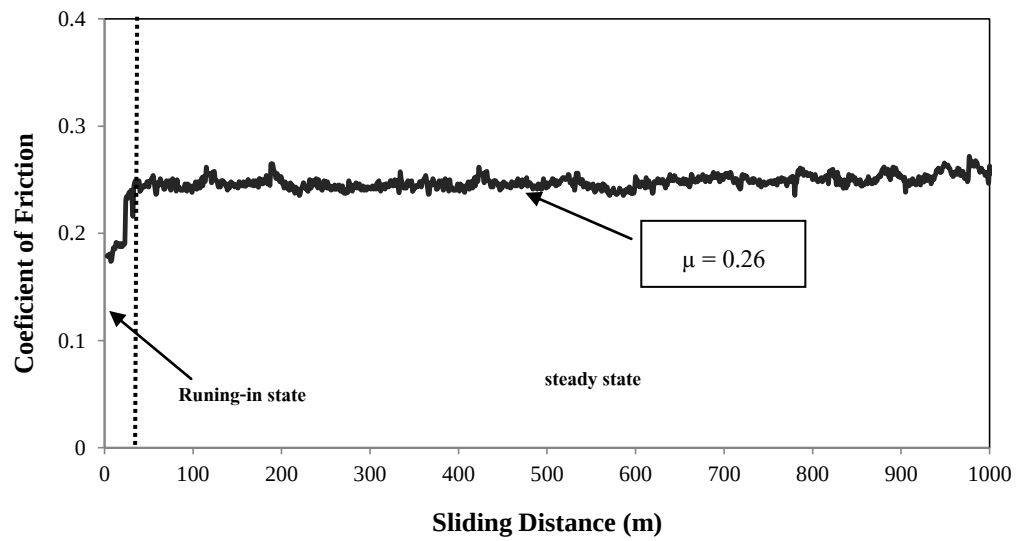
a)



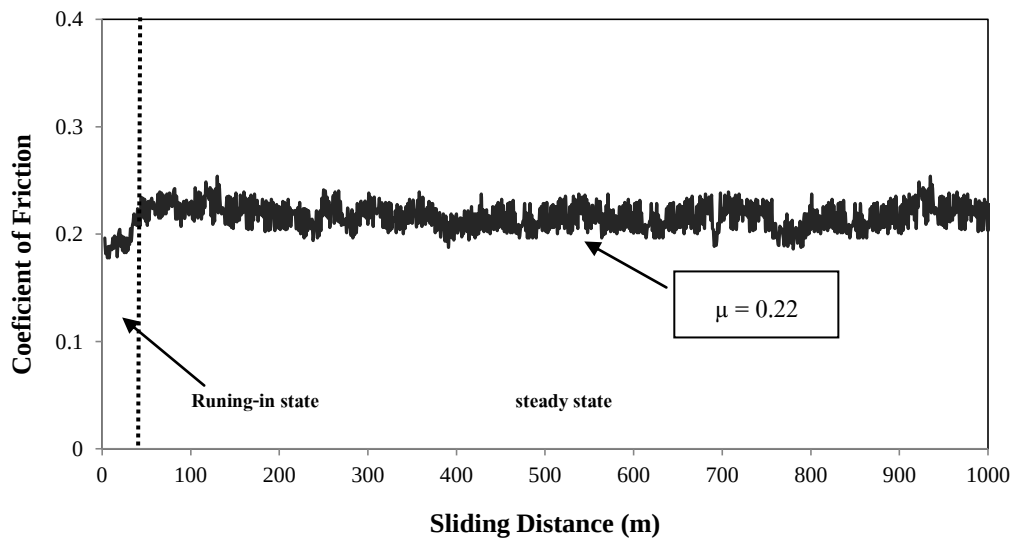
b)



c)



d)



e)

รูปที่ 4.15 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนที่ปริมาณอนุภาค
 เสกซะ โคนอลโบรอนไนไตรด์ต่างกัน ทดสอบที่น้ำหนักกด 30 นิวตัน ระยะทาง 1
 กิโลเมตร

- a) อนุภาคเสกซะ โคนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก
- b) อนุภาคเสกซะ โคนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
- c) อนุภาคเสกซะ โคนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
- d) อนุภาคเสกซะ โคนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก
- e) อนุภาคเสกซะ โคนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

4.3.1.1.2 ผลของน้ำหนักรีด

จากรูปที่ 4.13 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนที่ไม่เติมและเติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ปริมาณร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาผลจากน้ำหนักกรีดของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนที่ไม่มีการเติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ พบว่า เมื่อเพิ่มน้ำหนักกรีดจาก 10 นิวตัน เป็น 20 นิวตัน ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มน้ำหนักกรีดจะทำให้พื้นที่สัมผัส (Real Contact Area) ระหว่างลูกบอลกับพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น [2, 41] แต่เมื่อเพิ่มน้ำหนักกรีดเป็น 30 นิวตัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลง เนื่องจากความเค้นที่พอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนได้รับที่น้ำหนักกรีด 30 นิวตัน ทำให้เกิดความร้อนจากการเสียดสี คาดว่าความร้อนที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะกระตุ้นทำให้เศษสึกหรอทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเกิดการเสื่อมสภาพจนความหนืดของเศษสึกหรอลดลงโดยเป็นผลจากกระบวนการที่เรียกว่า Physicochemical [83] ดังนั้นเมื่อเศษสึกหรอเหล่านั้นติดบริเวณผิวสึกหรอพร้อมสัมผัสกับลูกบอลจะทำให้ลูกบอลลื่นไถลบนผิวได้ง่ายเป็นเพิ่มสมบัติการหล่อลื่นตัวเอง (Self Lubricant) นั้นเองซึ่งสอดคล้องกับวิทยานิพนธ์ของนริศดา น้อยน้ำ [82] ที่ศึกษาและทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตน ที่น้ำหนักกรีดเพิ่มขึ้นจาก 10 นิวตัน เป็น 20 นิวตัน ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะเพิ่มขึ้น จากนั้นจะลดลงเมื่อเพิ่มน้ำหนักกรีดเป็น 30 นิวตัน เนื่องมาจากความร้อนจากการเสียดสี นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาผลจากน้ำหนักกรีดของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนที่มีการเติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ปริมาณร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบในปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่เท่ากัน ที่น้ำหนักกรีด 10, 20 และ 30 นิวตัน พบว่า เมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักกรีดในการทดสอบ พอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนที่เติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแตกต่างกันเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ นั่นก็เนื่องจากอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่เติมลงไปมีการนำความร้อนที่ดีจะช่วยถ่ายเทความร้อนที่มาจากการเสียดสีอันเนื่องมาจากการเพิ่มน้ำหนักกรีดออกจากชิ้นงานทดสอบ [84, 93, 99]

4.3.1.1.3 ผลของระยะทางการทดสอบ

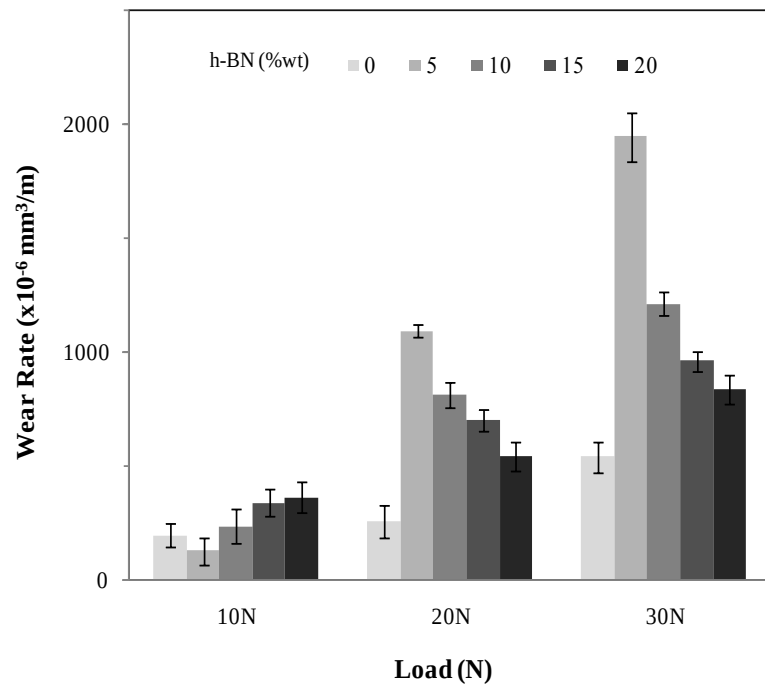
จากรูปที่ 4.14 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ระยะทางต่างกัน เมื่อพิจารณาผลของระยะทางการทดสอบของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เดิมและไม่เดิมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ พบว่า เมื่อเพิ่มระยะทางการทดสอบจาก 1 กิโลเมตร เป็น 2 กิโลเมตร ทั้งที่น้ำหนักกด 10 (4.14a) และ 30 (4.14b) นิวตัน ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ไม่เดิมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์จะมีค่าลดลงส่วนที่เดิมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์จะมีค่าใกล้เคียงกันและแตกต่างกันเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ นั่นก็เนื่องจากการเติมสารหล่อลื่นของแข็งลงในวัสดุหลักที่มีความแข็ง (Lubricating Phases in a Harder Matrix) แรงเสียดทานจะถูกควบคุมและค่าที่ได้จะเป็นค่าของวัสดุที่เติมลงไปวัสดุเชิงประกอบ [20] ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เดิมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์จะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเติมอนุภาคปริมาณเท่ากัน โดยค่าที่ได้เป็นค่าจากอิทธิพลในการเติมอนุภาคในปริมาณเท่ากัน และอนุภาคเหล่านี้ยังช่วยในการถ่ายเทความร้อนอันเกิดจากการเสียดสีเมื่อทดสอบเป็นเวลานานโดยความร้อนดังกล่าวจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะต่างจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ไม่เดิมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากพอลิเมอร์จะเกิดความร้อนจากการเสียดสีเมื่อทดสอบเป็นเวลานานและไม่มีอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ช่วยในการถ่ายเทความร้อนออกจากชิ้นงาน พอลิเมอร์จึงเกิดการไหลและเพิ่มสมบัติการหล่อลื่นตัวเอง เป็นผลทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีการเปลี่ยนแปลง [84]

4.3.1.2 ความต้านทานการสึกหรอ

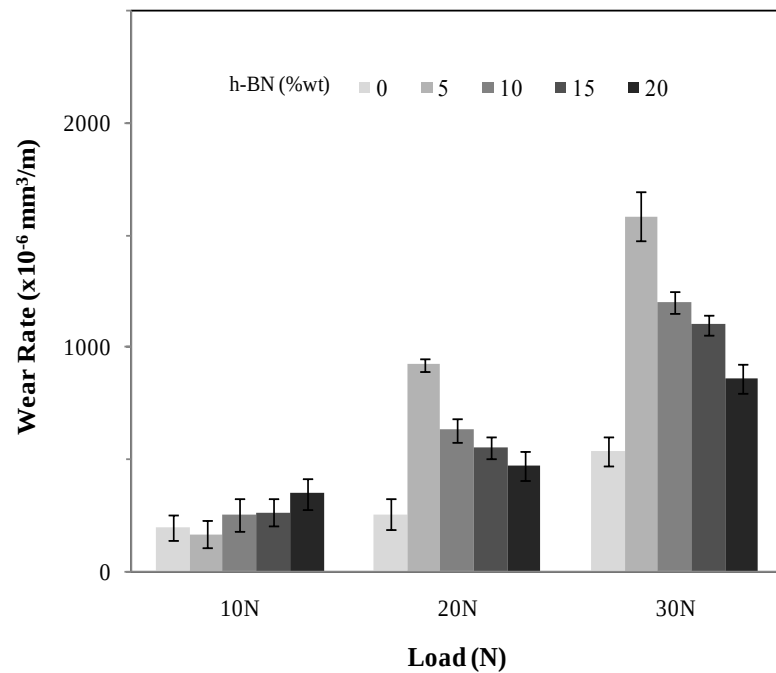
4.3.1.2.1 ผลของปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์

จากรูปที่ 4.16 แสดงอัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน เมื่อพิจารณาการเพิ่มปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักในพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน ที่น้ำหนักกด 10, 20 และ 30 นิวตัน พบว่า ผลของปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ต่ออัตราการสึกหรอสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี กรณีแรก คือ อัตราการสึกหรอที่น้ำหนักกด 10 นิวตัน จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราการสึกหรอจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากน้ำหนักกด 10 นิวตันเป็นน้ำหนักกดที่น้อยเกินกว่าจะทำให้พอลิเมอร์เปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plastic Deformation) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างส่วนใหญ่จึงเกิดในส่วนของพอลิเมอร์ กล่าวคือพอลิเมอร์ในส่วนรอยสึกหรอสามารถกลับคืนตัวหลังจากรับแรงกด ดังนั้นการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์

คิโตนที่มีอนุภาคเสกเซ โคนอลโบรอนไนไตรด์ในปริมาณที่น้อย (5 %wt) พอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุหลักสามารถกลับคืนตัว อัตราการสึกหรอจึงไม่มีความเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอเทอร์คิโตนที่ไม่เติมอนุภาคเสกเซ โคนอลโบรอนไนไตรด์ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเสกเซ โคนอลโบรอนไนไตรด์จากร้อยละ 10 ถึง 20 โดยน้ำหนัก พบว่าอัตราการสึกหรอมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อทำการทดสอบนอกจากอัตราการสึกหรอจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพอลิเมอร์เหมือนดังที่กล่าวข้างต้น แต่ยังพบว่า การเพิ่มปริมาณอนุภาคเสกเซ โคนอลโบรอนไนไตรด์มากขึ้นอนุภาคเสกเซ โคนอลโบรอนไนไตรด์บางส่วนสามารถหลุดออกมาแล้วชุดผิววัสดุร่วมด้วย (Three-body Abrasion) ทำให้เกิดรอยสึกหรอที่เป็นรอยขีดลึกและหยาบ ซึ่งยืนยันจากรอยสึกหรอที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด รูปที่ 4.17b แสดงรอยสึกหรอของพอลิเอเทอร์คิโตนที่เติมอนุภาคเสกเซ โคนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีรอยสึกหรอที่หยาบและรอยขีดลึกที่ลึกกว่าพอลิเอเทอร์คิโตนที่ไม่เติมอนุภาคเสกเซ โคนอลโบรอนไนไตรด์ ดังแสดงในรูป 4.17a สอดคล้องกับ Hasha และคณะ [30] ได้ศึกษาวัสดุเชิงประกอบของ PEEK และ PEKK โดยทำการเติมสารตัวเติม 2 ชนิดคือ แกรไฟต์และ PTFE พบว่าเมื่อทดสอบอนุภาคแกรไฟต์หลุดออกมาเป็นอนุภาคชุดขีดร่วม (Three-body Abrasion) ทำให้อัตราการสึกหรอสูงขึ้น นอกจากนั้นวิทยานิพนธ์ของ นันทิยา ศิลาคุปต์ [100] ศึกษาการเติมอนุภาคของ ALUMINIUM-BRONZE ในผิวเคลือบ PTFE/PEEK พบว่า อนุภาคของ ALUMINIUM-BRONZE ไปแทรกอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของผิวเคลือบและลูกบอล (Three-body abrasion) ส่งผลให้เกิดการสึกหรอแบบชุดขีด (Abrasive Wear) และทำให้ผิวเคลือบมี อัตราการสึกหรอสูงขึ้น นอกจากนั้นเมื่อทำการจำลองการทดสอบโดยใช้อนุภาคเสกเซ โคนอลโบรอนไนไตรด์เป็นวัสดุชุดขีดร่วม (Three-body Abrasion) โดยโรยอนุภาคเสกเซ โคนอลโบรอนไนไตรด์บนผ้าสักหลาดพร้อมกับนำชิ้นงานมาขัดถู พบว่า รอยสึกหรอของวัสดุที่การทดสอบมีอนุภาคเสกเซ โคนอลโบรอนไนไตรด์เป็นวัสดุชุดขีดร่วม ผิวสึกหรอจะมีรอยชุดขีดของอนุภาคซึ่งเป็นลักษณะการชุดขีดจากกลไกการสึกหรอแบบชุดขีดคล้ายกับการทดสอบการสึกหรอแบบ Ball-on-Disc ดังแสดงในรูปที่ 4.18b



a)

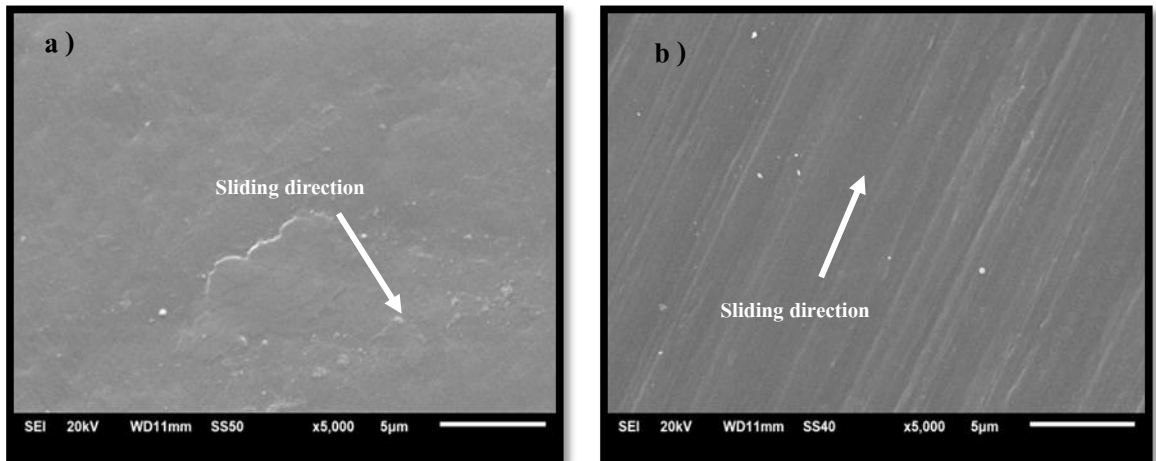


b)

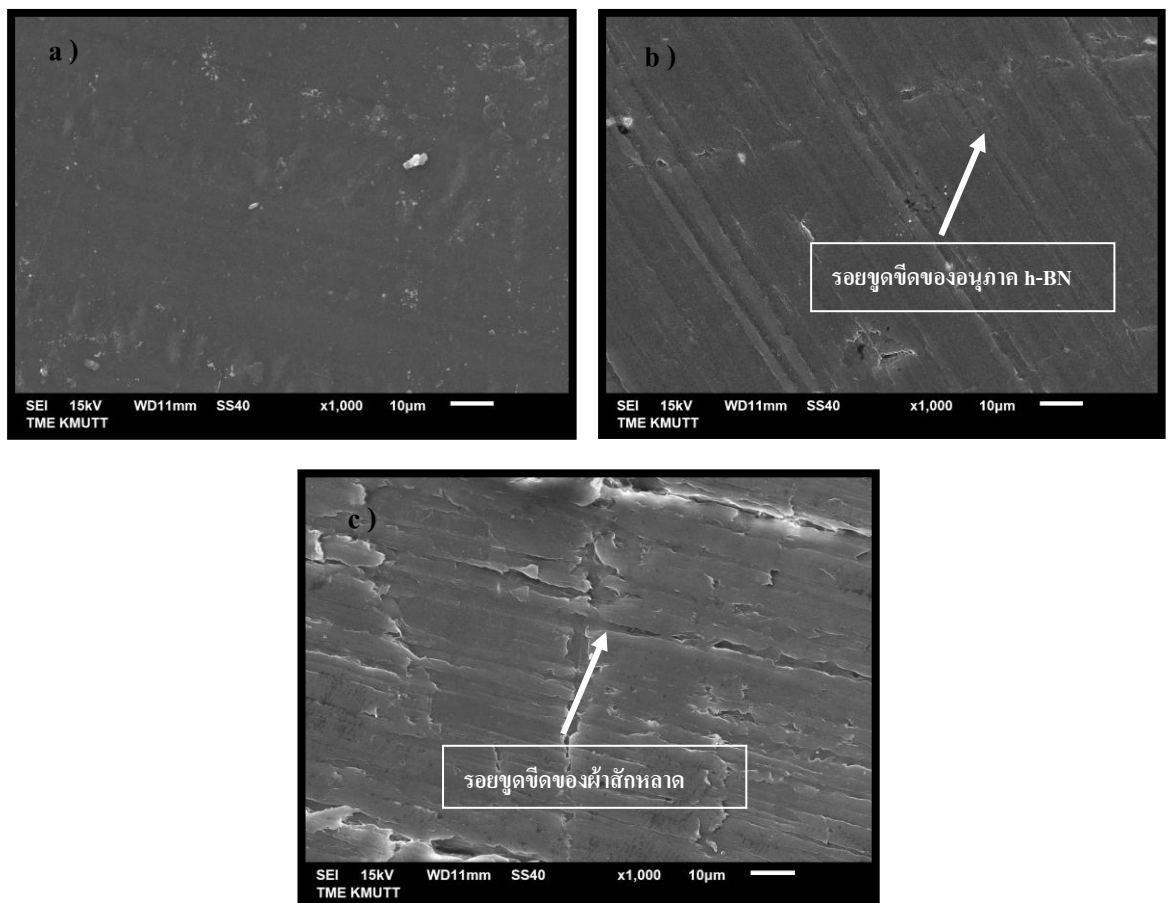
รูปที่ 4.16 อัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตน

a) อนุภาคเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์ขนาด 1.5 ไมโครเมตร

b) อนุภาคเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์ขนาด 0.1 ไมโครเมตร

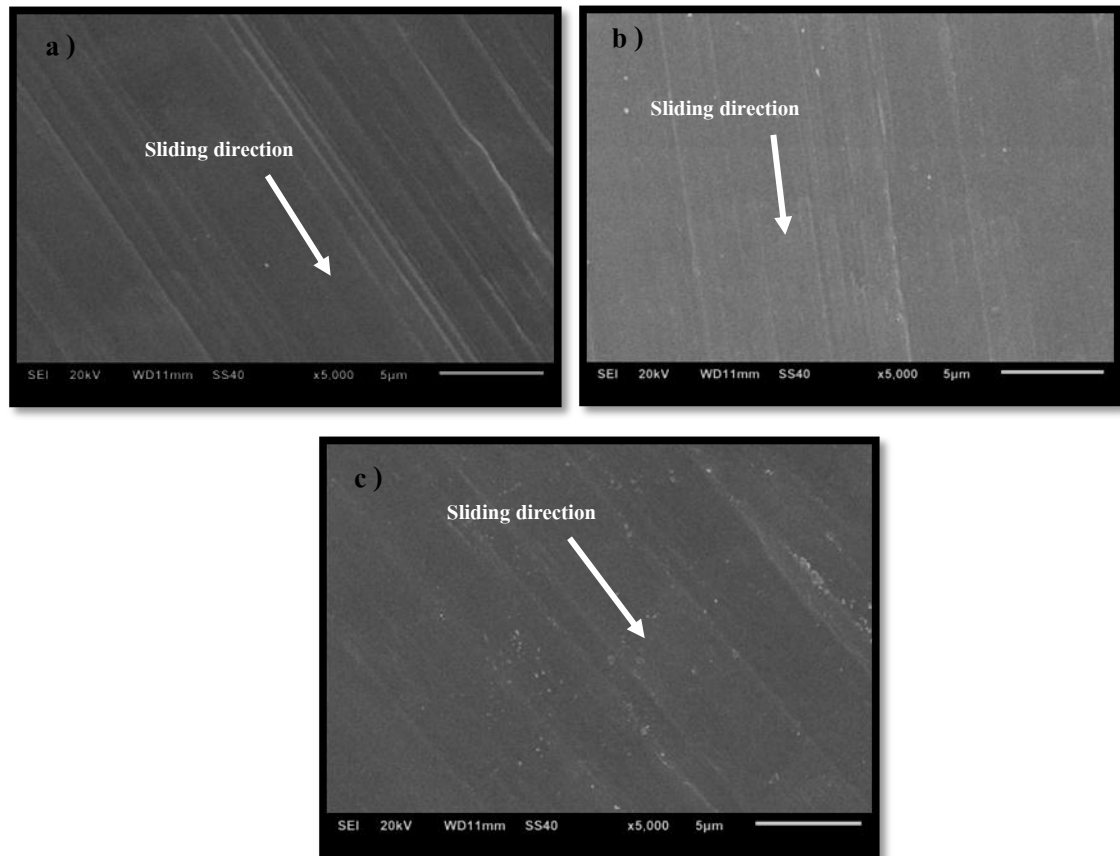


รูปที่ 4.17 รอยสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์อีโตน ที่ระยะทางทดสอบ 1 กิโลเมตร น้ำหนักกด 10 นิวตัน a) ปริมาณอนุภาคเสกเซโกนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก ขนาด 1.5 ไมโครเมตร b) ปริมาณอนุภาคเสกเซโกนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ขนาด 1.5 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.18 รอยสึกหรอจากการจำลองการทดสอบโดยใช้อนุภาคเสกเซโกนอลโบรอนไนไตรด์เป็นวัสดุชุดขีดร่วม a) ผิวชิ้นงานก่อนการขีด b) มีอนุภาคเสกเซโกนอลโบรอนไนไตรด์เป็นวัสดุชุดขีดร่วม c) ไม่มีอนุภาคเสกเซโกนอลโบรอนไนไตรด์เป็นวัสดุชุดขีดร่วม

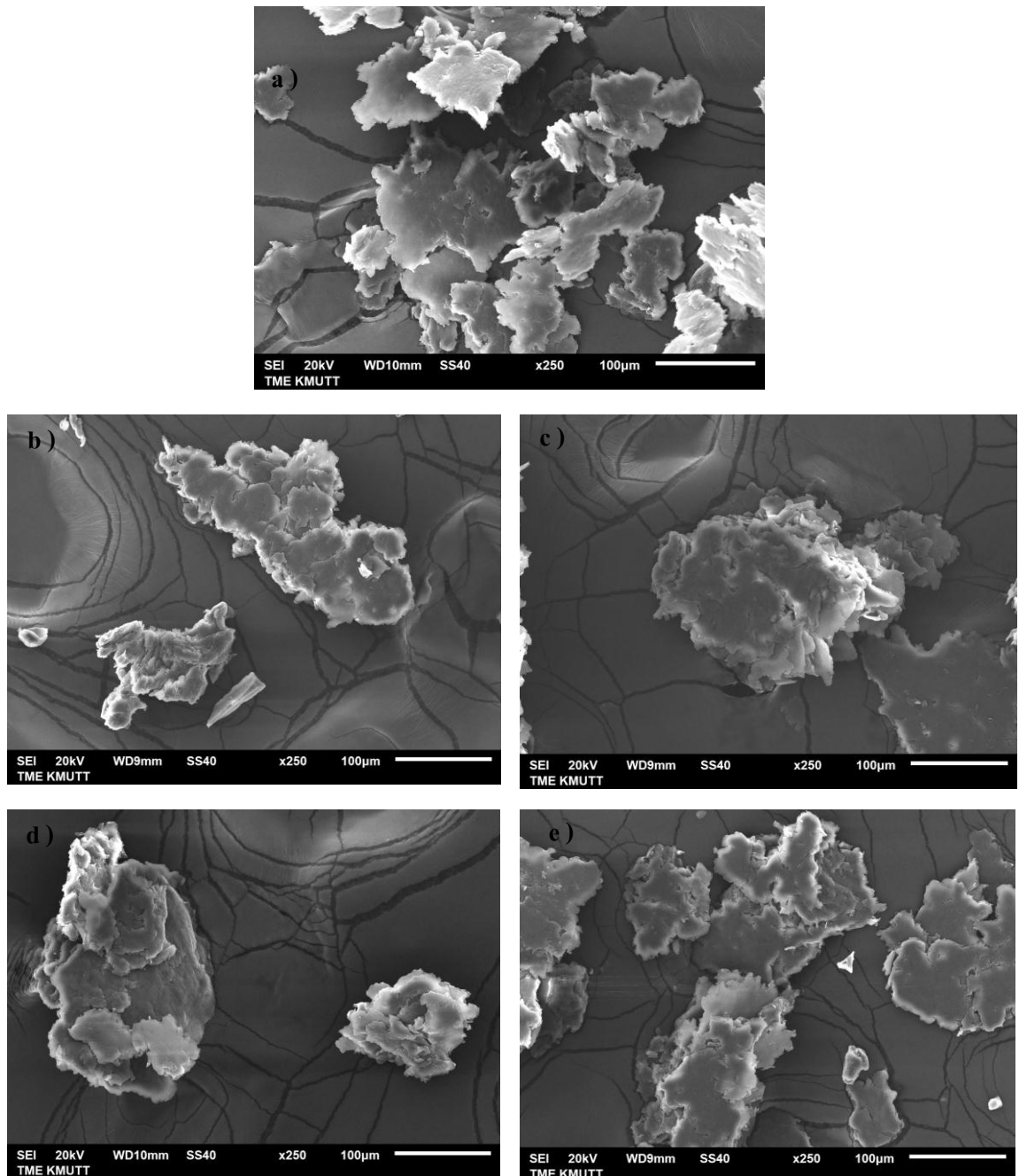
กรณีที่สอง คือ อัตราการสึกหรอที่น้ำหนักกด 20 และ 30 นิวตัน จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาค เสกซ์โกนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราการสึกหรอมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก น้ำหนักกด 20 และ 30 นิวตัน เป็นน้ำหนักกดที่มีแรงมากพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic Deformation) นอกจากนั้นยังทำให้อนุภาคเสกซ์โกนอลโบรอนไนไตรด์หลุดออกมาได้มากและเกิด เป็นอนุภาคขัดถูร่วม (Three body Abrasion) ขูดขีดผิววัสดุทำให้เกิดการสึกหรอแบบขัดถูในลักษณะ การขัดถูแบบ Wedge Formation และ Cutting [53] อย่างรุนแรง ดังจะเห็นได้จากเมื่อเติมอนุภาคเสกซ์โกนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก รอยสึกหรอจะหายาและเกิดรอยขูดขีดที่ลึกดังแสดง ในรูปที่ 4.19a แต่เมื่อพิจารณาเฉพาะการเพิ่มปริมาณอนุภาคเสกซ์โกนอลโบรอนไนไตรด์ในช่วงร้อยละ 5 ถึง 20 โดยน้ำหนัก พบว่า อัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนมี แนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเสกซ์โกนอลโบรอนไนไตรด์ที่ร้อยละ 10, 15 และ 20 โดย น้ำหนัก และรอยสึกหรอมีความหายาและรอยขูดขีดลดลงด้วย ซึ่งยืนยันได้จากรอยสึกหรอของพอลิ อีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เติมอนุภาคเสกซ์โกนอลโบรอนไนไตรด์ที่ร้อยละ 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ดัง แสดงในรูปที่ 4.19b และ 4.19c จะมีรอยสึกหรอและร่องขูดขีดที่หายาน้อยกว่าพอลิอีเทอร์อีเทอร์คี โตนที่เติมอนุภาคเสกซ์โกนอลโบรอนไนไตรด์ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูป 4.19a ทั้งนี้ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณอนุภาคเสกซ์โกนอลโบรอนไนไตรด์มากขึ้น เมื่อทดสอบที่น้ำหนักกดสูง นอกจากจะทำให้อนุภาคเสกซ์โกนอลโบรอนไนไตรด์หลุดออกมาได้มากพร้อมขูดขีดผิววัสดุ แต่การ หลุดของอนุภาคเสกซ์โกนอลโบรอนไนไตรด์ดังกล่าวนี้จะหลุดออกมามากพอที่จะแสดงอิทธิพล การเป็นสารหล่อลื่นของแข็งทำให้แรงเสียดทานระหว่างวัสดุคู่สัมผัสมีค่าลดลงจนทำให้อัตราการสึก หรมีค่าต่ำลงนั่นเอง [8] ซึ่งแตกต่างจากการทดสอบที่น้ำหนักกด 10 นิวตัน เป็นน้ำหนักกดที่ต่ำไม่ สามารถทำให้อนุภาคเสกซ์โกนอลโบรอนไนไตรด์หลุดออกมาได้มากพอที่จะแสดงอิทธิพลความ เป็นสารหล่อลื่นของแข็งแต่อนุภาคเหล่านั้นกลับทำหน้าที่ในการขูดขีดผิววัสดุเชิงประกอบพอลิ อีเทอร์อีเทอร์คีโตนเพียงอย่างเดียวจนทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้น ซึ่งยืนยันได้จากรูปที่ 4.13 แสดง ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบที่น้ำหนักกด 10 นิวตันจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมาก นักเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาค สอดคล้องกับงานวิจัยของ Song และคณะ [100] ศึกษาผิวเคลือบฟีนอลิกเร ซิน (Phenolic Resin) ที่ทำการเติมอนุภาคแกรไฟต์และ MoS_2 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 – 50 โดย น้ำหนัก พบว่า อัตราการสึกหรอจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอนุภาคแกรไฟต์และ MoS_2



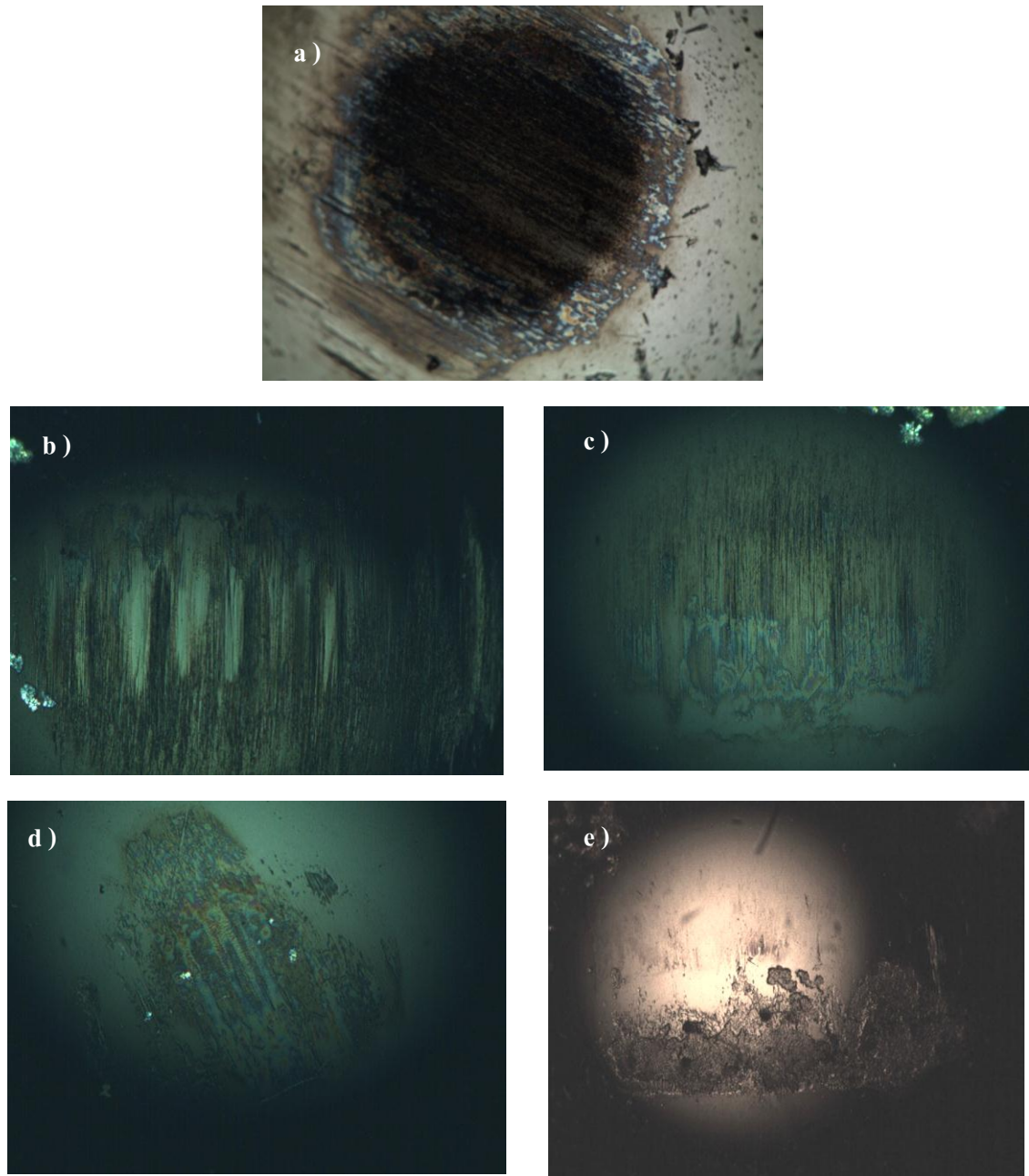
รูปที่ 4.19 รอยสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน ที่ระยะทางทดสอบ 1 กิโลเมตร น้ำหนักกด 30 นิวตัน อนุภาคเสกเซ โคนอลโบรอนไนไตรด์ขนาด 1.5 ไมโครเมตร ปริมาณ a) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก b) ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก c) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาเศษการสึกหรอ (Debris) และหัวกดลูกบอลที่ได้จากการทดสอบ พบว่า เศษการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนทั้งที่เดิมและไม่เดิมอนุภาคเสกเซ โคนอลโบรอนไนไตรด์จะมีลักษณะเป็นแผ่น (Plate-like Debris) ซึ่งเป็นเศษการสึกหรอที่มักเกิดจากการสึกหรอแบบขัดถูทั้งในลักษณะกลไกการ Wedge และ Cutting ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น คาดว่าเศษสึกหรอดังกล่าวเกิดจากการที่ผิววัสดุถูกตัดออกมาให้มีลักษณะคล้ายริบิ้นและถูกกดทับลงในรอยสึกหรอเมื่อทำการทดสอบเป็นเวลานานขึ้นเศษสึกหรอดังกล่าวจะเกิดการแตกหักและหลุดออกมาเป็นแผ่นริบิ้นที่ไม่ต่อเนื่อง [53] ดังแสดงในรูปที่ 4.20 แต่เศษการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เดิมอนุภาคเสกเซ โคนอลโบรอนไนไตรด์ (รูปที่ 4.20b, c, d และ e) จะมีลักษณะที่เป็นแผ่นที่มีความหนามากกว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ไม่เดิมอนุภาคเสกเซ โคนอลโบรอนไนไตรด์ (รูปที่ 4.20a) เศษการสึกหรอที่มีความหนามากขึ้นนั้นเป็นการหลุดออกมาจากผิวชิ้นงานหลังจากมีการกดทับกันในรอยสึกหรอทำให้เศษการสึกหรอมีขนาดใหญ่และส่งผลให้อัตราการสึกหรอมีค่าสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาหัวกดลูกบอลที่ได้จากการทดสอบ พบว่า หัวกดจากการทดสอบจะเกิดรอยขีดข่วนบริเวณผิวซึ่งจะเห็นได้ชัดว่ารอยหัวกดลูกบอลที่สัมผัสกับวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์

อีเทอร์คิโตนที่ไม่เติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ (รูปที่ 4.21a) จะมีรอยขีดข่วนที่ลึกและหยาบกว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนที่เติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุที่เติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์จะลดแรงเสียดทานระหว่างวัสดุคู่สัมผัส ส่งผลทำให้ลดการสูญเสียผิววัสดุคู่สัมผัสระหว่างทดสอบด้วย ซึ่งเห็นได้ชัดเมื่อเติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.21e



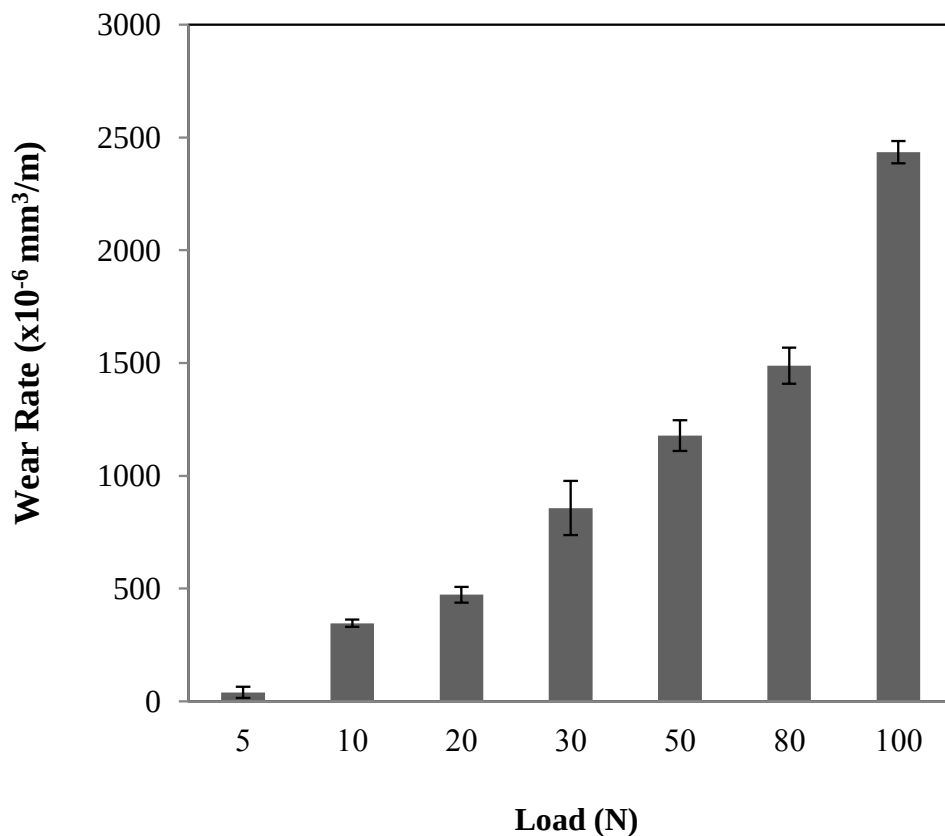
รูปที่ 4.20 เศษลึกรอยของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตน ที่ระยะทางทดสอบ 1 กิโลเมตร น้ำหนักกด 30 นิวตัน อนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ขนาด 1.5 ไมโครเมตร ปริมาณ a) ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก b) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก c) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก d) ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก e) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.21 รอยสักหรือของถูกบด ที่ระยะทางทดสอบ 1 กิโลเมตร น้ำหนักกด 30 นิวตัน ที่สัมผัสกับวัสดุเชิงประกอบที่เติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ขนาด 1.5 ไมโครเมตร ในปริมาณ a) ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก b) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก c) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก d) ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก e) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

4.3.1.2.2 ผลของน้ำหนักกด

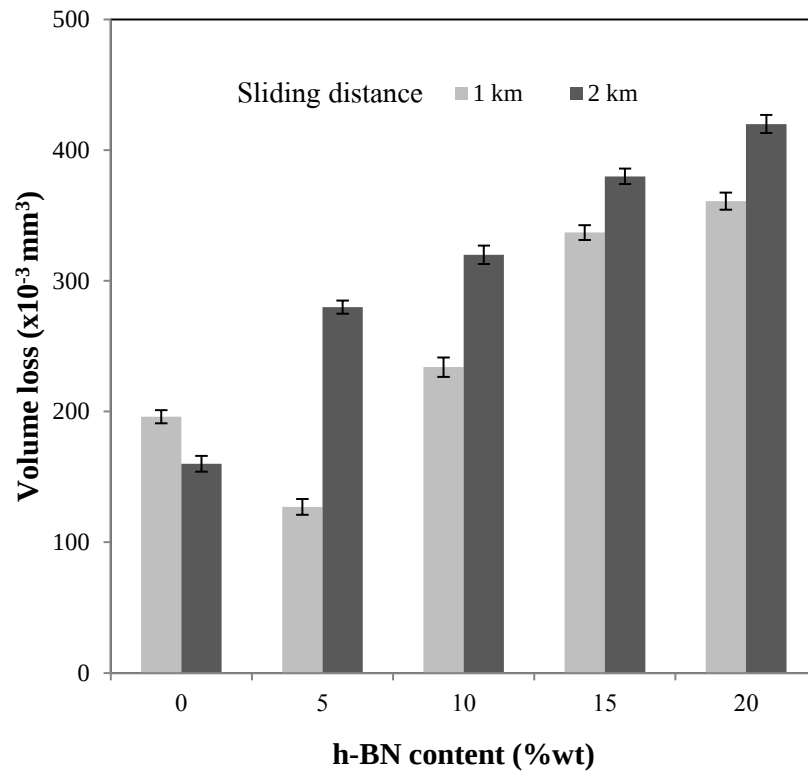
รูปที่ 4.16 แสดงอัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน ที่น้ำหนักกด 10, 20 และ 30 นิวตัน เมื่อพิจารณาผลของน้ำหนักกดในการทดสอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่มีปริมาณอนุภาคเซกซ์โกนอลโบรอนไนไตรด์เท่ากัน เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักกดจาก 10 เป็น 20 และ 30 นิวตัน พบว่า อัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนทั้งที่ไม่เติมและเติมอนุภาคเซกซ์โกนอลโบรอนไนไตรด์จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มน้ำหนักกดเป็นการเพิ่มแรงเค้นให้กับผิวของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนขณะทำการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ จะเห็นได้ชัดเจนจากรูปที่ 4.22 แสดงอัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เติมอนุภาคเซกซ์โกนอลโบรอนไนไตรด์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบที่น้ำหนักกด 5 ถึง 100 นิวตัน ทดสอบด้วยความเร็ว 0.1 เมตรต่อวินาที ระยะทางทดสอบ 1 กิโลเมตร พบว่าอัตราการสึกหรอจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มน้ำหนักกดที่ใช้ในการทดสอบ



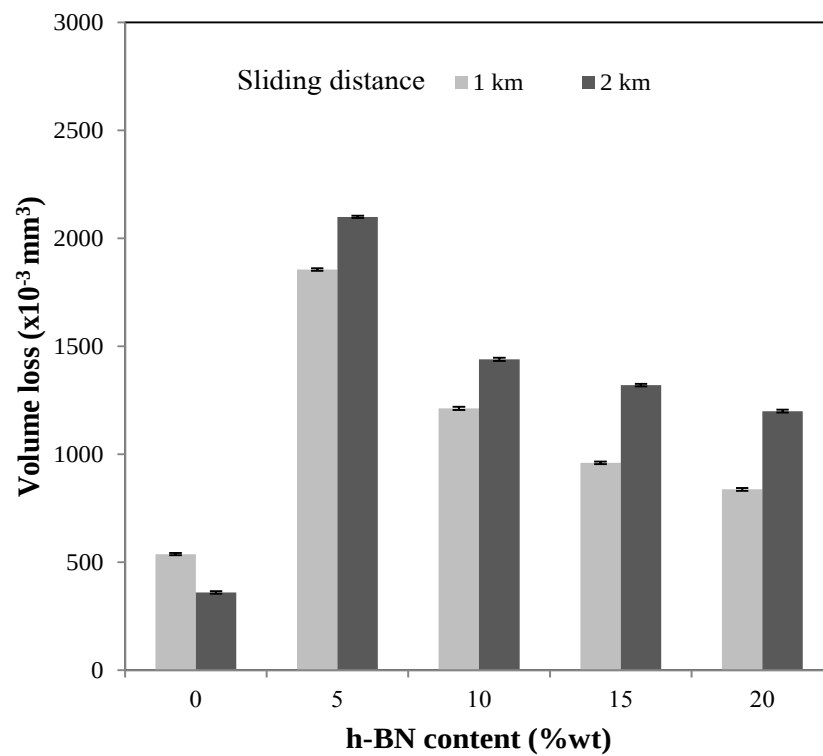
รูปที่ 4.22 อัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เติมอนุภาคเซกซ์โกนอลโบรอนไนไตรด์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ขนาด 1.5 ไมโครเมตรที่น้ำหนักกดต่างกัน

4.3.1.2.3 ผลของระยะทางทดสอบ

รูปที่ 4.23 แสดงผลของระยะทางที่มีผลต่อความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน เมื่อพิจารณาพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ไม่เติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ พบว่า เมื่อทำการทดสอบความต้านทานการสึกหรอโดยเพิ่มระยะทางทดสอบจาก 1 เป็น 2 กิโลเมตร ปริมาณการสูญเสียเนื้อวัสดุมีค่าลดลงทั้งที่น้ำหนักกด 10 นิวตัน ดังแสดงรูปที่ 4.23a และ 30 นิวตัน ดังแสดงรูปที่ 4.23b เนื่องจากการเพิ่มระยะทางในการทดสอบก่อให้เกิดความร้อนสะสมจากการเสียดสี ทำให้ผิววัสดุมีความอ่อนนุ่มขึ้นเพิ่มการหล่อลื่นและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลง ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3.1.1.3 ส่งผลให้การสึกหรอมีค่าลดลง แต่เมื่อพิจารณาพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ อนุภาคเหล่านี้ช่วยในการถ่ายเทความร้อนอันเกิดจากการเสียดสี ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากความร้อน ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3.1.1.3 แต่อนุภาคเหล่านั้นยังคงหลุดออกมาบริเวณผิวสัมผัสและชุดขีดผิววัสดุเชิงประกอบ ดังนั้น เมื่อทำการทดสอบโดยเพิ่มระยะทางทดสอบจาก 1 เป็น 2 กิโลเมตร ปริมาณการสูญเสียเนื้อวัสดุจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นทั้งที่น้ำหนักกด 10 และ 30 นิวตัน ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มระยะทางทดสอบเป็นการเพิ่มจำนวนรอบในการชุดขีดของอนุภาคบนผิววัสดุ ทำให้วัสดุหลุดออกจากผิววัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนเนื่องจากความล้าได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.24 เป็นรอยสึกหรอที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่า รูปที่ 4.24b เป็นรอยสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ระยะทางทดสอบ 2 กิโลเมตร น้ำหนักกด 10 นิวตัน จะมีรอยสึกหรอที่หายาบและรอยขีดถูที่รุนแรงกว่ารอยสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ระยะทางทดสอบ 1 กิโลเมตร น้ำหนักกด 10 นิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 4.24a นอกจากนั้นจะเห็นได้ชัดเมื่อทดสอบที่น้ำหนักกด 30 นิวตัน พบว่า เมื่อเพิ่มระยะทางทดสอบเท่ากับ 2 กิโลเมตร ดังรูปที่ 4.24d จะมีรอยสึกหรอที่หายาบและรอยขีดถูเป็นร่องที่ลึกและรุนแรงกว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ทดสอบระยะทางเท่ากับ 1 กิโลเมตร ดังแสดงในรูป 4.24c สอดคล้องกับวิทยานิพนธ์ของ ปัทม์ชนิต แส่นวิทยากร [80] ศึกษาผิวเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน และพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ผสมอะลูมิเนียมออกไซด์ พบว่ามีอัตราการสึกหรอมากขึ้น เมื่อเพิ่มระยะทางในการทดสอบ เช่นเดียวกับงานวิจัยของฉวีฉวี อินทวงศ์ [81] และนริศดา น้อยน้ำ [82] ศึกษาการใช้อนุภาคเถ้าลอยเติมลงในพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนขึ้นรูปจากการปั่นเคลือบและการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน ตามลำดับ พบว่าอัตราการสึกหรอเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มระยะทางในการทดสอบ แต่ถึงอย่างไรก็ตามปริมาณการสึกหรอที่เพิ่มสูงขึ้นจากระยะทางทดสอบ 2 กิโลเมตร มีอัตราการการเพิ่มที่น้อยมาก นั่นก็เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มระยะทางทดสอบจะทำให้วัสดุคู่สัมผัสชุดผิววัสดุลงไปได้ลึกมากขึ้นทำให้อนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่อยู่ใต้ผิวของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนหลุดออกมาได้มากขึ้นกว่าการทดสอบที่ระยะทาง 1 กิโลเมตรและทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นของแข็งจนทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของการสึกหรอมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ไม่มาก

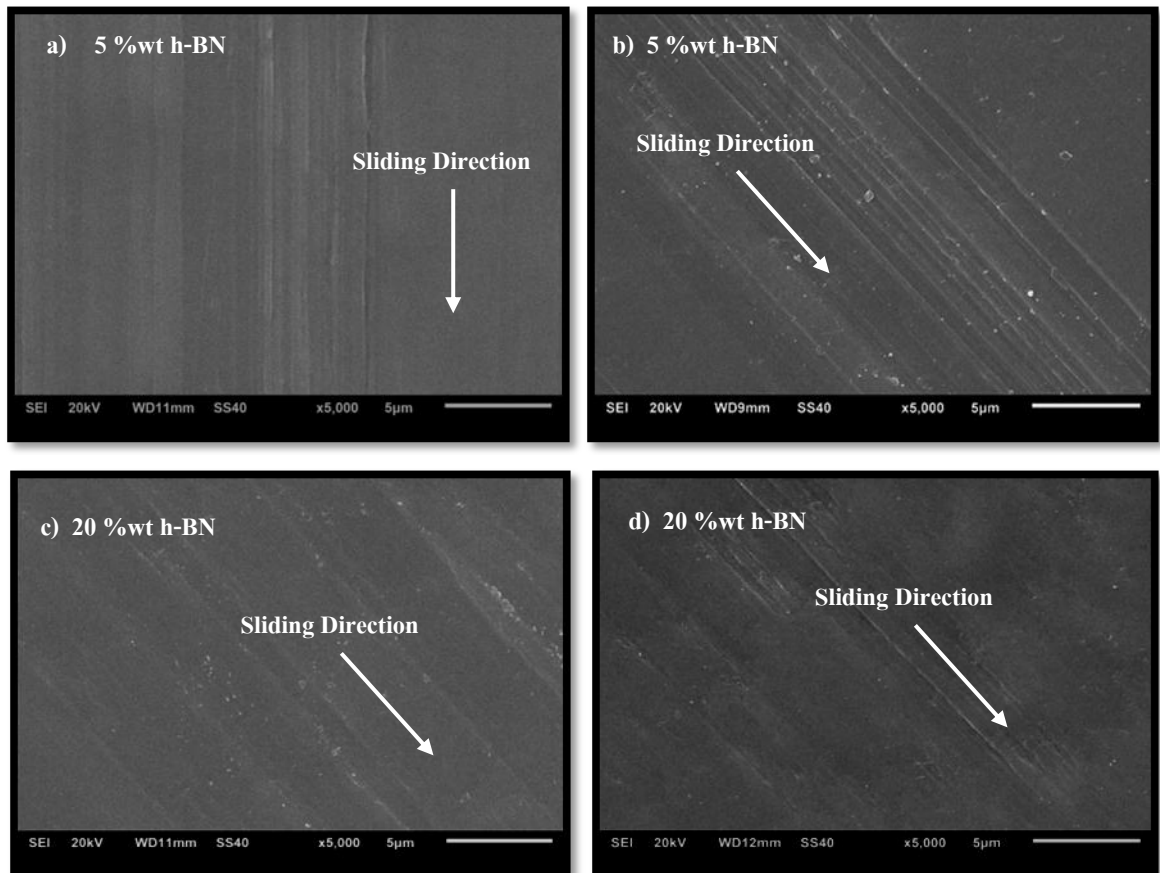


a)



b)

รูปที่ 4.23 ผลของระยะทางที่มีผลต่อความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เติมเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ขนาด 1.5 ไมโครเมตร a) น้ำหนักกด 10 N b) น้ำหนักกด 30 N



รูปที่ 4.24 รอยสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์ทีโดนที่เติมเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ในปริมาณร้อยละ 5 และ 20 โดยน้ำหนักขนาด 1.5 ไมโครเมตรที่สภาวะทดสอบต่างกัน

- a) ระยะทางทดสอบ 1 กิโลเมตร น้ำหนักกด 10 นิวตัน
- b) ระยะทางทดสอบ 2 กิโลเมตร น้ำหนักกด 10 นิวตัน
- c) ระยะทางทดสอบ 1 กิโลเมตร น้ำหนักกด 30 นิวตัน
- d) ระยะทางทดสอบ 2 กิโลเมตร น้ำหนักกด 30 นิวตัน

4.3.2 ความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์/พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน ทดสอบที่อุณหภูมิสูง

การทดสอบส่วนที่สองเป็นการทดสอบการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน โดยเลือกอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่เติมลงไปพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนในปริมาณ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ขนาด 1.5 ไมโครเมตร น้ำหนักกด 10 และ 30 นิวตัน ระยะทางการทดสอบ 1 กิโลเมตร ใช้อุณหภูมิในการทดสอบเท่ากับ 100, 200 และ 300 องศาเซลเซียส มีผลการทดสอบดังนี้

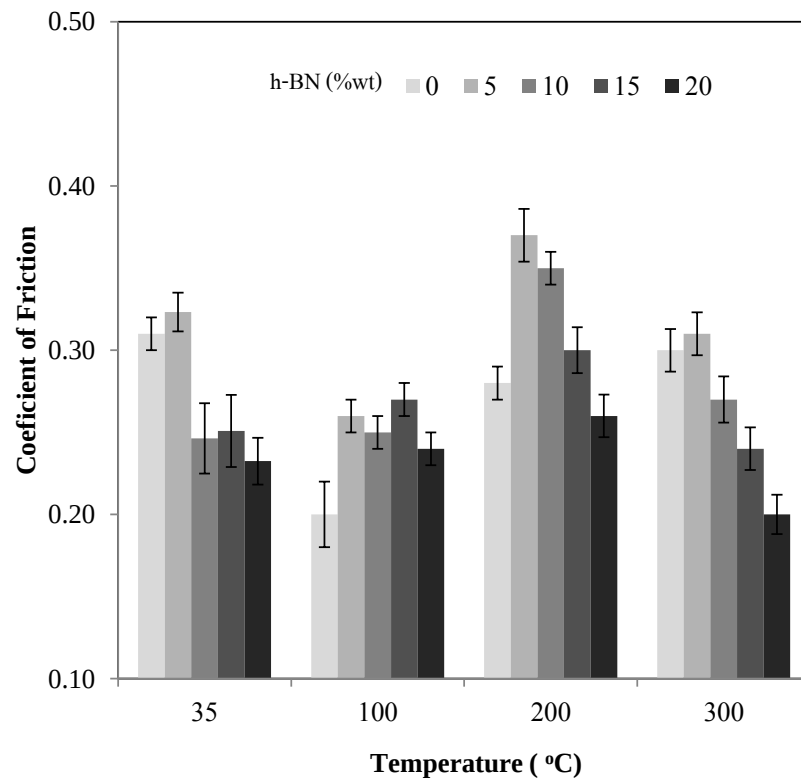
4.3.2.1 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

4.3.2.1.1 ผลของอุณหภูมิตดสอบ

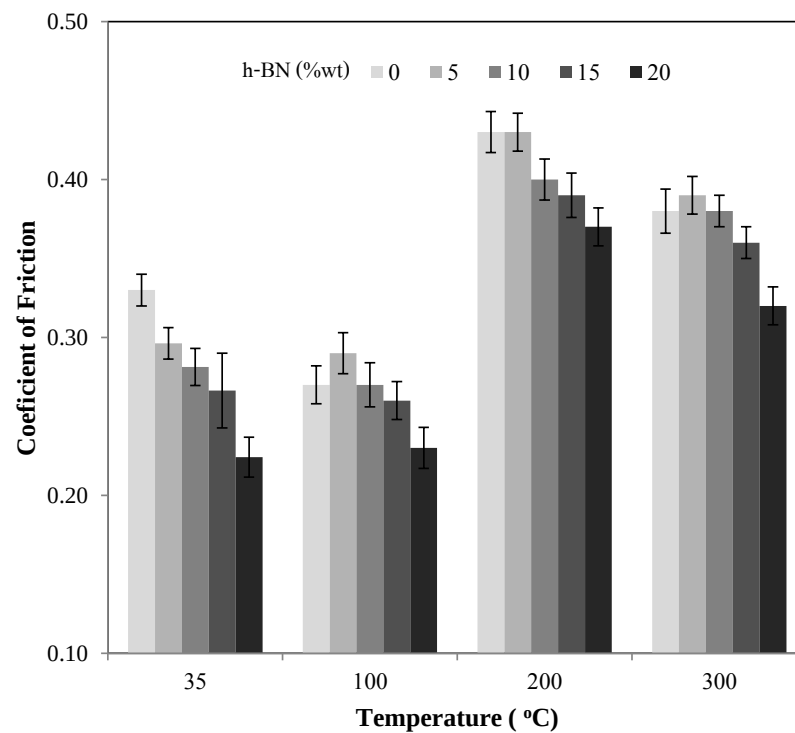
จากรูปที่ 4.25a และ 4.25b แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิตดสอบที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน พิจารณาในส่วนของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ไม่เติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิตดสอบจากอุณหภูมิห้องเท่ากับ 35 องศาเซลเซียสเป็น 100 องศาเซลเซียส ทั้งที่น้ำหนักกด 10 และ 30 N ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิตดสอบรวมกับความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีคาดว่าจะทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงมีค่าเข้าใกล้อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น (Glass Transition Temperature, T_g) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่นมีค่าไม่แตกต่างกันและอยู่ในช่วงอุณหภูมิเท่ากับ 142.5 -143.7 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.26 จนทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนเกิดการสั่นและเริ่มขยับตัวจนทำให้ผิววัสดุเกิดการเสียดรูปตามแนวแรงไถลของลูกบอล ส่งผลทำให้อุณหภูมิสามารถเลื่อนไถลผ่านผิววัสดุได้ง่ายเป็นการเพิ่มสมบัติการหล่อลื่น หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดสอบขึ้นเป็น 200 องศาเซลเซียส แนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานทั้งที่น้ำหนักกด 10 และ 30 จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่นทำให้วัสดุเปลี่ยนจากสถานะของแข็ง (Solid State) เป็นสถานะคล้ายยาง (Rubbery State) ซึ่งสถานะนี้ผิววัสดุที่สัมผัสกับลูกบอลจะมีความหนืด (Viscosity) เพิ่มสูงขึ้น [14] และเกิดกลไกการยึดติด (Adhesion) ระหว่างวัสดุคู่สัมผัส [84] แรงด้านการเคลื่อนที่ของลูกบอลเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาพอลิเมอร์ที่ทนอุณหภูมิสูง เช่น PEEK และ PAI เมื่อเพิ่มอุณหภูมิตดสอบเข้าใกล้ 150 องศาเซลเซียส วัสดุจะเกิดความอ่อนนิ่มและไหลได้ง่ายจนทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าลดลงและจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 150 องศาเซลเซียส [84] แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิตดสอบเท่ากับ 300 องศาเซลเซียส แนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่น้ำหนักกด 10 และ 30 นิวตัน จะแตกต่างกันโดยที่น้ำหนักกด 10 N ยังคงมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นต่อเนื่องจากอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส นั่นก็เนื่องจากยังคงเกิดการยึดติดระหว่างวัสดุคู่สัมผัสซึ่งต่างจากการทดสอบที่น้ำหนักกด

30 N ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบที่อุณหภูมิในการทดสอบเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากน้ำหนักกดที่เพิ่มสูงขึ้นจะเป็นการเพิ่มแรงเค้นเฉือนจนทำให้เกิดความร้อนจากการเสียดสี (Frictional Heating) [84] ซึ่งความร้อนที่ได้ดังกล่าวเมื่อรวมกับความร้อนจากการทดสอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 300 องศาเซลเซียส ทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในการทดสอบจริงเพิ่มสูงมากกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting Point) เป็นผลทำให้ผิววัสดุที่สัมผัสกับลูกบอลเกิดการไหลได้ดีขึ้นทำให้ความหนืดมีค่าลดลงเป็นผลให้ลดการยึดติดระหว่างวัสดุคู่สัมผัส ทำให้ด้านการเคลื่อนที่ของลูกบอลได้ลดลง ซึ่งยืนยันได้จากรอยสึกหรอรูปที่ 4.27g จะเห็นได้ชัดว่ารอยสึกหรอมีลักษณะรอยการไหลของพอลิเมอร์ที่มากกว่าและไหลได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบ ณ อุณหภูมิ 200 ที่น้ำหนักกดเดียวกัน ดังแสดงในรูป 4.27e

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.25a และ 4.25b พอลิเอเทอร์อีเทอร์อีโตนที่เดิมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ แรงเสียดทานจะไม่ได้ขึ้นอยู่กับพอลิเอเทอร์อีเทอร์อีโตนเพียงส่วนเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับอนุภาคที่เดิมลงไปวัสดุหลักด้วย เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทดสอบและพิจารณาวัสดุเชิงประกอบในปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์เท่ากัน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานทั้งที่น้ำหนักกด 10 และ 30 นิวตัน มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกัน นั่นคือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบจากอุณหภูมิห้องเท่ากับ 35 องศาเซลเซียสเป็น 100 องศาเซลเซียสค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีที่ค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ นั่นก็เนื่องจากการเดิมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์จะนำความร้อนออกจากชิ้นงาน [99] จนทำให้ความร้อนไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้มากนักจากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดสอบขึ้นเป็น 200 และ 300 องศาเซลเซียส ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพอลิเอเทอร์อีเทอร์อีโตนที่เดิมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ในปริมาณเท่ากันจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิทดสอบมีค่าสูงมากจนอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่เดิมลงไปมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะนำความร้อนออกจากชิ้นงานจนทำให้อุณหภูมิในระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น วัสดุจะเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายยาง เกิดการยึดติดระหว่างวัสดุคู่สัมผัสทำให้การต้านแรงไถลของลูกบอลเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปจำลองรูปที่ 4.28c และ 4.28d แต่ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 300 องศาเซลเซียส ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส เนื่องจาก อุณหภูมิทดสอบที่สูงใกล้เคียงอุณหภูมิหลอมเหลวจนทำให้วัสดุหลักเกิดการหลอมไหลจนความหนืดมีค่าลดลงและลดการต้านการเคลื่อนที่ของลูกบอล ดังแสดงในรูปจำลองรูปที่ 4.28d ซึ่งสอดคล้องกับรอยสึกหรอที่มีการเดิมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูป 4.27h จะมีรอยไหลที่ชัดเจนและไหลได้ง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูป 4.27f

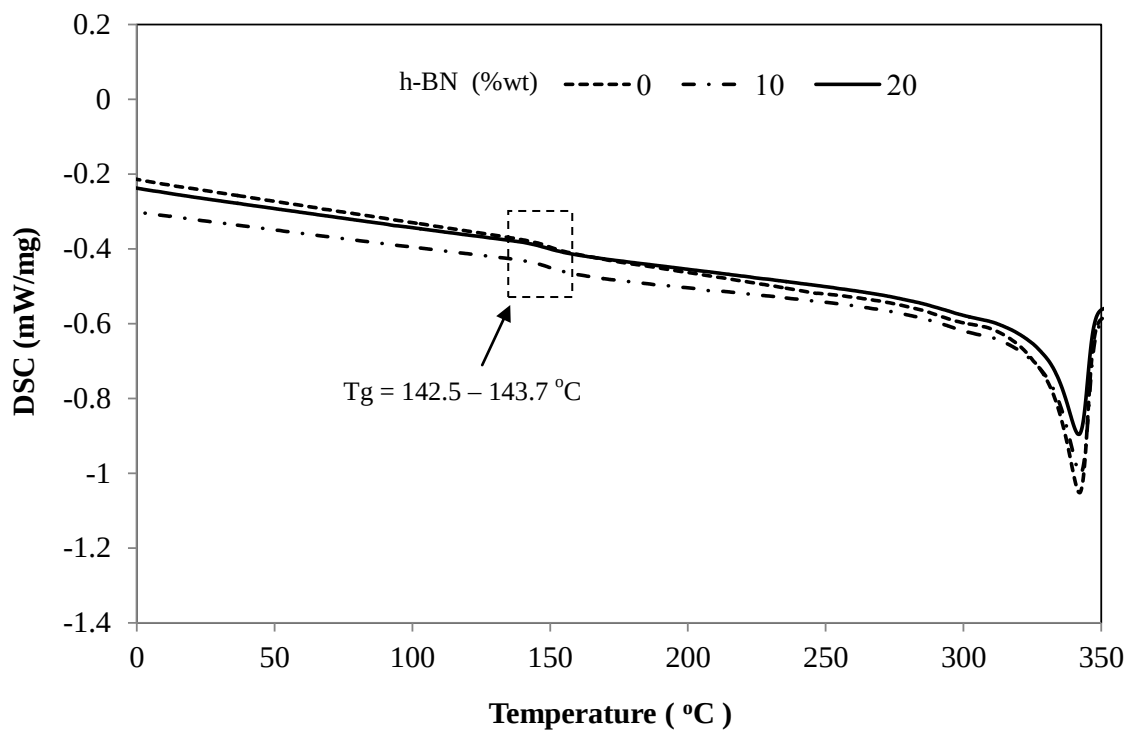


a)

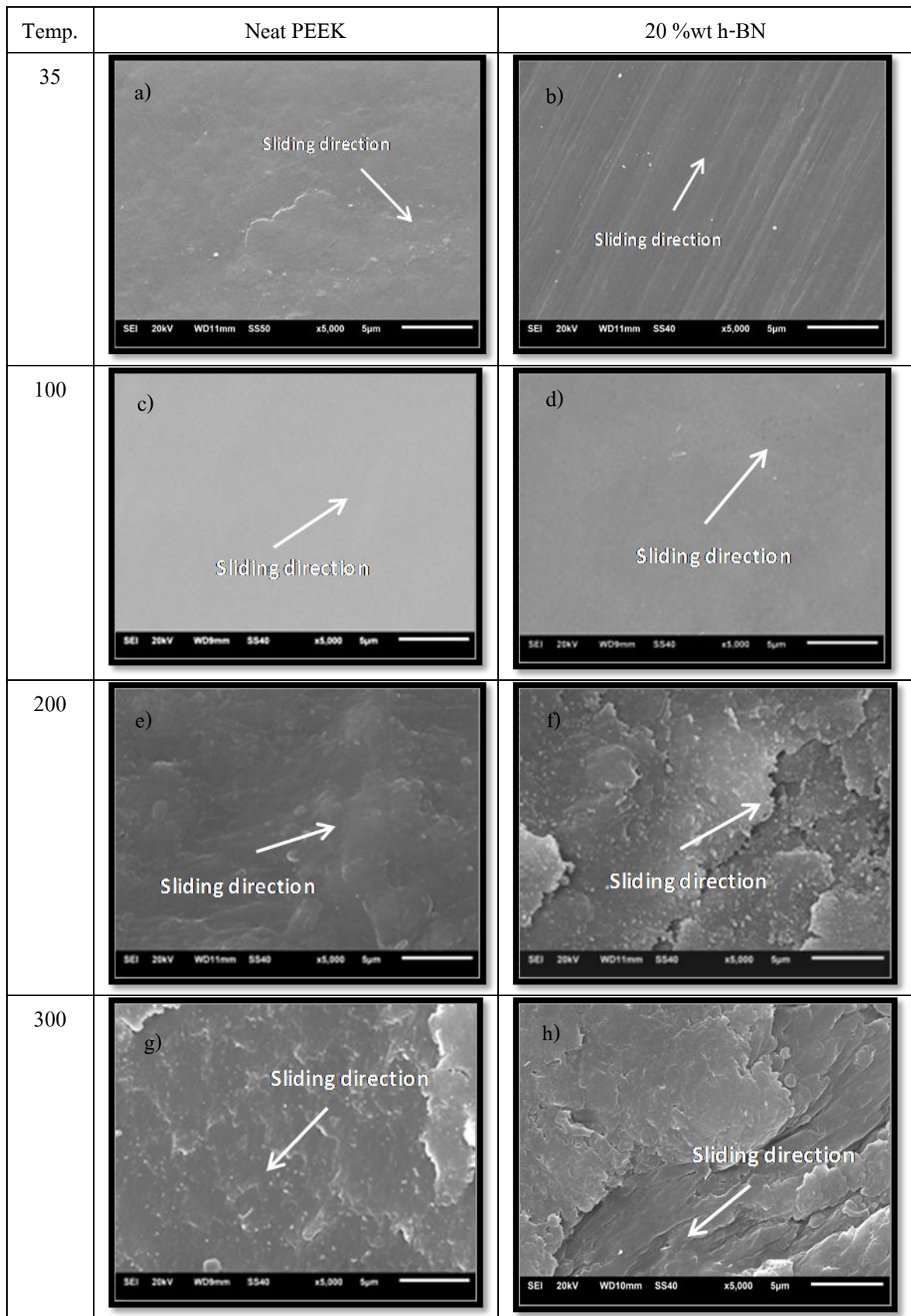


b)

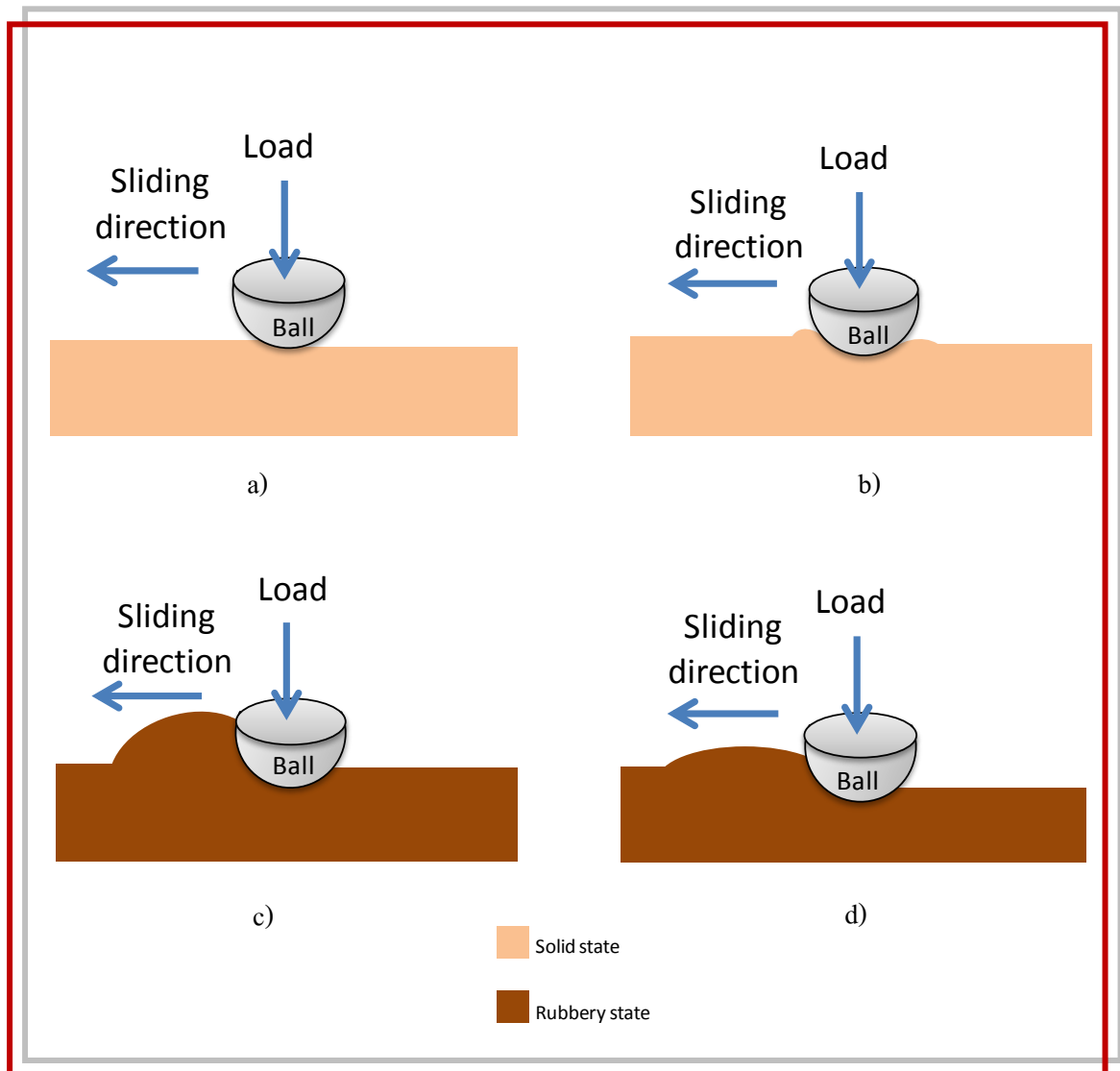
รูปที่ 4.25 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนและวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนที่อุณหภูมิการทดสอบต่างกัน a) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่น้ำหนักกด 10 N b) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่น้ำหนักกด 30 N



รูปที่ 4.26 สมบัติทางความร้อนของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนและวัสดุเชิงประกอบเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์/พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน



รูปที่ 4.27 รอยสึกหรอจากการทดสอบการสึกหรอของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนและวัสดุเชิงประกอบ พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิการทดสอบต่างกัน



รูปที่ 4.28 รูปภาพจำลองการทดสอบการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตน ณ

อุณหภูมิการทดสอบต่างกัน

- a) ทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 35°C
- b) ทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิ 100°C
- c) ทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิ 200°C
- d) ทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิ 300°C

4.3.2.1.2 ผลของปริมาณอนุภาคเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์

เมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มปริมาณอนุภาคเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์ในพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบนั้นจะลดลงได้เมื่อมีปัจจัยต่างๆ มากระทำกับวัสดุจนทำให้อนุภาคเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์มีโอกาสหลุดออกมาได้มากพอที่จะแสดงอิทธิพลของการเป็นสารหล่อลื่นของแข็งจนทำให้แรงเสียดทานระหว่างวัสดุคู่สัมผัสลดลง โดยจากรูปที่ 4.25a แสดงผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่น้ำหนักกด 10 นิวตัน เมื่อพิจารณาการทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆแล้วจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณอนุภาคเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอย่างไม่มีความสำคัญ ณ อุณหภูมิการทดสอบที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 35 องศาเซลเซียสและ 100 องศาเซลเซียส นั่นก็เนื่องจาก น้ำหนักกดและอุณหภูมิการทดสอบยังไม่มากพอที่จะทำให้อนุภาคเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์หลุดออกมาได้มากพอที่จะแสดงอิทธิพลความเป็นสารหล่อลื่นของแข็ง ซึ่งต่างจากการทดสอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 200 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลง เนื่องจากอุณหภูมิการทดสอบที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นอุณหภูมิสูงเกินกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น ทำให้วัสดุเปลี่ยนจากสถานะของแข็งเป็นสถานะคล้ายยาง ซึ่งสถานะนี้สายโซ่โมเลกุลของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนจะเกิดการสั่นและเคลื่อนที่ออกจากกันเกิดเป็นช่องว่างระหว่างสายโซ่โมเลกุลทำให้อนุภาคเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์มีโอกาสหลุดออกมาได้ถึงแม้จะทดสอบที่น้ำหนักกดไม่สูงมาก (10N) ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์มากยิ่งขึ้นอนุภาคเหล่านี้ก็จะมีโอกาสหลุดออกมาแสดงอิทธิพลความเป็นสารหล่อลื่นของแข็งได้มากขึ้น

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาการทดสอบที่น้ำหนักกด 30 นิวตัน ที่อุณหภูมิการทดสอบต่างๆ ดังแสดงในรูป 4.25b พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบจะมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์ ทั้งนี้เกิดจาก 2 ปัจจัย คือ กรณีแรกเมื่อพิจารณา ณ อุณหภูมิการทดสอบที่อุณหภูมิห้องและ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิไม่มากพอที่จะทำให้อนุภาคเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์มีโอกาสหลุดออกมาได้มาก แต่เนื่องจากการทดสอบใช้น้ำหนักกดสูงมากพอที่ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรและอนุภาคเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์มีโอกาสหลุดออกมาได้มากเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3.1.1.1 และ 4.3.1.2.1 (ที่น้ำหนักกด 20 และ 30 นิวตัน) กรณีที่สองเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบเป็น 200 และ 300 องศาเซลเซียส ปัจจัยที่ทำให้อนุภาคเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์มีโอกาสหลุดออกมาได้มากก็คือน้ำหนักกดที่สูงมากพอรวมกับอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเสกชะโกนอลโบรอนไนไตรด์มากขึ้น อนุภาคเหล่านี้ก็จะมีโอกาสหลุดออกมาได้มากจนค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลง

4.3.2.1.3 ผลของน้ำหนักรีด

จากรูปที่ 4.25a และ 4.25b เป็นผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่น้ำหนักกด 10 และ 30 นิวตัน พิจารณาในส่วนของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่มีปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์เท่าๆกัน เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักกดในการทดสอบจาก 10 นิวตัน เป็น 30 นิวตัน พบว่า การทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบที่เติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์มีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงเล็กน้อย เนื่องจากอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่เติมลงไปจะช่วยนำความร้อนออกจากชิ้นงานทำให้ความร้อนไม่ส่งผลให้ผิวชิ้นงานเกิดการอ่อนนุ่มมากนัก ซึ่งต่างจากพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ไม่เติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักกดเป็นการเพิ่มแรงเค้นจะเกิดความร้อนจากการเสียดสีร่วมกับอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบส่งผลให้ความร้อนเพิ่มสูงขึ้นจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น ผิววัสดุมีความอ่อนนุ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มน้ำหนักกดลูกบอลที่สัมผัสกับผิวอ่อนนุ่มจะกดลงไปได้มากจนมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่แท้จริงเพิ่มสูงขึ้นและทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ส่วนการทดสอบที่อุณหภูมิทดสอบเท่ากับ 200 และ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิการทดสอบที่เพิ่มสูงขึ้น (เป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น) ความร้อนที่ได้จากการทดสอบก็จะทำให้ผิววัสดุมีความอ่อนนุ่ม ลูกบอลที่สัมผัสกับผิวอ่อนนุ่มเมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักกดในการทดสอบจาก 10 นิวตัน เป็น 30 นิวตัน วัสดุคู่สัมผัสจะกดลงไปได้มากจนมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่แท้จริงเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.28c และ 4.28d จนทำให้ทั้งพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เติมและไม่เติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีในหัวข้อ 2.3.2.2 (บทที่ 2) [41] ที่กล่าวไว้ด้วยเรื่องความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสที่แท้จริงมาก ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นด้วย

4.3.2.2 ความต้านทานการสึกหรอ

4.3.2.2.1 ผลของอุณหภูมิทดสอบ

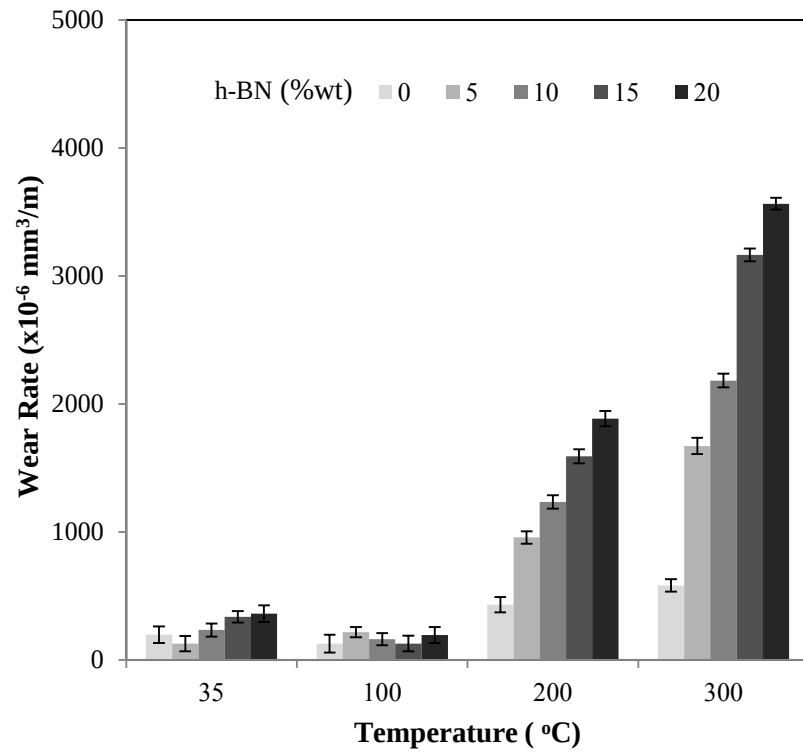
จากรูปที่ 4.29 แสดงผลของอัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน ณ อุณหภูมิการทดสอบต่างกัน เมื่อพิจารณาวัสดุเชิงประกอบในปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์เท่ากัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบจากอุณหภูมิห้องเท่ากับ 35 องศาเซลเซียส เป็น 100 องศาเซลเซียส อัตราการสึกหรอจะมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจาก อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสรวมกับความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีคาดว่าจะทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงมีค่าเข้าใกล้อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น จนทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนเกิดการสั่นและเริ่มขยับ

ตัวจนทำให้ผิววัสดุเกิดการเสียรูปตามแนวแรงไถของลูกบอล ส่งผลทำให้ลูกบอลสามารถไถลไถผ่านผิววัสดุได้ง่ายเป็นการเพิ่มสมบัติการหล่อลื่นดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3.2.1.1 เมื่อทำการทดสอบผิววัสดุที่ไถลไถได้ง่ายตามแนวแรงของลูกบอลนั้นการสึกหรอของผิววัสดุจะเกิดการขูดและเสียรูปโดยไม่เสียเนื้อวัสดุโดยเนื้อวัสดุจะติดไปกับรอยสึกหรอที่เรียกว่าการขูดขีดแบบ Ploughing [53] ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3.3 แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบเป็น 200 และ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งอย่างที่กล่าวไว้ว่าเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้อยแล้วเป็นขีดหุ่นวัสดุจะเปลี่ยนจากสถานะของแข็งเป็นสถานะคล้ายยาง ซึ่งจะทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความอ่อนนุ่มมากจนมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่แท้จริงเพิ่มสูงขึ้นและทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิการทดสอบที่เพิ่มสูงขึ้นดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3.2.1.3 ดังนั้นเมื่อทำการทดสอบการสึกหรอผิววัสดุจะเกิดการยึดติดเนื่องจากกลไกการสึกหรอเปลี่ยนจากกลไกการขูดขีดแบบ Ploughing เป็นกลไกการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) และหลุดออกได้ง่ายเป็นผลให้อัตราการสึกหรอจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

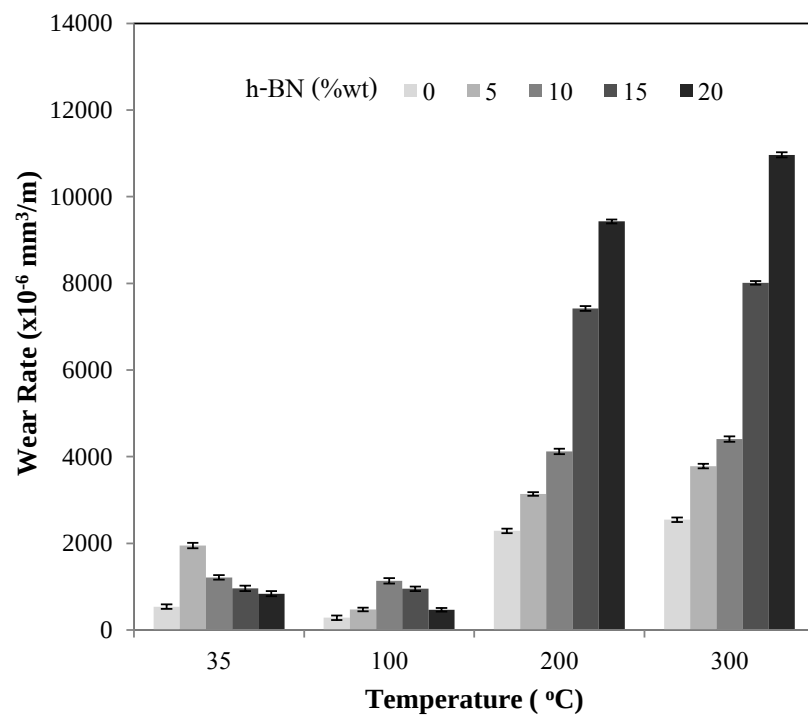
4.3.2.2.2 ผลของปริมาณอนุภาคเสกเซโกนอลโบรอนไนไตรด์

เมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มปริมาณอนุภาคเสกเซโกนอลโบรอนไนไตรด์ในพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ในแต่ละอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ ดังแสดงในรูป 4.29a (10 นิวตัน) และ 4.29b (30 นิวตัน) พบว่า เมื่อทำการเพิ่มปริมาณอนุภาคเสกเซโกนอลโบรอนไนไตรด์ทดสอบที่น้ำหนักกด 10 นิวตัน อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อัตราการสึกหรอจะมีแนวโน้มเดียวกับการทดสอบความต้านทานการสึกหรอที่อุณหภูมิห้อง 35 องศาเซลเซียส นั่นคือ อัตราการสึกหรอจะมีค่าแตกต่างเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเสกเซโกนอลโบรอนไนไตรด์และการทดสอบที่น้ำหนักกด 30 นิวตัน อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อัตราการสึกหรอจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเสกเซโกนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นจะลดลงเมื่อพิจารณาปริมาณอนุภาคเสกเซโกนอลโบรอนไนไตรด์ในช่วงร้อยละ 5 ถึง 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งเหตุผลได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3.1.2 และเสกการสึกหรอจากการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ยังคงมีลักษณะเป็นแผ่นเหมือนกับการทดสอบที่อุณหภูมิห้องซึ่งเป็นเสกการสึกหรอที่เกิดจากการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) เกิดการ Cutting คาดว่าเสกสึกหรอจะถูกตัดจากผิววัสดุมีลักษณะคล้ายริบบิ้น (Ribbon Like Debris) พร้อมถูกกดทับลงบนรอยสึกหรอเป็นชั้นๆ เมื่อทำการทดสอบเป็นระยะเวลาขึ้น เสกสึกหรอคล้ายริบบิ้นที่มีความยาวต่อเนื่องจะเกิดการแตกและหลุดออกจากรอยสึกหรอเป็นแผ่นที่มีลักษณะคล้ายริบบิ้นที่มีความยาวไม่ต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4.30a, b, c, d และ e แต่เมื่อทำการทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิ 200 และ 300 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ชัดว่าอัตราการสึกหรอทั้งน้ำหนักกด 10 และ 30 นิวตัน จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของอนุภาคเสกเซโกนอลโบรอนไนไตรด์ ทั้งนี้เนื่องจากพบว่าการเติมอนุภาคเสกเซโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่เป็นสารตัวเติมลงในพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนซึ่งวัสดุหลักไม่สามารถเข้ากันได้ดีโดยยืนยันได้จากความแข็งแรง

(Tensile Strength) ของวัสดุมีค่าลดลงเมื่อเติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งโดยทั่วไปวัสดุเชิงประกอบที่สารตัวเติมและวัสดุหลักไม่สามารถเข้ากันได้เมื่อทำการเพิ่มอนุภาคนำขึ้นงาน วัสดุเชิงประกอบเหล่านั้นจะมีความเหนียวลดลงและเกิดการหลอมไหลได้ง่าย ดังนั้นเมื่อทำการเพิ่มอนุภาคนำขึ้นงานสูงกว่าอนุภาคนำขึ้นงานการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น (มากกว่า 200 และ 300 องศาเซลเซียส) รวมทั้งเพิ่มปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ จะทำให้วัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์ไคโตนจะมีความเหนียวที่ลดลงได้มากและเกิดการหลอมไหลจนทำให้วัสดุหลุดออกมาจากผิวได้มากตามการเพิ่มอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ นอกจากนั้นเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 200 และ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งโดยปกติการเติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ ดังกล่าวจะช่วยในการถ่ายเทความร้อนออกจากชิ้นงาน แต่เนื่องจากอนุภาคนำขึ้นงานในการทดสอบดังกล่าวสูงมากจนทำให้อนุภาคนำขึ้นงานทั้งระบบ อาทิเช่น แท่นเหล็กวางชิ้นงาน แท่งเหล็กจับชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงมากจนอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ไม่สามารถถ่ายเทความร้อนออกจากชิ้นงานออกสู่ระบบได้ แต่กลับเกิดการสะสมความร้อนไว้กับชิ้นงานทดสอบจนทำให้วัสดุเกิดความอ่อนนุ่มจนหลุดออกมาได้ง่าย ซึ่งยืนยันได้จากรอยสึกหรอที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่า รอยสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบที่เติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 200 และ 300 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.27f และ 4.27h ตามลำดับ จะมีรอยสึกหรอที่หยาบ นอกจากนั้นยังมีรอยขีดและรอยหลุดลอก (Delamination) ของวัสดุที่ใหญ่และลึกมากเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่ไม่เติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่ทำการทดสอบ ณ อุณหภูมิเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.27e และ 4.27g นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาจากเศษสึกหรอจากการทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.30f, g, h, i และ j พบว่าเศษสึกหรอจะมีลักษณะแบบ Rolling (Rolling-like Wear Debris) ซึ่งเกิดจากการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะเปลี่ยนพฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุจากการสึกหรอแบบขัดถู (ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น) เป็นการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) โดยเศษสึกหรอที่หลุดออกมาจากผิววัสดุจะเกิดการยึดตัวและม้วนกลิ้งเป็นเส้นก่อนที่จะหลุดออกมา



a)

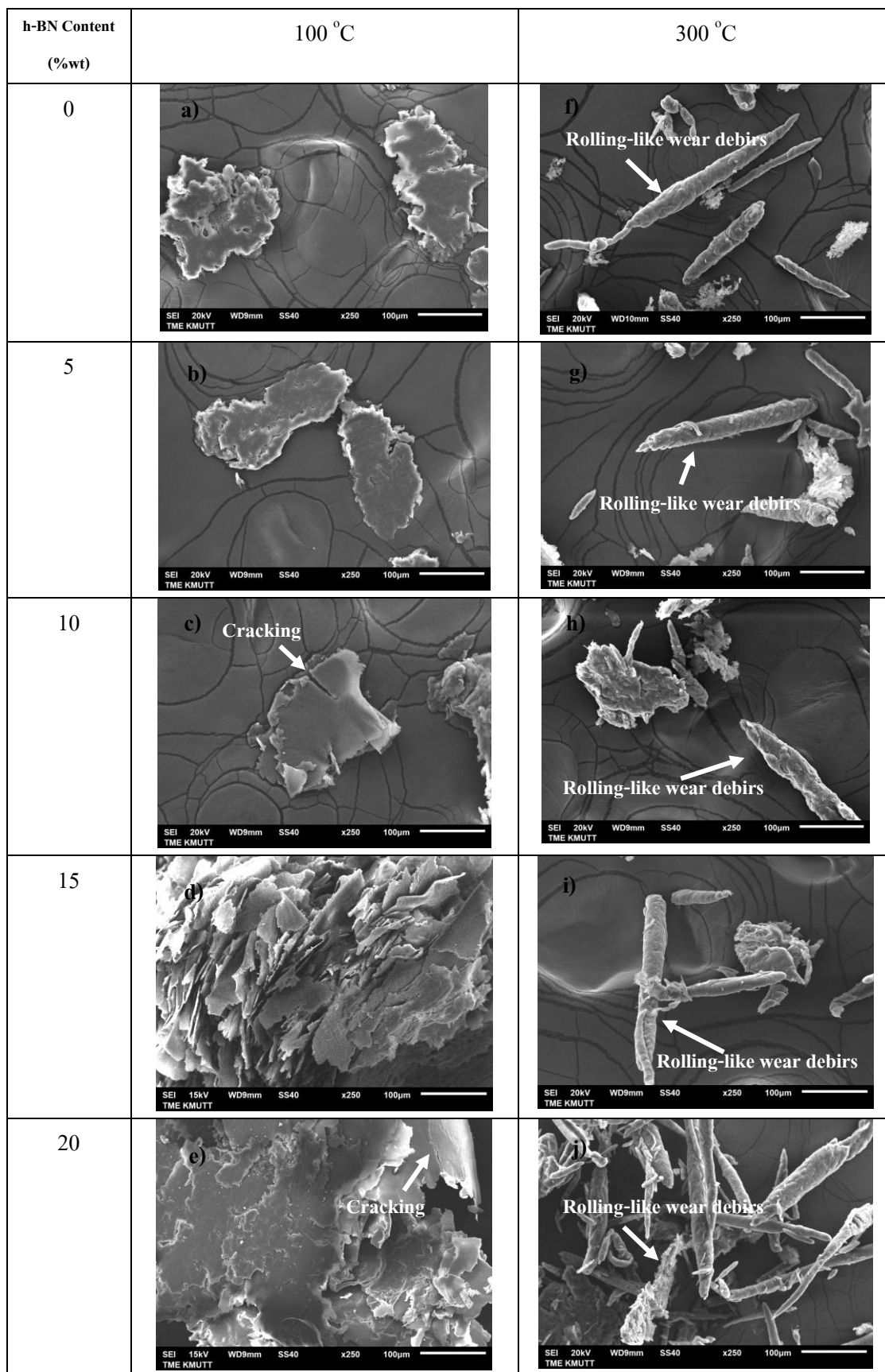


b)

รูปที่ 4.29 อัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่อุณหภูมิการทดสอบต่างกัน

a) อัตราการสึกหรอที่น้ำหนักกด 10 N

b) อัตราการสึกหรอที่น้ำหนักกด 30 N



รูปที่ 4.30 เศษสึกหรอจากการทดสอบการสึกหรอของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนและวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คิโตนในปริมาณและอุณหภูมิการทดสอบต่างกัน

4.3.2.2.3 ผลของน้ำหนักรีด

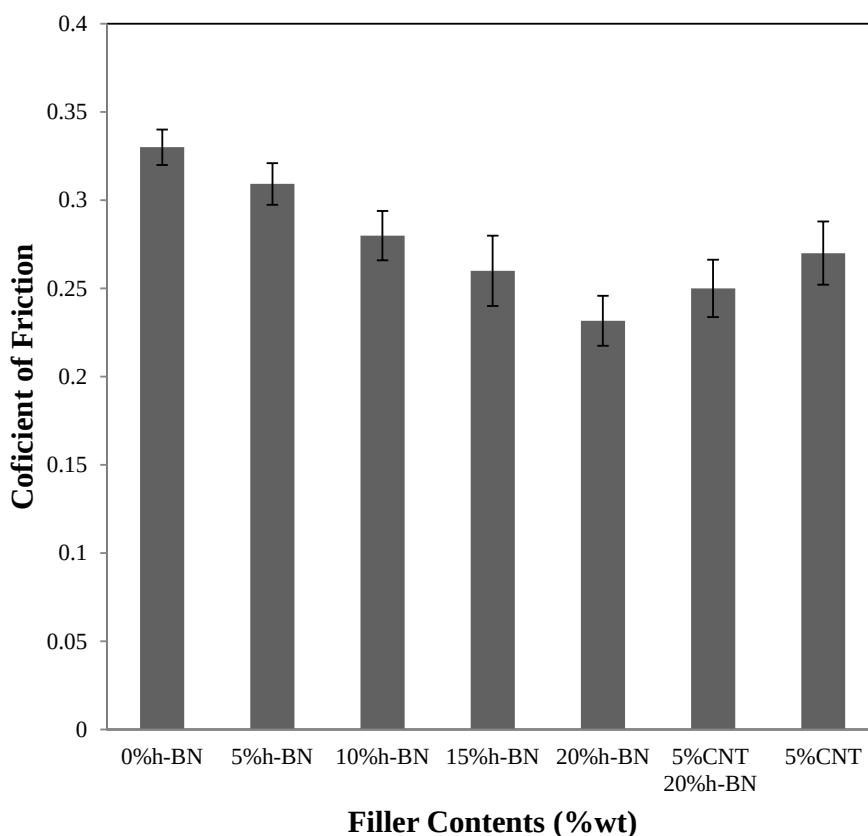
จากรูปที่ 4.29a และ 4.29b ผลการศึกษาความต้านทานการสึกหรอที่น้ำหนักกด 10 และ 30 นิวตัน พบว่า ทุกๆ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอ เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักกดจาก 10 นิวตัน เป็น 30 นิวตัน อัตราการสึกหรอจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เห็นได้ชัดที่อุณหภูมิทดสอบเท่ากับ 200 และ 300 องศาเซลเซียส เนื่องจากน้ำหนักกดที่เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มแรงเค้นให้กับลูกบอลที่ไถบนผิววัสดุเชิงประกอบนอกจากนั้นยังเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสจริงและการยึดติดของวัสดุคู่สัมผัสมากขึ้นส่งผลให้เศษการสึกหรอหลุดออกมาได้มากขึ้นนั่นเอง

4.3.3 ความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์/คาร์บอนนาโนทิวบ์/พอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตน

การทดสอบส่วนที่สามเป็นการทดสอบเพื่อทำการปรับปรุงความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ซึ่งพบว่าอัตราการสึกหรอยังมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ไม่เติมสารตัวเติมตามที่ได้กล่าวไว้ในส่วนแรกโดยการนำอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์เติมลงไปวัสดุเชิงประกอบพอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ในปริมาณ 20 โดยน้ำหนัก โดยการทดสอบสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตนจะใช้น้ำหนักกด 30 นิวตัน ระยะทางการทดสอบ 1 กิโลเมตร มีผลการทดสอบดังนี้

4.3.3.1 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

จากรูปที่ 4.31 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์/พอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตนวัสดุเชิงประกอบคาร์บอนนาโนทิวบ์/เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์/พอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตนและวัสดุเชิงประกอบคาร์บอนนาโนทิวบ์/พอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตน พบว่า เมื่อทำการเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักในวัสดุเชิงประกอบพอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เติมเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบพอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เติมเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าการเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์จะไม่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เติมเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม นอกจากนั้นยังมีค่าที่ลดลงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบพอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเพียงอย่างเดียว

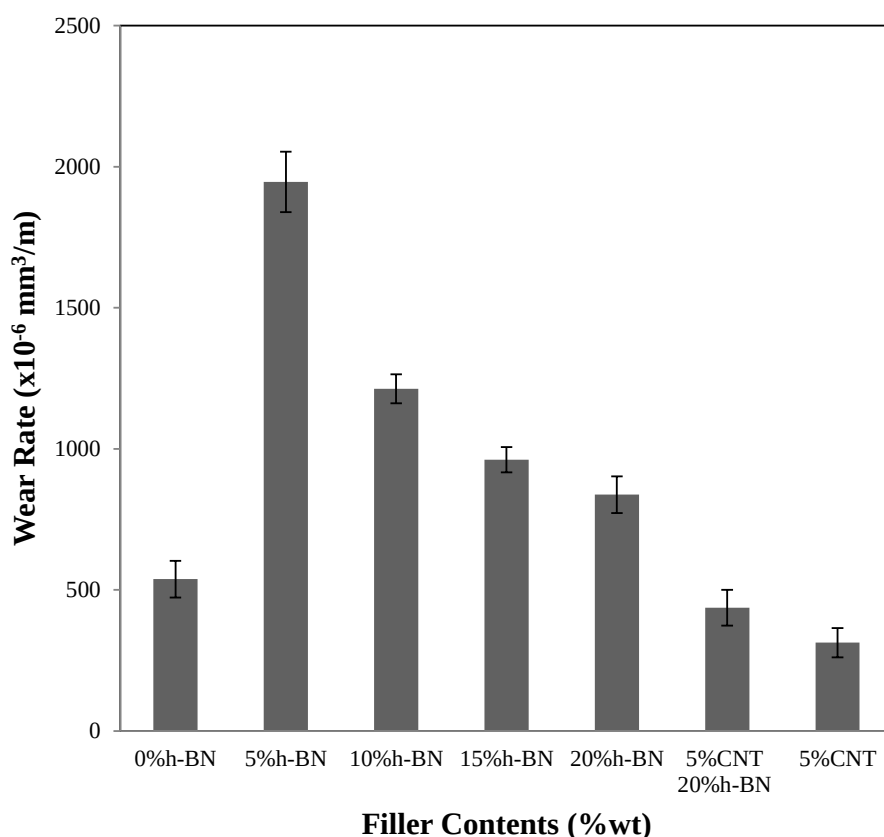


รูปที่ 4.31 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอเทอร์อีเทอร์อีไคโตน

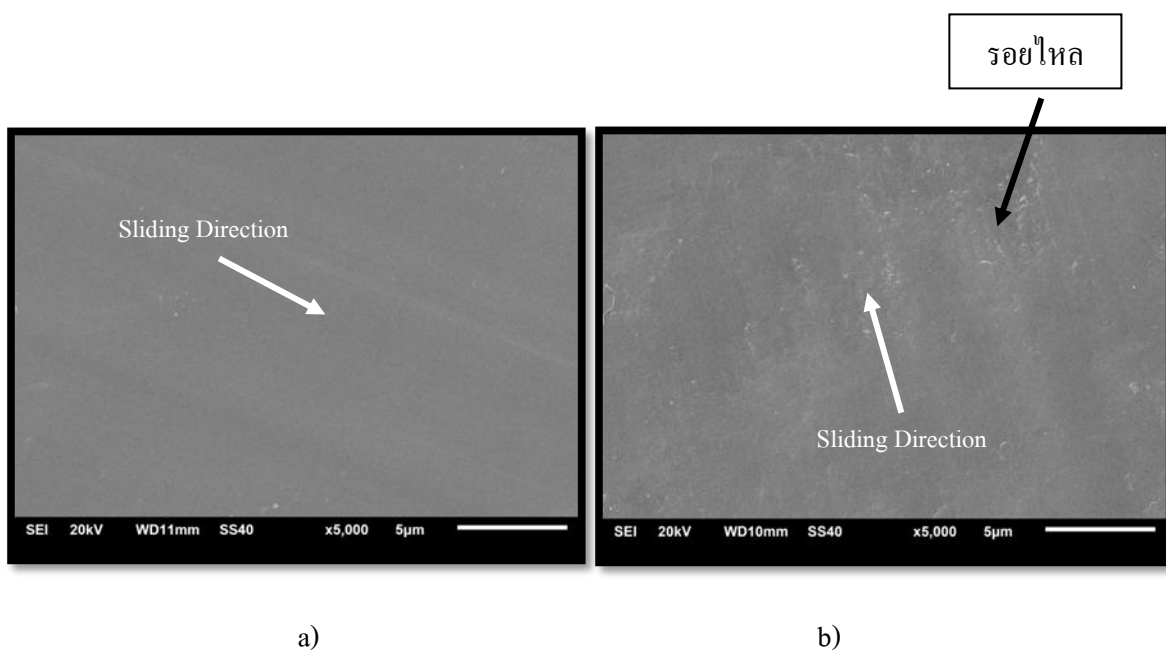
4.3.3.2 ความต้านทานการสึกหรอ

จากรูปที่ 4.32 แสดงผลของอัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอเทอร์อีเทอร์อีไคโตนพบว่า พอลิเอเทอร์อีเทอร์อีไคโตนที่เติมเฮกซะ โกลบอลโบรอนไนไตรด์แต่ละอัตราส่วน อัตราการสึกหรอจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอเทอร์อีเทอร์อีไคโตนที่ไม่เติมสารตัวเติม ดังนั้นงานวิจัยจึงทำการปรับปรุงความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอเทอร์อีเทอร์อีไคโตนที่เติมเฮกซะ โกลบอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยน้ำหนักของการเติมอนุภาคเฮกซะ โกลบอลโบรอนไนไตรด์โดยทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำที่สุดเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวป์ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าอัตราการสึกหรอจะมีค่าลดลงพร้อมทั้งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานยังเปลี่ยนแปลงจากเดิมไม่มากนัก ดังได้กล่าวในหัวข้อ 4.3.3.1 ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวป์เข้าไปช่วยรับแรงและกระจายแรงจากวัสดุกลุ่มสัมผัส ทำให้เศษสึกหรอของวัสดุหลุดออกมาจากผิวชิ้นงานได้น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบพอลิเอเทอร์อีเทอร์อีไคโตนที่เติมเฮกซะ โกลบอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yang และคณะ [102] ที่ทำการศึกษาวัสดุเชิงประกอบพอลิไทรินด้วยการเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวป์ พบว่า อัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบจะมีค่าลดลงเนื่องจากอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวป์เข้าไปช่วยรับแรงและ

กระจายแรงนั่นเอง โดยเห็นได้ชัดจากรูปที่ 4.31 พบว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราการสึกหรอมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ไม่เติมสารตัวเติมแต่ยังคงมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เติมเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักนอกจากนั้นเมื่อทำการศึกษารอยสึกหรอจะพบว่ารอยสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักที่เติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีรอยสึกหรอที่เรียบและรอยขีดข่วนที่เกิดจากการสึกหรอแบบขัดถูจะลดลง นอกจากนั้นยังเกิดรอยไหลบนรอยสึกหรอที่เป็นผลจากการเติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.33b ส่วนรอยสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เติมเพียงอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่า รอยสึกหรอจะค่อนข้างเรียบมากกว่าและพบรอยขีดข่วนจากการสึกหรอแบบขัดถูเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.33a แต่อย่างไรก็ตามรอยสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบที่กล่าวมาข้างต้นจะมีรอยสึกหรอที่เรียบและรอยขีดข่วนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เติมเพียงอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ดังที่ได้กล่าวและแสดงไว้ในรูปที่ 4.19c



รูปที่ 4.32 อัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน



รูปที่ 4.33 รอยสึกหรอจากการทดสอบการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

- a) วัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่เติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก b) วัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักที่เติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก