O-1-21



อัตราส่วนผสมระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์และเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่มีอิทธิพลต่อ สมบัติไตรโบโลยีของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน Effect of Ratio between Carbon Nanotube and Hexagonal Boron Nitride on Tribological Properties of Polyetheretherketone Composites

<u>ธนเทพ ทรัพย์เจริญพร^{*}</u>, ทิพบรรณ ปะละไทย และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ <u>TanathepSubjareonpond</u>^{*}, TippabanPalathai and NarongritSombatsompop

กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์(P-PROF), คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 ถนนประชาอุทิศ บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140 Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha-Uthit Rd., Bang Mod, Thungkru, Bangkok 10140 ^{*}E-mail: Tanathep arm@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 087-358-5383, เบอร์โทรสาร 02-4708647

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนผสมระหว่างเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตร์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้น ที่ ส่งผลต่อสมบัติไตรโบโลยีของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์อีโตน ที่ปริมาณส่วนผสมรวม10 wt% โดยปรับเปลี่ยนเฮกซะ โกนอลโบรอนไนไตร์กับคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้น ในอัตราส่วนดังนี้ 10/0, 7.5/2.5, 5/5, 2.5/7.5 และ 0/10 ผลการทดลอง พบว่าเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตร์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้น ส่งผลทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นและเมื่ออัตราเร็วในการทดสอบ เพิ่มขึ้น การเติมเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตร์ ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์อีเทอร์คีโตนมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลง ส่วนคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้นมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราจำเพาะการสึกหรอเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในทุกสภาวะ การทดสอบการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วนต่างๆระหว่างเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตร์กับคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้นส่งผลให้ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนของเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตร์เพิ่มชื้น และมีอัตราจำเพาะการสึกหรอ ต่ำลงเมื่ออัตราส่วนของคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้นเพิ่มขึ้น

คำหลัก: คาร์บอนนาโนทิวบ์/เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์/พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/สมบัติไตรโบโลยี A batwa at

Abstract

The effect of the ratio of hexagonal boron nitride (h-BN) tocarbon nanotube (MWCNT) on tribological properties of polyetheretherketone (PEEK) compositeswas studied.Total filler content was fixed at 10 wt%. Various ratio ofh-BN to MWCNT were 10/0, 7.5/2.5, 5/5, 2.5/7.5 and0/10. The results showed that the hardness increased with increasing h-BN and MWCNT contents.When the sliding speed was increased, h-BN played an important role to decrease the coefficient of friction. MWCNT filled in PEEK composite did not show any significant differences in the coefficient of friction and specific wear rate.The addition of h-BN in PEEK composite exhibited a decrease in the coefficient of friction whereas the addition of MWCNT in PEEK composite decreased the specific wear rate.

Keywords:Carbon Nanotube/Hexagonal Boron Nitride/Polyetheretherketone/Tribological Properties

1. บทนำ

38

การทำงานของเครื่องจักรต่างๆส่วนใหญ่มีจุดหมุนเหวี่ยง ทำให้เกิดการเสียดสี เป็นเหตุให้ทำให้เกิดการสึกหรอขึ้น โดยทำให้มี ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเพิ่มขึ้น ในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุพอลิเมอร์มาประยุกต์ใช้ในงานต้านทานต่อการสึกหรออย่างกว้างขวาง



เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดี ขึ้นรูปง่ายและมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับโลหะพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (Polyetheretherketone, PEEK) มีสมบัติเชิงกลเด่นได้แก่ สมบัติความแข็งแรงสูงมีความเสถียรทางความร้อน ต้านทานการสึกหรอ[1-2] และเฮกซะโกนอล โบรอนไนไตรด์ (Hexagonal Boron Nitride, h-BN) เป็นสารหล่อลื่นแบบแข็ง (Solid lubricant)เพื่อลดแรงเสียดทาน เนื่องจาก h-BN มีโครงสร้างเป็นชั้นเกิดการลื่นไถลได้ดี[3-4] โดยงานวิจัยของ ปิติพงษ์ พรหมรักษ์[5] ศึกษาผลของh-BN ที่เติมในPEEK พบว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลง แต่การสึกหรอสูงขึ้นและจากงานวิจัยของ Park และคณะ[6] และCaiและคณะ[7] พบว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon Nanotube, CNT) ช่วยให้วัสดุมีการสึกหรอลดลง เนื่องจาก CNT มีสมบัติทางด้านความแข็งที่สูง[8]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนผสมระหว่างh-BN และCNT ลงในPEEKที่มีผลต่อสมบัติอัตราการสึกหรอ และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบ

2. วิธีการ

2.1 วัสดุในงานวิจัย

งานวิจัยใช้PEEK เกรด 450PF ขนาดเฉลี่ย63.16 ไมครอนบริษัท Victrexจำกัดประเทศอังกฤษผง h-BN ขนาดเฉลี่ย 1.5 ไมครอนบริษัท MK IMPEX จำกัด ประเทศแคนนาดา ผงคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้น (Multi Wall Carbon Nanotube, MWCNT) เกรด NC7000 ขนาดความยาวเฉลี่ย 1.5 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 นาโนเมตรบริษัท Nanocylจำกัด ประเทศ เบลเยียม

2.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ปริมาณการผสมวัสดุตัวเติมถูกจำกัดที่ 10% โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนระหว่าง h-BN กับ MWCNT คือ 10/0, 7.5/2.5, 5/5, 2.5/7.5, 0/10ผสมกับPEEK ด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิคบาร์ท (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 20 นาทีโดยมีเอทานอลเป็นตัวกลาง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 100องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น และนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 380องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที แรงดัน 10 เมกาปาสคาล จากนั้นเตรียมชิ้นงานเป็น แผ่นกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง25มิลลิเมตร เพื่อนำไปทดสอบการสึกหรอ

2.3 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอและการตรวจสอบคุณลักษณะ

ทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องไตรโบโลยีแบบ Ball-on-Disc โดยใช้วัสดุคู่สัมผัสคือลูกบอลเหล็กเจือโครเมียมเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตรอัตราเร็วในการทดสอบ 0.1 และ 0.5 เมตร/วินาทีน้ำหนักกดในการทดสอบ 10, 20 และ 30 นิวตัน ระยะทางทดสอบ 1กิโลเมตร

ตรวจสอบความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งระดับจุลภาค (Microhardness) รุ่น HMV-2000 บริษัท Shimadzu ประเทศ เยอรมัน โดยวัดความแข็งแบบวิคเกอร์(Vickers) กดเป็นเวลา 15 วินาที น้ำหนักกด 200 กรัม ทำการวัด 15 ครั้ง ต่อ 1 ชิ้นงาน เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยอัตราจำเพาะการสึกหรอหาโดยวัดรอยสึกหรอบนชิ้นงานโดยใช้เครื่อง Profilometerรุ่น SV3000 บริษัท Mitutoyoประเทศญี่ปุ่น ทำการวัด 4 จุด ต่อ 1 ชิ้นงาน เพื่อนำมาหาพื้นที่เฉลี่ย รอยและเศษการสึกหรอตรวจสอบด้วยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JSM-6610LV บริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น

3. ผลและอภิปรายผล

3.1 อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างh-BN และMWCNT ที่ส่งผลต่อความแข็งของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

จากรูปที่ 1 พบว่าความแข็งของ PEEK มีค่าสูงขึ้นเมื่อเติม h-BN และ MWCNT เนื่องจากค่าความแข็งของh-BN และ MWCNT สูงกว่า PEEK นอกจากนี้พบว่าความแข็งไม่เปลี่ยนแปลงในทุกอัตราส่วนระหว่าง h-BN กับ MWCNT เนื่องจากปริมาณ สารตัวเติม(10 wt%) โดยรวมมีปริมาณเท่าเดิม

3.2 อิทธิพลของh-BN และMWCNT ที่ส่งผลต่อสมบัติไตรโบโลยีของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

3.2.1 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

จากรูปที่ 2(ก)พบว่าเมื่อความเร็วในการทดสอบเพิ่มขึ้นจาก 0.1 ไป 0.5 เมตร/วินาทีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของ PEEK มี แนวโน้มคงที่แตกต่างกับ 10 wt%h-BNที่มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่ออัตราเร็วเพิ่มขึ้นมีผลให้h-BN หลุดมากขึ้น และแสดงหน้าที่ เป็นสารหล่อลื่นแบบแข็งส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลง ส่วนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของ10 wt%MWCNTมีแนวโน้ม คงที่เนื่องจาก MWCNT เป็นวัสดุที่มีความแข็งที่สูง รับแรงเค้นได้เพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุคู่สัมผัสจึงคงที่





รูปที่ 1 ค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบที่ไม่เติมและเติม h-BN กับ MWCNT ในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 2 (ก) และ (ค) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน โดยทดสอบที่น้ำหนักกด 10 นิวตัน (ข) และ (ง)อัตราจำเพาะการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน โดยทดสอบที่ความเร็ว 0.5 เมตร/วินาที

จากรูปที่ 2(ค)พบว่าเมื่อน้ำหนักกดเพิ่มขึ้นจาก 10, 20 และ 30 นิวตันสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของ PEEKและ 10 wt%MWCNTมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากที่สภาวะน้ำหนักกดสูง ผิวของชิ้นงานได้รับความเค้นสูงขึ้นและเปลี่ยนรูปเป็นความร้อน จากการเสียดสีส่งผลให้เศษการสึกหรอ(Debris) เกิดการเสื่อมสภาพ ความหนืดลดลง และติดบริเวณผิวของคู่สัมผัสไถลได้ง่ายขึ้น เกิดการเสียดสีส่งผลให้เศษการสึกหรอ(Debris) เกิดการเสื่อมสภาพ ความหนืดลดลง และติดบริเวณผิวของคู่สัมผัสไถลได้ง่ายขึ้น เกิดการเสียดสีส่งผลให้เศษการสึกหรอ(Debris) เกิดการเสื่อมสภาพ ความหนืดลดลง และติดบริเวณผิวของคู่สัมผัสไถลได้ง่ายขึ้น เกิดการประพฤติตัวเป็นการหล่อลื่นตัวเอง (Self lubricant)ตรงข้ามกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของ10 wt%h-BNที่มีแนวโน้ม คงที่ เนื่องจาก h-BN เป็นวัสดุที่นำความร้อนได้ดี มีค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่ 33.47 W/m.K[9] ส่งผลให้ ไม่เกิดกลไกแบบ PEEK ส่วนที่น้ำหนักกด 20 นิวตัน พบว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งของ h-BNเกิด การขูดขีดร่วมอย่างรุนแรง (3-body abrasion)ทำให้การหล่อลื่นลดลงดังแสดงจากรอยขูดขีดในรูปที่ 3(จ) *3.2.2 ความต้านทานการสึกหรอ*

40



จากรูปที่ 2(ข)พบว่าเมื่ออัตราเร็วเพิ่มขึ้น อัตราจำเพาะการสึกหรอของ PEEK มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ที่อัตราเร็วสูง ส่งผลให้ เกิดความร้อนที่ผิวขึ้นงานเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากเศษการสึกหรอบางส่วนที่อยู่ระหว่างคู่สัมผัส เกิดการไหลตัวง่ายขึ้น ทำให้ลดการขัด ถูร่วมส่วนอัตราจำเพาะการสึกหรอของ 10 wt%h-BNมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากความแข็งของ h-BN อาจหลุดออกมาอยู่บริเวณ คู่สัมผัสเกิดเป็นการขัดถูร่วม ส่วนอัตราจำเพาะการสึกหรอของ 10 wt%MWCNTมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจาก MWCNT เป็นวัสดุที่มีความแข็งที่สูง อีกทั้งมีค่า Aspect ratio ที่สูง ส่งผลมีการช่วยรับและกระจายแรงที่เกิดขึ้น

จากรูปที่ 2(ง)พบว่าเมื่อน้ำห^{ู้}นักกดเพิ่มขึ้นอัตราจำเพาะการสึกหรอของทั้ง PEEKและ 10 wt%MWCNTมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากที่สภาวะน้ำหนักกดสูง ผิวของซิ้นงานได้รับความเค้นสูง เกิดความร้อน ส่งผลทำให้วัสดุเกิดการสึกหรอแบบล้า (Fatigue damage) ลักษณะเป็นริ้วขนานกับทิศทางการทดสอบ ส่งผลให้ลดการเสียรูปอย่างถาวร อัตราจำเพาะการสึกหรอลดลง ดังแสดง ในรูปที่ 3(ข) และอาจพบใน3(ซ) บ้างเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ G. Zhang และคณะ[10]แต่กลไกการสึกหรอแบบล้า ไม่พบใน10 wt%h-BNเนื่องจาก h-BN มีการนำความร้อนที่ดี ดังแสดงในรูปที่ 3(จ) ส่วนกรณีการเพิ่มน้ำหนักกดส่งผลให้ h-BN เกิดการอัดตัวเนื่องจากความเค้น ส่งผลให้ความรุนแรงของการขูดขีดลดลง

3.3 อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างh-BN ต่อMWCNT ที่ส่งผลต่อความต้านทานการสึกหรอของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน 3.3.1 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

จากรูปที่ 2(ก)พบว่าเมื่ออัตราเร็วสูงขึ้นสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบในทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มลดลง แต่ที่ อัตราเร็ว 0.1 เมตร/วินาทีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีแนวโน้มคงที่ในทุกอัตราส่วนและที่อัตราเร็ว 0.5 เมตร/วินาทีสัมประสิทธิ์แรง เสียดทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของ h-BNลดลง

จากรูปที่ 2(ค)พบว่าเมื่อน้ำหนักกดเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบในทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มคงที่ และเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่ออัตราส่วนของ h-BN ลดลง เนื่องจากปริมาณสารh-BN ที่หล่อลื่นลดลงแต่ที่น้ำหนักกด 20 นิวตัน พบว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงขึ้นเล็กน้อยอาจเป็นผลจากการขูดขีดอย่างรุนแรงจากทั้ง h-BN และ MWCNT ดังแสดงในรูปที่ 3(ฎ)และวัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วน 7.5/2.5/90มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำที่สุด

3.3.2 ความต้านทานการสึกหรอ

จากรูปที่ 2(ข)พบว่าเมื่ออัตราเร็วสูงขึ้น อัตราจำเพาะการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบในทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ที่ ความเร็ว 0.1เมตร/วินาทีอัตราจำเพาะของความต้านทานการสึกหรอมีแนวโน้มใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วนเนื่องจากที่อัตราเร็วนี้ การขูดขีดร่วมของ h-BN มีน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3(ญ)แต่ที่อัตราเร็ว 0.5 เมตร/วินาทีอัตราจำเพาะการสึกหรอมีแนวโน้มลดลงเมื่อ อัตราส่วนของMWCNT เพิ่มขึ้น เนื่องจากMWCNT ช่วยรับและกระจายแรงและวัสดุเชิงประกอบที่อัตราส่วน 2.5/7.5/90มีอัตรา จำเพาะการสึกหรอต่ำที่สุด ในทุกอัตราเร็วการทดสอบ

จากรูปที่ 2(ง)พบว่าเมื่อน้ำหนักกดสูงขึ้น อัตราจำเพาะการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบในทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มลดลง และ มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนของ MWCNT สูงขึ้น อีกทั้งMWCNT ช่วยรับและกระจายแรงดีขึ้น ดังแสดงรอยการสึกหรอที่ลดลงใน รูปที่ 3(จ), 3(ฏ) และ 3(ซ) ตามลำดับ และวัสดุเชิงประกอบที่อัตราส่วน 2.5/7.5/90มีอัตราจำเพาะการสึกหรอต่ำที่สุด ในทุก น้ำหนักกดการทดสอบ

3.4 การวิเคราะห์เศษการสึกหรอ

จากรูปที่ 3(ค), 3(ฉ), 3(ฌ) และ 3(ฏ)แสดงเศษการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนมีลักษณะเป็นแผ่น เนื่องจากกลไกของเศษการสึกหรอที่หลุดออก ได้รับความเค้น และเกิดความร้อนขึ้น ส่งผลให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวร เคลือบบน ผิวสึกหรอ จากนั้นจึงแตก และหลุดออกเป็นแผ่น เนื่องจากความเค้นในภายหลัง สอดคล้องกับงานวิจัยของZhang และคณะ[11]



(ก) PEEK

(ข) PEEK

(ค) PEEK





4. สรุป

h-BN และMWCNT ส่งผลให้ความแข็งของPEEK มีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่อัตราส่วนระหว่างh-BN กับMWCNT ไม่ส่งผลต่อค่า ความแข็งของPEEK ส่วนh-BN ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดต่ำลง ในบาง สภาวะทดสอบ ส่วนMWCNT ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และอัตราจำเพาะการ สึกหรอเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ในทุกสภาวะทดสอบ และอัตราส่วนระหว่างh-BN กับ MWCNT ส่งผลต่อสมบัติไตรโบโลยีของPEEK โดยสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนของh-BN เพิ่มขึ้น และมีอัตราจำเพาะการสึกหรอต่ำลงเมื่ออัตราส่วน ของMWCNT เพิ่มขึ้น โดยมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำสุดที่อัตราส่วนhBN/MWCNT 7.5/2.5และมีอัตราจำเพาะการสึกหรอ ต่ำสุดที่อัตราส่วน hBN/MWCNT 2.5/7.5

5. กิตติกรรมประกาศ

42

คณะวิจัย ขอขอบคุณโครงการมหาวิทยาลัยแห่งชาติ (NRU) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (เมธีวิจัยอาวุโส สกว., เลขที่ สัญญา RTA5580009) และศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) รหัสโครงการ NN-B-22-CT3-21-52-07) ที่ให้ความ อนุเคราะห์และสนับสนุนทุนวิจัย



6. เอกสารอ้างอิง

[1] Polyether ether ketone, URL:http://www.tangram.co.uk/TI-Polymer-PEEK.html, access on 17/06/2015.
[2]PAR group, PEEK, English, URL: http://www.par-group.co.uk/engineering-plastics/PEEK.aspx, access on 17/06/2015.

[3]Westergard, R., Ahin, A., Axen N. and Hogmark, S.(1998).Sliding wear and friction of Si₃N₄–SiC-Based ceramic composites containing hexagonal boron nitride, Engineering Tribology, Vol. 212, No. 5, pp. 381-387.

[4]Ramond, G.(2004). Mechanical Wear Fundamentals and Testing, 2nded, Marcel Dekker, New York, p. 287. [5]ปิติพงษ์ พรหมรักษ์(2555).สมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์/พอลิ อีเทอร์อีเทอร์คีโตน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 107-108.

[6]Park, H., Kim, J., Seo, Y., Shim, J., Sung, M. and Kwak, S.(2013). Wear behavior of in situ polymerized carbon nanotube/ultra high molecular weight polyethylene composites, *Macromolecular Research*, Vol. 21, No. 9, pp. 965-970.

[7]Cai, H., Yan, F. and Xue, Q.(2004). Investigation of tribological properties of polyimide/carbon nanotube nanocomposites, *Materials Science and Engineering A*,Vol. 364, Nos. 1-2, pp. 94-100.

[8] Carbon Nanotube-Polymer Composites: Manufacture, Properties and Applications, Carbon Nanotube Composites, URL: http://coecs.ou.edu/Brian.P.Grady/nanotube.html, access on 17/06/2015

[9] Chan H. E.(2011).Development and characterization of thermally conductive polymeric composites for electronic packaging applications, A thesis submitted, Applied Science and Engineering Graduate Department of Mechanical & Industrial Engineering University of Toronto, p.10.

[10] Zhang, G., Yub, H., Zhang, C., Liao H. and Coddet, C.(2008). Temperature dependence of the tribological mechanisms of amorphous PEEK (polyetheretherketone) under dry sliding conditions, *ActaMaterialia*, Vol. 56, pp. 2182-2190.

[11] Zhang, M.Q., Lut, Z.P. and Friedricht, K.(1997). On the wear debris of etheretherketone: fractal dimensions in relation to wearmechanisms, *Tribology International*, Vol. 30, No. 2, pp. 87-102.