

## สมบัติความเสียดทานและการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบฟีนอลิกที่เติมผงเถ้าจากธรรมชาติ

### Friction and Wear Properties of Natural Ash-Filled Phenolic Based Composites

เสาวภา ชูศรี<sup>1\*</sup>, เอกชัย วิมลมาลา<sup>1</sup>, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ<sup>1</sup> และ ศิรินทร ทองแสง<sup>2</sup>

Saowapa Choosri<sup>1\*</sup>, Ekachai Wimolmala<sup>1</sup>, Narongrit Sombatsompop<sup>1</sup> and Sirinthorn Thongsang<sup>2</sup>

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของผงเถ้าจากธรรมชาติประกอบด้วยเถ้าลอยและเถ้าขาน้อยที่มีผลต่อสมบัติความเสียดทานและการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบฟีนอลิก โดยมีการนำผงเถ้ามาใช้แทนที่ผงอะลูมินาและผงซิลิกาที่เป็นวัสดุขัดถูในชิ้นงานด้วยปริมาณ 0, 4, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เตรียมชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ทดสอบวัดค่าความแข็ง ความทนแรงกดอัด วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคภายในชิ้นงาน และสมบัติไดรโบลยีด้านความเสียดทานและการสึกหรอที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 150 องศาเซลเซียส ผลการวิจัย พบว่า การเติมผงเถ้าจากธรรมชาติส่งผลทำให้ความแข็งมีแนวโน้มลดลง ส่วนความทนแรงกดอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลงในทุกอุณหภูมิทดสอบ สำหรับความต้านทานการสึกหรอที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ของชิ้นงานที่เติมผงเถ้าในช่วง 0-12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่อุณหภูมิ 100 และ 150 องศาเซลเซียส ชิ้นงานที่เติมผงเถ้ามีความต้านทานการสึกหรอดีกว่าชิ้นงานที่ไม่เติมผงเถ้า

#### ABSTRACT

This article studied the effect of natural ash (fly ash and bagasse ash) on the friction and wear properties of phenolic based composites. The natural ash replaced alumina and silica as abrasive materials in the composites with ash content of 0, 4, 8 and 12 wt% The composites were prepared by hot press at 170°C. The properties of phenolic based composites were examined, including hardness, compressive strength, and microstructural analysis. Tribological properties of the composites in terms of the coefficient of friction and wear rate at 25, 100 and 150°C were studied. It was found that the addition of natural ash led to a reduction of the hardness and an increase in compressive strength of composites. The coefficient of friction of the phenolic based composites did not change with ash loading at all test temperature. The wear resistance at 25°C for the phenolic based composites was stable at 0-12 wt% of ash, while the wear resistance at 100 and 150°C of the composites loaded with natural ash particles was superior to those of the composites without ash.

Key Words: Phenolic / Natural ash / Tribological / Wear

\* Corresponding author; e-mail address: [kwang211033@hotmail.com](mailto:kwang211033@hotmail.com)

<sup>1</sup>กลุ่มวิจัย P-PROF คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

<sup>1</sup>P-PROF research group, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

<sup>2</sup>Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

## คำนำ

อุตสาหกรรมการผลิตผ้าเบรคมีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมรถยนต์ ระบบเบรคเป็นส่วนที่สำคัญในด้านความปลอดภัยของรถยนต์ โดยมีผ้าเบรคเป็นตัวสร้างแรงเสียดทานกับจานเบรคเพื่อชะลอและหยุดการหมุนของล้อ กล่าวคือ ในขณะที่ออกแรงเหยียบที่แป้นเบรค แรงเหยียบถูกส่งไปที่แม่ปั้มน้ำมันเบรค (Master cylinder) เพื่อทำหน้าที่อัดแรงดันน้ำมันเบรคออกไปตามระบบเบรคไปจนถึงตัวเบรค เมื่อเบรคได้รับแรงดัน ลูกปั้มน้ำมันเบรคดันให้ผ้าเบรคเสียดทานกับชุดจานเบรคที่อยู่ใกล้กับจานดิสก์เบรคหรือดรัมเบรค เพื่อให้เกิดแรงเสียดทานทำให้ล้อหมุนช้าลง เมื่อเพิ่มน้ำหนักเหยียบเบรค แรงดันน้ำมันเบรคเพิ่มมากขึ้น มีความฝืดที่ล้อเพิ่มขึ้น รถจึงสามารถหยุดได้ตามความต้องการของผู้ขับขี่ (John Remling, 1928) ในปัจจุบันกระบวนการผลิตผ้าเบรคงานอุตสาหกรรมมีการใช้วัสดุที่มีส่วนผสมของสารฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสาน (Binder) ยึดส่วนประกอบต่างๆ ภายในผ้าเบรค ได้แก่ สารหล่อลื่นชนิดของแข็ง สารเสริมแรง และวัสดุขัดถูอื่นๆ (दारणी जेठियुसुख, 2555) แต่เดิมผ้าเบรคมีส่วนผสมที่สำคัญคือสารแอสเบสตอส (Asbestos) เนื่องจากมีราคาถูก เบรคเสียดเสียบ เพิ่มความแข็งและความฝืดให้กับผ้าเบรค พบว่าฝุ่นผงของสารแอสเบสตอสที่เกิดจากการสึกหรอของผ้าเบรคส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดมะเร็งในปอดเป็นอันตรายต่อสุขภาพ จึงมีการหลีกเลี่ยงการใช้สารแอสเบสตอสเป็นส่วนผสมในการผลิตผ้าเบรค ทำให้ผู้ผลิตผ้าเบรคเปลี่ยนชนิดของสารตัวเติมเสริมแรงเป็นชนิดอื่น เช่น เส้นใยแก้ว โดหะ อะรามิด และเซรามิก เป็นต้น (D. Chan and G.W. Stachowiak, 2004)

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาสารตัวเติมที่มาจากธรรมชาติโดยใช้ถั่วลันเตาและถั่วเขียว ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติและเป็นสารตัวเติมที่มีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกา (Silica,  $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา (Alumina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (S. Thongsang *et al.*, 2012; S. Kanking *et al.*, 2012) ซึ่งมีค่าความแข็งค่อนข้างสูงสำหรับใช้เป็นวัสดุขัดถูที่สามารถช่วยชะลอการสึกหรอของผ้าเบรคได้ (Mustafa Boz, 2007) ดังนั้นจึงนำไปสู่วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของผงถั่วจากธรรมชาติที่มีต่อสมบัติความเสียดทาน และการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบฟีนอลิกที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิสูง (100 และ 150 องศาเซลเซียส) และนอกจากนี้เป็นการพัฒนาการผลิตผลิตภัณฑ์ผ้าเบรคที่มีประสิทธิภาพและมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Eco-friendly) ด้วย (R. Yun *et al.*, 2010)

## อุปกรณ์และวิธีการ

### การเตรียมชิ้นงาน

การเตรียมชิ้นงานเริ่มต้นจากการผสมส่วนผสมทั้งหมดตามอัตราส่วนที่ต้องการดังแสดงในตารางที่ 1 ด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) จากนั้นนำส่วนผสมไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบแท่งรูปสี่เหลี่ยมขนาด  $25 \times 25 \times 7$  มิลลิเมตร<sup>3</sup> (มอก. 97-2536) โดยมีขั้นตอนการขึ้นรูปเริ่มจากกระบวนการอัดแห้ง จากนั้นนำชิ้นงานอัดซ้ำด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Hot press) โดยใช้อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส โดยทำการอัดขึ้นรูปร้อนขั้นที่ 1 ด้วยความดัน 100 บาร์ เป็นเวลา 15 นาที และอัดขึ้นรูปร้อนขั้นที่ 2 ด้วยความดัน 140 บาร์ เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำชิ้นงานหลังการขึ้นรูปร้อนไปอบด้วยอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-4 ชั่วโมง แล้วจึงนำชิ้นงานปรับแต่งผิวหน้าโดยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100-320 ความหยาบผิวของชิ้นงานประมาณ  $5.2 \mu\text{m}$  (ไมครอน) แล้วจึงทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติไทรโบโลยีต่อไป

Table 1 Material formulations of phenolic based composites

Materials	Functions	Content (wt%)
Phenolic resin	Matrix	50
Chopped fiber (S-glass)	Reinforcement	15
Graphite (75-100 $\mu\text{m}$ )	Solid lubricant	3
Silicon carbide (75-100 $\mu\text{m}$ )	Friction modifier	8
Barium sulfate (75-100 $\mu\text{m}$ )	Filler	12
Abrasives* (75-100 $\mu\text{m}$ ): Natural ash** (75-100 $\mu\text{m}$ )	Abrasives	12:0, 8:4, 4:8, 0:12

\*Alumina/silica, \*\*Fly ash and Bagasse ash

### การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

#### ความแข็ง (Hardness)

การทดสอบความแข็ง ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E384-2003 ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ระดับจุลภาค (Micro-Vickers hardness tester) บริษัท Future-Tech รุ่น FM-700e Type D ประเทศญี่ปุ่น ใช้แรงกด 50 gf (กรัมแรง) เวลาทดสอบ 10 วินาที

#### มอดุลัสการกดอัดและความแข็งแรงกดอัด (Compressive modulus and compressive strength)

การทดสอบมอดุลัสการกดอัดและความแข็งแรงกดอัด ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5467-2010 ด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine บริษัท LLOYD รุ่น LR 50K ประเทศอังกฤษ ความเร็วในการทดสอบ 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที กำหนดเปอร์เซ็นต์ความเครียดที่ 40%

#### การทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการสึกหรอ (Friction coefficient and wear)

การทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการสึกหรอ โดยใช้เครื่องทดสอบไตรโบมิเตอร์ที่อุณหภูมิสูง (High temperature tribometer) บริษัท CSM-instruments รุ่น High temperature tribometer ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ด้วยรูปแบบ Pin-on-disc กำหนดชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบเป็นพิน (Pin) ปลายทรงกรวยหัวตัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวพิน 2.5 มิลลิเมตร คู่สัมผัส (Disc) เป็นเหล็กหล่อ เกรด FCD450 ความหยาบผิว 0.3-0.4  $\mu\text{m}$  ในการทดสอบใช้ความเร็วในการทดสอบ 37.7 เซนติเมตรต่อวินาที แรงกด 1 นิวตัน ระยะทาง 1 กิโลเมตร ทดสอบ ณ อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง

#### การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) บริษัท JEOL รุ่น JSM-6610LV ประเทศญี่ปุ่น เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวและการยึดเกาะของอนุภาคสารตัวเติมกับเนื้อเมทริกซ์ภายในชิ้นงานทดสอบ

### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### ผลของการเติมผงเถ้าจากธรรมชาติที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพีนอลิก

##### ความแข็ง (Hardness)

จากรูปที่ 1 แสดงสมบัติเชิงกลด้านความแข็งของชิ้นงาน ซึ่งเป็นความแข็งที่ผิวของชิ้นงานที่ทำการเติมผงเถ้าจากธรรมชาติ ประกอบด้วยเถ้าลอยและเถ้าขาน้อยที่ปริมาณ 0-12 wt% พบว่า เมื่อเติมผงเถ้าในชิ้นงานส่งผลทำให้ความแข็งที่ผิวของชิ้นงานมีแนวโน้มต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่เติมผงเถ้า โดยชิ้นงานที่เติมเถ้าลอยนั้นเห็นการลดลงของค่าความแข็งอย่างชัดเจน ที่ปริมาณการเติมเถ้าลอยที่ 12 wt% ในขณะที่การเติมเถ้าขาน้อยมีการลดลงที่ปริมาณ 8-12 wt% ทั้งนี้เนื่องจากผงเถ้าทั้งสองชนิดที่ทดแทนผงอะลูมินาและผงซิลิกา นั้น มีค่าความแข็งเริ่มต้นของอนุภาคผงน้อยกว่า โดยค่าความแข็งเริ่มต้นของผงอะลูมินาและผงซิลิกาตามโมฮ์สเกลมีค่าเท่ากับ 9 และ 7 ตามลำดับ (W.Österle *et al*, 2014) ส่วนในกรณีของสารตัวเติมเถ้าลอยและเถ้าขาน้อยมีค่าความแข็งเริ่มต้นตามโมฮ์สเกลเท่ากับ 6 (D. Chan and G.W. Stachowiak, 2004; V.S. Aigbodion, 2010) จึงส่งผลทำให้ค่าความแข็งของชิ้นงานโดยรวมไม่ต่างกัน

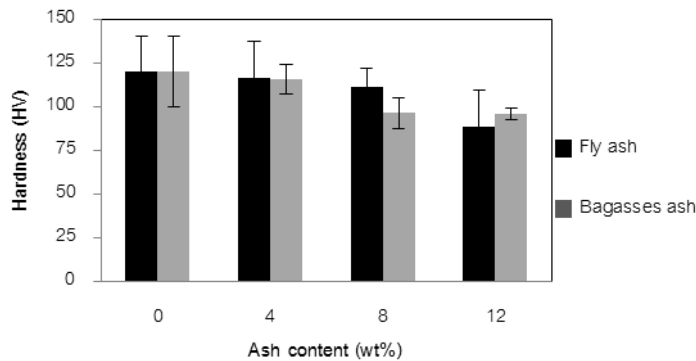


Figure 1 Hardness of phenolic based composites with ash content

##### มอดูลัสการกดอัดและความต้านทานแรงกดอัด (Compressive modulus and compressive strength)

ค่ามอดูลัสการกดอัดของชิ้นงานที่ทำการเติมผงเถ้าทั้งสองชนิด แสดงดังรูปที่ 2 โดยค่ามอดูลัสการกดอัดนั้นแสดงความสามารถในการต้านทานต่อการเสียรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) พบว่า เมื่อปริมาณการเติมผงเถ้าเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่ามอดูลัสการกดอัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เพราะค่ามอดูลัสการกดอัดนั้นเป็นผลช่วงที่แรงกดเข้าไปทำให้โครงสร้างภายในของชิ้นงานเกิดการบีบอัดและสามารถคืนกลับตัวได้ แต่เมื่อได้รับแรงเพิ่มขึ้นอนุภาคผงและองค์ประกอบภายในเกิดการเรียงชิดติดกันมากขึ้น หลังจากนั้นเมื่อถึงจุดหนึ่งอนุภาคผงและเนื้อเมทริกซ์เกิดการเลื่อนผ่านกัน ส่งผลทำให้เกิดการเสียรูปแบบถาวร (Plastic deformation) แสดงถึงค่าความต้านทานแรงกดอัดของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3 สังเกตเห็นว่า ค่าความต้านทานแรงกดอัดของชิ้นงานเมื่อทำการเติมเถ้าลอยลงไปชิ้นงาน พบว่า ค่าความต้านทานแรงกดอัดของชิ้นงานที่เติมผงเถ้าทั้งสองชนิดในปริมาณ 4 wt% ส่งผลทำให้ค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่เติมผงเถ้าเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อทำการเติมเถ้าลอยเพิ่มสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงกดอัดไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งโครงสร้างจุลภาคของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด แสดงดังรูปที่ 4 โดยที่เถ้าลอยมีลักษณะทรงกลมและผิวเรียบดังแสดงในรูปที่ 4a) เถ้าขาน้อยมีลักษณะเป็นแท่งและมีรูพรุนที่ผิว ดังแสดงในรูปที่ 4b) และสารตัวเติมผงอะลูมินา ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดระดับนาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4c)

และพบว่า การยึดเกาะกันระหว่างเถ้าลอยกับเนื้อเมทริกซ์มีการยึดเกาะที่ดีดังแสดงในรูปที่ 5a) ในกรณีการเติมเถ้าขาน้อยเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงกดอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าขาน้อยนั้นเป็นอนุภาคที่มีลักษณะเป็นแท่งและมีความเป็นรูพรุนที่ผิว จึงส่งผลให้การยึดเกาะกันระหว่างเถ้าขาน้อยกับเนื้อเมทริกซ์เกิดได้ดี โดยเนื้อเมทริกซ์สามารถแทรกตัวเข้าไปภายในรูพรุนที่ผิวของเถ้าขาน้อยได้ดังแสดงในรูปที่ 5b) ในลักษณะของการยึดเกาะกันทางกล (Mechanical interlocking) (D.N.U. Lan *et al*, 2012) ลักษณะการกระจายตัวของเถ้าลอยและเถ้าขาน้อยภายในชิ้นงาน ส่วนผสมสามารถกระจายตัวได้ค่อนข้างดี ส่งผลทำให้ภายในเนื้อชิ้นงานมีการยึดเกาะกันของอนุภาคผงกับเนื้อเมทริกซ์ ทำให้ชิ้นงานมีความสามารถในการต้านทานต่อแรงกด เนื้อวัสดุเกิดการต้านแรงกดที่ได้รับจนถึงจุดหนึ่งที่แรงกดสามารถทำลายแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคผงกับเนื้อเมทริกซ์ได้ ส่งผลต่อชิ้นงานเกิดการเสียรูปอย่างถาวรและเกิดการแตกหักแบบเปราะขึ้นภายในชิ้นงาน

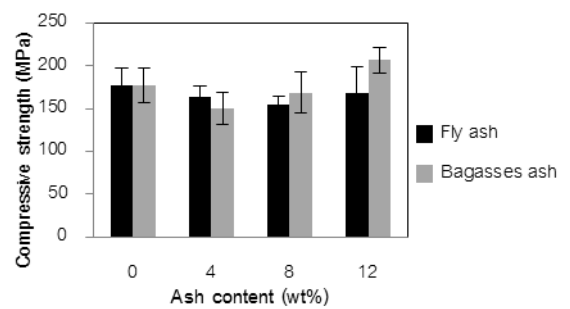
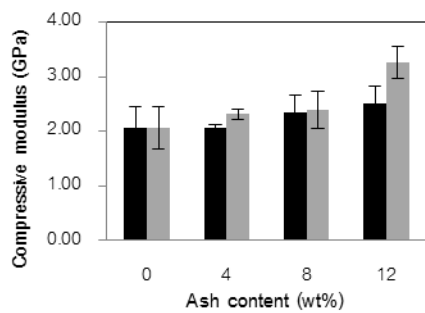


Figure 2 Compressive modulus of phenolic based composites with ash content Figure 3 Compressive strength of phenolic based composites with ash content

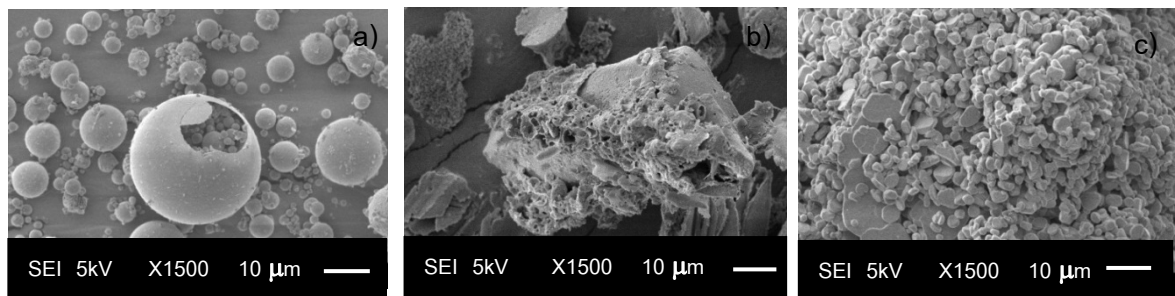


Figure 4 SEM pictures of materials (1500x) note: a) fly ash, b) bagasse ash and c) Alumina

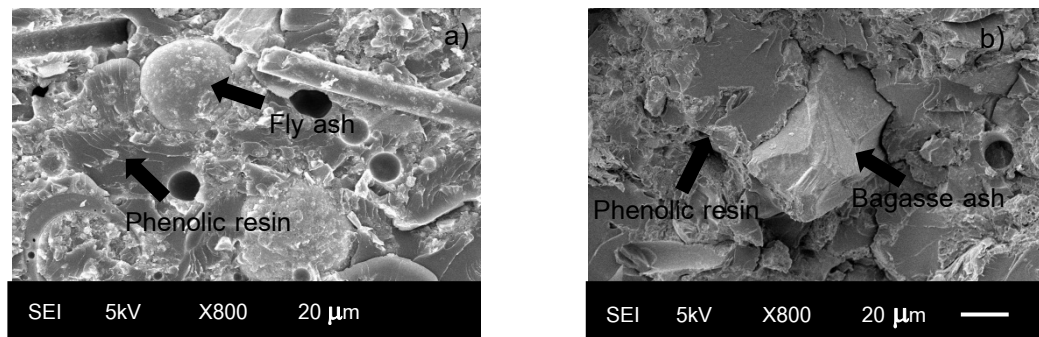


Figure 5 SEM micrograph of phenolic based composites (800x)

note: a) 8% fly ash and b) 8% bagasse ash

**ผลของการเติมผงเถ้าจากธรรมชาติที่ส่งผลต่อสมบัติไตรโบโลยีของวัสดุเชิงประกอบพีนอลิกสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of friction)**

จากรูปที่ 6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นงานที่ทำการเติมผงเถ้าและไม่เติมผงเถ้า โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิสูง (100 และ 150 องศาเซลเซียส) พบว่า เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นงานที่ไม่เติมผงเถ้าและเติมผงเถ้าทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิสูง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงส่งผลทำให้เนื้อเมทริกซ์เกิดการอ่อนตัวและทำให้การยึดเกาะระหว่างเนื้อเมทริกซ์กับอนุภาคผงเกิดน้อยลง ดังนั้นเมื่อเกิดการเสียดสีกับวัสดุคู่สัมผัส อนุภาคผงต่างๆ ในชิ้นงานจึงหลุดออกได้ง่ายขึ้น ทำให้เศษของการสึกหรอที่มีความแข็งสูงเข้าไปแทรกระหว่างคู่ผิวสัมผัสในลักษณะอนุภาคที่สาม (Third body) และเกิดความเสียดทานแนบติด (Adhesive friction) ร่วมด้วย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohan *et al.*, 2014

**อัตราการสึกหรอ (Wear rate)**

อัตราการสึกหรอของชิ้นงานที่เติมเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยแสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งประกอบด้วยอัตราการสึกหรอที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิสูง (100 และ 150 องศาเซลเซียส) จากการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ค่าอัตราการสึกหรอของชิ้นงานเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย และเมื่อทำการเติมผงเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อย ส่งผลทำให้ค่าอัตราการสึกหรอไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อทำการทดสอบชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง พบว่า ค่าอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดสอบ เพราะเนื้อเมทริกซ์เกิดการอ่อนตัวซึ่งเป็นดังคำอธิบายก่อนหน้า และโดยรวมค่าอัตราการสึกหรอของชิ้นงานที่ทำการเติมผงเถ้าทั้งสองชนิดมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่เติมผงอะลูมินา (ชิ้นงาน 0 %Ash) ทั้งนี้เนื่องจากผงอะลูมินาที่ใช้มีอนุภาคขนาดเล็กระดับไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4c) จึงสามารถกระจายตัวในเนื้อเมทริกซ์ได้ค่อนข้างยาก (Mustafa Boz, 2007) เมื่อทำการทดสอบที่มีการเสียดสีกับวัสดุคู่สัมผัสสามารถหลุดออกมาได้ง่าย

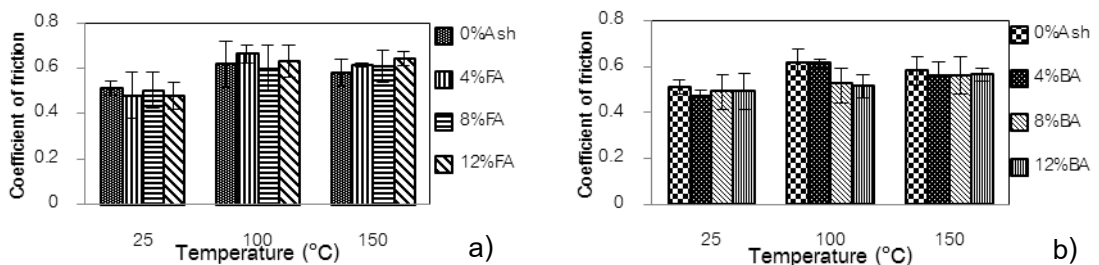


Figure 6 Coefficient of friction of phenolic based composites with ash content at various temperature

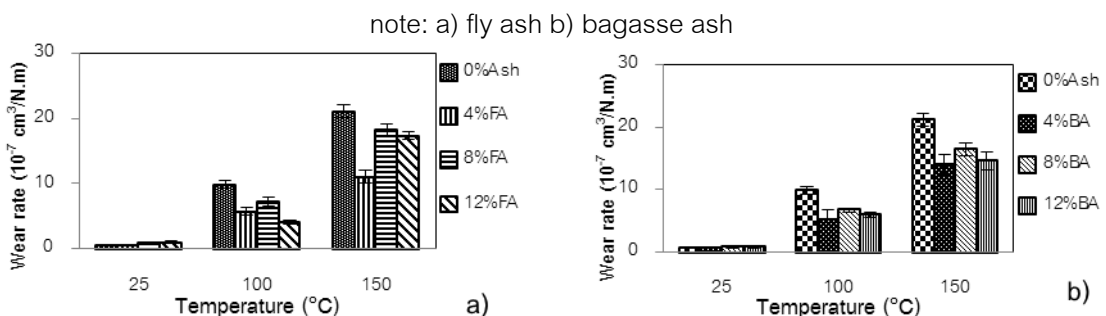


Figure 7 Wear rate of phenolic based composites with ash content at various temperature

note: a) fly ash b) bagasse ash

## ผลการทดลองตามสภาวะการใช้งานจริงตามมาตรฐาน มอก. 97-2536

จากการพิจารณาค่าความแข็ง ความต้านทานแรงกดอัด และลักษณะการยึดเกาะของเนื้อเมทริกซ์และสารตัวเติมภายในชิ้นงานที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ คาดว่า สูตรที่มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ผ้าเบรกได้คือ สูตรที่เติมเถ้าขาน้อย 4 wt% จึงนำไปทดสอบตามสภาวะการใช้งานจริงของผ้าเบรกตามมาตรฐาน มอก. 97-2536 โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 100, 150 และ 200 องศาเซลเซียส และเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมผงเถ้า พบว่า ชิ้นงานที่ไม่เติมผงเถ้าและชิ้นงานที่เติมเถ้าขาน้อย 4 wt% นั้นให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกหรอผ่านเกณฑ์ตามที่มาตรฐาน มอก. 97-2536 กำหนดไว้ แสดงดังตารางที่ 2

Table 2 Comparison between without and with natural ash by TIS 97-2536 standard test method

Temperature (°C)	Coefficient of friction			Wear rate ( $10^{-7}$ cm <sup>3</sup> /N.m)		
	TIS 97-2536	0%Ash	4%BA	TIS 97-2536	0%Ash	4%BA
100	0.300-0.600	0.508	0.494	0.510	0.699	0.531
150	0.250-0.600	0.535	0.538	0.770	0.373	0.323
200	0.200-0.600	0.544	0.552	1.02	0.418	0.307

## สรุป

การเติมผงเถ้าจากธรรมชาติ ซึ่งประกอบด้วยเถ้าลอยและเถ้าขาน้อยในชิ้นงานนั้น ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลด้านความแข็งมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณผงเถ้าที่เพิ่มขึ้น และสมบัติด้านความทนแรงกดอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในส่วนของผลที่เกิดจากการเติมผงเถ้าจากธรรมชาติที่มีต่อสมบัติความเสียดทานและการสึกหรอนั้น พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นงานมีแนวโน้มคงที่เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) และมีแนวโน้มของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิสูง (100 และ 150 องศาเซลเซียส) ในส่วนของความต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้องมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่อุณหภูมิสูงชิ้นงานที่เติมเถ้าลอยและเถ้าขาน้อยมีความต้านทานการสึกหรอดีกว่าชิ้นงานที่ไม่เติมผงเถ้า และเมื่อทดสอบชิ้นงานตามสภาวะการใช้งานจริงของผ้าเบรก พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกหรอของชิ้นงานผ่านเกณฑ์ตามที่มาตรฐาน มอก. 97-2536 กำหนดไว้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมเถ้าขาน้อย 4 wt% นั้นเป็นส่วนที่สามารถนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ผ้าเบรกที่มีประสิทธิภาพและมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้

## กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยฯ ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการทุนเมธีวิจัยอาวุโส (รหัสโครงการ RTA 5580009) และโครงการทุนสนับสนุนมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (NRU) รวมถึงบริษัท ไนโซ จำกัด บริษัท วิคตอรีสตาร์ จำกัด และบริษัท ภัทรกานต์ เทรดิง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุสำหรับงานวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

ดารณี เจริญสุข, 2555, "การประยุกต์ใช้ฟีนอลิกเรซินในอุตสาหกรรมยาง", วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 6, ฉบับที่ 1, หน้า 27.

- D. Chan and G.W. Stachowiak, 2004, "Review of automotive brake friction materials", **Proceedings of the institution of mechanical engineers**, Vol. 218, pp. 953-967.
- D.N.U. Lan, A.A. Bakar, B. Azahari, Z.M. Ariff and Y. Chujo, 2012, "Effect of interlocking between porous epoxy microparticles and elastomer on mechanical properties and deformation modes", **Polymer Testing**, Vol. 31, pp. 931–937.
- J. Remling, 1928, "Basic Principles of Braking", **Brakes**, pp. 1-7.
- M. Boz and A. Kurt, 2007, "The effect of  $Al_2O_3$  on the friction performance of automotive brake friction materials", **Tribology International**, Vol. 40, pp. 1161-1169.
- N. Mohan, C.R. Mahesha and R. Raja, 2014, "Tribo-mechanical behaviour of SiC filled glass-epoxy composites at elevated temperatures", **International Journal of Engineering, Science and Technology**, Vol. 6, No. 5, pp. 44-56.
- R. Yun, P. Filip and Y. Lu, 2010, "Performance and evaluation of eco-friendly brake friction materials", **Tribology International**, Vol. 43, pp. 2010–2019.
- S. Kanking, P. Niltui, E. Wimolmala and N. Sombatsompop, 2012, "Use of bagasse fiber ash as secondary filler in silica or carbon black filled natural rubber compound", **Materials and Design**, Vol. 41, pp. 74–82.
- S. Thongsang, W. Vorakhan, E. Wimolmala and N. Sombatsompop, 2012, "Dynamic mechanical analysis and tribological properties of NR vulcanizates with fly ash/precipitated silica hybrid filler". **Tribology International**, Vol. 53, pp. 134–141.
- V.S. Aigbodion, S.B. Hassan, E.T. Dauda and R.A. Mohammed, 2010, "The development of mathematical model for the prediction of ageing behaviour for Al-Cu-Mg/bagasse ash particulate composites", **Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering**, Vol. 9, No.10, pp. 907-917.
- W.Österle, C.Deutsch, T.Gradt, G.Orts-Gi, T.Schneider and A.I. Dmitriev, 2014, "Tribological screening tests for the selection of raw materials for automotive brake pad formulations", **Tribology International**, Vol. 73, pp. 148-155.