



การผลิตวัสดุประกอบโพลียูรีเทนและถ่านคาร์บอนจากลิกนินเพื่อใช้ เป็นฉนวนความร้อน

Charcoal-Polyurethane Composite Material for Insulation

ลดารัตน์ เลี่ยมปรีชา (Ladarat Liampreecha)* วิมลพร เอี่ยมอมรพันธ์ (Wimornporm Iamamornphan)**

พรนภา เกษมศิริ (Pomnapa Kasemsiri)*** ขนิษฐา คำวิทย์ศักดิ์ (Khanita Kamwilaisak)¹***

(Received: December 18, 2017; Revised: January 26, 2018; Accepted: January 31, 2018)

บทคัดย่อ

การเตรียมวัสดุประกอบโพลียูรีเทนผสมถ่านคาร์บอนและพาราฟินเพื่อใช้เป็นฉนวนความร้อน ทำโดยการเตรียมถ่านคาร์บอนจากลิกนินที่แยกจากน้ำยางดำซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานกระดาษ เมื่อวิเคราะห์ลิกนินด้วยเครื่อง CHNS/O analyzer พบว่ามีองค์ประกอบธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจนเท่ากับ 60.93% 5.60% และ 0.20% ตามลำดับ ลิกนินจะถูกเผาเป็นถ่านคาร์บอนในสภาวะอับอากาศที่อุณหภูมิ 385 °C เป็นเวลา 1 hr ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C/min จากนั้นนำไปเสริมแรงให้กับวัสดุประกอบโพลียูรีเทนผสมพาราฟิน โดยการเติมถ่านคาร์บอนที่ 0-20% โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่าการทนต่อแรงอัดในช่วง 0.186-0.645 MPa ค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มลดลงระหว่าง 0.149-0.466 W/m.K ตามปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น การเติมถ่านคาร์บอน 20% โดยน้ำหนักมีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุดที่ 0.149 W/m.K เมื่อนำไปทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วยการทำ Thermal Cycling ที่อุณหภูมิ 5-80 °C พบว่าไม่มีการเสื่อมสภาพและไม่เปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่การทดสอบ 500 รอบ ขึ้นชั้นจากผล FTIR และการวิเคราะห์เสถียรภาพต่ออุณหภูมิก่อนและหลังด้วยเครื่อง DSC ซึ่งพบว่ามีค่าความจุความร้อนเป็น 37.50 และ 38.63 J/g ตามลำดับ

ABSTRACT

This research was to optimized preparation conditions of charcoal-polyurethane composite material for using as an insulator. Charcoal was prepared from lignin which is a major component of black liquor. The composition of lignin was analyzed by CHNS/O analyzer, and found that it was composed of Carbon Nitrogen and Oxygen by 60.93, 5.60, and 0.20% respectively. The charcoal was prepared by carbonized lignin at 385 °C for 1 hr at heating rate 10 °C/min and was applied as the reinforced in polyurethane composite. The compressive stress of the charcoal-polyurethane composite material was found between 0.186-0.645 MPa, and thermal conductivity decreased from 0.466 to 0.149 W/m.K with respect to the increment of the percentage of charcoal from 0 to 20 wt%. The lowest thermal conductivity is 0.149 W/m.K at 20 wt% charcoal. Thermal stability of the material was tested by thermal cycling method at 5-80 °C, 500 cycles. The result shows that there is no deterioration and alteration of charcoal-polyurethane composite material. The thermal stability was confirmed by FT-IR and DSC result at pre- and post-thermal cycling testing, the heat capacity were 37.50 and 36.63J/g, respectively which the difference is not significant.

คำสำคัญ: น้ำยางดำ ลิกนิน โพลียูรีเทน วัสดุประกอบ

Keywords: Black liquor, Lignin, Polyurethane, Composite material

¹Correspondent author: khanita@kku.ac.th

* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

การประหยัดพลังงานเป็นแนวทางสำคัญที่มนุษย์ต้องคำนึงถึงเพื่อรักษาสิ่งแวดล้อมที่ดีให้คงอยู่ได้ ฉนวนความร้อนเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่เป็นทั้งในภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือน โดยฉนวนความร้อนจะทำหน้าที่กั้นการส่งผ่านความร้อนจากด้านหนึ่งไปอีกด้าน สามารถพิจารณาการเป็นฉนวนที่ดีได้จากค่าการนำความร้อนที่ยิ่งต่ำจะยิ่งมีความเป็นฉนวนที่ดี โพลียูรีเทน โฟมเป็นพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติสำคัญคือมีค่าการนำความร้อนต่ำมาก (0.0408 W/m.K) [1] มีน้ำหนักเบา ทนต่อการกัดกร่อนของกรด-เบสได้ดี [2] จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้ทำฉนวนความร้อนและงานอื่นๆ นอกจากนี้การนำเอาของเสียมมาใช้ก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะรักษาสิ่งแวดล้อมได้ ลิกนินเป็นของเสียที่เกิดจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษโดยมีปริมาณกว่า 900 – 1350 ตันต่อปี [3-4] และมีมูลค่าต่ำ ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาเพิ่มมูลค่าโดยการผลิตเป็นถ่านคาร์บอน นอกจากนี้การใช้วัสดุกักเก็บพลังงานก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะช่วยประหยัดพลังงานได้ โดยวัสดุกักเก็บพลังงานหรือ Phase Change Material (PCM) มีความสามารถที่จะเปลี่ยนสถานะที่อุณหภูมิในช่วงหนึ่งแล้วเกิดการกักเก็บหรือปลดปล่อยพลังงานในปริมาณมากในขณะที่เปลี่ยนสถานะ พาราฟิน (Paraffin) เป็นวัสดุ PCM ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีค่าความจุความร้อนแฝงที่สูงทำให้กักเก็บพลังงานได้ดี มีความยืดต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีและราคาไม่แพง การใช้งาน PCM จะต้องถูกห่อหุ้มด้วยวัสดุชนิดอื่นเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะจะทำให้วัสดุไม่สามารถคงรูปอยู่ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้มีความสนใจที่จะใช้โพลียูรีเทนเป็นตัวกักเก็บพาราฟินและใช้ถ่านคาร์บอนที่ผลิตจากลิกนินเสริมความแข็งแรงให้กับโพลียูรีเทน โดยใช้ลิกนินที่แยกจากน้ำยางดำที่เป็นของเสียจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ แล้วทำการศึกษาคุณสมบัติของโพลียูรีเทนผสมพาราฟินและถ่านคาร์บอนที่เตรียมได้เพื่อเป็นแนวทางในการเป็นฉนวนความร้อน

วิธีการวิจัย

1. การเตรียมโพลียูรีเทนผสมพาราฟินและถ่านคาร์บอน

โพลียูรีเทนจะถูกเตรียมจากสาร Polyol 2125/001 และสาร MDI 20 (บริษัท บีเอเอสเอฟ จำกัด ประเทศไทย) ถ่านคาร์บอนจะเตรียมโดยเผาลิกนินที่อุณหภูมิ 385 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (เตาเผารุ่น VULCAN 3-550 บริษัท Ney ประเทศสหรัฐอเมริกา) โดยชั่งน้ำหนักส่วนผสมคือ สาร Polyol 2125/001 ปริมาณ 6 g สาร MDI 20 ปริมาณ 12 g พาราฟิน 9 g และถ่านคาร์บอนที่ร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 ของน้ำหนักรวมของสาร Polyol 2125/001 สาร MDI 20 และพาราฟิน เริ่มต้นการเตรียมชิ้นงานโดยผสมสาร MDI 20 กับผงถ่านคาร์บอนให้เข้ากันในภาชนะโดยใช้เครื่องกวนในการช่วยผสมใช้ จากนั้นให้ความร้อนกับพาราฟินที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10 นาที แล้วเติมพาราฟินร้อนลงในสารที่ผสมกันไว้กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 30 วินาที แล้วจึงเติมสาร Polyol 2125/001 ลงไปกวน 10 วินาที จากนั้นปล่อยให้สารเกิดปฏิกิริยาเกิดเป็นโพลียูรีเทนแล้วตั้งชิ้นงานทิ้งไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

2. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

2.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะ

- วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างด้วย Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) รุ่น Tensor 27 บริษัท Bruker ประเทศเยอรมนี ในช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ 4000 ถึง 650 cm^{-1}

- ทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนด้วย Thermogravimetric Analysis (TGA) รุ่น TGA 50 บริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น ที่อุณหภูมิ 30-700 °C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C/min ภายใต้สภาวะไนโตรเจน



- วิเคราะห์ค่าการนำความร้อนด้วย Thermal conductivity รุ่น ISOMET 2114 บริษัท Applied Precision ประเทศสโลวาเกีย

- วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วย Differential Scanning Calorimetry (DSC) รุ่น DSC 214 Polyma บริษัท Netzsch ประเทศเยอรมนี ที่อุณหภูมิ 30-80 °C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C/min ภายใต้สภาวะไนโตรเจน

- วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างโฟม Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น S-3000N บริษัท HITACHI ประเทศญี่ปุ่น

- วิเคราะห์ความแข็งแรงตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) มาตรฐานที่ ASTM D1621 [5] ด้วย Universal Testing Machine (UTM) รุ่น 5567A บริษัท Instron ประเทศอังกฤษ

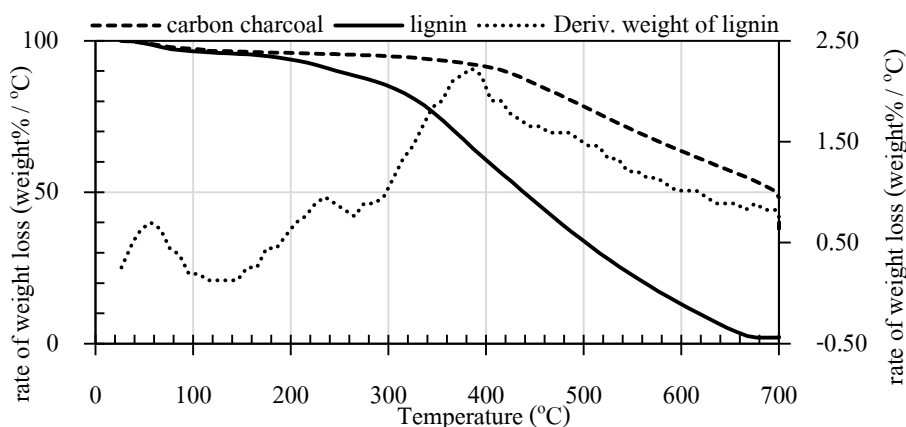
2.2 ทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนโดยการใช้งานซ้ำ (Thermal Cycling)

ตัวอย่างจะถูกทดสอบด้วยการนำไปจุ่มในน้ำร้อน (80 °C) สลับน้ำเย็น (5 °C) จำนวน 500 รอบ ด้วยเครื่อง Thermal cycler รุ่น Biometra T1 บริษัท Whatman Biometra ประเทศอังกฤษ จากนั้นนำไปทดสอบ DSC และ FTIR เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างหลังการใช้งานซ้ำ 500 รอบ

ผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์ถ่านคาร์บอน

ถ่านคาร์บอนถูกเตรียมจากลิกนินที่แยกได้จากน้ำยางดำที่มีองค์ประกอบธาตุคาร์บอน (Carbon) ไฮโดรเจน (Hydrogen) และไนโตรเจน (Nitrogen) เป็น 60.93 %C 5.60 %H และ 0.20 %N ซึ่งลิกนินที่แยกได้มีองค์ประกอบธาตุมีใกล้เคียงกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [6-7] โดยทั่วไปวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมถ่านคาร์บอนควรมีสัดส่วนของถ่านคาร์บอนอยู่มากกว่า 50%C ดังนั้นลิกนินจึงมีความเหมาะสมสำหรับการเตรียมเป็นถ่าน ซึ่งเมื่อนำลิกนินไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนด้วยเครื่อง TGA และทำการหาอัตราการสูญเสียน้ำหนักต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของลิกนินดังแสดงในภาพที่ 1 พบว่าเมื่อลิกนินเกิดการสูญเสียน้ำหนักแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วง 30-150 °C เป็นช่วงการระเหยของน้ำ ช่วง 150-300 °C เป็นช่วงการสลายตัวของสารระเหยง่าย (Volatiles) ช่วง 300-700 °C เป็นช่วงการสูญเสียโครงสร้างหลักและมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดอุณหภูมิ 385 °C ซึ่งอุณหภูมินี้จะใช้เป็นอุณหภูมิในการเผาไหม้เพื่อเตรียมถ่านคาร์บอน และเมื่อนำถ่านคาร์บอนไปวิเคราะห์ TGA พบว่าถ่านคาร์บอนมีเสถียรภาพทางความร้อนมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับลิกนินดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งเป็นผลมาจากการเผาไหม้ได้กำจัดสารระเหยง่ายอื่นๆ ออกจากโครงสร้างทำให้ถ่านมีสัดส่วนของคาร์บอนมากขึ้น

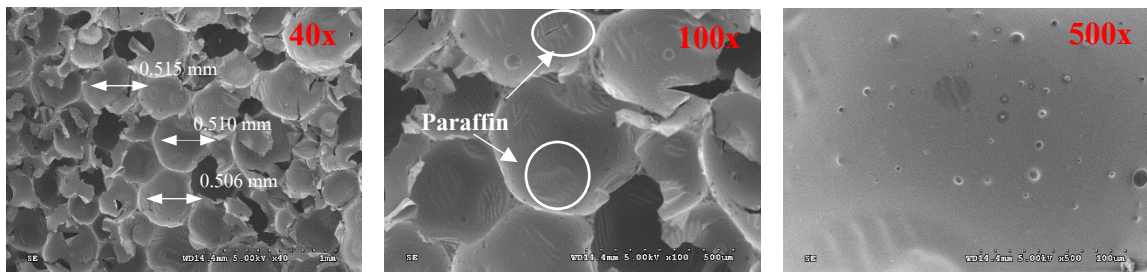


ภาพที่ 1 ผลการทดสอบ TGA ของถ่านคาร์บอนและลิกนิน

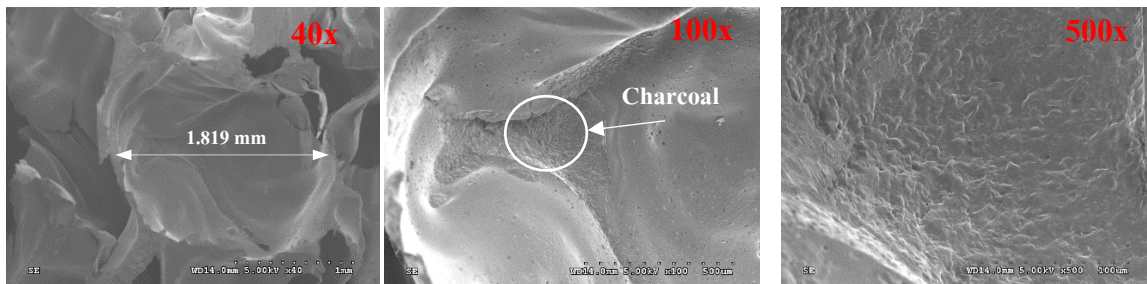
2. ผลการวิเคราะห์โฟมโพลียูรีเทนผสมถ่านคาร์บอนและพาราฟิน

2.1 ลักษณะทางกายภาพ

จากการทดสอบ SEM ของโฟมโพลียูรีเทนผสมพาราฟินและโฟมโพลียูรีเทนผสมถ่านคาร์บอนและพาราฟิน (20% Carbon charcoal) ดังแสดงในภาพที่ 2 พบว่าโฟมโพลียูรีเทนผสมพาราฟินที่ไม่มีการเติมถ่านคาร์บอนมีโครงสร้างที่เป็นโพรงหรือรูพรุนคล้ายลูกบอลในโครงสร้าง โดยเมื่อพิจารณาที่กำลังขยาย 40x พบว่ามีขนาดรูพรุนอยู่ที่ 0.51 mm ซึ่งมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนที่เกิดในโฟมโพลียูรีเทนผสมถ่านคาร์บอนและพาราฟิน (20% Carbon charcoal) ที่มีขนาดรูพรุนอยู่ที่ 1.819 mm โดยจากภาพเมื่อเปรียบที่กำลังขยาย 100x และ 500x จะพบว่าโฟมโพลียูรีเทนผสมพาราฟินจะมีลักษณะแผ่นฟิล์มบางๆ เคลือบที่ผิวของวัสดุซึ่งแผ่นฟิล์มที่เห็นคือส่วนของพาราฟินที่เราเติมลงในวัสดุประกอบ ในขณะที่โฟมโพลียูรีเทนผสมถ่านคาร์บอนและพาราฟิน (20% Carbon charcoal) จะมองเห็นรอยขรุขระ บนผิวของวัสดุซึ่งเป็นส่วนของถ่านคาร์บอนที่ทำการเติมลงไป



(ก)



(ข)

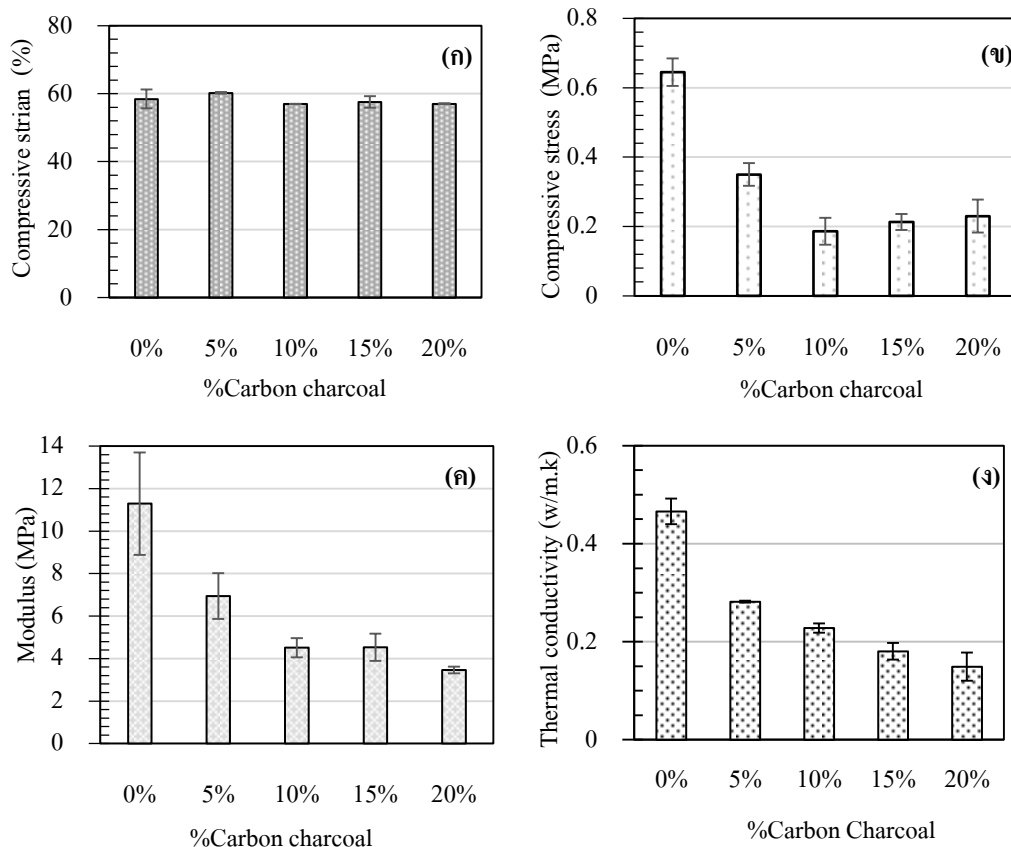
ภาพที่ 2 ผลการทดสอบ SEM (ก) โฟมโพลียูรีเทนผสมพาราฟิน และ (ข) โฟมโพลียูรีเทนผสมถ่านคาร์บอนและพาราฟิน (20% Carbon charcoal)

2.2 ความแข็งแรงและการนำความร้อน

จากการทดสอบความแข็งแรงของโฟมตามมาตรฐาน ASTM D1621 [5] ซึ่งเป็นมาตรฐานในการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของโฟมชนิดแข็ง โดยใช้เครื่อง UTM เมื่อทำการทดสอบวัสดุประกอบโฟมโพลียูรีเทนผสมถ่านคาร์บอนและพาราฟินที่สัดส่วนการเติมถ่านที่ 0 5 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความเครียดอัด (Compressive strain) ซึ่งเป็นค่าที่เกิดจากการหดตัวของวัสดุเมื่อได้รับแรงอัด (ภาพที่ 3 (ก)) ที่สัดส่วนการเติมถ่านต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 55-60 % ส่วนค่าความเค้นอัด (Compressive stress) เป็นค่าที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุได้รับแรงอัด (ภาพที่ 3 (ข)) พบว่าที่ 0% มีค่าสูงสุดอยู่ 0.6451 MPa ซึ่งเป็นผลจากการเกิดรูพรุนในโครงสร้างของโฟมเมื่อมีการเติมถ่านคาร์บอน และที่ 5% มีค่าลดลงเป็น 0.35 MPa และที่ 10% 15% และ 20% นั้นพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ 0.186



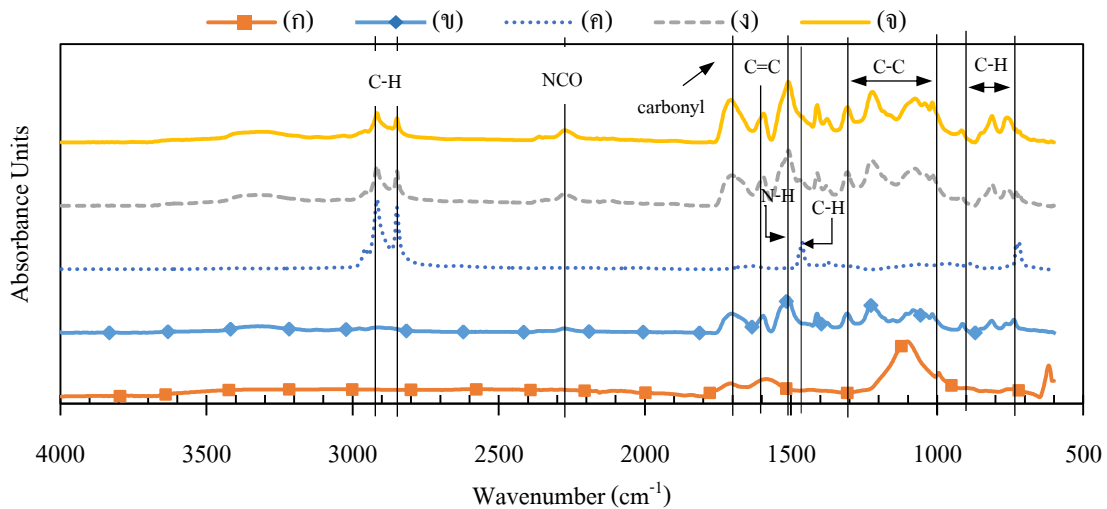
0.213 และ 0.230 MPa ตามลำดับ ผลการทดสอบและค่ามอดูลัส (Modulus) คือค่าความเครียดต่อความเค้นเป็นค่าที่บอกคุณสมบัติวัสดุว่ามีความแข็งแรงหรือยืดหยุ่น (ภาพที่ 3 (ก)) พบว่ามีแนวโน้มคล้ายกับค่าความเค้นอัดคือมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนการเติมถ่านอยู่ที่ 0-5% และมีค่าใกล้เคียงกันที่การเติมถ่าน 10-20 % โดยน้ำหนัก โดยวัสดุที่มีการเติมถ่านคาร์บอน 0 5 10 15 และ 20 จะมีค่าเท่ากับ 11.29 6.94 4.51 4.53 และ 3.46 MPa ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาการนำความร้อน (Thermal Conductivity) โดยทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง ISOMET 2114 (ภาพที่ 3 (ง)) พบว่าเมื่อถ่านคาร์บอนมีปริมาณมากขึ้นจะทำให้ค่าการนำความร้อนลดลงเป็นผลมาจากการเติมถ่านคาร์บอนส่งผลต่อขนาดรูพรุนภายในโครงสร้างของโฟม ซึ่งที่สัดส่วน 0% ถ่านคาร์บอน มีค่าการนำความร้อนสูงสุดที่ 0.466 W/m.K และที่ 5% 10% 15% มีค่าเท่ากับ 0.281 0.227 0.180 W/m.K ตามลำดับ และที่สัดส่วนการผสมถ่านคาร์บอน 20% มีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุดที่ 0.149 W/m.K ดังนั้นวัสดุที่มีความเหมาะสมที่สุดที่จะนำไปใช้เป็นฉนวนความร้อนคือที่การเติมถ่านคาร์บอน 20% โดยน้ำหนัก และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับแผ่นฉนวนความร้อนโพลียูรีเทนโฟมที่มีใช้กันอยู่ในเชิงพาณิชย์มีค่าการนำความร้อน 0.0408 W/m.K [1] จะพบว่าฉนวนที่เตรียมได้มีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าจึงเป็นฉนวนที่ไม่ดีเท่า แต่เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นยิปซัมซึ่งมีค่าการนำความร้อน 0.2820 W/m.K [1] จะพบว่าฉนวนที่เตรียมได้มีค่าต่ำกว่าแสดงว่าวัสดุที่เตรียมได้มีความสามารถที่จะใช้เป็นฉนวนความร้อนได้ แต่ยังต้องการการพัฒนากระบวนการผลิตในด้านตัวแปรอื่นๆ เช่น สูตรในการผสม เวลาที่ใช้ต่อไป



ภาพที่ 3 ค่า (ก) Compressive strain (ข) Compressive stress (ค) Modulus และ (ง) Thermal Conduction ของวัสดุประกอบโฟมโพลียูรีเทนผสมถ่านคาร์บอนและพาราฟิน ที่สัดส่วน 0% 5% 10% 15% และ 20% Carbon charcoal

2.3 โครงสร้างทางเคมีและเสถียรภาพทางความร้อน

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR ดังภาพที่ 4 แสดงค่าสเปกตรัม FT-IR ระหว่างค่าดูดกลืนแสง (absorbance) กับเลขคลื่น (wavenumber) โดยพบหมู่ฟังก์ชันสำคัญของถ่านคาร์บอน โฟมโพลียูรีเทน พาราฟิน โฟมโพลียูรีเทนผสมพาราฟิน รวมถึงวัสดุประกอบ โฟมโพลียูรีเทนผสมถ่านคาร์บอนและพาราฟิน (20% Carbon charcoal) พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญที่เลขคลื่น 723 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบงอของหมู่ C-H ที่ $1300\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ ของหมู่ C-H bending และการบิดงอของโครงสร้าง C-C ที่อยู่ในถ่านและที่ $900\text{--}750\text{ cm}^{-1}$ ของหมู่ C-H ที่ 1466 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบงอแบบ symmetric ของหมู่ C-H ที่ 1600 cm^{-1} เป็นหมู่ของ C=C ซึ่งเกิดจากการสั่นของโครงสร้างถ่าน นอกจากนี้ที่เลขคลื่น 1700 cm^{-1} เป็นการสั่นของกลุ่ม carbonyl หรือ carboxyl species ที่ 2274 cm^{-1} เป็นหมู่ของ isocyanate (NCO) ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับพอลิโอด ที่ 1702 cm^{-1} เป็นหมู่ C=O อิสระที่ไม่ทำปฏิกิริยากับ N-H ซึ่งที่เลขคลื่น 1527 cm^{-1} จะแสดงหมู่ NH stretching และที่เลขคลื่น 2848 cm^{-1} และ 2916 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดของหมู่ C-H [8-10, 13] ซึ่งเมื่อพิจารณาแถบคลื่นของวัสดุประกอบ โฟมโพลียูรีเทนผสมถ่านคาร์บอนและพาราฟิน (20% Carbon charcoal) พบว่ามีแถบคลื่นที่ตรงกันกับถ่านคาร์บอน พาราฟินและโฟมโพลียูรีเทน แสดงให้เห็นว่ามีถ่านคาร์บอนและพาราฟินอยู่ในวัสดุประกอบที่เตรียมขึ้น และไม่พบแถบคลื่นของสารประกอบชนิดอื่นเกิดขึ้น จึงกล่าวได้ว่าการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพาราฟิน โฟมโพลียูรีเทนและถ่านคาร์บอนไม่ทำปฏิกิริยาระหว่างสารทั้ง 3 ชนิด

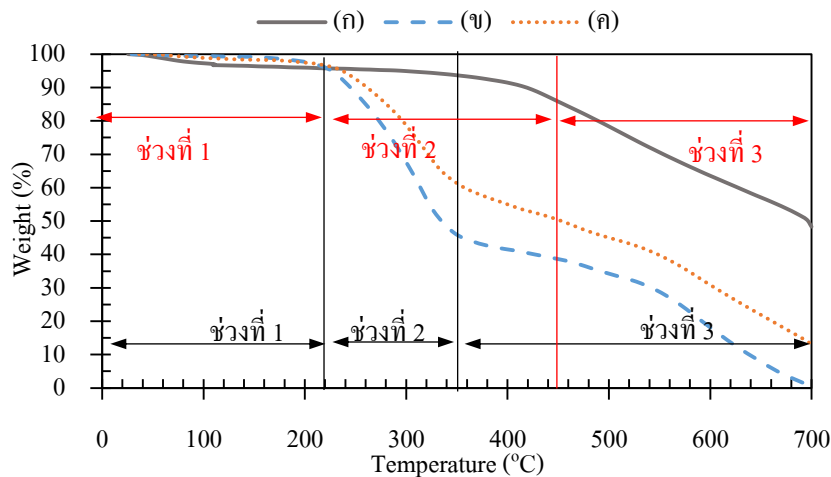


ภาพที่ 4 กราฟ FT-IR ของ (ก) ถ่านคาร์บอน (ข) โฟมโพลียูรีเทน (ค) พาราฟิน (ง) โฟมโพลียูรีเทนผสมพาราฟิน และ (จ) วัสดุประกอบ โฟมโพลียูรีเทนผสมถ่านคาร์บอนและพาราฟิน (20% Carbon charcoal)

และเมื่อทำการวิเคราะห์ความเสถียรภาพต่อความร้อนของถ่านคาร์บอน โฟมโพลียูรีเทนผสมพาราฟิน และวัสดุประกอบ โฟมโพลียูรีเทนผสมถ่านคาร์บอนและพาราฟิน (20% Carbon charcoal) ดังแสดงในภาพที่ 5 พบว่าการสลายตัวทางความร้อนของถ่านคาร์บอน (เส้น (ก)) แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 อุณหภูมิต่ำ $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นช่วงการสลายตัวของน้ำซึ่งมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักค่อนข้างต่ำที่ประมาณ 5% ช่วงที่ 2 อุณหภูมิ $220\text{--}430\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นช่วงสลายของสารระเหยง่ายโดยถ่านมีการสูญเสียน้ำหนักอยู่ที่ 10% ช่วงที่ 3 อุณหภูมิ $440\text{ }^{\circ}\text{C}$ ขึ้นไปเป็นช่วงการสลายตัวของโครงสร้างหลักของถ่านคาร์บอน ซึ่งเกิดการสูญเสียน้ำหนักที่ 40% และมีปริมาณคาร์บอนคงเหลือ 50% ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อนำถ่านคาร์บอนไปเสริมแรงให้กับ โฟมโพลียูรีเทนผสมพาราฟินพบว่าวัสดุประกอบที่เตรียมได้มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5 (เส้น (ค)) เมื่อเปรียบเทียบกับ โฟมโพลียูรีเทนผสมพาราฟิน (เส้น (ง)) โดยวัสดุประกอบ (เส้น (ค))



สามารถแบ่งช่วงออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 อุณหภูมิต่ำ 220 °C เป็นช่วงการสลายตัวของน้ำและสารระเหยง่ายต่างๆ ช่วงที่ 2 อุณหภูมิ 220-350 °C เป็นช่วงการสลายตัวของโครงสร้างพาราฟิน [12] และโพลียูรีเทนครั้งที่ 1 ซึ่งจะเป็นการสลายหมู่ยูรีเทน (urethane group) ที่อยู่ในส่วนแข็ง (hard segment) ของโพลียูรีเทน ในช่วงนี้พบว่าการสลายตัวของโพลียูรีเทนเกิดขึ้นสูงที่สุด โดยมีการสูญเสียน้ำหนักอยู่ที่ 55% และวัสดุประกอบจะมีการสูญเสียน้ำหนักน้อยลงมีค่าเท่ากับ 40% ซึ่งเป็นผลมาจากถ่านคาร์บอนที่เติมลงไป โพลียูรีเทนช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับวัสดุประกอบ ช่วงที่ 3 อุณหภูมิ 350-700 °C เป็นการสลายตัวของโครงสร้างโพลียูรีเทนครั้งที่ 2 ซึ่งจะสลายพันธะที่อยู่ในส่วนนิ่ม (soft segment) ของโพลียูรีเทน โดยจะมีการสลายตัวสูงสุดอยู่ในช่วง 400-500 °C [10, 13] มีค่าอยู่ที่ 40% และเกิดการสลายตัวจนหมดที่อุณหภูมิ 700 °C ส่วนวัสดุประกอบมีการสูญเสียน้ำหนักอยู่ที่ 40% โดยมีน้ำหนักที่เหลือที่อุณหภูมิ 700 °C เท่ากับ 14% เมื่อเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุประกอบโพลียูรีเทนผสมถ่านคาร์บอนและพาราฟินกับวัสดุที่ไม่ได้ผสมถ่านคาร์บอน จะพบว่าวัสดุที่ไม่ได้ผสมถ่านคาร์บอนจะเกิดสูญเสียโครงสร้างหลักของวัสดุที่อุณหภูมิ (350 °C) ต่ำกว่าอุณหภูมิการสูญเสียโครงสร้างหลักของวัสดุประกอบโพลียูรีเทนผสมถ่านคาร์บอนและพาราฟิน (450 °C) ซึ่งกล่าวได้ว่าวัสดุประกอบโพลียูรีเทนผสมถ่านคาร์บอนและพาราฟิน สามารถทนความร้อนได้มากกว่าวัสดุที่ไม่ได้ผสมถ่านคาร์บอน



ภาพที่ 5 กราฟ TGA ของ (ก) ถ่านคาร์บอน (ข) โพลียูรีเทนผสมพาราฟิน และ (ค) วัสดุประกอบโพลียูรีเทนผสมถ่านคาร์บอนและพาราฟิน (20% Carbon charcoal)

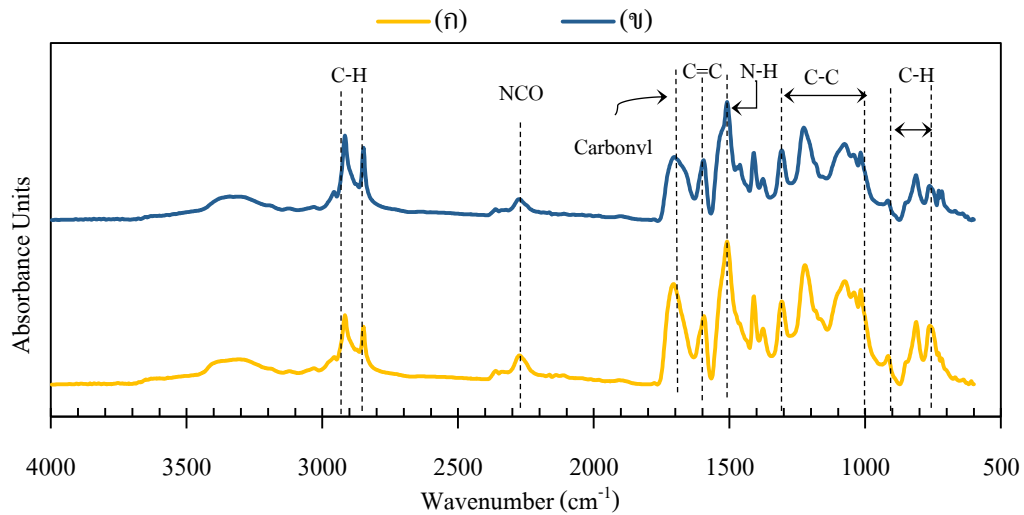
2.4 การทดสอบการใช้งานซ้ำของวัสดุประกอบ

ทำการทดสอบโดยนำชิ้นงาน ไปจุ่มในน้ำร้อนอุณหภูมิ 80 °C สลับน้ำเย็นอุณหภูมิ 5 °C โดยใช้เครื่อง Thermal Cycling แล้วนำชิ้นงานที่ผ่านการจุ่มที่ 500 รอบ ไปทำการวิเคราะห์ DSC เพื่อหาอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสและค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะ (latent heat) เพื่อทำการวิเคราะห์การรั่วไหลของพาราฟินที่ผสมอยู่ในวัสดุประกอบ หากมีการรั่วไหลเกิดขึ้นความร้อนแฝงจะมีค่าลดลง ซึ่งผลจากการทดสอบวัสดุประกอบโพลียูรีเทนดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าวัสดุประกอบก่อนการทำ Thermal Cycling มีค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลวอยู่ที่ 37.50 (J/g) และหลังการทดสอบอยู่ที่ 38.63 (J/g) ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Lorwanishpaisam et al. [12] ที่พบว่าพาราฟินมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ 60 °C และอุณหภูมิเยือกแข็งที่ 54 °C นอกจากนี้เมื่อทดสอบวัสดุประกอบหลังการทำ Thermal Cycling ด้วยเครื่อง FT-IR พบว่าแถบ FT-IR ของวัสดุ

ประกอบทั้งก่อนและหลังการทดสอบมีลักษณะเหมือนกัน ไม่เกิดแถบคลื่นใหม่ในโครงสร้างหลังการใช้งาน 500 รอบ ที่การใช้งานที่อุณหภูมิ 5-80 °C ดังแสดงในภาพที่ 6 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าวัสดุประกอบโพลีโพลียูรีเทนผสมถ่านคาร์บอน และพาราฟินไม่เกิดปฏิกิริยาที่จะทำให้เกิดสารชนิดใหม่ในโครงสร้างระหว่างการใช้งาน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าวัสดุประกอบที่เตรียมได้สามารถใช้งานซ้ำที่อุณหภูมิ 5-80 °C จำนวน 500 รอบ โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางความร้อน และโครงสร้าง

ตารางที่ 1 ค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะ (latent heat) ของโพลีโพลียูรีเทนที่ 20% Carbon charcoal

Thermal Cycling (cycle)	Latent heat (J/g)		Temperature (°C)	
	melting	freezing	melting	freezing
0	37.50	-38.19	60.10	54.50
500	38.63	-38.75	59.90	54.70



ภาพที่ 6 กราฟ FT-IR ของวัสดุประกอบโพลีโพลียูรีเทนผสมถ่านคาร์บอนและพาราฟิน (20% Carbon charcoal) (ก) ก่อนทำ และ (ข) หลังทำ thermal cycling จำนวน 500 รอบ

สรุป

จากการเตรียมวัสดุประกอบโพลีโพลียูรีเทนและถ่านคาร์บอนเพื่อใช้เป็นฉนวนความร้อน โดยถ่านคาร์บอนเตรียมจากการเผาถ่านหินที่แยกจากน้ำยางคำซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานกระดาษ ที่สภาวะอับอากาศที่อุณหภูมิ 385 °C เป็นเวลา 1 hr เมื่อนำไปเสริมแรงให้กับวัสดุประกอบโพลีโพลียูรีเทนผสมพาราฟินโดยการเติมถ่านคาร์บอนที่ 0-20% โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่าการทนต่อแรงอัดในช่วง 0.186-0.645 MPa ค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มลดลงระหว่าง 0.149-0.466 W/m.K ตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอน การเติมถ่านคาร์บอนที่ 20% โดยน้ำหนัก มีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุดที่ 0.149 W/m.K จึงมีความเหมาะสมที่สุดในการใช้เป็นฉนวนความร้อน เมื่อนำไปทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วยการทำ Thermal Cycling ที่อุณหภูมิ 5-80 °C พบว่าวัสดุประกอบไม่มีการเสื่อมสภาพและไม่เปลี่ยนแปลงทางความร้อน ที่การทดสอบ 500 รอบ ยืนยันได้จากผล FTIR และการวิเคราะห์ความเสถียรต่ออุณหภูมิของวัสดุก่อนและหลังทดสอบ



ด้วยเครื่อง DSC ซึ่งพบว่ามีค่าความจุความร้อนเท่ากับ 37.50 และ 38.63 J/g ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่าวัสดุประกอบที่เตรียมได้มีความเหมาะสมในการใช้เป็นฉนวนได้ อย่างไรก็ตามการศึกษาต่อไปยังมีความจำเป็นในด้านการพัฒนาปรับปรุงให้ได้ประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นก่อนที่จะขยายขนาดสู่ระดับเกรดการค้า

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนและส่งเสริมการทำวิทยานิพนธ์ ประจำปีการศึกษา 2558 จากบัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยขอนแก่น และทุนสนับสนุนจากกลุ่มวิจัยวิศวกรรมพาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Somjate P, Pattana R, Nushanad N, Skuntee S, Rungaroon P. Thermal insulation produced from vetiver fiber and natural rubber latex. *Kasetsart Engineering Journal (Thailand)* 2007; 61:87–94
2. Chalit A. Polyurethane product quality improvements by using reaction-injection-molding flow analysis [Master Thesis in Mechanical Engineering]. Bangkok: The Graduate School, Kasetsart University; 2006. Thai.
3. Prattana T. Operation strategies for maximizing electrical output of cogeneration system in a pulp mill [Master Thesis of Engineering in Energy Management Technology]. Bangkok: The Graduate School, King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2012. Thai.
4. Office of Industrial Economics. Index Industrial [Online] 2013 [Cited 29 Nov 2014]. Available from: <http://www.oie.go.th/academic/statistics>
5. ASTM International. ASTM D1621 - 00 Standard Test Method for Compressive Properties Of Rigid Cellular Plastics [Online] 2014 [Cited 25 Jul 2017]. Available from: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D1621-00.htm>
6. Zhang C, Wu H, Kessler MR. High bio-content polyurethane composites with urethane modified lignin as filler. *Polymer* 2015; 69: 52–57.
7. Sameni J, Krigstin S, Sain M. Characterization of lignins isolated from industrial residues and their beneficial uses. *BioResources* 2016; 11: 8435–8456.
8. Lazzarini A. Activated carbons for applications in catalysis: the point of view of a physical-chemist. *Rendiconti Lincei* 2017; 1: 1–14.
9. Dhevi DM, Prabu AA, Kim KJ. Hyperbranched polyester as a crosslinker in polyurethane formation: real-time monitoring using in situ FTIR. *Polymer Bulletin* 2016; 73: 2867–2888.
10. Ciecierska E, Jurczyk-Kowalska M, Bazarnik P, Kowalski M, Krauze S, Lewandowska M. The influence of carbon fillers on the thermal properties of polyurethane foam. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2016; 123: 283–291.



11. Karaipekli A, Biçer A, Sarı A, Tyagi VV. Thermal characteristics of expanded perlite/paraffin composite phase change material with enhanced thermal conductivity using carbon nanotubes. *Energy Conversion and Management* 2017; 134: 373–381.
12. Lorwanishpaisarn N, Kasemsiri P, Posi P, Chindapasirt P. Characterization of paraffin/ultrasonic-treated diatomite for use as phase change material in thermal energy storage of buildings. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2017; 128: 1293–1303.
13. Hoseinabadi M, Naderi M, Najafi M, Motahari S, Shokri M. A study of rigid polyurethane foams: The effect of synthesized polyols and nanoporous graphene. *Journal of Applied Polymer Science* 2017; 134: 1–6.