

การศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิคของการใช้ถ่านชาร์จาก กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเป็นสารดูดซับมลพิษอากาศในอาคาร

มนีรัตน์ องค์กรวรรณดี^{1*} ทับทิม ชาติสุวรรณ² และอดิศักดิ์ ปัตติยะ³
maneerat.o@msu.ac.th^{1*}, c.thabtim@gmail.com², adisak_pattiya@yahoo.com³

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

³ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Received: April 17, 2018
Revised: August 20, 2018
Accepted: November 5, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติกายภาพและเคมีของถ่านชาร์จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวล 2 ชนิด ได้แก่ ชี้อ้อยไม้และไม้กระถินยักษ์ เพื่อใช้ถ่านชาร์เป็นสารดูดซับมลพิษอากาศในอาคาร ทำการทดสอบสมบัติของถ่านชาร์ ได้แก่ ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซโทลูอินซึ่งใช้เป็นตัวแทนมลพิษอินทรีย์ระเหย ค่าไอโอดีน พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว และโครงสร้างอสังฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด และเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตเชิงพาณิชย์จากกะลามะพร้าวและยูคาลิปตัส ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมพหุคูณพบว่าถ่านชาร์ทั้งสองมีลักษณะการดูดซับดี ถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์ให้ค่าความจุจำเพาะของการดูดซับและเลขยกกำลังพหุคูณใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ ค่าไอโอดีนของถ่านชาร์ชี้อ้อยไม้และไม้กระถินยักษ์เท่ากับ 731 และ 802 มก./กรัม ตามลำดับ โดยถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์มีพื้นที่ผิวจำเพาะและเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนมากกว่าถ่านชาร์ชี้อ้อยไม้ประมาณ 2 เท่า สอดคล้องภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่แสดงให้เห็นรูพรุนของถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์มีลักษณะคล้ายคาลิปปารี่และช่องเปิดใหญ่กว่า หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวบนถ่านชาร์ทั้งสองมีพันธะหมู่เอโรมาติก จากสมบัตินี้ถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์สามารถใช้เป็นสารดูดซับมลพิษอากาศประเภทสารอะโรมาติกได้โดยตรง รวมทั้งการนำถ่านชาร์มาผ่านกระบวนการกระตุ้นผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อปรับปรุงพื้นผิวการดูดซับและเพิ่มหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวให้มีความสามารถในการดูดซับกลิ่นหรือสารมลพิษอากาศประเภทอื่น

คำสำคัญ: ถ่านชาร์ ไพโรไลซิส สารดูดซับ สารอินทรีย์ระเหย การเพิ่มมูลค่า

Technical Feasibility Study of Char from Fast-Pyrolysis as Adsorbent for Removing Indoor Air Pollutant

Maneerat Ongwandee^{1*}, Thabtim Chatsuvan² and Adisak Pattiya³
maneerat.o@msu.ac.th^{1*}, c.thabtim@gmail.com², adisak_pattiya@yahoo.com³

^{1*,2} Environmental Engineering Program, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

³ Mechanical Engineering Program, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

Received: April 17, 2018
Revised: August 20, 2018
Accepted: November 5, 2018

Abstract

This research was to characterize physical and chemical properties of char obtained from fast pyrolysis of two biomass types, i.e. sawdust and acacia wood, in order to use char as an adsorbent for removal of indoor air pollutants. Studied chars were tested as follows: adsorption isotherm for gaseous toluene used as a representative of a volatile organic compound, iodine number, specific surface area and pore characteristics, functional groups on the surface, and morphology by scanning electron microscopy (SEM). The Freundlich isotherm indicated that both chars provided favorable adsorption isotherms. The acacia-wood char had specific adsorption capacity and Freundlich isotherm exponent closer to the activated carbon. Iodine numbers of the acacia-wood and sawdust chars were 731 and 802 mg/g, respectively. The specific surface area and mean pore size of the acacia-wood char were twice as large as those of the sawdust char. These results agreed with SEM images that showed capillary-like pores and greater open pores found in the acacia-wood char than in the sawdust char. The similar functional group of aromatic bonds was observed on the surfaces of both chars. According to these properties, the acacia-wood char is capable of directly using as an adsorbent for removing aromatic indoor pollutants. Furthermore, improvement of the char properties by activation and addition of particular functional groups on the surfaces can increase the char ability to adsorb odors and other air pollutants.

Keywords: char, pyrolysis, adsorbent, volatile organic compounds, value-added

1. บทนำ

กระบวนการไพโรไลซิสจัดเป็นกระบวนการทางความร้อนแบบหนึ่งที่ใช้ย่อยสลายชีวมวลภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงในรูปแบบต่างๆ โดยไพโรไลซิสแบบเร็วนิยมใช้ในการเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวที่เรียกว่าไบโอออยล์ (bio-oil) เนื่องจากได้ปริมาณสูงถึง 75% เมื่อเทียบกับไพโรไลซิสแบบกลาง (intermediate) ที่ให้ไบโอออยล์เพียง 50% เงื่อนไขของปฏิกิริยาไพโรไลซิสแบบเร็วจะใช้อุณหภูมิปฏิกิริยาประมาณ 500 องศาเซลเซียส และเวลากักไอน์ไพโรไลซิสสั้นมากประมาณ 1-2 วินาที นอกเหนือจากผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือไบโอออยล์แล้วยังได้ผลิตภัณฑ์รองอื่น ได้แก่ แก๊ส 13% และถ่านชาร์ 12% [1] ในปัจจุบันแก๊สและถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วถูกนำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนในขั้นตอนการบ่อนชีวมวลที่ต้องทำให้แห้งเท่านั้น ยังไม่มีการวิจัยเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่ผลิตภัณฑ์รองแต่อย่างใด

ปัจจุบันการจัดการคุณภาพอากาศในอาคารได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากคนชั้นกลางส่วนใหญ่ใช้เวลามากกว่า 87% ของแต่ละวันภายในอาคาร [2] และคุณภาพอากาศที่ไม่ดีก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้อาศัยหรือทำงานในอาคาร ซึ่งองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมประเทศสหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency, US EPA) กำหนดให้คุณภาพอากาศในอาคารที่ไม่ดีเป็นความเสี่ยง 1 ใน 5 อันดับแรกของความเสี่ยงทางสุขภาพจากสิ่งแวดล้อม [3] งานวิจัยหลายบทความระบุตรงกันว่า กลุ่มอาการป่วยเหตุอาคาร (sick building syndromes, SBS) มีความสัมพันธ์กับสารอินทรีย์ระเหย (volatile organic compounds, VOCs) ที่ตรวจพบในอาคารอย่าง

ชัดเจน แม้ว่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่ตรวจพบอยู่ในระดับต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนดโดยหน่วยงานด้านอาชีวอนามัยก็ตาม [4-5]

การควบคุมหรือกำจัดสารมลพิษอากาศในอาคารประกอบด้วย 3 หลักการ ได้แก่ การควบคุมที่แหล่งกำเนิดมลพิษ การระบายอากาศ และการทำความสะอาดอากาศ [6] โดยหลักการสุดท้ายนี้มีการใช้เทคนิคต่างๆ เพื่อทำความสะอาดอากาศที่ปนเปื้อนมลพิษ เช่น เครื่องฟอกอากาศดักจับฝุ่นละอองขนาดเล็ก หรือถ่านกัมมันต์ (activated carbon) กำจัดกลิ่นหรือสารอินทรีย์ระเหยต่างๆ เช่น สารแอโรมาติก (aromatics) เป็นต้น จากการศึกษาที่ผ่านมาด้วยแบบสอบถามพบว่า เรื่องกลิ่นและความชื้นเป็นปัญหาที่ผู้อาศัยในคอนโดมิเนียมตอบมากที่สุด จึงนำไปสู่การออกแบบผลิตภัณฑ์ของตกแต่งด้วยถ่านไม้ที่สามารถดูดกลิ่นและความชื้นได้ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยดังกล่าวใช้ถ่านไม้อัดแท่งมาดัดแปลงสร้างผลิตภัณฑ์ดูดซับกลิ่น ซึ่งเน้นงานออกแบบเป็นหลักโดยไม่ได้มีการทดสอบความสามารถในการดูดซับของผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบมา [7]

ดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มมูลค่าของถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วมาใช้เป็นสารดูดซับมลพิษอากาศในอาคารประเภทสารอินทรีย์ระเหย โดยเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารมลพิษกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตเชิงพาณิชย์ รวมทั้งศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านชาร์เพื่อเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้ถ่านชาร์

2. วิธีการทดลอง

2.1 ถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ที่ศึกษา

ถ่านชาร์เป็นผลิตภัณฑ์รองจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเพื่อผลิต

ไบโอออยล์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟอง (bubbling fluidized bed reactor) ของหน่วยวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ขนาดห้องปฏิบัติการที่มีอัตราป้อนชีวมวล 300 กรัม/ชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิคงอยู่ของไฮโดรไลซิสก่อนการควบแน่น และอุณหภูมิของถ่านหลังทำปฏิกิริยาก็คือ 420 องศาเซลเซียส ในงานวิจัยนี้ศึกษาถ่านชาร์ที่ได้จากชีวมวล 2 ชนิด ได้แก่ ขี้เลื่อยไม้ (P sawdust) เป็นของเหลือทิ้งจากโรงเลื่อย และไม้กระถินยักษ์ (Pacacia) สมบัติของชีวมวลแสดงสรุปในตารางที่ 1 ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตเชิงพาณิชย์ได้จากบริษัทจัดจำหน่ายในประเทศไทย จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว (C coconut shell) และจากไม้ยูคาลิปตัส (C eucalyptus) ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation) โดยถ่านทั้ง 4 ชนิดเป็นผงสีดำ ขนาดอยู่ในช่วง 70-200 ไมครอน

ตารางที่ 1 สมบัติของชีวมวลที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

ลักษณะสมบัติ*	ปริมาณ (%)	
	ขี้เลื่อยไม้	ไม้กระถินยักษ์
สารระเหย	82.9	79.1
คาร์บอนคงตัว	10	18.5
เถ้า	7.1	2.4

* ทดสอบที่สภาวะแห้ง

2.2 การทดสอบไอโซเทอมการดูดซับก๊าซโทลูอิน

งานวิจัยนี้เลือกโทลูอิน (toluene) เป็นตัวแทนสารมลพิษอินทรีย์ระเหยเพราะโทลูอินมักตรวจพบในอากาศภายในอาคารทั่วไปด้วยความ

เข้มข้นสูง ในอาคารสำนักงานของประเทศไทย ตรวจพบโทลูอินในปริมาณสูงถึง 54% ของปริมาณสารอินทรีย์ระเหย 13 ชนิดที่ตรวจวัด [8]

ขั้นตอนการทดสอบทำโดยการเตรียมก๊าซโทลูอินจากของเหลวโทลูอิน บริสุทธิ์ (Merck KGaA, Germany) ซึ่งปล่อยให้ระเหยในขวดแก้วขนาด 10 มล. จนได้ความดันไออิ่มตัว (saturated vapor) จากนั้นจึงเจือจางไอระเหยอิ่มตัวลงในขวดแก้วขนาด 20 มล. ซึ่งภายในบรรจุถ่านที่ทดสอบปริมาณ 0.10 กรัม ให้ได้ความเข้มข้น 0.3-0.9 ส่วนในล้านส่วน (ppm) หรือเทียบเท่า 1.1-3.7 มก./ลบ.ม. เขย่าขวดด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 40 นาทีที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส จากนั้นดูดก๊าซในขวดไปวิเคราะห์หาปริมาณโทลูอินที่เหลือด้วยเครื่อง Gas Chromatography / Flame Ionization Detector, GC-FID (Shimizu Co., Japan) ซึ่งจะได้ความเข้มข้นโทลูอินในขวดที่สภาวะสมดุล สภาวะการทำงานของเครื่อง GC/FID มีดังนี้ คอลัมน์ที่ใช้ Rtx-5ms ขนาด 30 m x 0.25 mm i.d. (Restex Co., USA), อุณหภูมิเตา 40 องศาเซลเซียส คงที่เป็นเวลา 10 นาที อุณหภูมิการฉีด 250 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิตัวตรวจวัด 300 องศาเซลเซียส ปรับเทียบค่าความเข้มข้นด้วยความเข้มข้นโทลูอินมาตรฐาน 4 ค่า

พฤติกรรมการดูดซับก๊าซโทลูอินจะอธิบายด้วยแบบจำลองการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm) โดยถือว่าพื้นผิวของวัสดุดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (heterogeneous surfaces) และพลังงานพื้นผิวของกระบวนการดูดซับมีลักษณะกระจายซับซ้อน การดูดซับของโมเลกุลตัวถูกดูดซับสามารถซ้อนกันเกินกว่าหนึ่งชั้นได้ [9] สมการฟรอนด์ลิชแสดงดังสมการ (1)

$$q_e = K_f C_e^n \quad (1)$$

โดยที่ q_e คือ ความสามารถของถ่านในการดูดซับ โทลูอิน (มก./กรัมของถ่าน), C_e คือ ความเข้มข้นของโทลูอิน ณ สภาวะสมดุล (มก./ลบ.ม.), K_f คือ ค่าคงที่แสดงถึงความจำเพาะของการดูดซับ ที่สภาวะความเข้มข้นค่าใดๆ (specific capacity) และ n คือ ค่ายกกำลังแสดงถึงระดับการสะสม และความหลากหลายของพลังงานในปฏิกิริยาการดูดซับ กรณี $n < 1$ เส้นกราฟไอโซเทอมจะโค้งออก (convex isotherm), $n = 1$ เส้นกราฟไอโซเทอมเป็นเส้นตรง (linear isotherm) และ $n > 1$ เส้นกราฟไอโซเทอมจะโค้งเข้า (concave isotherm)

ข้อมูล q_e และ C_e ที่ได้จากการทดลอง จะใช้ทำนายค่า K_f และ n ในสมการ (1) ด้วยการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear regression) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป NLREG[®] ซึ่งจะแตกต่างจากการทำนายค่าพารามิเตอร์ของฟรอนตลิชในงานวิจัยอื่นที่นิยมใช้วิธีแปลงข้อมูลดั้งเดิมที่มีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ให้เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น (linearization) เช่น การแปลงข้อมูลด้วยวิธีฐานสิบ (log-transformation) เพื่อหาพารามิเตอร์การดูดซับ อย่างไรก็ตามการแปลงข้อมูลให้เป็นเชิงเส้นมักมีข้อเสีย เช่น ทำให้เกิดการลำเอียงของข้อมูลที่ถูกละเลย ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ที่ทำนายไม่อยู่ในช่วงความเชื่อมั่น 95% เป็นต้น [10]

2.3 การวิเคราะห์หาค่าไอโอดีน (iodine number)

ทดสอบหาค่าไอโอดีนของถ่านเพื่อประเมินค่าความพรุนของรูขนาดเล็ก (microporosity) โดยใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D4607-86 [11] โดยนำถ่านอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชม. ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นชั่งถ่าน 1.000 ± 0.050 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล. นำไปวิเคราะห์หาการดูดซับไอโอดีนของถ่านที่ทดสอบ

2.4 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน

ทดสอบถ่านชาร์เพื่อวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะตามทฤษฎีของเบ็ต (BET, The Brunauer-Emmett-Teller) ด้วยก๊าซไนโตรเจนหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (pore size diameter) และปริมาตรของรูพรุน (pore volume) ด้วยเครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นผิว (Bel Sorp mini II, BEL Japan, Inc.)

2.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว (functional groups)

ทดสอบถ่านชาร์เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับสารมลพิษแต่ละประเภท โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) (Bruker Co., USA)

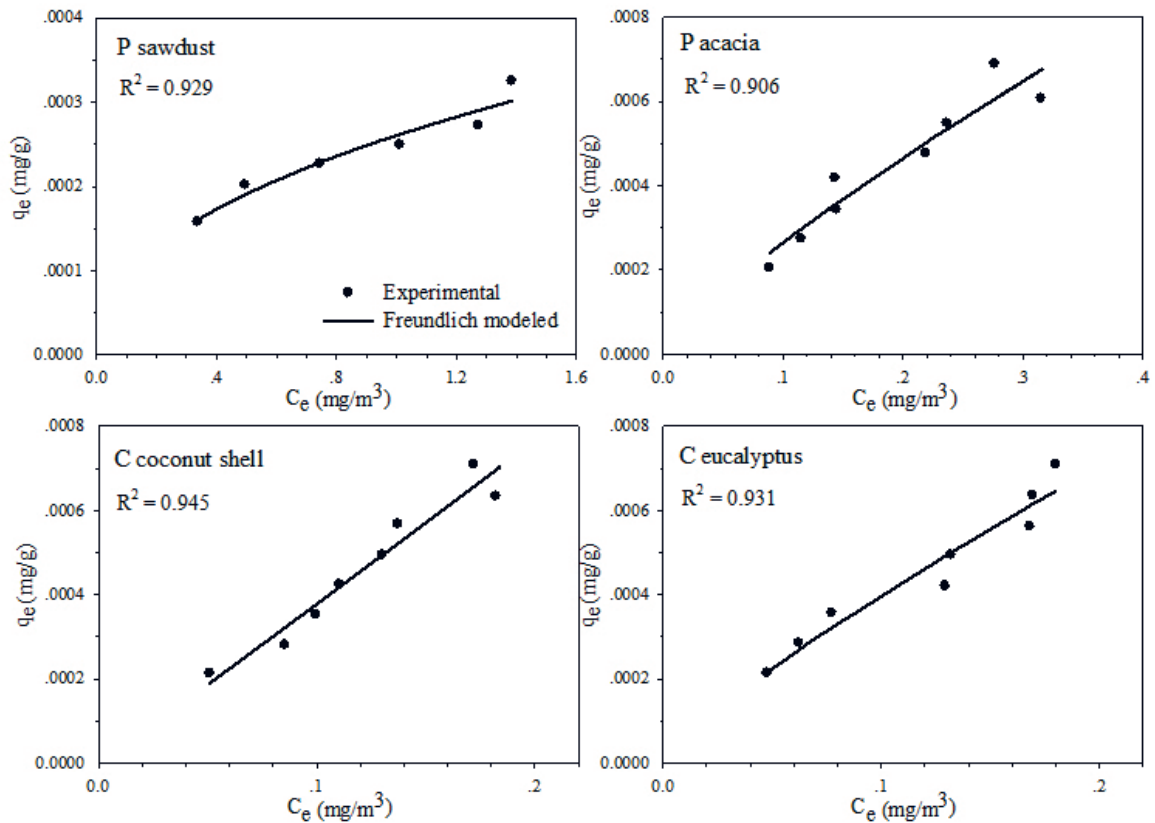
2.6 การศึกษาโครงสร้างอณูฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM)

ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างอณูฐานวิทยา และลักษณะรูพรุนของถ่านชาร์ ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (JSM-6010, JEOL, Ltd, Japan)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ไอโซเทอมการดูดซับโทลูอินและค่าไอโอดีน

รูปที่ 1 แสดงเส้นกราฟไอโซเทอมการดูดซับโทลูอินของถ่านแต่ละชนิดที่ได้จากการทดลองและเส้นกราฟที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองฟรอนตลิชตามสมการ (1)



รูปที่ 1 ไอโซเทอมการดูดซับโพลีอินของถ่านชาร์ไฟโวลีซิสและถ่านกัมมันต์ ที่ได้จากการทดลอง การดูดซับและจากการทำนายด้วยสมการฟรอนด์ลิช

ตารางที่ 2 สรุปค่าพารามิเตอร์ฟรอนด์ลิช K_f และ n ที่ได้จากการทำนายและค่า proportion of variance explained (R^2) จากผลการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยทุกการทดลองได้ค่า R^2 สูงกว่า 0.90 ซึ่งแสดงถึงการแนบสนิทระหว่างข้อมูลการทดลองกับข้อมูลจากการทำนายด้วยแบบจำลองฟรอนด์ลิช ค่าบวกของ K_f และ n แสดงความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์จากการทำนายที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ในตารางที่ 2 ยังแสดงค่าไอโอดีนด้วย

ตารางที่ 2 K_f และ n ที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองฟรอนด์ลิช และค่าไอโอดีน

ชนิดถ่าน	K_f	n	R^2	ค่าไอโอดีน**
P sawdust	2.6×10^{-4} $\pm 2 \times 10^{-5}$	0.447	0.929	731
P acacia	1.7×10^{-3} $\pm 8 \times 10^{-4}$	0.815	0.906	802
C coconut shell	3.9×10^{-3} $\pm 2 \times 10^{-3}$	1.019	0.945	972
C eucalyptus	2.7×10^{-3} $\pm 1 \times 10^{-3}$	0.827 ± 0.273	0.931	943

* หน่วยค่า K_f คือ $\text{mg}^{1-n} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{g}^{-1}$

** หน่วยค่าไอโอดีน คือ mg/g carbon

จากรูปที่ 1 และตารางที่ 2 ค่า n ชี้ให้เห็นว่าการดูดซับโทลูอินของถ่านชาร์ทั้งสองชนิดมีลักษณะเส้นกราฟโค้งออก ($n < 1$) จัดว่าเป็นการดูดซับดีหรือ favorable adsorption นั่นคือถ่านชาร์จะสูญเสียความสามารถในการดูดซับ (q^e) ไม่มากเมื่อความเข้มข้นมลพิษขาเข้าลดลง เท่ากับความเข้มข้นมลพิษขาออก ซึ่งตรงข้ามกับ unfavorable adsorption [9] เมื่อพิจารณาความจุจำเพาะของการดูดซับหรือ K_f ของถ่านทั้ง 4 ชนิดที่ค่าความเข้มข้นสารมลพิษโทลูอินใดๆ จะเห็นว่า ถ่านชาร์ซีเลื่อยไม่มีค่าต่ำสุด โดยต่ำกว่าถ่านชนิดอื่นประมาณ 10 เท่า ในขณะที่ถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์มีค่าต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตเชิงพาณิชย์ทั้ง 2 ชนิดประมาณ 1-2 เท่า ทั้งนี้เป็นเพราะถ่านชาร์จากกระบวนการไพโรไลซิสเทียบได้กับการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ผ่านเพียงกระบวนการคาร์บอนไนเซชันเท่านั้น ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเปลี่ยนถ่านชาร์ให้เป็นถ่านกัมมันต์ ดังนั้นจึงยังไม่เกิดการขยายขนาดและการพัฒนารูพรุนอย่างเต็มที่ [12] แต่มีข้อน่าสังเกตว่าถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์มีค่าพารามิเตอร์พรุนดิลิชใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่นำมาทดสอบเปรียบเทียบในขณะที่ถ่านชาร์ซีเลื่อยไม่มีค่าต่ำกว่าค่อนข้างมาก เมื่อพิจารณาสมบัติของชีวมวลตั้งต้นทั้งสองที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส (ตารางที่ 1) พบว่ามีสมบัติคล้ายคลึงกัน ยกเว้นปริมาณเถ้าของซีเลื่อยไม่มีค่าสูงกว่าไม้กระถินยักษ์ถึง 3 เท่า จึงชี้เป็นนัยว่าโครงสร้างคาร์บอนของถ่านชาร์ที่ได้จากซีเลื่อยไม้จะมีปริมาณน้อยกว่าถ่านชาร์ที่ได้จากไม้กระถินยักษ์เมื่อคือน้ำหนักที่เท่ากัน

จากผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนพบว่า ได้ผลการทดสอบคล้ายคลึงกับผลการดูดซับโทลูอิน โดยถ่านชาร์ซีเลื่อยไม่มีค่าไอโอดีนต่ำสุดเท่ากับ 731 มก./กรัม ตามด้วยถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์ 802 มก./กรัม ในขณะที่ถ่านกัมมันต์มีค่า

สูงกว่า 900 มก./กรัม เนื่องจากผ่านกระบวนการกระตุ้นแล้วจึงเพิ่มความพรุนของรูขนาดเล็กมากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ประเทศไทย (มอก. 900-2547) [13] สำหรับถ่านชนิดผง อาจจัดได้ว่าถ่านชาร์ไพโรไลซิสเป็นไปตามเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนดสำหรับค่าไอโอดีนคือ 600 มก./กรัม

3.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาด และปริมาตรรูพรุนของถ่านชาร์

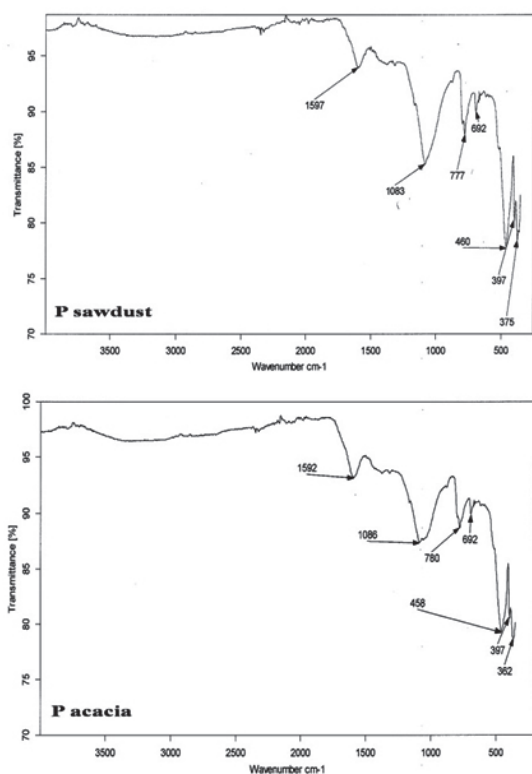
ตารางที่ 3 แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะ เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน และปริมาตรทั้งหมดของรูพรุนของถ่านชาร์ซีเลื่อยไม้และไม้กระถินยักษ์ ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่ากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วสำหรับชีวมวลทั้งสองก่อให้เกิดลักษณะรูพรุนภายในแตกต่างกัน ถ่านชาร์ซีเลื่อยไม่มีรูพรุนเฉลี่ยขนาดเล็กกว่าของถ่านไม้กระถินยักษ์ถึง 2 เท่า และมีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดมากกว่าถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์ อย่างไรก็ตามเมื่อวัดพื้นที่ผิวจำเพาะกลับมีค่าต่ำกว่า ดังนั้นอาจชี้เป็นนัยได้ว่า ช่องเปิดที่เกิดขึ้นในถ่านชาร์ซีเลื่อยไม้มีขนาดเล็กจนบางส่วนไม่มีประสิทธิภาพต่อการดูดซับสารมลพิษได้เท่ากับถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการดูดซับโทลูอิน

ตารางที่ 3 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาด และปริมาตรรูพรุนของถ่านชาร์

ลักษณะสมบัติ	P sawdust	P acacia
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม./กรัม)	1.15	2.75
ปริมาตรรูพรุน ทั้งหมด (ลบ.ซม./กรัม)	8.00×10^{-3}	6.43×10^{-3}
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน (นาโนเมตร)	42.67	115.95

3.3 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชาร์

รูปที่ 2 แสดงแถบสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นรังสีช่วงกลางอินฟราเรดประมาณ 400-4000 ซม.⁻¹ ของถ่านชาร์ทั้ง 2 ชนิดด้วยเครื่อง FT-IR ซึ่งจะเห็นได้ว่าการดูดกลืนรังสีมีลักษณะคล้ายคลึงกันมาก โดยมีการดูดกลืนที่เด่นชัดในช่วง 350-1600 ซม.⁻¹ แต่ไม่พบการดูดกลืนรังสีในช่วงสูงกว่า 2000 ซม.⁻¹



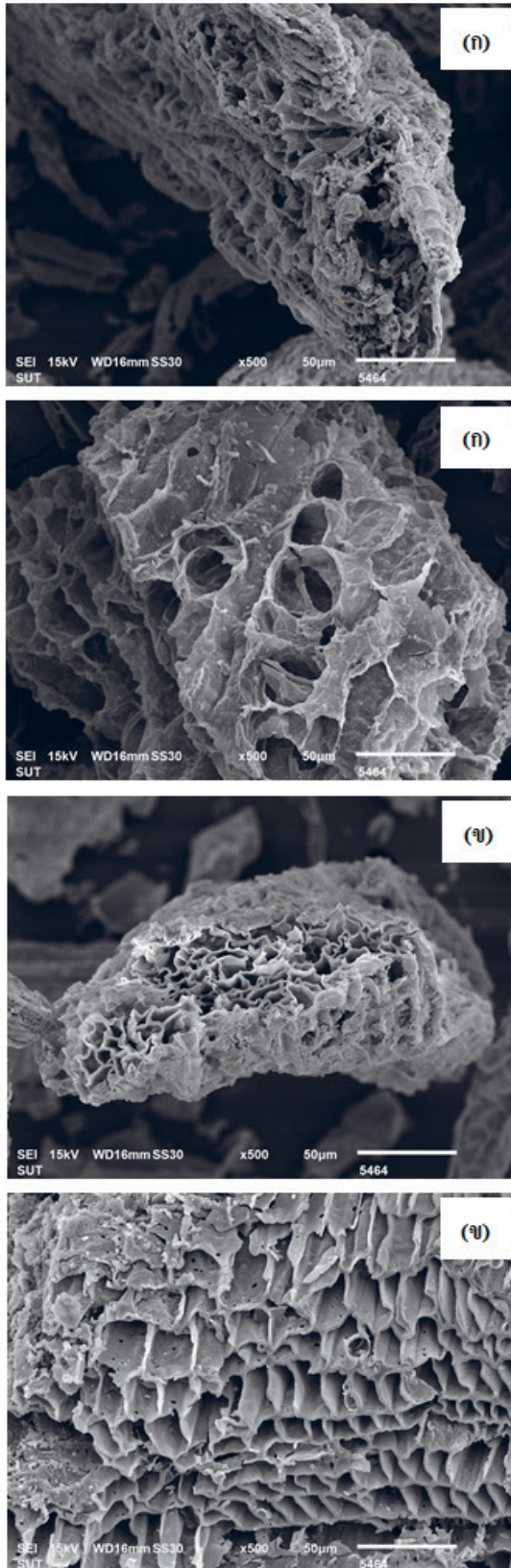
รูปที่ 2 แถบสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของถ่านชาร์ไพโรไลซิสด้วยเครื่อง FT-IR

ถ่านชาร์ทั้งสองพบการดูดกลืนรังสีช่วงประมาณ 1590 ซม.⁻¹ และช่วง 690-780 ซม.⁻¹ แสดงถึงพันธะ C=C และ C-H ในหมู่แอโรมาติก [14-15] ถ่านชาร์เป็นผลิตภัณฑ์ที่หลงเหลือจากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลซึ่งคาดว่าจะอยู่ในรูปของลิกนินเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากลิกนินสลายตัวทางความร้อนได้ยากกว่าชีวมวลส่วนที่เป็นเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ลิกนินเป็นสารประกอบพอลิเมอร์มีโครงสร้างพื้นฐานคือวงแหวนอะโรมาติก

การไม่พบแถบสเปกตรัมดูดกลืนรังสีสูงกว่า 2000 ซม.⁻¹ ของถ่านชาร์ทั้งสองแสดงถึงพื้นผิวไม่มีพันธะหมู่แอลเคน ไนไตรล์ และรวมถึงพันธะหมู่กรด เช่น กรดคาร์บอกซิลิก หรือฟีนอล ซึ่งจะดูดซับรังสีสูงกว่า 3000 ซม.⁻¹ [15] เพราะถ่านชาร์ไม่ได้ถูกกระตุ้นต่อทางเคมีด้วยกรดหรือไม่ได้มีการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนชนิดต่างๆ โดยกระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ถึงแม้ว่าถ่านชาร์ที่เกิดขึ้นมีการสัมผัสกับอากาศในภายหลัง แต่การออกซิเดชันด้วยอากาศในสภาวะบรรยากาศทั่วไปไม่สามารถเพิ่มหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนให้กับพื้นผิวถ่านชาร์ได้

3.4 โครงสร้างอณูพื้นฐานวิทยาของถ่านชาร์

รูปที่ 3(ก) และ (ข) แสดงโครงสร้างอณูพื้นฐานวิทยาของถ่านชาร์ซี่เลื้อยไม้และไม้กระถินยักษ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดกำลังขยาย 500 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 3 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด
ของถ่านชาร์ (ก) ชี้อยู่ไม้ และ
(ข) ไม้กระถินยักษ์

จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแสดงให้เห็นรูพรุนหรือช่องเปิดบนพื้นผิวของถ่านชาร์ทั้ง 2 ชนิด โดยถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์พบรูพรุนลักษณะคล้ายกับคาปิลลารี (Capillary) จำนวนมากกว่าที่พบในถ่านชาร์ชี้อยู่ไม้ และรูพรุนยังมีขนาดใหญ่กว่า มีการกระจายที่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจช่วยให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่มีประโยชน์ต่อการดูดซับมีค่าสูงกว่าดังแสดงในตารางที่ 3 อย่างไรก็ตาม ถ่านชาร์ทั้ง 2 ชนิดยังพบรูพรุนที่ไม่มีช่องเปิดสู่ภายนอกด้วย เนื่องจากยังไม่ได้รับการกระตุ้นเพื่อให้เกิดการพัฒนาช่องเปิดอย่างเต็มที่ และยังมีอนุภาคขนาดเล็กปะปนอยู่ที่ผิวหน้าถ่านชาร์

3.5 แนวทางการนำถ่านชาร์ไปใช้เป็นสารดูดซับ

จากผลการวิเคราะห์สมบัติถ่านชาร์ไพโรไลซิสและผลเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ขายในท้องตลาด อาจสามารถจำแนกแนวทางการนำถ่านชาร์ไปสร้างเป็นผลิตภัณฑ์การค้าเพื่อใช้เป็นสารดูดซับกลิ่นหรือมลพิษอากาศในอาคารได้ดังนี้

แนวทางที่ 1 การนำถ่านชาร์ไปใช้ในรูปแบบเดิมโดยไม่ต้องมีกระบวนการเพิ่มสมบัติหรือความสามารถในการดูดซับ ซึ่งแนวทางนี้จะเหมาะกับถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์มากกว่าถ่านชาร์ชี้อยู่ไม้เพราะมีความจุในการดูดซับสูงกว่า โดยสามารถนำถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์มาใช้ดูดซับมลพิษอากาศในอาคารประเภทสารอินทรีย์อะโรมาติก เช่น เบนซีน โทลูอิน สไตรีน ไซลีน เป็นต้น หรือสารมลพิษไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว หรือใช้ดูดซับก๊าซมลพิษ อนินทรีย์ เช่น โอโซน เป็นต้น

แนวทางที่ 2 การนำถ่านชาร์มาผ่านกระบวนการเพิ่มสมบัติหรือความสามารถในการดูดซับก่อนนำไปใช้งาน แบ่งตามกระบวนการเพิ่มสมบัติถ่านชาร์ดังนี้

(1) การกระตุ้นถ่านชาร์ให้เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเหมาะสม มีพื้นผิวในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ยังแสดงถึงช่องเปิดที่ยังไม่พัฒนาอย่างเต็มที่และการมีอนุภาคขนาดเล็กปนเปื้อนอยู่ที่พื้นผิว การกระตุ้นอาจทำได้ทั้งการกระตุ้นทางกายภาพหรือทางเคมี ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาความเหมาะสมทางเทคนิคต่อไป เนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับชนิดของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวและความเสถียรทางความร้อนของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นด้วย

(2) การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันชนิดต่างๆ บนพื้นผิวเพื่อให้ได้สารดูดซับที่มีความสามารถจำเพาะในการดูดซับสารมลพิษอากาศบางชนิด เช่น การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนชนิดต่างๆ หรือการเพิ่มหมู่กรดซึ่งจะทำให้สารดูดซับมีพื้นผิวเหมาะสมต่อการดูดซับสารมลพิษต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาทางเทคนิคเพิ่มเติม

นอกจากนี้การเพิ่มมูลค่าของสารดูดซับจากถ่านชาร์ในทางการตลาดควรคำนึงถึงการศึกษาและออกแบบผลิตภัณฑ์ให้มีความเหมาะสมด้านประโยชน์ใช้สอยของกลุ่มลูกค้าเพื่อให้ตอบสนองพฤติกรรมในการใช้งาน และมีความคุ้มค่าของราคาด้วยนอกเหนือจากการพิจารณาเพียงด้านประสิทธิภาพหรือความสามารถในการดูดซับของผลิตภัณฑ์

4. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านชาร์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์รองได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในการสลายชีวมวลให้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับโทลูอินด้วยแบบจำลองฟรอนดลิช ค่าไอโอดีน พื้นผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว และภาพถ่ายยอสันฐานวิทยาพบว่า ถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์มีพฤติกรรมการดูดซับและความจุ

ในการดูดซับโทลูอินใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตเชิงพาณิชย์มากกว่าถ่านชาร์ซีเลียมี่ส่วนค่าไอโอดีนของถ่านชาร์ทั้งสองยังต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตเชิงพาณิชย์จากทั้งกะลามะพร้าวและยูคาลิปตัสที่นำมาเปรียบเทียบอาจเนื่องจากถ่านชาร์ยังไม่ผ่านการกระตุ้นให้มีลักษณะเป็นถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มความพรุนของรูขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามถ่านชาร์ทั้งสองมีค่าไอโอดีนสูงกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ชนิดผงซึ่งกำหนดไว้ที่ 600 มก./กรัม ผลการวิเคราะห์พื้นผิวแสดงให้เห็นว่า ถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าและมีขนาดรูพรุนไม่เล็กเกินไปเมื่อเทียบกับถ่านชาร์ซีเลียมี่ ซึ่งผลดังกล่าวยังยืนยันได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ส่องกราด ถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์มีรูพรุนคล้ายคาปิลารี รูพรุนมีช่องเปิดสู่ภายนอกสำหรับหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวของถ่านชาร์ทั้งสองคล้ายคลึงกัน คือ พบหมู่อะโรมาติก เนื่องจากการเกิดของถ่านชาร์จากชีวมวลมีกระบวนการเหมือนกัน จากสมบัติดังกล่าวสามารถเพิ่มมูลค่าของถ่านชาร์ด้วยการนำไปใช้เป็นสารดูดซับมลพิษอากาศในอาคาร โดยแบ่งเป็น 2 แนวทาง คือ การนำถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์ซึ่งมีสมบัติใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตเชิงพาณิชย์ไปใช้ดูดซับสารมลพิษอะโรมาติกได้โดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติเพิ่มเติมกับอีกแนวทางคือการนำถ่านชาร์มาผ่านกระบวนการเพิ่มสมบัติหรือความสามารถในการดูดซับก่อนนำไปใช้งานที่ต้องการกำจัดสารมลพิษแบบจำเพาะ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และคณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือกลางมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bridgewater AV. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*. 2012;38: 68-94.
- [2] Jenkins LP, Phillips JT, Molberg SE, Hui PS. Activity patterns of californians: use of and proximity to indoor pollutant sources. *Atmospheric Environment*. 1992;26A:2141-3148.
- [3] United States Environmental Protection Agency [Internet]. Why indoor air quality is important to schools. 2017 [cited 2017 December 20]. Available from: <https://www.epa.gov/iaq-schools/why-indoor-air-quality-important-schools>.
- [4] Hedge A. Work-related illness in offices: a proposed model of the sick building syndrome. *Environmental International*. 1989;15:143-158.
- [5] Ten Brinke J, Selvin S, Hodgson TA, Fisk JW, Mendell JM, Koshland PC, Daisey MJ. Development of new volatile organic compound (VOC) exposure metrics and relationship to sick building syndromes. *Indoor Air*. 1989;8:140-152.
- [6] Godish T. *Indoor air pollution control*. Michigan: Lewis; 1989.
- [7] Tieosuwan P. Designing a range of home decoration products that help eliminate unwanted odor and absorb humidity condominium by utilizing the attributes of charcoal [master's independent study]. Nakhon Pathom: Silpakorn University; 2014.
- [8] Ongwandee M, Moonrinta R, Panyame theekul S, Tangbanluekal C, Morrison G. Investigation of volatile organic compounds in office buildings in Bangkok, Thailand: concentrations, sources and occupant symptoms. *Building and Environment*. 2011;46:1512-1522.
- [9] DiGiano FA, Weber WJ. *Process dynamics in environmental systems*. New York: Wiley & Sons; 1996.
- [10] Berthouex PM, Brown LC. *Statistics for environmental engineering*. Florida: Lewis; 1994.
- [11] American Society for Testing and Materials. ASTM D4607-86 Standard test method for determination of iodine number of activated carbon. Philadelphia: ASTM Committee on Standards; 1986.
- [12] Katesa J. Effects of carbonization temperature on properties of chars and activated carbon from coconut shell [master's thesis]. Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology; 2013.

- [13] Thai Industrial Standard. TIS 900-2547 activated carbon. Bangkok: Thai Industrial Standard Institute; 2004.
- [14] Friedel RA, Hofer LJE. Spectral characterization of activated carbon. The Journal of Physical Chemistry. 1970;74:2921-2922.
- [15] Abugu HO, Okoye PAC, Ajiwe VIE, Omuku PE, Umeobika UC. Preparation and characterization of activated carbon produced from oil bean (Ugba or Ukpaka) and snail shell. Environmental Analytical Chemistry. 2015;2:1-17.