



การทำตัวดูดซับสารกลุ่ม BTEX ในอากาศจากภาคตะกอนเยื่อกระดาษ

โดย

นางสาวปนัดดา ผู้มีจรรยา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การทำตัวดูดซับสารกลุ่ม BTEX ในอากาศจากภาคตะกอนเยื่อกระดาษ

โดย

นางสาวปนัดดา ผู้มีจรรยา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**PRODUCTION OF ADSORBENT FROM PAPER SLUDGE
TO ADSORB BTEX IN AIR**

By

Panadda Phumeechanya

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

MASTER OF SCIENCE

Department of Environmental Science

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2008

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การทำตัวดูดซับสาร
กลุ่ม BTEX ในอากาศจากกากตะกอนเชื้อกระดาษ ” เสนอโดย นางสาวปนัดดา ผู้มีจรรยา เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะตั้งกูร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.มลิวรรณ บุญเสนอ

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอื้อมพร มัชฌิมวงศ์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล อ้นแอ่ง)

...../...../.....

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.มลิวรรณ บุญเสนอ)

...../...../.....

48311308 : สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : กากตะกอนเชื้อกระดาษ, ตัวดูดซับ, เบนซีน, โทลูอิน, เอทิลเบนซีน, ไซลีน

ปณิดดา ผู้มีจรรยา : การทำตัวดูดซับสารกลุ่ม BTEX ในอากาศจากกากตะกอนเชื้อกระดาษ. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รศ.ดร.มลิวรรณ บุญเสนอ. 112 หน้า.

การทดลองทำตัวดูดซับสารกลุ่ม BTEX (Benzene Toluene Ethylbenzene และ Xylenes) ในอากาศจากกากตะกอนเชื้อกระดาษของโรงงานกระดาษ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตตัวดูดซับสำหรับใช้ในหลอดเก็บตัวอย่างสารกลุ่ม BTEX ในอากาศ ขั้นตอนการศึกษาทำโดยนำกากตะกอนเชื้อกระดาษไปเผาที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส โดยแต่ละอุณหภูมิจะเผาานาน 1 และ 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการแยกขนาดอนุภาคเป็น 2 ขนาด คือ ขนาดระหว่าง 300 - 500 ไมโครเมตร และขนาดระหว่าง 500 - 1,000 ไมโครเมตร ตัวดูดซับ 8 ชนิดที่ได้จากการเตรียมนี้จะถูกนำไปทดลองเพื่อหาความสามารถในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่จุดสมดุล และทำการคัดเลือกตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับดีที่สุด จากนั้นนำตัวดูดซับที่เลือกไว้ไปทดลองเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX กับ ตัวดูดซับที่มีจำหน่ายคือถ่านกัมมันต์

ผลการศึกษาค่าการดูดซับไอโอดีนของตัวดูดซับทั้ง 8 ชนิด พบว่า มีค่าการดูดซับไอโอดีนไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 47.86 - 62.28 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน ผลการทดลองโดยใช้ตัวดูดซับทั้ง 8 ชนิดที่เตรียมได้พบว่า ตัวดูดซับซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขนาด 300 - 500 ไมโครเมตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ดีที่สุด โดยสามารถดูดซับ Ethylbenzene ได้ดีกว่า *o*-Xylene Toluene *m,p*-Xylene และ Benzene ในปริมาณ 1,030.93 826.45 800.00 632.91 และ 222.22 ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักตัวดูดซับ ตามลำดับ และจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารกลุ่ม BTEX พบว่า สมการแบบ Langmuir สามารถใช้อธิบายผลการทดลองการดูดซับได้ดีกว่าสมการแบบ Freundlich แสดงว่าการดูดซับสารกลุ่ม BTEX บนพื้นผิวของตัวดูดซับจะมีลักษณะเป็นการดูดซับสารบนพื้นผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สามารถเกิดการดูดซับแบบผันกลับได้ ซึ่งเป็นรูปแบบของการดูดซับทางกายภาพ

สำหรับประสิทธิภาพในการดูดซับสาร Benzene Toluene Ethylbenzene Xylenes ของถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 59% 90% 94% และ 89% ตามลำดับ ขณะที่ประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับที่เตรียมได้ เท่ากับ 48% 53% 66% และ 33% ตามลำดับ แสดงว่า ตัวดูดซับที่มีจำหน่ายมีความสามารถในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ได้มากกว่าตัวดูดซับที่เตรียมขึ้น แต่ตัวดูดซับที่เตรียมได้มีขั้นตอนการผลิตง่าย รวดเร็ว และมีค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ ดังนั้น จึงอาจนำตัวดูดซับที่เตรียมได้ไปใช้เป็นตัวดูดซับ ในอุปกรณ์บำบัดมลพิษอากาศ แทน ซึ่งการใช้ตัวดูดซับในอุปกรณ์บำบัดมลพิษอากาศนั้นต้องใช้ปริมาณมากทำให้เป็นการช่วยลดปริมาณของเสียที่ต้องกำจัด นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการกำจัดจะเพิ่มขึ้นได้จากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับด้วย

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2551
ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

48311308 : MAJOR : ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD : PAPER SLUDGE, ADSORBENT, BENZENE, TOLUENE, ETHYLBENZENE, XYLENES

PANADDA PHUMEECHANYA : PRODUCTION OF ADSORBENT FROM PAPER SLUDGE TO ADSORB BTEX IN AIR. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.MALIWAN BOONSANER,Ph.D.. 112 pp.

The study on the production of adsorbent from paper sludge to adsorb BTEX (Benzene Toluene Ethylbenzene and Xylene) in air was aimed to investigate the possibility of producing the adsorbent for BTEX detector tube. The experiment was conducted by baking the paper sludge in the furnace at 400 and 500 °C for 1 and 2 hours, then separated into two particle sizes: 300-500 µm and 500-1000 µm. Eight adsorbents were prepared and used in the adsorption study at 25 °C and the best adsorbent was selected according to its highest sorption capacity at equilibrium. Then, the chosen adsorbent together with the commercial adsorbent (activated carbon or AC) were used in adsorption study, and their sorption capacities were compared.

The experiment on the adsorption of Iodine with eight adsorbents showed that the sorption capacity of eight adsorbents is not different and have between 47.86 - 62.28 mg/g of the adsorbent. The experiment on the adsorption of BTEX in the air with eight adsorbents showed that the adsorbent with particles size of 300-500 µm and prepared at 500 °C for 2 hours had the highest sorption capacity. It was found that this adsorbent could adsorb Ethylbenzene > *o*-Xylene > Toluene > *m,p*-Xylene > Benzene with the capacity of 1,030.93, 826.45, 800.00, 632.91 and 222.22 µg/g of the adsorbent, respectively and the study on the adsorption isotherm of BTEX group. It was found that Langmuir isotherm can explain adsorption behavior better than Freundlich isotherm. It showed that the adsorption of BTEX group on adsorbent surface is single layer and can reversible adsorption which is physical adsorption pattern.

The adsorption efficiencies of Benzene Toluene Ethylbenzene and Xylene by the activated carbon were 59% 90% 94% and 89%, respectively while those obtained from the adsorbent prepared from paper sludge were 48% 53% 66% and 33%, respectively. This result showed that the activated carbon had higher efficiency to adsorb BTEX more than the prepared adsorbent. However, the prepared adsorbent pass only one step of carbonization process and is waste so it have low cost to produce compare with the activated carbon. Thus, this prepared adsorbent may be use as air filter in air pollution control device which need a large amount of adsorbent since it was easy to prepare from waste paper sludge and considerably cheap compared to the commercial one. Besides, the adsorption efficiency could also be increased with the increase amount of the adsorbent used.

Department of Environmental Science

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2008

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มลิวรรณ บุญเสนอ ประธานผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ และช่วยเหลือตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล อ้นแจ่ม และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอี่ยมพร มัชฌิมวงศ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนวความคิด ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ในการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคุณผ่องศรี เผ่าภูรี และคุณนที สังกบุญ นักวิทยาศาสตร์ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ตลอดจนคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมทุกท่านที่เป็นกำลังใจ ให้คำแนะนำ คอยช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์เครื่องมือ สารเคมี และอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทำวิจัยครั้งนี้

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่น้อง และเพื่อน ๆ ทุกคนที่ได้ให้การสนับสนุน เป็นกำลังใจ และช่วยเหลือทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
คำอธิบายคำย่อ.....	ท
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
สมมติฐานของการศึกษา.....	3
ขอบเขตการศึกษา	3
ขั้นตอนการศึกษา.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
สารกลุ่ม BTEX.....	5
สมบัติทางกายภาพและเคมี.....	5
แหล่งที่มา.....	7
ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่กระจายของสารในสิ่งแวดล้อม.....	8
ความเป็นพิษของสารกลุ่ม BTEX.....	10
การกำหนดค่ามาตรฐานของสารกลุ่ม BTEX ที่อนุญาตให้มีได้ในอากาศ...	13
การศึกษาการแพร่กระจายของสารกลุ่ม BTEX ในอากาศ.....	15
การเก็บตัวอย่างสารประกอบอินทรีย์ระเหยในอากาศ.....	16
Active Sampling.....	16
Passive Sampling	17
ตัวดูดซับ	17
กลไกการดูดซับ	18

บทที่		หน้า
	หลักการดูดซับ	18
	ชนิดของการดูดซับ.....	19
	สมการการดูดซับ.....	20
	ถ่านกัมมันต์	23
	วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์.....	24
	ชนิดของถ่านกัมมันต์.....	26
	การนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์.....	27
	การนำกากตะกอนเยื่อกระดาษเพื่อทำตัวดูดซับ.....	28
	วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกระดาษ	28
	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยที่ใช้ผลิตเยื่อกระดาษ.....	29
	การผลิตเยื่อกระดาษ	29
	การผลิตกระดาษ.....	30
	กากตะกอนเยื่อกระดาษ	31
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
3	วิธีการทดลอง.....	35
	เตรียมตัวดูดซับ	35
	ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำตัวดูดซับ	35
	การเตรียมตัวดูดซับเพื่อใช้ในการทดลอง	35
	ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับ.....	36
	การศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX	37
	เตรียมการวิเคราะห์ปริมาณสารกลุ่ม BTEX ในอากาศ	37
	เตรียมการวิเคราะห์ปริมาณสารกลุ่ม BTEX ในตัวดูดซับ.....	37
	วิธีการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับ	40
	ศึกษาความสามารถในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของถ่านกัมมันต์ที่มี จำหน่ายกับตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ.....	43
4	ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง	45
	การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาต่อการเผา	45
	การศึกษาสมบัติของตัวดูดซับที่ผลิตจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ.....	46

บทที่	หน้า
การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับที่ผลิต	
กากตะกอนเยื่อกระดาษ	48
ระยะเวลาการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับที่จุดสมดุล	48
การศึกษาการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับจากกากตะกอน	
เยื่อกระดาษแต่ละชนิด.....	50
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนระหว่างตัวดูดซับกับ	
อากาศ (K_{sa}) ของตัวดูดซับ S7 กับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสาร	
กลุ่ม BTEX.....	58
การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ระหว่าง	
ถ่านกัมมันต์จากหลอดเก็บตัวอย่างอากาศที่มีจำหน่ายกับตัวดูดซับ S7.....	61
ระยะเวลาการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของถ่านกัมมันต์จากหลอดเก็บ	
ตัวอย่างที่จุดสมดุล.....	61
การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ	63
5 สรุปผลการทดลอง	65
สรุปผลการทดลอง	65
ข้อเสนอแนะ	67
บรรณานุกรม.....	68
ภาคผนวก	75
ภาคผนวก ก	76
ภาคผนวก ข	79
ภาคผนวก ค	82
ภาคผนวก ง.....	89
ภาคผนวก จ.....	95
ภาคผนวก ฉ	98
ประวัติผู้วิจัย.....	112

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมบัติทางกายภาพและเคมีของสารกลุ่ม BTEX	6
2	ค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศภายในสถานประกอบการของสารกลุ่ม BTEX	14
3	แสดงชนิดของตัวดูดซับที่ได้จากการเผาและคัดขนาด.....	36
4	%Recovery ของวิธีที่ใช้สกัดและวิเคราะห์สารกลุ่ม BTEX	39
5	ค่า Method Detection Limit ของวิธีที่ใช้สกัดและวิเคราะห์สารกลุ่ม BTEX	40
6	ความเข้มข้นของสารกลุ่ม BTEX ที่ใช้ในการทดลอง.....	40
7	ความเข้มข้นของสารที่ใช้ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการ ดูดซับสารกลุ่ม BTEX	43
8	ลักษณะของกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	46
9	ค่าการดูดซับไอโอดีนของตัวดูดซับที่ผลิตจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ แต่ละชนิด.....	47
10	ผลการทดลองหาระยะเวลาการดูดซับที่จุดสมดุลของตัวดูดซับ S7 ที่ ความเข้มข้นสูงสุด	49
11	ผลการทดลองการดูดซับสาร Benzene ของตัวดูดซับ S1 –S8.....	51
12	ผลการทดลองการดูดซับสาร Toluene ของตัวดูดซับ S1 –S8	52
13	ผลการทดลองการดูดซับสาร Ethylbenzene ของตัวดูดซับ S1 –S8.....	53
14	ผลการทดลองการดูดซับสาร <i>m,p</i> -Xylene ของตัวดูดซับ S1 –S8.....	54
15	ผลการทดลองการดูดซับสาร <i>o</i> -Xylene ของตัวดูดซับ S1 –S8.....	55
16	สมบัติทางกายภาพและทางเคมี และค่า K_{sa} จากการทดลอง.....	58
17	ผลการทดลองหาระยะเวลาการดูดซับที่จุดสมดุลของ AC ที่ความเข้มข้นสูงสุด...	62
18	ผลการทดลองเปรียบเทียบการดูดซับสารกลุ่มBTEX ของตัวดูดซับ AC และ S7..	64
19	ประสิทธิภาพการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับ AC และ S7	64
20	รายชื่อสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	77
21	รายชื่ออุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	78
22	คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของถ่านกัมมันต์ผง.....	84
23	คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของถ่านกัมมันต์เม็ด.....	84

ตารางที่		หน้า
24	แผนการชักตัวอย่างสำหรับการทดสอบการบรรจุ.....	86
25	ตัวแปรปรับค่า (Correction factor; D) สำหรับทดสอบค่าการดูดซับ ไอ โอดีน	94

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่ม BTEX.....	5
2	ปริมาณสารกลุ่ม BTEX ในน้ำมันเบนซิน และองค์ประกอบเป็นร้อยละของ สารกลุ่ม BTEX ในน้ำมันเบนซิน	7
3	ทางที่จะได้รับสารมลพิษ.....	10
4	กลไกการดูดซับของสารบนพื้นผิวตัวดูดซับ.....	19
5	Langmuir Isotherm	21
6	Freundlich Isotherm.....	22
7	ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานกระดาษ	31
8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_{sa} กับระยะเวลาการดูดซับ ตามสมการ Freundlich ของตัวดูดซับ S7	49
9	ตัวอย่างไอโซเทอมของ Freundlich ในการดูดซับดูดซับ <i>o</i> -Xylene ของ ตัวดูดซับ S7	57
10	ตัวอย่างไอโซเทอมของ Langmuir ในการดูดซับ <i>o</i> -Xylene ของตัวดูดซับ S7	57
11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log K_{sa}$ กับ $\log VP$	59
12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log K_{sa}$ กับ MW.....	60
13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log K_{sa}$ กับ $\log K_{ow}$	60
14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_{sa} กับระยะเวลาการดูดซับตามสมการ Freundlich ของตัวดูดซับ AC	62
15	ลักษณะกากตะกอนเชื้อกระดาษที่ผ่านการอบให้แห้งก่อนนำไปเผา.....	80
16	ลักษณะกากตะกอนเชื้อกระดาษที่ผ่านการอบให้แห้งก่อนนำไปเผากับตัวดูดซับ S7 .	80
17	ลักษณะของตัวดูดซับจากกากตะกอนเชื้อกระดาษ S1 – S7	81
18	ไอโซเทอมของ Freundlich ในการดูดซับ Benzene ของตัวดูดซับ S1-S8	99
19	ไอโซเทอมของ Langmuir ในการดูดซับ Benzene ของตัวดูดซับ S1-S8.....	100
20	ไอโซเทอมของ Freundlich ในการดูดซับ Toluene ของตัวดูดซับ S1-S8.....	101
21	ไอโซเทอมของ Langmuir ในการดูดซับ Toluene ของตัวดูดซับ S1-S8.....	102
22	ไอโซเทอมของ Freundlich ในการดูดซับ Ethylbenzene ของตัวดูดซับ S1-S8	103

ภาพที่		หน้า
23	ไอโซเทอมของ Langmuir ในการดูดซับ Ethylbenzene ของตัวดูดซับ S1-S8.....	104
24	ไอโซเทอมของ Freundlich ในการดูดซับ <i>m,p</i> -Xylene ของตัวดูดซับ S1-S8	105
25	ไอโซเทอมของ Langmuir ในการดูดซับ <i>m,p</i> -Xylene ของตัวดูดซับ S1-S8.....	106
26	ไอโซเทอมของ Freundlich ในการดูดซับ <i>o</i> -Xylene ของตัวดูดซับ S1-S8	107
27	ไอโซเทอมของ Langmuir ในการดูดซับ <i>o</i> -Xylene ของตัวดูดซับ S1-S8.....	108
28	ไอโซเทอมของ Freundlich ในการดูดซับ Benzene ของตัวดูดซับ AC และ S7	109
29	ไอโซเทอมของ Freundlich ในการดูดซับ Toluene ของตัวดูดซับ AC และ S7.....	109
30	ไอโซเทอมของ Freundlich ในการดูดซับ Ethylbenzene ของตัวดูดซับ AC และ S7	109
31	ไอโซเทอมของ Freundlich ในการดูดซับ Xylenes ของตัวดูดซับ AC และ S7	110
32	ไอโซเทอมของ Langmuir ในการดูดซับ Benzene ของตัวดูดซับ AC และ S7	110
33	ไอโซเทอมของ Langmuir ในการดูดซับ Toluene ของตัวดูดซับ AC และ S7.....	110
34	ไอโซเทอมของ Langmuir ในการดูดซับ Ethylbenzene ของตัวดูดซับ AC และ S7...	111
35	ไอโซเทอมของ Langmuir ในการดูดซับ Xylenes ของตัวดูดซับ AC และ S7.....	111

คำอธิบายคำย่อ

คำย่อ	คำเต็ม
AC	= Activated Carbon
C	= Ceiling Exposure Limit
CNS	= Central Nervous System
C_a	= Concentration in air
C_s	= Concentration in sorbent
FID	= Flame Ionization Detector
GC	= Gas Chromatograph
H	= Henry 's Law Constant
K_{ow}	= Octanol/Water Partition Coefficient
K_{sa}	= Sorbent/Air Partition Coefficient
MTBE	= Methyl <i>Tertiary</i> -Butyl Ether
MW	= Molecular Weight
PAHs	= Polycyclic Aromatic Hydrocarbon
SD	= Standard Deviation
STEL	= Short-Term Exposure Limit
S1	= ตัวดูดซับที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขนาด 300–500 ไมโครเมตร
S2	= ตัวดูดซับที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขนาด 500-1,000 ไมโครเมตร
S3	= ตัวดูดซับที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขนาด 300–500 ไมโครเมตร
S4	= ตัวดูดซับที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขนาด 500-1,000 ไมโครเมตร
S5	= ตัวดูดซับที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขนาด 300–500 ไมโครเมตร

คำย่อ	คำเต็ม
S6	= ตัวดูดซับที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขนาด 500-1,000 ไมโครเมตร
S7	= ตัวดูดซับที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขนาด 300-500 ไมโครเมตร
S8	= ตัวดูดซับที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขนาด 500-1,000 ไมโครเมตร
TLV	= Threshold Limit Value
TWA	= Time Weight Average
$t_{1/2}$	= Half - life
U.S.EPA.	= United States Environmental Protection Agency
VOCs	= Volatile Organic Compounds
VP	= Vapor Pressure
X/m	= The Maximum Adsorption Per Unit Mass

บทที่ 1

บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สารเคมีกลุ่ม BTEX ประกอบด้วยสาร 4 ชนิด ได้แก่ เบนซีน (Benzene) โทลูอิน (Toluene) เอทิลเบนซีน (Ethylbenzene) และไซลีน (Xylenes) สำหรับ Xylenes สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 isomers คือ *o*-Xylene *m*-Xylene และ *p*-Xylene สารกลุ่ม BTEX เป็นสารกลุ่มที่มีความดันไอสูง ระเหยได้ง่าย จึงจัดสารกลุ่มนี้อยู่ในกลุ่มสารประกอบอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds หรือ VOCs) ในปัจจุบันสารกลุ่ม BTEX ได้ถูกนำมาใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น Benzene ใช้ในการผลิตยางสังเคราะห์ พลาสติก ไนลอน สารฆ่าแมลง และสี ส่วน Ethylbenzene ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสี หมึก พลาสติก และสารฆ่าแมลง สำหรับ Toluene ใช้เป็นตัวทำละลายในการผลิตสี น้ำมัน เรซิน กาว และการเคลือบ ขณะที่ Xylenes ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตยางหนัง และการพิมพ์ (Technical Outreach Services for Communities [TOSC], 2001) นอกจากนี้ ยังพบว่าสารกลุ่มนี้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของน้ำมันปิโตรเลียม ได้แก่ น้ำมันดิบ น้ำมันดีเซล และน้ำมันเบนซินอีกด้วย

การศึกษาที่ผ่านมาพบว่าสารประกอบอินทรีย์ระเหยกลุ่มนี้แพร่กระจายอยู่ในอากาศ โดยเฉพาะในเขตพื้นที่โรงงานอุตสาหกรรม และชุมชนเมืองในบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น (Pao *et al.*, 2008) ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศในเขตชุมชนเมืองเขตปกครองพิเศษฮ่องกง (Lee *et al.*, 2002) พบว่ามีสารกลุ่ม BTEX ปนเปื้อนอยู่ในอากาศ โดยมีความเข้มข้นเฉลี่ยของสาร Benzene เท่ากับ 0.013 ไมโครกรัม/ลิตร Toluene เท่ากับ 0.098 ไมโครกรัม/ลิตร Ethylbenzene เท่ากับ 0.014 ไมโครกรัม/ลิตร *m,p*-Xylene เท่ากับ 0.019 ไมโครกรัม/ลิตร และ *o*-Xylene เท่ากับ 0.009 ไมโครกรัม/ลิตร ส่วน Hinwood *et al.* (2007) ได้รายงานผลตรวจวัดปริมาณสารกลุ่ม BTEX ในอากาศในพื้นที่ชุมชนเมืองของประเทศออสเตรเลีย 4 แห่ง พบว่ามีความเข้มข้นของ Benzene อยู่ระหว่าง 0.04–23.8 ไมโครกรัม/ลิตร Toluene อยู่ระหว่าง 0.03–2,120 ไมโครกรัม/ลิตร Ethylbenzene อยู่ระหว่าง 0.03–119 ไมโครกรัม/ลิตร และ Xylenes อยู่ระหว่าง 0.04–697 ไมโครกรัม/ลิตร

สำหรับการศึกษาในประเทศไทยผลการศึกษาศึกษาสำรวจโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแห่งหนึ่งในเขตจังหวัดระยองที่มีการใช้สารทำละลายอินทรีย์ในกระบวนการผลิตทั้งในประเภท

สารกลุ่มอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic Hydrocarbon) และสารกลุ่มอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic Hydrocarbon) พบว่ามีสารกลุ่มดังกล่าวในอากาศบริเวณที่ทำงาน (นลินีและคณะ, 2540) นอกจากนี้ Keprasertsup *et al.* (2003) ได้ทำการเก็บตัวอย่างอากาศในบริเวณบิมน้ำมัน และบริเวณถนนในกรุงเทพมหานคร พบว่า ที่เกาะกลางของแท่นเติมน้ำมันมีความเข้มข้นเฉลี่ยของ Benzene เท่ากับ 0.069 ± 0.107 ไมโครกรัม/ลิตร Toluene เท่ากับ 0.216 ± 0.257 ไมโครกรัม/ลิตร Ethylbenzene เท่ากับ 0.027 ± 0.026 ไมโครกรัม/ลิตร และ Xylenes เท่ากับ 0.101 ± 0.114 ไมโครกรัม/ลิตร ส่วนที่บริเวณแยกถนนมีความเข้มข้นเฉลี่ยของ Benzene เท่ากับ 0.016 ± 0.009 ไมโครกรัม/ลิตร Toluene เท่ากับ 0.083 ± 0.048 ไมโครกรัม/ลิตร Ethylbenzene เท่ากับ 0.013 ± 0.009 ไมโครกรัม/ลิตร และ Xylenes เท่ากับ 0.054 ± 0.049 ไมโครกรัม/ลิตร

ในการตรวจวัดความเข้มข้นของสารกลุ่ม BTEX ในอากาศนั้น มักทำโดยใช้ตัวดูดซับ (Adsorbent) เก็บตัวอย่างก่อนนำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ สำหรับตัวดูดซับที่ใช้ส่วนมากคือ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ซึ่งสามารถผลิตได้จากวัสดุหลายชนิด โดยเฉพาะพวกอินทรีย์วัตถุที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น พวกเซลลูโลสที่มาจากพืช ได้แก่ ชานอ้อย (ณัฐยา, 2545) เปลือกข้าว (Ajmal *et al.*, 2003) กากเมล็ดกาแฟ (Sae-ung and Boonamnuayvitaya, 2003) เปลือกของผลไม้หรือพืชบางชนิด เช่น วอลนัท (Martinez *et al.*, 2006) พีแคน แอลมอนด์ (Bansode *et al.*, 2003) นอกจากนี้ ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (Chena *et al.*, 2002; Zhai *et al.*, 2004; Yu and Zhong, 2006) และกากตะกอนจากการผลิตเยื่อกระดาษก็สามารถนำมาผลิตเป็นตัวดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่นการศึกษาของ Khalili *et al.* (2002) พบว่า ตัวดูดซับที่ผลิตจากกากตะกอนการผลิตเยื่อกระดาษมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟินอลได้ 65 – 70% ส่วนการศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสียในการดูดซับอะซีโตนและโทลูอินของ Rio *et al.* (2005) พบว่า สามารถดูดซับอะซีโตน และโทลูอินได้ 12-51 และ 13-54 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่าน ตามลำดับ

ในงานวิจัยนี้ได้นำกากตะกอนเยื่อกระดาษ (Paper Sludge) ซึ่งได้จากการกรองน้ำเสียเบื้องต้นก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตกระดาษมาใช้เป็นวัสดุดิบในการผลิตตัวดูดซับ สำหรับกากตะกอนเยื่อกระดาษนี้คือส่วนของเยื่อกระดาษที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลสอยู่เป็นจำนวนมาก (ชวิศร์ และจีมา, 2547) ตัวดูดซับที่ผลิตได้จะถูกนำไปใช้ผลิตเป็นตัวดูดซับในหลอดเก็บตัวอย่าง สำหรับการตรวจวัดและเก็บตัวอย่างสารกลุ่ม BTEX ในอากาศแทนตัวดูดซับที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ นอกจากนั้นการนำกากตะกอนเยื่อกระดาษนี้มาใช้ยังเป็นการนำของเสียกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ทั้งยังช่วยลดปริมาณ และค่าใช้จ่ายในการจัดการกากซึ่งเป็นของเสียให้แก่โรงงานอุตสาหกรรมกระดาษด้วย

2. ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อทำตัวดูดซับสารกลุ่ม BTEX ในอากาศจากกากตะกอนเยื่อกระดาษซึ่งได้จากการกรองน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานกระดาษ

2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ผลิตจากกากตะกอนเยื่อกระดาษกับถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในหลอดเก็บตัวอย่างสารกลุ่ม BTEX ในอากาศที่มีจำหน่าย

3. สมมติฐานของการศึกษา

กากตะกอนเยื่อกระดาษจากน้ำเสียของโรงงานกระดาษมีองค์ประกอบของเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงอาจนำมาใช้ทำตัวดูดซับที่มีคุณสมบัติเป็นถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เช่นเดียวกับวัสดุทางเกษตรอื่น ๆ เช่น กะลามะพร้าว ขี้เลื่อย หรือ ชัง เป็นต้น และตัวดูดซับที่ผลิตจากกากตะกอนเยื่อกระดาษนี้สามารถดูดซับสารกลุ่ม BTEX ที่ปนเปื้อนในอากาศได้ โดยคุณสมบัติของการดูดซับสารกลุ่ม BTEX นั้นขึ้นอยู่กับขนาดของตัวดูดซับ รวมทั้ง อุณหภูมิที่ใช้ในการทำตัวดูดซับด้วย

4. ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ในอากาศโดยตัวดูดซับขนาดระหว่าง 300 – 500 ไมโครเมตร และ 500 – 1,000 ไมโครเมตร ที่ทำจากกากตะกอนเยื่อกระดาษซึ่งผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน (Carbonization) ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 1 และ 2 ชั่วโมง และประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ดูดซับสารกลุ่ม BTEX ได้ดีที่สุดจะถูกเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในหลอดเก็บตัวอย่างอากาศชนิด ORBO-32 ขนาดเล็กของบริษัท SUPELCO ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว

5. ขั้นตอนการศึกษา

- 5.1 ศึกษา รวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 5.2 จัดเตรียมวิธีการ อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่จำเป็นต้องใช้ในการวิจัย
- 5.3 ทำตัวดูดซับที่ผลิตจากกากกระดาษในสภาวะที่กำหนด และทดสอบการปนเปื้อน
- 5.4 เตรียมการทดลอง โดยแบ่งตัวดูดซับออกเป็นขนาดต่าง ๆ ตามที่กำหนด
- 5.5 ทดลองประสิทธิภาพการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับ แต่ละขนาดที่ได้จากแต่ละอุณหภูมิและแต่ละเวลาที่ผลิต

5.6 ทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับที่ผลิตจากกากตะกอนเยื่อกระดาษของโรงงานกระดาษกับตัวดูดซับที่เป็นถ่านกัมมันต์ซึ่งบรรจุในหลอดเก็บตัวอย่างอากาศที่มีจำหน่าย

5.7 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

5.8 เขียนรายงานการวิจัย

6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อเป็นแนวทางในการใช้กากตะกอนเยื่อกระดาษของโรงงานกระดาษซึ่งเป็นกากของเสียมาใช้ทำตัวดูดซับในหลอดเก็บตัวอย่างอากาศ รวมทั้ง อาจนำไปสู่การใช้ทำอุปกรณ์ในการบำบัดมลสารในอากาศต่อไป

บทที่ 2

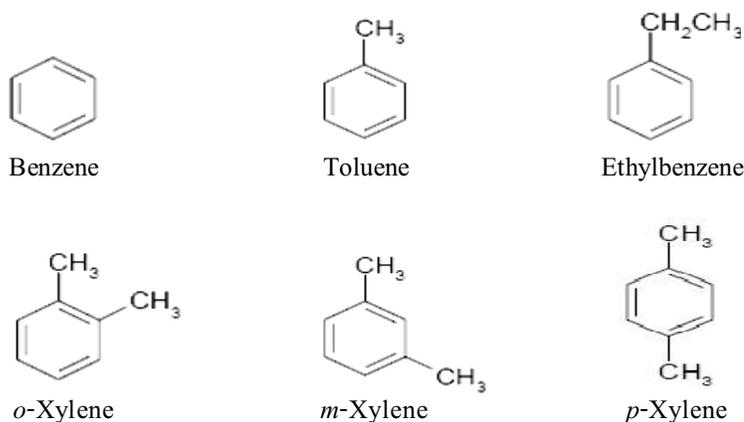
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. สารกลุ่ม BTEX

BTEX เป็นชื่อย่อของสาร เบนซีน (Benzene) โทลูอิน (Toluene) เอทิลเบนซีน (Ethylbenzene) และไซลีน (Xylenes) โดยสาร Xylenes แบ่งออกเป็น 3 isomers คือ *o*-Xylene *m*-Xylene และ *p*-Xylene สารในกลุ่มนี้จัดเป็นสารประกอบอินทรีย์ระเหยที่มีการนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง และยังเป็นองค์ประกอบในน้ำมันปิโตรเลียม จึงทำให้พบการแพร่กระจายของสารกลุ่มนี้ได้ทั้งในเขตโรงงานอุตสาหกรรม พื้นที่ใกล้เคียง และบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น การสะสมของสารในสิ่งแวดล้อมอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศได้ในระยะยาว

1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมี

สารเคมีกลุ่ม BTEX เป็นสารไฮโดรคาร์บอนประเภท Monoaromatic ที่มีสมบัติเป็นสารไวไฟ สถานะเป็นของเหลว ไม่มีสี มีกลิ่น สำหรับโครงสร้างทางเคมี และสมบัติทางกายภาพและเคมี แสดงในภาพที่ 1 และตารางที่ 1 (Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], 2004)



ภาพที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่ม BTEX

ที่มา: ATSDR (2004)

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของสารกลุ่ม BTEX

สมบัติทางกายภาพและเคมี	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	<i>o</i> -Xylene	<i>m</i> -Xylene	<i>p</i> -Xylene
สูตรทางเคมี*	C ₆ H ₆	C ₇ H ₈	C ₈ H ₁₀			
น้ำหนักโมเลกุล (กรัม/โมล)**	78.11	92.14	106.17	106.17	106.17	106.17
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)**	80.1	110.6	136.2	144.4	139.1	138.4
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)**	5.5	-95	-94.4	-25.2	-47.9	13.3
ค่าการละลายน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร)*	1,700	515	152	175	-	198
ความดันไอที่ 20 องศา เซลเซียส (มิลลิเมตรปรอท)**	95.2	28.4	9.6	6.7	8.4	8.8
ความหนาแน่นจำเพาะที่ 20 องศาเซลเซียส (กรัม/มิลลิตร)*	0.8787	0.8669	0.8670	0.8802	0.8642	0.8610
log K _{ow} ที่ 20 องศาเซลเซียส*	2.13	2.69	3.15	2.77	3.18	3.15
Henry's law constant ที่ 25 องศาเซลเซียส (กิโปลาสคาล ·ลูกบาศก์เมตร/โมล)*	0.55	0.67	0.80	0.50	0.70	0.71
ความเป็นพิษ*	ไม่มีพิษ	ไม่มีพิษ	ไม่มีพิษ	ไม่มีพิษ	ไม่มีพิษ	ไม่มีพิษ
Half-Life (Photolysis)***	13.4 วัน	3 ชั่วโมง	0.5 ชั่วโมง - 1 วัน	15 ชั่วโมง	10 ชั่วโมง	18 ชั่วโมง

ที่มา : * Christensen and Elton (1998)

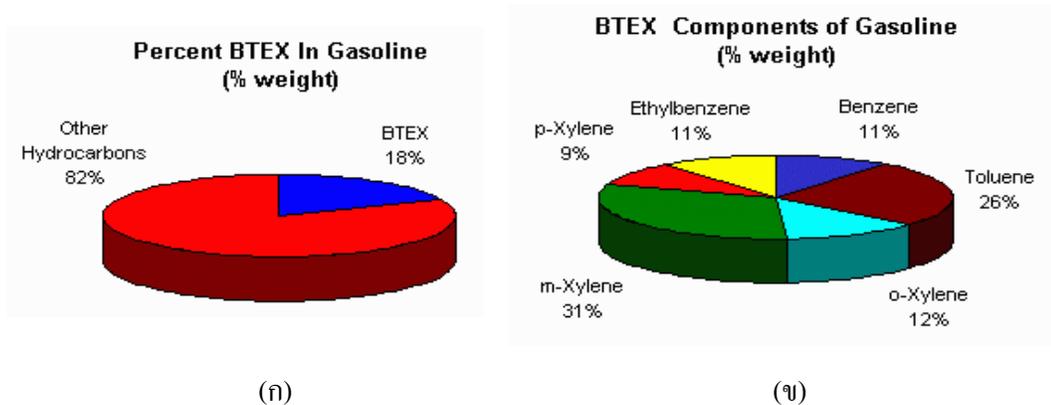
** National Institute for Occupational Safety and Health [NIOSH] (2003)

*** Spectrum Lab. (2003)

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าสารกลุ่ม BTEX มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างต่ำอยู่ระหว่าง 78.12 – 106.17 กรัม/โมล และมีความดันไอที่ 20 องศาเซลเซียส ตั้งแต่ 6.6 – 95.6 มิลลิเมตรปรอท ซึ่งแสดงว่าสารกลุ่มนี้มีความดันไอสูง ระเหยได้ง่าย ทำให้จัดอยู่ในกลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds; VOCs) (Christensen and Elton, 1998)

1.2 แหล่งที่มา

สารกลุ่ม BTEX เป็นองค์ประกอบของน้ำมันปิโตรเลียม จึงพบได้ในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ทำจากน้ำมันปิโตรเลียม ไม่ว่าจะเป็น น้ำมันดิบ น้ำมันดีเซล และน้ำมันเบนซิน (Gasoline) ยกตัวอย่างเช่น ในน้ำมันเบนซินจะพบสารกลุ่ม BTEX เป็นองค์ประกอบถึงร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 2 (ก) ซึ่งองค์ประกอบต่าง ๆ ของสารกลุ่ม BTEX ที่พบในน้ำมันเบนซินนั้น แบ่งเป็นสาร Benzene Toluene Ethylbenzene *o*-Xylene *m*-Xylene และ *p*-Xylene ร้อยละ 11 26 11 12 31 และ 9 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังภาพที่ 2 (ข) (Christensen and Elton, 1998)



ภาพที่ 2 ปริมาณสารกลุ่ม BTEX ในน้ำมันเบนซิน และองค์ประกอบเป็นร้อยละของสารกลุ่ม BTEX ในน้ำมันเบนซิน

ที่มา: Christensen and Elton (1998)

นอกจากสารกลุ่ม BTEX เป็นส่วนประกอบในน้ำมันจึงอาจทำให้พบการแพร่กระจายของสารกลุ่มนี้จากการคมนาคมขนส่งแล้ว สารกลุ่ม BTEX ยังถูกนำมาใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น Benzene ถูกนำมาใช้ในการผลิตยางสังเคราะห์ พลาสติก ไนลอน สารฆ่าแมลง และสี Ethylbenzene ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสี หมึก พลาสติก และสารฆ่าแมลง Toluene ใช้เป็นตัวทำละลายในการผลิตสี แลกเกอร์ น้ำมัน เรซิน น้ำยาทำความสะอาด กาว และการเคลือบ รวมทั้งใช้ในการผลิตสารเคมีชนิดอื่น วัตถุระเบิด สี และสารประกอบอื่นๆ Xylenes ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตยาง หนัง ยา สีย้อม สารกำจัดแมลง แลกเกอร์ สารเคลือบเงา น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน และการพิมพ์ (TOSC, 2001)

1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่กระจายของสารในสิ่งแวดล้อม

สารกลุ่ม BTEX เป็นสารที่มีความดันไอสูง จึงทำให้สารกลุ่มนี้สามารถระเหยเข้าสู่อากาศได้ง่าย การแพร่กระจายของสารสู่อากาศนั้นจะขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพและเคมี ดังนี้

1.3.1 ค่า Henry 's law constant (H)

Henry 's law constant เป็นสมบัติของสารเคมีที่แสดงถึงการแบ่งส่วนระหว่างแก๊สกับของเหลวที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ค่า H มักถูกนำไปใช้ในการอธิบายถึงการเคลื่อนที่ของสารจากน้ำสู่อากาศ ซึ่งจะช่วยทำนายพฤติกรรมของสารประกอบอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม ถ้าค่านี้สูงหมายถึง สารจะเคลื่อนที่เข้าสู่ส่วนที่เป็นอากาศได้มากกว่า สำหรับสารกลุ่ม BTEX มีค่า Henry 's law constant จากสูงไปต่ำดังนี้ Ethylbenzene (0.8) > *p*-Xylene (0.71) > *m*-Xylene (0.7) > Toluene (0.67) > Benzene (0.55) > *o*-Xylene (0.5) กิโลปาสกาล.ลูกบาศก์เมตร/โมล (ตารางที่ 1)

1.3.2 ค่าความดันไอของสาร (Vapor pressure)

ความดันไอของสารเป็นความดันในสถานะสมดุลของสารในสถานะแก๊สที่อุณหภูมิคงที่ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรปรอท หรือ torr (มีค่าเท่ากับมิลลิเมตรปรอท) ความดันไอของสารเป็นค่าที่แสดงถึงแนวโน้มในการระเหยของสารทั้งที่อยู่ในสถานะของแข็งหรือของเหลว ถ้าสารมีค่าความดันไอสูงจะหมายถึงสารสามารถระเหยและอยู่ในสถานะแก๊สได้มาก โดยทั่วไปสารที่อยู่บน/ในดิน น้ำ พืช หรือสัตว์ จะระเหยและเข้าสู่อากาศได้ เนื่องจากสารมีความดันไอสูง

สารกลุ่ม BTEX มีค่าความดันไอยู่ระหว่าง 6.6 – 95.2 torr (ตารางที่ 1) ซึ่ง Ney (1990) ได้แบ่งสารออกเป็น 3 กลุ่ม ตามค่าความดันไอของสาร ซึ่งจากค่าความดันไอของสารกลุ่ม BTEX นี้จะจัดว่ากลุ่มนี้มีค่าความดันไอสูง (ค่าความดันไอมากกว่า 0.01 torr) สามารถระเหยได้ดี ถูกดูดซับในดินได้น้อย และอาจสลายตัวโดยแสงแดด จากค่าความดันไอของสารที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่าความดันไอของ Benzene > Toluene > Ethylbenzene > *p*-Xylene > *m*-Xylene > *o*-Xylene ดังนั้นในเบื้องต้นจึงประเมินว่า สาร Benzene ซึ่งระเหยได้ดีที่สุดจะถูกดูดซับไว้ในดินได้น้อยที่สุด รองลงไปคือ Toluene Ethylbenzene *p*-Xylene *m*-Xylene และ *o*-Xylene ตามลำดับ

1.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนระหว่างออกคานอลกับน้ำ (Octanol - water partition coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนระหว่างออกคานอลกับน้ำ หรือ K_{ow} เป็นค่าที่ไม่มีหน่วย ใช้เป็นตัวชี้วัดการดูดซับสารในดินและการสะสมของสารในสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะความสามารถในการสะสมสารในเนื้อเยื่อไขมันของสิ่งมีชีวิต เนื่องจากออกคานอลเป็นสารที่มีลักษณะใกล้เคียงกับชนิดของไขมันที่อยู่ในสิ่งมีชีวิต ค่า K_{ow} จะแปรผกผันกับค่าการละลายน้ำ ซึ่งมักใช้ในการประเมินความสามารถในการละลายน้ำของสารทำให้ทราบแนวโน้มว่าสารจะถูกดูดซับในดิน และสะสมในสิ่งมีชีวิตมากน้อยเพียงใด จากค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนระหว่างออกคานอลกับน้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนระหว่างออกคานอลกับน้ำของ m -Xylene > p -Xylene = Ethylbenzene > o -Xylene > Toluene > Benzene (ตารางที่ 1) แสดงว่า m -Xylene จะถูกดูดซับในดินได้ดีที่สุด รองลงไปคือ p -Xylene Ethylbenzene o -Xylene Toluene และ Benzene ตามลำดับ

1.3.4 กระบวนการสลายตัวเนื่องจากแสงแดด (Photolysis)

สารเคมีสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้โดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ (Phototransform) การเกิด Phototransform ของสารสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในอากาศ ดิน และน้ำ ผลของกระบวนการเปลี่ยนรูปโดยพลังงานแสงอาทิตย์ (Photolytic) ทำให้ปริมาณสารที่พบลดลงอย่างรวดเร็ว สำหรับการสลายตัวของสารอาจขึ้นกับกระบวนการอื่นอีก เช่น กระบวนการ Hydrolysis หรือ การย่อยสลายของจุลินทรีย์ในธรรมชาติ ระยะเวลาที่ทำให้สารเคมีมีปริมาณลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณเริ่มต้น เรียกว่า ครึ่งชีวิต (Half-life, $t_{1/2}$) สำหรับอัตราการสลายตัวของสารเนื่องจากแสงแดดสามารถใช้กำหนดปริมาณของสารในสิ่งแวดล้อมได้ จากตารางที่ 1 พบว่าสารกลุ่ม BTEX มีค่าครึ่งชีวิตอยู่ระหว่าง 0.5 ชั่วโมง – 13.4 วัน ดังนั้น จึงประเมินว่าสารกลุ่มนี้อาจสลายตัวจากกระบวนการ Photolysis ได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีค่าครึ่งชีวิตของสารน้อยกว่า 30 วัน (Ney, 1990)

1.4 ความเป็นพิษของสารกลุ่ม BTEX

เนื่องจากสารกลุ่ม BTEX เป็นองค์ประกอบในน้ำมัน ทำให้พบการแพร่กระจายได้ อยู่ทั่วไป โดยเฉพาะในอากาศในบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้คนมีโอกาสรับ สารกลุ่มนี้ได้เสมอ สารกลุ่ม BTEX สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ ทางปาก ทางลมหายใจ และทางผิวหนัง ดังภาพที่ 3 โดย

- 1) การบริโภคพืช หรือน้ำที่ปนเปื้อนด้วยสารกลุ่ม BTEX
- 2) การหายใจโดยรับเอาไอระเหยจากสารที่ปนเปื้อนในดิน น้ำ หรืออากาศขณะเติมน้ำมัน
- 3) การได้รับทางผิวหนัง โดยสารที่สัมผัสกับผิวหนังจะถูกดูดซับเข้าไปในผิวหนัง การสัมผัสกับส่วนของร่างกายอาจเกิดจากสารกระเด็นมาถูกผิวหนัง หรือการอาบน้ำที่มีสารกลุ่ม BTEX ปนเปื้อนอยู่



ภาพที่ 3 ทางที่จะได้รับสารมลพิษ
ที่มา : TOSC (2001)

ความเป็นพิษของสารกลุ่ม BTEX หากสัมผัสหรือได้รับสารเป็นปริมาณมาก ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ จะทำให้เกิดความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน (Acute effect) คือ ทำให้ผิวหนังที่สัมผัสเกิดการระคายเคือง ส่งผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง (Central Nervous System; CNS) และระบบทางเดินหายใจ แต่หากได้รับสารติดต่อกันเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดการสะสมและเป็นพิษแบบเรื้อรัง (Chronic effect) โดยจะมีผลต่อไต ตับ หัวใจ ปอด ระบบประสาท และระบบเลือด (Bond J.A., 1978) สารกลุ่ม BTEX แต่ละชนิดแสดงความเป็นพิษแตกต่างกัน ดังนี้

1.4.1 Benzene

1.4.1.1 ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน

การได้รับทางผิวหนังจะทำให้เกิดการระคายเคือง และอาจเป็นสาเหตุของอาการภูมิแพ้ หากสัมผัสตาจะทำให้กระจกตาบวมขุ่นชั่วคราว และอาจเกิดการมองเห็นผิดปกติ ส่วนการได้รับทางการหายใจจะทำให้เกิดการระคายเคืองทางเดินหายใจ กดระบบประสาทส่วนกลาง มีอาการง่วงงุน เชื่องซึม ปวดศีรษะ อาเจียน การได้รับในความเข้มข้นสูงๆ ทำให้ชัก โคม่า และเสียชีวิตจากการเต้นผิดปกติของหัวใจ สำหรับการได้รับทางปากจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินอาหาร คลื่นไส้ อาเจียน ถ่ายเหลว อาจเป็นอันตรายต่อระบบประสาทส่วนกลาง ปวดศีรษะ ง่วงซึม ตาพร่า อ่อนเพลีย สัน ซัก หมดสติ หยุดหายใจและเสียชีวิต (กองอาชีวอนามัย, 2456)

1.4.1.2 ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง

Benzene เป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogen) และเป็นอันตรายต่ออวัยวะที่สร้างเม็ดเลือด ตับ ไต ระบบภูมิคุ้มกันมะเร็งเม็ดเลือดขาว (Leukemia) เกิดภาวะโลหิตจาง (Aplastic anemia) จนอาจทำให้เสียชีวิตได้ นอกจากนี้ Benzene ยังอาจเป็นสารก่อกลายพันธุ์ในมนุษย์ (Mutagen) (Christensen and Elton, 1998)

1.4.1.3 การย่อยสลายของสารในร่างกาย

เมื่อสารเข้าสู่ร่างกาย ตับจะทำหน้าที่เปลี่ยนรูปสาร โดยจะเปลี่ยน Benzene เป็นฟีนอล (Phenol) ก่อนถูกขับออกทางปัสสาวะ (Rampel *et al.*, 1990)

1.4.2 Toluene

1.4.2.1 ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน

การได้รับทางผิวหนังหรือตาจะทำให้ผิวหนังแห้งและเกิดอาการระคายเคือง ส่วนการได้รับทางการหายใจจะทำให้เกิดการระคายเคืองระบบทางเดินหายใจ Toluene มีผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง ทำให้เกิดอาการอ่อนเพลีย ไม่มีแรง ปวดศีรษะ มึนงง ผิวหนังชา คลื่นไส้ อาเจียน หมดสติ อาจถึงเสียชีวิต บางคนอาจมีอาการเกี่ยวกับความผิดปกติของตับ สำหรับการได้รับทางปาก จะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง ถ่ายเหลว วิงเวียน อ่อนเพลียและหมดสติ (กรมควบคุมมลพิษ, 2547)

1.4.2.2 ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง

เมื่อได้รับติดต่อกันเวลานาน Toluene จะทำลายสมอง และมีผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง (Christensen and Elton, 1998)

1.4.2.3 การย่อยสลายของสารในร่างกาย

เมื่อสารเข้าสู่ร่างกาย ตับจะทำหน้าที่เปลี่ยนรูปสาร Toluene ให้กลายเป็น Benzyl alcohol และ Benzoic acid ก่อนถูกขับออกทางปัสสาวะ (ประสงค์ และ ไมตรี, 2545)

1.4.3 Ethylbenzene

1.4.3.1 ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน

การสัมผัสกับผิวหนังหรือตาจะทำให้เกิดการระคายเคือง และหากได้รับทางการหายใจจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเยื่อเมือกของระบบทางเดินหายใจ ส่วนบน และกดประสาทส่วนกลาง สำหรับการได้รับทางปากจะทำให้เกิดการระคายเคืองที่ระบบทางเดินอาหาร มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดศีรษะ (NOVA Chemical, 2006)

1.4.3.2 ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง

อวัยวะเป้าหมายเมื่อได้รับสารแบบเรื้อรัง คือ ระบบประสาทส่วนกลาง ปอด ทรวงอก ระบบหายใจ ไต ตับ กระเพาะปัสสาวะ อวัยวะสืบพันธุ์ นอกจากนี้ Ethylbenzene ยังเป็นอันตรายต่อทารกในครรภ์

1.4.3.3 การย่อยสลายของสารในร่างกาย

เมื่อสารเข้าสู่ร่างกาย ดับจะทำหน้าที่เปลี่ยนรูปสารโดยเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของกรดแมนเดิลิก (Mandelic Acid) ก่อนถูกขับออกทางปัสสาวะ (Rampel *et al.*, 1990)

1.4.4 Xylenes

1.4.4.1 ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน

การสัมผัสผิวหนังหรือตาจะทำให้เกิดการระคายเคือง และหากได้รับทางการหายใจจะทำให้เกิดการระคายเคือง หายใจติดขัด ถ้าได้รับในระดับความเข้มข้นสูง ๆ จะทำให้มีอันตราย เวียนหัวเป็นลมและอาจเสียชีวิต สำหรับการได้รับทางปาก จะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง ปวดท้อง และเบื่ออาหาร (กองอาชีวอนามัย, 2456)

1.4.4.2 ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง

Xylenes อาจมีผลต่อการเติบโตของทารกในครรภ์ และมีอาการของพิษแบบเรื้อรังอื่นๆ ได้แก่ ไชกระดูกถูกทำลาย เนื่องจากจำนวนเม็ดเลือดแดงลดลง Xylenes ทำลายตับไต ทำให้ผิวหนังแห้งแตก ความจำเสื่อม สมาธิสั้น รวมทั้ง อาจจะทำลายสมอง และเยื่อหุ้มตา

1.4.4.3 การย่อยสลายของสารในร่างกาย

เมื่อสารเข้าสู่ร่างกาย ดับจะทำหน้าที่เปลี่ยนรูปสารไปเป็น *o*-, *m*- หรือ *p*-toluic acid ก่อนขับออกทางปัสสาวะ หรือสารอาจจะรวมตัวกับ Glycine แล้วถูกขับออกมาในรูป Methylhippuric acid (Irwin, 1997)

1.5 การกำหนดค่ามาตรฐานของสารกลุ่ม BTEX ที่อนุญาตให้มีได้ในอากาศ

หน่วยงานด้านความปลอดภัยและสุขภาพในการประกอบอาชีพได้กำหนดค่ามาตรฐานของสารกลุ่ม BTEX ที่อนุญาตให้มีได้ในอากาศของสถานประกอบการ เช่น ประเทศญี่ปุ่นยังได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศภายในอาคารของ Toluene และ Xylenes ไว้เท่ากับ 260 และ 870 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ (Amagai *et al.*, 2002) สหรัฐอเมริกาได้กำหนดความเข้มข้นของสารกลุ่ม BTEX ไว้ดังที่แสดงในตารางที่ 2 ส่วนประเทศไทยยังไม่ได้กำหนดมาตรฐานความเข้มข้นของสารที่ยอมให้มีได้ในบรรยากาศทั่วไปแต่มีมาตรฐานความปลอดภัยในการทำงาน ซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 2 ใดๆก็ดี บางประเทศได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศ

ของสารกลุ่ม BTEX ไว้ได้แก่ ประเทศญี่ปุ่นได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศของ Benzene โดยมีค่าเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 3 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร และในยุโรปกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 5 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 2 ค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศภายในสถานประกอบการของสารกลุ่ม BTEX

สาร	ความเข้มข้นของสาร (หน่วย : มิลลิกรัม/ลิตร)						
	ไทย*	OSHA**	NIOSH**			ACGIH**	
	ค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาทำงานปกติ	TWA	TWA	C	STEL	TLV	STEL
Benzene	10	1	0.1 ^a	1	-	10 ^b	-
Toluene	200	200	100	-	150	50 (skin)	-
Ethylbenzene	-	100	100	-	125	100	125
<i>o</i> - Xylene	100	100	100 ^c	-	150	100	150
<i>m</i> - Xylene	100	100	100	-	-	100	150
<i>p</i> - Xylene	100	100	100	-	-	100	150

^a เป็นสารก่อมะเร็ง, ^b อาจจะเป็นสารก่อมะเร็ง, ^c อยู่ในกลุ่มยาฆ่าแมลงกลุ่มที่ 1

หมายเหตุ OSHA : The Occupational Safety and Health Administration

NIOSH : The National Institute for Occupational Safety and Health

ACGIH : The American Conference of Governmental Industrial Hygienists

ที่มา : * ประกาศกระทรวงมหาดไทยเรื่องความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับภาวะแวดล้อม(2520)

** NIOSH (2003)

2. การศึกษาการแพร่กระจายของสารกลุ่ม BTEX ในอากาศ

เมื่อสารกลุ่ม BTEX ถูกนำไปใช้เพื่อทำผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย อีกทั้งสารกลุ่มนี้ยังเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของน้ำมันดีเซล และน้ำมันเบนซิน จึงทำให้พบการแพร่กระจายของสารกลุ่มนี้ในอากาศในหลายพื้นที่ ซึ่งมีตัวอย่างผลการศึกษาการแพร่กระจายของสารกลุ่มนี้ในอากาศทั้งในประเทศและต่างประเทศ ดังนี้

Hsieh *et al.* (2006) ทำการตรวจวัดปริมาณสารประกอบอินทรีย์ระเหยในอากาศ 5 ชนิด คือ สารกลุ่ม BTEX ทั้ง 4 ชนิด และสาร Methyl Tertiary-Butyl Ether (MTBE) ในเขตพื้นที่โรงงานอุตสาหกรรมทางตอนใต้ของประเทศไต้หวัน 6 แห่ง ภายในบริเวณที่ตรวจวัดมีอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย อุตสาหกรรมการผลิตอาหาร เครื่องจักร โลหะ น้ำมันปิโตรเลียม และพวกปิโตรเคมีภัณฑ์ ผลการศึกษาพบว่ามีความเข้มข้นของสารกลุ่ม BTEX ดังนี้ คือ Benzene อยู่ระหว่าง 0.012 – 0.121 ไมโครกรัม/ลิตร Toluene อยู่ระหว่าง 0.037 – 0.101 ไมโครกรัม/ลิตร Ethylbenzene อยู่ระหว่าง 0.003 – 0.023 ไมโครกรัม/ลิตร *m,p*-Xylene อยู่ระหว่าง 0.017 – 0.035 ไมโครกรัม/ลิตร และ *o*-Xylene อยู่ระหว่าง 0.006 – 0.017 ไมโครกรัม/ลิตร ส่วน Lee *et al.* (2002) ได้ศึกษาการแพร่กระจายของสารประกอบอินทรีย์ระเหย 42 ชนิด ในอากาศของพื้นที่ชุมชนเมืองเขตปกครองพิเศษฮ่องกง 4 แห่ง ได้แก่ เขตที่พักอาศัยในชุมชนเมือง พื้นที่โรงงานอุตสาหกรรม พื้นที่ย่านการค้า และพื้นที่เมืองใหม่ ผลการศึกษาพบว่ามีการประกอบอินทรีย์ระเหยที่สามารถตรวจวัดได้ทั้งหมด 12 ชนิด โดยมีความเข้มข้นเฉลี่ยของสาร Benzene เท่ากับ 0.013 ไมโครกรัม/ลิตร Toluene เท่ากับ 0.098 ไมโครกรัม/ลิตร Ethylbenzene เท่ากับ 0.014 ไมโครกรัม/ลิตร *m,p*-Xylene เท่ากับ 0.019 ไมโครกรัม/ลิตร และ *o*-Xylene เท่ากับ 0.009 ไมโครกรัม/ลิตร ส่วน Hinwood *et al.* (2007) ได้รายงานผลตรวจวัดปริมาณสารกลุ่ม BTEX ในอากาศในพื้นที่ชุมชนเมืองของประเทศออสเตรเลีย 4 แห่ง พบว่ามีความเข้มข้นของ Benzene อยู่ระหว่าง 0.04–23.8 ไมโครกรัม/ลิตร Toluene อยู่ระหว่าง 0.03–2,120 ไมโครกรัม/ลิตร Ethylbenzene อยู่ระหว่าง 0.03–119 ไมโครกรัม/ลิตร และ Xylenes อยู่ระหว่าง 0.04–697 ไมโครกรัม/ลิตร

สำหรับการตรวจวัดปริมาณสารกลุ่ม BTEX และ MTBE ในอากาศของกรุงเทพมหานคร Keprasertsup *et al.* (2003) ได้เก็บตัวอย่างอากาศในปั๊มน้ำมันที่มีขนาดแตกต่างกัน 9 แห่ง ๆ ละ 2 จุด คือ ที่บริเวณเกาะกลางของแท่นเติมน้ำมัน และริมเขตปั๊มน้ำมัน และเก็บตัวอย่างในบริเวณแยกถนนที่มีความหนาแน่นของยานพาหนะแตกต่างกัน 6 แห่ง ผลการตรวจวัดพบว่า ที่เกาะกลางของแท่นเติมน้ำมันมีความเข้มข้นเฉลี่ยของ Benzene เท่ากับ 0.069 ± 0.107 ไมโครกรัม/ลิตร Toluene เท่ากับ 0.216 ± 0.257 ไมโครกรัม/ลิตร Ethylbenzene เท่ากับ 0.027 ± 0.026

ไม่โครกรัม/ลิตร และ Xylenes เท่ากับ 0.101 ± 0.114 ไมโครกรัม/ลิตร ส่วนที่บริเวณริมเขตปืมน้ำมัน มีความเข้มข้นเฉลี่ยของ Benzene เท่ากับ 0.012 ± 0.013 ไมโครกรัม/ลิตร Toluene เท่ากับ 0.056 ± 0.038 ไมโครกรัม/ลิตร Ethylbenzene เท่ากับ 0.008 ± 0.009 ไมโครกรัม/ลิตร และ Xylenes เท่ากับ 0.023 ± 0.017 ไมโครกรัม/ลิตร สำหรับบริเวณแยกถนนมีความเข้มข้นเฉลี่ยของ Benzene เท่ากับ 0.016 ± 0.009 ไมโครกรัม/ลิตร Toluene เท่ากับ 0.083 ± 0.048 ไมโครกรัม/ลิตร Ethylbenzene เท่ากับ 0.013 ± 0.009 ไมโครกรัม/ลิตร และ Xylenes เท่ากับ 0.054 ± 0.049 ไมโครกรัม/ลิตร นอกจากนี้ การสำรวจคุณภาพอากาศภายในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแห่งหนึ่งในเขตจังหวัดระยองที่มีการใช้สารทำลายอินทรีย์ในกระบวนการผลิตทั้งที่เป็นสารกลุ่มอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และสารกลุ่มอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน พบว่า มีสารกลุ่มดังกล่าวในอากาศบริเวณที่ทำงาน (นลินี และคณะ, 2540) และยังตรวจพบสารกลุ่มนี้ในอากาศในพื้นที่ริมอุตสาหกรรมมาตาพุดและบริเวณใกล้เคียง (เดชา, 2546) โดยมีความเข้มข้นเฉลี่ยของ Benzene 0.80 ไมโครกรัม/ลิตร Toluene 2.83 ไมโครกรัม/ลิตร Ethylbenzene 0.49 ไมโครกรัม/ลิตร และ Xylenes 2.36 ไมโครกรัม/ลิตร

3. การเก็บตัวอย่างสารประกอบอินทรีย์ระเหยในอากาศ

การเก็บตัวอย่างสารประกอบอินทรีย์ระเหยในอากาศ มีวิธีที่นิยมหลายวิธี ได้แก่

3.1 Active Sampling

วิธี Active Sampling หมายถึง การเก็บตัวอย่างอากาศที่ต้องใช้ปั๊มในการดูดตัวอย่างอากาศให้ไหลผ่านภาชนะหรือหลอดเก็บตัวอย่างที่บรรจุตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ไว้ เพื่อเก็บตัวอย่างสารที่ต้องการตรวจสอบสำหรับนำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการต่อไป สำหรับการเก็บตัวอย่างจะอาศัยหลักการอย่างใดอย่างหนึ่งต่อไปนี้ คือ (วงศ์พันธ์ และคณะ, 2547; สาวิตรี, 2548; วนิดา, 2551)

3.1.1 การเข้าไปแทนที่อากาศ (Air displacement) ตัวอย่างอากาศจะถูกดูดเข้าไปในภาชนะเก็บ (Collector) เช่น ขวดหรือถุงสุญญากาศ ถังคานิสเตอร์ เป็นต้น

3.1.2 การควบแน่น (Condensation) เป็นการเก็บตัวอย่างแก๊สโดยดูดอากาศเข้าไปในอุปกรณ์เก็บตัวอย่างที่แช่อยู่ในภาชนะที่บรรจุสารทำความเย็นชนิดต่าง ๆ เพื่อเป็นการลดอุณหภูมิของแก๊สที่ต้องการตรวจวัดให้ต่ำกว่าจุดเดือด หรือจุดเยือกแข็งทำให้แก๊สเกิดการควบแน่นก่อนนำไปวิเคราะห์ หลักการควบแน่นเหมาะที่จะใช้กับตัวอย่าง ที่มีคุณสมบัติที่ระเหยได้ง่ายมาก ๆ หรือไม่คงตัว (Stable) บนตัวดูดซับ

3.1.3 การดูดซึม (Absorption) โดยตัวอย่างแก๊สจะถูกละลายหรือทำปฏิกิริยากับของเหลว (สารดูดซึม) ที่บรรจุอยู่ในขวดดักจับแก๊สหรือ Impinger วิธีนี้ไม่ค่อยได้รับความนิยมเนื่องจากความยุ่งยากในการเคลื่อนย้ายสารละลายที่ใช้ในการดูดซึม อีกทั้งต้องระวังอุปกรณ์แตกหักเสียหายในขณะเก็บตัวอย่าง

3.1.4 การดูดซับ (Adsorption) เป็นการเก็บตัวอย่างแก๊สที่เป็นที่นิยมโดยแก๊สที่ต้องการเก็บจะถูกดูดติดกับผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) ที่เป็นของแข็ง สำหรับลักษณะของตัวดูดซับจะเป็นวัสดุขนาดเล็กที่มีรูพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ ตัวดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในการเก็บตัวอย่าง ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ Alumina และ Silica gel เป็นต้น ทั้งนี้ การเลือกใช้ตัวดูดซับในการเก็บตัวอย่างแก๊สนั้นจะต้องพิจารณาคคุณสมบัติของตัวดูดซับแต่ละชนิดด้วย เช่น ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุประเภทไม่มีขั้วจึงชอบดูดซับสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วมากกว่าสารที่มีขั้ว ส่วน Alumina และ Silica gel เป็นวัสดุประเภทมีขั้ว จึงชอบดูดซับแก๊สที่มีความเป็นขั้วสูง ๆ

3.2 Passive Sampling

เป็นการเก็บตัวอย่างโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊สจากความเข้มข้นสูงไปสู่ความเข้มข้นต่ำ ณ สภาวะ Steady state โดยการดูดซึมทางเคมี หรือ การดูดซับทางด้านกายภาพบนตัวกลาง (Medium) ที่ทำให้อิ่มตัวด้วยสารประกอบที่มีความเฉพาะเจาะจงกับสารที่ตรวจวัด ซึ่งวิธีนี้ไม่ต้องใช้ปั๊มในการเก็บตัวอย่าง ข้อดีของวิธีการนี้คือ ไม่มีเสียงรบกวนจากปั๊มดูดอากาศ ต้นทุนต่ำ ส่วนข้อเสียคือ อัตราการเก็บตัวอย่างต่ำ ไม่สามารถเก็บตัวอย่างในระยะเวลาสั้น ๆ ต้องใช้ระยะเวลาาน ดังนั้นจึงนิยมใช้วิธีการนี้สำหรับการเก็บตัวอย่างแบบระยะยาว (วงศ์พันธ์ และคณะ, 2547; สลาวิตรี, 2548; วนิดา, 2551)

4. ตัวดูดซับ

ตัวดูดซับที่ใช้ในหลอดเก็บตัวอย่างมีหลายชนิดดังกล่าวแล้วข้างต้น สำหรับตัวดูดซับซึ่งบรรจุไว้ภายในหลอดเก็บตัวอย่างที่ใช้เก็บแก๊สพวกสารอินทรีย์ระเหย โดยเฉพาะสารกลุ่ม BTEX คือ ถ่านกัมมันต์ หรือที่เรียกว่า Activated Carbon เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบจากธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง และมีสมบัติในการดูดซับสารชนิดต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปของ

คาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ชนิดหนึ่ง ซึ่งโครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีความเป็นผลึก (Crystallites) อยู่บ้าง โดยส่วนใหญ่จะรวมกันอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบซึ่งต่างจากแกรไฟต์ และจากสมบัติเหล่านี้ทำให้ถ่านกัมมันต์มีความแตกต่างจากถ่านชนิดอื่น ๆ เช่น ถ่านหินลิกไนต์ ถ่านโค้ก ถ่านไม้ หรือแกรไฟต์ (ณัฐยา, 2545)

5. กลไกการดูดซับ

ตัวดูดซับ (Adsorbent) หมายถึง สารที่พื้นผิวเกิดการดูดซับ ในขณะที่สารที่ถูกดูดซับจะเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ตัวถูกดูดซับแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการกระจายบนผิวหรือเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างและสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับและสารที่เป็นตัวถูกดูดซับ

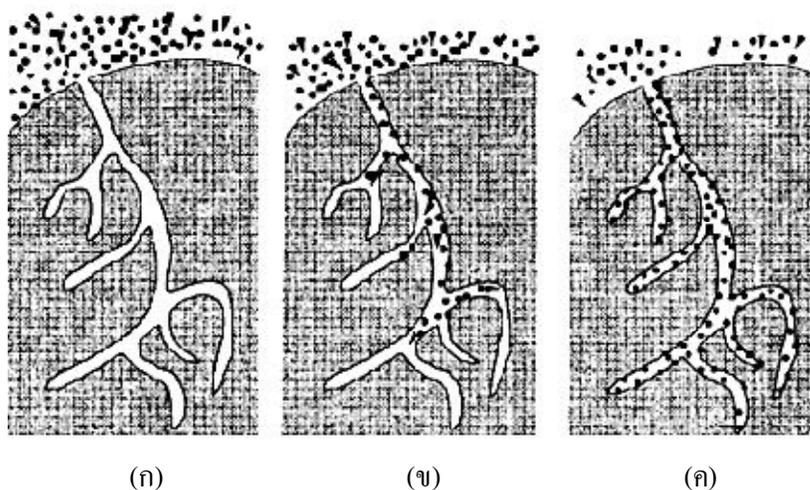
5.1 หลักการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างเฟส 2 เฟสที่ถูกนำไปใช้ในการแยกสารบางชนิดออกจากสารละลายของเหลวหรือแก๊ส เมื่อสารละลายหรือแก๊สผสมซึ่งเป็นตัวถูกดูดซับไหลผ่านตัวดูดซับ และมีการสัมผัสกันจะทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างผิวของตัวดูดซับกับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นนี้ต้องมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับด้วยกันเองจึงจะทำให้กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นได้ กระบวนการดูดซับนี้จะดำเนินไปอย่างต่อเนื่องจนตัวดูดซับใกล้เข้าสู่ภาวะอิ่มตัว (Break Point) ประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับจึงลดลงตามเวลาจนในที่สุดการดูดซับจะเข้าสู่ภาวะสมดุล ซึ่งเป็นจุดที่ความสามารถในการดูดซับหมดไป สำหรับกระบวนการดูดซับสารนั้นอาจแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ (ขจรศักดิ์, 2549; สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2547)

ขั้นตอนที่ 1 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่อยู่ในของไหลเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวด้านนอกของตัวดูดซับ ดังภาพที่ 4 (ก)

ขั้นตอนที่ 2 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนจากพื้นผิวด้านนอกเข้าไปในโพรงช่องว่างของตัวดูดซับ (Pore Diffusion) ซึ่งจะเกิดการดูดซับขึ้นก็ต่อเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีรูปร่างเหมาะสมกับลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ ดังภาพที่ 4 (ข)

ขั้นตอนที่ 3 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกาะติดที่พื้นผิวภายในโพรงช่องว่างของตัวดูดซับ (Adhesion) การดูดซับส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในภายในโพรงช่องว่าง เพราะว่าภายในโพรงช่องว่างมีปริมาณพื้นที่ผิวที่ทำให้เกิดการดูดซับได้มาก ดังภาพที่ 4 (ค)



ภาพที่ 4 กลไกการดูดซับของสารบนพื้นผิวตัวดูดซับ
ที่มา : ขจรศักดิ์ (2549)

5.2 ชนิดของการดูดซับ

การดูดซับแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพและทางเคมี ดังนี้

5.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ซึ่งเป็นแรงที่ไม่กำหนดทิศทาง การที่สารถูกยึดเหนี่ยวด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์นี้ทำให้การยึดเหนี่ยวไม่แข็งแรงและไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น การดูดซับแบบนี้สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติ โดยที่ไม่ต้องใช้พลังงานในการกระตุ้น และจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในทันทีที่โมเลกุลเคลื่อนที่มายังบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับ การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวทั้งหมดของตัวดูดซับ จึงทำให้มีปริมาณการดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับสูงมาก การดูดซับแบบนี้อาจเกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับด้วยกันเองได้ จึงทำให้เกิดการดูดซับได้มากกว่าหนึ่งชั้น (Multilayer) ทั้งนี้ การเพิ่มความดันหรือเพิ่มอุณหภูมิของระบบจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เพราะตัวถูกดูดซับเกิดการเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับ หรือที่เรียกว่า Desorption ซึ่งเป็นวิธีการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง (ฉันทยา, 2545; สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2547)

5.2.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดจากพันธะทางเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ เช่น การใช้วาล์วเลนซ์อิเล็กทรอนิกส์ร่วมกัน เป็นต้น ซึ่งจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับจะส่งผลให้มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วเกิดการจัดเรียงอะตอมใหม่เป็นสารประกอบใหม่ขึ้นมา การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีบนพื้นผิวของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับนั้นจะเกิดได้บนพื้นผิวบางแห่งเท่านั้น และเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) จึงทำให้มีปริมาณการดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับต่ำ พันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่มีความแข็งแรงจึงทำให้ตัวดูดซับกลับคืนสู่สภาพเดิมหรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้ยาก เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้

กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นทั้ง 2 ประเภทเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งปกติการดูดซับทางเคมีจะคายความร้อนออกมามากกว่า 10,000 แคลอรี/โมล ส่วนความร้อนที่คายออกมาจากการดูดซับทางกายภาพนั้นมีค่าความร้อนเกิดขึ้นเพียง 100 แคลอรี/โมล ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการดูดซับทางเคมีมากถึง 100 เท่า (ณัฐยา, 2545; สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2547)

5.3 สมการการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

Adsorption Isotherm เป็นสมการที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารในตัวกลางใด ๆ ที่สถานะสมดุลของการดูดซับ และที่อุณหภูมิคงที่ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า ไอโซเทอม (Isotherm) ซึ่งเป็นตัวชี้บ่งและอธิบายลักษณะการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ ทั้งนี้ ไอโซเทอมการดูดซับมีนั้นนี้อยู่มากมายหลายแบบ แต่สมการที่มักจะถูกนำมาใช้สำหรับเพื่ออธิบายไอโซเทอมการดูดซับ (Sparks, 2003) ได้แก่

5.3.1 สมการ Langmuir (Langmuir Isotherm)

เป็นสมการที่แสดงไอโซเทอมการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียวและการดูดซับเป็นแบบผันกลับได้ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระบนผิวของตัวดูดซับ พลังงานในการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกตำแหน่ง พลังงานในการดูดซับมีค่าคงที่ และไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกัน รูปแบบสมการเป็นดังนี้

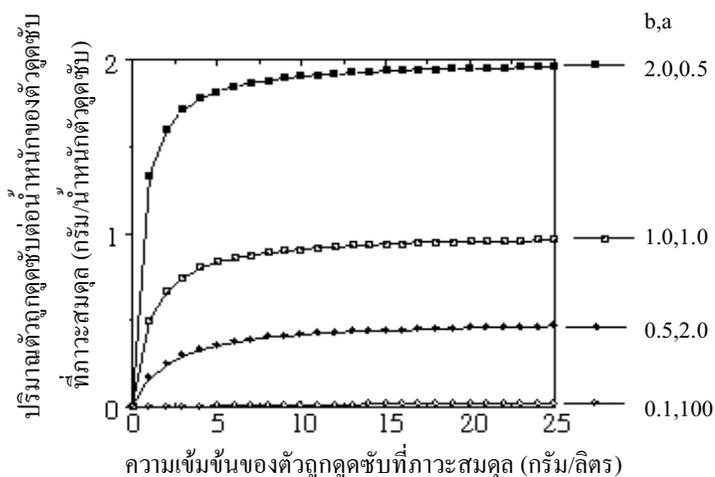
$$C_s = \frac{aC_a b}{(1 + aC_a)} \quad (1)$$

เมื่อ C_s = ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ภาวะสมดุล
(กรัม/น้ำหนักตัวดูดซับ)

C_a = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในอากาศที่ภาวะสมดุล (กรัม/ลิตร)

a = ค่าคงที่แสดงถึงความแข็งแรงของการดูดซับ

b = ค่าคงที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับสูงสุดบนผิว
ของตัวดูดซับ (กรัม/น้ำหนักตัวดูดซับ)



ภาพที่ 5 Langmuir Isotherm

ที่มา : Schroeder (2006)

จัดรูปสมการ (1) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ (2) ได้ดังนี้

$$\frac{C_a}{C_s} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{b} C_a \quad (2)$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_a/C_s กับ C_a จะได้กราฟเส้นตรงซึ่งสามารถหาค่า $1/b$ และ $1/ab$ ได้จากความชันของกราฟ และจุดตัดแกนในแนวตั้ง สำหรับค่า b ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าปริมาณสารสูงสุด (X) ที่ตัวดูดซับสามารถดูดซับได้ในตัวดูดซับ 1 กรัม (m) ดังนั้นค่า b จึงเท่ากับ X/m

5.3.2 สมการ Freundlich (Freundlich Isotherm)

เป็นสมการที่แสดงการดูดซับบนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (Rough surface) โดยแต่ละพื้นผิวที่เกิดการดูดซับจะให้พลังงานของการดูดซับออกมาไม่คงที่ และมีการรวมพื้นผิวที่ให้พลังงานการดูดซับเท่ากันเข้าด้วยกัน ข้อเสียของ สมการ Freundlich คือไม่สามารถหาค่าการดูดซับสูงสุดได้ และใช้อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสูงๆ ได้ไม่ดี โดยทั่วไปรูปแบบสมการ Freundlich เป็นดังนี้

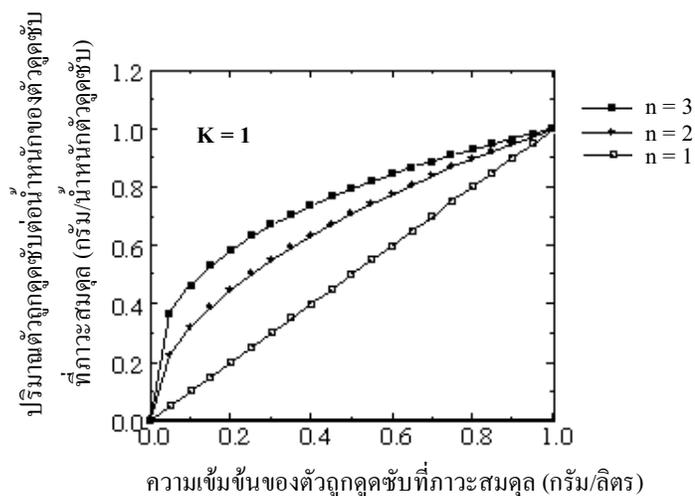
$$C_s = K_{sa} C_a^{1/n} \quad (3)$$

เมื่อ C_s = ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ภาวะสมดุล
(กรัม/น้ำหนักตัวดูดซับ)

C_a = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในอากาศที่ภาวะสมดุล (กรัม/ลิตร)

K = ค่าคงที่แสดงถึงพลังงานหรือความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (ลิตร/น้ำหนักตัวดูดซับ)

n = ค่าคงที่แสดงถึงความแข็งแรงของการดูดซับ



ภาพที่ 6 Freundlich Isotherm

ที่มา : Schroeder (2006)

เมื่อจัดรูปสมการ (3) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ (4) ได้ ดังนี้

$$\log C_s = (1/n) \log C_a + \log K_{sa} \quad (4)$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log C_s$ กับ $\log C_a$ จะได้กราฟเป็นเส้นตรงสามารถคำนวณหาค่า $1/n$ และ K ได้จากความชัน และจุดตัดแกนในแนวดิ่ง ทั้งนี้ การดูดซับสารที่ความเข้มข้นต่ำ และสารแพร่ไปมาระหว่างเฟส 2 เฟส (Partitioning) คือ ระหว่างตัวดูดซับและตัวกลางที่จุดสมดุล และอุณหภูมิคงที่ n จะมีค่าเท่ากับ 1 ทำให้ได้กราฟจะเป็นเส้นตรง ดังนั้นสมการที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำ คือ $C_s = KC_a$

6. ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์มีสมบัติที่สามารถดูดซับสารต่าง ๆ ได้ดี โดยทั่วไปบริเวณผิวหน้าของถ่านกัมมันต์ไม่มีความเป็นขั้วถึงแม้ว่าจะมีปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นทำให้ได้สารประกอบออกไซด์ที่ทำให้ผิวหน้าของถ่านมีความเป็นขั้วได้เล็กน้อยก็ตาม ดังนั้นโดยภาพรวมถ่านกัมมันต์มักถูกจัดเป็นตัวดูดซับในกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และถูกนำไปใช้เป็นตัวเก็บตัวอย่างสารประเภทสารประกอบอินทรีย์อยู่เสมอ (Ruthven, 1984) ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ คือ ใช้ฟอกสีน้ำตาลทรายให้ขาวบริสุทธิ์หรือการกรองน้ำให้บริสุทธิ์ รวมทั้งเป็นตัวกรองเพื่อให้ได้ตัวทำละลายที่บริสุทธิ์พอที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ ถ่านกัมมันต์สามารถช่วยใช้กำจัดตะกอนในโรงงานผลิตเบียร์หรือดูดซับไอของ Benzene ในรถยนต์ นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั่วไป เช่น เป็นตัวดูดซับแก๊สที่ปล่อยออกมาจากเตาเผา รวมทั้งใช้ในระบบฟอกอากาศให้บริสุทธิ์ ทั้งนี้ ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสารทั้งที่อยู่ในสถานะที่เป็นของแข็งและของเหลว สำหรับถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับสารที่อยู่ในสถานะของเหลว จะมีขนาดรูพรุนของถ่านใหญ่กว่าชนิดที่ใช้ในการดูดซับสารที่อยู่ในสถานะแก๊ส โดยมีรัศมีของรูพรุนอยู่ระหว่าง 2 - 50 นาโนเมตร และถ่านที่ใช้ดูดซับสารในสถานะแก๊สจะมีรัศมีของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร

วัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ควรมีสมบัติดังนี้ มีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูง มีสมบัติคงที่ มีราคาถูก และหาได้ง่าย (ศูนย์วิจัยและตรวจสอบคุณภาพถ่านกัมมันต์, 2545) วัตถุดิบที่สามารถนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ได้มีอยู่หลายชนิด โดยส่วนใหญ่วัตถุดิบที่ใช้มักเป็นพวกอินทรีย์สารที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น พวกเซลลูโลสที่มาจากพืช ได้แก่ ไม้ยางพารา ไม้ไผ่ เศษไม้เหลือทิ้ง รวมทั้งพวกวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น แกลบ

กะลามะพร้าว ขี้เลื่อย ชังข้าวโพด เป็นต้น นอกจากนี้ วัสดุคิบบำพวกด่านหิน เช่น ลิกไนต์ แอนทราไซต์ เป็นต้น และวัสดุคิบบจากสัตว์ เช่น กระดูก และเขาสัตว์ เป็นต้น ก็สามารถนำมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ได้เช่นกัน สำหรับถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดแก๊ส และไอระเหยที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำนั้นส่วนมากผลิตจากกะลามะพร้าว เนื่องจากกะลามะพร้าวเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีความแข็งแรง และมีสารเจือปนที่เป็นอันตรายอยู่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุคิบบวกด่านหิน (อุราวรรณ, 2544)

โดยทั่วไปสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ออกความสามารถในการดูดซับอนุภาคที่มีขนาดเล็ก คือ ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine Number) ที่มีหน่วยเป็นน้ำหนักไอโอดีนที่ถูกดูดซับ/กรัมถ่าน ค่าไอโอดีนนัมเบอร์เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณรูที่มีขนาด 10-28 อังสตรอม (อังสตรอมมีค่าเท่ากับ 10^{-10} เมตร) ถ่าถ่านกัมมันต์มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์มากจะแสดงว่าถ่านนั้นเป็นตัวดูดซับที่สามารถดูดซับโมเลกุลขนาดเล็กได้ดี ทั้งนี้สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้กำหนดให้ถ่านกัมมันต์ต้องมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์มากกว่า 600 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค)

6.1 วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์

การผลิตถ่านกัมมันต์แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเผาวัสดุคิบบให้เป็นถ่านหรือการคาร์บอนไนซ์เซชัน (Carbonization) และขั้นตอนการกระตุ้น (Activation) ในการผลิตถ่านกัมมันต์อาจจะใช้วิธีใดวิธีหนึ่งหรือใช้ทั้ง 2 วิธีร่วมกันก็ได้ (Wikipedia, 2007) สำหรับแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

6.1.1 ขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์เซชัน (Carbonization) เป็นกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งเกิดจากการเผาวัสดุคิบบในที่อับอากาศ เพื่อไม่ให้วัสดุคิบบกลายเป็นเถ้า โดยจะใช้อุณหภูมิในการเผาไม่สูงนัก ส่วนใหญ่จะเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นการเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์หลัก 3 ประเภท ได้แก่ ถ่านที่มีลักษณะสีดำ เรียกว่าชาร์ (Char) ของเหลวที่เรียกว่า ทาร์ (Tar) และส่วนที่เป็นแก๊ส การคาร์บอนไนซ์เซชันนั้นเป็นขั้นตอนการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนในวัสดุคิบบ โดยใช้ความร้อนทำให้เกิดการสลายตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน ออกมาในรูปของของเหลวและแก๊ส ซึ่งส่งผลให้ Char เป็นถ่านที่มีปริมาณคาร์บอนสูงขึ้นกว่าวัสดุคิบบ (กระทรวงอุตสาหกรรม. ม.ม.ป.; วิสรุต, 2542 ; ศูนย์วิจัยและตรวจสอบคุณภาพถ่านกัมมันต์, 2545)

6.1.2 ขั้นตอนการกระตุ้น (Activation) เป็นการนำถ่านที่ได้จากขั้นตอนแรกไปเพิ่มประสิทธิภาพด้วยเทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์ ที่เรียกว่าการกระตุ้น (Activation) การกระตุ้นทำได้ 2 วิธี คือ การกระตุ้นทางเคมี และการกระตุ้นทางกายภาพ (กระทรวงอุตสาหกรรม, ม.ม.ป.; Wikipedia, 2007) สำหรับการกระตุ้นทางกายภาพเป็นการนำวัตถุดิบที่ผ่านการคาร์บอนเซชันแล้วมากระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ชนิดต่าง ๆ เช่น ไอน้ำ อีเอ็มตัวยิ่งยวด (Steam) แก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ (Carbondioxide; CO_2) แก๊สออกซิเจน (Oxygen; O_2) และอากาศ (Air) ร่วมกับการใช้ความร้อนในการเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 600 – 1,200 องศาเซลเซียส เพื่อให้สารอินทรีย์ต่าง ๆ สลาย ทำให้ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งทำให้ถ่านเกิดรูพรุน (Porous) และมีพื้นที่ผิวสัมผัส (Active Site) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านสูงขึ้น ข้อดีของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีนี้ คือ สามารถนำมาใช้งานได้เลยทันที โดยไม่ต้องล้างสารที่เหลือตกค้าง แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าการกระตุ้นด้วยสารเคมี ทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในการผลิต โดยทั่วไปขนาดของรูพรุนที่ได้จากการกระตุ้นทางกายภาพจะมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมี

ส่วนการกระตุ้นทางเคมี เป็นการนำสารเคมีทำปฏิกิริยากับเนื้อคาร์บอนโดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้นส่วนใหญ่เป็นสารดูดน้ำ (Dehydrating Agent) ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น สำหรับขั้นตอนในการกระตุ้นทำโดยนำถ่านที่ผ่านการคาร์บอนเซชันแล้วมาผสมรวมกับสารกระตุ้น เพื่อให้สารกระตุ้นสามารถซึมผ่านเข้าไปได้ทั่วถึง จากนั้นนำไปเผาในที่อับอากาศที่อุณหภูมิประมาณ 600 - 700 องศาเซลเซียส ในการผลิตถ่านกัมมันต์อาจใช้ทั้งวิธีกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมีร่วมกันได้ กล่าวคือเมื่อใช้สารเคมีกระตุ้นแล้วนำไปกระตุ้นต่อโดยใช้แก๊สออกซิไดซ์ในอุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มจำนวนรูพรุนให้มากขึ้น ข้อดีของวิธีการกระตุ้นทางเคมี คือ สารกระตุ้นสามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อถ่านได้อย่างทั่วถึงทำให้ได้ รูพรุนค่อนข้างกว้าง รูพรุนมีขนาดกลาง และขนาดใหญ่ และเป็นการใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก สำหรับข้อเสียของวิธีนี้ คือ ต้องล้างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น ทำให้ต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการล้าง นอกจากนี้ เครื่องมือ/อุปกรณ์ที่ใช้ต้องเป็นวัสดุชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้เพราะสารเคมีที่ใช้เป็นสารกัดกร่อน

6.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์

การจำแนกชนิดของถ่านกัมมันต์นิยมจำแนกตามสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่าน เช่น ลักษณะรูปร่าง ขนาดรูพรุน ค่าความเป็นกรดต่างเมื่อละลายน้ำ เป็นต้น ซึ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ที่มีชื่อเรียกต่าง ๆ มาจากการแบ่งชนิดตามสมบัติทางกายภาพและเคมี ดังนี้

6.2.1 ชนิดของถ่านกัมมันต์ แบ่งตามลักษณะรูปร่าง ได้แก่ (American Society for Testing and Material [ASTM], 1989; Wikipedia, 2007)

6.2.1.1 Powdered Activated Carbon หรือ PAC เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 180 ไมโครเมตร ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผง ใช้สำหรับฟอกสีของเหลว ดูดกลิ่นในสารละลายได้หลายชนิด

6.2.1.2 Granulated Activated Carbon หรือ GAC เป็นถ่านกัมมันต์ที่เมื่อนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 180 ไมโครเมตร แล้วต้องมีปริมาณถ่านกัมมันต์ที่อยู่บนตะแกรงไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ส่วนใหญ่จะมีขนาดระหว่าง 0.2 – 5 มิลลิเมตร มีรูปร่างไม่แน่นอน ใช้สำหรับทำแก๊สให้บริสุทธิ์ หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใสแล้วบริสุทธิ์

6.2.1.3 Pellet Activated Carbon เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูปร่างขึ้นอยู่กับการอัดผ่านเครื่องอัด มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.8 – 5 มิลลิเมตร ส่วนมากใช้สำหรับทำแก๊สให้บริสุทธิ์ หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใสแล้วบริสุทธิ์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการปฏิกิริยาของแก๊ส และใช้ทำหน้าที่ากปกป้องกันแก๊ส และไอพิษต่าง ๆ

6.2.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์ แบ่งตามขนาดของรูพรุน ได้แก่ (Ruthven, 1984)

6.2.2.1 ชนิดรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนน้อยกว่า 2 นาโนเมตร มีปริมาณรูพรุนอยู่ระหว่าง 0.15 – 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม ถ่าน และมีพื้นที่ผิวทั้งหมดอยู่ระหว่าง 100 – 1,000 ตารางเมตร/กรัม ถ่าน มักนำไปใช้ประโยชน์เกี่ยวกับการดูดซับแก๊ส และไอระเหย

6.2.2.2 ชนิดรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore หรือ Transitional Pore) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 2 - 50 นาโนเมตร มีปริมาณรูพรุนอยู่ระหว่าง 0.02 – 0.1 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม ถ่าน และมีพื้นที่ผิวทั้งหมดอยู่ระหว่าง 10 – 100 ตารางเมตร/กรัม ถ่าน มักนำไปใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Reaction) ดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น การฟอกสี

6.2.2.3 ชนิดรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) เป็นถ່วนกัมนันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนมากกว่า 50 นาโนเมตร มีปริมาณรูพรุนอยู่ระหว่าง 0.2 – 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัมถ່วน และมีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง 0.5 - 2 ตารางเมตร/กรัมถ່วน โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่าง ๆ แต่เป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนเล็กได้ง่ายขึ้น มักนำไปใช้ประโยชน์ในการฟอกสี และการผลิตยา

6.2.3 ชนิดของถ່วนกัมนันต์ แบ่งตามค่าความเป็นกรดต่างเมื่อละลายน้ำ ได้แก่ (ณัฐยา, 2545)

6.2.3.1 ถ่งนกัมนันต์ชนิดแอล (L Type) เป็นถ่งนกัมนันต์ที่อยู่ในสารละลายแล้วมีสมบัติเป็นกรด โดยส่วนใหญ่หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวเป็นอนุพันธ์ของหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl)

6.2.3.2 ถ่งนกัมนันต์ชนิดเอช (H Type) เป็นถ่งนกัมนันต์ที่อยู่ในสารละลายแล้วมีสมบัติเป็นด่าง โดยส่วนใหญ่หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวได้แก่ ควินิน (Quinine) ฟีนอล (Phenols) และคาร์บอกซิเลท (Carboxylates)

6.3 การนำถ่งนกัมนันต์ไปใช้ประโยชน์

เนื่องจากถ่งนกัมนันต์เป็นตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับสารชนิดต่าง ๆ ทั้งที่อยู่ในสถานะของเหลวและแก๊สได้เป็นอย่างดี จึงทำให้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมหลายประเภท และยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ สิ่งแวดล้อม และอีกมากมายหลายด้าน ซึ่งมีตัวอย่างการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ดังนี้ (กระทรวงอุตสาหกรรม, ม.ม.ป.; Wikipedia, 2007)

6.3.1 การประยุกต์ใช้ทางสิ่งแวดล้อม

สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับมลสารทั้งที่อยู่ในภาคสนาม เช่น การเก็บตัวอย่างอากาศด้วยหลอดเก็บตัวอย่างที่ภายในบรรจุด้วยถ่งนกัมนันต์ ใช้สำหรับดูดซับมลสารที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน เป็นต้น หรือใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ใช้ในการดูดซับกลิ่น สี และดูดซับอากาศเสียในโรงงานอุตสาหกรรมก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ รวมทั้ง ใช้ในการดูดซับสารที่เจือปนอยู่ในกระบวนการผลิตน้ำประปา เป็นต้น

6.3.2 การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์

ในต่างประเทศมีการใช้ถ่านกัมมันต์รักษาโรค เช่น รักษาอาการอักเสบจากการติดเชื้อ ขจัดสารพิษ ลดแก๊สในกระเพาะอาหาร ดูดเชื้อแบคทีเรียที่เป็นตัวผลิตแก๊สในลำไส้ ใช้รักษาอาการท้องเสีย ใช้ในการรักษาความเป็นพิษของสาร ใช้กับผู้ป่วยที่บริโภคยาเกินขนาด และยังสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตยาได้อีกด้วย

6.3.3 การใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม

โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์มีความบริสุทธิ์มากขึ้น เช่น ใช้ฟอกสีน้ำตาล น้ำมัน/ไขมันสำหรับบริโภค และยังสามารถนำมาใช้สำหรับทำให้อาหารและเครื่องดื่มมีรสชาติดีขึ้น เช่น ใช้ดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการออกกระบวนการผลิต เป็นต้น

6.3.4 การใช้ในการดูดซับสารที่อยู่ในสถานะแก๊ส

ถ่านกัมมันต์ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ และไอของสารอินทรีย์ โดยถ่านกัมมันต์จะทำหน้าที่ในการดูดซับมลสารในอากาศ ก่อนที่จะเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจของผู้สวมใส่ หรือใช้ทำเป็นกั้นกรองของบุนหรี เพื่อดูดซับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide; CO) และน้ำมันดินในบุนหรี เป็นต้น นอกจากนี้ ในอุตสาหกรรมที่ต้องการนำเอาไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ ก็มีการนำถ่านกัมมันต์ไปดูดซับไอระเหยที่ต้องการแล้วจึงผ่านกระบวนการควบแน่นที่ความดันต่ำ ๆ เพื่อให้ได้สารกลับมาใช้ใหม่ อุตสาหกรรมที่ใช้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ในเรื่องนี้ คือ อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมยาสังเคราะห์ อุตสาหกรรมกัมพู เป็นต้น สำหรับในเครื่องปรับอากาศ ถ่านกัมมันต์ถูกใช้เพื่อดูดซับมลสารในอากาศที่อาจเป็นอันตรายต่อร่างกาย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และอะเซทิลีน เป็นต้น

7. การนำกากตะกอนเยื่อกระดาษเพื่อทำตัวดูดซับ

กากตะกอนเยื่อกระดาษเป็นของเสียส่วนหนึ่งที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระดาษ และถูกนำมาใช้เพื่อผลิตตัวดูดซับในงานวิจัยนี้ สำหรับกระบวนการผลิตกระดาษนั้น มีส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนี้

7.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกระดาษ วัตถุดิบที่ใช้ผลิตเยื่อกระดาษมีหลายชนิด ซึ่งแบ่งเป็นประเภทหลัก ๆ คือ (สลักจิต, 2549; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550)

7.1.1 วัตถุดิบประเภทไม้ (Wood) เป็นแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญที่สุดในอุตสาหกรรม การผลิตกระดาษ โดยแบ่งไม้ตามลักษณะของเส้นใยเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ไม้เนื้ออ่อน และ ไม้เนื้อ แข็ง ไม้เนื้ออ่อนเป็นไม้ที่มีเส้นใยยาวประมาณ 3-4 มิลลิเมตร เช่น ไม้ประเภทสน ส่วนไม้เนื้อแข็ง เป็นไม้ที่มีเส้นใยยาวประมาณ 1-1.5 มิลลิเมตร เช่น ไม้ยูคาลิปตัส

7.1.2 วัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ (Non-Wood) ส่วนใหญ่เป็นพืชที่ปลูกตามฤดูกาล ได้แก่ ปอ ป่าน ลิ้นจี่ ฝ้าย ใผ่ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ชานอ้อย ฟาง รวมทั้งกระดาษใช้แล้ว

7.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยที่ใช้ผลิตเยื่อกระดาษ

7.2.1 เซลลูโลส (Cellulose) เป็นโพลิเมอร์ของกลูโคสที่ยาวประมาณ 4,000 ถึง 8,000 โมเลกุล ไม่มีกิ่งแขนง (Branch Chain) มีโครงสร้างในลักษณะผลึกที่เป็นระเบียบ (Crystallites) มีความแข็งแรงสูง ซึ่งใช้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการผลิตกระดาษ

7.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ประกอบด้วยน้ำตาลโมโนแซคคาไรด์ (Monosaccharide) มากกว่า 1 ชนิด เป็นกิ่งแขนง มีโครงสร้างในลักษณะอสัณฐาน (Amorphous) ไม่เป็นระเบียบ มีความแข็งแรงต่ำ

7.2.3 ลิกนิน (Lignin) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มักพบอยู่ ร่วมกับเซลลูโลส โครงสร้างโมเลกุลของลิกนินมีลักษณะเป็นโพลิเมอร์ ประกอบด้วย โมโนเมอร์ ขนาดเล็กมารวมตัวกัน ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษต้องกำจัดลิกนินออกไป เนื่องจากเป็น สาเหตุทำให้กระดาษมีสีคล้ำ และเยื่อมีความแข็งแรงน้อยลง

7.3 การผลิตเยื่อกระดาษ แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ดังนี้ (สลักจิต, 2549; กรม โรงงานอุตสาหกรรม, 2550)

7.3.1 การจัดเตรียมวัตถุดิบ ประกอบด้วยขั้นตอนการลอกเปลือกไม้ (Debarking) การสับชิ้นไม้ (Chipping) และการคัดขนาด (Screening) ซึ่งขั้นตอนนี้จะเป็นการกำจัดสิ่งเจือปนที่ ไม่ต้องการออก และแปรรูปให้มีขนาดพอเหมาะที่จะนำไปใช้ในการผลิตเยื่อขั้นต่อไป

7.3.2 การต้มเยื่อกระดาษ (Pulping) เป็นการสกัดเยื่อจากไม้ สามารถทำได้ 3 วิธี คือ

7.3.2.1 กระบวนการเชิงกล (Mechanical Pulping) หลักการที่สำคัญของกระบวนการนี้คือ การบด (Grinding) เพื่อกระจายเส้นใยในเนื้อไม้ออกจากกัน แล้วนำมาแยกเยื่อออกจากเศษไม้ชิ้นหยาบ เยื่อที่ได้จากวิธีการนี้จะมีความแข็งแรงต่ำ เหมาะกับการนำไปผลิตกระดาษคุณภาพต่ำ เช่น กระดาษหนังสือพิมพ์

7.3.2.2 กระบวนการทางเคมี (Chemical Pulping) เป็นการนำวัตถุดิบมาต้มกับสารเคมีความเข้มข้นสูง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมซัลไฟด์ (Na₂S) และสารเคมีพวกไบซัลไฟต์ (Bisulphite) เป็นต้น เพื่อสกัดเอาสารในเนื้อไม้ (ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส) ที่เป็นตัวยึดเส้นใยที่จับตัวกันไว้ออกมา เยื่อจากวิธีนี้จะมีปริมาณเซลลูโลสสูง มีลิกนินและสารอินทรีย์อื่น ๆ ปนอยู่น้อยมาก มีความเหนียวสูง เหมาะกับการนำไปผลิตกระดาษที่มีคุณภาพชั้นดี

7.3.2.3 กระบวนการกึ่งเคมี (Semi-Chemical Pulping) เป็นการสกัดเยื่อโดยใช้การต้มเยื่อทางเคมีและเชิงกลร่วมกัน ขั้นตอนแรกเป็นการใช้สารเคมีเพื่อทำให้สารที่ยึดเส้นใยอ่อนตัวลงทำให้สามารถสกัดเยื่อออกมาได้ง่ายขึ้นและใช้พลังงานน้อยลง ขั้นตอนที่ 2 เป็นการบดเนื้อไม้หรือวัตถุดิบอื่น ๆ ที่ผ่านการแช่สารเคมีมาแล้วเพื่อแยกเยื่อออกมา เยื่อจากวิธีนี้จะมีความแข็งแรงมากกว่าเยื่อที่สกัดโดยกระบวนการเชิงกล แต่แข็งแรงน้อยกว่าเยื่อที่สกัดด้วยกระบวนการทางเคมี

7.4 การผลิตกระดาษ

เยื่อที่สกัดได้จะแขวนลอยอยู่ในน้ำเรียกว่า Pulp Slurry ซึ่งจะนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษต่อไป มีขั้นตอนการผลิต ดังนี้ (สลักจิต, 2549; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550)

7.4.1 การฟอกขาวเยื่อ (Bleaching) เพื่อกำจัดลิกนินที่อยู่ในเยื่อกระดาษที่ไม่สามารถกำจัดออกได้หมดในขั้นตอนการต้มเยื่อกระดาษทำให้กระดาษมีสีขาวขึ้น สารเคมีที่ใช้ฟอกเยื่อ เช่น คลอรีน (Cl₂) ไฮโปคลอไรต์ (HOCl) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂)

7.4.2 การเติมสารแต่งเติม (Additives) นิยมเติมขณะตีปั่นเยื่อ แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ สารเพิ่มปริมาณ (Filler) ช่วยเพิ่มปริมาณทำให้กระดาษมากขึ้น ช่วยลดต้นทุนการผลิต Sizing Agent ทำหน้าที่เพิ่มความต้านทานการซึมผ่านของเหลว Binding ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กระดาษ และสารเติมแต่งเบ็ดเตล็ด เช่น สารเพิ่มความขาว สี สารป้องกันการเกิดโพลี เป็นต้น

7.4.3 การตีเยื่อปั่น (Beating) เพื่อแยกเยื่อออกจากกัน ทำให้กระดาษมีผิวเรียบขึ้น

7.4.4 การโรยเยื่อ เป็นขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่นกระดาษ

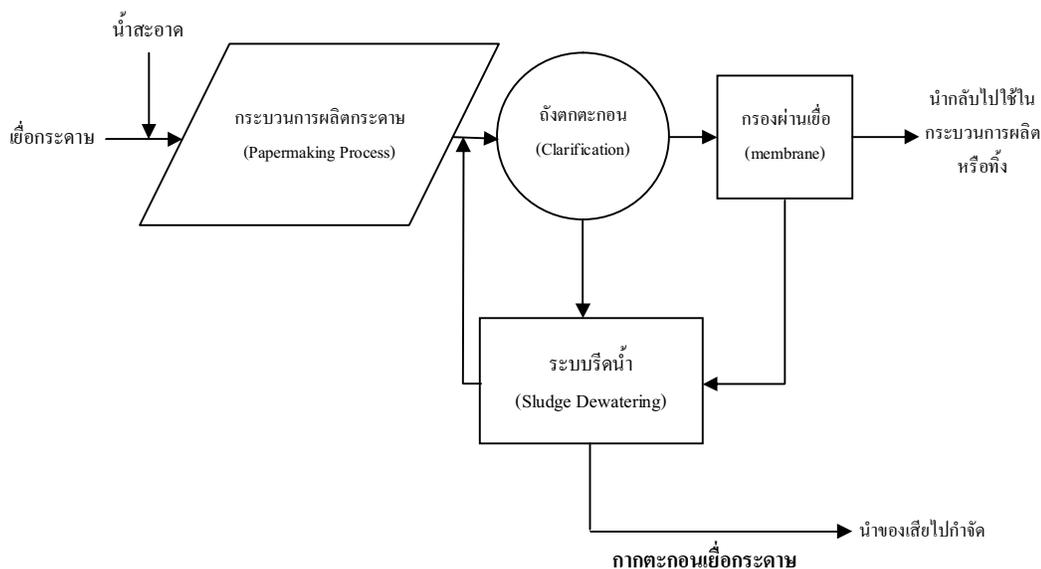
7.4.5 การอัดรีด (Pressing) เพื่อรีดน้ำส่วนใหญ่ออกไปก่อนนำกระดาษไปรีดแห้ง

7.4.6 การรีดแห้ง (Drying) กระดาษที่ผ่านการรีดแล้วยังมีความชื้นสูงจึงต้องนำไปทำให้แห้งอีก

7.4.7 การรีดเรียบ (Calendering) เพื่อลบรอยที่เกิดจากสายพานหรือตะแกรงระหว่างขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่นกระดาษ ซึ่งทำให้กระดาษเนื้อแน่นและเรียบมากขึ้น

7.5 กากตะกอนเยื่อกระดาษ

ในกระบวนการผลิตกระดาษของโรงงานอุตสาหกรรมมักพบปัญหาการสูญเสียเยื่อกระดาษที่ปะปนมากับน้ำเสียเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเมื่อทำการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระดาษแล้วจะทำให้เกิดของเสียที่เรียกว่า กากตะกอนเยื่อกระดาษ (Paper Sludge; PS) เป็นจำนวนมาก ดังที่แสดงในภาพที่ 7 กากตะกอนนี้เป็นเยื่อขนาดสั้นไม่เหมาะสมจะนำกลับไปใช้ใหม่ ในกระบวนการผลิต สุภาวิณี (2550) ได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนเยื่อกระดาษเหล่านี้พบว่าประกอบด้วยเซลลูโลส 50% เฮมิเซลลูโลส 40% ลิกนิน 7% และอื่นๆ 3% (ของน้ำหนักแห้ง)



ภาพที่ 7 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานกระดาษ

ที่มา : Triveni Engineering & Industries (2008)

8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบหลายชนิด โดยส่วนใหญ่มักเป็นพวกอินทรีย์สารที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น พวกเซลลูโลสที่มาจากพืช เป็นต้น แต่อย่างไรก็ดี มีการใช้วัสดุหลายชนิดมาผลิตถ่านกัมมันต์ ซึ่งก็ทำให้ถ่านกัมมันต์มีสมบัติต่าง ๆ กันไป เช่น

เกรียงศักดิ์ (2542) ได้ศึกษาการทำถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ เป็นสารกระตุ้น ผลการทดลองพบว่าถ่านกะลามะพร้าวที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 1.4 ตารางเมตรต่อกรัมถ่าน ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 66 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่าน และเมื่อนำถ่านกะลามะพร้าวที่ได้จากการเผาไปผ่านขั้นตอนการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ด้วยอัตราส่วนของซิงค์คลอไรด์ต่อถ่านกะลามะพร้าว 2.5:1 จะทำให้ได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 608 ตารางเมตรต่อกรัมถ่าน ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 869.40 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่าน แสดงว่าการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้สารเคมีในขั้นตอนการกระตุ้นทำให้ถ่านกะลามะพร้าวมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์

Khalili *et al.* (2000) ได้ศึกษาการนำกากตะกอนจากการผลิตเยื่อกระดาษ (Paper mill sludge) มาทำถ่านกัมมันต์โดยมีวิธีในการผลิต คือ นำไปกระตุ้นด้วยทางเคมีด้วยอัตราส่วนของซิงค์คลอไรด์ต่อกากตะกอนจากการผลิตเยื่อกระดาษเท่ากับ 3.5 แล้วนำไปกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์จากกากกระดาษที่ผ่านการผลิตตามขั้นตอนดังกล่าวแล้วจะมีพื้นที่ผิวสูงถึง 1,020 – 1,700 ตารางเมตรต่อกรัมถ่าน และมีขนาดรูพรุนส่วนใหญ่เป็นแบบขนาดกลาง (Mesopore)

อรชума และคณะ (2547) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ทำจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรมาเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ในการดูดซับแก๊สที่เกิดจากกระบวนการหลอมพลาสติก ซึ่งเป็นสารในกลุ่ม Polyaromatic Hydrocarbon หรือ PAHs ประกอบด้วยสารจำนวน 6 ชนิด คือ Naphthalene Acenaphthylene Acenaphthene Anthracene Phenanthrene และ Pyrene สำหรับวัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย กาบมะพร้าว แกลบ ฟางข้าว และขี้เถ้า ซึ่งสามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร และผ่านการอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าแก๊สซึ่งผ่านคอลัมน์ที่บรรจุด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ เป็นเวลา 1 นาที จะถูกดูดซับโดยกาบมะพร้าว แกลบ ฟางข้าวและขี้เถ้า ด้วยประสิทธิภาพที่ต่างกัน โดยถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารทั้ง 6 ชนิดได้ร้อยละ 100 แกลบมีประสิทธิภาพในการดูดซับสาร Naphthalene Acenaphthylene Acenaphthene Anthracene Phenanthrene และ Pyrene ได้ร้อยละ

96.27 96.23 96.36 96.22 96.64 และ 96.39 ตามลำดับ ส่วนกาบมะพร้าวมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารทั้ง 6 ชนิดดังกล่าวได้ร้อยละ 92.89 92.79 92.87 93.86 93.82 และ 94.18 ตามลำดับ จี๋เลื่อยมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารทั้ง 6 ชนิดดังกล่าวได้ร้อยละ 91.18 93.41 93.86 92.45 92.52 และ 92.77 ตามลำดับ และฟางข้าวมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารทั้ง 6 ชนิดดังกล่าวได้ร้อยละ 90.24 91.08 91.06 90.82 91.06 และ 91.01 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับแต่ละชนิดพบว่า ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับแก๊สดีที่สุดในรองลงมา คือ แกลบ กาบมะพร้าว จี๋เลื่อย และฟางข้าว ตามลำดับ

Sae-ung and Boonamnuayvitaya (2003) ได้รายงานผลการศึกษาศึกษาการดูดซับไอระเหยของฟอร์มัลดีไฮด์ (Formoldehyde) ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟซึ่งผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีการที่แตกต่างกันรวมจำนวนทั้งหมด 6 ชนิด โดยใช้วิธีการกระตุ้น 3 แบบ คือ กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ จากผลการศึกษาศึกษาความสามารถในการดูดซับไอระเหยของฟอร์มัลดีไฮด์ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จนกระทั่งการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุลพบว่าถ่านกัมมันต์ทั้ง 6 ชนิดมีความสามารถในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในระดับต่ำ เนื่องจากกลุ่มฟังก์ชันทางเคมีบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ทั้ง 6 ชนิดส่วนใหญ่เป็นกลุ่มของสารพวกที่ไม่ชอบน้ำ สำหรับชนิดของถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ได้ดีที่สุดคือ ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเผาแบบ ไพโรไลซิส (Pyrolysis) แล้วนำมากระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($CZn-N_2$) เป็นชนิดมีค่าพื้นที่ผิวทั้งหมด (Specific Surface Area) และปริมาตรรูพรุน (Pore Volumes) น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเผาแบบ Pyrolysis แล้วนำมากระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($CZn-N_2-CO_2$) ที่มีค่า Specific Surface Area และ Pore Volumes สูงที่สุด ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากลักษณะกลุ่มฟังก์ชันทางเคมีบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ 2 ชนิดนี้ โดย $CZn-N_2-CO_2$ มีกลุ่มฟังก์ชันหลักเป็นพวกที่ไม่ชอบน้ำ คือ กลุ่มไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon Group; C-H) แต่ $CZn-N_2$ มีกลุ่มฟังก์ชันหลักเป็นพวกที่ชอบน้ำอยู่ถึง 2 กลุ่ม คือ กลุ่มอัลคิล (Alkyl Group; O-H) และกลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl Group; C=O) ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าความสามารถในการดูดซับไอระเหยของฟอร์มัลดีไฮด์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์

ลัดดา และ อัจฉรา (2549) ได้รายงานผลการศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากจี๋เลื่อยไม้ยางพาราในการดูดซับไอระเหยของ Toluene โดยเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดอยู่ระหว่าง 20-30 เมช (Mesh) ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ทำการทดลองโดยให้ไอระเหยของ

Toluene ผ่านคอลัมน์ที่มีถ่านกัมมันต์แบบเม็ดบรรจุอยู่ 1.5 กรัม มีปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย อัตราการไหลของแก๊สที่อัตราการไหล 2.5 3.5 และ 5 ลิตร/นาที และอุณหภูมิ 25 29 และ 33 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาพบว่าเมื่ออัตราการไหลและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ ถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวได้เร็วขึ้น เนื่องจากที่อัตราการไหลสูงจะมีปริมาณ ไอระเหยของ Toluene ที่เข้าสู่คอลัมน์มากขึ้น ทำให้เกิดการดูดซับ Toluene ได้อย่างรวดเร็ว ส่วน ที่อุณหภูมิสูงไอระเหยของ Toluene จะเข้าไปไล่สารชนิดอื่นที่อยู่ภายในรูพรุนออกมาได้มากจึงทำ ให้เกิดการดูดซับได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า นอกจากนี้ ยังพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจาก กะลามะพร้าวจะเข้าสู่สภาวะการอิ่มตัวได้เร็วกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากซีลี้อยู่ไม่ยั้งพาราที่สภาวะ เดียวกัน เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากซีลี้อยู่ไม่ยั้งพารามีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าถ่านกัมมันต์ที่ ผลิตจากกะลามะพร้าว สำหรับสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอของ Toluene ของถ่านกัมมันต์ทั้ง สองชนิด คือ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และมีอัตราการไหลเท่ากับ 2.5 ลิตร/นาที

Chaiyaand and Boonamnuayvitaya (2003) ได้ศึกษาการดูดซับไอระเหยของ Toluene ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า สำหรับวิธีการที่เหมาะสมในการ ผลิตถ่าน กัมมันต์ คือ อัตราส่วนของซิงค์คลอไรด์ต่อกากกาแฟเท่ากับ 3:1 และนำมากระตุ้นด้วย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ที่ผ่าน การผลิตตามวิธีการดังกล่าวแล้วจะมีพื้นที่ผิวทั้งหมด 913.50 ตารางเมตร/กรัมถ่าน เป็นพื้นที่ผิวของ รูพรุนแบบ Mesopore เท่ากับ 629.13 ตารางเมตร/กรัมถ่าน ปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเท่ากับ 1.01 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัมถ่าน มีรูพรุนแบบ Mesopore ประมาณร้อยละ 92 และจากการศึกษา ความสามารถของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดในการดูดซับไอระเหยของ Toluene ในช่วงความเข้มข้น ระหว่าง 100–740 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับไอระเหยของ Toluene ได้มากกว่า ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า นอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการดูดซับไอระเหยของ Toluene จะมี ค่ามากขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับและความเข้มข้นของ Toluene แต่จะลดลงเมื่ออุณหภูมิ สูงขึ้น

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

การทดลองการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ในอากาศโดยตัวดูดซับจากกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานกระดาษแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ การเตรียมตัวดูดซับโดยการเผาและคัดขนาด การศึกษาสมบัติของตัวดูดซับที่ผลิตขึ้น และการศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับแต่ละชนิดในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ซึ่งมีวิธีการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมตัวดูดซับ

1.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำตัวดูดซับ

วัตถุดิบที่นำมาทำตัวดูดซับคือกากตะกอนเยื่อกระดาษจากการแยกน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานกระดาษจากกระบวนการผลิตซึ่งมีลักษณะเป็นขุยสีเทา ฟู เกาะกันเป็นก้อน และมีความชื้นสูง (ลักษณะของกากตะกอนเยื่อกระดาษแสดงในภาคผนวก ข) ดังนั้น จึงต้องนำมาอบแห้งแล้วจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิ 350 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส โดยทุกอุณหภูมิทำการเผาเป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง เพื่อเลือกอุณหภูมิที่จะนำไปใช้สำหรับเตรียมตัวดูดซับเพื่อใช้ในการทดลอง โดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับหลังการเผา

1.2 การเตรียมตัวดูดซับเพื่อใช้ในการทดลอง

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพในข้อ 1.1 ทำให้ทราบอุณหภูมิที่จะใช้เตรียมตัวดูดซับสำหรับการทดลอง คือ อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส โดยขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับเป็นดังนี้

1. นำกากตะกอนเยื่อกระดาษไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน เพื่อไล่ความชื้น แล้วปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง
2. แบ่งกากตะกอนเยื่อกระดาษที่อบแล้วออกเป็น 4 ส่วน
3. นำแต่ละส่วนใส่ในถ้วยกระเบื้องแล้วปิดปากถ้วยด้วย Aluminum Foil เเจาะรูเพียงเล็กน้อยแล้วนำไปเผาไล่อากาศออกด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 10 นาที

4. นำส่วนที่ 1 ไปเผาในเตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ส่วนที่ 2 ไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ส่วนที่ 3 ไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง และส่วนที่ 4 ไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็น

5. นำตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด ไปคัดแยกขนาดโดยร่อนผ่านตะแกรงแยกขนาดให้ได้ 2 ขนาด คือ ขนาดระหว่าง 300 - 500 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่เท่ากับขนาดส่วนใหญ่ของถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในหลอดเก็บตัวอย่างอากาศ และขนาดระหว่าง 500 - 1,000 ไมโครเมตร

6. เก็บตัวดูดซับแต่ละชนิด โดดูดความชื้น (Dessicator) ก่อนนำไปใช้ทดลอง โดยสรุปจากขั้นตอนนี้จะได้ตัวดูดซับ 8 ชนิด ซึ่งใช้ชื่อเรียกและรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงชนิดของตัวดูดซับที่ได้จากการเผาและคัดขนาด

ชื่อที่ใช้เรียก ชนิดตัวดูดซับ	อุณหภูมิในการเผา (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลาในการเผา (ชั่วโมง)	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)
S1	400	1	300 - 500
S2	400	1	500 - 1,000
S3	400	2	300 - 500
S4	400	2	500 - 1,000
S5	500	1	300 - 500
S6	500	1	500 - 1,000
S7	500	2	300 - 500
S8	500	2	500 - 1,000

2. ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับ

การศึกษาสมบัติของตัวดูดซับในการดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กทำโดยการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number) ในการทดลองนี้ได้ใช้วิธีวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนตามมาตรฐานของ American Water Works Association B604 (AWWA, 2006) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ตามข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์ (มอก.900-2547) ที่ได้กำหนดให้วิเคราะห์ด้วยวิธีตามมาตรฐาน ASTM D4607 ตามรายละเอียดในภาคผนวก ง

3. การศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX

การศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้ คือ

3.1 เตรียมการวิเคราะห์ปริมาณสารกลุ่ม BTEX ในอากาศ

วิเคราะห์ปริมาณสารกลุ่ม BTEX โดยวิธี Headspace ตามวิธี EPA Method 5021 (U.S.EPA, 2003) สำหรับการทดลองนี้ได้นำขวดตัวอย่างไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส จนถึงสมดุล แล้วจึงดูดตัวอย่างอากาศด้วย Gas Tight Syringe แล้ววิเคราะห์โดยเครื่อง Gas Chromatograph (GC)

3.2 เตรียมการวิเคราะห์ปริมาณสารกลุ่ม BTEX ในตัวดูดซับ

การสกัดสารกลุ่ม BTEX ในตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ โดยวิธีของ EPA Method 3820 (U.S.EPA, 1986) สำหรับสารที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมดรวมทั้งสารทดลองที่ใช้ (Benzene Toluene Ethylbenzene และ Xylenes) เป็น AR Grade จากผู้ผลิต ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ก

1. นำตัวอย่างตัวดูดซับที่ได้จากการทดลองเทใส่ลงในหลอดทดลอง ปิดปากขวดด้วย Aluminum Foil และปิดซ้ำอีกชั้นด้วย Parafilm
2. เติม Reagent Water (Uncontaminated Water หรือ DI Water) 5 มิลลิลิตร
3. นำไปเขย่าด้วยเครื่อง Ultrasonic Bath นาน 1 นาที
4. นำไปปั่นให้ตกตะกอนด้วยเครื่อง Centrifuge ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ความเร็ว 4,000 รอบ/นาที นาน 5 นาที
5. แยกส่วนใส (Supernatant) ลงใน Volumetric Flask ขนาด 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรของสารละลายเป็น 10 มิลลิลิตร ด้วย Reagent Water
6. ใส่ Hexadecane 0.5 มิลลิลิตร ลงใน Flask แล้วเขย่านาน 2 นาที
7. ตั้งทิ้งไว้ให้ Hexadecane แยกชั้น จึงดูดส่วนใสไปวิเคราะห์หาสารกลุ่ม BTEX ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph

สำหรับการสกัดสารกลุ่ม BTEX ในการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารระหว่างตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนเยื่อกระดาษกับถ่านกัมมันต์ในหลอดเก็บตัวอย่างอากาศทำโดยวิธีที่ดัดแปลงจากวิธีตามมาตรฐานของ NIOSH Method 1501 (NIOSH, 2003) ดังนี้

1. นำตัวอย่างตัวดูดซับที่ได้จากการทดลองเทใส่ลงในหลอดแก้ว (Vial) ขนาด 2 มิลลิลิตร
2. ใส่ Methanol ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดแก้ว แล้วปิดฝาให้สนิททันที
3. ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที และเขย่าตัวอย่างบางครั้งคราว แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาสารกลุ่ม BTEX ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph

เมื่อสกัดสารกลุ่ม BTEX จากตัวดูดซับโดยวิธีตามข้อ 3.1 หรือ 3.2 แล้ว สารละลายที่ได้จะถูกวิเคราะห์หาปริมาณโดยเครื่อง Gas Chromatograph (GC) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น autosystem XL Gas Chromatograph ที่มี Flame Ionization Detector (FID) และใช้ Capillary Column RTX-1 ความยาว 30 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.32 มิลลิเมตร Film Thickness 3 ไมโครเมตร ซึ่งมีสภาวะของเครื่อง ดังนี้

อุณหภูมิ Detector: 280 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ Injector : 280 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ Oven : ใช้โปรแกรมอุณหภูมิ (Temperature Program) ดังนี้

อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 240 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 5 องศาเซลเซียส/นาที และเพิ่มอุณหภูมิเป็น 280 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 16 องศาเซลเซียส/นาที หลังจากอุณหภูมิ Column เป็น 280 องศาเซลเซียส แล้วคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 10 นาที

อัตราการไหลของแก๊สใน Column : H₂ 45.0 มิลลิลิตร/นาที

Air 450 มิลลิลิตร/นาที

Make-up Gas (N₂) 30.0 มิลลิลิตร/นาที

Carrier Gas (He) 5.0 มิลลิลิตร/นาที

3.2.1 %Recovery และ Method Detection Limit ของการวิเคราะห์สารกลุ่ม

BTEX

เติม (Spike) สารละลาย BTEX ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนลงในตัวดูดซับชนิด S7 (ตัวดูดซับที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขนาด 300–500 ไมโครเมตร) และชนิด AC (ถ่านกัมมันต์ในหลอดเก็บตัวอย่างอากาศที่มีจำหน่าย) แล้วนำไปสกัดและวิเคราะห์โดยวิธี EPA Method 3820 (U.S.EPA, 1986) และ NIOSH Method 1501 (NIOSH, 2003) ความเข้มข้นของสารที่วิเคราะห์ได้นำไปคำนวณ ดังนี้

$$\% \text{Recovery} = \frac{\text{ความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้ (มิลลิกรัม/ลิตร)}}{\text{ความเข้มข้นของสารที่เติมลงไปในตัวอย่าง (มิลลิกรัม/ลิตร)}} \times 100$$

ส่วนค่า Method Detection Limit คำนวณได้จาก 3 เท่าของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Method Detection Limit = 3SD) จากการวิเคราะห์ตัวอย่างขณะทำ Recovery 3 ตัวอย่าง สำหรับ %Recovery และ Method Detection Limit ของการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 %Recovery ของวิธีที่ใช้สกัดและวิเคราะห์สารกลุ่ม BTEX โดยวิธี EPA Method 3820 และ NIOSH Method 1501

สารทดลอง	วิธี EPA Method 3820	วิธี NIOSH Method 1501	
	%Recovery ของ S7	%Recovery ของ AC	%Recovery ของ S7
Benzene	75	91	81
Toluene	59	78	81
Ethylbenzene	50	73	85
<i>m,p</i> -Xylene	52	73	76
<i>o</i> -Xylene	58	73	76

ตารางที่ 5 ค่า Method Detection Limit ของวิธีที่ใช้สกัดและวิเคราะห์สารกลุ่ม BTEX โดยวิธี EPA Method 3820 และ NIOSH Method 1501

สารทดลอง	วิธี EPA Method 3820	วิธี NIOSH Method 1501	
	S7 (ไมโครกรัม/กรัมน้ำหนักตัวดูดซับ)	AC (ไมโครกรัม/กรัมน้ำหนักตัวดูดซับ)	S7 (ไมโครกรัม/กรัมน้ำหนักตัวดูดซับ)
Benzene	46	109	46
Toluene	63	172	61
Ethylbenzene	70	197	57
<i>m,p</i> -Xylene	55	123	49
<i>o</i> -Xylene	57	86	58

3.3 วิธีการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับ

3.3.1 การหาระยะเวลาการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับที่จุดสมดุล (Equilibrium Time) ประกอบด้วย

ก. เตรียมสารทดลอง โดยละลายสารแต่ละชนิดในเมทานอล (Metanol) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ตามที่แสดงในตารางที่ 6 สำหรับความเข้มข้นของสารที่ใช้ในการทดลองได้จากการคำนวณค่ามาตรฐานความปลอดภัยในอากาศและค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของสารระหว่างตัวดูดซับกับอากาศ ดังรายละเอียดในภาคผนวก จ

ตารางที่ 6 ความเข้มข้นของสารกลุ่ม BTEX ที่ใช้ในการทดลอง

สารทดลอง	ความเข้มข้นที่ 1 (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่ 2 (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่ 3 (มิลลิกรัม/ลิตร)
Benzene	1.90	2.85	3.8
Toluene	6.48	9.72	12.96
Ethylbenzene	5.04	7.56	10.08
Xylenes	11.39	17.09	22.78

ข. ใช้ตัวดูดซับ S7 (ตัวดูดซับขนาด 300 – 500 ไมโครเมตร ที่เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง) เป็นตัวแทนของตัวดูดซับทั้งหมดในการทดลองหาระยะเวลาการดูดซับที่จุดสมดุล เนื่องจากเป็นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับสารได้มาก จึงอาจทำให้มีระยะเวลาเข้าสู่สมมูลนานกว่าตัวดูดซับชนิดอื่น ๆ

ก. ชั่งตัวดูดซับหนัก 150 มิลลิกรัม (เป็นปริมาณที่เท่ากับถ่านกัมมันต์ที่บรรจุอยู่ในหลอดเก็บตัวอย่างอากาศ) ใส่ในหลอดแก้ว (Vial) ขนาด 10 มิลลิลิตร จำนวน 9 ขวด

ง. ฉีดสารทดลองที่ความเข้มข้นสูงสุดลงในหลอดแก้ว (Vial) ที่บรรจุตัวดูดซับจำนวน 3 ขวด ปิดฝาด้วย Aluminum Cap ให้สนิท และนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิด้วยความเร็ว 150 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

จ. เก็บตัวอย่างหลังจากเขย่าเป็นเวลา 1 2 และ 3 วัน และวิเคราะห์หาปริมาณสารกลุ่ม BTEX ในอากาศโดยวิธี Headspace ตามวิธี EPA Method 5021 (U.S.EPA, 2003) และสกัดตัวดูดซับด้วย Hexadecane ตามวิธี EPA Method 3820 (U.S. EPA, 1986)

ฉ. คำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารในตัวดูดซับ (C_s) ต่อความเข้มข้นของสารในอากาศ (C_a) ที่เวลาต่าง ๆ เมื่อค่า C_s/C_a คงที่แสดงว่าการดูดซับถึงจุดสมดุล

3.3.2 การศึกษาการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับจากกากตะกอนเยื่อกระดาษแต่ละชนิด

การทดลองการดูดซับสารกลุ่ม BTEX โดยตัวดูดซับทั้ง 8 ชนิดดำเนินการดังนี้

ก. ชั่งตัวดูดซับหนัก 150 มิลลิกรัม ใส่ในหลอดแก้ว (Vial) ขนาด 10 มิลลิลิตร จำนวน 9 ขวด

ข. ฉีดสารทดลองแต่ละความเข้มข้นลงในหลอดแก้ว (Vial) ที่บรรจุตัวดูดซับความเข้มข้นละ 3 ขวด ปิดฝา Auminium Cap ให้สนิท และนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิด้วยความเร็ว 150 รอบ/นาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จนถึงสมดุล (ระยะเวลาที่ถึงจุดสมดุลได้จากการศึกษาในข้อที่ 3.2.1)

ค. เก็บตัวอย่าง และวิเคราะห์หาปริมาณสารกลุ่ม BTEX ในอากาศโดยวิธี Headspace ตามวิธี EPA Method 5021 (U.S.EPA, 2003) และสกัดตัวดูดซับด้วย Hexadecane ตามวิธี EPA Method 3820 (U.S. EPA, 1986)

ง. คำนวณหาค่าการดูดซับของตัวดูดซับแต่ละชนิดโดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich และ Langmuir ดังนี้

ไอโซเทอมแบบ Freundlich

ไอโซเทอมแบบ Freundlich ได้จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารในตัวดูดซับ ($\log C_s$) กับความเข้มข้นของสารในอากาศ ($\log C_a$) กราฟเส้นตรงที่ได้จะแสดงว่าการดูดซับของตัวดูดซับสามารถอธิบายได้โดยใช้ไอโซเทอม Freundlich ค่าคงที่จากความจุดตัดแกนเป็นความสามารถในการดูดซับสาร โดย

$$C_s = K_{sa} C_a^{1/n} \quad \text{ณ จุดสมดุลและอุณหภูมิคงที่}$$

ไอโซเทอมแบบ Langmuir

ไอโซเทอมแบบ Langmuir ได้จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารในอากาศต่อความเข้มข้นของสารในตัวดูดซับ หรือ (C_a/C_s) กับความเข้มข้นของสารในอากาศ (C_a) กราฟที่ได้เป็นเส้นตรงแสดงว่าการดูดซับสามารถอธิบายได้โดยใช้ไอโซเทอม Langmuir ซึ่งจะสามารถคำนวณหาปริมาณการดูดซับสูงสุดบนผิวของตัวดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (X/m) ได้จากความชัน ($1/b$) ส่วนค่าคงที่แสดงความแข็งแรงของการดูดซับหาได้จากจุดตัดแกนในแนวตั้ง ($1/kb$)

$$\frac{C_a}{C_s} = \frac{C_a}{b} + \frac{1}{ab} \quad \text{ณ จุดสมดุลและอุณหภูมิคงที่}$$

จ. เปรียบเทียบไอโซเทอมการดูดซับทั้ง 2 ชนิด และอธิบายการดูดซับของตัวดูดซับที่เตรียมได้จากสมการทั้ง 2 แบบ

ฉ. เลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมเพื่อใช้ทดลองเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ในหลอดเก็บตัวอย่างอากาศที่มีจำหน่าย (AC)

3.4 ศึกษาความสามารถในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายกับตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ

ขั้นตอนการทดลองทำเช่นเดียวกับข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 แต่ใช้ปริมาณของตัวดูดซับทั้งสองชนิดเพียง 7.5 มิลลิกรัมต่อตัวอย่าง และความเข้มข้นของสารละลายกลุ่ม BTEX ที่ใช้สูงขึ้นดังที่แสดงในตารางที่ 7 เนื่องจากตัวดูดซับ AC สามารถดูดซับสาร BTEX ได้ดีมากจนไม่สามารถตรวจพบสารในอากาศ สำหรับการสกัดสารกลุ่ม BTEX จากตัวดูดซับใช้วิธีมาตรฐานของ NIOSH Method 1501 (NIOSH, 2003) เนื่องจากเป็นวิธีมาตรฐานในการสกัดสารกลุ่ม BTEX จากตัวดูดซับในหลอดเก็บตัวอย่างอากาศที่มีจำหน่าย

ทั้งนี้ ในการสรุปผลใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich และแบบ Langmuir เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารของถ่านกัมมันต์ในหลอดเก็บตัวอย่างที่มีจำหน่ายและที่เตรียมจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ

ตารางที่ 7 ความเข้มข้นของสารที่ใช้ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX

สารทดลอง	ความเข้มข้นที่ 1 (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่ 2 (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่ 3 (มิลลิกรัม/ลิตร)
Benzene	14.59	21.85	29.18
Toluene	28.81	43.22	57.62
Ethylbenzene	36.01	54.02	72.02
Xylenes	64.07	96.11	128.14

3.4.1 ลักษณะของถ่านกัมมันต์จากหลอดเก็บตัวอย่างที่มีจำหน่าย

ถ่านกัมมันต์ในหลอดเก็บตัวอย่างอากาศที่นำมาใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX กับตัวดูดซับจากกากตะกอนเยื่อกระดาษนั้น เป็นถ่านกัมมันต์ชนิด ORBO-32 ขนาดเล็กของบริษัท SUPELCO ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ปริมาณที่บรรจุในหลอดเก็บตัวอย่างอากาศเท่ากับ 150 มิลลิกรัม มีขนาดอยู่ระหว่าง 380 – 850 ไมโครเมตร (20 – 40 เมช) พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 1,100 – 1,200 ตารางเมตรต่อกรัมถ่าน และมี Temperature Limit 900 องศาเซลเซียส

โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยมักจะผลิตด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ เนื่องจากขนาดของรูพรุนที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่าการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้ในการดูดซับแก๊สที่มีขนาดโมเลกุลขนาดเล็ก (ณัฐยา, 2545) ทั้งนี้ จากการทดลองคัดแยกขนาดของถ่านกัมมันต์ในหลอดเก็บตัวอย่างอากาศที่ขนาดระหว่าง 300 – 500 ไมโครเมตร และ 500 – 1,000 ไมโครเมตร พบว่า ถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่มีขนาดระหว่าง 300 – 500 ไมโครเมตร คิดเป็น 85 % และมีขนาดระหว่าง 500 – 1,000 ไมโครเมตร คิดเป็น 15 %

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

1. การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาต่อการเผา

การเตรียมตัวดูดซับโดยการเผาวัตถุดิบที่จะนำมาทำเป็นตัวดูดซับเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อคุณภาพของตัวดูดซับที่นำมาใช้ในการทดลอง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาถึงอุณหภูมิและเวลาของการเผา ซึ่งจะมีผลต่อลักษณะเบื้องต้นของตัวดูดซับที่ใช้ทดลอง ในการทดลองเผาได้กำหนดช่วงอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 350 – 600 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส เป็นสถานะที่ไม่เหมาะสมในการผลิตตัวดูดซับ เพราะจะให้ผลผลิตต่ำมาก (วิศรุต, 2542) สำหรับผลการทดลองเผา พบว่า ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส สีของกากตะกอนเยื่อกระดาษเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเพียงเล็กน้อย โดยที่ระยะเวลาการเผาที่ 2 ชั่วโมง เริ่มมีกากตะกอนบางส่วนเปลี่ยนเป็นสีดำ เพราะสารต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอนที่อยู่ในกากตะกอนเยื่อกระดาษยังสลายตัวออกไปไม่หมด ทั้งนี้ แสดงให้เห็นได้จากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผากากตะกอนเยื่อกระดาษจะเปลี่ยนเป็นสีดำมากขึ้น เนื่องจากขั้นตอนการเผาตัวดูดซับ (Carbonization) เป็นการเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ทำให้ได้ถ่านที่มีลักษณะเป็นสีดำที่เรียกว่า Char เป็นถ่านที่มีปริมาณคาร์บอนสูงทำให้สามารถดูดซับสารได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และ 500 องศาเซลเซียส ที่กากตะกอนเยื่อกระดาษมีลักษณะเปลี่ยนเป็นสีดำมากขึ้น ส่วนการเผากากตะกอนเยื่อกระดาษที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่ากลายเป็นเถ้า แสดงว่าความร้อนที่อุณหภูมินี้มากเกินไปทำลายโครงสร้างคาร์บอนของกากตะกอนเยื่อกระดาษซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อกระบวนการดูดซับ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกใช้กากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งมีลักษณะเป็นสีดำที่ตรงกับลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่มีสีดำ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 2547) มีผลการทดลองดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ลักษณะของกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิในการเผา (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลาในการเผา (ชั่วโมง)	ลักษณะทางกายภาพภายนอกของ กากตะกอนเยื่อกระดาษ
350	1	มีสีเทาเข้มขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย
350	2	มีลักษณะเป็นสีเทาเข้มเกือบกลายเป็นสีดำ
400	1	เปลี่ยนเป็นสีดำเพียงบางส่วน
400	2	มีส่วนที่เป็นสีดำเพิ่มมากขึ้น
500	1	เปลี่ยนเป็นสีดำเข้ม แต่มีบางส่วนเป็นสีดำน้อยกว่าเล็กน้อย
500	2	เปลี่ยนเป็นสีดำเข้มทั้งหมด
600	1	กากตะกอนเยื่อกระดาษส่วนใหญ่เปลี่ยนเป็นเถ้าสีขาว แต่มีบางส่วนยังเป็นสีดำเข้ม
600	2	เปลี่ยนเป็นเถ้าสีขาวเกือบทั้งหมด

2. การศึกษาสมบัติของตัวดูดซับที่ผลิตจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ

ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน (โดยวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ต่อตัวดูดซับแต่ละชนิด หรือ $n = 3$) เพื่อประเมินความสามารถในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับแต่ละชนิดในเบื้องต้น (ตารางที่ 9) พบว่า ตัวดูดซับที่ผลิตจากกากตะกอนเยื่อกระดาษแต่ละชนิดมีค่าการดูดซับไอโอดีนไม่แตกต่างกันมากนัก โดยตัวดูดซับที่เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่าระหว่าง 58.26 - 62.28 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน และตัวดูดซับที่เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีค่าระหว่าง 47.86 - 51.10 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน ทั้งนี้ ค่าที่วิเคราะห์ได้ทั้ง 8 ชนิดนี้ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับค่าที่กำหนดโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ได้กำหนดให้ถ่านกัมมันต์ต้องค่ามีมากกว่า 600 มิลลิกรัม/กรัมน้ำหนักตัวดูดซับ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกะลามะพร้าวที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 66 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่าน (เกรียงศักดิ์, 2542) จะเห็นว่าตัวดูดซับจากกากตะกอนเยื่อกระดาษมีค่าการดูดซับไอโอดีนใกล้เคียงกับถ่านกะลามะพร้าว โดยตัวดูดซับ S4 มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงที่สุดและ S7 มีค่าต่ำสุด โดยลำดับของการดูดซับไอโอดีนเป็นดังนี้ $S4 > S3 > S2 > S1 > S6 > S8 > S5$ และ S7

ตารางที่ 9 ค่าการดูดซับไอโอดีนของตัวดูดซับที่ผลิตจากกากตะกอนเยื่อกระดาษแต่ละชนิด

ชนิดตัวดูดซับ	อุณหภูมิในการเผา (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลาในการเผา (ชั่วโมง)	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัม/กรัมถ่าน)
S1	400	1	300 - 500	58.26
S2	400	1	500 - 1,000	60.09
S3	400	2	300 - 500	60.68
S4	400	2	500 - 1,000	62.28
S5	500	1	300 - 500	48.68
S6	500	1	500 - 1,000	51.10
S7	500	2	300 - 500	47.86
S8	500	2	500 - 1,000	49.37

เมื่อพิจารณาค่าการดูดซับไอโอดีนกับอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาตัวดูดซับแต่ละชนิดจะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเผาให้นานขึ้นค่าการดูดซับไอโอดีนจะสูงขึ้นด้วย แต่ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเผาให้นานขึ้นค่าการดูดซับไอโอดีนกลับน้อยลง และเมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับไอโอดีนของตัวดูดซับที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะมีค่าการดูดซับไอโอดีนมากกว่าตัวดูดซับที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส การที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นผลจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง นั้นยังไม่เพียงพอที่จะทำให้สารประกอบอินทรีย์วัตถุอื่น ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอนในกากตะกอนเยื่อกระดาษสลายตัวทั้งหมด และเมื่อเพิ่มระยะเวลาการเผาจึงทำให้สารประกอบอินทรีย์วัตถุอื่น ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอนสลายได้มากขึ้นจึงทำให้ตัวดูดซับที่ได้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 500 องศาเซลเซียส ความร้อนที่เพิ่มขึ้นอาจไปทำลายโครงสร้างของกากตะกอนเยื่อกระดาษจนทำให้พื้นที่ผิวลดลง ค่าการดูดซับไอโอดีนจึงน้อยลงด้วย

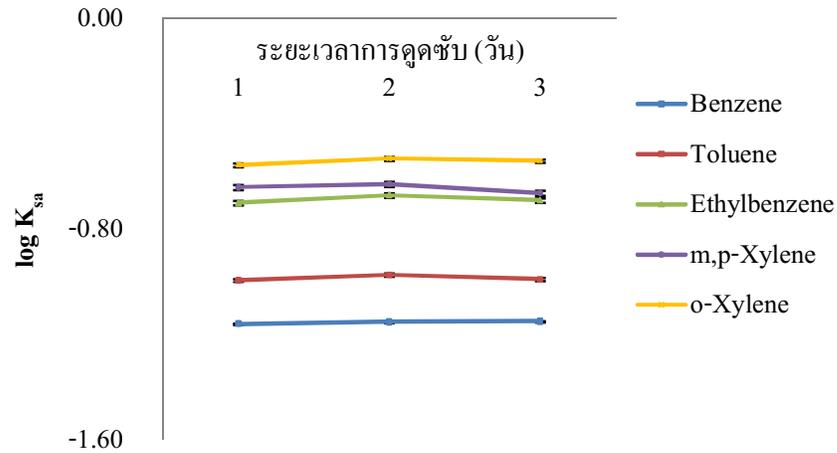
3. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับที่ผลิตจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ

กากตะกอนเยื่อกระดาษที่นำมาใช้ในการทดลองนี้เป็นกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียที่ผ่านขั้นตอนการรีดน้ำ แล้วนำไปผ่านกระบวนการคาร์บอนซ์เซชันที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส เพียงขั้นตอนเดียวโดยไม่ได้นำไปทำการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีอีก เนื่องจากการทดลองนี้ต้องการประหยัดพลังงานและสารเคมีที่ต้องใช้ในขั้นตอนการกระตุ้นด้วย

ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับทั้ง 8 ชนิด ทำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เพื่อประเมินและคัดเลือกชนิดตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับได้ดีที่สุดก่อนนำไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX กับถ่านกัมมันต์จากหลอกลีบตัวอย่างอากาศที่มีจำหน่าย สำหรับผลการทดลองเป็นดังนี้

3.1 ระยะเวลาการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับที่จุดสมดุล

ผลจากการทดลองเพื่อหาระยะเวลาการดูดซับที่จุดสมดุลจะใช้เป็นเวลาสำหรับทดสอบความสามารถในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่จุดสมดุลต่อไป ที่จุดสมดุลสัดส่วนของความเข้มข้นของสารในตัวดูดซับ (C_s) ต่อความเข้มข้นของสารในอากาศ (C_a) จะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงถึงแม้จะเพิ่มระยะเวลาในการทดลอง ผลการทดลองโดยใช้ตัวดูดซับ S7 ที่ความเข้มข้นสารละลาย BTEX สูงสุด คือ Benzene เท่ากับ 3.8 มิลลิกรัม/ลิตร Toluene เท่ากับ 12.96 มิลลิกรัม/ลิตร Ethylbenzene เท่ากับ 10.08 มิลลิกรัม/ลิตร และ Xylenes เท่ากับ 22.78 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่ามีค่า K_{sa} (sorbent/air partition coefficient หรือ สัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนระหว่างตัวดูดซับกับอากาศ) ซึ่งได้จากความเข้มข้นของสารในตัวดูดซับ (C_s) ต่อความเข้มข้นของสารในอากาศ (C_a) มีค่าค่อนข้างคงที่ตั้งแต่ 1 วันหลังเริ่มทดลอง (ตารางที่ 10 และภาพที่ 8) ดังนั้นระยะเวลาในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ที่จุดสมดุลคือ หลังจากเริ่มการทดลองแล้ว 1 วัน แต่เพื่อให้การดูดซับสารเข้าสู่สมดุลอย่างแน่นอน การทดลองหาความสามารถการดูดซับที่จุดสมดุลของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ จึงใช้เวลา 2 วัน หลังเริ่มทดลอง



ภาพที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_{sa} กับระยะเวลาการดูดซับ ตามสมการ Freundlich ของตัวดูดซับ S7

ตารางที่ 10 ผลการทดลองหาระยะเวลาการดูดซับที่จุดสมดุลของตัวดูดซับ S7 ที่ความเข้มข้นสูงสุด

สารทดลอง	วันที่	C_s	C_a	K_{sa}^* (ลิตร/กรัม น้ำหนักตัวดูดซับ)
		(ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักตัวดูดซับ)	(ไมโครกรัม/ลิตร)	
Benzene	1	89.60	1293.10	0.07
	2	69.02	961.12	0.07
	3	92.99	1315.39	0.07
Toluene	1	318.33	3135.86	0.10
	2	299.05	2526.94	0.12
	3	310.86	3050.83	0.10
Ethylbenzene	1	265.75	1334.04	0.20
	2	224.92	1137.29	0.20
	3	243.67	1195.85	0.20
m,p-Xylene	1	111.30	488.22	0.23
	2	103.58	442.07	0.23
	3	102.97	476.35	0.22
o-Xylene	1	97.12	350.19	0.28
	2	100.06	340.92	0.29
	3	98.62	343.33	0.29

* หมายเหตุ : $K_{sa} = C_s/C_a$

3.2 การศึกษาการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับจากกากตะกอนเยื่อกระดาษแต่ละชนิด

ผลการทดลองการดูดซับสารกลุ่ม BTEX โดยตัวดูดซับ 8 ชนิดใช้สารทดลอง 3 ความเข้มข้น แต่ละความเข้มข้นได้ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และการเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์หลังจากเริ่มการทดลอง 2 วัน (Equilibrium Time) ค่าความเข้มข้นของสารในตัวดูดซับ (C_s) และความเข้มข้นของสารในอากาศ (C_a) ที่ได้นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ตามรูปแบบไอโซเทอมของ Freundlich และไอโซเทอมของ Langmuir ดังภาพที่ 9 และ 10 ตามลำดับ จะได้ค่า K_{sa} จากสมการไอโซเทอมแบบ Freundlich และได้ค่า a (ค่าคงที่แสดงถึงความแข็งแรงของการดูดซับ) และค่า b หรือ X/m (ปริมาณการดูดซับสูงสุดบนผิวของตัวดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ) จากสมการไอโซเทอมแบบ Langmuir ของสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ซึ่งแสดงในภาคผนวก ก

Benzene

จากไอโซเทอมแบบ Langmuir พบว่า ความสามารถในการดูดซับ Benzene ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ได้ค่า X/m ของตัวดูดซับ S7 สูงสุด รองลงไปคือ $S3 > S6 > S8 > S5 = S1 > S4 > S2$ มีค่า X/m เรียงตามลำดับดังนี้ 222.22 217.39 169.49 166.67 163.93 163.93 138.89 และ 117.65 ไมโครกรัม/กรัมน้ำหนักของตัวดูดซับ ส่วนค่า a ของตัวดูดซับ $S2 > S4 > S8 > S7 > S6 > S1 > S5 > S3$ มีค่าเรียงตามลำดับดังนี้ 5,813.56 3,387.92 2,727.52 2,172.02 1,937.09 1,371.53 1,367.99 และ 1,331.94 ลิตร/กรัม โดยไอโซเทอมแบบ Langmuir มีค่า Correlation index (R^2) อยู่ระหว่าง 0.92 – 0.99

สำหรับไอโซเทอมแบบ Freundlich พบว่า มีค่า K_{sa} ในการดูดซับ Benzene ของตัวดูดซับ S7 สูงสุด รองลงไปคือ $S3 > S6 > S1 > S2 > S8 > S4 > S5$ ตามลำดับ และมีค่า K_{sa} เรียงตามลำดับดังนี้ 5.14×10^{-2} 3.41×10^{-2} 2.92×10^{-2} 2.10×10^{-2} 1.57×10^{-2} 1.56×10^{-2} 1.53×10^{-2} และ 1.08×10^{-2} ลิตร/กรัมน้ำหนักตัวดูดซับ โดยไอโซเทอมแบบ Freundlich มีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.75 – 0.98

เมื่อเปรียบเทียบไอโซเทอมทั้ง 2 ชนิดในการดูดซับ Benzene ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ได้ผลดังนี้ ตัวดูดซับ S7 สามารถดูดซับ Benzene ได้ดีที่สุด โดยไอโซเทอมแบบ Langmuir สามารถอธิบายการดูดซับ Benzene ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ได้ดีกว่าไอโซเทอมแบบ Freundlich ยกเว้นไอโซเทอมของตัวดูดซับ S3 ทั้งนี้ โดยพิจารณาจาก R^2 ซึ่งไอโซเทอมแบบ Lanmuir มีค่าสูงกว่า

ตารางที่ 11 ผลการทดลองการดูดซับสาร Benzene ของตัวดูดซับ S1 –S8

สารทดลอง	ตัวดูดซับ	Freundlich Isotherm		Langmuir Isotherm		
		K_{sa}	R^2	X/m	a	R^2
		(ลิตร/กรัม)		(ไมโครกรัม/กรัม)	(ลิตร/กรัม)	
Benzene	S1	2.10×10^{-2}	0.94	163.93	1,371.53	0.99
	S2	1.57×10^{-2}	0.96	117.65	5,813.56	0.99
	S3	3.41×10^{-2}	0.98	217.39	1,331.94	0.97
	S4	1.53×10^{-2}	0.75	138.89	3,387.92	0.99
	S5	1.08×10^{-2}	0.90	163.93	1,367.99	0.92
	S6	2.92×10^{-2}	0.89	169.49	1,937.09	0.97
	S7	5.14×10^{-2}	0.94	222.22	2,172.02	0.98
	S8	1.56×10^{-2}	0.95	166.67	2,727.52	0.99

Toluene

จากไอโซเทอมแบบ Langmuir พบว่า ความสามารถในการดูดซับ Toluene ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ได้ค่า X/m ของตัวดูดซับ S7 รองลงไปที่ $S3 = S5 > S6 = S8 > S4 > S1 > S2$ และมีค่า X/m เรียงตามลำดับดังนี้ 800.00 714.29 714.29 625.00 625.00 534.76 357.14 และ 222.22 ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักของตัวดูดซับ ส่วนค่า a ของตัวดูดซับ $S2 > S4 > S7 > S8 > S6 > S3 > S5 > S1$ มีค่าเรียงตามลำดับดังนี้ 4,284.90 2,254.61 1,911.90 1,181.77 1,166.78 800.92 526.30 และ 470.58 ลิตร/กรัม โดยไอโซเทอมแบบ Langmuir มีค่า Correlation index (R^2) อยู่ระหว่าง 0.94 – 0.98

สำหรับไอโซเทอมแบบ Freundlich พบว่า มีค่า K_{sa} ในการดูดซับ Toluene ของตัวดูดซับ S7 สูงสุด รองลงไปที่ $S3 > S1 > S6 > S8 > S4 > S5 > S2$ ตามลำดับ และมีค่า K_{sa} เรียงตามลำดับดังนี้ 13.35×10^{-2} 10.73×10^{-2} 9.22×10^{-2} 8.21×10^{-2} 7.58×10^{-2} 6.67×10^{-2} 5.17×10^{-2} และ 2.65×10^{-2} ลิตร/กรัม น้ำหนักตัวดูดซับ โดยไอโซเทอมแบบ Freundlich มีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.85 – 0.99

เมื่อเปรียบเทียบไอโซเทอมทั้ง 2 ชนิดในการดูดซับ Toluene ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ได้ผลดังนี้ ตัวดูดซับ S7 สามารถดูดซับ Toluene ได้ดีที่สุดในไอโซเทอมแบบ Langmuir สามารถอธิบายการดูดซับ Toluene ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ได้ดีกว่าไอโซเทอมแบบ Freundlich ยกเว้นไอโซเทอมของตัวดูดซับ S1 ทั้งนี้ โดยพิจารณาจาก R^2 ซึ่งไอโซเทอมแบบ Lanmuir มีค่าสูงกว่า

ตารางที่ 12 ผลการทดลองการดูดซับสาร Toluene ของตัวดูดซับ S1 –S8

สารทดลอง	ตัวดูดซับ	Freundlich Isotherm		Langmuir Isotherm		
		K_{sa}	R^2	X/m	a	R^2
		(ลิตร/กรัม)		(ไมโครกรัม/กรัม)	(ลิตร/กรัม)	
Toluene	S1	9.22×10^{-2}	0.99	534.76	470.58	0.95
	S2	2.65×10^{-2}	0.85	222.22	4,284.90	0.97
	S3	10.73×10^{-2}	0.87	714.29	800.92	0.97
	S4	6.67×10^{-2}	0.90	357.14	2,254.61	0.95
	S5	5.17×10^{-2}	0.85	714.29	526.30	0.94
	S6	8.21×10^{-2}	0.85	625.00	1,166.78	0.97
	S7	13.35×10^{-2}	0.86	800.00	1,911.90	0.97
	S8	7.58×10^{-2}	0.88	625.00	1181.77	0.98

Ethylbenzene

จากไอโซเทอมแบบ Langmuir พบว่า ความสามารถในการดูดซับ Ethylbenzene ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ได้ค่า X/m ของตัวดูดซับ S7 รองลงไปที่คือ $S5 > S6 > S8 > S3 > S1 > S4 > S2$ ตามลำดับ โดยมีค่า X/m เรียงตามลำดับดังนี้ 1,030.93 970.87 833.33 769.23 740.74 714.29 454.55 และ 232.56 ไมโครกรัม/กรัมน้ำหนักของตัวดูดซับ ส่วนค่า a ของตัวดูดซับ $S2 > S7 > S4 > S6 > S8 > S3 > S5 > S1$ มีค่าเรียงตามลำดับดังนี้ 5,129.43 2,013.70 1,952.60 1,752.85 1,584.21 1,039.02 850.75 และ 463.62 ลิตร/กรัม โดยไอโซเทอมแบบ Langmuir มีค่า Correlation index (R^2) อยู่ระหว่าง 0.88 – 0.98

สำหรับไอโซเทอมแบบ Freundlich พบว่า มีค่า K_{sa} ในการดูดซับ Ethylbenzene ของตัวดูดซับ S7 สูงสุด รองลงไปคือ $S3 > S1 > S6 > S4 > S8 > S5 > S2$ ตามลำดับ และมีค่า K_{sa} เรียงตามลำดับดังนี้ 22.01×10^{-2} 17.66×10^{-2} 17.08×10^{-2} 15.66×10^{-2} 15.09×10^{-2} 15.06×10^{-2} 11.68×10^{-2} และ 5.03×10^{-2} ลิตร/กรัม น้ำหนักตัวดูดซับ โดยไอโซเทอมแบบ Freundlich มีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.67 – 0.99

เมื่อเปรียบเทียบไอโซเทอมทั้ง 2 ชนิดในการดูดซับ Ethylbenzene ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ได้ผลดังนี้ ตัวดูดซับ S7 สามารถดูดซับ Ethylbenzene ได้ดีที่สุดในไอโซเทอมแบบ Langmuir สามารถอธิบายการดูดซับ Ethylbenzene ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ได้ดีกว่าไอโซเทอมแบบ Freundlich ยกเว้นไอโซเทอมของตัวดูดซับ S1 ทั้งนี้ โดยพิจารณาจาก R^2 ซึ่งไอโซเทอมแบบ Lanmuir มีค่าสูงกว่า

ตารางที่ 13 ผลการทดลองการดูดซับสาร Ethylbenzene ของตัวดูดซับ S1 –S8

สารทดลอง	ตัวดูดซับ	Freundlich Isotherm		Langmuir Isotherm		
		K_{sa} (ลิตร/กรัม)	R^2	X/m (ไมโครกรัม/กรัม)	a (ลิตร/กรัม)	R^2
Ethylbenzene	S1	17.08×10^{-2}	0.99	714.29	463.62	0.96
	S2	5.03×10^{-2}	0.67	232.56	5,129.43	0.96
	S3	17.66×10^{-2}	0.83	740.74	1,039.02	0.88
	S4	15.09×10^{-2}	0.83	454.55	1,952.60	0.90
	S5	11.68×10^{-2}	0.82	970.87	850.75	0.91
	S6	15.66×10^{-2}	0.84	833.33	1,752.85	0.98
	S7	22.01×10^{-2}	0.80	1,030.93	2,013.70	0.96
	S8	15.06×10^{-2}	0.90	769.23	1,584.21	0.91

m,p-Xylene

จากไอโซเทอมแบบ Langmuir พบว่า ความสามารถในการดูดซับ m,p-Xylene ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ได้ค่า X/m ของตัวดูดซับ S7 รองลงไปคือ $S5 > S8 > S6 > S3 > S1 > S4 > S2$ ตามลำดับ โดยมีค่า X/m เรียงตามลำดับดังนี้ 632.91 588.24 476.19 454.55 434.78 400.00 256.41 และ 169.49 ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักของตัวดูดซับ ส่วนค่า a ของตัวดูดซับ $S2 > S4 > S6 >$

S8 > S7 > S3 > S5 > S1 มีค่าเรียงตามลำดับดังนี้ 5,966.83 3,812.32 2,618.42 2,067.13 2,009.67 1,445.54 1,279.83 และ 1,119.72 ลิตร/กรัม โดยไอโซเทอมแบบ Langmuir มีค่า Correlation index (R^2) อยู่ระหว่าง 0.90 – 0.99

สำหรับไอโซเทอมแบบ Freundlich พบว่า มีค่า K_{sa} ในการดูดซับ *m,p*-Xylene ของตัวดูดซับ S7 สูงสุด รองลงไปที่ S1 > S8 > S6 > S3 > S5 > S4 > S2 ตามลำดับ และมีค่า K_{sa} เรียงตามลำดับดังนี้ 29.08×10^{-2} 19.94×10^{-2} 18.60×10^{-2} 17.84×10^{-2} 17.63×10^{-2} 16.06×10^{-2} 15.59×10^{-2} และ 7.25×10^{-2} ลิตร/กรัมน้ำหนักตัวดูดซับ โดยไอโซเทอมแบบ Freundlich มีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.77 – 0.99

เมื่อเปรียบเทียบไอโซเทอมทั้ง 2 ชนิดในการดูดซับ *m,p*-Xylene ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ได้ผลดังนี้ ตัวดูดซับ S7 สามารถดูดซับ *m,p*-Xylene ได้ดีที่สุดในไอโซเทอมแบบ Langmuir สามารถอธิบายการดูดซับ *m,p*-Xylene ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ได้ดีกว่าไอโซเทอมแบบ Freundlich ยกเว้นไอโซเทอมของตัวดูดซับ S3 ทั้งนี้ โดยพิจารณาจาก R^2 ซึ่งไอโซเทอมแบบ Lanmuir มีค่าสูงกว่า

ตารางที่ 14 ผลการทดลองการดูดซับสาร *m,p*-Xylene ของตัวดูดซับ S1 –S8

สารทดลอง	ตัวดูดซับ	Freundlich Isotherm		Langmuir Isotherm		
		K_{sa}	R^2	X/m	a	R^2
<i>m,p</i> -Xylene	S1	19.94×10^{-2}	0.99	400.00	1,119.72	0.99
	S2	7.25×10^{-2}	0.79	169.49	5,966.83	0.97
	S3	17.63×10^{-2}	0.99	434.78	1,445.54	0.90
	S4	15.59×10^{-2}	0.87	256.41	3,812.32	0.95
	S5	16.06×10^{-2}	0.92	588.24	1,279.83	0.93
	S6	17.84×10^{-2}	0.77	454.55	2,618.42	0.95
	S7	29.08×10^{-2}	0.88	632.91	2,009.67	0.98
	S8	18.60×10^{-2}	0.80	476.19	2,067.13	0.91

o-Xylene

จากไอโซเทอมแบบ Langmuir พบว่า ความสามารถในการดูดซับ *o*-Xylene ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ได้ค่า X/m ของตัวดูดซับ S7 รองลงไปที่ S5 > S3 > S5 > S6 > S8 > S4 > S2 ตามลำดับ โดยมีค่า X/m เรียงตามลำดับดังนี้ 826.45 564.97 366.30 293.26 234.19 227.27 201.21 และ 161.29 ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักของตัวดูดซับ ส่วนค่า a ของตัวดูดซับ S2 > S8 > S4 > S1 > S6 > S5 > S3 > S7 มีค่าเรียงตามลำดับดังนี้ 4,838.84 3,463.94 3,185.64 2,803.47 2,475.86 1,590.26 732.62 และ 611.76 ลิตร/กรัม โดยไอโซเทอมแบบ Langmuir มีค่า Correlation index (R^2) อยู่ระหว่าง 0.98 – 1

สำหรับไอโซเทอมแบบ Freundlich พบว่า มีค่า K_{sa} ในการดูดซับ *o*-Xylene ของตัวดูดซับ S7 สูงสุด รองลงไปที่ S3 > S5 > S6 > S4 > S8 > S1 > S2 ตามลำดับ และมีค่า K_{sa} เรียงตามลำดับดังนี้ 32.98×10^{-2} 24.76×10^{-2} 19.39×10^{-2} 18.96×10^{-2} 15.93×10^{-2} 13.19×10^{-2} 13.05×10^{-2} และ 10.23×10^{-2} ลิตร/กรัม น้ำหนักตัวดูดซับ โดยไอโซเทอมแบบ Freundlich มีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.94 – 1

เมื่อเปรียบเทียบไอโซเทอมทั้ง 2 ชนิดในการดูดซับ *o*-Xylene ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ได้ผลดังนี้ ตัวดูดซับ S7 สามารถดูดซับ *o*-Xylene ได้ดีที่สุด โดยไอโซเทอมแบบ Langmuir สามารถอธิบายการดูดซับ *o*-Xylene ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ได้ดีใกล้เคียงกับไอโซเทอมแบบ Freundlich

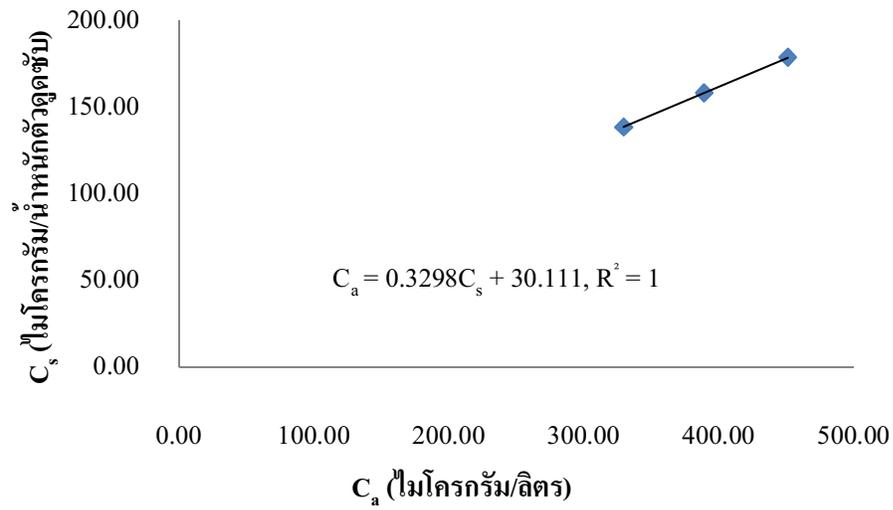
ตารางที่ 15 ผลการทดลองการดูดซับสาร *o*-Xylene ของตัวดูดซับ S1 –S8

สารทดลอง	ตัวดูดซับ	Freundlich Isotherm		Langmuir Isotherm		
		K_{sa}	R^2	X/m	a	R^2
		(ลิตร/กรัม)		(ไมโครกรัม/กรัม)	(ลิตร/กรัม)	
<i>o</i> -Xylene	S1	13.05×10^{-2}	0.99	201.21	2,803.47	0.99
	S2	10.23×10^{-2}	0.94	161.29	4,838.84	0.98
	S3	24.76×10^{-2}	0.99	564.97	732.62	0.99
	S4	15.93×10^{-2}	0.98	227.27	3,185.64	0.99
	S5	19.39×10^{-2}	0.99	366.30	1,590.26	0.99
	S6	18.96×10^{-2}	0.99	293.26	2,475.86	0.99
	S7	32.98×10^{-2}	1	826.45	611.76	1
	S8	13.19×10^{-2}	0.94	234.19	3,463.94	0.98

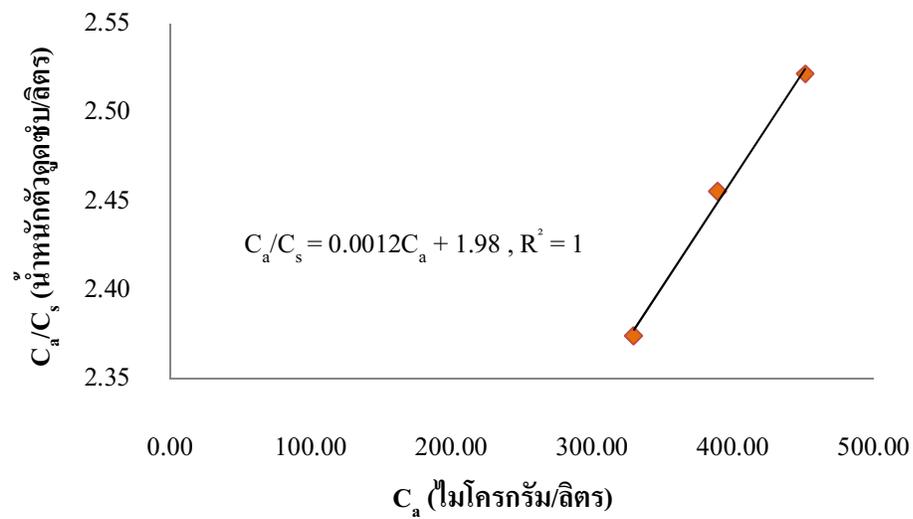
โดยสรุปแล้วผลการศึกษาไอโซเทอมทั้งสองแบบในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น พบว่าตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นที่มีค่า R^2 สูง แสดงว่าสมการทั้งสองสามารถอธิบายการดูดซับสารกลุ่ม BTEX โดยตัวดูดซับทั้ง 8 ชนิดได้ดี โดยสมการแบบ Langmuir สามารถใช้อธิบายผลการทดลองการดูดซับได้ดีกว่าสมการแบบ Freundlich เล็กน้อย เนื่องจากมีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 มากกว่า แสดงว่าการดูดซับสารกลุ่ม BTEX บนพื้นผิวของตัวดูดซับส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นการดูดซับสารบนพื้นผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) สามารถเกิดการดูดซับแบบผันกลับได้ (Reversible) ซึ่งเป็นรูปแบบของการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ทุกตัวของตัวดูดซับแต่ละชนิด พบว่า ตัวดูดซับที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขนาด 300–500 ไมโครเมตร (S7) สามารถดูดซับสารกลุ่ม BTEX ได้ดีที่สุด โดยพิจารณาจากค่า K_{sa} (sorbent/air partition coefficient) และ X/m (ปริมาณการดูดซับสูงสุดบนผิวของตัวดูดซับ/น้ำหนักตัวดูดซับ) มีค่าสูงสุด ดังนั้น ในการทดลองเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ระหว่างถ่านกัมมันต์จากหลอดเก็บตัวอย่างอากาศที่มีจำหน่ายกับตัวดูดซับที่ผลิตจากกากตะกอนเชื้อกระดาษจึงเลือกตัวดูดซับ S7 เพื่อนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป และเมื่อประเมินความสามารถในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของ S7 จากค่า X/m โดยสมการแบบ Langmuir พบว่าตัวดูดซับ S7 สามารถดูดซับ Ethylbenzene > *o*-Xylene > Toluene > *m,p*-Xylene > Benzene ตามลำดับ โดยมีค่า X/m เรียงตามลำดับดังนี้คือ 1,030.93 826.45 800.00 632.91 และ 222.22 ไมโครกรัม/กรัมของตัวดูดซับ S7

ข้อสังเกตจากผลการศึกษาค่าการดูดซับไอโอดีนและประสิทธิภาพในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับที่มีสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนระหว่างตัวดูดซับกับอากาศ ซึ่งบ่งชี้ความสามารถในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ได้ดีที่สุดคือ ตัวดูดซับ S7 แต่ S7 มีค่าการดูดซับไอโอดีนน้อยที่สุด ในขณะที่ตัวดูดซับ S4 ที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงที่สุดแต่ความสามารถในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX กลับไม่สูง ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวพบว่า ค่าการดูดซับไอโอดีนไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกับค่าความสามารถในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ผลการทดลองเช่นนี้สามารถพบได้บ่อยครั้งเมื่อตัวดูดซับมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยสามารถดูดซับสารได้ดีกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า ในเรื่องนี้ Sangpoum (1999) และ Sae-ung and Boonamnuayvitaya (2003) อธิบายว่าบนพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับแต่ละชนิดจะมีลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่สามารถดูดซับสารแต่ละชนิดได้แตกต่างกัน ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะที่สามารถดูดซับสารกลุ่ม BTEX ไม่ใช่พื้นที่ผิวทั้งหมดบนตัวดูดซับ ดังนั้น ลักษณะหมู่ฟังก์ชันบนตัวดูดซับจึงมีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารแต่ละชนิดมากกว่าค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ



ภาพที่ 9 ตัวอย่างไอโซเทอมของ Freundlich ในการดูดซับดูดซับ *o*-Xylene ของตัวดูดซับ S7



ภาพที่ 10 ตัวอย่างไอโซเทอมของ Langmuir ในการดูดซับ *o*-Xylene ของตัวดูดซับ S7

4. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนระหว่างตัวดูดซับกับอากาศ (K_{sa}) ของตัวดูดซับ S7 กับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารกลุ่ม BTEX

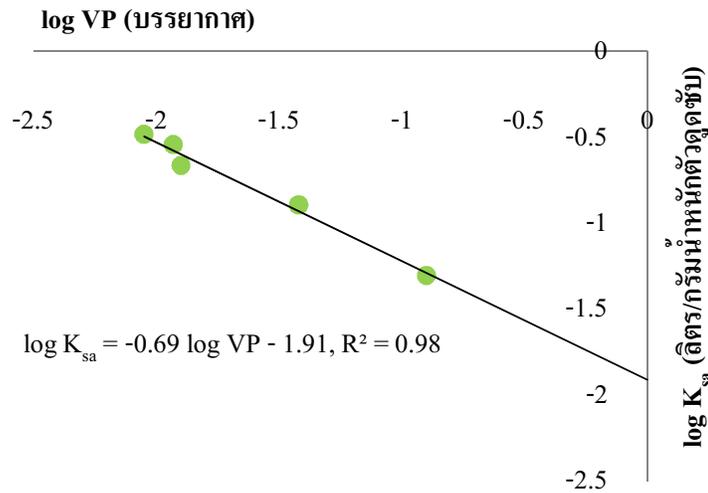
สำหรับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{sa} ของสารกลุ่ม BTEX ที่ได้จากการทดลองหาไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich ของตัวดูดซับ S7 เมื่อ $K_{sa} = C_s/C_a$ ที่จุดสมดุลและอุณหภูมิคงที่ กับสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารพบว่า ค่า K_{sa} ของสารมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับสมบัติการละลายในไขมันของสาร ($\log K_{ow}$) ความดันไอ ($\log VP$) และน้ำหนักโมเลกุลของสาร (MW) (ตารางที่ 16) $R^2 > 0.90$ (ภาพที่ 11, 12 และ 13)

ตารางที่ 16 สมบัติทางกายภาพและทางเคมี และค่า K_{sa} จากการทดลอง

สารทดลอง	MW (กรัม/โมล)	$\log K_{ow}$ ที่ 25 องศาเซลเซียส	$\log VP$ ที่ 25 องศาเซลเซียส (บรรยากาศ)	$\log K_{sa}$ ที่ 25 องศาเซลเซียส (ลิตร/กรัม น้ำหนักตัวดูดซับ)
Benzene	78.1	2.13	-0.90	-1.3
Toluene	92.1	2.69	-1.42	-0.89
Ethylbenzene	106.2	3.15	-1.90	-0.66
<i>m,p</i> -Xylene	106.2	3.18	-1.93	-0.54
<i>o</i> -Xylene	106.2	3.12	-2.05	-0.48

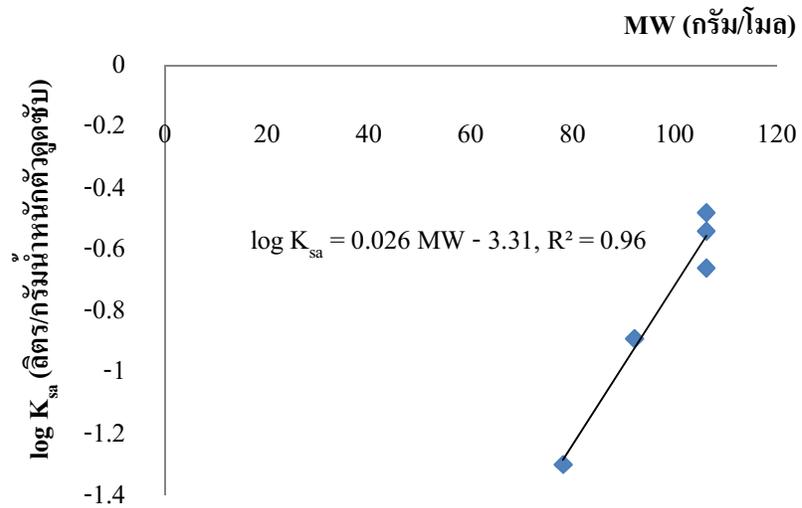
ที่มา: Schwarzenbach *et al.*, 1992

การพิจารณาค่า K_{sa} ของสารเทียบกับความดันไอพบว่า ค่า K_{sa} ของ Benzene < Toluene < Ethylbenzene < *m,p*-Xylene < *o*-Xylene สอดคล้องกับ (ตารางที่ 16) ความดันไอของ Benzene > Toluene > Ethylbenzene > *m,p*-Xylene > *o*-Xylene เมื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้นของ K_{sa} กับความดันไอของสารแต่ละชนิด พบว่า มีความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบแปรผกผันดังสมการ $\log K_{sa} = -0.69 \log VP - 1.91$, $R^2 = 0.98$ (ภาพที่ 11) แสดงว่าสารที่มีค่าความดันไอสูงจะถูกดูดซับได้น้อย เนื่องจากสารระเหยได้ง่าย สำหรับ Benzene ($\log VP = -0.90$ บรรยากาศ) ที่มีค่าความดันไอสูงกว่า *m,p*-Xylene ($\log VP = -1.93$ บรรยากาศ) จึงถูกดูดซับในดิน ($\log K_{sa} = -1.3$) ได้น้อยกว่า *m,p*-Xylene ($\log K_{sa} = -0.54$)

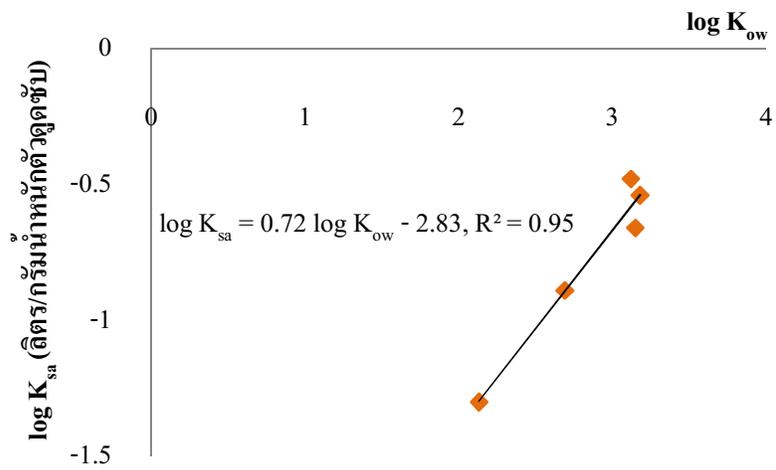


ภาพที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log K_{sa}$ กับ $\log VP$

เมื่อพิจารณาค่า K_{sa} ของสารเทียบกับน้ำหนักโมเลกุล (MW) และค่าการละลายในไขมัน ($\log K_{ow}$) พบว่า ค่า K_{sa} ของ Benzene < Toluene < Ethylbenzene < *m,p*-Xylene < *o*-Xylene เทียบกับน้ำหนักโมเลกุล Benzene < Toluene < *o*-Xylene < Ethylbenzene < *m,p*-Xylene ส่วนค่าการละลายในไขมันเป็นดังนี้ Benzene < Toluene < Ethylbenzene = *m,p*-Xylene = *o*-Xylene (ตารางที่ 16) ทั้งนี้ การเรียงลำดับค่า K_{sa} ของสาร Ethylbenzene, *m,p*-Xylene และ *o*-Xylene อาจไม่เป็นไปตามการเรียงลำดับของน้ำหนักโมเลกุล และค่าการละลายในไขมันได้เนื่องจากสารทั้ง 3 ชนิดมีน้ำหนักโมเลกุลและค่าการละลายในไขมันใกล้เคียงกันมาก เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{sa} กับน้ำหนักโมเลกุล พบว่า ค่า K_{sa} ยังคงแปรผันตรงกับค่าน้ำหนักโมเลกุล $\log K_{sa} = 0.026 MW - 3.31, R^2 = 0.96$ (ภาพที่ 12) และค่าการละลายในไขมัน $\log K_{sa} = 0.72 \log K_{ow} - 2.83, R^2 = 0.95$ (ภาพที่ 13) แสดงว่าสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลและค่าการละลายในไขมันน้อย คือ Benzene (MW = 78.1 กรัม/โมล และ $\log K_{ow} = 2.13$) จะถูกดูดซับได้น้อยกว่าสารที่มีค่าน้ำหนักโมเลกุลและค่าการละลายในไขมันมากกว่า คือ *m,p*-Xylene (MW = 106.2 กรัม/โมล และ $\log K_{ow} = 3.18$) เพราะเมื่อสารมีขนาดใหญ่ขึ้นสารจะมีพลังงานในการแทรกตัวเข้าไปในตัวดูดซับได้มากขึ้น จึงทำให้การดูดซับสารในตัวดูดซับจะสูงขึ้นเมื่อสารมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้ Connell (1990) ได้กล่าวถึงข้อจำกัดในเรื่องขนาดโมเลกุลของสารไว้ว่า สารจะถูกดูดซับได้มากขึ้นเมื่อขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้น แต่จำกัดเฉพาะสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 350 เท่านั้น



ภาพที่ 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log K_{sa}$ กับ MW



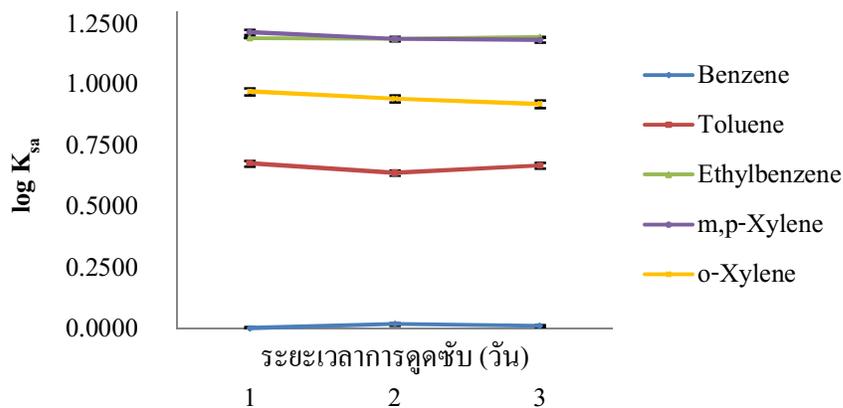
ภาพที่ 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log K_{sa}$ กับ $\log K_{ow}$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าว จึงสรุปได้ว่าสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ส่งผลต่อลักษณะการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับแต่ละชนิด แต่อย่างไรก็ตาม การประเมินความสามารถในการดูดซับสารของตัวดูดซับแต่ละชนิดนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับร่วมด้วย เช่น กลุ่มฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับ ขนาดของรูพรุน ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ เป็นต้น ตัวอย่างการศึกษาของ Sangpoum (1999) พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวาโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่ถูกเตรียมในสภาวะ 400 และ 500 องศาเซลเซียส โดยถูกเผาเป็นระยะเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ทั้ง 2 อุณหภูมินี้จะสามารถดูดซับ *o*-Xylene > Toluene > Benzene ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองนี้ และสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ มีค่าการละลายในไขมันมากที่สุด และมีค่าความดันไอน้อย ได้แก่ *o*-Xylene จะถูกดูดซับได้ดีกว่า Toluene และ Benzene ที่มีขนาดโมเลกุล ค่าการละลายในไขมันน้อยกว่า แต่ถ่านกัมมันต์ที่ถูกเตรียมที่สภาวะ 600 องศาเซลเซียส ที่ถูกเผาเป็นระยะเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง สามารถดูดซับสาร Toluene > *o*-Xylene > Benzene ตามลำดับ ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาถ่านกัมมันต์นั้นมีความร้อนสูงเกินจึงไปทำลายพื้นผิวของตัวดูดซับบริเวณที่ใช้ในการดูดซับ *o*-Xylene ทำให้ปริมาณพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับ *o*-Xylene ลดลง (sangpoum, 1999)

5. การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ระหว่างถ่านกัมมันต์จากหลอดเก็บตัวอย่างอากาศที่มีจำหน่ายกับตัวดูดซับ S7

5.1 ระยะเวลาการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของถ่านกัมมันต์จากหลอดเก็บตัวอย่างที่จุดสมดุล

ตัวดูดซับในหลอดเก็บตัวอย่างอากาศที่มีจำหน่ายเป็นพวกถ่านกัมมันต์ (Activated carbon หรือ AC) ที่มีสมบัติดูดซับสารกลุ่ม BTEX ได้ดี ในเบื้องต้นได้ทำการทดลองเพื่อหาระยะเวลาที่สารกลุ่ม BTEX ถูกดูดซับจนถึงจุดสมดุลทำโดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง K_{sa} กับระยะเวลาที่ใช้ทดลอง (ภาพที่ 14 และ ตารางที่ 17) ผลการทดลองพบว่า ค่า K_{sa} ของสารทุกตัวมีค่าค่อนข้างคงที่หลังจากเริ่มทดลอง 1 วัน แต่เพื่อให้การดูดซับสารเข้าสู่สมดุลแน่นอน ในการทดลองการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสองชนิดจึงใช้ระยะเวลา 2 วัน



ภาพที่ 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_{sa} กับระยะเวลาการดูดซับตามสมการ Freundlich ของตัวดูดซับ AC

ตารางที่ 17 ผลการทดลองหาระยะเวลาการดูดซับที่จุดสมดุลของ AC ที่ความเข้มข้นสูงสุด

สารทดลอง	วันที่	C_s	C_a	K_{sa}
		(ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักตัวดูดซับ)	(ไมโครกรัม/ลิตร)	(ลิตร/กรัม น้ำหนักตัวดูดซับ)
Benzene	1	13,474.51	13,429.58	1.01
	2	13,201.62	13,701.09	1.04
	3	11,633.61	11,238.04	1.03
Toluene	1	7,930.71	37,764.18	4.76
	2	7,670.00	33,181.51	4.36
	3	6,507.21	27,032.47	4.66
Ethylbenzene	1	4,809.36	75,022.32	15.60
	2	4,631.63	71,483.23	15.49
	3	3,555.30	50,719.36	15.73
m,p-Xylene	1	1,824.41	30,006.68	16.45
	2	1,834.41	27,160.43	15.44
	3	1,327.92	20,253.17	15.25
o-Xylene	1	1,152.50	10,808.25	9.38
	2	1,214.55	10,611.76	8.77
	3	1,195.94	9,960.05	8.34

5.2 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ

ที่ความเข้มข้นของสารทดลองเดียวกัน ไอโซเทอมแบบ Langmuir ทำให้ทราบความสามารถในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX จากค่า X/m ของตัวดูดซับ AC ดังนี้คือสามารถดูดซับ Ethylbenzene > Xylenes > Toluene > Benzene โดยมีค่า X/m เรียงตามลำดับดังนี้ 58,882.53 30,303.03 28,571.43 และ 8,849.56 ไมโครกรัม/กรัมของ AC ส่วนความสามารถในการดูดซับสารจากค่า X/m ของตัวดูดซับ S7 สามารถดูดซับ Ethylbenzene > Xylenes > Toluene > Benzene โดยค่า X/m เรียงตามลำดับดังนี้ 43,478.26 20,408.16 14,084.51 และ 4,347.83 ไมโครกรัม/กรัมของ S7 (ตารางที่ 18)

สำหรับไอโซเทอมแบบ Freundlich พบว่า ค่า K_{sa} ในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับ AC สามารถดูดซับ Ethylbenzene > Toluene > Xylenes > Benzene มีค่าเรียงตามลำดับดังนี้ 14,076.67 7,030.72 5,011.87 และ 2,137.96 ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักตัวดูดซับ ส่วน K_{sa} ในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับ S7 สามารถดูดซับ Ethylbenzene > Xylenes > Toluene > Benzene มีค่าเรียงตามลำดับดังนี้ 9.84 1.01 0.36 และ 0.09 ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักตัวดูดซับ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ระหว่างตัวดูดซับ S7 และ AC พบว่า ตัวดูดซับ AC มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ได้ดีกว่าตัวดูดซับ S7 คือตัวดูดซับ AC ดูดซับ Benzene Toluene Ethylbenzene Xylenes ได้ 59% 90% 94% และ 89% ตามลำดับ ส่วนตัวดูดซับ S7 ดูดซับได้ 48% 53% 66% และ 33% ตามลำดับ (ตารางที่ 19) อย่างไรก็ตาม ตัวดูดซับจากกากตะกอนเยื่อกระดาษเป็นการเตรียมตัวดูดซับด้วยวิธีการนำไปเผา (Carbonization) เท่านั้น ดังนั้นหากต้องการให้ตัวดูดซับมีประสิทธิภาพมากขึ้นจำเป็นต้องเพิ่มขึ้นขั้นตอนการกระตุ้นในกระบวนการผลิตด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ หรือทางเคมี เพื่อให้ได้สารประกอบอินทรีย์วัตถุในกากตะกอนเยื่อกระดาษสลายตัวออกไป ซึ่งจะส่งผลให้ถ่านเกิดรูพรุน (porous) และมีพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น (Sangpoun, 1999; วิสรุต, 2542; เกรียงศักดิ์, 2542)

ข้อสังเกตจากผลการศึกษากการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับ S7 ในข้อ 3.2 กับผลการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ AC กับ S7 พบว่า ค่า X/m และ K_{sa} ในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับ S7 ของการศึกษาทั้งสองครั้งมีค่าแตกต่างกันอย่างมาก โดยค่า X/m และ K_{sa} ที่ได้จากการทดลองในข้อ 5.2 มีค่าสูงกว่าผลการศึกษานี้ในข้อ 3.2 ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าสูงมากในขณะที่ปริมาณของตัวดูดซับหรือน้ำหนักของ S7 ที่ใช้ในการทดลองนี้ลดลงจากเดิม คือ 150 มิลลิกรัม เป็น 7.5 มิลลิกรัม ทำให้ความเข้มข้นของสารทดลองที่ใส่ลงใน vial ระเหยไปอยู่ในเฟสอากาศไม่ได้ทั้งหมด และมีสารทดลองเหลืออยู่ในเฟสที่เป็นของเหลวในตัวดูดซับ ด้วยเหตุนี้เมื่อวิเคราะห์จึงพบว่าปริมาณสารที่ถูก

ดูดซับในตัวดูดซับ (C_s) มีค่าสูงมากกว่าที่ควรจะเป็น ส่งผลให้ค่า X/m และ K_{sa} ในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับ S7 สูงกว่าเดิมอย่างมาก

ตารางที่ 18 ผลการทดลองเปรียบเทียบการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับ AC และ S7

สารทดลอง	ตัวดูดซับ	Freundlich Isotherm			Langmuir Isotherm		
		K_{sa}	n	R^2	X/m	a	R^2
		(ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักตัวดูดซับ)	(ลิตร/กรัม น้ำหนักตัวดูดซับ)		(ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักตัวดูดซับ)	(ลิตร/กรัม)	
Benzene	AC	2,137.96	0.14	0.88	8,849.56	1,591.55	0.99
	S7	0.09	0.86	0.99	4,347.83	6.48	0.84
Toluene	AC	7,030.72	0.15	0.95	28,571.43	3,500.00	0.99
	S7	0.36	0.81	0.99	14,084.51	4.07	0.73
Ethylbenzene	AC	14,076.67	0.15	0.94	58,882.53	6,296.30	0.99
	S7	9.84	0.65	0.83	43,478.26	6.65	0.64
Xylenes	AC	5,011.87	0.21	0.82	30,303.03	4,024.39	0.98
	S7	1.01	0.76	0.99	20,408.16	5.08	0.84

ตารางที่ 19 ประสิทธิภาพการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับ AC และ S7

ตัวดูดซับ	AC	S7
Benzene	59%	48%
Toluene	90%	53%
Ethylbenzene	94%	66%
Xylenes	89%	33%

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

1. สรุปผลการทดลอง

กากตะกอนเยื่อกระดาษที่ใช้ในการทดลองทำตัวดูดซับสารกลุ่ม BTEX ในอากาศนี้ เป็นกากตะกอนที่ได้จากการกรองน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานกระดาษ ซึ่งกากตะกอนเยื่อกระดาษยังมีความชื้นอยู่ จึงต้องนำมาอบแห้งก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง สำหรับการเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 350 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาต่าง ๆ พบว่า กากตะกอนเยื่อกระดาษมีลักษณะเปลี่ยนแปลงจากเดิมเพียงเล็กน้อยเพราะสารต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอนที่อยู่ในกากตะกอนเยื่อกระดาษยังสลายตัวออกไปไม่หมด ส่วนการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส ทำให้กากตะกอนเยื่อกระดาษกลายเป็นเถ้าสีขาว ดังนั้น ในการทดลองจึงเตรียมตัวดูดซับจากกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งมีลักษณะเป็นสีดำที่ตรงกับลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่มีสีดำ ส่วนขนาดของตัวดูดซับที่ใช้ทดลองมีขนาดระหว่าง 300 - 500 ไมโครเมตร และขนาดระหว่าง 500 - 1,000 ไมโครเมตร ในการทำตัวดูดซับมีการเตรียมตัวดูดซับจากการเผาที่อุณหภูมิ ช่วงเวลา และขนาดต่าง ๆ ได้ตัวดูดซับที่ใช้ทดลอง 8 ชนิด (S1 – S8) ผลการศึกษาค่าการดูดซับ ไอโอดีนของตัวดูดซับทั้ง 8 ชนิด พบว่า มีค่าการดูดซับไอโอดีนไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 47.86 - 62.28 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน

เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ทุกตัวของตัวดูดซับทั้ง 8 ชนิด พบว่าตัวดูดซับแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ได้แตกต่างกันตามขนาดของตัวดูดซับ และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำตัวดูดซับ สำหรับตัวดูดซับที่สามารถดูดซับสารกลุ่ม BTEX ได้ดีที่สุดคือ ตัวดูดซับ S7 ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขนาด 300 – 500 ไมโครเมตร โดยตัวดูดซับ S7 สามารถดูดซับ Ethylbenzene > *o*-Xylene > Toluene > *m,p*-Xylene > Benzene ตามลำดับ มีค่า X/m เรียงตามลำดับดังนี้คือ 1,030.93 826.45 800.00 632.91 และ 222.22 ไมโครกรัม/กรัมน้ำหนักตัวดูดซับ อย่างไรก็ตาม ผลการเปรียบเทียบค่าการดูดซับไอโอดีนกับประสิทธิภาพในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าค่าการดูดซับไอโอดีนไม่สอดคล้องกับค่าความสามารถในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ เนื่องจากลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่สามารถดูดซับสารแต่ละชนิดได้แตกต่างกัน ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะที่สามารถดูดซับสารกลุ่ม BTEX ไม่ใช่พื้นที่ผิวทั้งหมดบนตัวดูดซับ ดังนั้น ลักษณะหมู่ฟังก์ชันบนตัวดูดซับจึงมีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารแต่ละชนิดมากกว่าค่าการดูดซับ

ไอโอดีนและพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ ทั้งนี้ จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงว่าตัวดูดซับจากกากตะกอนเยื่อกระดาษนี้สามารถนำมาทำเป็นดูดซับสารกลุ่ม BTEX ในอากาศได้ เช่นเดียวกับการทำตัวดูดซับสารอินทรีย์ระเหยจากวัสดุทางการเกษตรชนิดอื่น ๆ เช่น กะลามะพร้าว ขี้เลื่อย หรือ ชัง ซึ่งเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่

ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ของตัวดูดซับที่ผลิตจากกากตะกอนเยื่อกระดาษที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่จุดสมดุล พบว่า สมการแบบ Langmuir สามารถใช้อธิบายผลการทดลองการดูดซับได้ดีกว่าสมการแบบ Freundlich เล็กน้อยเนื่องจากมีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 มากกว่า แสดงว่าการดูดซับสารกลุ่ม BTEX บนพื้นผิวของตัวดูดซับส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นการดูดซับสารบนพื้นผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) สามารถเกิดการดูดซับแบบผันกลับได้ (Reversible) ซึ่งเป็นรูปแบบของการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

สำหรับผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนระหว่างตัวดูดซับกับอากาศ (K_{sa}) ของตัวดูดซับ S7 กับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารกลุ่ม BTEX พบว่า ค่า K_{sa} ของตัวดูดซับ S7 ในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX มีลักษณะแปรผันตรงกับสมบัติการละลายในไขมัน ($\log K_{ow}$) ของสารและน้ำหนักโมเลกุลของสาร (MW) แสดงว่าสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลและค่าการละลายในไขมันน้อย คือ Benzene จะถูกดูดซับได้น้อยกว่าสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลและค่าการละลายในไขมันมากกว่า คือ *m,p*-Xylene ส่วนค่า K_{sa} ของตัวดูดซับ S7 ในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX มีลักษณะแปรผกผันกับค่าความดันไอของสาร ($\log VP$) ซึ่งสารที่มีค่าความดันไอสูงจึงถูกดูดซับในตัวดูดซับได้น้อยกว่าสารที่มีค่าความดันไอลดกว่า เช่น Benzene ถูกดูดซับได้น้อยกว่า *m,p*-Xylene อย่างไรก็ตาม การประเมินความสามารถในการดูดซับสารของตัวดูดซับแต่ละชนิดนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับร่วมด้วย เช่น กลุ่มฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับ ขนาดของรูพรุน ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ เป็นต้น

เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับระหว่าง S7 กับถ่านกัมมันต์ในหลอดเก็บตัวอย่างที่มีจำหน่าย (AC) พบว่า S7 สามารถดูดซับสารกลุ่ม BTEX ได้แต่มีประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยกว่าตัวดูดซับ AC โดยสามารถดูดซับ Ethylbenzene > Toluene > Xylenes > Benzene มีค่าเรียงตามลำดับดังนี้ 14,076.67 7,030.72 5,011.87 และ 2,137.96 ไมโครกรัม/กรัมน้ำหนักตัวดูดซับตามลำดับ และจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ระหว่างตัวดูดซับ S7 และ AC พบว่า ตัวดูดซับ AC มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ได้ดีกว่าตัวดูดซับ S7 คือ ตัวดูดซับ AC ดูดซับ Benzene Toluene Ethylbenzene Xylenes ได้ 59% 90% 94% และ 89% ตามลำดับ ส่วนตัวดูดซับ S7 ดูดซับได้ 48% 53% 66% และ 33% ตามลำดับ

2. ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับจากกากตะกอนเยื่อกระดาษเพิ่มเติม เช่น การหาพื้นที่ผิวจำเพาะ การศึกษาลักษณะหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับ การหาขนาดรูพรุนส่วนใหญ่ของตัวดูดซับ เป็นต้น

2. ตัวดูดซับจากกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นตัวดูดซับที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการคาร์บอนไนซ์เซชัน (Carbonization) เท่านั้น ดังนั้น ในการทดลองต่อไปหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวดูดซับ อาจทำได้โดยเพิ่มขั้นตอนการกระตุ้นในกระบวนการผลิตด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ หรือทางเคมี

3. แม้ว่าตัวดูดซับจากกากตะกอนเยื่อกระดาษจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ในอากาศน้อยกว่าถ่านกัมมันต์จากหลอดเก็บตัวอย่างที่มีจำหน่าย แต่ตัวดูดซับจากกากตะกอนเยื่อกระดาษมีขั้นตอนการผลิตง่าย รวดเร็ว และมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตต่ำกว่า ถ่านกัมมันต์ที่ต้องผ่านขั้นตอนการกระตุ้นทำให้มีค่าใช้จ่ายในการผลิตค่อนข้างสูง ดังนั้น เพื่อเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดมลพิษทางอากาศ จึงอาจนำตัวดูดซับจากกากตะกอนเยื่อกระดาษไปเป็นทางเลือกสำหรับนำไปใช้ในการบำบัดมลพิษทางอากาศ เช่น ใช้เป็นตัวดูดซับในระบบบำบัดแก๊สหรือไอระเหยของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดจะเพิ่มขึ้นได้จากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ หรือการให้มลสารผ่านตัวดูดซับที่เชื่อมต่อกันหลาย ๆ หน่วย นอกจากนี้ จะเป็นการช่วยลดปริมาณการกำจัดของเสียของโรงงานอุตสาหกรรมได้อีกทางหนึ่งด้วย

4. ควรมีการศึกษาความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจากกากตะกอนเยื่อกระดาษกับสารอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ เช่น สารอินทรีย์ระเหยง่ายในกลุ่ม Chlorinated VOCs หรือ Halogenated Hydrocarbon เนื่องจากเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษและมีความคงตัวในสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารกลุ่มที่ไม่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุล ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับบำบัดมลพิษทางอากาศต่อไป

บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2547. เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์. ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและสารเคมี. แหล่งที่มา: <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=61>, 30 มิถุนายน 2550.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2550. การผลิตเชื้อกระดาษ. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. แหล่งที่มา: www.diw.go.th/EMS%20for%20SMEs%20Website/page%203_files/text/env/pulp-paper/t hai/chap3.pdf, 6 ธันวาคม 2550.
- กระทรวงอุตสาหกรรม. ม.ม.ป. ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว. กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.
- กองอาชีวอนามัย กรมอนามัย. 2546. ข้อมูลเพื่อปฏิบัติงานกับสารเคมี ด้านอาชีวอนามัย: พิษวิทยาสิ่งแวดล้อม. ฐานข้อมูลอาชีวอนามัยและความปลอดภัยเกี่ยวกับสารเคมีที่มีใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทย. แหล่งที่มา: <http://www.anamai.moph.go.th/chemnet/chemistry.asp>, 30 มิถุนายน 2550.
- เกรียงศักดิ์ กิตติพิमान. 2542. การดูดซับออกซิเจนและไนโตรเจนด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ขจรศักดิ์ โสภการีย์. 2549. สมรรถนะของการบำบัดสีย้อม โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการดูดซับผิว. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. แหล่งที่มา: http://www.eng.cmu.ac.th/researchs/wara2_49/3_3.pdf, 30 มิถุนายน 2550.
- ชวิศร์ วงศ์วัฒนกิจ และจีมา ชมสุรินทร์. 2547. การศึกษาการผลิตเอทานอลจากกากเชื้อกระดาษเหลือทิ้ง. IRPUS: Industrial and Research Projects for Undergraduate Student. แหล่งที่มา: http://www.irpus.org/project_file/2547_2006-08-23_FE0062-47.pdf, 3 กรกฎาคม 2550.
- ณัฐยา พูนสวัสดิ์. 2545. การเตรียมและวัดสมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์และชานอ้อยโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- เดชา พิมพิสุทธ์. 2546. ข้อมูลการปล่อยสารมลพิษจากพวก BTEX และการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเมินผลกระทบต่อคุณภาพอากาศในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมปิโตรเคมีมาบตาพุด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- นลินี ศรีพวง, รัชนิกร ชมสวน, ณัฐ อาจสมิติ และสมเกียรติ ท้วมแสง. 2540. กรณีศึกษาผู้ประกอบการอาชีพที่สัมผัสกับสารทำลายอินทรีย์ในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี. **สำนักที่ปรึกษากรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข**. แหล่งที่มา:
<http://advisor.anamai.moph.go.th/212/21204.html>, 14 พฤษภาคม 2548.
- ประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่องความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อม (สารเคมี). 2520. ตารางหมายเลข 3 ในประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่องความปลอดภัยเกี่ยวกับสารเคมีอันตราย หมวด 1 ข้อ 4.
- ประสงค์ คุณานุวัฒน์ชัยเดช และไมตรี สุทธิจิตต. 2545. สารอินทรีย์ไฮโดรคาร์บอนและสุขภาพ. **พิษวิทยาสาร. 11:1-4.**
- ลัดดา จันทวาโร และอัจฉรา สีม่วง. 2549. การศึกษาคุณสมบัติการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากขี้เลื่อยไม้ยางพารา **คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**. แหล่งที่มา: [http:// www.eng.psu.ac.th/enghome/index.php](http://www.eng.psu.ac.th/enghome/index.php), 5 พฤษภาคม 2550.
- วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์, นิตยา มหาผล และธีระ เกรอด. 2538. **มลภาวะอากาศ**. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- วนิดา จินศาสตร์. 2551. **มลพิษอากาศและการจัดการคุณภาพอากาศ**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- วิศรุต โจดานนท์. 2542. ผลของการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจากเปลือกถั่วลิสงด้วยกรดฟอสฟอริกต่อการดูดซับไอเบนซีนเจือจาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศูนย์วิจัยและตรวจสอบคุณภาพถ่านกัมมันต์. 2545. การคาร์บอนไนซ์เซชัน. **Activated Carbon**. แหล่งที่มา: [http:// http://www.sc.chula.ac.th/ASCON2002/การคาร์บอนไนซ์เซชัน.html](http://www.sc.chula.ac.th/ASCON2002/การคาร์บอนไนซ์เซชัน.html), 5 พฤษภาคม 2550.
- สลักจิต ธานี. 2549. การหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดของโรงงานเยื่อและกระดาษภายหลังการดูดซับด้วยแอคทีเวเต็ดคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สาวตรี พลุมา. 2548. การรับสัมผัสสารอินทรีย์ระเหยจากสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัยในเขตกรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุภาวีนี นิลเขต. 2550. การใช้กากตะกอนเยื่อกระดาษเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับผลิตกลูโคสและเอนไซม์เซลลูเลสโดยเชื้อรา *Trichoderma spp.* ในปฏิกรณ์กึ่งต่อเนื่องขนาดระดับห้องปฏิบัติการ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.2547.มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์:

Standard for activated carbon. มอก.900-2547.

สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม โรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2547. คู่มือเทคโนโลยีการควบคุมมลพิษทางอากาศสำหรับอุตสาหกรรมเคลือบผิว ศูนย์บริการข้อมูลสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม. แหล่งที่มา: [http:// www2.diw.go.th/PIC/documents.html](http://www2.diw.go.th/PIC/documents.html), 26 มีนาคม 2550.

อรชума ศิริแก้ว, ศิริขวัญ จงรักษ์ และพัฒนา อรุณย์พงศธร. 2547. การดูดซับก๊าซจากกระบวนการหลอมพลาสติกในโรงงานพลาสติกโดยใช้วัสดุเหลือใช้จากการเกษตรเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์. **IRPUS: Industrial and Research Projects for Undergraduate Student.** แหล่งที่มา: [http:// www.irpus.org/project_file/2547_2006-08-23_FS0022-47.pdf](http://www.irpus.org/project_file/2547_2006-08-23_FS0022-47.pdf), 26 มีนาคม 2550.

อุรวรรณ อุ่นแก้ว. 2544. ถ่านกัมมันต์. กรมวิทยาศาสตร์บริการ. แหล่งที่มา: http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/ct_10_2544_active_carbon.pdf, 26 มีนาคม 2550.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2004. Interaction Profile for Benzene, Toluene, Ethylbenzene, and Xylenes (BTEX). **Department of Health and Human Services Agency for Toxic Substances and Disease Registry.** Available source: <http://www.atsdr.cdc.gov/interactionprofiles/ip05.html>, January 3, 2006.

Ajmal, M., R.A.K Rao, S. Anwar, J. Ahmad and R. Ahmad. 2003. Adsorption studies on rice husk: removal and recovery of Cd(II) from wastewater. **Bioresource Technology.** 86: 147-149.

Amagai, T., T. Ohuru and T. Sugiyama, 2002. Gas chromatographic/mass spectrometric determination of benzene and its alkyl derivatives in indoor and outdoor air in Fuji, Japan. **Journal of AOAC International.** 85(1): 203-211.

American Water Works Association. 2006. **Granular Activated Carbon.** ANSI/AWWA B604-05.

American Society for Testing and Material. 1989. **Standard Test Method for Particle Size Distribution of Grnular Activated Carbon D2862-82.** Annual book of ASTM standards Vol. 15.01. Philadelphia: ASTM.

Bansode, R.R., J.N. Losso, W.E. Marshall, R.M. Rao and R.J. Portie. 2003. Adsorption of volatile organic compounds by pecan shell- and almond shell-based granular activated carbons. **Bioresource Technology.** 90(2) : 175-184.

- Bond J.A., S.. 1978. Its metabolism and the evaluation of hazards in industry. **Scan J Work Environ Health.** 4: 95-103.
- Chaiyaand, C. and V. Boonamnuyvitaya. 2003. Adsorption of Toluene Vapor on Mesoporous Activated Carbon Produced from Coffee Residue. **Environmental Technical Information Service.** Available source: [http:// www.aseanenvironment.info/Abstract/42002254.pdf](http://www.aseanenvironment.info/Abstract/42002254.pdf), June 26, 2007.
- Chena, X., S. Jeyaseelana and N. Grahamb. 2002. Physical and chemical properties study of the activated carbon made from sewage sludge. **Waste Management.** 22: 755-760.
- Christensen, J.S. and J. Elton. 1998. Soil and Groundwater pollution from BTEX. **Groundwater Pollution Primer.** Available source: <http://ewr.cee.vt.edu/environmental/teach/gwprimer/btex/btex.h>, January 3, 2006.
- Connell, D.W.. 1990. **Bioaccumulation of Xenobiotic Compounds.** CRC Press, Inc., New York.
- Hinwood, A.L., C. Rodriguez, T. Runnion, D. Farrar, F. Murray, A. Horton, D. Glass, V. Sheppard, J.W. Edwards, L. Denison, T. Whitworth, C. Eiser, M. Bulsara, R.W. Gillett, J. Powell, S. Lawson, I. Weeks and I. Galbally. 2007. Risk factors for increased BTEX exposure in four Australian cities. **Chemosphere.** 66(3): 533-541.
- Hsieh, L.T., H.H. Yang and H.W. Chen. 2006. Ambient BTEX and MTBE in the neighborhoods of different industrial parks in Southern Taiwan. **Journal of Hazardous Materials.** 128(2-3): 106-115.
- Irwin, R.J.. 1997. Environmental Contaminantes Encyclopedia *o*-Xylene Entry. **National Park Service: Nature & Science.** Available source: http://www.nature.nps.gov/hazardssafety/toxic/xylene_o.pdf, June 20.2007.
- Keprasertsup, C., V. Bashkin, S. Wangwongwatana, P. Pokethitiyook, S. Adsavakulchai and S. Towprayoon. 2003. Concentrations of MTBE, Benzene, Toluene, Ethyl-benzene, and Xylene in Ambient Air at Gas Stations and Traffic Area in Bangkok. **ThaiScience.** Available source: <http://www.thaiscience.info/Article%20for%20ThaiScience/Article/4/.pdf>, March 5, 2007.
- Khalili, R., M. Campbell, G. Sandi and J. Golas. 2000. Production of micro-and mesoporous activated carbon from paper mill sludge I. Effect of zinc chloride activation. **Carbon.** 38: 1905-1915.

- Khalili, N.R., J.D. Vyas, W. Weangkaew, S.J. Westfall, S.J. Parulekar, R. Sherwood. 2002. Synthesis and characterization of activated carbon and bioactive adsorbent produced from paper mill sludge. **Separation and Purification Technology**. 26: 295–304.
- Lee, S. C., M. Y. Chiu, K. F. Ho, S. C. Zou and Xinming Wang. 2002. Volatile organic compounds (VOCs) in urban atmosphere of Hong Kong. **Chemosphere**. 48(3): 375-382.
- Mackay, D. 1983. Fugacity Models of Indoor Exposure to Volatile Chemicals. **Chemosphere**. 12: 143-154.
- Martinez, M.L., M.M. Torres, C.A. Guzman and D.M. Maestri. 2006. Preparation and characteristics of activated carbon from live stones and walnut shells. **Industrial Crops and Products**. 23: 23-28.
- National Institute for Occupational Safety and Health. 2003. **NIOSH Manual of Analytical Methodes: Hydrocarbons Aromatic, Method 1501**. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention. U.S.A.
- Ney, R.E., Jr. 1990. **What did that chemical go? : A practical guide to chemical fate and transport in the environment**. Van Nostrand Reinhold, New Yopk.
- NOVA Chemical. 2006. Material Safety Data Sheet. **NOVA Chemical**. Available source: http://www.novachem.com/ProductServices/docs/Ethylbenzene_MSDS_EN.pdf, June 30, 2007.
- Pao W.G.L., Y.C. Yao, J.H. Tsai, Y.C. Hsu, L.P. Chang and K.H. Chang. 2008. Source impacts by volatile organic compound in an industrial city of southern Taiwan. **Science of the total Environment**. 398: 154-163.
- Rampel, D.M., J. Rosenberg, and R.J. Harrison. 1990. Biologic monitoring in: LaDou J, ed. Occupational Medicine. **California Appleton & Lange** : 459-466.
- Rio, S., C. Faur-Brasquet, L. Le Coq and P. Le Cloirec. 2005. Production and Characterization of Adsorbent Materials from an Industrial Waste. **Adsorption**. 11: 793-798.
- Ruthven, D.M.. 1984. **Principles of Adsorption & Adsorption Processes**. John Wiley & Sons, Inc., New York.

- Sae-ung, S. and V. Boonamnuayvitaya. 2003. Adsorption of formaldehyde vapor by using activated carbon prepared from coffee residue. **Environmental Technical Information Service**. Available source: [http:// www.aseanenvironment.info/Abstract/42002255.pdf](http://www.aseanenvironment.info/Abstract/42002255.pdf), April 1, 2007.
- Sangpoum, C.. 1999. **Adsorption of benzene, toluene, And o-xylene vapours on activated carbons prepared from water hyacinth activated by zinc chloride**. Partial Fulfillment of the Requirements for the Doctoral Degree. Chulalongkorn University.
- Schroeder, P.A. 2006. The Geochemistry of clay minerals. **The University of Georgia Department of Geology**. Available source: <http://www.gly.uga.edu/schroeder/geol6550/isotherm3.gif>, August 7, 2007.
- Schwarzenbach, R.P., P.M. Gschwend and D.M. Imboden. 1992. **Environmental Organic Chemistry**. A Wiley-Interscience Publication, Newyork.
- Sparks, D.L.. 2003. **Environmental Soil Chemistry**. Academic Press, California.
- Spectrum lab., 2003. Chemical Fact Sheet. **Spectrum Laboratories Inc**. Available source: <http://www.speclab.com/compound/c71432.htm>, October 15, 2008.
- Technical Outreach Services for Communities. 2001. BTEX contamination. **Michican State University College of Engineering**. Available source: http://www.egr.msu.edu/tosc/akron/factsheets/fs_btexpdf.pdf, December 13, 2005.
- Triveni Engineering & Industries. 2008. Pulp and Paper Wastewater Treatment Plant. **Water Treatment Plant**. Available source: <http://www.thewatertreatmentplant.com/paper-wastewater-treatment.html>, October 17, 2008.
- United States Environmental Protection Agency. 1986. **Determination of Volatile Organic Compounds, Method 3820**. Environmental Protection Agency, U.S.A.
- United States Environmental Protection Agency. 2003. **Volatile Organic Compounds in Various Sample Matrices Using Equilibrium Headspace Analysis, Method 5021A**. Environmental Protection Agency, U.S.A.
- Wikipedia. 2007. Activated Carbon. **Wikipedia, the free encyclopedia**. Available source: [http:// en.wikipedia.org/wiki/Activated_carbon](http://en.wikipedia.org/wiki/Activated_carbon), June 30, 2007.

- Yu, L. and Q. Zhong. 2006. Preparation of adsorbents made from sewage sludges for adsorption of organic materials from wastewater. **Journal of Hazardous Materials**. 137(1): 359-366.
- Zhai, Y., W. Xianxun, Z. Guangming, Z. Dejian and C. Kaifeng. 2004. Study of adsorbent derived from sewage sludge for the removal of Cd^{2+} , Ni^{2+} in aqueous solutions. **Separation and purification technology**. 38(2): 191-196.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

ภาคผนวก ก

1. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 20 รายชื่อสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

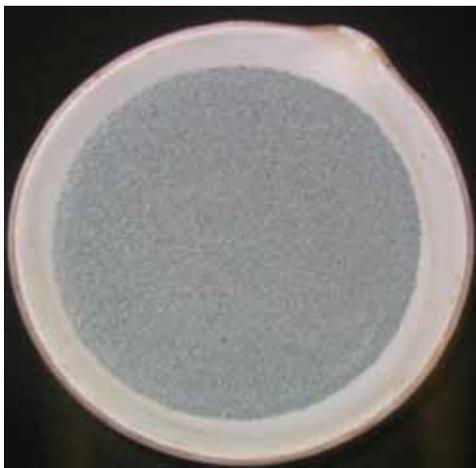
ชื่อสารเคมี	CAS.No.	บริษัท
การดูดซับไอโอดีน		
กรดไฮโดรคลอริก (HCl)	7647-01-0	Merck
ไอโอดีน (I ₂)	7553-56-2	BDH
โซเดียมไรโอซัลเฟต (Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O)	10102-17-7	Ajax
โพตัสเซียมไอโอไดด์ (KI)	7681-11-0	Merck
โพตัสเซียมไอโอเดต (KIO ₃)	7758-05-6	Ajax
โซเดียมคาร์บอเนต (Na ₂ CO ₃)	497-19-8	Ajax
แป้ง	-	BDH
การทดลองการดูดซับสารกลุ่ม BTEX		
Benzene (99.8%)	71-43-2	Panreac
Toluene (99.5%)	108-88-3	Panreac
Ethylbenzene (99%)	100-41-4	Fluka
Xylenes (98.5%)	1330-20-7	Panreac
Methanol (99.8%)	67-57-1	BDH
Hexadecane (99%)	544-76-3	Merck

2. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 21 รายชื่ออุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ชื่ออุปกรณ์และเครื่องมือ	รุ่น	บริษัท
กระดาษกรอง 70 mm Ø Circles	เบอร์ 40	Whatman
เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Analytic Balance)	AB204	Mettler Toledo
เครื่องคัดแยกขนาด	EFL 2000	Endecotts
เตาเผาอุณหภูมิสูง	CFS 11/7	Carbolite Furnaces
Aluminum Cap	ขนาด 10 mm	-
Aluminum Cap	ขนาด 20 mm	-
Centrifuge	Rotanta 46R	Hettich Zentrifugen
Crimper	ขนาด 10 mm	The Finest in Crimping Tool & Accessories
Crimper	ขนาด 20 mm	The Finest in Crimping Tool & Accessories
Decap	ขนาด 20 mm	The Finest in Crimping Tool & Accessories
Gas Chromatograph	AutoSystem XL	Perkin Elmer
Orbital Shaker	-	GALLENKAMP
Standard Test Sieve	45 µm	Retsch
Standard Test Sieve	300 µm	Retsch
Standard Test Sieve	500 µm	Retsch
Standard Test Sieve	1,000 µm	Retsch
Oven	-	ELE International
Ultrasonic Bath	5210	Branson
Gas Tight Syringe 500 ul	500R-GT	SGE
Microliter Syringe 10 µl	701N	Hamilton
Microliter Syringe 100 µl	100F	SGE

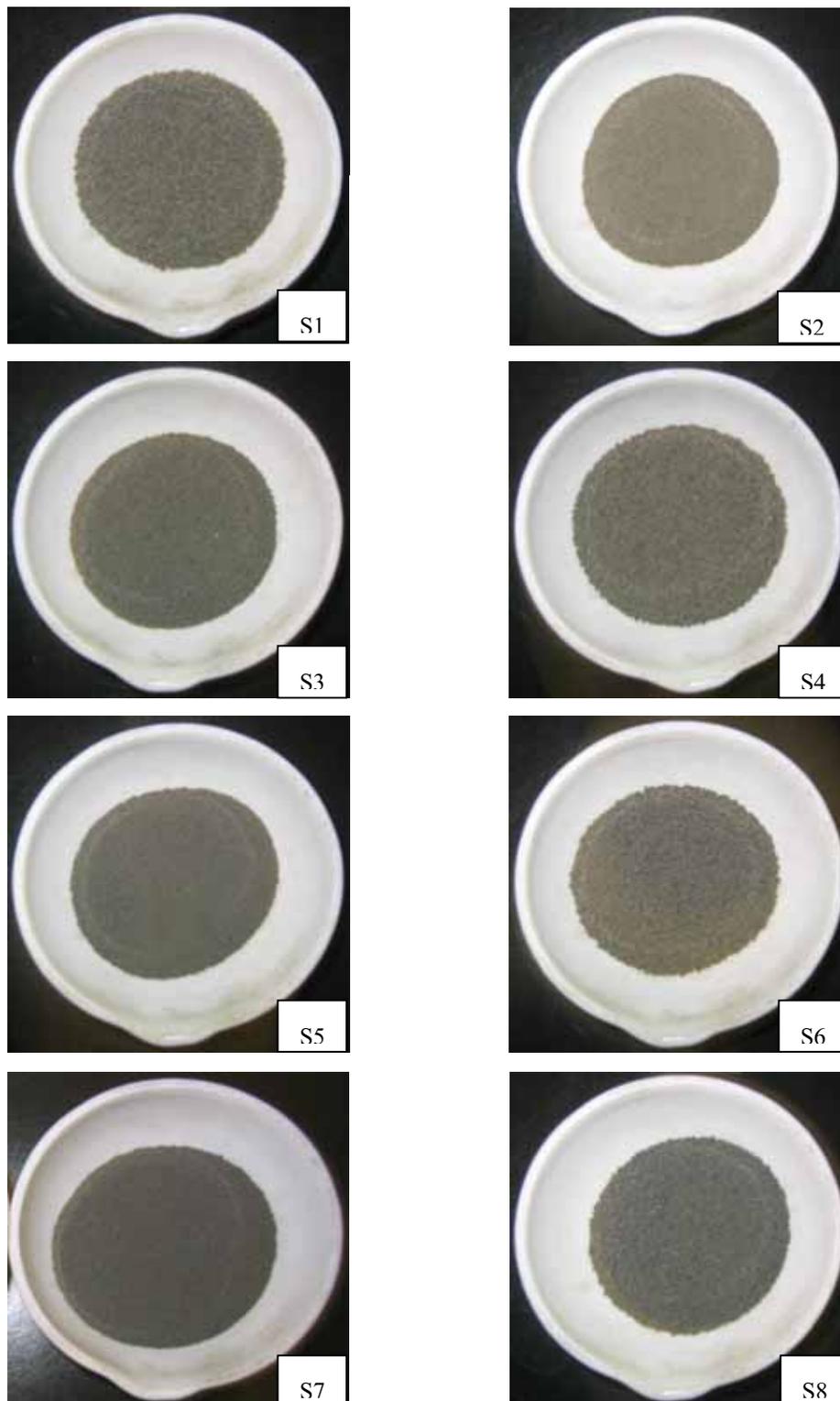
ภาคผนวก ข
ลักษณะของกากตะกอนเยื่อกระดาษ



ภาพที่ 15 ลักษณะกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการอบให้แห้งก่อนนำไปเผา



ภาพที่ 16 ลักษณะกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการอบให้แห้งก่อนนำไปเผากับตัวดูดซับS7



ภาพที่ 17 ลักษณะของตัวดูดซับจากกากตะกอนเชื้อกระดาษ S1 – S7

ภาคผนวก ก

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์ (มอก.900-2532)

ภาคผนวก ก

1. ขอบข่าย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้กำหนด ชนิดขนาด คุณลักษณะที่ต้องการ การบรรจุ เครื่องหมายและฉลาก การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน และการทดสอบด้านกัมมันต์

2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

2.1 ถ่านกัมมันต์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์ จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี

2.2 ค่าไอโอดีน หมายถึง จำนวนมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับไว้ด้วยถ่านกัมมันต์ 1 กรัม เมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังจากถูกดูดซับ และผ่านการกรองแล้วเป็น 0.02 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

3. ชนิด

3.1 ถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

3.1.1 ถ่านกัมมันต์ผง (powdered activated carbon)

3.1.2 ถ่านกัมมันต์เม็ด (granular activated carbon)

4. ขนาด

4.1 ถ่านกัมมันต์ผง

ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย แต่ปริมาณที่ผ่านแรง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก การทดสอบให้เป็นไปตามข้อ 9.3.1

4.2 ถ่านกัมมันต์เม็ด

ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย แต่ปริมาณที่ผ่านแรง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก การทดสอบให้เป็นไปตามข้อ 9.3.2

5. คุณลักษณะที่ต้องการ

5.1 ลักษณะทั่วไป

5.1.1 ถ่านกัมมันต์ผง

ต้องเป็นผงละเอียดสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมใด ๆ

5.1.2 ถ่านกัมมันต์เม็ด

ต้องเป็นเม็ดสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมใด ๆ

การทดสอบให้ทำโดยการตรวจพินิจ

5.2 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมี

5.2.1 ถ่านกัมมันต์ผง

ให้เป็นไปตามตารางที่ 1

ตารางที่ 22 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของถ่านกัมมันต์ผง (ข้อ 5.2.1)

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบตาม
1	ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600	AWWA B600
2	ความหนาแน่นปรากฏ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	0.20 ถึง 0.75	

หมายเหตุ AWWA หมายถึง American Water Work Association

5.2.2 ถ่านกัมมันต์เม็ด

ให้เป็นไปตามตารางที่ 2

ตารางที่ 23 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของถ่านกัมมันต์เม็ด (ข้อ 5.2.2)

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบตาม
1	ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600	AWWA B600
2	ความชื้น ร้อยละ ไม่เกิน	8	
3	ความหนาแน่นปรากฏ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	0.20 ถึง 0.75	
4	ความแข็ง ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70	AWWA B600 Ro-Tap abrasion test

6. การบรรจุ

- 6.1 ให้บรรจุถ่านกัมมันต์ในภาชนะบรรจุที่สะอาดแห้ง และปิดสนิท
- 6.2 น้ำหนักสุทธิของถ่านกัมมันต์ในแต่ละภาชนะบรรจุ ต้องไม่น้อยกว่าที่ระบุไว้ที่ฉลาก
การทดสอบให้ปฏิบัติตามข้อ 9.4

7. เครื่องหมายและฉลาก

7.1 ที่ภาชนะบรรจุถ่านกัมมันต์ทุกหน่วยอย่างน้อยต้องมีเลข อักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่าย ชัดเจน

- (1) ชนิด
- (2) น้ำหนักสุทธิ เป็นกิโลกรัม
- (3) เดือน ปีที่ทำ หรือรหัสรุ่นที่ทำ
- (4) ชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำ หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน

ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

7.2 ผู้ทำผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เป็นไปตามมาตรฐานนี้ จะแสดงเครื่องหมายมาตรฐานกับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนั้นได้ ต่อเมื่อได้รับใบอนุญาตจากคณะกรรมการมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแล้ว

8. การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

8.1 รุ่น ในที่นี้ หมายถึง ถ่านกัมมันต์ชนิดเดียวกัน ทำโดยกรรมวิธีเดียวกัน บรรจุในภาชนะบรรจุชนิดและขนาดเดียวกัน ที่ทำหรือส่งมอบหรือซื้อขายในระยะเวลาเดียวกัน

8.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับ ให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้ หรืออาจใช้แผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้ หรืออาจใช้แผนการชักตัวอย่างอื่นที่เทียบเท่ากันทางวิชาการกับแผนที่กำหนดไว้

8.2.1 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบการบรรจุ

8.2.1.1 ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน ตามจำนวนที่กำหนดในตารางที่ 3

8.2.1.2 ตัวอย่างทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 6. จึงจะถือว่าถ่านกัมมันต์รุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

ตารางที่ 24 แผนการชักตัวอย่างสำหรับการทดสอบการบรรจุ (ข้อ 8.2.1.1)

ขนาดรุ่น หน่วยภาชนะบรรจุ	ขนาดตัวอย่าง หน่วยภาชนะบรรจุ
ไม่เกิน 25	3
26 ถึง 50	4
51 ถึง 100	5
101 ถึง 300	6
301 ถึง 500	7
501 ถึง 800	8
801 ถึง 1,000	9
ตั้งแต่ 1,000 ขึ้นไป	10

8.2.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบขนาด และคุณลักษณะที่ ต้องการ

8.2.2.1 ให้ชักตัวอย่าง จากตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบการบรรจุแล้วมาภาชนะบรรจุละเท่า ๆ กัน ให้ได้ตัวอย่างรวมกันไม่น้อยกว่า 1,500 กรัม ผสมตัวอย่างทั้งหมดเข้าด้วยกัน แล้วแบ่งออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน บรรจุแต่ละส่วนลงในภาชนะที่สะอาดแห้ง และปิดได้สนิท พร้อมทั้งบันทึกรายละเอียดที่จำเป็นไว้ ตัวอย่างส่วนหนึ่งนำไปใช้ในการวิเคราะห์อีก 2 ส่วนที่เหลือ ให้ผู้ที่เกี่ยวข้องเก็บไว้เป็นหลักฐาน

8.2.2.2 ตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 4. และข้อ 5. จึงจะถือว่าถ่านกัมมันต์รุ่นนั้น เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

8.3 เกณฑ์ตัดสิน

ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ ต้องเป็นไปตามข้อ 8.2.1.2 และข้อ 8.2.2.2 ทุกข้อ จึงจะถือว่า ถ่านกัมมันต์รุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้

9. การทดสอบ

9.1 ให้ใช้วิธีทดสอบที่กำหนดในมาตรฐานนี้ หรือวิธีอื่นใดที่ให้ผลเทียบเท่า ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในมาตรฐานนี้

9.2 น้ำกลั่นและสารเคมีที่ใช้ ต้องมีความบริสุทธิ์เหมาะสมสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์

9.3 การทดสอบขนาด

9.3.1 ถ่านกัมมันต์ผง

9.3.1.1 เครื่องมือ

(1) แร่ง 150 ไมโครเมตร

(2) กุชครุชชีเบล

9.3.1.2 วิธีทดสอบ

นำตัวอย่างประมาณ 25 กรัม ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ประมาณ 2 ชั่วโมง จนได้น้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในเดซิเคเตอร์ จากนั้นให้รีบชั่งให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอนถึง 0.001 กรัม (m_0) เทตัวอย่างใส่ในบีกเกอร์ เดิมน้ำ 600 ถึง 700 ลูกบาศก์เซนติเมตร คนให้เข้ากัน ทำแรงให้เปียกก่อนแล้วเทตัวอย่างช้า ๆ ผ่านแร่ง ในขณะที่เทให้คนตัวอย่างเป็นครั้งคราว ล้างตัวอย่างที่ติดอยู่ในบีกเกอร์ออกให้หมด เมื่อเทตัวอย่างทั้งหมดลงบนแร่งแล้วใช้น้ำล้างตัวอย่างอีกจนกระทั่งไม่มีตัวอย่างผ่านแร่งอีก ถ่ายตัวอย่างที่ค้างบนแร่ง โดยใช้น้ำช่วยใส่ลงในบีกเกอร์แล้วกรองผ่านกุชครุชชีเบลซึ่งทราบน้ำหนักแน่นอนแล้ว นำกุชครุชชีเบลไปอบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ประมาณ 2 ชั่วโมงจนได้น้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในเดซิเคเตอร์แล้วรีบชั่งทันที (m_1)

9.3.1.3 วิธีคำนวณ

ปริมาณที่ผ่านแร่ง ร้อยละ โดยน้ำหนัก = $(1 - m_1/m_0) \times 100$

เมื่อ m_0 คือ น้ำหนักตัวอย่าง หลังจากอบแห้งครั้งแรก เป็นกรัม

m_1 คือ น้ำหนักตัวอย่าง หลังจากอบแห้งครั้งที่ 2 เป็นกรัม

9.3.2 ถ่านกัมมันต์เม็ด

9.3.2.1 เครื่องมือ

(1) แร่ง 150 ไมโครเมตร

(2) เครื่องเขย่า ที่มีอัตราการเขย่า 285 ± 5 รอบต่อนาที

9.3.2.2 วิธีทดสอบ

ชั่งตัวอย่างประมาณ 100 กรัม ให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอนถึง 0.1 กรัม ใส่ในแ่งง เขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 3 นาที ถ่ายส่วนที่ค้างบนแ่งงทั้งหมดลงในภาชนะที่ทราบน้ำหนักแน่นอนแล้ว ชั่งและคำนวณส่วนที่ค้างบนแ่งงเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

9.4 น้ำหนักสุทธิ

ชั่งตัวอย่างทั้งหมดพร้อมภาชนะบรรจุ แล้วเทถ่านกัมมันต์ออก ชั่งภาชนะเปล่า แล้วเฉลี่ยผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งได้เป็นน้ำหนักสุทธิต่อภาชนะบรรจุ

ภาคผนวก ง

วิธีการทดสอบการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number)

ภาคผนวก ง

1. อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องชั่งแบบทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. บิวเรต
3. ขวดรูปชมพู่
4. ตู้อบ
5. บีกเกอร์
6. กรวยกรอง
7. ปิเปต
8. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 หรือเทียบเท่า

2. การเตรียมสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์

2.1 สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก

เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาตร 70 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น 550 มิลลิลิตร แล้วคนให้เข้ากันเทเก็บใส่ขวด

2.2 สารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟตเข้มข้น 0.100 นอร์มอล

ชั่งโซเดียมไซโอซัลเฟต 24.820 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นที่ต้มเดือดใหม่ ๆ ปริมาตร 75 ± 25 มิลลิลิตร แล้วคนให้ละลาย จากนั้นเติมโซเดียมคาร์บอเนต 0.1 ± 0.01 กรัม เพื่อป้องกันการสลายตัวของโซเดียมไซโอซัลเฟตเนื่องจากแบคทีเรีย แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร เทใส่ขวดสีชาตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 4 ก่อนนำมาใช้ในการวิเคราะห์

2.3 สารละลายไอโอดีนเข้มข้น 0.100 ± 0.001 นอร์มอล

ชั่งไอโอดีน 12.700 กรัม และโปตัสเซียมไอโอไดด์ 19.100 กรัม ลงในบีกเกอร์ ผสมให้เข้ากันแล้วเติมน้ำกลั่น 2-5 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์คนให้ละลาย จากนั้นค่อยๆ เติมน้ำกลั่นครั้งละประมาณ 5 มิลลิลิตร และคนจนกระทั่งสารละลายมีปริมาตร 50-60 มิลลิลิตร ตั้งสารละลายทิ้งไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมง หรือให้แน่ใจว่าสารเคมีจะละลายจนหมด ระหว่างที่ตั้งทิ้งไว้ควรคนสารละลายบ้างเป็นครั้งคราว เพื่อช่วยให้สารเคมีละลายได้ดีขึ้น แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร เทเก็บในขวดสีชา

2.4 สารละลายโปตัสเซียมไอโอเดต 0.100 นอร์มอล

อบโปตัสเซียมไอโอเดตประมาณ 4 กรัม ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องในเคชิกเคเตอร์ นำสารที่อบแห้งแล้ว 3.5667 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร เทใส่ขวดเก็บสารที่มีฝาปิดมิดชิด

2.5 น้ำแป้ง

ผสมแป้งหนัก 1 ± 0.5 กรัม ในน้ำเย็น 5-10 มิลลิลิตร แล้วเทลงในน้ำกลั่นที่ต้มเดือดใหม่ ๆ จนได้ปริมาตร 1 ลิตร พร้อมกับคนตลอดเวลาทิ้งให้เย็นแล้วเทเก็บในขวดเก็บสาร สารนี้ควรเตรียมใหม่ทุกครั้งในวันที่ทำการทดลอง

3. การหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย

3.1 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต

ปีเปตสารละลายโปตัสเซียมไอโอเดตปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ 250 มิลลิลิตร เติมโปตัสเซียมไอโอไดค์ 2.00 ± 0.01 กรัม ลงไปเขย่าให้ละลาย ปีเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร เติมลงในสารละลาย นำมาไตเตรทด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต จนได้สารละลายสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแป้งลงไป 2-3 หยด เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์ แล้วไตเตรทต่อไปจนได้สารละลายไม่มีสี จากนั้นคำนวณหาความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตจาก

$$N_1 = \frac{P_1 \times R}{S}$$

เมื่อ	N_1	=	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (นอร์มอล)
	P_1	=	ปริมาตรของสารละลายโปตัสเซียมไอโอเดต (มิลลิลิตร)
	S	=	ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)
	R	=	ความเข้มข้นของสารละลายโปตัสเซียมไอโอเดต (นอร์มอล)

3.2 ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

ปีเปตสารละลายไอโอดีน 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วไตเตรทด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนจนกระทั่งได้สารละลายสีเหลืองอ่อน หยคน้ำแป้งลงไป 2-3 หยด เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์แล้วไตเตรทต่อไปจนได้สารละลายไม่มีสี จากนั้นคำนวณหาความเข้มข้นจากสูตร

$$N_2 = \frac{S \times N_1}{I}$$

เมื่อ	N_2	=	ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน(นอร์มอล)
	S	=	ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)
	N_1	=	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต (นอร์มอล)
	I	=	ปริมาตรของสารละลายไอโอดีน (มิลลิลิตร)

ความเข้มข้นของไอโอดีนต้องมีค่าในช่วง 0.100±0.001 นอร์มอล ถ้าความเข้มข้นไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวต้องเตรียมไอโอดีนใหม่

4. วิธีการทดสอบการดูดซับไอโอดีน

1. บดตัวดูดซับที่ต้องการนำมาวิเคราะห์แล้วนำไปร่อนผ่าน Sieve ขนาด 325 mesh (45 ไมครอน)
2. อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์
3. ชั่งตัวดูดซับที่บดแล้ว 1.000-1.600 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปิเปตสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก 10 มิลลิลิตร ใส่ลงไปเขย่าจนกระทั่งตัวดูดซับเปียกทั่วหมด
4. นำขวดรูปชมพู่ไปวางบนแผ่นให้ความร้อน ต้มจนเดือดประมาณ 30 วินาที เพื่อไล่สารประกอบซัลเฟตออก แล้วยกตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง
5. ปิเปตสารละลายไอโอดีน 0.100 นอร์มอล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปิดจุกยางและเขย่าแรง ๆ เป็นเวลา 30 วินาที
6. กรองโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 หรือเทียบเท่า
7. ทิ้งส่วนที่กรองได้ 20-30 มิลลิลิตร แรกทิ้งไปจากนั้นกรองต่อไปจนหมด
8. ปิเปตสารละลายที่กรองได้ 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ไตรเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไซโอซัลเฟต 0.100 นอร์มอล จนได้สารละลายสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแบ่งสุกลงไป 2 มิลลิลิตร เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์แล้วทำการ ไตรเตรทต่อไปจนได้สารละลายใสไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไซโอซัลเฟตที่ใช้ทั้งหมด (S)
9. คำนวณความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับโดยตัวดูดซับ (C) จากสูตร

$$C = \frac{N_2 \times S}{F}$$

ค่า C ที่ได้ต้องมีค่าอยู่ในช่วง 0.008-0.0334 นอร์มอล ถ้าไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวต้องทำการทดลองใหม่โดยการเปลี่ยนน้ำหนักของตัวดูดซับ โดยถ้าค่า C น้อยกว่าที่กำหนดต้องลดปริมาณตัวดูดซับลง ถ้า C มากกว่าที่กำหนดต้องเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ จนได้ค่า C อยู่ในช่วงดังกล่าว เมื่อได้ค่า C แล้วนำมาเทียบหาค่า D (Correction factor)

10. นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าการดูดซับไอโอดีนจากสูตร

$$I_2 \text{ No.} = \frac{X}{m} \times D$$

โดย $X/m = (A - (2.2B \times S)) / M$

$$C = (N_2 \times S) / F$$

$$A = N_1 \times 12693.0$$

$$B = N_2 \times 126.93$$

เมื่อ $X/m =$ ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

$N_1 =$ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เตรียม (นอร์มอล)

$N_2 =$ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไซโอซัลเฟต (นอร์มอล)

$S =$ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน โซเดียมไซโอซัลเฟตที่ใช้ในการไตเตรท (มิลลิลิตร)

$F =$ ปริมาตรของสารละลายไอโอดีนที่ใช้ในการไตเตรท (มิลลิลิตร)

$C =$ ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับ (นอร์มอล)

$D =$ ค่าตัวแปรปรับค่า (Correction factor)

$M =$ น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้

ตารางที่ 25 ตัวแปรปรับค่า (Correction factor; D) สำหรับทดสอบค่าการดูดซับไอโอดีน

Residual Filtrate Normality C	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009
0.0080	1.1625	1.1613	1.1600	1.1575	1.1550	1.1538	1.1513	1.1500	1.1475	1.1463
0.0090	1.1438	1.1425	1.1400	1.1375	1.1363	1.1350	1.1325	1.1300	1.1288	1.1275
0.0100	1.1250	1.1238	1.1225	1.1213	1.1200	1.1175	1.1163	1.1150	1.1138	1.1113
0.0110	1.1100	1.1088	1.1075	1.1063	1.1038	1.1025	1.1000	1.0988	1.0975	1.0963
0.0120	1.0950	1.0938	1.0925	1.0900	1.0888	1.0875	1.0763	1.0850	1.0838	1.0825
0.0130	1.0800	1.0788	1.0775	1.0763	1.0750	1.0738	1.0725	1.0713	1.0700	1.0688
0.0140	1.0675	1.0663	1.0650	1.0625	1.0613	1.0600	1.0588	1.0575	1.0563	1.0550
0.0150	1.0538	1.0525	1.0513	1.0500	1.0488	1.0475	1.0463	1.0450	1.0438	1.0425
0.0160	1.0413	1.0400	1.0388	1.0375	1.0375	1.0363	1.0350	1.0333	1.0325	1.0313
0.0170	1.0300	1.0288	1.0275	1.0263	1.0250	1.0245	1.0238	1.0225	1.0208	1.0200
0.0180	1.0200	1.0188	1.0175	1.0163	1.0150	1.0144	1.0138	1.0125	1.0125	1.0113
0.0190	1.0100	1.0088	1.0075	1.0075	1.0063	1.0050	1.0050	1.0038	1.0025	1.0025
0.0200	1.0013	1.0000	1.0000	0.9988	0.9975	0.9975	0.9963	0.9950	0.9950	0.9938
0.0210	0.9938	0.9925	0.9925	0.9913	0.9900	0.9900	0.9988	0.9875	0.9875	0.9863
0.0220	0.9863	0.9850	0.9850	0.9838	0.9825	0.9825	0.9813	0.9813	0.9800	0.9788
0.0230	0.9788	0.9775	0.9775	0.9763	0.9763	0.9750	0.9750	0.9738	0.9738	0.9725
0.0240	0.9725	0.9708	0.9700	0.9700	0.9688	0.9688	0.9675	0.9675	0.9663	0.9663
0.0250	0.9650	0.9650	0.9638	0.9638	0.9625	0.9625	0.9613	0.9613	0.9606	0.9600
0.0260	0.9600	0.9588	0.9588	0.9575	0.9575	0.9563	0.9563	0.9550	0.9550	0.9538
0.0270	0.9538	0.9525	0.9525	0.9519	0.9513	0.9513	0.9506	0.9500	0.9500	0.9488
0.0280	0.9488	0.9475	0.9475	0.9463	0.9463	0.9463	0.9450	0.9450	0.9438	0.9438
0.0290	0.9425	0.9425	0.9425	0.9413	0.9413	0.9400	0.9400	0.9394	0.9388	0.9388
0.0300	0.9375	0.9375	0.9375	0.9363	0.9363	0.9363	0.9363	0.9350	0.9350	0.9346
0.0310	0.9333	0.9333	0.9325	0.9325	0.9325	0.9313	0.9313	0.9313	0.9300	0.9300
0.0320	0.9300	0.9294	0.9288	0.9288	0.9280	0.9275	0.9275	0.9275	0.9270	0.9270
0.0330	0.9263	0.9263	0.9257	0.9250	0.9250					

ภาคผนวก จ
วิธีการหาความเข้มข้นของสารที่ใช้ทดลอง

ภาคผนวก จ

ความเข้มข้นแรกของสารแต่ละตัวที่ใช้ในการทดลอง (C_u) นี้คำนวณได้จากการนำความเข้มข้นของสารในตัวดูดซับ (C_s) รวมกับความเข้มข้นของสารในอากาศ (C_a) ที่ใส่ลงใน Vial เนื่องจากสารกลุ่ม BTEX บางส่วนจะถูกดูดซับอยู่ในตัวดูดซับ หากใช้ความเข้มข้นสารต่ำอาจทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารที่เหลือในอากาศที่จุดสมดุลได้ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

1. กำหนดความเข้มข้นของสารในอากาศ (C_a) ของสารแต่ละตัว โดยพิจารณาจากค่ามาตรฐานความปลอดภัยในการทำงาน

2. คำนวณหาความเข้มข้นของสารในตัวดูดซับ (C_s) ของสารแต่ละตัวได้จากความเข้มข้นของสารในตัวดูดซับ (C_s) = K_{sa} x ความเข้มข้นของสารในอากาศ (C_a) ของสารแต่ละตัว ส่วนค่า K_{sa} หาได้จากสมการ

$$K_{sa} = \frac{K_d}{K_{aw}}$$

เมื่อ K_d คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างดินกับน้ำของสารแต่ละตัว
(Soil/Water Partition Coefficient; หน่วย ลิตร/กรัม น้ำหนักดิน)

K_{aw} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างอากาศกับน้ำของสารแต่ละตัว
(Air/Water Partition Coefficient; ไม่มีหน่วย) สามารถคำนวณได้จากทฤษฎีเรื่อง Fugacity Model ของ Mackay *et al.* (1983) ซึ่งค่า K_{aw} หาได้จากสมการ

$$K_{aw} = \frac{H}{RT}$$

เมื่อ H คือ Henry's law constant ของสาร ที่ 25 องศาเซลเซียส
(หน่วย กิโลปาสกาล.ลูกบาศก์เมตร/โมล)

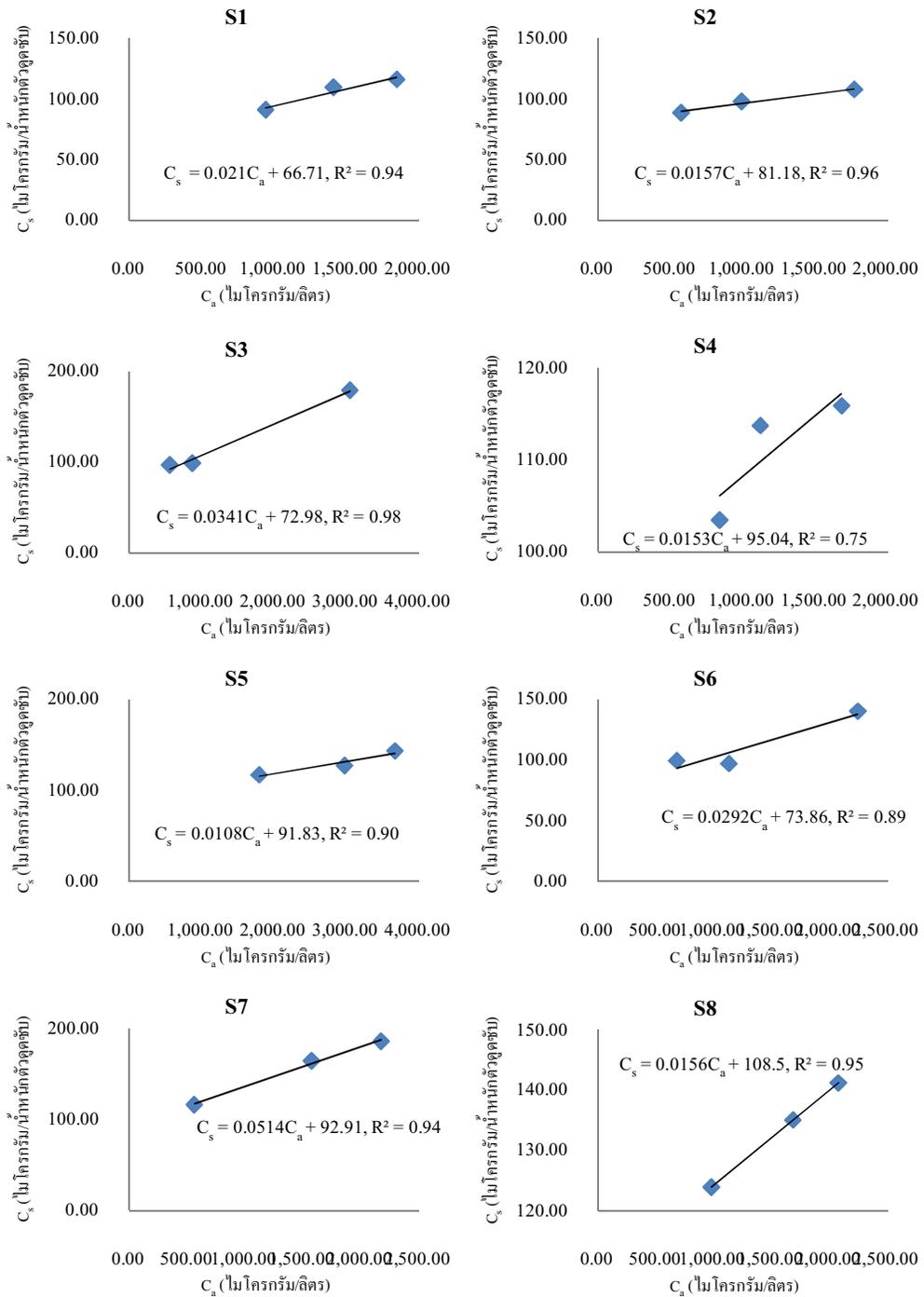
R คือ Gas constant มีค่าเท่ากับ 8.314 กิโลปาสกาล.ลูกบาศก์เมตร/โมล

T คือ Absolute Temperature มีค่าเท่ากับ 273 + Degree Celsius

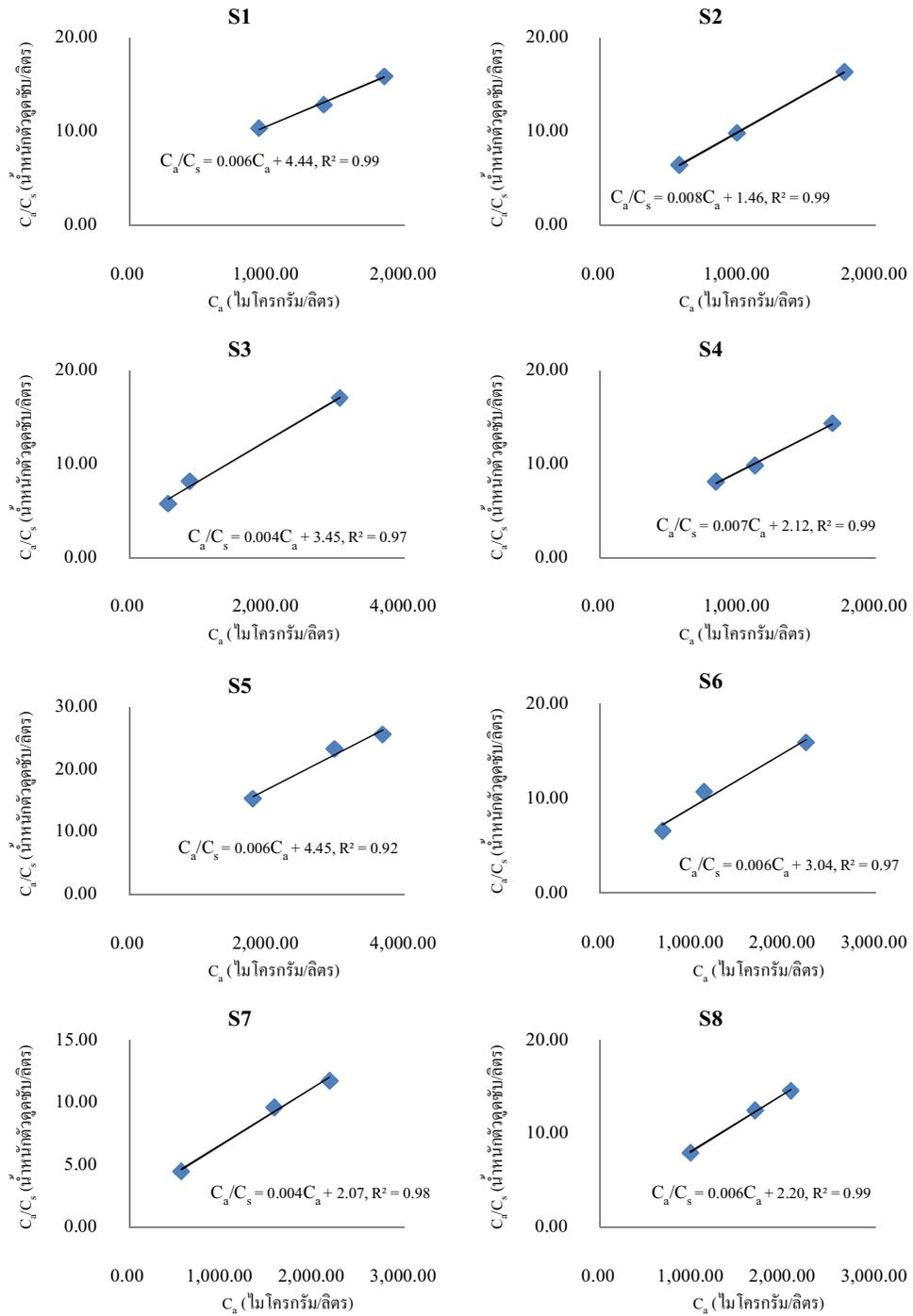
จากนั้นนำค่าความเข้มข้นของสารในตัวดูดซับ (C_s) กับความเข้มข้นของสารในอากาศ (C_a) ที่คำนวณได้มารวมกันจะได้ค่าความเข้มข้นของสารแต่ละตัวที่ใช้ในการทดลอง โดยความเข้มข้นที่ 2 และ 3 คิดเป็น 150% และ 200% ของความเข้มข้นแรก

ภาคผนวก จ
ไอโซเทอมแบบ Freundlich และ Langmuir
ในการดูดซับสารกลุ่ม BTEX

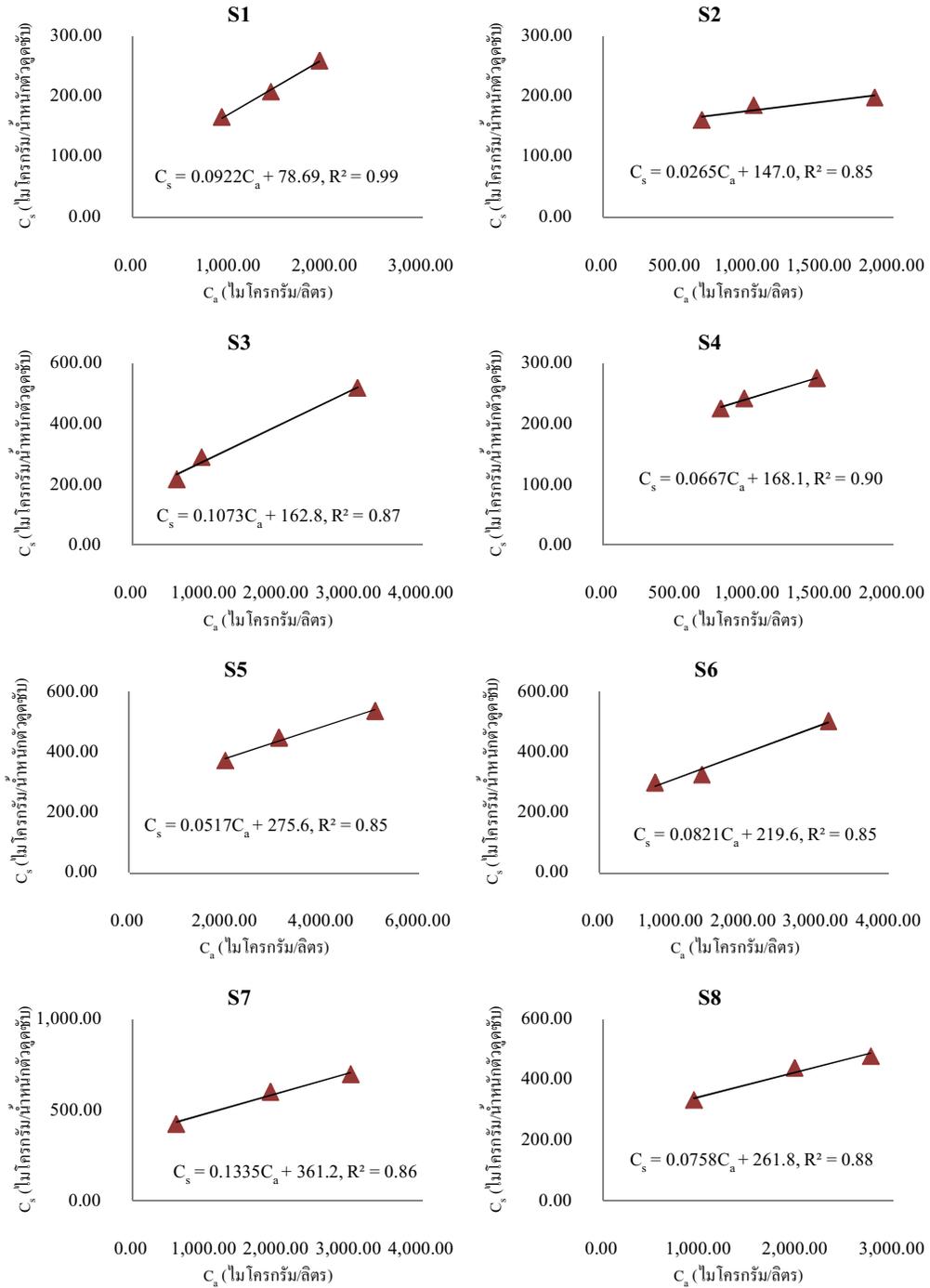
ภาคผนวก ฉ



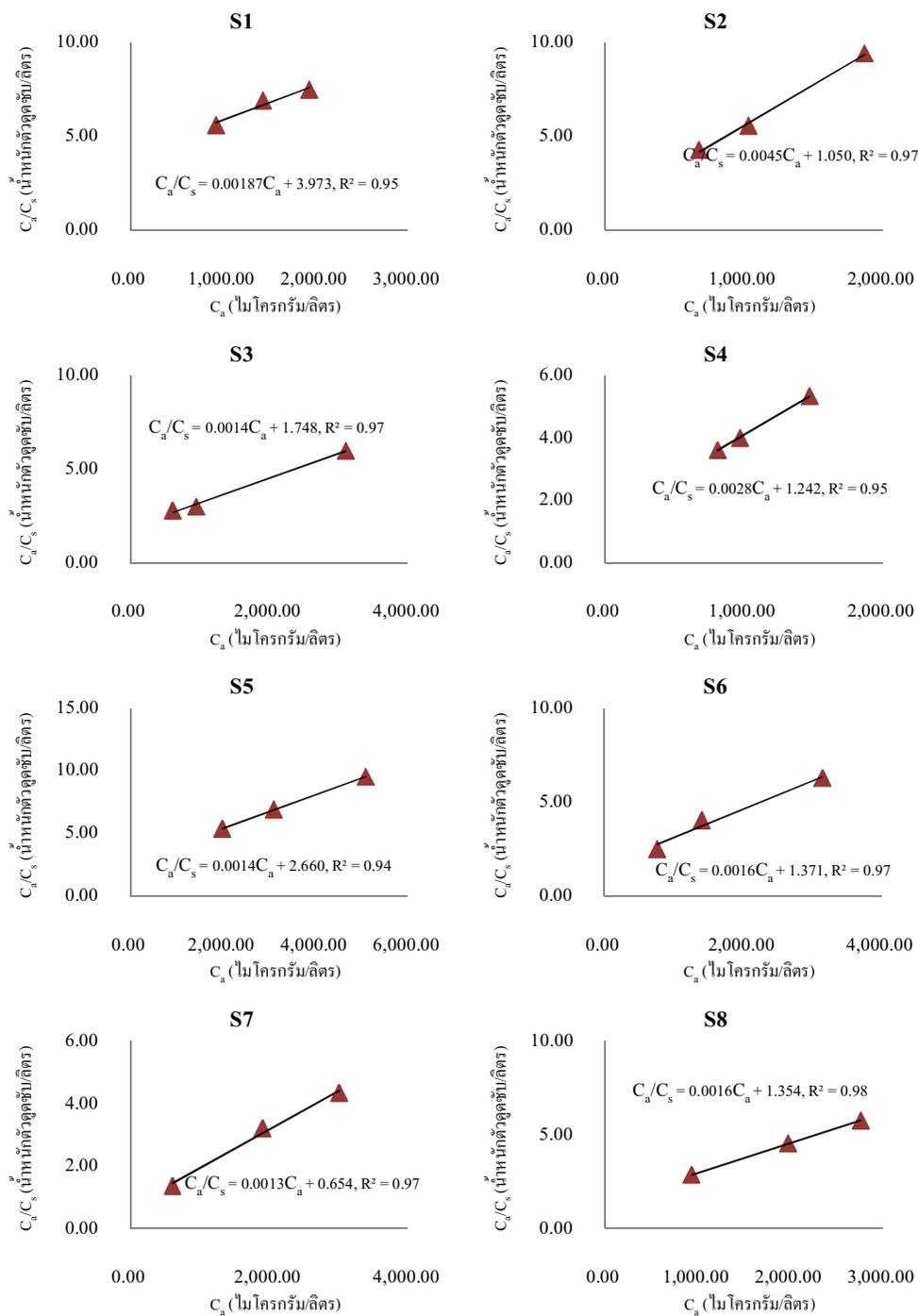
ภาพที่ 18 ไอโซเทอมของ Freundlich ในการดูดซับ Benzene ของตัวดูดซับ S1-S8



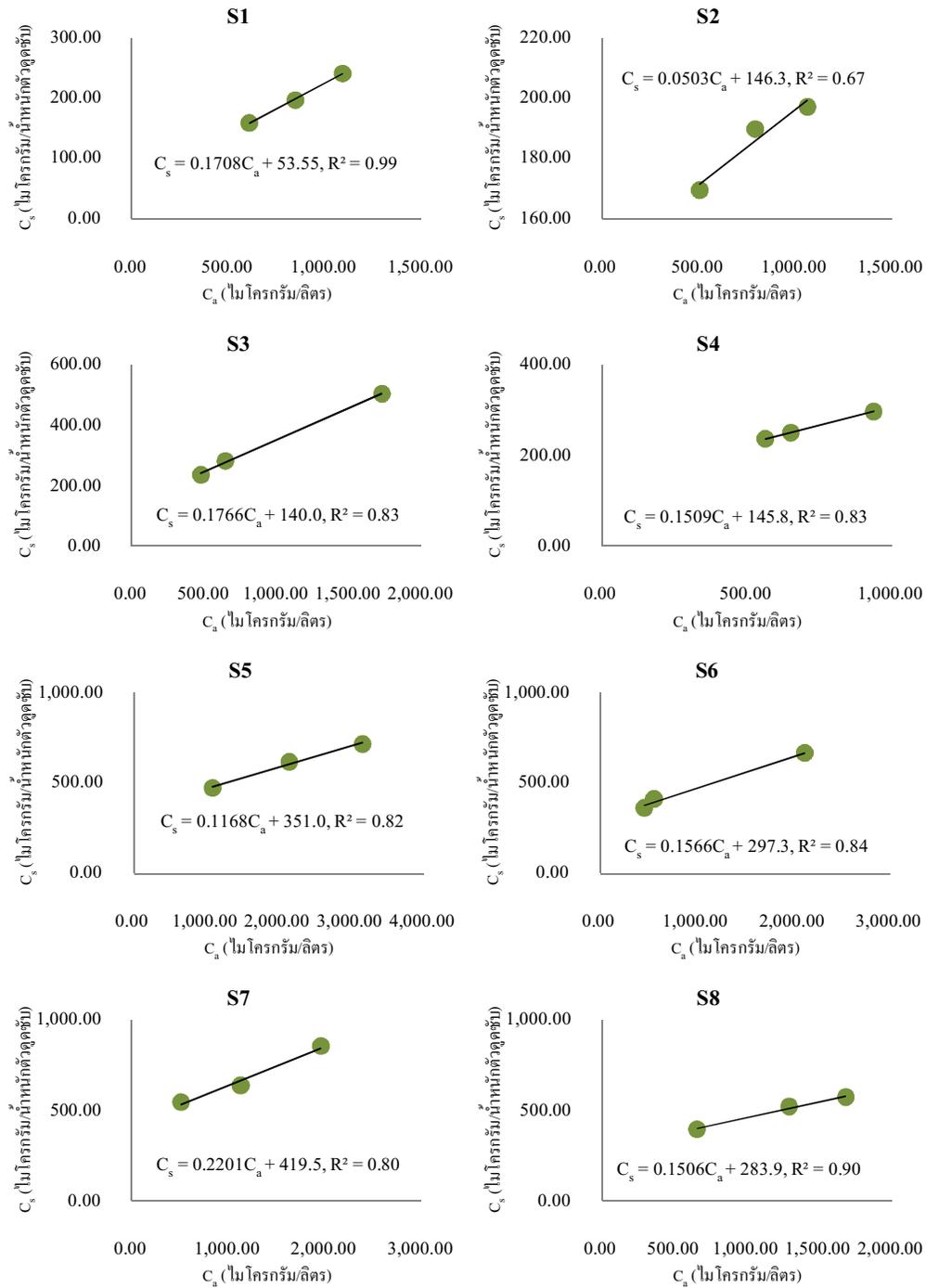
ภาพที่ 19 ไอโซเทอมของ Langmuir ในการดูดซับ Benzene ของตัวดูดซับ S1-S8



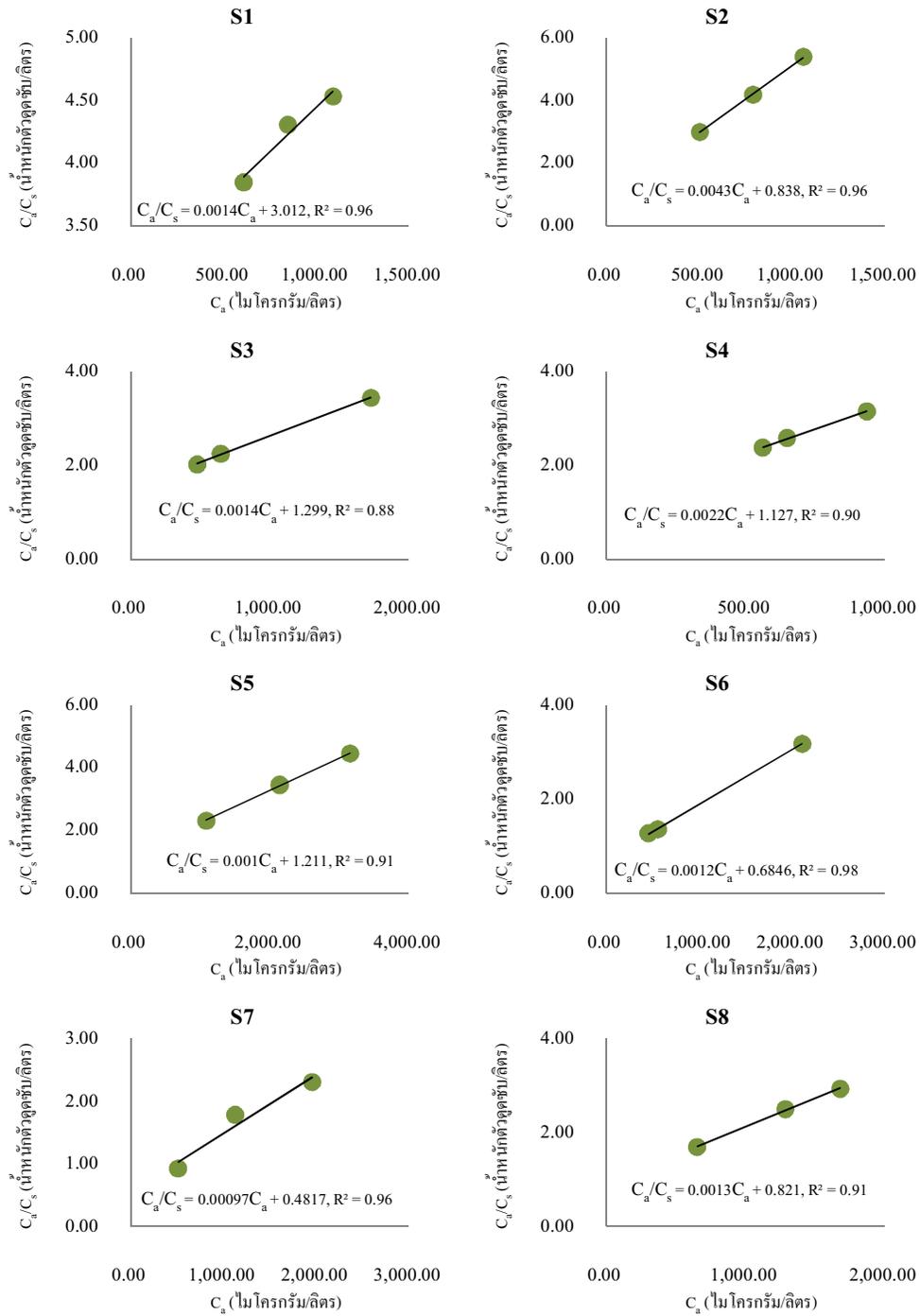
ภาพที่ 20 ไอโซเทอมของ Freundlich ในการดูดซับ Toluene ของตัวดูดซับ S1-S8



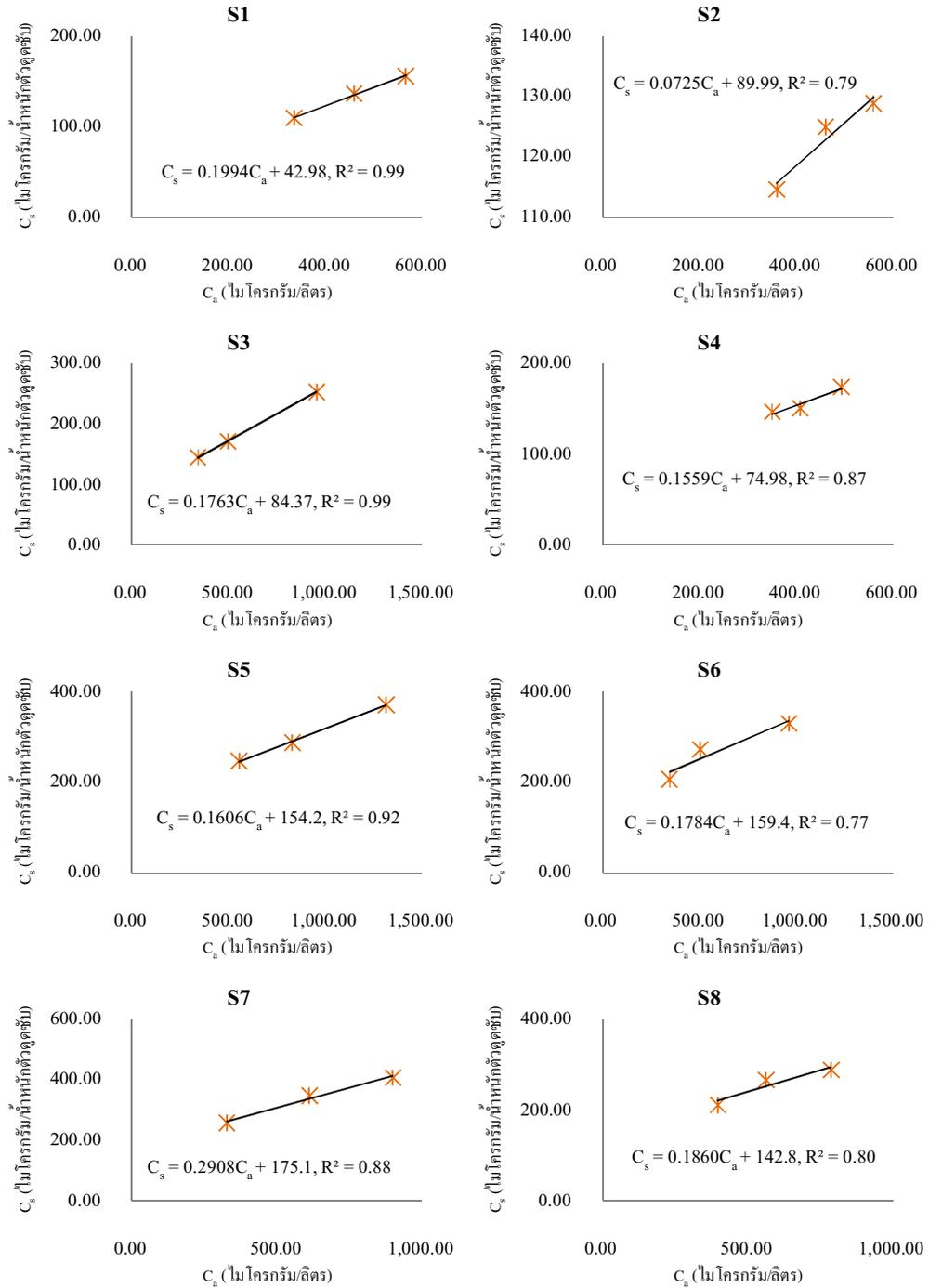
ภาพที่ 21 ไอโซเทอมของ Langmuir ในการดูดซับ Toluene ของตัวดูดซับ S1-S8



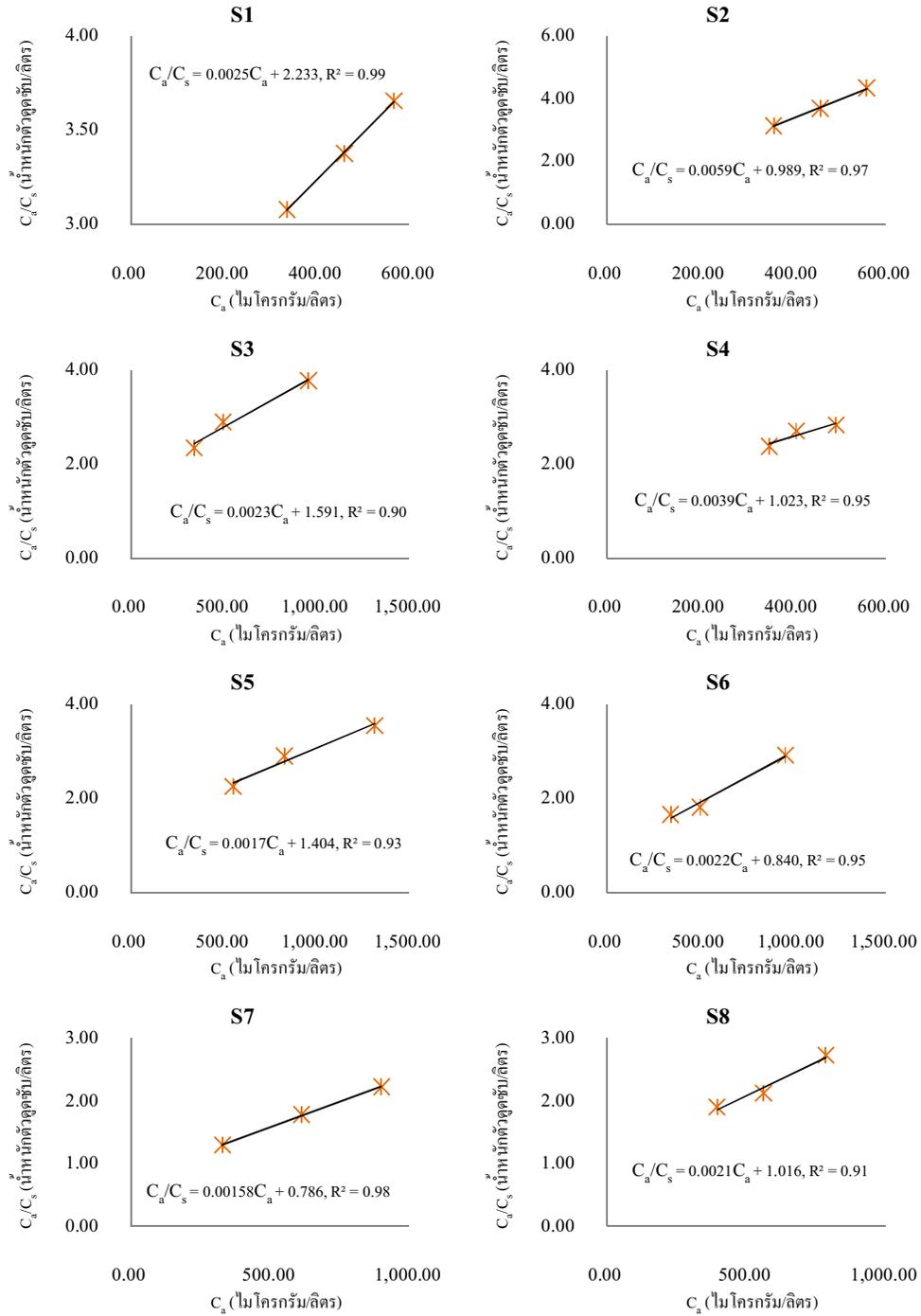
ภาพที่ 22 ไอโซเทอมของ Freundlich ในการดูดซับ Ethylbenzene ของตัวดูดซับ S1-S8



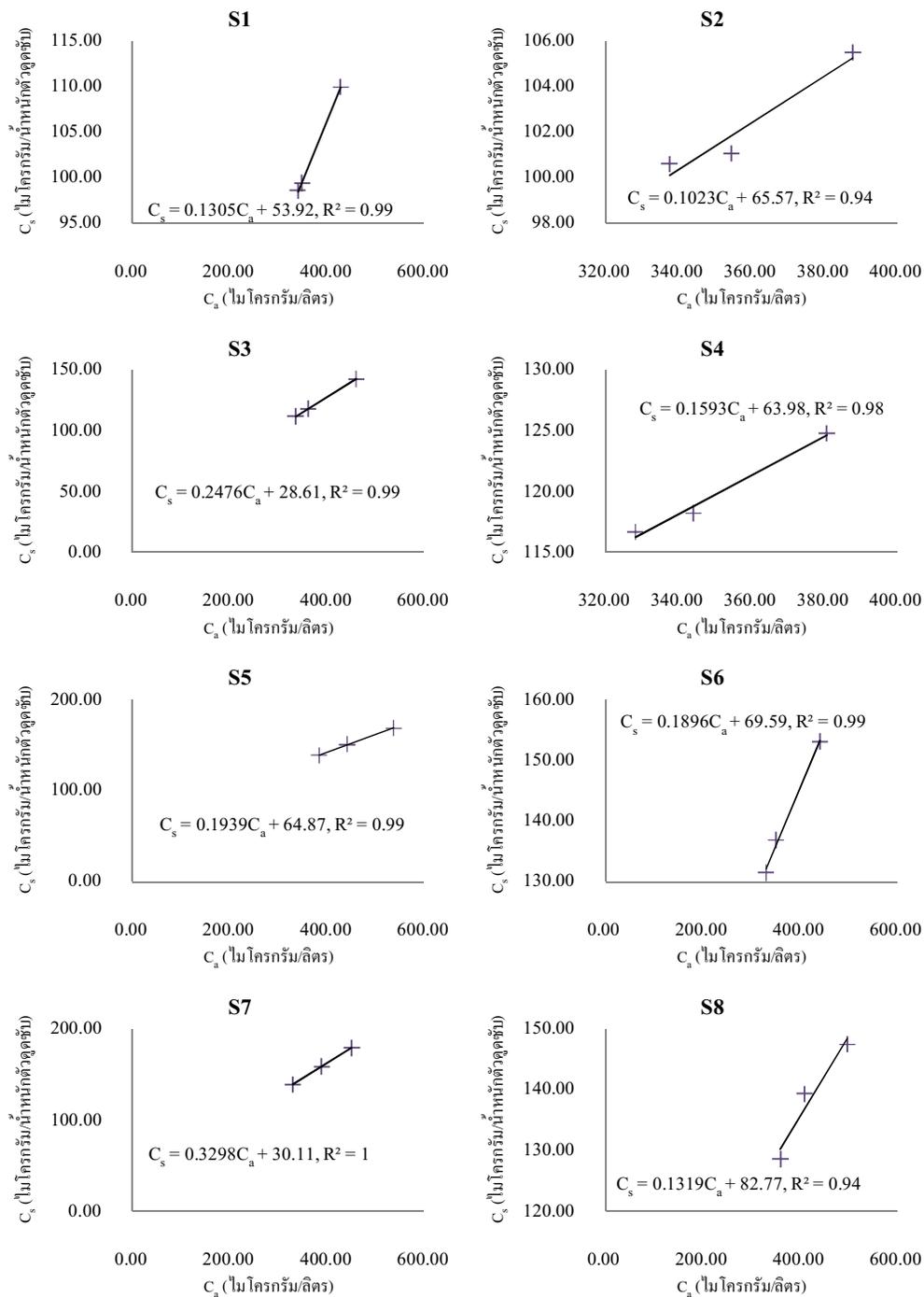
ภาพที่ 23 ไอโซเทอมของ Langmuir ในการดูดซับ Ethylbenzene ของตัวดูดซับ S1-S8



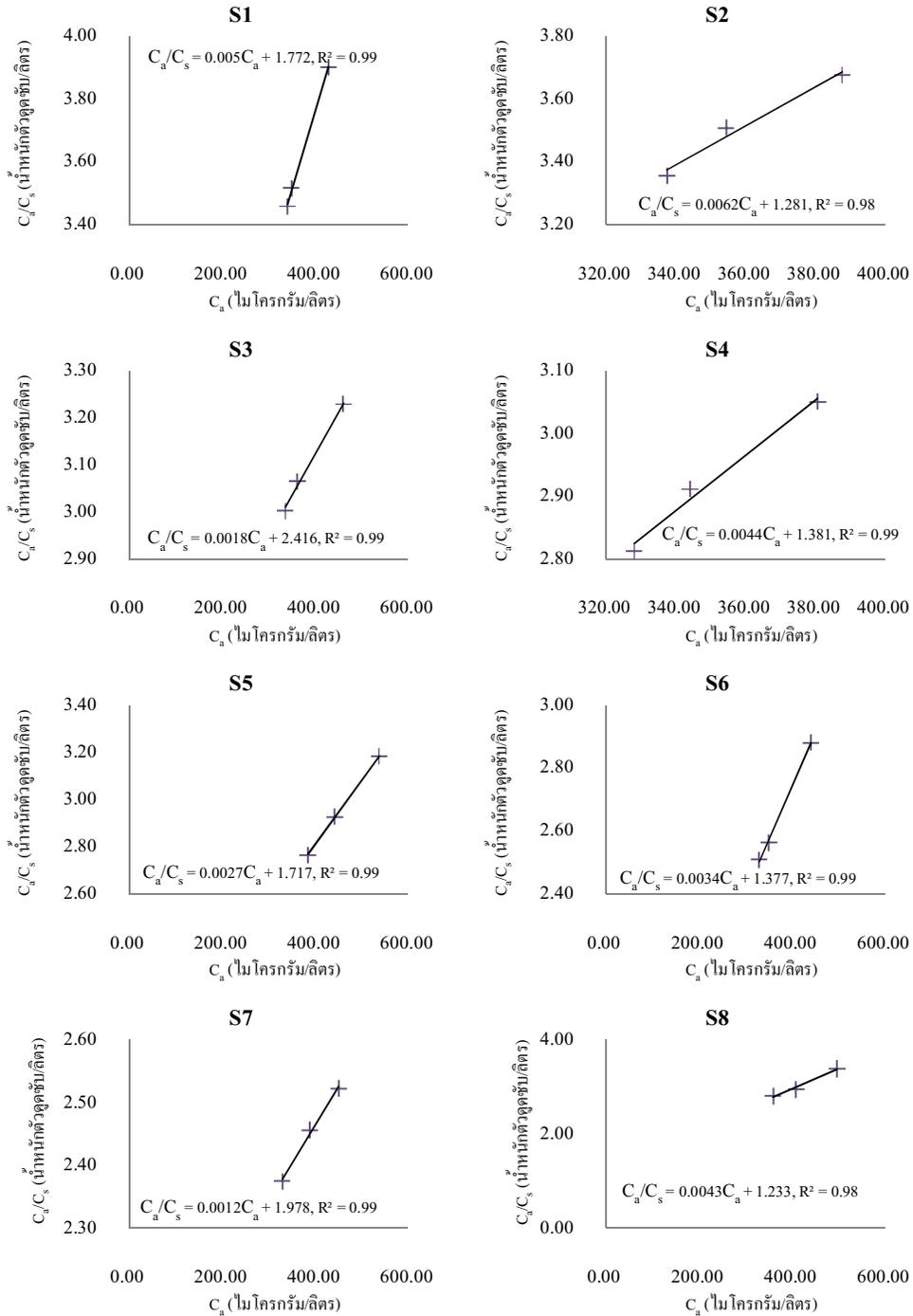
ภาพที่ 24 ไอโซเทอมของ Freundlich ในการดูดซับ *m,p*-Xylene ของตัวดูดซับ S1-S8



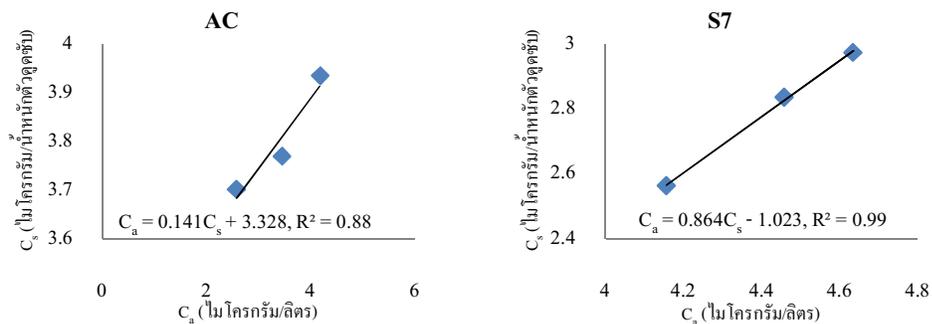
ภาพที่ 25 ไอโซเทอมของ Langmuir ในการดูดซับ *m,p*-Xylene ของตัวดูดซับ S1-S8



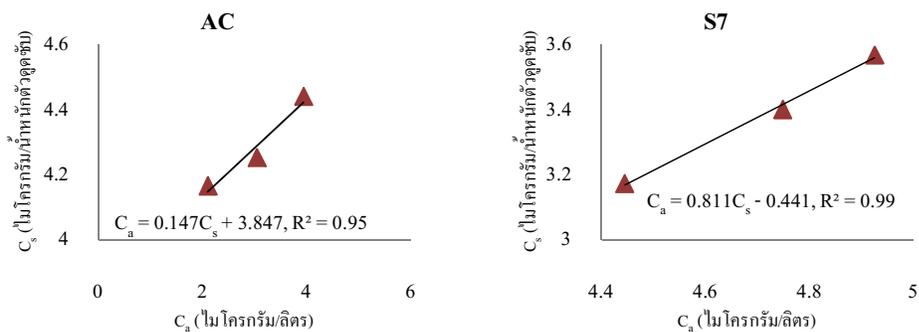
ภาพที่ 26 ไอโซเทอมของ Freundlich ในการดูดซับ *o*-Xylene ของตัวดูดซับ S1-S8



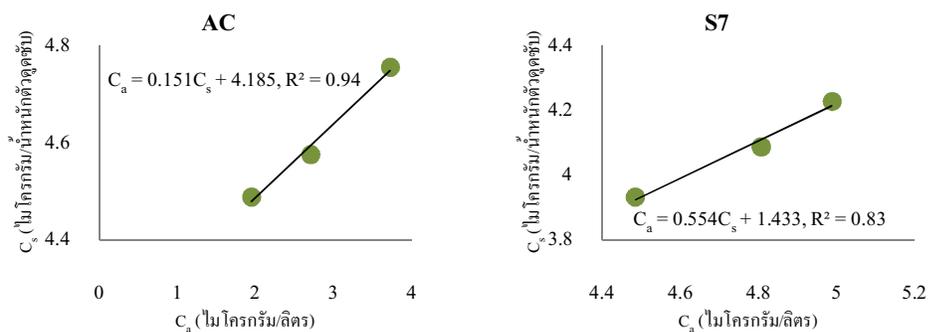
ภาพที่ 27 ไอโซเทอมของ Langmuir ในการดูดซับ *o*-Xylene ของตัวดูดซับ S1-S8



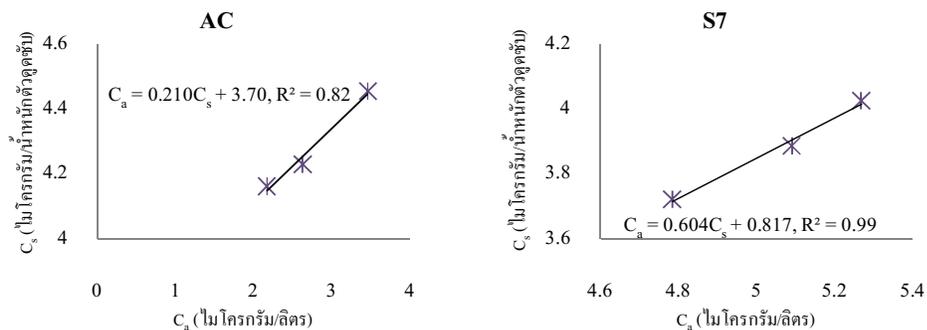
ภาพที่ 28 ไอโซเทอมของ Freundlich ในการดูดซับ Benzene ของตัวดูดซับ AC และ S7



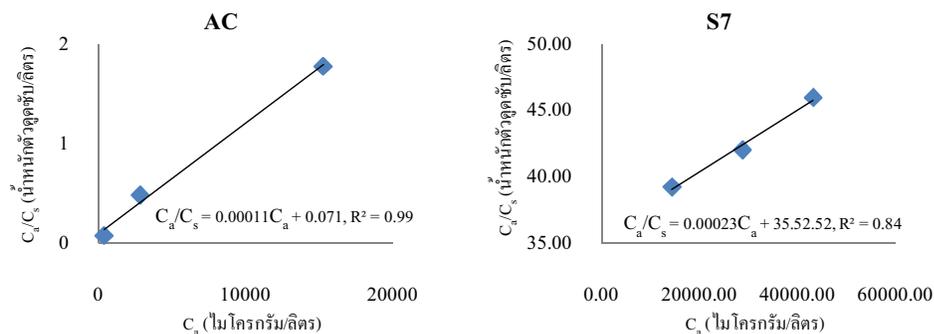
ภาพที่ 29 ไอโซเทอมของ Freundlich ในการดูดซับ Toluene ของตัวดูดซับ AC และ S7



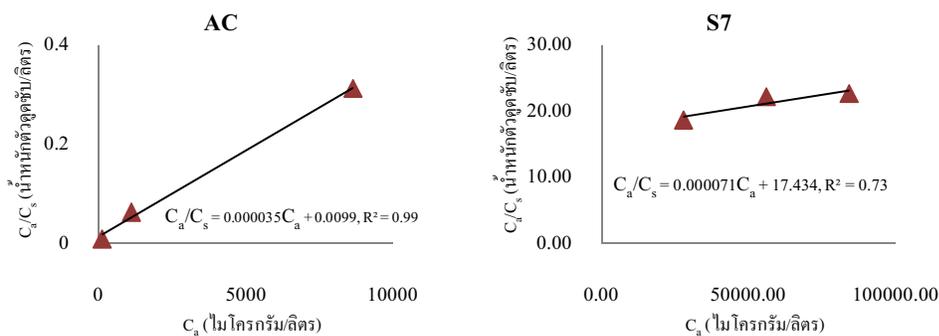
ภาพที่ 30 ไอโซเทอมของ Freundlich ในการดูดซับ Ethylbenzene ของตัวดูดซับ AC และ S7



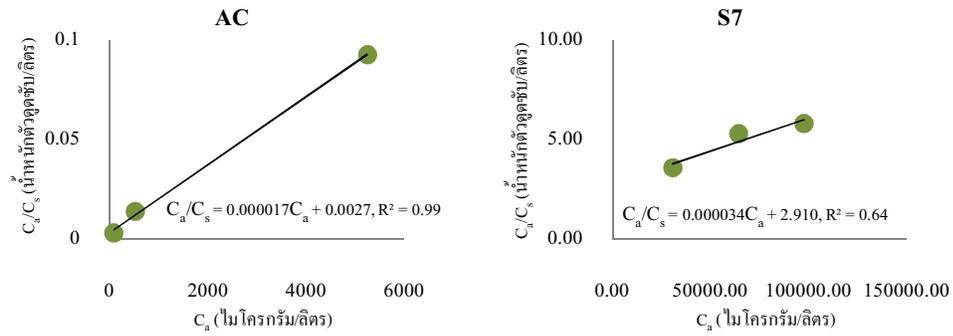
ภาพที่ 31 ไอโซเทอมของ Freundlich ในการดูดซับ Xylenes ของตัวดูดซับ AC และ S7



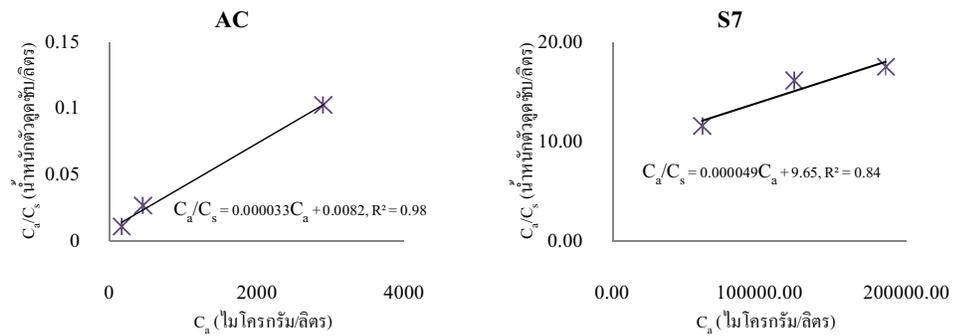
ภาพที่ 32 ไอโซเทอมของ Langmuir ในการดูดซับ Benzene ของตัวดูดซับ AC และ S7



ภาพที่ 33 ไอโซเทอมของ Langmuir ในการดูดซับ Toluene ของตัวดูดซับ AC และ S7



ภาพที่ 34 ไอโซเทอมของ Langmuir ในการดูดซับ Ethylbenzene ของตัวดูดซับ AC และ S7



ภาพที่ 35 ไอโซเทอมของ Langmuir ในการดูดซับ Xylenes ของตัวดูดซับ AC และ S7

ประวัติผู้วิจัย

- ชื่อ – สกุล นางสาวปนัดดา ผู้มีจรรยา
 68 ถนนยิงเป้า ตำบลสนามจันทร์ อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000
 โทรศัพท์ 034-250392 E-mail address panadda337@hotmail.com
- ประวัติการศึกษา
- พ.ศ. 2547 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต วิชาเอกวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
- พ.ศ. 2548 ศึกษาต่อระดับปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
- ประวัติการฝึกงานและอบรม
- พ.ศ. 2546 ผ่านการฝึกงาน ณ บริษัท เทสโก้ จำกัด (บริษัทที่ปรึกษาด้านสิ่งแวดล้อม)
- พ.ศ. 2546 ผ่านการอบรมระบบบริหารงานคุณภาพ ISO 9001:2000
 จัดโดยคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
- พ.ศ. 2547 ผ่านการอบรมความปลอดภัยในโรงงานอุตสาหกรรม จัดโดย
 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ร่วมกับ สำนักงานสวัสดิการและ
 คุ้มครองแรงงาน จังหวัดนครปฐม
- ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่
- ปนัดดา ผู้มีจรรยา. 2551. การทำตัวดูดซับสารกลุ่ม BTEX ในอากาศจากกาน้ำเสียของ
 โรงงานกระดาษ. น. 189. ใน รายงานการประชุม 10 ปีวิชาการแม่ฟ้าหลวง (สาขาวิทยาศาสตร์และ
 เทคโนโลยี). มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. เชียงราย.