

การดูดซับบีทีทีจากนุ่นและวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน

นางสาวดาราริป์ เพ็ชรพรหม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

ADSORPTION OF BTEX BY KAPOK AND RAYON INDUSTRIAL WASTE

Miss Darathip Pejprom

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การดูดซับบีเท็กจากนุ่นและวัสดุเหลือทิ้งจาก  
อุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน

โดย

นางสาวดาราริป์ เพ็ชรพรหม

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.สุชา ขาวเขียว

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แก่นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชา ขาวเขียว)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนันธ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร.เอมมา อาสนจินดา)

ดาราธิป เพ็ชรพรหม : การดูดซับบีเท็กจากนุ่นและวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย  
เรยอน (ADSORPTION OF BTEX BY KAPOK AND RAYON INDUSTRIAL WASTE)  
อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.สุธา ขาวเขียว, 180 หน้า.

สารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็กประกอบด้วย เบนซีน โทลูอิน เอทิลเบนซีนและไซลีน ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมตัวทำละลาย ดังนั้นในงานวิจัย  
ชิ้นนี้จึงได้มีการประยุกต์ใช้เส้นใยธรรมชาติจากนุ่นที่มีคุณสมบัติความเป็นไฮโดรโฟบิกมาขึ้นรูป  
เป็นวัสดุดูดซับสารบีเท็กพร้อมกับเส้นใยเรยอน น้ำยาวิสโคส และเกลือโซเดียมซัลเฟตที่เป็นของ  
เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยทำการขึ้นรูปวัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยนุ่นต่อ  
เส้นใยเรยอนและอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำแตกต่างกัน

จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนผสมของเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอนที่เหมาะสมสำหรับนำมา  
ขึ้นรูปเป็นวัสดุดูดซับ มี 5 อัตราส่วน ได้แก่ 1:0, 3:1, 1:1, 1:3, 0:1 และอัตราส่วนผสมของน้ำยา  
วิสโคสต่อน้ำที่เหมาะสมในการขึ้นรูปวัสดุดูดซับมี 3 อัตราส่วน ได้แก่ 1:2, 1:4 และ 1:6 เมื่อนำวัสดุ  
ดูดซับที่เตรียมได้มาดูดซับไอระเหยของสารบีเท็กที่มีความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดเริ่มต้น 800-  
1200 ส่วนในล้านส่วน ผ่านคอลัมน์ดูดซับ พบว่า วัสดุดูดซับที่เตรียมจากอัตราส่วนผสมของเส้นใย  
นุ่นต่อเส้นใยเรยอน 1:0 ผสมกับน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:6 (S8) เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการดูดซับ  
ไอระเหยของบีเท็กแต่ละชนิด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของสารเบนซีน  
โทลูอิน ไซลีนและเอทิลเบนซีน ร้อยละประมาณ 78.84±10.01, 72.70±16.69, 58.58±2.47 และ  
54.45±2.72 ตามลำดับ ซึ่งการกำจัดไอระเหยของสารส่วนใหญ่มีแนวโน้มมากกว่าค่าเฉลี่ยในการ  
กำจัดสารแต่ละชนิด ที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 58.84 และเมื่อนำ S8 มาเปรียบเทียบกับแผ่นกรอง  
คาร์บอนที่เป็นวัสดุดูดซับทางการค้าพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของสารแต่ละชนิด  
ใกล้เคียงกัน โดยแผ่นกรองคาร์บอนมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของสารเบนซีน โทลูอิน  
ไซลีนและเอทิลเบนซีน ร้อยละประมาณ 72.99±1.78, 80.96±7.90, 46.79±10.86 และ 70.94±1.57  
ตามลำดับ และเมื่อนำวัสดุดูดซับทั้ง 7 อัตราส่วนรวมทั้งแผ่นกรองคาร์บอนมาดูดซับไอระเหยของ  
บีเท็กที่เป็นสารผสม พบว่า วัสดุดูดซับทั้งหมดมีแนวโน้มการกำจัดไอระเหยของสารเบนซีน  
โทลูอินและไซลีนใกล้เคียงกัน ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดไอระเหยมากกว่าค่าเฉลี่ยทั้งหมด ซึ่งมี  
ค่าเท่ากับ ร้อยละ 24.91 และพบว่าวัสดุดูดซับทั้งหมดมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของสาร  
เอทิลเบนซีนน้อยกว่าค่าเฉลี่ย

ภาควิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา..... 2555.....

## 5370242721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : GAS ADSORPTION / CELLULOSE SPONGE / BTEX / VOLATILE ORGANIC COMPOUND

DARATHIP PETPROM : ADSORPTION OF BTEX BY KAPOK AND RAYON INDUSTRIAL WASTE. ADVISOR : ASSOC. PROF. SUTHA KHAODHIAR, Ph.D., 180 pp.

BTEX are volatile organic compounds (VOCs) which include benzene, toluene, ethylbenzene and xylene. BTEX are widely used in industrial as solvent. Therefore, this study focused on adsorption of BTEX by kapok modified with rayon fiber, viscose and sodium sulfate which were waste from textile industry. The adsorbent was prepared at various ratio of fiber, viscose and water. The results indicated 5 appropriate ratios of fiber were 1:0, 3:1, 1:1, 1:3, 0:1 and 3 appropriate ratios of viscose: water were 1:2, 1:4 and 1:6. BTEX at concentration from 800 to 1200 ppm were absorbed by adsorbent through packed column. According to the result the ratio of fiber was 1:0 with viscose: water was 1:6 were the best ratio of adsorbent (S8). Benzene, toluene, xylene and ethylbenzene removal efficiency were  $78.84 \pm 10.01\%$ ,  $72.70 \pm 16.69\%$ ,  $58.58 \pm 2.47\%$  and  $54.45 \pm 2.72\%$ , respectively. The overall of removal efficiency were higher than mean value ( $54.45 \pm 2.72\%$ ). BTEX removal efficiency of S8 was compared with commercial carbon adsorption which had  $72.99 \pm 1.78\%$ ,  $80.96 \pm 7.90\%$ ,  $46.79 \pm 10.86\%$  and  $70.94 \pm 1.57\%$  of benzene, toluene, xylene and ethylbenzene removed efficiency respectively. The result showed that S8 and commercial carbon adsorption were very close. Benzene, toluene and xylene were absorbed by 7 ratios of adsorbents and commercial carbon adsorption. This study showed that the removal efficiency of all adsorbents was higher than mean value (24.9%) but ethylbenzene removal efficiency of 7 ratios was than mean lower value.

Department : ..... Environmental Engineering Student's Signature .....

Field of Study : ..... Environmental Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : ..... 2012 .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความกรุณาจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณผู้ที่คอยให้ความกรุณา ช่วยเหลือและคอยชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ดังต่อไปนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเชียร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ช่วยชี้แนะ แนะนำ ให้คำปรึกษา และให้ข้อคิดที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีเสมอมาพร้อมกับการเสียสละเวลาในการตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนันธ์ และอาจารย์ ดร. เอมมา อาสนจินดา กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาช่วยตรวจสอบข้อบกพร่อง ชี้แนะ และแนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่กรุณาประสิทธิประสาทวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณคุณเชาวลิต เสนุรักษ์วรกุล ผู้จัดการแผนกความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม บริษัทไทยเรยอน จำกัด (มหาชน) สำหรับการให้คำปรึกษาและให้วัสดุอุปกรณ์ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอบคุณคุณรามนรี เนตรวิเชียร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำวิธีการในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ที่เป็นประโยชน์

ขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ และเพื่อนร่วมรุ่นปริญญาโท ที่คอยให้ความช่วยเหลือในทุกๆ เรื่อง และขอบคุณสำหรับกำลังใจที่มีให้กันเสมอมา

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณครอบครัวเป็นอย่างยิ่งที่คอยให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในการศึกษาหาความรู้ในครั้งนี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 สารอินทรีย์ระเหย หรือ สารอินทรีย์ระเหยง่าย.....	5
2.2 แหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ.....	5
2.3 ผลกระทบจากสารอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสุขภาพ.....	6
2.4 สารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีทีเอก.....	7
2.4.1 เบนซีน (Benzene).....	8
2.4.2 โทลูอิน (Toluene).....	9
2.4.3 ไซลีน (Xylene).....	10
2.4.4 เอทิลเบนซีน (Ethylbenzene).....	11
2.4.5 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารบีทีเอก.....	11
2.4.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่กระจายของสารในสิ่งแวดล้อม.....	13
2.5 เส้นใย (Fiber).....	14
2.5.1 ประเภทของเส้นใย.....	14
2.5.1.1 เส้นใยธรรมชาติ.....	14
2.5.1.2 เส้นใยสังเคราะห์.....	14
2.5.1.3 เส้นใยกึ่งสังเคราะห์.....	15

2.5.2 สมบัติของเส้นใย.....	15
2.6 นุ่น (Kapok).....	16
2.6.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของนุ่น.....	16
2.6.2 ลักษณะคุณสมบัติพิเศษของนุ่น.....	17
2.7 เรยอน (Rayon).....	18
2.7.1 กระบวนการผลิตเรยอน.....	18
2.7.1.1 กระบวนการผลิตวิสโคสเรยอนชนิดมาตรฐาน.....	19
2.7.2 กระบวนการเตรียมสารละลายหนืดหรือวิสโคส.....	21
2.7.3 กระบวนการที่ทำให้เกิดเกลือโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).....	22
2.7.4 กระบวนการที่ทำให้เกิดเส้นใยเรยอนที่เหลือใช้.....	23
2.8 กากอุตสาหกรรมจากการผลิตเส้นใยเรยอน.....	23
2.9 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon).....	25
2.9.1 ชนิดของถ่านกัมมันต์.....	25
2.9.2 ดัชนีที่ใช้วัดคุณภาพของถ่านกัมมันต์.....	25
2.9.3 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์.....	25
2.9.4 การประยุกต์ใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์.....	26
2.10 กระบวนการดูดซับ (Adsorption).....	27
2.10.1 ความหมายของการดูดซับ.....	27
2.10.2 แรงในการดูดซับ.....	27
2.10.3 กลไกการดูดซับ.....	29
2.10.3.1 กลไกการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีทีเอ.....	30
2.10.4 ความสามารถในการดูดซับ.....	30
2.10.5 ความลึกของชั้นสารดูดซับต่ำสุด.....	32
2.10.6 เส้นแสดงการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (Adsorption isotherms).....	33
2.10.7 สารดูดซับ.....	34
2.10.8 การฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ.....	34
2.11 ความสามารถในการละลายและกฎของเฮนรี (Henry's Law).....	36
2.12 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	37
2.12.1 หลักการ.....	37



2.12.2 ชนิดของแก๊สโครมาโทกราฟี.....	37
2.12.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการแยกสาร.....	38
2.12.4 เครื่องมือ.....	38
2.12.4.1 แก๊สเฉื่อย.....	38
2.12.4.2 วิธีการนำสารเข้าสู่ระบบ.....	38
2.12.4.3 คอลัมน์ของแก๊สโครมาโทกราฟี.....	39
2.12.4.4 เตาอบ.....	39
2.12.4.5 ดีเทกเตอร์และเรคคอร์ด.....	40
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
2.13.1 งานวิจัยที่ใช้เส้นใยनुนเป็นตัวดูดซับ.....	40
2.13.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการขึ้นรูปวัสดุดูดซับ.....	42
2.13.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก.....	44
2.13.4 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ.....	54
2.13.5 งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง .....	55
2.14 ความแตกต่างกับงานวิจัยที่ผ่านมา.....	56
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	58
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	58
3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง.....	58
3.1.2 ถังปฏิบัติการที่ใช้ในการทดลอง.....	58
3.1.3 วัสดุที่ใช้ในการทำตัวดูดซับ.....	59
3.1.4 สารเคมี.....	59
3.2 การวิเคราะห์.....	60
3.2.1 ขนาดคอลัมน์ที่ใช้บรรจุวัสดุดูดซับที่ทำขึ้น.....	60
3.2.2 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	60
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	60
3.3.1 การทดลอง.....	60
3.3.1.1 การทดลองช่วงที่ 1.....	67

	หน้า
3.3.1.2 การทดลองช่วงที่ 2.....	70
3.3.1.3 การทดลองช่วงที่ 3.....	70
3.3.1.4 การทดลองช่วงที่ 4 .....	72
3.3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	73
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	75
4.1 การเตรียมวัสดุคูดซับ.....	75
4.1.1 วัสดุคูดซับที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำแตกต่างกัน .....	76
4.1.1.1 น้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:0.....	76
4.1.1.2 น้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:2.....	77
4.1.1.3 น้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:4.....	77
4.1.1.4 น้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:6.....	77
4.2 การเลือกและวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุคูดซับ.....	82
4.2.1 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิว.....	82
4.2.1.1 เส้นใยนูนและเส้นใยเรขอน.....	82
4.2.1.2 วัสดุคูดซับที่เตรียมจากอัตราส่วนผสมน้ำยาวิสโคสต่อน้ำต่างกัน .....	83
4.2.2 หาหมู่ฟังก์ชัน.....	87
4.2.3 พื้นที่ผิวของวัสดุคูดซับ.....	89
4.2.4 ความหนืดของวิสโคส.....	90
4.2.5 ความหนาแน่น.....	90
4.2.6 ความชื้นของวัสดุคูดซับ.....	91
4.3 การคัดเลือกวัสดุคูดซับที่เหมาะสมสำหรับคูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก....	91
4.4 การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการคูดซับบีเท็ก.....	95
4.4.1 อัตราการไหลของแก๊ส.....	95
4.4.2 อุณหภูมิ.....	95
4.4.3 อัตราความเข้มข้นของสารเริ่มต้น.....	96
4.4.4 การ पै็คคอลัมน์คูดซับ.....	97
4.4.5 ระยะเวลาและปริมาตรของแก๊ส.....	97
4.4.6 คอลัมน์คูดซับที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	98
4.4.7 การคำนวณหาปริมาตรของวัสดุคูดซับในคอลัมน์.....	99



	หน้า
5.2 ข้อดี ข้อเสีย และการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์.....	116
5.3 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป.....	116
รายการอ้างอิง.....	118
ภาคผนวก.....	125
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	180

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	มาตรฐานค่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 1 ปี.....	6
ตารางที่ 2.2	ปริมาณการผลิตสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็กในประเทศไทยปี 2552.....	7
ตารางที่ 2.3	สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก.....	12
ตารางที่ 2.4	เปรียบเทียบชนิดของถ่านกัมมันต์.....	26
ตารางที่ 2.5	องค์ประกอบของแผ่นกรองคาร์บอน.....	27
ตารางที่ 2.6	คำนวณค่าความสามารถในการละลายจากกฎของเฮนรี.....	36
ตารางที่ 2.7	ผลการทดลองการทำให้คืนกลับสภาพเดิมของสารกัมมันต์ 1 ปอนด์ ที่ดูดซับอีเทอร์ ไวรั้อยละ 20 .....	54
ตารางที่ 3.1	การตั้งสถานะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่เหมาะสมเพื่อดูดซับไอระเหย ของบีเท็ก.....	60
ตารางที่ 3.2	ปัจจัยที่ศึกษาในการขึ้นรูปวัสดุดูดซับ.....	61
ตารางที่ 3.3	จำนวนตัวอย่างที่ต้องทำการทดลองในขั้นตอนที่ 1.....	63
ตารางที่ 3.4	จำนวนตัวอย่างที่ต้องทำการทดลองในขั้นตอนที่ 2.....	65
ตารางที่ 3.5	จำนวนตัวอย่างทั้งหมดที่ต้องนำมาทำการทดลองในขั้นตอนที่ 3.....	66
ตารางที่ 3.6	จำนวนตัวอย่างที่ต้องทำการทดลองในขั้นตอนที่ 4 นำแผ่นกรองคาร์บอนมา เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับกับวัสดุดูดซับที่ได้เตรียมขึ้น.....	67
ตารางที่ 3.7	ศึกษาสมบัติของวัสดุดูดซับทางกายภาพและทางเคมี.....	70
ตารางที่ 3.8	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 1.....	73
ตารางที่ 3.9	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2.....	73
ตารางที่ 3.10	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3 และการทดลองที่ 4.....	74
ตารางที่ 4.1	อัตราส่วนผสมระหว่างเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอน และอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยา วิสโคสต่อน้ำ แบบไม่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต มีทั้งหมด 20 ตัวอย่าง.....	75
ตารางที่ 4.2	อัตราส่วนผสมระหว่างเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอน และอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยา วิสโคสต่อน้ำ แบบใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต 50 กรัม มีทั้งหมด 20 ตัวอย่าง.....	76
ตารางที่ 4.3	ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ.....	88
ตารางที่ 4.4	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับในอัตราส่วนผสมต่างๆ.....	89
ตารางที่ 4.5	ผลการวิเคราะห์หาค่าความหนืดของวิสโคสในอัตราส่วนผสมต่างๆ.....	90

	หน้า
ตารางที่ 4.6 ความหนาแน่นที่แท้จริงของวัสดุคูดซับ.....	91
ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าความชื้นของวัสดุคูดซับ.....	92
ตารางที่ 4.8 สรุปผลการวิเคราะห์และคัดเลือกวัสดุคูดซับที่ได้เตรียมขึ้น.....	93
ตารางที่ 4.9 อัตราส่วนของวัสดุคูดซับที่นำมาใช้คูดซับแก๊สบีเท็ก.....	94
ตารางที่ 5.1 สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดไอระเหยของสารบีเท็ก.....	113
ตารางที่ 5.2 วัสดุที่เลือกใช้ในงานวิจัย ประโยชน์ อัตราส่วนที่ดีที่สุด และอัตราส่วนผสมที่ เหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัย.....	115

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 สูตรโมเลกุลของเบนซีน.....	8
ภาพที่ 2.2 สูตรโมเลกุลของโทลูอิน.....	10
ภาพที่ 2.3 สูตรโมเลกุลของไซลีน.....	10
ภาพที่ 2.4 สูตรโมเลกุลของเอทิลเบนซีน.....	11
ภาพที่ 2.5 ผลนุ่น.....	16
ภาพที่ 2.6 ลักษณะส่วนต่างๆ ของนุ่น.....	17
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างภายในเส้นใยนุ่น.....	17
ภาพที่ 2.8 เส้นใยเรยอน.....	18
ภาพที่ 2.9 ผังการผลิตรวมวิสโคสเรยอน.....	20
ภาพที่ 2.10 สารละลายหนืดหรือวิสโคส.....	21
ภาพที่ 2.11 กลีโอะโซเดียมซัลเฟตที่ปนเปื้อนสิ่งสกปรก.....	23
ภาพที่ 2.12 ภาพเส้นใยเรยอนที่หลุดออกมาจากระบบการผลิตและรวบรวมไปขายต่ออีก ตลาดหนึ่ง.....	23
ภาพที่ 2.13 การดูดซับทางกายภาพที่เกิดจากการมีขี้วหรือไม่มีขี้ว.....	28
ภาพที่ 2.14 กลไกการดูดซับ.....	29
ภาพที่ 2.15 แสดงความเข้มข้นภายในคอลัมน์ของสารดูดซับ.....	31
ภาพที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงของชั้นความเข้มข้นของสารดูดซับ.....	32
ภาพที่ 2.17 อัตราความต้องการไอน้ำต่อปอนด์ของสารถูกดูดซับ.....	35
ภาพที่ 2.18 หลักการทำงานและแปลผลของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	37
ภาพที่ 2.19 องค์ประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	38
ภาพที่ 2.20 ระบบการดูดซับ.....	45
ภาพที่ 2.21 ระบบการดูดซับโทลูอินและอะซิโตน.....	48
ภาพที่ 2.22 ระบบการดูดซับ.....	50
ภาพที่ 2.23 ระบบการดูดซับบีเท็กแบบต่อเนื่อง.....	50
ภาพที่ 2.24 ระบบการดูดซับและการคายการดูดซับของสารไซลีน.....	51
ภาพที่ 2.25 ระบบการดูดซับและการออกซิเดชันโทลูอิน.....	53

ภาพที่ 3.1 แผนการไหลของอุปกรณ์สำหรับกระบวนการดูดซับ.....	58
ภาพที่ 3.2 แผนการทดลองทั้งหมด.....	62
ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนการทำวัสดุดูดซับ.....	69
ภาพที่ 3.4 การดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก.....	72
ภาพที่ 4.1 ตัวอย่างของวัสดุดูดซับที่มีการขึ้นรูปไม่สมบูรณ์.....	77
ภาพที่ 4.2 อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:0 ของวัสดุดูดซับ.....	78
ภาพที่ 4.3 อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:2 ของวัสดุดูดซับ.....	79
ภาพที่ 4.4 อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:4 ของวัสดุดูดซับ.....	80
ภาพที่ 4.5 อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:6 ของวัสดุดูดซับ.....	81
ภาพที่ 4.6 ลักษณะพื้นที่ผิวปรากฏของเส้นใย.....	82
ภาพที่ 4.7 ลักษณะพื้นที่ผิวปรากฏของวัสดุดูดซับที่เตรียมจากอัตราส่วนผสม.....	85
ภาพที่ 4.8 ลักษณะพื้นที่ผิวปรากฏของวัสดุดูดซับที่เตรียมจากอัตราส่วนผสม.....	86
ภาพที่ 4.9 ความยาวคลื่นของของเส้นใยนุ่ม เส้นใยเรยอนและแผ่นกรองคาร์บอน.....	87
ภาพที่ 4.10 ความเข้มข้นของไอระเหยของบีเท็ก.....	96
ภาพที่ 4.11 หาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเก็บไอระเหยของแก๊ส.....	98
ภาพที่ 4.12 คอลัมน์ดูดซับที่ใช้ในงานวิจัย.....	98
ภาพที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดเบนซีนของวัสดุดูดซับ.....	101
ภาพที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดโทลูอินของวัสดุดูดซับ.....	103
ภาพที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดไซลีนของวัสดุดูดซับ.....	104
ภาพที่ 4.16 ประสิทธิภาพการกำจัดเอทิลเบนซีนของวัสดุดูดซับ.....	106
ภาพที่ 4.17 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับในการกำจัดไอระเหยของสารแต่ละชนิด..	108
ภาพที่ 4.18 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับในการกำจัดไอระเหยของสารผสมบีเท็ก..	110



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการเพิ่มขึ้นของประชากรอย่างรวดเร็ว ทำให้ความต้องการปัจจัยสี่มีเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งหนึ่งในปัจจัยสี่ที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ก็คือ เครื่องนุ่งห่ม จึงส่งผลให้อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเครื่องนุ่งห่มอย่างอุตสาหกรรมสิ่งทอเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและยังเป็นอุตสาหกรรมส่งออกที่มีบทบาทสำคัญในการนำเงินตราเข้าประเทศอย่างต่อเนื่องเป็นรองแค่เพียงอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และส่วนประกอบเท่านั้น (ภัสรา พระยาครุฑและคณะ, 2551) มูลค่าการส่งออกสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มของไทยไปยังตลาดโลกในเดือนมกราคมถึงเดือนกรกฎาคมปี 2554 มีมูลค่า 4982.5 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวจากเดือนมกราคมถึงเดือนกรกฎาคมปี 2553 ถึง 17.3 เปอร์เซ็นต์ (สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ, 2554) ทั้งนี้เนื่องมาจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยอุตสาหกรรมย่อยๆ หลายส่วนประกอบ ตั้งแต่ ต้นน้ำ คือ อุตสาหกรรมการผลิตเส้นใย ใช้เงินทุนและเทคโนโลยีระดับสูงใช้แรงงานไม่มาก อุตสาหกรรมกลางน้ำ คือ การปั่นด้าย การทอผ้า การถักผ้า อุตสาหกรรมฟอก ย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จ ต่อเนื่องจนถึงอุตสาหกรรมปลายน้ำ คือ อุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่มและเสื้อผ้าสำเร็จรูป โรงงานส่วนมากร้อยละ 90 เป็นโรงงานขนาดกลางและขนาดเล็ก และใช้แรงงานเป็นจำนวนมาก ยังมีการผลิตมากขึ้นทำให้ของเสียที่ต้องนำไปกำจัดมีมากขึ้นตามไปด้วย อาทิ ของเสียจากบริษัทไทยเรยอน ได้แก่ เส้นใยเรยอนที่เหลือใช้ซึ่งเกิดจากกระบวนการอบแห้งแล้วโดนกำจัดออกมามีประมาณ 500 ตันต่อปี และน้ำยาล้างโคลสที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใยซึ่งเป็นของเสียที่เหลือจากการล้างตัวกรอง มีประมาณ 300 ตันต่อปี เป็นต้น (บริษัทไทยเรยอน, 2554) ซึ่งราคาในการกำจัดของเสียและของเสียอันตรายมีราคาที่สูงมาก หากมีวิธีการใดที่สามารถนำของเสียที่ต้องการจะกำจัดไปใช้ใหม่ได้จะทำให้สามารถลดต้นทุนในการกำจัดและเพิ่มรายได้เข้าสู่โรงงานได้อีกทางหนึ่ง

เมื่ออุตสาหกรรมมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว วัตถุดิบที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตจึงเป็นสิ่งสำคัญและปริมาณความต้องการใช้ก็มากขึ้นตามขนาดของอุตสาหกรรมนั้นๆ ซึ่งวัตถุดิบส่วนใหญ่ที่ถูกนำมาใช้ จะมีเบนซิน โทลูอิน เอทิลเบนซิน และไซลีน ผสมอยู่ สารเหล่านี้เรียกรวมกันว่า บีเท็กเป็นกลุ่มของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์เพราะสามารถระเหยเป็นไอกระจายตัวไปในอากาศได้ง่ายที่อุณหภูมิและความดันปกติ ทำให้คณะกรรมการสิ่งแวดล้อม

แห่งชาติ ออกประกาศกำหนดมาตรฐานค่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 1 ปี แหล่งกำเนิดหลักที่สำคัญที่ทำให้เกิดบีเท็ก คือ การทำกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) ซึ่งสารอินทรีย์กลุ่มนี้จะถูกใช้ในอุตสาหกรรมเชื้อเพลิง ตัวทำละลาย เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเรซิน โพลีเมอร์ พลาสติก ระเบิด ใช้ในทางเกษตรกรรมและใช้ในทางเภสัชกรรม ซึ่งสารประกอบกลุ่มนี้สามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้หลายทาง เช่น จากกระบวนการผลิตและไอเสียของยานยนต์ ปัจจุบัน การลดปริมาณการปล่อยสารระเหยอินทรีย์สู่สิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาที่เร่งด่วนที่ทุกประเทศควรจะทำ เนื่องจากสารดังกล่าวสามารถกระจายสู่คน สัตว์และพืช และยังสามารถถ่ายทอดผ่านห่วงโซ่อาหารอีกด้วย

ดังนั้นจึงได้มีการนำของเสียจากโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน ได้แก่ เส้นใยเรยอน น้ำยาวิสโคส และเกลือ โซเดียมซัลเฟต มาทดลองขึ้นรูปเป็นวัสดุดูดซับร่วมกับเส้นใยนุ่น เพื่อนำไปดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็กที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมตัวทำละลาย เนื่องจากสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็กมีคุณสมบัติความไม่มีขั้ว ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เส้นใยนุ่นชอบ เพราะเส้นใยนุ่นเป็นเส้นใยที่มีขี้ผึ้งเคลือบอยู่บนพื้นผิวของเส้นใยทำให้เกิดเป็นลักษณะพิเศษคือชอบโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว และไม่ชอบโมเลกุลที่มีขั้ว (Lim และ Huang, 2007) ดังนั้นการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อวัสดุดูดซับและสารถูกดูดซับเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้วเหมือนกัน (Lee และคณะ, 2008) แต่เนื่องจากนุ่นมีลักษณะเบาและฟุ้งกระจายได้ง่าย จึงได้มีการนำเส้นใยเรยอนที่เป็นของเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตเส้นใยเรยอนมาผสมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุดูดซับและลดการฟุ้งกระจายของเส้นใยนุ่น รวมทั้งได้นำน้ำยาวิสโคสที่เป็นของเสียจากกระบวนการล้างตัวกรองจากโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน มาผสมกับเส้นใยเพื่อเป็นตัวเชื่อมประสานเส้นใยให้เข้ากันและสามารถขึ้นรูปเป็นวัสดุดูดซับที่มีลักษณะคล้ายฟองน้ำได้เมื่อนำมาขึ้นรูปด้วยกรด และมีการใส่เกลือโซเดียมซัลเฟตลงไปเพื่อเพิ่มรูพรุนและลดความหนาแน่นของวัสดุดูดซับที่เกิดขึ้น (วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, 2547) ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็กของวัสดุดูดซับที่เตรียมจาก อัตราส่วนผสมระหว่างเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอนเท่ากับ 1:0, 3:1, 1:1, 1:3 และ 0:1 น้ำหนัก ผสมกับของผสมชนิดที่เกิดจากน้ำยาวิสโคสกับน้ำที่อัตราส่วน 1:0, 1:2, 1:4 และ 1:6 โดยน้ำหนัก และมีใส่เกลือโซเดียมปริมาณ 0 และ 50 กรัม

โดยงานวิจัยชิ้นนี้ได้พัฒนากระบวนการขึ้นรูปต่อเนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมา เรื่องการประยุกต์ใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมเส้นใยเรยอนผสมกับเส้นใยนุ่นเพื่อเป็นวัสดุดูดซับน้ำมัน (จิรายุ มั่งสุวรรณ, 2553)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอน อัตราส่วนของวิสโคสค่อน้ำและปริมาณโซเดียมซัลเฟต ในการขึ้นรูปวัสดุคูดซับจากเส้นใยนุ่นและของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุคูดซับที่ได้จากการขึ้นรูป

1.2.2 ศึกษาความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก ด้วยวัสดุคูดซับที่เตรียมขึ้นจากเส้นใยนุ่นและของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน

1.2.3 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็กระหว่างตัวคูดซับที่เตรียมขึ้นจากเส้นใยนุ่นและของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน กับแผ่นกรองคาร์บอนที่นิยมใช้เป็นตัวคูดซับทางการค้า

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการของเสียนันตรายภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.1 เตรียมตัวกลางที่พัฒนากระบวนการขึ้นรูปจากจिरायु มั่งสุวรรณ เรื่องการประยุกต์ใช้เส้นใยเรยอนผสมกับเส้นใยนุ่นเพื่อเป็นวัสดุคูดซับน้ำมัน โดยใช้ของเหลือทิ้งจากโรงงานไทยเรยอน ได้แก่ เส้นใยเรยอนและน้ำยาวิสโคส เป็นส่วนผสมของวัสดุคูดซับ แล้วขึ้นรูปด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 10 โดยเติมสารโซเดียมซัลเฟตเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้แก่วัสดุคูดซับ

1.3.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุคูดซับ ได้แก่ โครงสร้างและความเป็นรูพรุน การอัดตัว เป็นต้น และสมบัติทางเคมีของวัสดุคูดซับ ได้แก่ ความชื้น เป็นต้น

1.3.3 ศึกษาการดูดซับแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร มีปริมาตร 15.386 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่มีอัตราการไหลอยู่ในช่วง 6-8 ลิตรต่อชั่วโมง ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก ที่ใช้ในการเตรียมสารละลายมีความเข้มข้น 1,000 ส่วนในล้านส่วน

1.3.4 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก ระหว่างตัวคูดซับที่เตรียมขึ้นจากเส้นใยนุ่นและของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน กับแผ่นกรองคาร์บอนที่นิยมใช้เป็นตัวคูดซับทางการค้า

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้ทราบอัตราส่วนของเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอน อัตราส่วนของวิสโคสต่อน้ำ และปริมาณโซเดียมซัลเฟตที่เหมาะสมในการขึ้นรูปวัสดุคูดซับที่เตรียมจากเส้นใยนุ่นผสมกับของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน

1.4.2 เป็นทางเลือกในการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งของโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน ซึ่งได้แก่ เส้นใยเรยอน น้ำยาวิสโคสและสารโซเดียมซัลเฟต

1.4.3 เป็นแนวทางในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก โดยใช้วัสดุคูดซับที่เตรียมขึ้นจากเส้นใยนุ่นและของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สารอินทรีย์ระเหย หรือ สารอินทรีย์ระเหยง่าย

สารอินทรีย์ระเหย หรือ สารอินทรีย์ระเหยง่าย คือ กลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ (Organic Compounds) ที่สามารถระเหยเป็นไอกระจายตัวไปในอากาศได้ง่ายที่อุณหภูมิและความดันปกติ และมีความดันไอมากกว่า 1 มิลลิเมตรปรอท ไอเหล่านี้สามารถจะเปลี่ยนรูปกลับเป็นของเหลวหรือของแข็งตามสภาวะเดิมได้ โดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดัน โมเลกุลส่วนใหญ่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจน อาจมีออกซิเจนหรือฮาโลเจน เช่น คลอรีน โบรมีน รวมอยู่ด้วย (กรมควบคุมมลพิษ, 2554)

#### 2.2 แหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ

สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ ได้กล่าวถึงแหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศไว้ว่า “สารอินทรีย์ระเหยง่ายที่แพร่กระจายอยู่ในบรรยากาศมีที่มาจากหลายๆ แหล่ง โดยทั่วไปแล้วแหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่ายมี 2 แหล่งใหญ่ คือ สารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดจากการทำกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ โดยสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติอาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น เกิดจากไฟไหม้ป่า ภูเขาไฟระเบิด การผลิตสารอินทรีย์ระเหยง่ายสู่บรรยากาศของพืชบางชนิด การนำเสียของอินทรีย์วัตถุรวมทั้งจากการขับถ่ายและการหายใจของมนุษย์ เป็นต้น แต่สารอินทรีย์ระเหยที่เกิดจากการทำกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ เป็นแหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยที่สำคัญและเป็นต้นเหตุของปัญหาสิ่งแวดล้อมที่นับวันจะมีความรุนแรงมากขึ้น” ซึ่งกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ที่ก่อให้เกิดมลพิษประเภทนี้มีมากมาย ตั้งแต่กระบวนการผลิตใหญ่ๆ ที่ใช้เครื่องจักรกล เครื่องยนต์น้ำมันเชื้อเพลิงต่างๆ และอุตสาหกรรมที่ผลิตหรือใช้สารอินทรีย์ระเหย นอกจากนั้นกิจกรรมในชีวิตประจำวันก็ยังเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดมลพิษด้วยเช่นกัน ได้แก่การเดินทาง ไอระเหยจากการเติมน้ำมันเชื้อเพลิง การคมนาคมขนส่ง การใช้เชื้อเพลิง

หุงต้ม การเผาไหม้กองขยะ และการใช้สารเคมีในครัวเรือน เช่น น้ำยาซักแห้งหรือน้ำยาทำความสะอาดบางชนิด

### 2.3 ผลกระทบจากสารอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสุขภาพ

สารอินทรีย์ระเหยง่ายบางตัวเป็นสารก่อมะเร็งร้ายแรงชนิดหนึ่ง ตามนิยามและการวิจัยโดยหน่วยงานวิจัยด้านมะเร็งนานาชาติ (International Agency for Research on Cancer: IARC) และองค์การอนามัยโลก (World Health Organization: WHO) สารอินทรีย์ระเหยง่ายสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทางคือ การดื่มกินทางปาก การหายใจและการสัมผัสทางผิวหนัง หลังจากเข้าสู่ร่างกายแล้วจะไปถูกกำจัดโดยตับ ซึ่งจะมีเอนไซม์และระบบการเผาผลาญที่แตกต่างกัน ซึ่งความเป็นพิษของสารอินทรีย์ระเหยง่ายต่อร่างกายจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2554)

- 1.) ช่วงครึ่งชีวิต (Half life) ของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในร่างกาย
- 2.) สภาวะความสมบูรณ์และความแข็งแรงของร่างกาย
- 3.) การทำงานของระบบขับถ่ายของเสีย

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานค่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 1 ปี

มาตรฐานค่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 1 ปี	
สารมลพิษ	ค่ามาตรฐาน
1. เบนซีน (Benzene)	ไม่เกิน 1.7 มกค./ลบ.ม
2. ไวนิลคลอไรด์ (Vinyl Chloride)	ไม่เกิน 10 มกค./ลบ.ม
3. 1,2 - ไดคลอโรอีเทน (1,2 - Dichloroethane)	ไม่เกิน 0.4 มกค./ลบ.ม
4. ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)	ไม่เกิน 23 มกค./ลบ.ม
5. ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane)	ไม่เกิน 22 มกค./ลบ.ม
6. 1,2 - ไดคลอโรโพรเพน (1,2 - Dichloropropane)	ไม่เกิน 4 มกค./ลบ.ม
7. เตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene)	ไม่เกิน 200 มกค./ลบ.ม
8. คลอโรฟอร์ม (Chloroform)	ไม่เกิน 0.43 มกค./ลบ.ม
9. 1,3 - บิวทาไดอิน (1,3 - Butadiene)	ไม่เกิน 0.33 มกค./ลบ.ม

(ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ, 2554)

คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ออกประกาศกำหนดมาตรฐานค่าสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds) ในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 1 ปี มีจำนวนสารอินทรีย์ระเหยง่าย 9 ชนิด และอยู่ในระหว่างกำหนดร่างมาตรฐานการระบายสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากแหล่งกำเนิดอื่นๆ

## 2.4 สารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก

บีเท็กเป็นกลุ่มของสารระเหยอินทรีย์ที่สำคัญกลุ่มหนึ่ง ซึ่งถูกใช้ในอุตสาหกรรม อาทิ เป็นเชื้อเพลิง ตัวทำละลาย และใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเรซิน โพลีเมอร์ พลาสติก ระเบิด สารเคมีที่ใช้ในทางเกษตรหรือใช้ในทางเภสัชกรรมและไอเสียของยานยนต์ ปัจจุบันการลดปริมาณการปล่อยสารระเหยอินทรีย์สู่สิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาที่เร่งด่วนของประเทศต่างๆ เนื่องจากสารดังกล่าวสามารถกระจายสู่คน สัตว์และพืช และยังสามารถถ่ายทอดผ่านห่วงโซ่อาหาร (Food chain) อีกด้วย ซึ่ง United States Environmental Protection Agency (U.S.EPA) ได้จัดสารประกอบบีเท็กให้เป็นสารมลพิษที่ควรกำจัดอย่างเร่งด่วน (วรพจน์ สุนทรสุข, 2550)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณการผลิตสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็กในประเทศไทยปี 2552

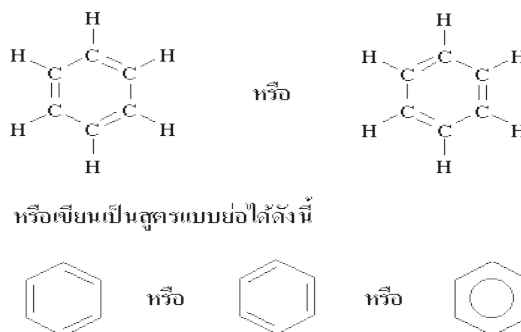
สารเคมี	ปริมาณการผลิต (ตันต่อปี)
เบนซีน	662,000
โทลูอิน	60,000
เอทิลเบนซีน	210,400 <sup>a</sup>
ไซลีน	76,000 (เมกซ์ไซลีน) 1,195,000 (พาราไซลีน) 66,000 (ออร์โธไซลีน)

(ที่มา: บริษัท ปตท. อะโรเมติกและการกลั่น จำกัด (มหาชน), 2552)

(<sup>a</sup>ที่มา: บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน), 2553)

### 2.4.1 เบนซีน (Benzene)

เบนซีน (Benzene,  $C_6H_6$ ) เป็นกลุ่มไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวง ประกอบด้วยคาร์บอน 6 อะตอม เรียกว่า อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนเป็นพันธะเดี่ยวสลับกับพันธะคู่ มีจุดหลอมเหลว 5.5 องศาเซลเซียส มีจุดเดือด 80.1 องศาเซลเซียส เป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นนำคม ระเหยได้เร็ว ไวไฟมาก ละลายน้ำได้เล็กน้อย สามารถละลายได้ด้วยอะซิโตน เอทานอลหรือไดเอทิลเอสเทอร์ เบนซีนเกิดได้ทั้งจากการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติและกระบวนการผลิต เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและการเผาถ่าน เบนซีนเป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเคมี สี ลีย้อม หนังกีเยม สารกำจัดแมลง สารทำความสะอาด สะอาด ผงซักฟอก หมึก เรซิน ใยสังเคราะห์ แล็กเกอร์ พลาสติก และเป็นตัวทำละลายในหมึกพิมพ์ ในอุตสาหกรรมการพิมพ์ เป็นต้น (Keith และ Walker, 1995; เกரியงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2546) ภูเขาไฟระเบิดและไฟไหม้ป่าทำให้เกิดเบนซีน ตามธรรมชาติได้ นอกจากนี้เบนซีนยังเป็นส่วนหนึ่งของน้ำมันดิบ (Crude oil) น้ำมันเบนซินที่เราใช้เติมในรถยนต์ (gasoline) และในควีนบูทรี (NPC Safety and Environmental Service Co., Ltd., 2554 : ออนไลน์)



ภาพที่ 2.1 สูตร โมเลกุลของเบนซีน

(NPC Safety and Environmental Service Co., Ltd., 2554: ออนไลน์)

ความเป็นพิษของเบนซีน ที่เกิดจากการหายใจเอาเบนซีนเข้าไปในระดับสูงมากๆ อาจทำให้เป็นอันตรายถึงชีวิตได้ ความเข้มข้นในระดับรองลงมาจะทำให้เกิดอาการเวียนปวดศีรษะ เชื่องซึม หัวใจเต้นเร็ว ใจสั่น สับสนและหมดสติ เนื่องจากเบนซีนที่เกิดขึ้นผ่านระบบทางเดินหายใจจะถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดได้ทันที เพราะสามารถละลายได้ดีในไขมัน และจะไปสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อไขมัน ในกรณีที่เบนซีนเข้าสู่ร่างกายทางปากจากการดื่มกิน จะส่งผลให้เกิดการระคายเคืองที่บริเวณ



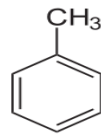
ผิวหนัง ถ้ามีการปนเปื้อนเบนซีนในระดับสูงจะทำให้มีอาการเวียนศีรษะ อาเจียน ภาวะถูกกดกร่อน ง่วงนอน ชัก หัวใจเต้นเร็วและเสียชีวิต การได้รับพิษของเบนซีนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานจะส่งผลต่อเม็ดเลือดแดง โดยเบนซีนจะไปทำลายไขกระดูก ทำให้จำนวนเม็ดเลือดแดงลดลงและนำไปสู่โรคโลหิตจาง ทำลายระบบภูมิคุ้มกันร่างกาย เพิ่มโอกาสการติดเชื้อ ทำให้เลือดหยุดไหลได้ยากกว่าปกติ และโรคมะเร็งโลหิต นอกจากนี้พบว่าสตรีที่สูดดมเบนซีนเป็นเวลาหลายเดือนจะมีระยะรอบเดือนผิดปกติ มีขนาดรังไข่เล็กลง และยังไม่ทราบว่าเบนซีนจะมีผลต่อทารกในครรภ์หรือไม่ ระดับความเข้มข้นของเบนซีนที่ไม่เป็นอันตราย ปริมาณสูงสุดในน้ำดื่มไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณสูงสุดในอากาศในที่ทำงานไม่เกิน 1 ส่วนในล้านส่วน (NPC Safety and Environmental Service Co., Ltd., 2554: ออนไลน์)

#### 2.4.2 โทลูอิน (Toluene)

โทลูอิน (Toluene,  $C_7H_8$ ) หรือ มีชื่อเรียกอื่นๆ ว่า เมทิลเบนซีน เมทิลเบนโซล หรือ ฟีนิลมีเทน โทลูอิน เป็นกลุ่มไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวง มีจุดหลอมเหลว  $-95$  องศาเซลเซียส มีจุดเดือด  $110.6$  องศาเซลเซียส เป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นเฉพาะตัว เป็นสารไวไฟสูง สามารถละลายได้ ด้วยคลอโรฟอร์ม เอทานอล อะซิโตน ไดเอทิลเอสเทอร์ คาร์บอนไดซัลไฟด์และกรดเกลือละลายได้ดี โทลูอินใช้เป็นตัวทำละลายเช่นเดียวกับเบนซีน หรือใช้เป็นสารเติมปนเบนซีนเป็นส่วนผสมในการผลิตกรดเบนโซอิกใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตยารักษาโรค ใช้ในอุตสาหกรรมการพิมพ์ภาพสี ส่วนผสมในวัตถุระเบิด ทำสีย้อม ทำน้ำหอม สีทาบ้าน กาว เรซิน ยาง แลคเกอร์ ทำหนังเทียม น้ำยาทำความสะอาด เช่นน้ำยาล้างจาน เป็นส่วนประกอบของยางมะตอย และผสมในน้ำมันเชื้อเพลิงรถยนต์และเครื่องบิน เป็นต้น ซึ่งสารตัวนี้สามารถถูกปลดปล่อยออกมาได้จากกระบวนการเผาไหม้ เช่น ในควันไอเสียรถยนต์และควันทูหรี่ (Keith และ Walker, 1995; เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2546 อ้างถึงใน กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2554: ออนไลน์)

โทลูอินมีคุณสมบัติหลายๆ อย่างคล้ายกับเบนซีน แต่มีความเป็นพิษอ่อนกว่า จึงมักถูกนำมาใช้แทนเบนซีน ซึ่งโทลูอินสามารถเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจเช่นเดียวกัน หากได้รับโทลูอินในระดับความเข้มข้น 600 ส่วนในล้านส่วน ในเวลา 8 ชั่วโมง จะก่อให้เกิดความเป็นพิษแบบเฉียบพลันมีอาการอ่อนเพลียเวียนศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน กล้ามเนื้อทำงานไม่ประสานกัน ม่านตาขยายเมื่อร่างกายได้รับโทลูอินที่มีความเข้มข้นในระดับ 200-300 ส่วนในล้านส่วน ในเวลา 8 ชั่วโมง จะเกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง ระคายเคืองตา ระคายเคืองทางเดินหายใจ อ่อนเพลีย ส่วนความเป็นพิษเรื้อรัง

เมื่อได้รับโทลูอินเป็นเวลานาน จะมีอาการอ่อนเพลีย ทำลายระบบประสาทส่วนกลาง ทำลายตับ ทำให้  
 อารมณ์แปรปรวนและอาจพบอาการโลหิตจาง (Keith และ Walker, 1995; มลิวรรณ บุญเสนอ, 2544  
 อ้างถึงใน กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2554: ออนไลน์)



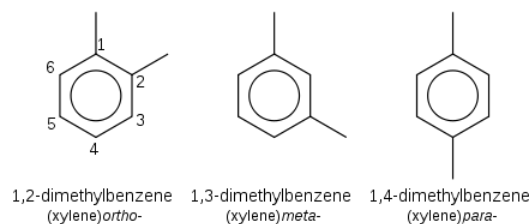
ภาพที่ 2.2 สูตรโมเลกุลของโทลูอิน

(กองควบคุมวัตถุเสพติด สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2554: ออนไลน์)

#### 2.4.3 ไซลีน (Xylenes)

ไซลีน (Xylenes,  $C_8H_{10}$ ) หรือ ไดเมทิลเบนซีน (Dimethylbenzene) มีจุดเดือด 137-144  
 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว -25 องศาเซลเซียส เป็นของเหลวใสไม่มีสี มีกลิ่นเฉพาะตัว เป็นสารไวไฟ  
 สามารถละลายได้ ด้วยอีเทอร์ เอทานอลและอะซิโตน ไซลีนใช้เป็นสารทำละลาย ผลิตภัณฑ์ สี ย้อม เรซิน  
 แลคเกอร์ น้ำยาเคลือบเงา ยางมะตอย ใช้ในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดต่างๆ สารกำจัดศัตรูพืชและน้ำมัน  
 เชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน

ความเป็นพิษที่เกิดจากไซลีน มีตั้งแต่ระดับการระคายเคืองตาและระบบทางเดินหายใจ  
 จนอาจเกิดอาการปวดบวม วิงเวียนศีรษะคลื่นไส้ อาเจียน ผื่นผิวหนังระคายเคืองจนอาจเกิดอาการผื่น  
 อักเสบ มีความผิดปกติของระบบประสาทส่วนกลาง ถ้ามีอาการรุนแรงอาจส่งผลทำให้ร่างกายเป็น  
 อัมพาตได้ (Keith และ Walker, 1995) จากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2536  
 กำหนดค่าปริมาณไซลีน ที่ระบายออกจากโรงงานหรือแหล่งผลิตทั่วไปไม่เกิน 200 ส่วนในล้านส่วน



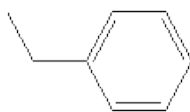
ภาพที่ 2.3 สูตรโมเลกุลของไซลีน

(วิกิพีเดีย, 2554: ออนไลน์)

#### 2.4.4 เอทิลเบนซีน (Ethylbenzene)

เอทิลเบนซีน (Ethylbenzene,  $C_8H_{10}$ ) หรือ มีชื่อเรียกอื่นๆคือ เอทิลเบนโซลและฟีนิลอีเทน มีจุดหลอมเหลวที่  $-94.4$  องศาเซลเซียส มีจุดเดือด ณ  $136.2$  องศาเซลเซียสเป็นของเหลวใส ไม่มีสี กลิ่นคล้ายอะโรมาติก ละลายน้ำได้น้อยมาก แต่สามารถละลายได้ด้วยเอทานอล เบนซีน และ ไดเอทิลเอสเทอร์เป็นส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตยาง ผลิตภัณฑ์ใช้ในกระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมและ ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เอทิลเบนซีนมีโอกาสที่จะถูกปลดปล่อยออกมาในกระบวนการเผาไหม้ เช่น จากควันท่อไอเสียรถยนต์และควันบุหรี่ (Keith และ Walker, 1995; เกரியงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2546)

พิษที่ได้รับจากเอทิลเบนซีน จะก่อให้เกิดอาการระคายเคืองตา น้ำตาไหล มีอาการง่วงเพลีย และมีอาการเสพติด และอาจก่อให้เกิดระคายเคืองผิวหนัง แดง อักเสบ ระคายเคืองจมูก คอ มีอาการบีบรัดตัวของปอด ส่งผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง ระบบหายใจ ตับ ไต และอาจจะเป็นอันตรายต่อทารกในครรภ์(Keith และ Walker, 1995)



ภาพที่ 2.4 สูตรโมเลกุลของเอทิลเบนซีน  
(ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์, 2554: ออนไลน์)

#### 2.4.5 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารบีเท็ก

สารบีเท็กเป็นกลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ประกอบด้วยสารเบนซีน ไชลีน โทลูอิน และเอทิลเบนซีน เป็นสารไฮโดรคาร์บอน ที่ไม่มีสีแต่มีกลิ่น สารแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.3

จากตารางที่ 2.3 พบว่า สารกลุ่มนี้มีความดันไอสูง โดยมีความดันไอประมาณ 6.6-95.6 มิลลิเมตรปรอท ในขณะที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่สูง สารทุกชนิดในกลุ่มนี้เป็นสารที่ไม่มีขั้ว

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก

สมบัติทางกายภาพและทางเคมี	เบนซีน	โทลูอิน	เอทิลเบนซีน	โอ-ไซลีน	เอ็ม-ไซลีน	พี-ไซลีน
สูตรทางเคมี	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>
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 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1,700	515	152	175	-	198
ความดันไอที่ 20 องศาเซลเซียส (มิลลิเมตรปรอท)	95.2	28.4	9.6	6.7	8.4	8.8
ความหนาแน่นจำเพาะที่ 20 องศาเซลเซียส (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.8787	0.8669	0.8670	0.8802	0.8642	0.8610
Log K <sub>ow</sub> ที่ 20 องศาเซลเซียส	2.13	2.69	3.15	2.77	3.18	3.15
ค่าคงที่เฮนรี ที่ 25 องศาเซลเซียส (กิโกลาสกาล. ลูกบาศก์เมตร/โมล)	0.55	0.67	0.80	0.50	0.70	0.71
ความเป็นขี้	ไม่มีขี้	ไม่มีขี้	ไม่มีขี้	ไม่มีขี้	ไม่มีขี้	ไม่มีขี้
ครึ่งชีวิต (โฟโตไลซิส)	13.4 วัน	3 ชั่วโมง	0.5 – 1 วัน	15 ชั่วโมง	10 ชั่วโมง	18 ชั่วโมง

(ที่มา: ปนัดดา ผู้มีจรรยา, 2551)

#### 2.4.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่กระจายของสารในสิ่งแวดล้อม

สารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็กเป็นสารที่สามารถระเหยกลายเป็นไอได้ดีที่อุณหภูมิและความดันปกติ เนื่องจากเป็นสารที่มีความดันไอสูง การที่สารบีเท็กจะแพร่กระจายเข้าสู่สิ่งแวดล้อมนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารดังนี้

##### 2.4.6.1 ค่าคงที่เฮนรี

ค่าคงที่เฮนรี (Henry's law constant) เป็นคุณสมบัติของสารเคมีที่แสดงถึงลักษณะการแบ่งส่วนระหว่างของเหลวกับแก๊สที่อุณหภูมิและความดันปกติ โดยค่าคงที่เฮนรีมันจะถูกนิยมนำไปใช้เพื่อแสดงถึงการเคลื่อนที่ของสารจากน้ำสู่อากาศ ซึ่งสารที่มีค่าคงที่เฮนรีสูงแสดงว่า สารจะสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ส่วนที่เป็นอากาศได้มาก ในสารกลุ่มนี้เอทิลเบนซีนเป็นสารที่มีค่าคงที่เฮนรีมากที่สุด รองลงมาคือ พี-ไซลีน เอ็ม-ไซลีน โทลูอิน เบนซีน และ โอไซลีน

##### 2.4.6.2 ค่าความดันไอของสาร

สารที่มีความดันไอสูง ซึ่งค่าความดันไอของสารจะแสดงถึงแนวโน้มในการระเหยของสารทั้งที่อยู่ในสถานะของแข็งและของเหลว ยิ่งสารที่มีความดันไอสูงแสดงว่าสารสามารถระเหยและอยู่ในสถานะแก๊สได้มาก โดยพบว่าเบนซีนมีค่าความดันไอมากที่สุด รองลงมาคือ โทลูอิน เอทิลเบนซีน และไซลีนตามลำดับ ซึ่งเบนซีนซึ่งระเหยมากที่สุดจะถูกดูดซับไว้ในดินน้อยที่สุด รองลงมาคือ โทลูอิน เอทิลเบนซีน และไซลีน ตามลำดับ

##### 2.4.6.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนระหว่างออกทานอลกับน้ำ

ใช้เป็นตัวแสดงถึงการดูดซับสารในดินและการสะสมของสารในสิ่งมีชีวิต ซึ่งค่านี้จะไม่มียุทธศาสตร์ โดยสามารถจะสะสมในเนื้อเยื่อไขมันของสิ่งมีชีวิตได้ เนื่องจากออกทานอลเป็นสารที่มีลักษณะใกล้เคียงกับชนิดของไขมันที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิต ซึ่งค่านี้จะแปรผกผันกับค่าการละลายน้ำ

##### 2.4.6.4 กระบวนการสลายตัว

กระบวนการสลายตัวเนื่องจากแสงแดด หรือ Photolysis คือการเปลี่ยนรูปของสารเคมี ทำให้ปริมาณของสารลดลงอย่างรวดเร็ว จากตารางที่ 2.3 จะพบว่า สารบีเท็กมีค่าครึ่งชีวิตไม่ถึง 30 วัน แสดงว่าสารกลุ่มนี้สามารถที่จะสลายตัวจากกระบวนการสลายตัวเนื่องจากแสงแดด (Photolysis) ได้อย่างรวดเร็ว แต่การสลายตัวของสารยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อีกหลายปัจจัย เช่น กระบวนการไฮโดรไลซิส และการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในธรรมชาติ เป็นต้น

## 2.5 เส้นใย (Fiber)

เส้นใยหมายถึง สิ่งที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวเรียวยาว องค์ประกอบของเซลล์ส่วนใหญ่เป็น เซลลูโลสที่เกิดจากการรวมตัวกันของพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ของกลูโคส (Glucose) ซึ่งโมเลกุลของเซลลูโลสที่เรียงตัวกันจะพบในผนังเซลล์ของพืชทุกชนิด จะเป็นหน่วยเส้นใยขนาดเล็กมาก เกิดการเกาะจับตัวกันเป็นเส้นใยขึ้น

### 2.5.1 ประเภทของเส้นใย

แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ เส้นใยธรรมชาติ เส้นใยสังเคราะห์และเส้นใยกึ่งสังเคราะห์

#### 2.5.1.1 เส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยที่มีอยู่ในธรรมชาติ แบ่งได้เป็น

1) เส้นใยจากพืช ได้แก่ เส้นใยจากเซลลูโลส เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วย เซลลูโลส ซึ่งได้จากส่วนต่างๆของพืช เช่น ป่าน ปอ ลินิน ฝ้าย นุ่น ใยสับปะรด ใยมะพร้าว เป็นต้น เซลลูโลสเป็นโฮโมพอลิเมอร์ ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสจำนวนมาก มีโครงสร้างเป็น กิ่งก้านสาขา

2) เส้นใยจากสัตว์ ได้แก่ เส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ ไหม ผม เล็บ เขา ใยไหม เป็นต้น ซึ่งถือได้ว่าเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากสัตว์ทุกชนิดจะเป็นเส้นใยโปรตีนทั้งหมด โดยองค์ประกอบหลักของโครงสร้างทางเคมีพื้นฐานในเนื้อเยื่อของสัตว์เกิดจากการต่อกันเป็นลูกโซ่ โมเลกุลยาวของกรดอะมิโนและแต่ละโมเลกุลจะถูกเชื่อมต่อกันด้วย Amide (peptide) links เส้นใยเหล่านี้ เมื่อเปียกน้ำ ความเหนียวและความแข็งแรงจะลดลงถ้าสัมผัสแสงแดดนานๆ จะสลายตัว

3) เส้นใยจากสินแร่ เช่น แร่ใยหิน มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ทนไฟ และไม่นำไฟฟ้า

2.5.1.2 เส้นใยสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นจากสารอนินทรีย์หรือ สารอินทรีย์ใช้ทดแทนเส้นใยจากธรรมชาติ แบ่งเป็น 4 ประเภท

1) เส้นใยพอลิเอสเตอร์ เช่น เทโตรอน ใช้บรรจุในหมอน เพราะมีความฟู ยืดหยุ่นไม่เป็นอันตรายต่อผิวหนัง

2) เส้นใยพอลิเอไมด์ เช่น ไนลอน เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีหลายประเภท เช่น ไนลอน 6,6 ไนลอน 6,10 ไนลอน 6 ซึ่งตัวเลขที่เขียนกำกับหลังชื่อจะแสดงจำนวนคาร์บอนอะตอม

ในมอนอเมอร์ของเอมีนและกรดคาร์บอกซิลิก ไนลอนจัดเป็นพอลิเมอร์พลาสติก มีความแข็งแรงมากกว่าพอลิเมอร์แบบเติมชนิดอื่น (เพราะมีแรงดึงดูดที่แข็งแรงของพันธะเพปไทด์) เป็นสารที่ติดไฟยาก (เพราะไนลอนมีพันธะ C-H ในโมเลกุลน้อยกว่าพอลิเมอร์แบบเติมชนิดอื่น)

3) เส้นใยอะคริลิก เช่น ออร์โซใช้ในการทำเสื้อผ้า ผ้านวม ผ้ายนแกะเทียม ร่มชายหาด หลังคากันแดด ผ้าม่าน พรหม เป็นต้น

4) เซลลูโลสแอซิเตด เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากการใช้เซลลูโลสทำปฏิกิริยากับกรดอะซิติกเข้มข้น โดยมีกรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้ประโยชน์จากเซลลูโลสแอซิเตด เช่น ผลิตเป็นแผ่นพลาสติกที่ใช้ทำแผงสวิตช์และหุ้มสายไฟ

2.5.1.3 เส้นใยกึ่งสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่ได้จากการนำสารจากธรรมชาติ มาปรับปรุงโครงสร้างให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น การนำเซลลูโลสจากพืชมาทำปฏิกิริยากับสารเคมีบางชนิด เช่น วิสโคสเรยอน แอมเบอร์เกรยอน เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จะใช้เส้นใย 2 ประเภทมาผสมกัน คือ เส้นใยนุ่นที่เป็นเส้นใยพืช จะมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ ผสมกับเส้นใยเรยอนที่เป็นเส้นใยกึ่งสังเคราะห์ เกิดจากการนำเซลลูโลสมาหมักในสารละลายต่างเพื่อปรับปรุงโครงสร้างแล้วขึ้นรูปกลายเป็นเส้นใยเรยอน

### 2.5.2 สมบัติของเส้นใย

โครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และการเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย เป็นสมบัติที่มีผลต่อเส้นใยนั้นๆ โดยตรง เช่น สมบัติการดูดซึมความชื้น จะขึ้นอยู่กับจำนวนของหมู่ไฮดรอกซิลเพราะหมู่ไฮดรอกซิลจะเป็นตัวดึงดูดน้ำทำให้มีความสามารถในการดูดซึมความชื้นได้ดี ซึ่งสมบัติที่สำคัญของเส้นใยได้แก่ สมบัติการนำไฟฟ้า การจุดติดไฟ การคืนตัวจากแรงอัด การย่อยสลายตัวและความแข็งแรงของเส้นใย เป็นต้น

## 2.6 นุ่น (Kapok)

นุ่นเป็นชื่อสามัญของพืชเส้นใยชนิดหนึ่ง มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn และอยู่ในตระกูล Bombacaceae นุ่นเป็นพืชเมืองร้อน สามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินเกือบทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นดินเหนียวหรือดินร่วนปนทราย เป็นพืชที่ไม่ต้องการน้ำฝนมากเป็นพืชที่ทนต่อความแห้งแล้งได้ดีแม้ในระยะที่นุ่นกำลังเจริญเติบโต



ภาพที่ 2.5 ผลนุ่น

(ศูนย์สารสนเทศชุมชน มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2554: ออนไลน์)

### 2.6.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของนุ่น

นุ่นเป็นไม้ยืนต้นที่มีการผลัดใบในฤดูแล้งประมาณเดือนกุมภาพันธ์ถึงเมษายน มีลำต้นสูงใหญ่ แผ่พุ่มกว้างบริเวณยอด บริเวณโคนต้นจะมีหนาม ลำต้นมีสีเขียว สูง 8-30 เมตร ใบจะเป็นใบประกอบแบบนิ้วมือ เรียงสลับ มีใบย่อย 5-9 ใบ รูปขอบขนานแกมใบหอก กว้าง 1.5-4.5 เซนติเมตร ยาว 5-16 เซนติเมตร ปลายใบเป็นรูปหอกเรียวแหลม ขอบใบเรียบ โคนใบเรียวแหลม ก้านใบและเส้นใบมีสีน้ำตาลแดง ก้านใบย่อยจะยาว 0.3-0.5 เซนติเมตร มีก้านใบรวมยาว 8-20 เซนติเมตร ดอกเป็นช่อกระจุก ออกที่ซอกใบ ขนาด 2-3.5 เซนติเมตร มีดอกย่อยเป็นจำนวนมาก ซึ่งดอกมีลักษณะเป็นรูปถ้วย ปลายแยกเป็น 5 กลีบ ยาว 1-1.5 นิ้ว กลีบดอกมีสีขาวแกมเหลือง กลีบดอกจะติดกันที่ตรงฐาน ส่วนกลีบด้านนอกมีสีขาวนวลและมีขน ด้านในเป็นสีเหลือง มีเกสรตัวผู้ 5-6 อัน ก้านเกสรตัวเมียไม่แยกผลเป็นฝักยาวรีแห้งแตก รูปขอบขนาน กว้าง 2 นิ้ว ยาว 4-5 นิ้ว ผลมีลักษณะเป็นเปลือกแข็งแหลมที่บริเวณปลายและโคน แตกเป็น 5 พู ภายในมีเมล็ดสีดำเป็นจำนวนมาก มีเส้นใยสีขาวคล้ายเส้นไหม ยาวหุ้มเมล็ด มีลักษณะเป็นปุยนุ่น (ฐานข้อมูลสมุนไพร คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2554 : ออนไลน์)





(ก) ลำต้น

(ข) ใบนุ่น

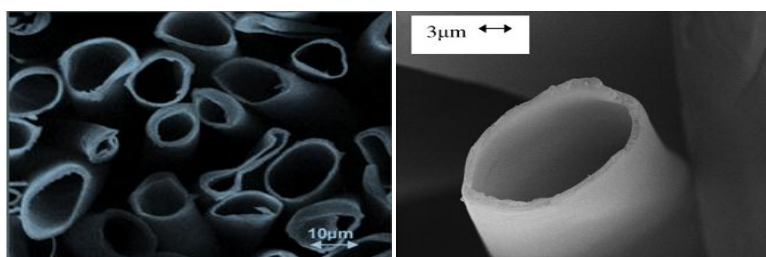
(ค) โคนต้นมีหนามแหลม

### ภาพที่ 2.6 ลักษณะส่วนต่างๆ ของนุ่น

(ฐานข้อมูลสมุนไพร คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2554: ออนไลน์)

#### 2.6.2 ลักษณะคุณสมบัติพิเศษของนุ่น

นุ่นเป็นพืชเส้นใยที่ได้จากผลหรือฝักมีน้ำหนักรเบา อ่อนนุ่ม เส้นใยนุ่นมีจี๊ฟี่งเคลือบ ทำให้กลายเป็นลักษณะเฉพาะชอบน้ำมันแต่ไม่ชอบน้ำ โครงสร้างภายในเป็นท่อกลวง (Lumen) ร้อยละ 77 เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก  $16.5 \pm 2.4$  ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน  $14.5 \pm 2.4$  ไมโครเมตร และมีความหนาแน่น 1.31 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.7 (Lim และ Huang, 2007)



### ภาพที่ 2.7 โครงสร้างภายในเส้นใยนุ่น

(ที่มา: Lim และ Huang, 2007)

## 2.7 เรยอน (Rayon)

นิยามคำว่าเรยอนจาก Federal Trade Commission ของสหรัฐอเมริกา กล่าวไว้ว่า “เรยอน คือ เส้นใยประดิษฐ์ที่ประกอบด้วยเซลลูโลสที่นำกลับมาใช้ใหม่ หรือเป็นเส้นใยประดิษฐ์ที่ประกอบด้วยเซลลูโลสที่นำกลับมาใช้ใหม่ซึ่งถูกแทนที่ด้วยสารอื่นไม่มากกว่าร้อยละ 15 ของไฮโดรเจนที่อยู่ในหมู่ไฮดรอกซิล” ดังนั้นเรยอนจึงจัดอยู่ในประเภทเส้นใยกึ่งสังเคราะห์



ภาพที่ 2.8 เส้นใยเรยอน

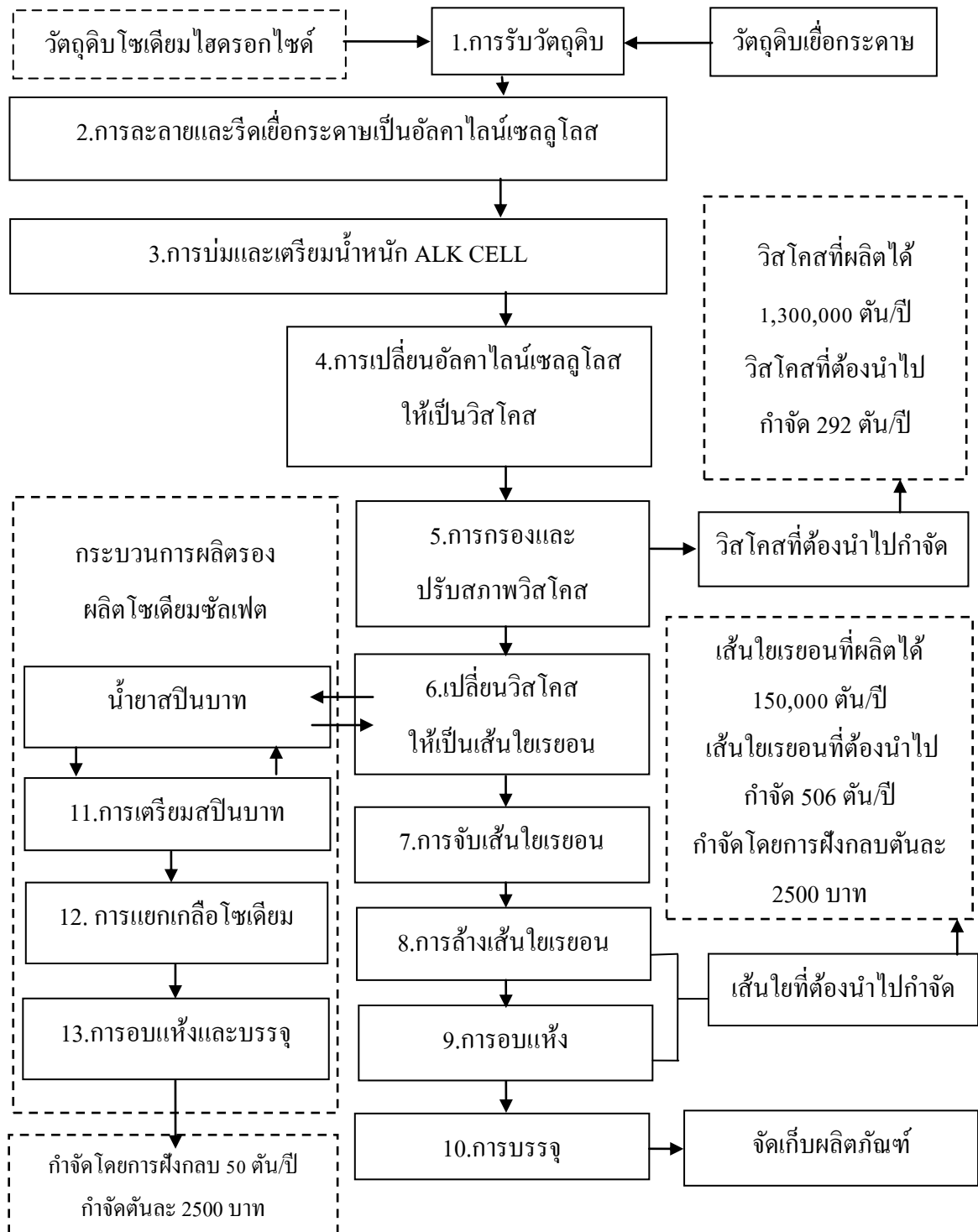
(ที่มา: บริษัทไทยเรยอน จำกัด (มหาชน), 2554)

### 2.7.1 กระบวนการผลิตเรยอน

ในกระบวนการผลิตเรยอนมีหลักการอยู่ 2 แบบหลัก แบบแรกคือ การผลิตเรยอนที่เรียกว่าวิสโคสเรยอน ซึ่งใช้วัตถุดิบที่เป็นเยื่อไม้ละลายในสารละลายที่เป็นด่าง แล้วนำมาหมักและนำสารเคมีมาใส่เพื่อทำปฏิกิริยาทำให้เกิดเป็นเซลลูโลสขึ้นมาใหม่ จากนั้นทำการปั่นออกเป็นเส้นใย ส่วนแบบที่สองเป็นการผลิตเรยอนที่เรียกกันว่าคิวปรัมโมเนียม โดยใช้เศษเส้นใยสั้นของฝ้ายที่เรียกว่า Cotton linters มาละลายในสารละลายคิวปรัมโมเนียม ไฮดรอกไซด์ หมักแล้วทำการปั่นเป็นเส้นใย แต่ในปัจจุบันการผลิตเส้นใยส่วนใหญ่จะเป็นแบบแรกที่เรียกว่าวิสโคสเรยอน ซึ่งกระบวนการผลิตนี้ได้มีการพัฒนาการผลิตทำให้เกิดเป็นการผลิตชนิดใหม่ๆ ออกเป็น สองชนิดคือ ชนิดมาตรฐาน และชนิดความแข็งแรงสูงที่เรียกว่า High Wet Modulus Rayon หรือใช้ตัวย่อว่า HWM ซึ่งสองชนิดนี้ความแตกต่างอยู่ที่กระบวนการผลิตเรยอนชนิด HWM นั้นจะหลีกเลี่ยงขั้นตอนการหมัก ที่จะทำให้โครงสร้างภายในมีการรักษาความยาวของลูกโซ่โมเลกุลเอาไว้ ทำให้เส้นใยที่ได้มีความแข็งแรงมากขึ้น

### 2.7.1.1 กระบวนการผลิตวิสโคสเรยอนชนิดมาตรฐาน

วัตถุดิบเริ่มต้นคือเยื่อไม้ถูกนำมาทำให้เป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์ จากนั้นนำไปหมักด้วยระยะเวลาที่เหมาะสม โดยมีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น แล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ไปทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส เพื่อเปลี่ยนสภาพของเซลลูโลสให้อยู่ในรูปของเซลลูโลสแซนเทตที่มีสีส้มอ่อน จากนั้นนำไปละลายในสารละลายด่างโซดาไฟจะได้เป็นสารละลายหนืดที่เรียกกันว่าวิสโคส (Viscose) ที่มีสีและลักษณะคล้ายขี้ผึ้งแล้วนำไปหมักต่อไปและมีการกำจัดฟองอากาศด้วยระบบสุญญากาศเพื่อป้องกันไม่ให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลงได้วัตถุดิบที่พร้อมจะอัดผ่านหัวฉีดลงในอ่างน้ำยาที่เป็นกรดกำมะถัน ทำให้เกิดการตกตะกอนของเซลลูโลสจากเซลลูโลสแซนเทต เป็นเส้นใยเซลลูโลสที่ต้องการ (วิระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2542) ถึงแม้ว่าปัจจุบันจะมีกระบวนการผลิตเส้นใยเรยอนหลายวิธี แต่วิธีนี้ก็ยังเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งกระบวนการนี้ใช้สารเคมีทำการละลายเยื่อไม้ค้นพบเป็นครั้งแรกโดย F.G. Keller ชาวเยอรมันในปี 2383 และในปี 2435 C.F. Cross และ E.J. Bevan ชาวอังกฤษได้พัฒนากระบวนการนี้ให้สามารถออกสู่การผลิตได้



ภาพที่ 2.9 ฟังการผลิตรวมวิสโคสเรยอน  
(ที่มา: บริษัทไทยเรยอน จำกัด (มหาชน), 2554)

## 2.7.2 กระบวนการเตรียมสารละลายหนืดหรือวิสโคส

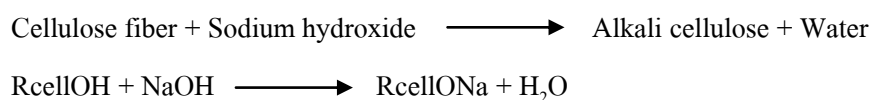


ภาพที่ 2.10 สารละลายหนืดหรือวิสโคส  
(ที่มา: บริษัทไทยเรยอน จำกัด (มหาชน), 2554)

สารละลายหนืดหรือวิสโคส เป็นของเหลวหนืด สีส้ม มีเซลลูโลสประกอบอยู่ 9 เปอร์เซ็นต์ มีความหนืดประมาณ 11,142 เซนติพอยส์ ซึ่งกระบวนการเตรียมสารละลายหนืดหรือวิสโคส สามารถแบ่งได้ 5 ขั้นตอนดังนี้ (บริษัทไทยเรยอน จำกัด (มหาชน), 2554)

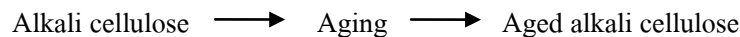
### ขั้นที่ 1

บดเซลลูโลสให้เป็นชิ้นเล็กๆ เพื่อให้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถซึมผ่านได้ จากนั้นโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไปแทนที่ตำแหน่งไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิล ทำให้โครงสร้างของผลึกเกิดการบวมตัว



### ขั้นที่ 2

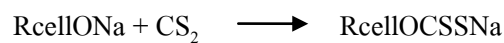
นำเซลลูโลสที่เกิดการบวมตัวจากขั้นตอนที่ 1 มาบ่มเพื่อทำลายพันธะของโพลิเมอร์ เนื่องจากมีโซเดียมไฮดรอกไซด์แทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลส ทำให้ออกซิเจนในอากาศสามารถผ่านเข้าไปได้ในตำแหน่ง Beta-1, 4-Glucosidic Oxygen Bonds นอกจากนี้ระยะเวลาในการบ่มมีผลต่อความหนืดของสารละลายหนืด ถ้าระยะเวลาในการบ่มนานจะยิ่งเป็นการลดพันธะลง (Depolymerize) ทำให้ได้สารละลายหนืดที่มีความหนืดต่ำ แต่ถ้าใช้ระยะเวลาในการบ่มน้อยเกินไปจะทำให้สารละลายหนืดมีความหนืดสูง



### ขั้นที่ 3

คาร์บอนไดซัลไฟด์จะเข้าไปแทนที่โซเดียมไอออนในขั้นที่ 1

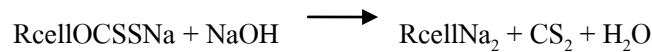
Aged alkali cellulose + Carbon disulfide  $\longrightarrow$  Cellulose xanthate



### ขั้นที่ 4

ใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 4 เข้าไปเจือจางเซลลูโลสแซนเทตแล้วจะได้สารละลายหนืดหรือวิสโคส ซึ่งเป็นของผสมระหว่างเซลลูโลสแซนเทต เซลลูโลสที่ไม่ทำปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำ

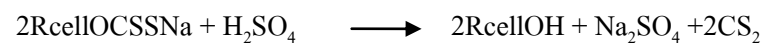
Cellulose xanthate + Dilute sodium hydroxide  $\longrightarrow$  Viscose mixture



### ขั้นที่ 5

การทำฟองน้ำเส้นใยธรรมชาติ สามารถทำได้โดยการใช้ผลึกเกลือโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ผสมกับสารละลายหนืดที่ได้ซึ่งมีเซลลูโลสแซนเทตเป็นองค์ประกอบหลัก จากนั้นนำมาขึ้นรูปเป็นฟองน้ำด้วยกรดซัลฟูริก และกรดซัลฟูริกจะทำให้ผลึกเกลือโซเดียมซัลเฟตละลายออกมา ซึ่งส่วนที่หายไปของผลึกเกลือเกิดเป็นรูพรุนบนฟองน้ำ

Viscose mixture + Sulfuric acid  $\longrightarrow$  Cellulose (Sponge) + Sodium sulfate + Carbon disulfide



#### 2.7.3 กระบวนการที่ทำให้เกิดเกลือโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )

เกลือโซเดียมซัลเฟตเกิดจากการระเหยของน้ำยาสป็นบาท ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  ร้อยละ 10) ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำยาวิสโคส โดยผ่านกระบวนการระเหยเอาน้ำออกด้วยเครื่องระเหย (Evaporator) และนำไปอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง (Dryer machine)



ภาพที่ 2.11 เกลือโซเดียมซัลเฟตที่ปนเปื้อนสิ่งสกปรก  
(ที่มา: บริษัทไทยเรยอน จำกัด (มหาชน), 2554)

#### 2.7.4 กระบวนการที่ทำให้เกิดเส้นใยเรยอนที่เหลือใช้

เส้นใยเรยอนที่เหลือใช้เกิดจากกระบวนการอบแห้ง แล้วหลุดออกมาจากระบบทำให้เกิดการปนเปื้อนฝุ่นซึ่งเส้นใยในชั้นตอนนี้จะนำไปขายต่ออีกตลาดหนึ่ง ส่วนเส้นใยที่เปียกน้ำก็จะนำไปกำจัด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำเส้นใยแห้งที่ปนเปื้อนฝุ่นมาเป็นวัสดุหนึ่งที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 2.12 ภาพเส้นใยเรยอนที่หลุดออกมาจากระบบการผลิตและรวบรวมไปขายต่ออีกตลาดหนึ่ง  
(ที่มา: บริษัทไทยเรยอน จำกัด (มหาชน), 2554)

#### 2.8 กากอุตสาหกรรมจากการผลิตเส้นใยเรยอน (เขาวลิต เสนานุรักษ์วรกุล, สัมภาษณ์, 19 ธันวาคม 2554)

ในกระบวนการผลิตเส้นใยเรยอนของบริษัทไทยเรยอนจะมีของเสียที่เป็นกากอุตสาหกรรมเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตหรือจากกระบวนการบำบัดมลพิษเป็นจำนวนมาก เช่น ตะกอนวิสโคส เส้นใยเรยอนที่ปนเปื้อน ตะกอนชีวภาพ ตะกอนสังกะสี เกลือโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) และขี้เถ้า

เป็นต้น ซึ่งของเสียอุตสาหกรรมทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะต้องนำไปกำจัดให้ถูกต้องตามกฎหมายด้วยวิธีการฝังกลบหรือเผาในเตาเผาซีเมนต์ ทำให้ในแต่ละปีบริษัทมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากของเสียอุตสาหกรรมเป็นจำนวนเงินถึง 40 ล้านบาท ซึ่งในส่วนของเสียที่เป็นตะกอนวิสโคสและเส้นใยเรยอนที่ปนเปื้อน บริษัทจะต้องเสียเงินเพื่อกำจัดให้ถูกต้องตามกฎหมายเป็นจำนวนเงินถึง 1 ล้านบาท ดังนั้นทางบริษัทไทยเรยอนจึงได้มีแนวทางการศึกษาเพื่อนำกากของเสียที่เกิดขึ้นมาทำให้เกิดประโยชน์ในรูปแบบของผลิตภัณฑ์ใหม่เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากของเสียอุตสาหกรรม เช่น การนำเอาตะกอนสังกะสี มาศึกษาทำอิฐมวลเบา และนำตะกอนชีวภาพมาศึกษาเป็นส่วนผสมของปุ๋ย เป็นต้น

ส่วนของเสียตะกอนวิสโคสและเส้นใยเรยอนที่ปนเปื้อน สามารถนำไปพัฒนาผสมกับเส้นใยธรรมชาติทำให้เกิดเป็นฟองน้ำเส้นใยธรรมชาติ (Cellulose sponge) ที่มีคุณสมบัติสามารถดูดซับน้ำมันได้ ซึ่งของเสีย ตะกอนวิสโคสเป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต ที่มีการปล่อยออกมาในรูปแบบของเหลว ในกิจกรรมต่างๆ เช่น การเก็บตัวอย่าง การล้างตัวกรอง โดยจะมีของเสียที่เป็นตะกอนวิสโคสเกิดขึ้นประมาณ 300 ตันต่อปี ส่วนของเสียที่เป็นเส้นใยเรยอนเป็นของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการล้างและอบเส้นใย ซึ่งเกิดการปนเปื้อนสิ่งสกปรกทำให้กลายเป็นของเสียที่ต้องนำไปกำจัดประมาณ 500 ตันต่อปี โดยของเสียทั้ง 2 ชนิดที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปกำจัดด้วยวิธีฝังกลบ ต้นละประมาณ 2,500 บาท

เกลือโซเดียมซัลเฟตเป็นผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการผลิตเส้นใยวิสโคส ซึ่งสามารถนำไปใช้ต่อได้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น ทำผงซักฟอก ยาสีฟัน ในแต่ละวันโรงงานสามารถผลิตเกลือนี้ได้มากถึง 360 ตัน เกลือโซเดียมซัลเฟตเกิดจากการระเหยของน้ำยาสปินบาท ( $H_2SO_4$  10%) ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำยาวิสโคส โดยผ่านกระบวนการระเหยเอาน้ำออกด้วยเครื่องระเหย (Evaporator) และนำไปอบแห้งด้วยเครื่องอบ (Dryer machine) นำเกลือโซเดียมซัลเฟตที่ได้บรรจุใส่ถุง 50 กิโลกรัมและถุงขนาด 1 ตัน จากนั้นขนย้ายไปเก็บในโกดังด้วยรถโฟคลิฟ

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้นำของเสียเกลือโซเดียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นระหว่างการขนส่งจากรถโฟคลิฟไปโกดังและจากโกดังไปยังรถบรรทุก ซึ่งระหว่างทางอาจเกิดการตกหล่นทำให้มีการแตกหักของถุง ทำให้เกลือโซเดียมซัลเฟตเกิดการปนเปื้อนสิ่งสกปรกไม่สามารถส่งไปขายต่อยังโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆได้ ซึ่งของเสียที่ปนเปื้อนและต้องนำไปกำจัดนี้มีประมาณ 50 ตันต่อปี และบริษัทจะต้องเสียเงินเพื่อกำจัดให้ถูกต้องตามกฎหมายต้นละประมาณ 2,500 บาท ด้วยวิธีการฝังกลบ และได้้นำตะกอนวิสโคสจากกระบวนการล้างตัวกรองและเส้นใยเรยอนจากกระบวนการอบแห้งที่หลุดออกมาทำให้เกิดการปนเปื้อนฝุ่นแล้วต้องนำไปกำจัดด้วยวิธีฝังกลบมาใช้ในงานวิจัยนี้เช่นกัน



## 2.9 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ทำขึ้นจากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสำคัญ เช่น ถ่านหิน ไม้ และผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ธาตุอื่นๆ ที่ตรวจพบในถ่านกัมมันต์ได้แก่ ธาตุไฮโดรเจน ธาตุออกซิเจน ธาตุไนโตรเจน และธาตุกำมะถันซึ่งเป็นองค์ประกอบของวัสดุอินทรีย์ คำว่า Activated ใช้กับสารดูดซับที่ได้ทำการเพิ่มพื้นที่ผิวทั้งภายในและภายนอก โดยการกระตุ้นหรือการให้ความร้อนและอัดด้วยความดันสูงในที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ต้องสูงพอที่จะระเหยส่วนที่ระเหยได้ทั้งหมดออกจากผิวของวัตถุ ประสิทธิภาพการดูดซับจะขึ้นกับประเภทของวัตถุดิบและกระบวนการที่ใช้ เช่น อุณหภูมิและความดัน

### 2.9.1 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์มี 2 ชนิดได้แก่ ชนิดที่เป็นเม็ด (Granular activated carbon) และชนิดที่เป็นผง (Powder activated carbon) ซึ่งทั้ง 2 ชนิดก็มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า 1000 ตารางเมตรต่อกรัมของถ่านที่ใช้เป็นตัวดูดซับ ถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ในกระบวนการดูดซับแก๊สและไอของสารมลพิษส่วนใหญ่จะมีการผลิตเป็นรูปแบบเม็ด มีขนาดอยู่ระหว่าง 4x6 ถึง 4x10 เมช ความหนาแน่นรวมของเม็ดถ่านกัมมันต์ที่บรรจุ 5 ถึง 50 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต โดยขึ้นอยู่กับโพรงภายในของถ่านกัมมันต์ ซึ่งโพรงแต่ละโพรงของถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดก็มีขนาดแตกต่างกันตลอดความลึกของโพรง ทำให้สามารถแบ่งขนาดของโพรงได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ (1) โพรงเล็ก เป็นโพรงที่มีขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร ใช้สำหรับเป็นสารดูดซับในแก๊ส (2) โพรงกลาง เป็นโพรงที่มีขนาดใหญ่กว่า 2 นาโนเมตร แต่มีขนาดไม่เกิน 50 นาโนเมตร และ (3) โพรงใหญ่ เป็นโพรงที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร ใช้สำหรับเป็นสารดูดซับในของเหลว

### 2.9.2. ดัชนีที่ใช้วัดคุณภาพของถ่านกัมมันต์ ได้แก่

2.9.2.1 พื้นที่ผิวจำเพาะ มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อกรัมถ่านกัมมันต์ หาได้จากปริมาณของไนโตรเจนที่ถูกคาร์บอนดูดเก็บไว้

2.9.2.2 ไอโอดีนนัมเบอร์ แสดงถึงปริมาณรูที่มีขนาด 10 ถึง 28 อังสตรอม ( $10^{-10}$  เมตร) ซึ่งถ่านกัมมันต์มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์มากแสดงว่าสามารถดูดซับโมเลกุลขนาดเล็กได้ดี

2.9.2.3 โมลาสนัมเบอร์ แสดงถึงปริมาณรูที่มีขนาดมากกว่า 28 อังสตรอม ( $10^{-10}$  เมตร) ถ่านกัมมันต์มีค่าโมลาส นัมเบอร์มากแสดงว่าดูดซับโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ดี

### 2.9.2.4 ชีตความสามารถในการดูดติด ความสามารถในการดูดมลสารของถ่านกัมมันต์ 1 กรัม

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบชนิดของถ่านกัมมันต์

คุณสมบัติ \ ชนิดของถ่านกัมมันต์	ชนิดเม็ด	ชนิดผง
ขนาด (ตามนิยาม ASTM D5158)	0.5-4 มม.	1-150 ไมครอน
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ม <sup>2</sup> /ก.)	900-1100	มากกว่า 850
ไอโอดีนนัมเบอร์	800-1000	700-800
ราคา	แพง	ถูก
อายุการใช้งาน	6 เดือน – 2 ปี	สั้น ตามกรณี

(ที่มา: พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, 2553)

### 2.9.3 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ไม่สามารถดูดจับสารโมเลกุลขนาดเล็กและโมเลกุลแบบมีขั้วได้ เช่น แอลกอฮอล์ธรรมชาติ น้ำตาลเป็นต้น ซึ่งโมเลกุลที่ถ่านกัมมันต์จับไม่ได้มักจะเป็นโมเลกุลที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย แต่ถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดพวกสี กลิ่น รส คลอรีนในน้ำ โลหะหนักต่างๆ กำจัดสารไฮโดรคาร์บอน กำจัดฟีนอลและสารประกอบได้ ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่ไม่มีประจุ จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานควบคุมมลพิษอากาศ เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญในการดูดซับคือ ประจุไฟฟ้าที่ผิวสัมผัส ถ้าสารดูดซับมีประจุไฟฟ้าจะทำให้ไอน้ำชอบเข้ามาเกาะและรบกวนกระบวนการดูดซับ เพราะอากาศเสียที่ปล่อยออกมามีความชื้น ดังนั้นถ้าใช้สารดูดซับที่มีประจุกับงานด้านการควบคุมมลพิษอากาศจะทำให้ใช้ไม่ได้ผลมากนัก

### 2.9.4 การประยุกต์ใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายรูปแบบ มีทั้งงานด้านอากาศและงานทางด้านน้ำ อาทิ ใช้ทำเป็นแผ่นกรองในเครื่องปรับอากาศ ระบบฟอกอากาศ หน้ากากกันแก๊ส เครื่องกรองน้ำ เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แผ่นกรองคาร์บอน ซึ่งมีองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 2.5 (หน้ากากคาร์บอนที่มีขายตามท้องตลาด) มาใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับกับสารดูดซับที่ได้เตรียมขึ้นเองจากเส้นใยุ่นที่ผสมกับของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (เส้นใยเรยอน วิสโคสและเกลือโซเดียมซัลเฟต) เนื่องจากแผ่นกรองคาร์บอนมีพื้นที่ผิวใกล้เคียงกับวัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้น และมีลักษณะความเป็นไฮโดรโฟบิกสามารถดูดซับโมเลกุลที่ไม่มีขั้วเหมือนกันได้

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของแผ่นกรองคาร์บอน

แผ่นกรองชั้นที่	ชนิดของแผ่นกรอง	ความหนาของแผ่นกรอง (gsm)
1	แผ่นโพลีโพรพีลีน	23
2	แผ่นคาร์บอน	40
3	แผ่นกระดาษกรอง	20
4	แผ่นโพลีโพรพีลีน	25

## 2.10 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

### 2.10.1 ความหมายของการดูดซับ

ในงานทางด้านอากาศ การดูดซับ (Adsorption) คือกระบวนการที่โมเลกุลของแก๊สมลพิษถูกดูดออกจากกระแसाากาศเสีย แล้วไปจับติดกับผิวด้านในของวัสดุที่ใช้เป็นตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง โมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับแก๊ส เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งสารดูดซับจะเป็นก้อนของแข็งที่มีลักษณะเป็นรูพรุน (จักรกฤษณ์ ศิวะเดชาเทพ, 2552)

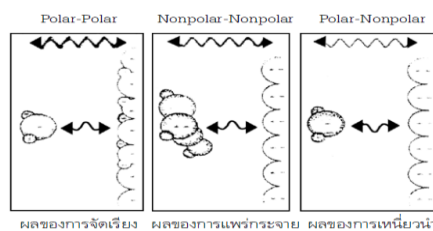
### 2.10.2 แรงในการดูดซับ

แรงที่ใช้ในกระบวนการดูดซับมี 2 ชนิด ได้แก่ แรงทางกายภาพและแรงทางเคมี ถ้าแรงที่ใช้ดูดโมเลกุลของแก๊สมลพิษให้ติดกับผิวของสารดูดซับเป็นแรงทางกายภาพ จะเป็นแรงที่มีการดึงดูดค่อนข้างอ่อน เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ และแก๊สที่ถูกดูดซับไว้ได้นั้นจะไม่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เมื่อต้องการนำเอาสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่อีกครั้งก็สามารถกำจัดแก๊สมลพิษออกได้ง่าย แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวนั้นเกิดจากพันธะทางเคมีหรือเป็นแรงทางเคมี จะไล่แก๊สออกจากสารดูดซับได้ยาก

เนื่องจากเป็นแรงที่มีการยึดติดกันแน่นมากซึ่งสารดูดซับทางเคมีอาจเป็นสารบริสุทธิ์หรือเป็นสารเคมีที่เกาะอยู่บนสารเคมีเฉื่อย เช่น การใช้เหล็กออกไซด์บริสุทธิ์ชั้นเล็กๆ ดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ หรือการใช้ถ่านกัมมันต์ซึ่งดูดซับกัมมันต์ไว้เพื่อดูดซับไอของปรอท

แรงทางเคมี เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนออกมาเหมือนกับแรงทางกายภาพ แต่แรงทางเคมีจะให้ความร้อนสูงกว่าแรงทางกายภาพมาก โดยปกติจะให้ความร้อนมากกว่า 10 กิโลแคลอรีต่อโมล สำหรับแรงทางกายภาพจะให้ความร้อนประมาณ 100 แคลอรีต่อโมล การใช้แรงทางเคมีปฏิกิริยาเคมีจะหยุดลงเมื่อผิวของสารดูดซับถูกทำปฏิกิริยาโดยทั่วถึงแล้ว ทำให้โมเลกุลของแก๊สมลพิษเรียงตัวบนสารดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้นและเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีสูงขึ้นส่งผลให้การดูดซับดีขึ้น ในขณะที่แรงทางกายภาพโมเลกุลของแก๊สมลพิษสามารถเรียงตัวกันได้หลายชั้น (Multilayer) และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง

การดูดซับทางกายภาพเกิดจากเหตุผล 3 ประการ ได้แก่ ผลของการจัดเรียงตัว ผลของการแพร่กระจายและผลของการเหนี่ยวนำ จากภาพที่ 2.13 (ก) โมเลกุลที่มีขั้ว การดึงดูดกันระหว่างโมเลกุลเกิดจากผลของการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่มีขั้ว 2 โมเลกุล โดยประจุที่เป็นลบของโมเลกุลหนึ่งจะวิ่งเข้าไปหาบริเวณที่มีประจุเป็นบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง เช่น การกำจัดไอน้ำซึ่งเป็นโมเลกุลมีขั้วออกจากกระแสะอากาศโดยใช้ซิลิกาเจล (ข) ส่วนการดูดซับโมเลกุลของแก๊สที่ไม่มีขั้วจะเกิดจากผลของการแพร่กระจาย เนื่องจากเมื่อโมเลกุลของสารที่ไม่มีขั้วทั้ง 2 ชนิดเข้าใกล้กัน พลังงานที่มีอยู่ในโมเลกุลนั้นจะลดลงและยึดติดกัน เช่น การดูดซับไอของสารอินทรีย์บนถ่านกัมมันต์ (ค) การดูดซับของโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากผลของการเหนี่ยวนำเนื่องจากโมเลกุลมีขั้วอาจจะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วเกิดเป็นโมเลกุลที่มีขั้วขึ้นได้เมื่ออยู่ใกล้กัน แต่ผลของการเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นได้น้อยมากเมื่อเทียบกับผลของการจัดเรียงและผลของการแพร่กระจาย (จักรกฤษณ์ ศิวะเดชาเทพ, 2552)



(ก)

(ข)

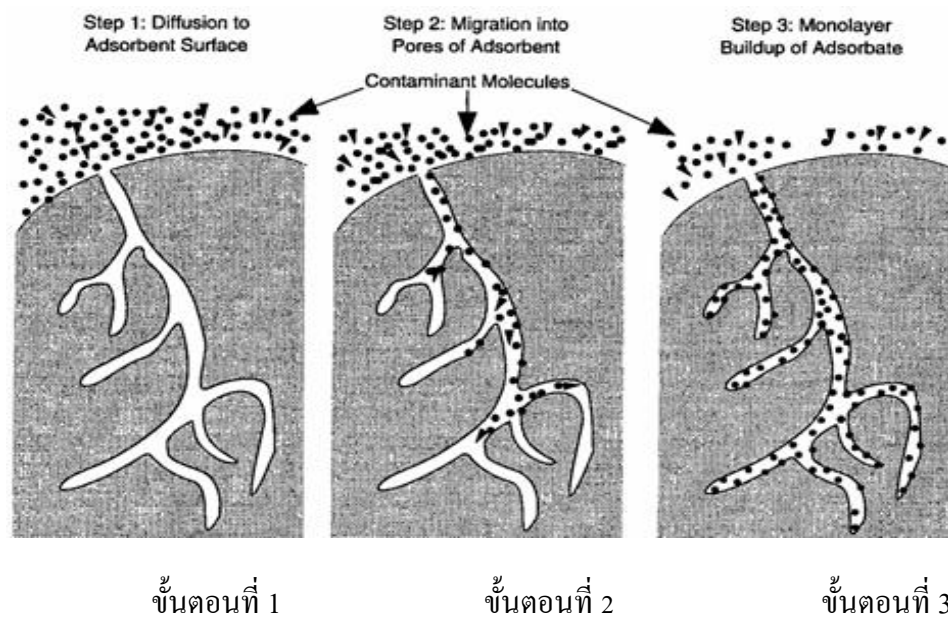
(ค)

ภาพที่ 2.13 การดูดซับทางกายภาพที่เกิดจากการมีขั้วหรือไม่มีขั้ว

(กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2554: ออนไลน์)

### 2.10.3 กลไกการดูดซับ

จากภาพที่ 2.14 กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นจาก 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 เป็นการแพร่ของโมเลกุลของแก๊สที่ดื้อ การบำบัดไปยังผิวภายนอกของสารดูดซับ ซึ่งการแพร่นี้เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของแก๊สมลพิษในกระแสนอกาศกับความเข้มข้นบริเวณผิวของสารมลพิษทำให้โมเลกุลของแก๊สมลพิษไหลจากกระแสนอกาศที่มีความเข้มข้นมากไปยังบริเวณพื้นผิวของสารดูดซับที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า ขั้นตอนที่ 2 เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของแก๊สมลพิษเข้าสู่รูพรุนของสารดูดซับ ซึ่งการเคลื่อนที่จะขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุน ในช่วงแรกที่รูพรุนมีขนาดใหญ่จะมีการเคลื่อนที่ที่เป็นการแพร่แบบกลุ่มก้อน การชนที่เกิดขึ้นจะเป็นการชนกันระหว่างโมเลกุลของแก๊สและการแพร่จะเปลี่ยนเป็นการเคลื่อนที่แบบผิวเมื่อรูพรุนมีขนาดเล็กลง การชนที่เกิดขึ้นเป็นการชนระหว่างโมเลกุลของแก๊สกับผิวในรูพรุนของสารดูดซับ ซึ่งการดูดซับส่วนใหญ่เกิดขึ้นในรูพรุนส่วนนี้ ขั้นตอนที่ 3 โมเลกุลของแก๊สมลพิษจะติดที่ผิวภายในรูพรุนของสารดูดซับ โดยเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ (จักรกฤษณ์ ศิวะเดชาเทพ, 2552)



ภาพที่ 2.14 กลไกการดูดซับ  
(กรมควบคุมมลพิษ, 2554: ออนไลน์)

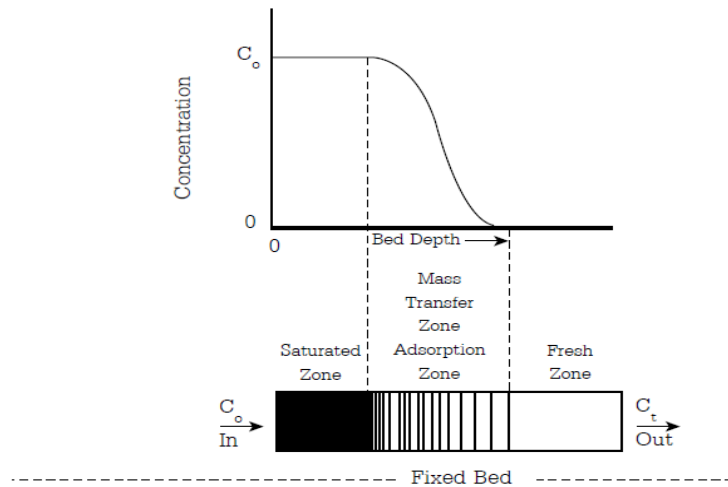
### 2.10.3.1 กลไกการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก

บีเท็กเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ไม่มีขั้ว และสารดูดซับที่ได้ทำขึ้นในงานวิจัยนี้ได้มีการนำเส้นใยุ่นมาใช้เป็นส่วนผสม ซึ่งเส้นใยุ่นมีลักษณะความเป็นไฮโดรโฟบิก ทำให้กลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นนี้เป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพที่เกิดจากการแพร่กระจาย เนื่องจากโมเลกุลของสารที่ไม่มีขั้วทั้ง 2 ชนิดเข้าใกล้กัน พลังงานที่มีอยู่ในโมเลกุลนั้นจะลดลงและยึดติดกัน เช่น การดูดซับไอของสารอินทรีย์บนถ่านกัมมันต์ กระบวนการดูดซับบีเท็กเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ ที่เกิดจากการดูดด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นแรงที่มีการดึงดูดค่อนข้างอ่อน โมเลกุลของแก๊สมลพิษสามารถเรียงตัวกันได้หลายชั้น (Multilayer) แก๊สที่ถูกดูดซับไว้ได้นั้นจะไม่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เมื่อต้องการนำเอาสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่อีกครั้งก็สามารถกำจัดแก๊สมลพิษออกได้ง่าย นอกจากนี้ยังพบว่ากระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เนื่องจากความเร็วจากการเคลื่อนตัวของโมเลกุลแก๊สจะถ่ายพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่ไปยังสารดูดซับกลายเป็นความร้อน โดยความร้อนของการดูดซับทางกายภาพเทียบได้กับความร้อนที่คายออกเนื่องจากการควบแน่นโดยมีค่าประมาณ 100 แคลอรีต่อโมล ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถของการดูดซับลดลง จากกฎทั่วไปอุณหภูมิของสารดูดซับจะถูกรักษาให้ต่ำกว่า 55 องศาเซลเซียส (ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ, 2550) อุณหภูมิที่กล่าวมานี้สามารถทำให้ลดลงได้โดยการหล่อเย็นแก๊สที่ปล่อยออกมา ที่ความเข้มข้นต่ำ (100 ส่วนในล้านส่วน) ความร้อนที่ปล่อยออกมาจะต่ำและถูกระบายออกจากสารดูดซับโดยการไหลของอากาศผ่านตัวกลาง

### 2.10.4 ความสามารถในการดูดซับ

จากภาพที่ 2.15 ความเข้มข้นของสารมลพิษจะเข้าสู่คอลัมน์ของสารดูดซับทางด้านซ้ายมือ และจะมีการดูดซับเมื่อผ่านคอลัมน์ทำให้กระแสอากาศที่สะอาดหลังการดูดซับแล้วผ่านออกมาทางด้านขวามือซึ่งความเข้มข้นของอากาศจะลดลงมาก นอกจากนี้เมื่อถึงจุดหนึ่งที่มีความเข้มข้นทางเข้าเท่ากับความเข้มข้นทางออกแสดงว่าสารดูดซับไม่สามารถดูดซับแก๊สมลพิษได้อีก ซึ่งการผ่านอากาศที่มีสารปนเปื้อนเข้าไปในตัวกลางที่เป็นสารดูดซับพบว่า ตัวกลางในส่วนแรกที่ได้สัมผัสกับสารปนเปื้อนในช่วงระยะเวลาหนึ่งก็จะดูดซับสารปนเปื้อนจนถึงจุดอิ่มตัว เรียกส่วนนี้ว่า Saturated zone ส่วนของตัวกลางในบริเวณถัดไปซึ่งเป็นบริเวณที่ตัวกลางยังมีความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อนอยู่เรียกว่า

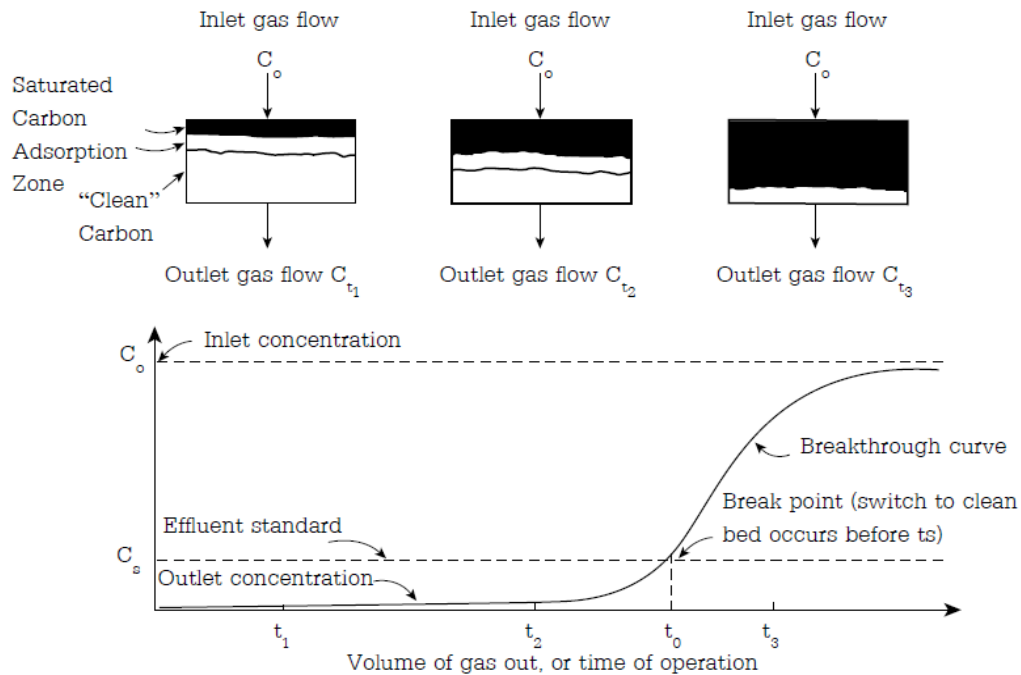
Mass Transfer Zone หรือ MTZ และส่วนของตัวกลางที่อยู่ถัดจากบริเวณ MTZ เป็นส่วนที่ยังไม่ได้มีการสัมผัสกับอากาศที่มีสารปนเปื้อนแต่อย่างใดซึ่งบริเวณนี้ยังสะอาดอยู่ จึงเรียกส่วนนี้ว่า Fresh zone



ภาพที่ 2.15 แสดงความเข้มข้นภายในคอลัมน์ของสารดูดซับ

(ที่มา: ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ, 2550)

เมื่อตัวกลางที่เป็นสารดูดซับเกิดการอิ่มตัวจะทำให้การดูดซับเริ่มน้อยลง บริเวณที่มีการถ่ายโอนของมวลสารจะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางการไหลของกระแสอากาศ และเมื่อผ่านสารดูดซับมาในที่สุดกระแสอากาศก็จะหลุดออกมาจากชั้นของสารดูดซับ ซึ่งจะเห็นได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ออกจากตัวกลางกับเวลา ซึ่งเรียกรูปนี้ว่า กราฟเบรคทูร์ (Breakthrough curve) ภาพที่ 2.16 ที่ช่วงเบรคทูร์ความเข้มข้นที่ทางออกจะเริ่มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเท่ากับความเข้มข้นทางเข้า ซึ่งการเบรคทูร์นี้อาจเรียกได้ว่าเป็นจุดที่ความสามารถของสารดูดซับในการดูดซับอากาศที่ปนเปื้อนเริ่มหมดไปและจุดอิ่มตัว คือจุดที่จะดูดซับปริมาณของสารมลพิษได้สูงสุดต่อน้ำหนักของสารดูดซับ



ภาพที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงของชั้นความเข้มข้นของสารดูดซับ  
(ที่มา: ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ, 2550)

#### 2.10.5 ความลึกของชั้นสารดูดซับต่ำสุด

ความลึกของชั้นดูดซับเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับในโลกการดูดซับจริง โมเลกุลของแก๊สหรือไอจะไม่ได้เรียงลำดับเข้าไปยึดเกาะกับผิวในชั้นของสารดูดซับอย่างสมบูรณ์ จะมีการ “random” ข้ามที่ว่างดังกล่าวบ้าง ดังนั้นในชั้นของสารดูดซับแทนที่จะมีเพียง 2 เขตคือ เขตที่สารดูดซับอิ่มตัวด้วยไอน้ำและเขตที่ยังไม่มีการดูดซับเลย ก็จะมีอาณาเขตส่วนหนึ่งที่อยู่ระหว่างอาณาเขตทั้งสอง ชั้นของสารตัวดูดซับมีการดูดซับบ้างแต่ยังไม่อิ่มตัวอาณาเขตนี้เรียกว่า Adsorption zone หรือ Mass transfer zone (MTZ) ดังนั้นในการออกแบบจะต้องเผื่อปริมาณสารดูดซับให้เพียงพอกับปรากฏการณ์นี้ด้วย ถ้าความลึกของสารดูดซับสั้นกว่า MTZ จะทำให้ระบบไม่ได้ผล โดยทั่วไปมักพบว่า MTZ มักจะสั้นกว่า 3 นิ้ว (ตำราบำบัดมลพิษอากาศ, 2550)

ในงานด้านมลพิษอากาศมีวิธีการทำนายส่วน MTZ ของความลึกทั้งหมด (NoII, 1992) การคำนวณความยาวของ MTZ มีความซับซ้อนเนื่องจากขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างเช่น ขนาดอนุภาคของสารดูดซับ ความเร็วแก๊ส ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ คุณสมบัติด้านการไหลของแก๊ส อุณหภูมิและ



ความดันของระบบ โดยสามารถประมาณค่า MTZ จากข้อมูลทดลองโดยใช้สมการด้านล่างนี้ (Joseph และ Bleacher, 1981)

$$MTZ = [1/(1-X_s)] \times D \times [1 - (C_B/C_S)]$$

เมื่อ  $D$  = ความลึกของชั้นสารตัวดูดซับ

$C_B$  = ความสามารถสูงสุดของตัวกลางที่ดูดซับ ไอสารปนเปื้อน, เปอร์เซ็นต์

$C_S$  = ปริมาณไอสารที่สามารถดูดซับไว้ได้มากที่สุดต่อหน่วยน้ำหนักสารดูดซับ, เปอร์เซ็นต์

$X_s$  = Degree of Saturation in the MTZ, เปอร์เซ็นต์ (ปกติจะใช้ 50 เปอร์เซ็นต์)

MTZ = ความยาวของ MTZ

ซึ่งสมการด้านบนนี้ใช้สำหรับตรวจสอบความลึกของชั้นสารดูดซับว่ายาวกว่า MTZ หรือไม่ ซึ่งในการใช้งานจริงจะพบว่าบางครั้งความลึกของชั้นสารดูดซับจะยาวกว่าความยาวของ MTZ หลายเท่า นอกจากนี้ความยาวของ MTZ จะมีความสัมพันธ์กับความเร็วของอากาศที่ผ่านชั้นสารดูดซับ ถ้าความเร็วสูงขึ้น MTZ จะยาวขึ้น

#### 2.10.6 เส้นแสดงการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (Adsorption isotherms)

จากกลไกการดูดซับสารมลพิษมีหลายขั้นตอน จึงเป็นเรื่องยากที่จะทำนายอัตราส่วนการถ่ายโอนมวลสารที่เกิดขึ้นภายในโพรงของรูพรุน ซึ่งในการทำนายจะต้องมีข้อมูลที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการดูดซับจึงจะสามารถหาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดกระบวนการดูดซับได้ ดังนั้นในการออกแบบจึงอาศัยข้อมูลสภาพการดูดซับที่สมดุลมาใช้ในการทำนายขนาดของระบบดูดซับและการประเมินประสิทธิภาพหรือความสามารถในการทำงานของระบบ

ข้อมูลที่ต้องคำนึงถึงของระบบการดูดซับคือ ข้อมูลที่ตรวจวัดที่สภาพสมดุล การดูดซับที่สมดุลคือ การที่อัตราการเคลื่อนที่ของไอสารมลพิษออกจากผิวของสารดูดซับเท่ากับอัตราการเคลื่อนที่ของไอสารมลพิษที่เข้าไปเกาะติดบนผิวของสารดูดซับ ข้อมูลการดูดซับที่ภาวะสมดุลเป็นข้อมูลที่แสดงให้เห็นถึงปริมาณไอสารที่สามารถดูดซับได้สูงสุดบนผิวของสารดูดซับที่สภาวะใดสภาวะหนึ่ง แม้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นในภาวะสมดุลจะขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง แต่ปัจจัยที่สำคัญที่สุดสำหรับกระบวนการควบคุมมลพิษอากาศคือ อุณหภูมิ

ข้อมูลการดูดซับที่ภาวะสมดุลที่เป็นประโยชน์มากที่สุด คือ Adsorption isotherm ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสามารถของสารดูดซับกับความเข้มข้นหรือความดันย่อยของไอสารมลพิษที่อุณหภูมิคงที่ ซึ่งค่าความสามารถของสารดูดซับมักแสดงเป็นตัวเลขในหน่วยร้อยละของน้ำหนักหรือเป็นกรัมของสารมลพิษต่อ 100 กรัมของสารดูดซับ

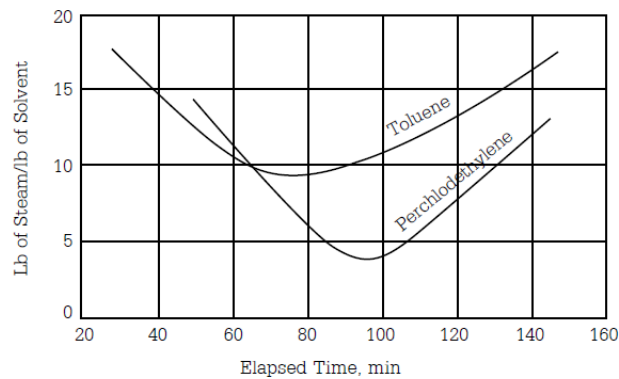
#### 2.10.7 สารดูดซับ

สารดูดซับมีหลายชนิดที่นิยมใช้กันทั่วไปได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ซิลิกาเจล แอคติเวทเต็ด อะลูมินาและซีโอไลต์ สารดูดซับแต่ละชนิดจะมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสารมลพิษ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญมีดังนี้

- 1) พื้นที่ผิว โดยทั่วไปสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าก็จะสามารถดูดซับได้สูงกว่าแต่ก็ขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุนนั้นๆ ด้วย
- 2) ความพรุนภายใน ถ้าพื้นที่ผิวของสารดูดซับส่วนใหญ่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่า 40 นาโนเมตรแล้ว โมเลกุลของสารมลพิษจะไม่สามารถเข้าไปถึงตำแหน่งที่สามารถดูดซับของสารดูดซับได้ เนื่องจากโมเลกุลของแก๊สมลพิษส่วนมากมีพิสัยของขนาดตั้งแต่ 40-90 นาโนเมตร
- 3) ปริมาตรรูพรุน มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม
- 4) ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพที่แห้ง มีหน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- 5) เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย มีหน่วยเป็น นาโนเมตร

#### 2.10.8 การฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ

การใช้ไอน้ำเป็นวิธีหนึ่งในการไล่สารมลพิษออกจากชั้นของสารดูดซับ ซึ่งอุณหภูมิของไอน้ำจะทำให้อุณหภูมิจนชั้นสารดูดซับสูงขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง แก๊สหรือไอสารมลพิษจะหลุดออกมาจากผิวของสารดูดซับ ในช่วงแรกของการให้ความร้อนจะไม่มีแก๊สหรือไอสารมลพิษหลุดออกมาจากชั้นดูดซับ เนื่องจากจะต้องเพิ่มอุณหภูมิให้สูงจนมีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้ไอสารมลพิษหลุดออกมาจากผิวชั้นดูดซับได้ (ตำราบำบัดมลพิษอากาศ, 2550) หรือทำการฟื้นฟูสภาพของสารดูดซับโดยการเพิ่มอุณหภูมิของสารดูดซับ ทำให้โมเลกุลของสารมลพิษที่ถูกดูดซับหลุดจากผิวของสารดูดซับ จากนั้นอาจจะมีการลดอุณหภูมิของสารมลพิษซึ่งอยู่ในสภาพแก๊สหรือไอลงจนกลั่นตัวกลายเป็นของเหลว สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้หรือนำไปกำจัดโดยวิธีที่เหมาะสม



ภาพที่ 2.17 อัตราความต้องการไอน้ำต่อปอนด์ของสารถูกดูดซับ  
(ที่มา: ตำราบำบัดมลพิษอากาศ, 2550)

จากภาพที่ 2.17 แสดงสัดส่วนของไอน้ำ (กิโลกรัม) ที่ใช้ต่อเปอร์คลอโรเอธิลีน (กิโลกรัม) ที่ไล่ออกมาได้ ในการฟื้นฟูสภาพคาร์บอนถ้าใช้เวลา 50 นาที จะต้องใช้ไอน้ำประมาณ 15 กิโลกรัมต่อเปอร์คลอโรเอธิลีน 1 กิโลกรัม จุดที่ใช้ไอน้ำต่ำสุด คือ 4.0 กิโลกรัมไอน้ำต่อกิโลกรัมของเปอร์คลอโรเอธิลีนเมื่อการฟื้นฟูสภาพใช้เวลา 90 นาที โดยมีปริมาณของตัวทำละลายที่นำกลับมาได้มากที่สุดและอัตราการไต่จะลดลงเมื่อเส้นกราฟเริ่มสูงขึ้น และการไต่โทลูอินก็จะเป็นรูปแบบเดียวกัน แต่จะใช้ไอน้ำปริมาณมากขึ้น เนื่องจากโทลูอินมีค่าความร้อนแฝงจำเพาะสูงกว่า สำหรับการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับควรใช้เวลาไม่เกิน 90 นาที

และจากงานวิจัยเรื่องการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากอากาศเสียโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง (จันทิมา ชั่งสิริพรและคณะ, 2550) จากการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับเบนซีนได้น้อยกว่าโทลูอิน และได้ทำการศึกษาการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่อิ่มตัวด้วยโทลูอินด้วยวิธีการใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส พบว่า การใช้ไอน้ำเป็นวิธีการที่เหมาะสมในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ

## 2.11 ความสามารถในการละลายและกฎของเฮนรี (Henry's Law)

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดูดกลืนสารมลพิษ คือความสามารถในการละลายของสารมลพิษ ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันของระบบ ความสามารถในการละลายนั้นใช้การวัดที่สภาวะสมดุล (Equilibrium Conditions) โดยวัดความเข้มข้นของแก๊สและสารละลายในภาชนะปิด และทิ้งไว้ระยะเวลาหนึ่งจนปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดกลืนเข้าไปในสารละลายเท่ากับปริมาณที่แก๊สเคลื่อนตัวออกหรือระเหยออกจากสารละลาย ณ จุดนี้ความเข้มข้นของแก๊สในส่วนที่อยู่ในอากาศและในของเหลวจะคงที่ คือ จะเกิดภาวะสมดุลของแก๊สในระบบอากาศกับของเหลว

กฎของเฮนรีช่วยทำให้สามารถคำนวณความสามารถในการละลายน้ำของแก๊สต่างๆ ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ กฎนี้เหมาะสำหรับแก๊สที่ละลายน้ำได้น้อยหรือปานกลาง ความสามารถในการละลายน้ำขึ้นอยู่กับปริมาณของแก๊ส (Partial Pressure) ในบรรยากาศเหนือผิวน้ำ หรือเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายหรือแก๊สบนเป็อนมีความเจือจางมาก ซึ่งเป็นกรณีทั่วไปในการบำบัดมลพิษทางอากาศ (ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ, 2550)

$$p^* = H x$$

เมื่อ  $p^*$  = ความดันย่อยของตัวถูกละลาย หรือแก๊สบนเป็อนในอากาศที่ภาวะสมดุล, Pa  
 $x$  = สัดส่วนโมลของตัวถูกละลายหรือแก๊สบนเป็อนในของเหลว  
 $H$  = ค่าคงที่ในกฎของเฮนรี, Pa/mole fraction

ตารางที่ 2.6 คำนวณค่าความสามารถในการละลายจากกฎของเฮนรี

	H@25 °C		X (mg/l)	p* (atm)	p* (Pa)	[C] <sub>g</sub> (mg/l)
	(kPa*m <sup>3</sup> /Mole) <sup>a</sup>	(atm.m <sup>3</sup> /mole) <sup>c</sup>				
เบนซีน	0.55	5.28x10 <sup>-3</sup>	1,000	0.0677	7,051	216.099
โทลูอิน	0.67	6.43x10 <sup>-3</sup>	1,000	0.0699	7,283	263.169
เอทิลเบนซีน	0.70	7.78x10 <sup>-3</sup>	1,000	0.0734	6,601	318.399
ไซลีน	0.80	7.29x10 <sup>-3</sup>	1,000	0.0687	7,544	298.011

(ที่มา: <sup>a</sup> Mitra และ Roy, 2011)

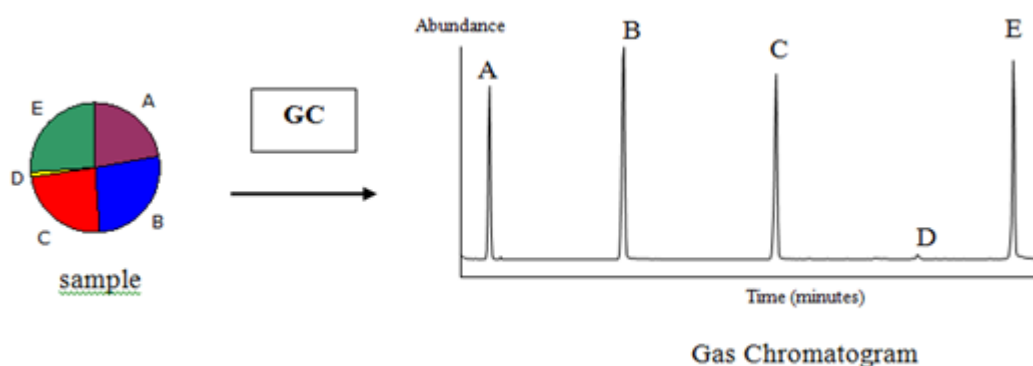
(ที่มา: <sup>c</sup> Robbins และคณะ, 1993)

## 2.12 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) เป็นขบวนการในการแยกสารออกจากสารผสมหรือแยกสารเนื้อเดียวออกจากกัน โดยอาศัยหลักการที่ว่าสารแต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายและถูกดูดซับต่างกัน จึงทำให้สารแต่ละชนิดแยกออกจากกันได้ (รุจิลักษณ์ รัตตะรมย์, 2554)

### 2.12.1 หลักการ

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) เป็นเทคนิคในการแยกสารเนื้อผสมออกจากกัน โดยอาศัยหลักการแยกระหว่างเฟส 2 เฟส คือ เฟสคงที่ (Stationary phase) และเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) โดยตัวอย่างที่จะนำมาใช้กับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจะต้องสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ และมีความเสถียรเมื่อถูกความร้อน ตัวอย่างที่กลายเป็นไอจะถูกก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียม เป็นตัวพาสารเคลื่อนที่ไปยังคอลัมน์ เพื่อทำการแยกสารออกจากกัน สารที่แยกได้จะถูกบันทึก เพื่อนำผลไปวิเคราะห์ต่อไป (เพริศพิชญ์ คณาธารณา, 2526)



ภาพที่ 2.18 หลักการทำงานและแปลผลของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

(ที่มา: รุจิลักษณ์ รัตตะรมย์, 2554)

### 2.12.2 ชนิดของแก๊สโครมาโทกราฟี (รุจิลักษณ์ รัตตะรมย์, 2554)

สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ตามชนิดของเฟสคงที่ (stationary phase) ดังนี้

- 1) แก๊ส-ของเหลวโครมาโทกราฟี เฟสคงที่จะเป็นของเหลวที่ถูกดูดซับอยู่บนของแข็ง
- 2) แก๊ส-ของแข็งโครมาโทกราฟี เฟสคงที่จะเป็นของแข็ง มักใช้วิเคราะห์แก๊สในอากาศ (แก๊สออกซิเจน แก๊สไนโตรเจน แก๊สอาร์กอน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์)

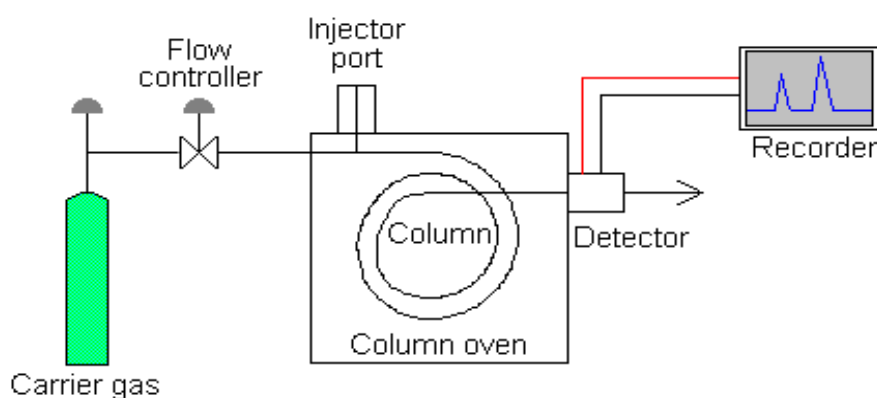
3) Gas-Bonded Phase เฟสคงที่จะเป็นสารอินทรีย์ที่สร้างพันธะกับพื้นผิวของแข็ง

### 2.12.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการแยกสาร

- 1) อัตราการไหลของแก๊สเฉื่อย หรือ Inert gas (เฟสเคลื่อนที่)
- 2) อุณหภูมิที่สารตัวอย่างจะระเหยกลายเป็นไอ
- 3) ขั้วของคอลัมน์
- 4) ชนิดของดีเทคเตอร์

### 2.12.4 เครื่องมือ

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี จะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้ แก๊สเฉื่อย (Inert gas) (เฟสเคลื่อนที่) วิธีการนำสารเข้าสู่ระบบ (Sample Injection System) คอลัมน์ของแก๊สโครมาโทกราฟี (Chromatographic Column) เตาอบ (Oven) และดีเทคเตอร์และบันทึกผล (Detector และ Recorder)



ภาพที่ 2.19 องค์ประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

(ที่มา: รุจิลักษณ์ รัตธรรมย์, 2554)

#### 2.12.4.1 แก๊สเฉื่อย

แก๊สเฉื่อยที่จะใช้เป็นเฟสเคลื่อนที่นั้นต้องเป็นแก๊สเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยา ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน แก๊สฮีเลียม แก๊สอาร์กอน และ คาร์บอนไดออกไซด์ การเลือกชนิดของแก๊สจะขึ้นอยู่กับชนิดของดีเทคเตอร์ ที่ใช้

#### 2.12.4.2 วิธีการนำสารเข้าสู่ระบบ

- 1) การนำสารเข้าสู่ระบบจะใช้การฉีด

- Effects band broadening อุณหภูมิของส่วนที่ฉีดสารจะสูงกว่าอุณหภูมิในเตาอบ ประมาณ 50 องศาเซลเซียส สารตัวอย่างจะถูกทำให้เป็นไอและส่งผ่านสู่แชมเบอร์

## 2) ปริมาณสารที่ฉีดเข้าสู่ระบบ

- Capillary columns จะฉีดสารเข้าสู่ระบบประมาณ 1 ไมโครลิตร

- Packed columns จะฉีดสารเข้าสู่ระบบประมาณ 1-20 ไมโครลิตร

### 2.12.4.3 คอลัมน์ของแก๊สโครมาโทกราฟี

แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

1) Packed column จะมีความยาวประมาณ 1.5-10 เมตร ประกอบไปด้วย Solid material ที่เหนียว ขนาดละเอียด (โดยปกติจะใช้ Diatomaceous earth) เคลือบด้วย Stationary phase

2) Capillary column เส้นผ่าศูนย์กลางภายในประมาณ 0.2 มิลลิเมตร ประกอบด้วย Wall coated open tubular จะเคลือบผนังภายในด้วย Liquid stationary phase และ Support coated tubular เคลือบผนังภายในด้วย Solid stationary phase ประสิทธิภาพของคอลัมน์สองชนิดนี้ดีกว่า Packed column

### 2.12.4.4 เตาอบ

เตาอบจะเป็นส่วนที่ควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ เพื่อให้ตัวอย่างอยู่ในรูปที่เป็นแก๊สหรือเป็นไอ ซึ่งอุณหภูมิของเตาอบอาจจะมีการตั้งอุณหภูมิให้คงที่ตลอดเวลา เรียกว่า Isothermal operation หรือมีการปรับอุณหภูมิให้มีการเปลี่ยนแปลงได้ในขณะทำการทดลอง เรียกว่า Temperature programming operation การควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์จะทำให้ได้ผลที่มีความแม่นยำ ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิจะต้องมีความละเอียดถึง 0.1 องศาเซลเซียส โดยการตั้งค่าอุณหภูมินั้นจะขึ้นอยู่กับจุดเดือดของตัวอย่าง ปกติแล้วอุณหภูมิของคอลัมน์จะถูกตั้งไว้ให้สูงกว่าจุดเดือดของตัวอย่าง ในขณะที่ตัวอย่างเคลื่อนที่ผ่านเฟสคงที่อุณหภูมิค่าจะให้ค่า Resolution ดี แต่ใช้เวลาในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้นถ้าสารประกอบแต่ละชนิดในตัวอย่างมีจุดเดือดใกล้เคียงกัน จะตั้งค่าอุณหภูมิเพียงค่าเดียว (Isothermal) ถ้าสารประกอบแต่ละชนิดในตัวอย่างมีจุดเดือดช่วงกว้าง จะใช้ Temperature program ในการแยกสาร คืออุณหภูมิของคอลัมน์จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งการแยกเสร็จสิ้น

#### 2.12.4.5 ดีเทคเตอร์และเรคคอดเจอร์

ดีเทคเตอร์ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณที่เกิดขึ้น เมื่อมีสารที่ทำการแยกผ่านออกจากคอลัมน์ ซึ่งดีเทคเตอร์จะมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับความจำเพาะของตัวอย่าง ได้แก่ Thermal conductivity detector (TCD), Flame ionization detector (FID), Nitrogen phosphorus detector (NPD), Electron capture detector (ECD), และ Mass spectrometer เมื่อสารถูกแยกและทำการวิเคราะห์แล้ว หน่วยประมวลผลจะแสดงผลการวิเคราะห์ออกมาในรูปแบบแก๊สโครมาโทกราฟี ซึ่งจะแสดงร้อยละ Abundance และเวลาที่สารออกมา และเครื่องสามารถวิเคราะห์หาความสูงกราฟและพื้นที่ใต้กราฟเพื่อเปรียบเทียบปริมาณสารได้

### 2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.13.1 งานวิจัยที่ใช้เส้นใยนุ่นเป็นตัวดูดซับ

Hori และคณะ (2000) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันของนุ่น โครงสร้างของเส้นใย ลักษณะทางเคมีและการประยุกต์ใช้ ซึ่งจากศึกษาพบว่านุ่นสามารถดูดซับน้ำมันได้ โดยนุ่น 1 กรัม สามารถดูดซับน้ำมันได้ถึง 40 กรัม ไม่ว่าจะเป็น้ำมันที่รั่วไหลปนเปื้อนในน้ำทะเลและน้ำจืด การที่เส้นใยนุ่นสามารถดูดซับน้ำมันได้เกิดจากสมบัติเฉพาะตัวของเส้นใยนุ่นที่มีความเป็นไฮโดรโฟบิกจึงทำให้สามารถใช้เป็นตัวดูดซับน้ำมันที่มีลักษณะความเป็นไฮโดรโฟบิกเช่นเดียวกัน

Huang และ Lim (2006) ทำการศึกษาเส้นใยนุ่นเพื่อแยกน้ำมันออกจากน้ำที่ปนเปื้อนน้ำมันด้วยการกรอง ในการทดลองนี้ได้ใช้น้ำมัน 2 ประเภท คือ น้ำมันดีเซลและน้ำมันไฮดรอลิกที่ปนเปื้อนร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่าความหนาของชั้นกรองจะมีผลต่อการแยกน้ำกับน้ำมันและมีผลต่อคุณภาพการกรอง ถ้าความหนาของชั้นกรองมากขึ้นและมีน้ำมันผสมในน้ำที่เข้ามามากขึ้นจะทำให้อัตราการกรองน้ำมันทั้ง 2 ประเภทออกจากน้ำลดลง และจากการศึกษาพบว่าที่ผิวของเส้นใยนุ่นมีเว็กที่มีลักษณะคล้ายจี๊ฟี่ซึ่งเคลือบอยู่บนผิวทำให้เส้นใยนุ่นไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) แต่ชอบน้ำมัน (Oleophilic) ดังนั้นน้ำจะสามารถกรองผ่านไปได้ ส่วนน้ำมันจะถูกจับไว้ที่ผิวเส้นใยนุ่น ซึ่งจากการทดลองพบว่านุ่นสามารถกรองกำจัดน้ำมันดีเซลออกจากน้ำได้ถึงร้อยละ 100 และกำจัดน้ำมันไฮโดรลิกได้มากกว่าร้อยละ 99.4 ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพสูงมากในการกำจัดน้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ นอกจากนี้อัตราการกรองขึ้นอยู่กับความหนืดและความหนาในการแผ่คอลัมน์



ซึ่งความหนาในการเพ็คคอล์มน์ที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดน้ำมันดีเซลและไฮโดรลิกออกจากน้ำ มีค่าเท่ากับ 0.07 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนปัญหาในการแยกน้ำ น้ำมันและอากาศออกจากกันภายในชั้นกรองจะขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นของน้ำมัน ประเภทของน้ำมัน และความหนาของชั้นกรอง

Lim และHuang (2007) ทำการศึกษาโพรงของนุ่นที่มีลักษณะเป็นเส้นใยชอบน้ำมันแต่ไม่ชอบน้ำ เพื่อทำความสะอาดและดูดซับน้ำมันที่รั่วไหล จากการตรวจสอบอย่างละเอียดพบว่า เส้นใยนุ่นมีโครงสร้างกลวงขนาดใหญ่ที่มีรูเมน ทำให้นุ่นถูกนำมาเปรียบเทียบกับ โพลีโพรพิลีน (PP) ที่เป็นวัสดุดูดซับเพื่อกำจัดน้ำมันที่รั่วไหล ซึ่งเป็นสินค้าที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง น้ำมันที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ น้ำมันดีเซล น้ำมันไฮโดรลิก (AWS46) และน้ำมันเครื่อง (HD40) จากการทดลองที่ความหนาของการเพ็คคอล์มน์เท่ากับ 0.02 กรัมต่อตารางเซนติเมตร นุ่นสามารถดูดซับน้ำมันดีเซลได้ 36 กรัมต่อกรัมตัวดูดซับ ดูดซับน้ำมันไฮโดรลิก (AWS46) ได้ 43 กรัมต่อกรัมตัวดูดซับ และดูดซับน้ำมันเครื่อง (HD40) ได้ 45 กรัมต่อกรัมตัวดูดซับ และพบว่าที่ความหนา 0.09 กรัมต่อตารางเซนติเมตร การกำจัดน้ำมันทั้ง 3 ประเภทลดลง 7.9, 8.1 และ 8.6 กรัมต่อกรัมตัวดูดซับ แต่ก็ยังสามารถดูดซับน้ำมันทั้ง 3 ประเภทนี้ได้มากกว่าโพลีโพรพิลีนอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อการดูดซับของน้ำมันอิ่มตัวมันจะระบายน้ำมันออกมา ซึ่งนุ่นมีความสามารถในการเก็บน้ำมัน แต่ก็ยังพบว่ามีน้ำมันดีเซลและ HD40 ไหลออกมา น้อยกว่าร้อยละ 8 และ AWS46 ไหลออกมาร้อยละ 12 จากตัวดูดซับ หลังจากที่มีการไหลออกมา 1 ชั่วโมง และเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในห้องอาบน้ำ พบว่า นุ่นเลือกกำจัดน้ำมันมากกว่าน้ำ น้ำมันทั้งหมดถูกกำจัดออกไป หลังจากนั้นนำนุ่นมาใช้ดูดซับใหม่ (reuse) 4 ครั้ง พบว่า ความสามารถในการดูดซับหายไปร้อยละ 30 เมื่อเพ็คคอล์มน์ที่มีความหนา 0.02 กรัมต่อตารางเซนติเมตรเท่าเดิม และความสามารถของการดูดซับจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นคอล์มน์ ซึ่งจากการทดลองนี้สรุปได้ว่า ลักษณะที่ไม่ชอบน้ำแต่ชอบน้ำมันของนุ่น เพราะว่าเส้นใยนุ่นอาจจะประกอบด้วยพื้นผิวที่มีขี้ผึ้งเคลือบ และมีรูเมนขนาดใหญ่ที่ช่วยในการดูดซับและเก็บน้ำมันได้มาก

Lim และ Huang (2007) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของนุ่น 2 ประเภทในการดูดซับ น้ำมันด้วยวิธีการกรอง นุ่น 2 ประเภทที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่ นุ่นธรรมชาติที่ไม่ได้ผสมตัวทำละลายและเส้นใยนุ่นที่ผสมตัวทำละลายเอทานอลและคลอโรฟอร์ม เส้นใยนุ่นมีขี้ผึ้งหรือแว็กซ์เคลือบบนผิวของเส้นใยทำให้มีลักษณะเฉพาะคือไม่ชอบน้ำแต่ชอบน้ำมัน ซึ่งจากการศึกษานี้พบว่า ในชั้นการกรองที่ลึกลงไปที่น้ำมันดีเซลผสมอยู่ร้อยละ 2.5 ประสิทธิภาพการกรองขึ้นอยู่กับเวลาที่ผ่านในคอล์มน์ อัตราเร็วในการกรอง คุณภาพของตัวกรอง และปริมาณน้ำมันที่ถูกจับหรือสะสม

ในคอลัมน์ที่ไม่ผ่านลงไปภายใต้ความดันคงที่ และจากการทดลองยังพบว่าเส้นใยนุ่นที่ผสมตัวทำละลาย จะทำให้กรองแยกน้ำมันดีขึ้นและใช้ชั้นกรองน้อยกว่านุ่นที่ไม่ได้ผสมตัวทำละลาย แต่นุ่นที่ผสมตัวทำละลายสามารถจับน้ำมันได้น้อยกว่านุ่นที่ไม่ได้ผสมตัวทำละลาย ซึ่งเหตุผลหลักที่ทำให้น้ำมันไม่ผ่านลงไปตั้งแต่แรก เพราะสารละลายที่เคลือบนุ่นอยู่นั้นมีลักษณะชอบน้ำมันและไม่ชอบน้ำเช่นกัน

### 2.13.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการขึ้นรูปวัสดุดูดซับ

วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุลและคณะ (2547) ทำการทดลองเตรียมฟองน้ำเส้นใยธรรมชาติ จากขานอ้อย ที่สภาวะต่างกันเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำมันดิบของฟองน้ำเส้นใยธรรมชาติที่เตรียมได้ โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 18-22 โดยน้ำหนัก ใช้อุณหภูมิสำหรับบ่มอัลคาไลเซลล์โลสในช่วง 30-95 องศาเซลเซียส ปริมาตรคาร์บอนไดออกไซด์ 25-45 มิลลิลิตร และปริมาณเกลือโซเดียมซัลเฟต โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนในการผสมกับของผสมหนืดใน 4 อัตราส่วน ได้แก่ ปริมาณเกลือโซเดียมซัลเฟตร้อยละ 25 50 66 และ 75 และนำฟองน้ำเส้นใยธรรมชาติที่ได้ไปทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำมันดิบและน้ำทะเล เปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซึมน้ำมันดิบและน้ำทะเลของโพลีโพรพิลีน จากการทดลองพบว่า การเตรียมฟองน้ำด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 18 และผสมกับเกลือโซเดียมซัลเฟต ในอัตราส่วน ร้อยละ 50 ทำให้ฟองน้ำดูดซึมน้ำมันดิบได้ดีที่สุดและพบว่าฟองน้ำเส้นใยธรรมชาติมีความสามารถในการดูดซึมน้ำมันดิบสูงกว่าโพลีโพรพิลีน 1.25 เท่า

นฤมล ศรีวิบูล (2548) ทำการทดลองเตรียมฟองน้ำเส้นใยธรรมชาติที่สภาวะแตกต่างกันเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซึมน้ำมันดิบของฟองน้ำเส้นใยธรรมชาติที่เตรียมได้จากขานอ้อย เทียบกับความสามารถในการดูดซึมน้ำมันดิบของวัสดุสังเคราะห์ที่มีขายตามท้องตลาดอย่างโพลีโพรพิลีน ซึ่งจากการเตรียมฟองน้ำเส้นใยธรรมชาติได้มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้อยู่ในช่วง 18-22 โดยน้ำหนัก ปริมาตรคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของเกลือโซเดียมซัลเฟตที่ใช้เติมลงไปผสมกับของผสมหนืดเพื่อเพิ่มความเป็นรูพรุนให้กับฟองน้ำเส้นใยธรรมชาติ 4 อัตราส่วน ได้แก่ ร้อยละ 25 ร้อยละ 50 ร้อยละ 66 และร้อยละ 75 จากการทดลองพบว่า ฟองน้ำเส้นใยธรรมชาติที่เตรียมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 18 และผสมกับเกลือโซเดียมซัลเฟตร้อยละ 50 สามารถดูดซึมน้ำมันดิบได้ดีที่สุด ซึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดูดซึมน้ำมันดิบ

น้ำมันดิบได้แก่อุณหภูมิในการบ่มอัลคาไลเซลลูโลส 95 องศาเซลเซียส และปริมาตรคาร์บอนไดออกไซด์ 25 มิลลิลิตร ทำให้ฟองน้ำเส้นใยธรรมชาติสามารถดูดซึมน้ำมันดิบได้มากถึง 12 เท่าของ น้ำหนักแห้ง ซึ่งสามารถดูดได้มากกว่าโพลีโพรพิลีน 1.25 เท่า

จิรายุ มั่งสุวรรณ (2554) ศึกษาประยุกต์ใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมเส้นใยเรยอนผสมกับเส้นใยุ่นเพื่อเป็นวัสดุดูดซับน้ำมัน โดยมีกรขึ้นรูปเป็นวัสดุดูดซับ ในการขึ้นรูปวัสดุดูดซับได้ใช้อัตราส่วนผสมระหว่างเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอนจำนวน 6 อัตราส่วน ได้แก่ 0:1, 1:1, 2:1, 3:1, 4:1 และ 1:0 โดยน้ำหนัก ผสมกับของผสมหนืดที่เตรียมจากอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคส ต่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 อัตราส่วน ได้แก่ 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 โดยน้ำหนัก และได้มีการกำหนดอัตราส่วนผสมของเส้นใยผสมต่อของผสมหนืดเป็น 10:1 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำวัสดุดูดซับที่เตรียมได้ไปศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมัน 3 ชนิด ที่มีความหนาแน่นและความหนืดแตกต่างกัน ได้แก่ น้ำมันดีเซล น้ำมันเครื่องยนต์ และน้ำมันเตา โดยได้ทำการทดลองดูดซับน้ำมันทั้ง 3 ชนิด 2 ช่วงเวลา คือ 15 นาที และ 24 ชั่วโมง ตามการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำมันสำหรับวัสดุดูดซับของสมาคมเพื่อการทดสอบวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (ASTM: F726-99) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า วัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้นสามารถดูดซับน้ำมันทั้ง 3 ชนิดได้เท่ากับ 0.32-0.45 ,0.32-0.45 และ 0.80-0.96 กรัมน้ำมันต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ และจากการทดลองพบว่าวัสดุดูดซับที่สามารถดูดซับน้ำมันได้มากที่สุด คือ วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยเรยอนต่อเส้นใยุ่น 3:1 ผสมกับของผสมหนืดที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1:4 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้นสามารถดูดซับน้ำมันได้น้อยกว่าโพลีโพรพิลีนที่เป็นวัสดุดูดซับทางการค้ามาก ทำให้ไม่เหมาะสมและไม่คุ้มค่าสำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่

ปนัดดา คงศรีเจริญ (2555) ศึกษาการพัฒนาวัสดุดูดซับน้ำมันจากเส้นใยุ่น และของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน โดยทำการขึ้นรูปวัสดุดูดซับจากอัตราส่วนผสมของเส้นใยุ่นกับเส้นใยเรยอน จำนวน 5 อัตราส่วนผสม คือ 1:0, 3:1, 1:1, 1:3 และ 0:1 โดยน้ำหนัก ผสมกับของผสมหนืดที่เตรียมจากน้ำยาวิสโคสและน้ำ จำนวน 4 อัตราส่วน คือ 1:0, 1:2, 1:4 และ 1:6 โดยน้ำหนัก และมีการใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต 0 และ 50 กรัมในวัสดุดูดซับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมัน 3 ชนิด ที่มีความหนืดและความหนาแน่นของน้ำมันแตกต่างกัน ได้แก่ น้ำมันดีเซล น้ำมันเครื่องยนต์ และน้ำมันเตา ตามวิธีการมาตรฐานการทดสอบการดูดซับน้ำมัน (ASTM F726-06) จากการทดลองพบว่า วัสดุดูดซับน้ำมันที่เตรียมจากอัตราส่วนผสมของเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอนร้อยละ

ละ 100:0 โดยน้ำหนัก ผสมกับน้ำยาวิสโคสต่อน้ำร้อยละ 14:86 โดยน้ำหนัก และใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต 50 กรัม มีประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันทั้ง 3 ชนิด ในระยะเวลา 15 นาที เท่ากับ  $18.15 \pm 0.67$ ,  $28.10 \pm 1.51$  และ  $34.14 \pm 1.17$  กรัมไขมัน/กรัมวัสดุดูดซับ ตามลำดับ และประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันทั้ง 3 ชนิด ในระยะเวลา 24 ชั่วโมง เท่ากับ  $21.21 \pm 0.34$ ,  $29.29 \pm 0.62$  และ  $37.26 \pm 0.64$  กรัมไขมัน/กรัมวัสดุดูดซับ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ โพลีโพรพิลีนซึ่งเป็นวัสดุดูดซับทางการค้า พบว่าวัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้นสามารถดูดซับน้ำมันได้มากกว่าโพลีโพรพิลีน นอกจากนี้ยังพบว่า วัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้นสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ถึง 5 ครั้ง ประสิทธิภาพลดลงร้อยละ 44 ซึ่งวัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้นสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากมีค่าความร้อนประมาณ  $10,558 \pm 22.63$  แคลอรี/กรัม และมีปริมาณเถ้าเพียงร้อยละ  $1.91 \pm 1.24$

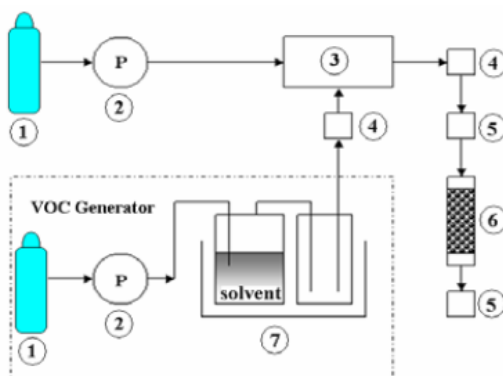
### 2.13.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก

สุภาภรณ์ มั่นไทรทอง (2541) ทำการทดลองหาการดูดซับไอของโทลูอินและไซลีนบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชังข้าวโพดโดยใช้เทคนิคโครมาโทกราฟี ซึ่งวัสดุดูดซับที่ได้เตรียมจากชังข้าวโพดที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก และสารละลายซิงค์คลอไรด์ ที่อุณหภูมิ 250, 300 และ 600 องศาเซลเซียส วัสดุดูดซับที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกจะได้วัสดุดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยที่สุด ส่วนวัสดุดูดซับที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์จะได้วัสดุดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด แต่ตัววัสดุดูดซับที่เตรียมได้จะมีพื้นที่ผิวแบบไม่มีคู่เหมือนกัน สำหรับวัสดุดูดซับชนิดเดียวกัน จะพบว่าค่าคงที่สมดุลการดูดซับบนวัสดุดูดซับที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกมีค่าต่ำที่สุด ขณะที่ค่าสมดุลการดูดซับบนวัสดุดูดซับชนิดอื่นจะมีค่าสูงกว่าอย่างน้อย 100 เท่า

จิระศักดิ์ แสงพุ่ม (2542) ศึกษาการดูดซับไอของเบนซีน โทลูอินและโอไซลีนด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวา ชานอ้อยและแกลบ ที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์เข้มข้น 600 กรัมต่อลิตร ซึ่งทดลองทำตัวดูดซับที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมงจากการทดลองเตรียมตัวดูดซับพบว่า ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวและค่าเฉลี่ยขนาดของโพรงจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณของตัวดูดซับที่ได้จะลดลง ซึ่งตัวดูดซับที่เตรียมจากผักตบชวามีพื้นที่ผิวมากที่สุด จากนั้นนำวัสดุดูดซับที่เตรียมจากผักตบชวาขนาด 40-60 เมช แผล็คใส่คอลัมน์สแตนเลสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $\frac{1}{4}$  นิ้ว ความยาวของชั้นดูดซับเท่ากับ 0.5, 1 และ 6 เซนติเมตร เพื่อดูดซับไอระเหยของเบนซีน โทลูอินและไซลีน จากการทดลองพบว่าค่าสมดุลการดูดซับของสารทั้งสามชนิดเรียงจากน้อยไปหามาก

คือ เบนซีน โทลูอินและไซลีน และค่าความร้อนของการดูดซับไอของเบนซีน โทลูอินและไซลีนเท่ากับ 72, 81 และ 100 กิโลจูลต่อโมลตามลำดับ

โสธิตญา ม้วยแก้ว (2550) ศึกษาการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยถ่านกัมมันต์ เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีสมบัติพื้นฐาน เช่น มีพื้นที่ผิวมาก มีรูพรุนขนาดเล็ก และถ่านกัมมันต์ยังมีสมบัติทางเคมีที่สามารถดูดซับสารที่เป็นไฮโดรโฟบิกได้ดีด้วยแรงแวนเดอร์วาล โดยสารประกอบอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองนี้คือโทลูอินและไซลีน และได้ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายเส้นโค้งเบรคทรูของการดูดซับไอระเหยของสารอินทรีย์ที่เลือก ซึ่งจะทำให้ทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการดูดซับ และสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการดูดซับในอุตสาหกรรมได้ จากการทดลองใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ขายตามท้องตลาดซึ่งผลิตจากกะลามะพร้าวเป็นตัวดูดซับซึ่งมีพื้นที่ผิวประมาณ 1200 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยประมาณ 31 อังสตรอม มาบรรจุใส่คอลัมน์ที่ทำด้วยแก้วรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร และความสูง 25 เซนติเมตร จากนั้นผ่านแก๊สไนโตรเจนแห้ง (ความเร็ว 0.15, 0.35 และ 0.50 เมตรต่อวินาที) เข้าสู่อิมฟินเจอร์ที่บรรจุสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งจุ่มในอ่างน้ำร้อน เพื่อให้ระเหยเป็นไอผสมกับแก๊สไนโตรเจนแล้วผ่านเข้าสู่คอลัมน์ดูดซับดังภาพที่ 2.20



- (1)ถังไนโตรเจน (2)Pressure Regulator and Rotameter (3)ถังผสม  
(4)Rotameter (5)Sampling Port (6)คอลัมน์ดูดซับ (7)อ่างน้ำร้อน

ภาพที่ 2.20 ระบบการดูดซับ

(ที่มา: โสธิตญา ม้วยแก้ว และวิทยา เทพไพฑูรย์, 2550)

จากนั้นนำมาวัดความเข้มข้นของไอระเหยด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่เวลาต่างๆ เพื่อสร้างเส้นโค้งเบรคทรู โดยโทลูอินและไซลีนมีความเข้มข้นขาเข้าเท่ากับ 500 ส่วนในล้านส่วนจากการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบการดูดซับโทลูอินและไซลีนที่เงื่อนไขเดียวกัน ไซลีนจะถึงจุด break point ก่อนโทลูอินเสมอ เนื่องจากโครงสร้างของไซลีนมีหมู่เมทิลมากกว่าโทลูอิน และพบว่าสมมูลการดูดซับของโทลูอินและไซลีนมีลักษณะใกล้เคียงกันแต่สมมูลการดูดซับไซลีนจะสูงกว่าโทลูอิน

ปนัดดา ผู้มีจรรยา (2551) ได้ทดลองทำตัวดูดซับสารกลุ่มบีเท็กในอากาศจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือกระดาษ โดยทำการศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือกระดาษที่จะนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง โดยเลือกใช้ภาคตะวันออกเฉียงเหนือกระดาษ 2 ขนาด คือ 300-500 ไมโครเมตร และ 500-1,000 ไมโครเมตร จากการทดลองพบว่า ตัวดูดซับที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขนาด 300-500 ไมโครเมตร สามารถดูดซับสารบีเท็กได้มากที่สุด โดยวัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้นจะดูดซับสารเอทิลเบนซีนได้ดีที่สุด รองลงมาคือสาร ออร์โธไซลีน โทลูอิน เมตาพาราไซลีน และเบนซีน และจากการทดลองพบว่า วัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเบนซีน โทลูอิน เอทิลเบนซีน และไซลีน เท่ากับร้อยละ 48, 53, 66 และ 33 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์พบว่ามีประสิทธิภาพการดูดซับน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ ซึ่งถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสารบีเท็ก ได้ร้อยละ 59, 90, 94 และ 89 ตามลำดับ

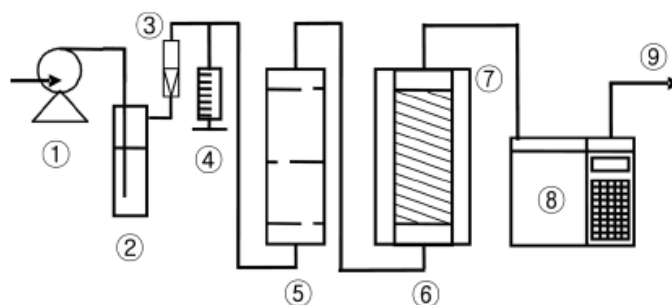
Zytner (1994) ทำการทดลองดูดซับเบนซีน โทลูอิน เอทิลเบนซีนและไซลีนที่เป็นองค์ประกอบของแก๊สไซลีนด้วยตัวดูดซับ 5 ชนิด ได้แก่ ดินร่วนปนทราย (sandy loam soil) ดินอินทรีย์ชั้นบน (organic top soil) ดินเหนียว (clay soil) พีทมอส (peat moss) และถ่านกัมมันต์แบบเม็ด (granular activated carbon) จากการทดลองพบว่า ไอโซเทอมของฟรุนดริชสามารถอธิบายการดูดซับ(adsorption) และการทำให้สารที่ถูกดูดซับแล้วหลุดออกไปจากตัวดูดซับได้ (desorption) ซึ่งคาร์บอนอินทรีย์ของตัวดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับและการทำให้สารที่ถูกดูดซับหลุดออกไปจากตัวดูดซับ และพบว่าถ่านกัมมันต์แบบเม็ดดูดซับได้ดีที่สุด รองลงมาคือพีทมอส ดินอินทรีย์ชั้นบน ดินเหนียว ดูดซับได้แย่มากที่สุดคือดินร่วนปนทราย และจากการทดลองยังพบว่าเบนซีนสามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวดูดซับที่เป็นดินได้เร็วที่สุด รองลงมาคือโทลูอิน ไซลีนและเอทิลเบนซีน

Chuang และคณะ (2003) ศึกษาคอลัมน์ดูดซับเบนซีนโดยใช้ถ่านกัมมันต์ ในการทดลองได้ใช้ถ่านกัมมันต์ขนาด 35-45 เมช มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 573 องศาเซลวิน และใส่แก๊สไนโตรเจนเข้าไป 24 ชั่วโมงเพื่อกำจัดสารที่ปนเปื้อนถ่านกัมมันต์ จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ประมาณ 2 กรัมมาทำการแพ็คคอลัมน์ในคอลัมน์แก้วขนาดเล็กที่มีความยาวประมาณ 3 เซนติเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่เป็นตัวพาแก๊สเข้าระบบอยู่ที่ 1.21 ลิตรต่อนาที ในการทดลองนี้มีการควบคุมอุณหภูมิภายในคอลัมน์และอุณหภูมิของเบนซีน และในการทดลองนี้ได้มีการวัดความเข้มข้นของเบนซีนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี โดยใช้ตัวตรวจจับสัญญาณเป็นแบบ FID (Flame ionization detector) ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง

Daifullah และ Girgis (2003) ศึกษาผลกระทบของลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับบีทีเอซึ่งถ่านกัมมันต์ทำมาจาก อินทผลัดัม (Date pits, DP) ก้านต้นฝ้าย (Cotton stalks, CS) เมล็ดลูกพีช (Peach stones, PS) เปลือกอัลมอนด์ (Almond shells, ALS) และเมล็ดมะกอก (Olive stones, OS) นำไปเคลือบด้วยกรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) ร้อยละ 50 และควบคุมความร้อนที่ 773 องศาเซลวิน พบว่า ตัวที่มีการดูดซับสูงสุด คือ ถ่านกัมมันต์ที่ทำจากเมล็ดลูกพีช รองลงมาคือ ถ่านกัมมันต์ที่ทำจากเปลือกอัลมอนด์ ก้านต้นฝ้าย เมล็ดมะกอก และตัวที่มีการดูดซับน้อยสุดคือ ถ่านกัมมันต์ที่ทำจากอินทผลัดัม ถ่านกัมมันต์ทั้งหมดที่มีฟอสเฟตตกค้าง และมีพื้นที่ผิวที่มีสารประกอบเชิงซ้อนของออกซิเจนส่วนใหญ่เป็นถ่านกัมมันต์ประเภทที่เป็นกรด และในการทดลองนี้จะมีการแยกกำจัดบีทีเอแต่ละตัว ซึ่งพบว่าความสามารถในการกำจัดบีทีเอจะไม่แน่นอน ไม่ขึ้นอยู่กับรูพรุนและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเสมอไป

Lillo-Rodenas และคณะ (2006) ทดลองเปรียบเทียบการดูดซับระหว่างเบนซีนและโทลูอิน ความเข้มข้นต่ำที่ผสมกันด้วยถ่านกัมมันต์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุที่มีความแตกต่างกันและถ่านกัมมันต์ที่ขายตามท้องตลาด ใส่ในคอลัมน์ประมาณ 75 มิลลิกรัม แพ็คชั้นดูดซับให้สูงประมาณ 6 ถึง 10 มิลลิเมตร และให้อัตราการไหลเท่ากับ 90 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 200 ส่วนในล้านส่วนเท่ากันทั้งสองชนิด ความดันสัมพัทธ์ของเบนซีนและโทลูอินเท่ากับ  $1.6 \times 10^{-3}$  และ  $5.4 \times 10^{-3}$  จากผลการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโทลูอินได้มากกว่าเบนซีนเนื่องจากความดันสัมพัทธ์ของโทลูอินมีมากกว่าเบนซีน เพราะที่ความเข้มข้นของสารเท่ากันทำให้สารระเหยอินทรีย์แต่ละตัวจะมีค่าความดันไอตัวแตกต่างกัน ซึ่งความจุของการดูดซับ

สามารถหาได้จากกราฟเบรคทรู นอกจากนี้จากการศึกษาเอกสารก่อนหน้านี้นพบว่าพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์เป็นปัจจัยสำคัญต่อการดูดซับ และพบว่าถ่านกัมมันต์ 100 กรัมสามารถดูดซับเบนซินได้ 34 กรัม และสามารถดูดซับโทลูอินได้ถึง 64 กรัม ซึ่งในการศึกษานี้สามารถยืนยันได้ว่ารูพรุนและพื้นที่ผิวที่มีกลุ่มออกซิเจนอยู่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีความเข้มข้นต่ำ



ภาพที่ 2.21 ระบบการดูดซับโทลูอินและอะซิโตน

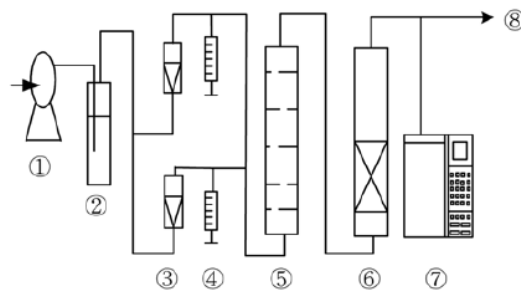
- (1) บั๊มสูบอากาศ (2) ขวดสารละลาย (3) เครื่องควบคุมอัตราการไหล (4) บั๊มนิ็ด (5) ห้องผสมแก๊ส (6) คอลัมน์ดูดซับ (7) วัสดุหุ้มคอลัมน์ดูดซับ (8) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (9) ช่องลมระบายออก

Lee และคณะ (2006) ทดลองเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของการดูดซับไอระเหยของอะซิโตนและโทลูอิน การดูดซับจะขึ้นอยู่กับความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ที่ทำจากกะลามะพร้าวในคอลัมน์ดูดซับ โดยจะทำการดูดซับไอระเหยของโทลูอิน ไอระเหยของอะซิโตน และไอระเหยผสมของสารโทลูอินผสมกับไอระเหยของสารอะซิโตน ในการทดลองนี้ใช้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว 1,145 ตารางเมตรต่อกรัม มีปริมาตรของรูพรุนเท่ากับ 0.41 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม รูพรุนมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 19 อังสตรอม และมีไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 1,100 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งจะทำให้การดูดซับในคอลัมน์ดูดซับที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 16 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 2.21 ในการดูดซับจะคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 20 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาในการเบรคทรูจะลดลงเมื่อไอระเหยมีความเข้มข้นขาเข้าสูง แต่ความเข้มข้นขาเข้าที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความจุในการดูดซับเพิ่มขึ้น และพบว่าถ่านกัมมันต์มีสมดุลความจุของการดูดซับไอระเหยของโทลูอินได้ดีกว่าไอระเหยของอะซิโตน (สามารถดูดซับได้มากกว่า 5 ครั้ง) เนื่องจากลักษณะความเป็นขั้วที่แตกต่างกันระหว่างวัสดุดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ และจากการทดลองพบว่ากราฟเบรคทรูของอะซิโตนที่ผสมกับโทลูอินแตก



ต่างกับอะซิโตนเพียงอย่างเดียว เพราะว่าไอระเหยของอะซิโตนบนวัสดุดูดซับจะถูกแทนที่ด้วยไอระเหยของโทลูอิน เนื่องจากแรงดึงดูดที่แตกต่างกันในการดูดซับ และจากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นระหว่างการดูดซับมีผลต่อการดูดซับสารทั้ง 2 ชนิด (ในช่วงระยะเวลา 10-30 นาที) ซึ่งในการดูดซับไอระเหยของอะซิโตนอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงน้อยประมาณ 3 องศาเซลเซียส เนื่องจากความแตกต่างของค่าที่ต่างกันในการดูดซับ (วัสดุดูดซับที่ไม่มีขั้วดูดซับสารที่มีขั้ว) เมื่อดูดซับไอระเหยของโทลูอิน จะพบว่า อุณหภูมิในการดูดซับจะสูงขึ้นถึง 33 องศาเซลเซียส เนื่องจากวัสดุดูดซับและสารที่ถูกดูดซับมีลักษณะของขั้วที่เหมือนกัน (ไม่มีขั้วทั้งคู่)

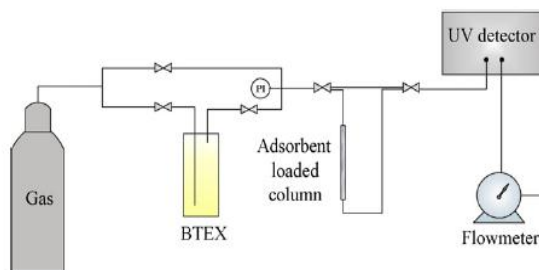
Lee และคณะ (2008) ศึกษาลักษณะเฉพาะของการดูดซับสารอะซิโตน เมทิลเอทิลคีโตน เบนซีน และโทลูอิน ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ทำจากเปลือกมะพร้าวในคอลัมน์ดูดซับที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 16 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2.22 โดยจะทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมดุลความจุของการดูดซับและลักษณะเฉพาะของไอระเหย ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุล ความหนาแน่น จุดเดือด ความดันไอ เส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุล และความเป็นขั้ว ในการทดลองจะใช้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว 1,241 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.61 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เส้นผ่านศูนย์กลางและมีรูพรุนเฉลี่ย 19.80 อังสตรอม โดยจะทำการทดลองในคอลัมน์ดูดซับที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างสมดุลความจุของการดูดซับ และลักษณะเฉพาะของสารดูดซับมี  $R^2$  สูง เพราะความสัมพันธ์ระหว่างสมดุลความจุของการดูดซับและน้ำหนักโมเลกุล โดยสารผสมจะมีผลรวมไอระเหยของสารดูดซับในระบบต่ำกว่าการดูดซับสารเพียงชนิดเดียว เนื่องจากในสารผสม สารแต่ละชนิดจะแข่งขันดูดซับ โดยถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีขั้วจะมีแรงดึงดูดสารที่ไม่มีขั้วเหมือนกันสูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความไม่มีขั้วและโมเลกุลขนาดใหญ่จะดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลที่มีขั้วและมีขนาดเล็ก ในการทดลองนี้ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโทลูอินได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสารที่ไม่มีขั้วเหมือนกันและเปรียบเทียบกับสารที่มีขั้ว นอกจากนี้ยังพบว่ากราฟเบรคทรูของสารผสมและสารเพียงชนิดเดียวมีลักษณะของกราฟเหมือนกัน และพบว่าไอระเหยที่มีแรงดึงดูดต่ำจะมีการลอยตัวสูงขึ้น แต่ระดับการลอยตัวจะต่ำลงและกว้างขึ้นเมื่อมีส่วนของแก๊สผสมเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.22 ระบบการดูดซับ

- (1) บั๊มสูบลมอากาศ (2) ขวดสารละลาย (3) เครื่องควบคุมอัตราการไหล (4) บั๊มฉีด (5) ห้องผสมแก๊ส (6) คอลัมน์ดูดซับ (7) วัสดุหุ้มคอลัมน์ดูดซับ (8) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (9) ช่องลมระบายออก

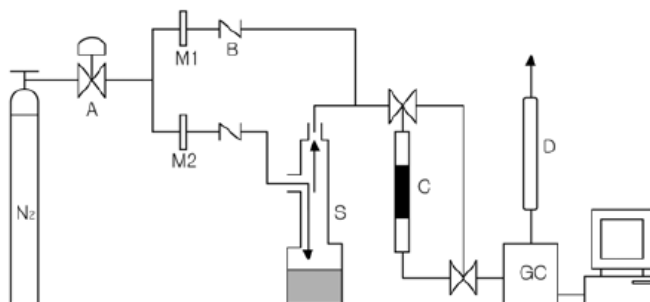
Standeker และคณะ (2009) ทำการทดลองกำจัดไอระเหยของบีเท็กซ์จากกระแสแก๊สโดยใช้ซิลิกาแอโรเจลที่มีลักษณะความไม่ชอบน้ำที่แตกต่างกัน โดยใช้ซิลิกาแอโรเจลในคอลัมน์ขนาดเล็ก ให้ความร้อนกับสารบีเท็กซ์ที่เตรียมไว้ จากนั้นปล่อยแก๊สเฉื่อยผ่านเข้าไปในขวดของสารละลายบีเท็กซ์เพื่อดันให้อากาศภายในขวดไหลออกไปผ่านตัวคอลัมน์ที่มีซิลิกาแอโรเจลบรรจุอยู่ แล้วต่อชุดทดลองเข้ากับเครื่อง UV detector ดังภาพที่ 2.23 จากการทดลองพบว่าซิลิกาแอโรเจลมีประสิทธิภาพในการดูดซับไอระเหยของบีเท็กซ์จากกระแสแก๊สได้ดีมากเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ การเพิ่มระดับความไม่ชอบน้ำของซิลิกาแอโรเจลทำให้มันมีค่าการดูดซับน้อยลง แต่จะไม่ดูดซับน้ำที่มากกับกระแสแก๊ส นอกจากนี้มีการทดลองใส่ Methyltrimethoxysilane (MTMS) หรือ Trimethylethoxysilane (TMES) ผสมเข้าไปในขั้นตอนการเตรียม ซึ่งพบว่า TMES มีลักษณะความไม่ชอบน้ำสูงมากจึงทำให้ มีลักษณะเฉพาะของพื้นที่ผิวภายนอกสูงสามารถดูดซับไอระเหยของบีเท็กซ์ได้มากแต่ไม่สามารถดูดซับไอระเหยของน้ำได้ออกมาได้เลย



ภาพที่ 2.23 ระบบการดูดซับบีเท็กซ์แบบต่อเนื่อง

(ที่มา: Standeker และคณะ, 2009 )

Ryu และ Yeo (2010) ทำการทดลองดูดซับและการคายการดูดซับไอระเหยของเอมีนไซลีน โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นตัวพาไอระเหยของไซลีน (อัตราการไหล 1.2 มิลลิลิตรต่อวินาที) ผ่านคอลัมน์ดูดซับที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 7.75 มิลลิเมตร ยาว 310.0 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพ 2.24 ในการทดลองจะใช้วัสดุดูดซับ 2 ประเภท ได้แก่ washed clay และ organoclay โดย wash clay เป็นวัสดุดูดซับอินทรีย์ที่ปรับสภาพด้วย hexadecyltrimethylammonium (HDTMA) และ organoclay เป็นวัสดุดูดซับที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพ ซึ่งได้ทำการศึกษากราฟเบรคทรูและไอโซเทอมของการดูดซับที่อุณหภูมิ 24, 34 และ 44 องศาเซลเซียส โดยจะนำวัสดุดูดซับที่เตรียมได้บรรจุใส่คอลัมน์ดูดซับจำนวน 14.5 กรัม จากการทดลองพบว่า เบรคทรูเคิร์ฟ จะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุดูดซับและความเข้มข้นของสารที่ผ่านเข้าระบบ วัสดุดูดซับ wash clay กราฟเบรคทรูจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิมากกว่า organoclay เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง (44 องศาเซลเซียส) กราฟเบรคทรูจะสั้นกว่าที่อุณหภูมิต่ำ (24 องศาเซลเซียส) และเมื่อสารที่ผ่านเข้าคอลัมน์ดูดซับมีความเข้มข้นน้อย กราฟเบรคทรูก็จะนานกว่าสารที่มีความเข้มข้นมากกว่า และจากการไอโซเทอมพบว่า การทดลองนี้เป็นไอโซเทอมแบบเบท (BET) โดยวัสดุดูดซับ wash clay เป็นการดูดซับแบบที่ 1 ในขณะที่ วัสดุดูดซับ organoclay เป็นการดูดซับแบบที่ 2 นอกจากนี้ได้ทำการทดลองการคายการดูดซับ โดยใช้ไนโตรเจนแก๊สบริสุทธิ์ไล่ไอระเหยของสารออกจากวัสดุดูดซับ ซึ่งพบว่า ที่อุณหภูมิเท่ากันสารที่มีความเข้มข้นมากกว่าจะคายการดูดซับได้ง่ายกว่าสารที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า และที่อุณหภูมิสูงวัสดุดูดซับจะคายการดูดซับได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ



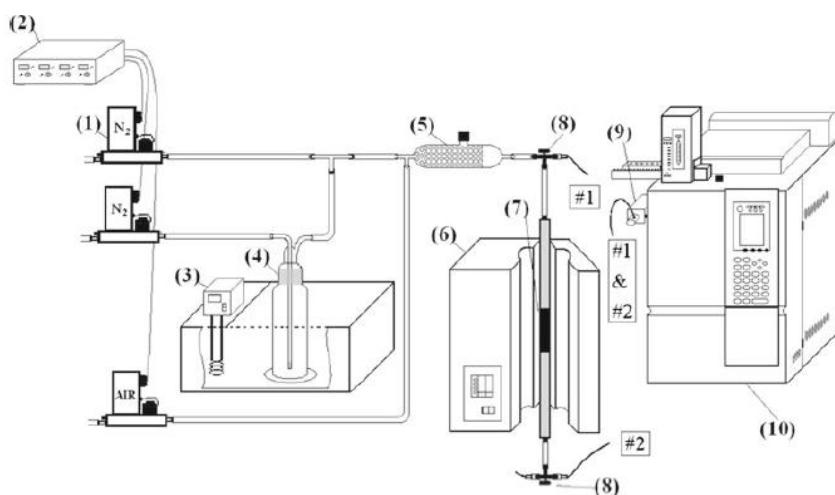
ภาพที่ 2.24 ระบบการดูดซับและการคายการดูดซับของสารไซลีน  
 (A) ตัวควบคุมแก๊ส (B) เช็ควาล์ว (C) คอลัมน์ดูดซับ (D) อุปกรณ์วัดฟองสบู่  
 (M1, M2) อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (S) ไซลีนที่อิมมัว  
 (ที่มา: Ryu และ Yeo, 2010)

McLaughlin และคณะ (2011) ศึกษาการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ในรูปของไอ ของเหลวบริสุทธิ์ และสารละลาย โดยใช้ไฮโดรโฟบิกแอร์โรเจลเป็นตัวดูดซับ และสารประกอบอินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษามี 6 ชนิดได้แก่ เบนซีน โทลูอิน ฟิไซลีน โอไซลีน คลอโรเบนซีน และไตรคลอโรเอทิลีน จากการศึกษาพบว่า อัตราการดูดซับสารมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสถานะของสารนั้น จากการทดลองใช้แอร์โรเจลดูดซับสารที่อยู่ในสถานะไอ จะใช้เวลาในการดูดซับ 100 นาที ในขณะที่การดูดซับสารที่อยู่ในสถานะของสารละลายและของเหลวจะใช้เวลา 10 นาที และ 10 วินาทีตามลำดับ เนื่องจากว่าแอร์โรเจลมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำมากทำให้อัตราการดูดซับไอสารเกิดขึ้นได้ช้า ดังนั้นกระบวนการดูดซับจะถูกควบคุมโดยการกระจายตัวอย่างช้าๆของความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการดูดซับ แต่ความร้อนของการดูดซับส่งผลต่อการดูดซับสารที่อยู่ในรูปของสารละลายและของเหลวน้อยมาก เนื่องจากค่าความร้อนที่มากขึ้นจะทำให้การดูดซับง่ายขึ้น ซึ่งการดูดซับของสารในสองสถานะนี้จะถูกควบคุมโดยการเคลื่อนที่ของมวลสารและการไหลสำหรับการดูดซับของเหลว และจากการทดลองพบว่า แอร์โรเจลสามารถดูดซับไอสารของคลอโรเบนซีนได้มากที่สุด รองลงมาคือไตรคลอโรเอทิลีน โทลูอิน ฟิไซลีนและเบนซีนตามลำดับ และพบว่าแอร์โรเจลสามารถดูดซับไอของโทลูอินและไซลีน ได้ดีกว่าตัวดูดซับที่ขายตามท้องตลาดอย่างซิลิกาเจลและถ่านกัมมันต์ ส่วนสมดุลการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในสารละลายตัวดูดซับสามารถดูดซับไซลีนได้มากที่สุด รองลงมาคือ คลอโรเบนซีน โทลูอิน ไตรคลอโรเอทิลีน และดูดซับเบนซีนได้น้อยสุด

Pan และคณะ (2012) ศึกษาวัสดุดูดซับที่เตรียมจากของอะลูมินา (waste activated alumina) เพื่อทำการดูดซับเบนซีน จากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุดูดซับ คือเตรียมขึ้นที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเมื่อนำวัสดุที่เตรียมขึ้นไปตรวจวิเคราะห์ พบว่า วัสดุดูดซับมีคาร์บอนเมสเฟรคชันร้อยละ 3.57 มีพื้นที่ผิว 234.70 ตารางเมตรต่อกรัม มีปริมาตรของรูพรุนเท่ากับ 0.41 ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม และวัสดุดูดซับมีขนาดของรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 6.59 นาโนเมตร ซึ่งวัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้นสามารถดูดซับเบนซีนได้ร้อยละ 21.80

Lin และ Cheng (2012) ศึกษาการดูดซับและการออกซิเดชันโทลูอินที่มีความเข้มข้นสูง (มากกว่า 500 ส่วนในล้านส่วน) ด้วยเส้นใยถ่านกัมมันต์ (ACFs) ดังภาพที่ 2.25 ในการทดลองนี้ได้ใช้เส้นใยถ่านกัมมันต์ 3 ชนิด ซึ่งมีความหนาของเส้นใยเท่ากับ 0.4, 0.4 และ 1.2 มิลลิเมตร และมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.29, 0.22 และ 0.07 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งจะตัดเส้นใยให้ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ใส่ในคอลัมน์ดูดซับ คุมความเข้มข้นขาเข้าของโทลูอิน 4 ความเข้มข้น

คือ 700, 1200, 1600 และ 2000 ส่วนในล้านส่วน ทำการดูดซับที่อุณหภูมิ 25, 50, 75 และ 200 องศาเซลเซียส และได้ทำการศึกษารูปแบบและรูปร่างของเส้นใยถ่านกัมมันต์ ด้วยการหาหมู่ฟังก์ชัน หาพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน ลักษณะพื้นผิวภายนอก เป็นต้น จากผลการทดลองพบว่า โทลูอินที่มีความเข้มข้น 1200 ส่วนในล้านส่วน ดูดซับที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สามารถดูดซับได้ 569 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็นความจุที่ดีที่สุดในการดูดซับ โทลูอินของเส้นใยถ่านกัมมันต์ ซึ่งการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีเนื่องจาก วัสดุดูดซับมีรูพรุนขนาดกลางเป็นจำนวนมาก และจากการศึกษาพบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการเบรคทรูลดลงเมื่อโทลูอินมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น และพบว่าเมื่อความเข้มข้นของโทลูอินเพิ่มขึ้นถึง 1200 ส่วนในล้านส่วน วัสดุดูดซับจะมีความจุในการดูดซับโทลูอินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าระยะเวลาในการเบรคทรูและความจุการดูดซับ โทลูอินจะลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นขาออกของโทลูอินในการดูดซับอิมตัวจะไม่ถึง 1200 ส่วนในล้านส่วน เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนที่อยู่บนพื้นผิวเส้นใยถ่านกัมมันต์จะทำปฏิกิริยากับโทลูอินให้กลายเป็นสารประกอบอื่นๆ



ภาพที่ 2.25 ระบบการดูดซับและการออกซิเดชัน โทลูอิน

- (1) เครื่องควบคุมอัตราการไหล (2) เครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้า (3) เครื่องวัดอุณหภูมิ (4) ขวดโทลูอิน  
 (5) ห้องผสมแก๊ส (6) เครื่องทำความร้อน (7) คอลัมน์ดูดซับ (8) วาล์วสามทาง (9) อุปกรณ์เก็บแก๊ส  
 (10) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

#### 2.13.4 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพตัวคูดซับ

จันทิมา ชั่งสิริพรและคณะ (2550) ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากอากาศเสีย โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากขี้เถ้าขี้เถ้าไม้อย่างพาราในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง จากการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับเบนซีนได้น้อยกว่าโทลูอิน และได้ทำการศึกษาการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้าขี้เถ้าไม้อย่างพาราที่อิ่มตัวด้วยโทลูอินด้วยวิธีการใช้อิน้ำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้อิน้ำเป็นวิธีการที่เหมาะสมในการฟื้นฟูสภาพของตัวคูดซับ

Wood (1946) ศึกษาวิธีการที่ทำให้ถ่านกัมมันต์ 1 ปอนด์ ที่ดูดซับอีเทอร์ไว้ร้อยละ 20 กลับคืนสู่สภาพเดิมโดยทำการเปรียบเทียบวิธีที่ทำให้ตัวคูดซับกลับคืนสู่สภาพเดิมด้วยวิธีการเปลี่ยนอุณหภูมิ การเปลี่ยนความดัน การใช้แก๊สเฉื่อย และการใช้อิน้ำ ซึ่งจากการทดลองพบว่าวิธีการใช้อิน้ำเป็นวิธีที่ทำให้ตัวคูดซับกลับคืนสภาพเดิมได้ดีที่สุด เนื่องจากสามารถทำให้อีเทอร์หลุดออกมาจากตัวคูดซับได้มากถึงร้อยละ 98 และพบว่าที่ความดันสูงๆ อุณหภูมิของอิน้ำ (100 องศาเซลเซียส) สูงเพียงพอที่จะทำให้อิมเลกุลของสารคายการดูดซับออกมา โดยไม่ทำให้ตัวคูดซับหรือไอของสารที่ถูกคายออกจากการดูดซับเสียหาย

ตารางที่ 2.7 ผลการทดลองการทำให้คืนกลับสภาพเดิมของสารกัมมันต์ 1 ปอนด์ ที่ดูดซับอีเทอร์ไว้ร้อยละ 20 (Wood, 1946 อ้างถึงใน กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2555: ออนไลน์)

วิธีการทำให้คืนกลับสภาพเดิม	สภาวะของการทำให้คืนกลับสภาพเดิม	อีเธอร์ที่คายออกมา (ร้อยละ)
โดยการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ	ทำให้อุ่นขึ้นถึง 100°ซ เป็นเวลา 20 นาที	15
โดยการเปลี่ยนแปลงของความดัน	ทำให้เกิดสภาพสุญญากาศที่ 50 มม.ปรอท 20°ซ เป็นเวลา 20 นาที	25
โดยใช้แก๊สเฉื่อย	ให้มีการหมุนเวียนของแก๊สเฉื่อยที่ 130°ซ	45
โดยการใช้อิน้ำ	ใช้อิน้ำพ่นเข้าไปที่ 160°ซ เป็นเวลา 20 นาที	98

Wei, Mather และ Fotheringham (2004) ทำการศึกษาล้างมีชีวิตที่ใช้ลดแรงดึงผิวเพื่อกำจัดน้ำมันออกจากตัวคูดซับ โดยการใช้สารลดแรงดึงผิวล้างตัวคูดซับ ซึ่งในการทดลองนี้มีปัจจัยที่

สำคัญหลายปัจจัยได้แก่ ประเภทของตัวดูดซับ เวลาในการล้าง ปริมาณสารลดแรงตึงผิว และอุณหภูมิ จากการทดลองพบว่า สารลดแรงตึงผิวสามารถล้างทำความสะอาดน้ำมันออกจากตัวดูดซับได้ดีถึงร้อยละ 95 ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการล้าง และยังพบว่าสารลดแรงตึงผิวเป็นตัวที่สามารถรีไซเคิลตัวดูดซับให้กลับมาใช้ใหม่ได้อีก

### 2.13.5 งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

Rajakovic และคณะ (2008) ศึกษาปัจจัยที่เป็นตัวควบคุมการกำจัดน้ำมันออกจากน้ำด้วยวัสดุดูดซับที่แตกต่างกันในระบบที่ละเท โดยใช้ตัวดูดซับ 2 ประเภท คือ ตัวดูดซับอินทรีย์และตัวดูดซับอนินทรีย์ วัสดุดูดซับอินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวดูดซับได้แก่ เส้นใยขนแกะธรรมชาติ (NWFs) และ Recycled wool based nonwoven material (RWNM) วัสดุดูดซับอนินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวดูดซับได้แก่ เชปพีโอไลต์ เบนโทไนท์ และซีโอไลต์ จากการทดลองพบว่าปัจจัยที่ควบคุมประสิทธิภาพการดูดซับได้แก่ ระยะเวลาในการดูดซับ อุณหภูมิและค่าพีเอชของน้ำ NWFs มีประสิทธิภาพในการดูดซับและมีความสามารถในการดูดซับมากที่สุด โดย NWFs 0.1 กรัม หลังจากดูดซับน้ำมันเครื่อง 10 นาที สามารถดูดซับน้ำมันเครื่องที่ปนเปื้อนในน้ำได้ 3.3 กรัม จากน้ำมันเครื่องที่ปนเปื้อนในน้ำทั้งหมด 4.5 กรัม ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสและพีเอช 8.0 และหลังจากดูดซับน้ำมันเครื่อง 30 นาทีพบว่า NWFs สามารถดูดซับน้ำมันได้สูงสุดถึงร้อยละ 95 ในขณะที่ NRWM สามารถดูดซับน้ำมันเครื่องได้เพียงร้อยละ 43.0 ซีพีโอไลต์ดูดซับน้ำมันเครื่องได้ร้อยละ 20.7 เบนโทไนท์ดูดซับน้ำมันเครื่องได้ร้อยละ 19.6 และซีโอไลต์ สามารถดูดซับน้ำมันเครื่องได้ร้อยละ 21.2

Lua และ Yang (2009) ศึกษาทฤษฎีและการทดลองดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ทำมาจากถั่วปากอ้าในคอลัมน์ ในการทดลองดูดซับใช้คอลัมน์สเตนเลสที่มีความยาว 200 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางยาว 10 มิลลิเมตร ด้านข้างของคอลัมน์จะมีการติดตัวให้ความร้อน จากผลการทดลองดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบว่าระยะเวลาที่ตัวกลางใช้ดูดซับไอสารปนเปื้อนได้สูงสุดจะลดลง เมื่อความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ผ่านเข้าระบบมากขึ้น อัตราการไหลของแก๊สที่ผ่านเข้าระบบเร็วขึ้นและอุณหภูมิสูงขึ้น

## 2.14 ความแตกต่างกับงานวิจัยที่ผ่านมา

งานวิจัยชิ้นนี้ได้พัฒนากระบวนการขึ้นรูปต่อเนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมา เรื่องการประยุกต์ใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมเส้นใยเรยอนผสมกับเส้นใยนุ่นเพื่อเป็นวัสดุดูดซับน้ำมัน (จิรายุ มั่งสุวรรณ, 2554)

โดยงานวิจัยนี้ได้สนใจทำการศึกษากำนำวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ เส้นใยเรยอน น้ำยาวิสโคส และเกลือโซเดียมซัลเฟต มาประยุกต์ทำเป็นวัสดุดูดซับร่วมกับเส้นใยธรรมชาติจากนุ่น เพื่อดูดซับไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก เนื่องจากนุ่นเป็นเส้นใยที่มีขี้ผึ้งเคลือบที่ผิว ทำให้มีคุณสมบัติพิเศษคือ ชอบน้ำมันแต่ไม่ชอบน้ำ ส่วนที่มีการเลือกกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็กเนื่องจากสารกลุ่มนี้มักถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมของอุตสาหกรรมเกือบทุกประเภท และอาจพบว่าเป็นส่วนผสมในน้ำมันเชื้อเพลิงรถยนต์และเครื่องบิน ซึ่งสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็กเป็นสารที่ไม่มีขี้ผึ้ง ทำให้มีความเป็นไฮโดรโฟบิกเหมือนกับเส้นใยนุ่น

งานวิจัยนี้แตกต่างกับงานของจิรายุ มั่งสุวรรณ (จิรายุ มั่งสุวรรณ, 2554) ในเรื่องของสัดส่วนที่จะนำมาใช้ขึ้นรูปวัสดุดูดซับ รูปแบบในการขึ้นรูปวัสดุดูดซับ ซึ่งงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการขึ้นรูปวัสดุดูดซับเป็นแผ่น จากการทดลองพบว่า วัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้นสามารถดูดซับน้ำมันดีเซล น้ำมันเครื่องยนต์ และน้ำมันเตา ได้เท่ากับ 0.32-0.45, 0.32-0.45 และ 0.80-0.96 กรัมไขมันต่อกรัมวัสดุดูดซับตามลำดับ ซึ่งผลการดูดซับที่ได้้น้อยมากเมื่อเทียบกับ โพลีโพรพิลีนซึ่งเป็นวัสดุดูดซับทางการค้า ทำให้ไม่ได้มีการศึกษาวิธีการในการนำกลับมาใช้ซ้ำ

ทำให้ได้มีการศึกษาวิธีการในการขึ้นรูปวัสดุดูดซับที่เป็นของเสียจากโรงงานผสมกับเส้นใยนุ่นขึ้นมาใหม่ เพื่อที่สามารถจะนำมาใช้ได้จริง โดยคุณปนัดดา คงศรีเจริญ (ปนัดดา คงศรีเจริญ, 2555) ซึ่งได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับ การพัฒนาวัสดุดูดซับน้ำมันจากเส้นใยนุ่นและของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน จากผลการทดลองพบว่า ตัวอย่างวัสดุดูดซับน้ำมันที่เตรียมจากอัตราส่วนเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอนร้อยละ 100:0 โดยน้ำหนัก ของผสมชนิดวิสโคสต่อน้ำร้อยละ 14:86 โดยน้ำหนัก และใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต 50 กรัม เป็นวัสดุดูดซับที่ดีที่สุดในการดูดซับน้ำมัน 3 ชนิด ที่มีความหนืดและความหนาแน่นแตกต่างกัน ได้แก่ น้ำมันดีเซล น้ำมันเครื่องยนต์ และน้ำมันเตา ได้ทำการดูดซับน้ำมันใน 2 ช่วงเวลา คือ 15 นาที พบว่า สามารถดูดซับได้  $18.15 \pm 0.67$ ,  $28.10 \pm 1.51$  และ  $34.14 \pm 1.17$  กรัมไขมันต่อกรัมวัสดุดูดซับ ตามลำดับ และในเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า สามารถดูดซับได้  $21.21 \pm 0.34$ ,  $29.29 \pm 0.62$  และ  $37.26 \pm 0.64$  กรัมไขมันต่อกรัมวัสดุดูดซับ ตามลำดับ วัสดุดูดซับน้ำมันที่เตรียมได้มี



ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันทั้ง 3 ชนิดสูงกว่า โพลีโพรพิลีนซึ่งเป็นวัสดุดูดซับทางการค้า และวัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้นสามารถนำมาใช้ซ้ำได้ 5 ครั้ง โดยประสิทธิภาพจะลดลงร้อยละ 44

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ศึกษาการขึ้นรูปวัสดุดูดซับร่วมกับคุณปนัดดา คงศรีเจริญ โดยงานวิจัยจะมีความแตกต่างกันตรงที่การนำวัสดุดูดซับไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อน ซึ่งงานวิจัยของคุณปนัดดา คงศรีเจริญ จะนำไปดูดซับน้ำมันซึ่งเป็นของเหลว แต่งานวิจัยชิ้นนี้จะนำวัสดุดูดซับที่ได้ไปกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก โดยการดูดซับสารบีเท็กผ่านคอลัมน์ดูดซับ

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

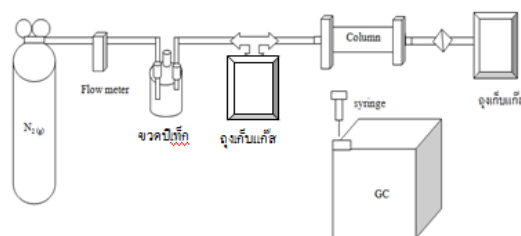
การวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการของเสขอันตรายภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ศึกษาศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีวัสดุ อุปกรณ์ สารเคมีและวิธีการดำเนินการวิจัย ดังนี้

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

- 3.1.1.1 อุปกรณ์เครื่องแก้ว จากบริษัทอามานี คอร์ปอเรชั่น จำกัด
- 3.1.1.2 เครื่องชั่งไฟฟ้า ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ OHAUS รุ่น Adventurer 120
- 3.1.1.3 เครื่องปั่น ยี่ห้อ Philips รุ่น HR 2068 กำลัง 600 วัตต์
- 3.1.1.4 เตอบ ยี่ห้อ Binder ของบริษัท Scientific promotion
- 3.1.1.5 โถดูดความชื้น
- 3.1.1.6 Flow meter จากบริษัทเอ็นเทค แอส โซซิเอท จำกัด ยี่ห้อ Nitto (Japan Instrument) รุ่น DK800S-4 [air] ขนาด ¼ นิ้ว
- 3.1.1.7 ถังเก็บแก๊ส Tedlar ยี่ห้อ SKC ขนาด 0.5 ลิตร รุ่น 232-02 จากบริษัทอามานี คอร์ปอเรชั่น จำกัด

##### 3.1.2 ถึงปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 3.1 แผนการไหลของอุปกรณ์สำหรับกระบวนการดูดซับ

### 3.1.3 วัสดุที่ใช้ในการทำตัวดูดซับ

3.1.3.1 เส้นใยเรยอนที่เหลือใช้จากบริษัทไทยเรยอน ซึ่งได้จากกระบวนการอบแล้ว หลุดออกมาทำให้เกิดการปนเปื้อนฝุ่น

3.1.3.2 สารละลายหนืดหรือวิสโคส เป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต ที่มีการปล่อยออกมาในรูปของเหลวในกิจกรรมต่างๆ เช่น การเก็บตัวอย่าง การล้างตัวกรอง

3.1.3.3 เส้นใยนุ่น พันธ์พื้นเมืองในประเทศไทย ที่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด

3.1.3.4 เกลือโซเดียมซัลเฟต ขนาด 300 ไมโครกรัม ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) เป็นของเสียที่เกิดจาก กระบวนการขนส่ง

### 3.1.4 สารเคมี

3.1.4.1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , Analytical reagent) บริษัท เอส.พี.เจ.พี. จำกัด

3.1.4.2 สารละลายมาตรฐานเบนซีน ( $\text{C}_6\text{H}_6$ , Analytical reagent) จากบริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.4.3 สารละลายมาตรฐานโทลูอิน ( $\text{C}_7\text{H}_8$ , Analytical reagent) จากบริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.4.4 สารละลายมาตรฐานไซลีน ( $\text{C}_8\text{H}_{10}$ , Analytical reagent) จากบริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.4.5 สารละลายมาตรฐานเอทิลเบนซีน ( $\text{C}_8\text{H}_{10}$ , Analytical reagent) จากบริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.4.6 สารละลายมาตรฐานเฮกเซน ( $\text{C}_6\text{H}_{14}$ , Analytical reagent) จากบริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.4.7 แก๊สเฉื่อย (แก๊สฮีเลียม) ร้อยละ 99.99 บริษัทเพรคซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.4.8 แก๊สไนโตรเจน ร้อยละ 99.5 และ 99.99 บริษัทเพรคซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.4.9 น้ำกลั่น

### 3.2 การวิเคราะห์

#### 3.2.1 ขนาดคอลัมน์ที่ใช้บรรจุวัสดุคูดซัฟที่ทำขึ้น

คอลัมน์ที่บรรจุวัสดุคูดซัฟที่ได้ทำขึ้นโดยใช้คอลัมน์อะคริลิก ปริมาตร 15.386 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 เซนติเมตร และยาว 10 เซนติเมตร

#### 3.2.2 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่ใช้ในการวิเคราะห์ รุ่น Agilent Technologies 6890N Network GC system ซึ่งจะมีการตั้งสภาวะของตัวเครื่องให้เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การตั้งสภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่เหมาะสมเพื่อคูดซัฟไอระเหยของบีเท็ก

พารามิเตอร์	สภาวะ
อุณหภูมิของอินเจ็คเตอร์	100 – 250 องศาเซลเซียส
ชนิดของคอลัมน์	เอชพี-1
ขนาดคอลัมน์	30 เมตร x 0.32 มิลลิเมตร x 0.2 ไมโครเมตร
ดีเทคเตอร์	เอฟไอดี อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส
แก๊สตัวพา	แก๊สฮีเลียม (He)

### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.3.1 การทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการของเสี่ยอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ศึกษวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วงดังนี้

การทดลองช่วงที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุคูดซัฟ โดยการทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปวัสดุคูดซัฟระหว่าง เส้นใยนูนกับเส้นใยเรยอน สารละลายหนืดหรือวิสโคสกับ น้ำและปริมาณเกลือโซเดียมซัลเฟต เมื่อได้ของผสมที่มีอัตราส่วนที่เหมาะสมจะนำมาขึ้นรูปวัสดุคูดซัฟ

ด้วยกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 จากนั้นล้างวัสดุชุบด้วยน้ำร้อน และล้างด้วยน้ำสะอาด ที่อุณหภูมิห้อง ดังรายละเอียดตามแผนภาพที่ 3.3

การทดลองช่วงที่ 2 เป็นการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุชุบ สมบัติทางกายภาพของวัสดุชุบ ได้แก่ โครงสร้าง พื้นที่ผิวของวัสดุชุบและความหนาแน่น เป็นต้น และสมบัติทางเคมีของวัสดุชุบ ได้แก่ ความชื้น เป็นต้น

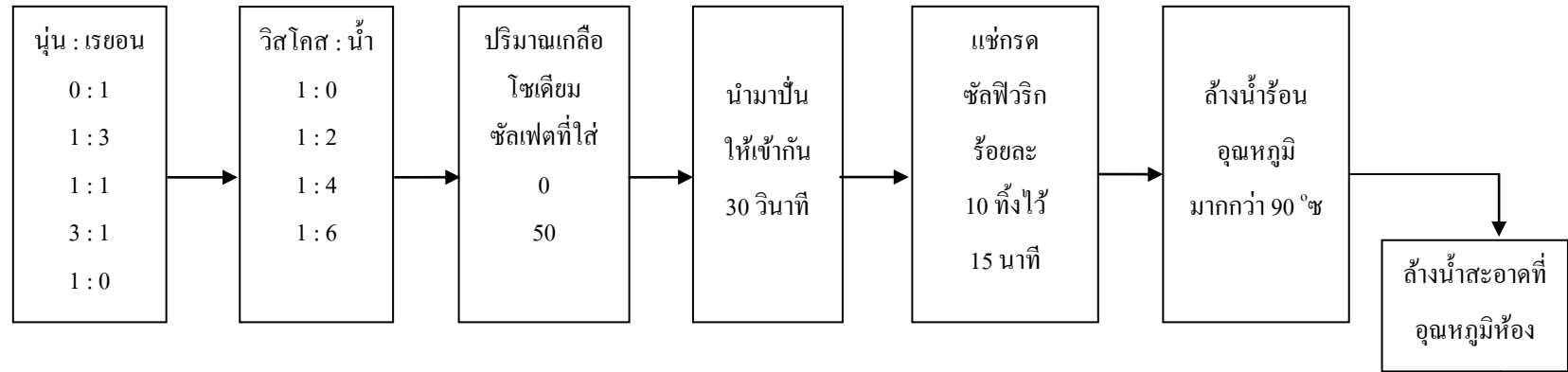
ตารางที่ 3.2 ปัจจัยที่ศึกษาในการขึ้นรูปวัสดุชุบ

ปัจจัยที่ศึกษา	รายละเอียด
อัตราส่วนระหว่างนุ่นต่อเรยอน	1:0, 1:1, 1:3, 3:1, 0:1
อัตราส่วนระหว่างวิสโคสต่อน้ำ	1:0, 1:2, 1:4, 1:6
ปริมาณเกลือโซเดียมซัลเฟต	0, 50

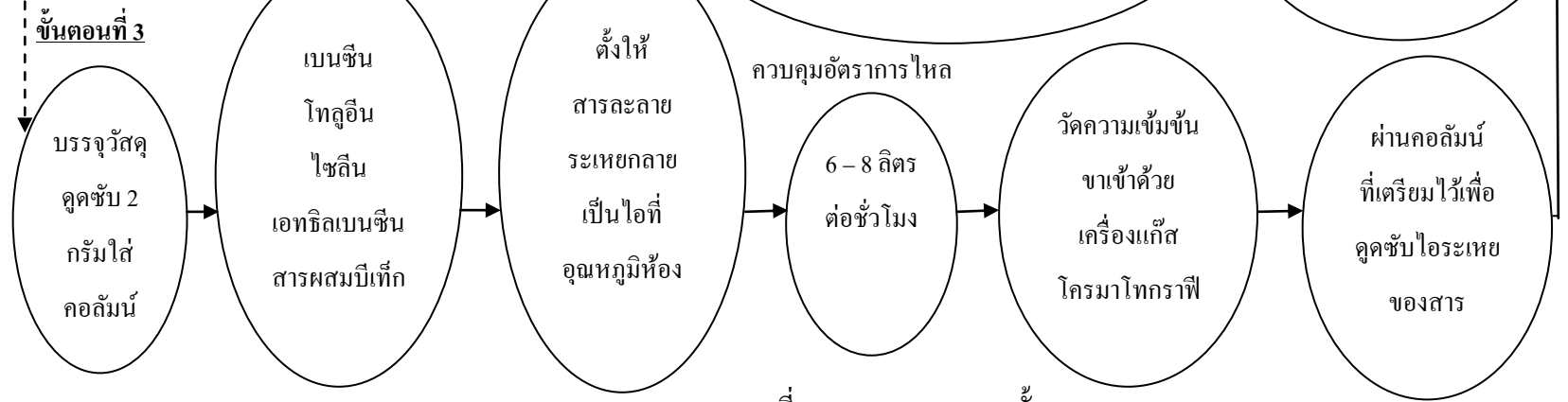
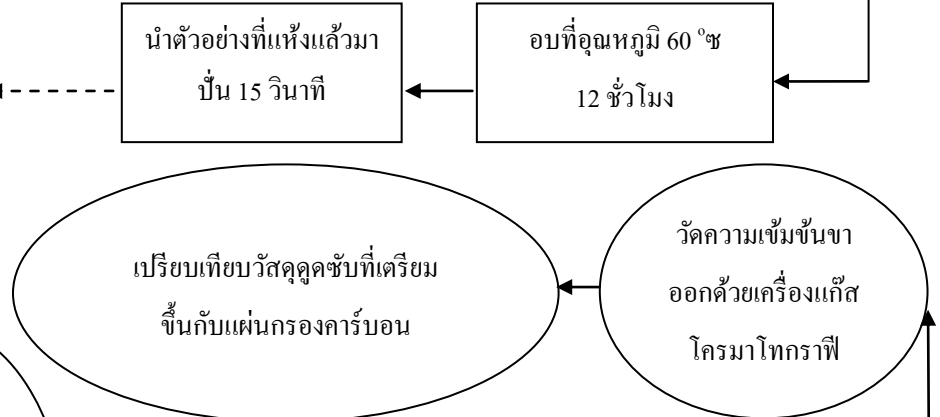
การทดลองช่วงที่ 3 เป็นการศึกษาการชุบสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็กด้วย วัสดุชุบที่ได้ทำขึ้นจากเส้นใยธรรมชาติจากนุ่นกับของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องนำไปกำจัด ได้แก่ เส้นใยเรยอน วิสโคสและเกลือโซเดียมซัลเฟต ที่ได้จากการทดลองที่ 1 มาชุบสารระเหยกลุ่ม บีเท็ก ได้แก่ เบนซีน โทลูอิน ไซลีน เอทิลเบนซีนและสารผสมบีเท็กที่ความเข้มข้น 1,000 ส่วนในล้าน ส่วน และตรวจวัดความสามารถในการชุบของวัสดุชุบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ดังรายละเอียดตามแผนภาพที่ 3.1 และ 3.4

การทดลองช่วงที่ 4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวัสดุชุบที่ได้เตรียมขึ้นจาก เส้นใยนุ่นผสมกับของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน เทียบกับแผ่นกรองอากาศคาร์บอนที่มีขายทางการค้า

**ขั้นตอนที่ 1**



**ขั้นตอนที่ 2**  
เลือกวัสดุดูดซับเพื่อนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี จากนั้นเลือกสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุดูดซับสามตัวเพื่อไปดูดซับบีเท็กในขั้นตอนที่สามต่อไป



ภาพที่ 3.2 แผนการทดลองทั้งหมด

ตารางที่ 3.3 จำนวนตัวอย่างที่ต้องทำการทดลองในขั้นตอนที่ 1

เส้นใยนุ่น ต่อเส้นใยเรยอน	น้ำยา วิสโคสต่อน้ำ	ปริมาณเกลือ โซเดียมซัลเฟต	ชื่อตัวอย่าง	จำนวนซ้ำ
1:0	1:0	0	S1	x3
		50	S2	x3
	1:2	0	S3	x3
		50	S4	x3
	1:4	0	S5	x3
		50	S6	x3
	1:6	0	S7	x3
		50	S8	x3
3:1	1:0	0	S9	x3
		50	S10	x3
	1:2	0	S11	x3
		50	S12	x3
	1:4	0	S13	x3
		50	S14	x3
	1:6	0	S15	x3
		50	S16	x3

เส้นใยนุ่น ต่อเส้นใยเรยอน	น้ำยา วิสโคสต่อน้ำ	ปริมาณเกลือ โซเดียมซัลเฟต	ชื่อตัวอย่าง	จำนวนชิ้น
1:1	1:0	0	S17	x3
		50	S18	x3
	1:2	0	S19	x3
		50	S20	x3
	1:4	0	S21	x3
		50	S22	x3
	1:6	0	S23	x3
		50	S24	x3
1:3	1:0	0	S25	x3
		50	S26	x3
	1:2	0	S27	x3
		50	S28	x3
	1:4	0	S29	x3
		50	S30	x3
	1:6	0	S31	x3
		50	S32	x3



เส้นใยนุ่น ต่อเส้นใยเรยอน	น้ำยา วิสโคสต่อน้ำ	ปริมาณเกลือ โซเดียมซัลเฟต	ชื่อตัวอย่าง	จำนวนชิ้น	
0:1	1:0	0	S33	x3	
		50	S34	x3	
	1:2	0	S35	x3	
		50	S36	x3	
	1:4	0	S37	x3	
		50	S38	x3	
	1:6	0	S39	x3	
		50	S40	x3	
	จำนวนตัวอย่างทั้งหมดที่ต้องทำในขั้นตอนที่ 1 รวม			40	120

ตารางที่ 3.4 จำนวนตัวอย่างที่ต้องทำการทดลองในขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 2	จำนวนตัวอย่าง	ทำซ้ำ
เลือกวัสดุชุดชั้นเพื่อนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี จากนั้นเลือกสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุชุดชั้นเพื่อไปชุดชั้นปีเท็กในขั้นตอนที่ 3	7	3
รวม	21	

ตารางที่ 3.5 จำนวนตัวอย่างทั้งหมดที่ต้องนำมาทำการทดลองในขั้นตอนที่ 3

ตัวอย่างที่ได้จาก ขั้นตอนที่ 2	จุดจับสารอินทรีย์ระเหยง่าย กลุ่มบีเท็ก	จำนวนตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง 3 ซ้ำ
1 ตัวอย่าง	เบนซีน	5	15
	โทลูอิน		
	เอทิลเบนซีน		
	ไซลีน		
	สารผสมบีเท็ก		
ถ้า 7 ตัวอย่าง	เบนซีน	(7 ตัวอย่าง x 5 สารที่ทำการ จุดจับ) 35	105
	โทลูอิน		
	เอทิลเบนซีน		
	ไซลีน		
	สารผสมบีเท็ก		
ดังนั้นจำนวนตัวอย่างทั้งหมดที่ต้องทำในขั้นตอนที่ 3 (3 ซ้ำ)		105 ตัวอย่าง	

ตารางที่ 3.6 จำนวนตัวอย่างที่ต้องทำการทดลองในขั้นตอนที่ 4 นำแผ่นกรองคาร์บอนมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการดูดซับกับวัสดุดูดซับที่ได้เตรียมขึ้น

วัสดุที่ใช้เป็นตัวดูดซับ	จำนวนตัวอย่างที่เลือกมา	นำมาดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก	จำนวนตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง 3 ชั่วโมง
ตัวดูดซับทางการค้า (แผ่นกรองคาร์บอน)	1	เบนซีน	5	15
		โทลูอิน		
		เอทิลเบนซีน		
		ไซลีน		
		สารผสมบีเท็ก		
ดังนั้นจำนวนตัวอย่างทั้งหมดที่ต้องทำในขั้นตอนที่ 4 (3 ชั่วโมง)			15 ตัวอย่าง	

### 3.3.1.1 การทดลองช่วงที่ 1 ขั้นตอนการทำวัสดุดูดซับ (ดังแสดงในภาพที่ 3.3)

- 1) สารละลายชนิดหรือวิสโคส มีเซลลูโลสประกอบอยู่ร้อยละ 9
- 2) เติมน้ำเพื่อเจือจางวิสโคสในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อลดความหนืดของวิสโคส ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้ทำการทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างวิสโคสต่อน้ำ 1:0, 1:2, 1:4, 1:6
- 3) นำเส้นใยุ่นและเส้นใยเรยอนมาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากเส้นใยุ่นมีลักษณะเบาฟุ้งกระจายได้ง่ายจึงทำให้ต้องใส่เส้นใยเรยอนลงไปเพื่อเป็นตัวประสานและเพิ่มความแข็งแรงให้กับเส้นใยุ่นซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้ได้มีการใส่อัตราส่วนระหว่างุ่นต่อเรยอน 0:1, 1:1, 1:3, 3:1 และ 1:0
- 4) นำวิสโคสที่เจือจางไว้แล้วจากขั้นตอนที่ 2 มาเติมในเส้นใยุ่นและเรยอนที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 3
- 5) จากนั้นเติมเกลือ โซเดียมซัลเฟตปริมาณ 0 หรือ 50 กรัม
- 6) ส่วนผสมที่ได้ผสมกันแล้ว จะเรียกว่าของผสม
- 7) นำของผสมที่ได้ไปปั่นด้วยเครื่องปั่นเป็นเวลา 15 วินาที เพื่อให้เส้นใยุ่น เส้นใยเรยอน เกลือ โซเดียมซัลเฟต และวิสโคสที่เจือจางด้วยน้ำแล้วผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีมากขึ้น และมีขนาดเล็กลง

8) เมื่อได้ของผสมแล้วนำมาเติมกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 เพื่อขึ้นรูปวัสดุคูดซับ ซึ่งจะเทกรดซัลฟิวริกให้ท่วมของผสม แล้วใช้แท่งแก้วคนไปมา จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 15 นาที

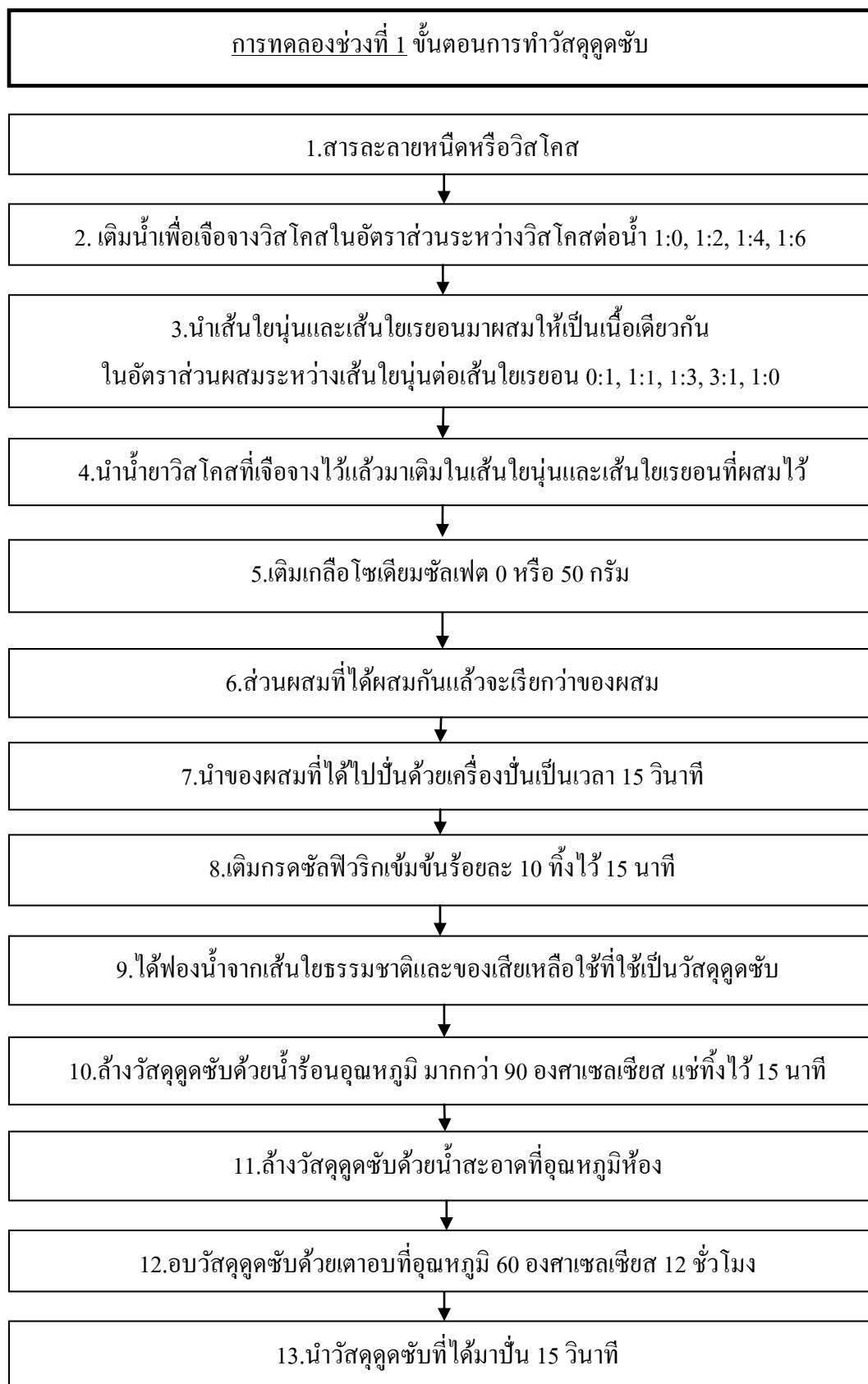
10) ได้ฟองน้ำจากเส้นใยธรรมชาติและของเสียเหลือใช้ที่ใช้เป็นวัสดุคูดซับ

11) ล้างวัสดุคูดซับด้วยน้ำร้อน เพื่อละลายเกลือโซเดียมซัลเฟตที่ตกค้างอยู่ ส่วนที่มีโซเดียมซัลเฟต ละลายออกไปจะเกิดเป็นรูพรุนที่วัสดุคูดซับขึ้น โดยจะแช่ทิ้งไว้ 15 นาที ที่อุณหภูมิมากกว่า 90 องศาเซลเซียสเนื่องจากเกลือโซเดียมซัลเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำได้สูงสุดที่อุณหภูมิ 32.4 องศาเซลเซียส (49.7 กรัม/ 100 กรัม)

12) จากนั้นนำวัสดุคูดซับที่ได้มาล้างด้วยน้ำสะอาดที่อุณหภูมิห้องเพื่อล้างเกลืออีกครั้งหนึ่งและยังช่วยในการกำจัดกลิ่นให้น้อยลง

13) อบวัสดุคูดซับด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง เพื่อให้วัสดุคูดซับแห้งซึ่งอาจจะมีกลิ่นขึ้นเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 10

14) นำวัสดุคูดซับที่ได้จากขั้นตอนนี้ไปปั่นด้วยเครื่องปั่น 15 วินาทีเพื่อให้มีขนาดเล็กลงและช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ จากนั้นนำวัสดุคูดซับที่ได้ไปทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเพื่อหาตัวคูดซับที่มีลักษณะที่ดีที่สุด แล้วนำไปบรรจุในคอลัมน์ที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 3 เพื่อคูดซับไอระเหยของบีทีเอ



ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนการทำวัสดุคูดซับ

3.3.1.2 การทดลองช่วงที่ 2 เป็นการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุคูดซั้บ ดังตารางด้านล่างนี้

ตารางที่ 3.7 ศึกษาสมบัติของวัสดุคูดซั้บทางกายภาพและทางเคมี

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์	อ้างอิงวิธีการวิเคราะห์
โครงสร้าง	Scanning Electron Microscopy (SEM)	ส่งวิเคราะห์
ความหนืด	Brookfield Digital Viscometer	ส่งวิเคราะห์
พื้นที่ผิว	Surface Area Analyzer	ส่งวิเคราะห์
ความชื้น	Test Method D 2654, 2495 Hot air oven method	ASTM standards ปี 2008
ความหนาแน่น	Gas Pycnometer (Quantachrome, Ultrapycnometer 1000)	ส่งวิเคราะห์
หมู่ฟังก์ชัน	Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)	ส่งวิเคราะห์

3.3.1.3 การทดลองช่วงที่ 3 เป็นการศึกษาการคูดซั้บสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็กด้วย วัสดุคูดซั้บที่ได้จัดทำขึ้น (ดังแสดงในภาพที่ 3.4)

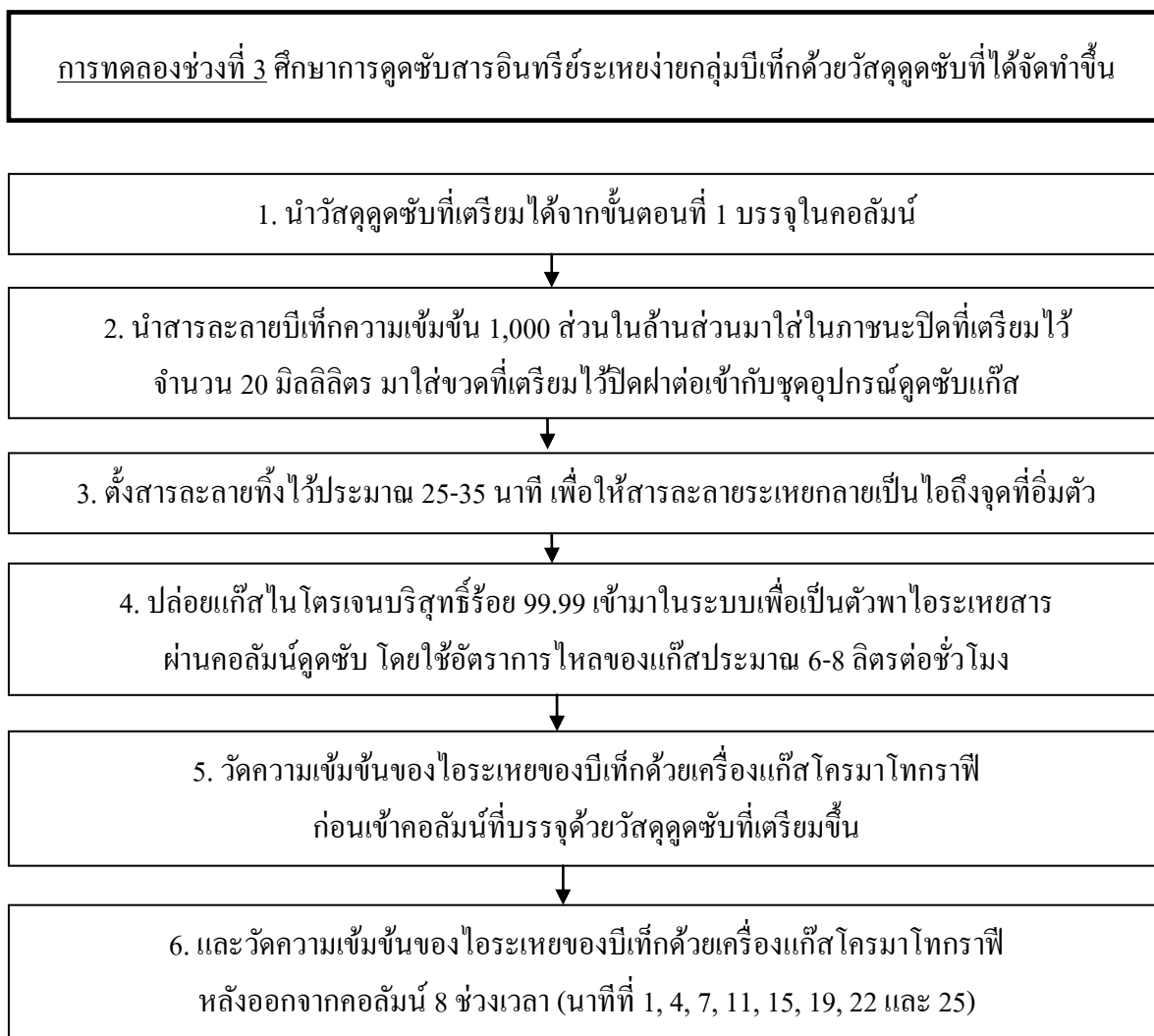
- 1) นำวัสดุคูดซั้บที่เตรียมได้จำนวน 2 กรัม มาบรรจุในคอลัมน์ที่มีปริมาตร 15.386 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 2) นำสารละลายเบนซีน โทลูอิน ไซลีนและเอทิลเบนซีน ที่มีความเข้มข้น 1000 ส่วนในล้านส่วนจำนวน 20 มิลลิลิตร มาใส่ขวดที่เตรียมไว้ปิดฝาต่อเข้ากับชุดอุปกรณ์คูดซั้บแก๊สดังแสดง ในภาพที่ 3.1
- 3) ตั้งสารละลายทิ้งไว้ประมาณ 25-35 นาที เพื่อให้สารละลายระเหยกลายเป็นไอ ถึงจุดที่อิ่มตัว
- 4) ปล่อยแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 เข้ามาในระบบเพื่อเป็นตัวพา ไอร์ระเหยสารผ่านคอลัมน์คูดซั้บ โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สประมาณ 6-8 ลิตรต่อชั่วโมง ในการทดลองนี้ จะใช้วิธีการปล่อยไอร์ระเหยให้ผ่านคอลัมน์คูดซั้บเป็นรอบๆ แต่ละรอบจะตั้งสารละลายทิ้งไว้ประมาณ 25-35 นาที ที่อุณหภูมิห้อง แล้วปล่อยไอร์ระเหยของสารที่ได้ให้ผ่านเข้าไปในคอลัมน์คูดซั้บเป็นเวลา 1 นาที

เพื่อจะคุมความเข้มข้นของไอร่หะเหยของสารที่จะเข้าระบบให้คงที่ โดยจะทำการปล่อยไอร่หะเหยของสารให้เข้าระบบคูดซ้บ 25 นาที

5) ในขณะที่ทำการปล่อยไอร่หะเหยของสารเข้าระบบจะมีการเก็บไอร่หะเหยของสารเพื่อไปหาความเข้มข้นของสารก่อนผ่านเข้าคอลัมน์คูดซ้บ และหลังผ่านคอลัมน์คูดซ้บด้วยถุงเก็บแก๊ส โดยจะทำการเก็บ ไอร่หะเหยของสารไปตรวจวัดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีในรอบแรกของการปล่อย และอีกสี่รอบถัดไปจนครบ 25 รอบ ในรอบที่มีการเก็บไอร่หะเหยของสารบ่เท่กไปตรวจวัดจะทำการเก็บไอร่หะเหยของสารบ่เท่กใส่ในถุงเก็บแก๊สก่อนผ่านเข้าคอลัมน์คูดซ้บเป็นเวลา 30 วินาที หลังจากนั้นจะปล่อยไอร่หะเหยของสารบ่เท่กผ่านคอลัมน์คูดซ้บอีก 30 วินาที เพื่อทำการเก็บแก๊สไปตรวจวัดหาความเข้มข้นขาออก เพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดสารเบนซีน โทลูอิน เอทิลเบนซีน และไซลีน ดังสมการด้านล่างนี้ (Laokiat และคณะ, 2012)

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)} = \left( \frac{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นสุดท้าย}}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \right) \times 100$$

6) จากการตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอร่หะเหยของสารบ่เท่กก่อนเข้าระบบคูดซ้บ พบว่า ไอร่หะเหยของสารบ่เท่กแต่ละชนิด (เบนซีน โทลูอิน ไซลีน และเอทิลเบนซีน) จากสารละลายบ่เท่ก 1000 ส่วนในล้านส่วน ในภาชนะปิดปริมาตร 20 มิลลิลิตร มีความเข้มข้นของไอร่หะเหยก่อนเข้าระบบคูดซ้บประมาณ 800-1200 ส่วนในล้านส่วน



ภาพที่ 3.4 การดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก  
ด้วยวัสดุดูดซับที่ได้เตรียมขึ้น โดยวิธีการดูดซับผ่านคอลัมน์

3.3.1.4 การทดลองช่วงที่ 4 เปรียบเทียบวัสดุดูดซับที่ได้เตรียมขึ้นเองเทียบกับแผ่นกรองคาร์บอนที่มีทางการค้า

- 1) นำวัสดุดูดซับที่เหมาะสมจากการทดลองหาอัตราส่วนในการขึ้นรูปและจากการทดลองดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก มาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับแผ่นกรองคาร์บอน
- 2) นำแผ่นกรองคาร์บอนที่มีขายตามท้องตลาดมาทดลองดูดซับเบนซีน โทลูอิน เอทิลเบนซีน ไซลีนและสารผสมบีเท็ก ด้วยวิธีการเดียวกับการทดลองในช่วงที่ 3



### 3.3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 3.8 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 1

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. อัตราส่วนระหว่างนุ่นต่อเรยอน	- 0:1, 1:3, 1:1, 3:1, 1:0
2. อัตราส่วนระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ	- 1:0, 1:2, 1:4, 1:6
3. ปริมาณเกลือโซเดียมซัลเฟต	- 0 และ 50 กรัม
4. ปริมาณน้ำสะอาดที่อุณหภูมิห้องใช้ล้างวัสดุคูดซับ	-
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. อุณหภูมิของน้ำร้อนที่ใช้ล้างวัสดุคูดซับ	-
2. ปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ใช้ขึ้นรูปวัสดุคูดซับ	- ใส่ให้ท่วมวัสดุคูดซับ
3. เวลาที่ใช้ในการปั่นของผสม	- 15 วินาที
4. เวลาที่ใช้ในการแช่กรดซัลฟิวริกเพื่อขึ้นรูปวัสดุคูดซับ	- 15 นาที
5. อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบวัสดุคูดซับ	- 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
ตัวแปรตาม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ได้วัสดุคูดซับในอัตราส่วนตามที่ต้องการ	-

ตารางที่ 3.9 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. วัสดุคูดซับ	-
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
1. สมบัติของวัสดุคูดซับทางด้านกายภาพและทางเคมีที่ทำการศึกษา	- โครงสร้างของวัสดุคูดซับ - พื้นที่ผิว - ความหนาแน่น - ความชื้น - หมู่ฟังก์ชัน - ความหนืด

ตารางที่ 3.10 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3 และการทดลองที่ 4

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความเข้มข้นของไอระเหยของสารละลายก่อนผ่านเข้าไปในคอลัมน์	800-1,200 ส่วนในล้านส่วน
ตัวแปรควบคุม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
1. ความเข้มข้นของสารละลายเบนซีน โทลูอิน ไซลีน และเอทิลเบนซีน	- 1,000 ส่วนในล้านส่วน
2. อัตราการไหล	- 6-8 ลิตรต่อชั่วโมง
3. ความดัน	- 1 บรรยากาศ
4. ขนาดคอลัมน์ที่ใช้บรรจุวัสดุคูดซับที่จัดทำขึ้น	- ปริมาตร 15.386 ลูกบาศก์เซนติเมตร - เส้นผ่านศูนย์กลาง กลาง 1.4 เซนติเมตร และยาว 10 เซนติเมตร
5. สภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	- อุณหภูมิอินเจ็คเตอร์ 150-250 องศาเซลเซียส - คอลัมน์สแตนเลส เอชพี-1 ขนาด 30 เมตร x 0.32 มิลลิเมตร x 0.2 ไมโครเมตร - ดีเทคเตอร์เอฟไอดี อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส
6. เวลาที่ใช้ในการคูดซับ	- 25 นาที (ประมาณ 162 bed volume)
7. ปริมาณของวัสดุคูดซับที่บรรจุใส่คอลัมน์และแผ่นกรองคาร์บอน	- 2 กรัม
ตัวแปรตาม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความเข้มข้นของไอระเหยของสารละลายบีเท็กที่ออกจากคอลัมน์	-
2. ความสามารถของวัสดุคูดซับในการคูดซับไอระเหยของสารละลายบีเท็ก	-
3. สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการคูดซับของวัสดุคูดซับที่ได้เตรียมขึ้นกับวัสดุคูดซับทางการค้า	

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมวัสดุคูดซับจากเส้นใยธรรมชาติผสมกับของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ อาทิ เส้นใยเรยอน น้ำยาวิสโคสและเกลือโซเดียมซัลเฟต เพื่อนำมาคูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก โดยได้มีการทดลองเตรียมวัสดุคูดซับ จากนั้นนำวัสดุคูดซับที่ได้ขึ้นรูปไว้มาเลือกและวิเคราะห์หาคุณสมบัติของวัสดุคูดซับที่เหมาะสมทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ ลักษณะโครงสร้างพื้นผิว หมู่ฟังก์ชัน พื้นที่ผิวของวัสดุคูดซับ ความหนืดของน้ำยาวิสโคส ความหนาแน่น และความชื้นของวัสดุคูดซับ จากนั้นนำวัสดุคูดซับที่เลือกไว้มาหาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

#### 4.1 การเตรียมวัสดุคูดซับ

จากการเตรียมตัวอย่างวัสดุคูดซับ จำนวน 40 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 3 กรัม โดยแต่ละตัวอย่างมีการใช้อัตราส่วนผสมระหว่างเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอน อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ และปริมาณเกลือโซเดียมซัลเฟต ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนผสมระหว่างเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอน และอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ แบบไม่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต มีทั้งหมด 20 ตัวอย่าง

น้ำยาวิสโคส : น้ำ นุ่น : เรยอน	1 : 0	1 : 2	1 : 4	1 : 6
1 : 0	S1	S3	S5	S7
3 : 1	S9	S11	S13	S15
1 : 1	S17	S19	S21	S23
1 : 3	S25	S27	S29	S31
0 : 1	S33	S35	S37	S39

หมายเหตุ : ตัวอักษร S แล้วตามด้วยหมายเลข ใช้เป็นชื่อวัสดุคูดซับในอัตราส่วนต่างๆ น้ำยาวิสโคส : น้ำ คืออัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสกับน้ำได้เป็นของผสมหนืดสีส้ม ที่มีเซลลูโลส คาร์บอนไดซัลไฟด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำเป็นองค์ประกอบ และนุ่น : เรยอน เป็นอัตราส่วนผสมระหว่างเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอนที่นำมาผสมกันในอัตราส่วนต่างๆ ได้เป็นเส้นใยผสม

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนผสมระหว่างเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอน และอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ แบบใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต 50 กรัม มีทั้งหมด 20 ตัวอย่าง

น้ำยาวิสโคส : น้ำ นุ่น : เรยอน	อัตราส่วนผสม			
	1 : 0	1 : 2	1 : 4	1 : 6
1 : 0	S2	S4	S6	S8
3 : 1	S10	S12	S14	S16
1 : 1	S18	S20	S22	S24
1 : 3	S26	S28	S30	S32
0 : 1	S34	S36	S38	S40

หมายเหตุ : ตัวอักษร S แล้วตามด้วยหมายเลข ใช้เป็นชื่อวัสดุคูดซัabinอัตราส่วนต่างๆ

จากการทดลองเตรียมวัสดุคูดซัabinอัตราส่วนต่างๆ ทั้งแบบใส่เกลือโซเดียมซัลเฟตและไม่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต ในทุกอัตราส่วนของเส้นใย พบว่า

#### 4.1.1 วัสดุคูดซัabinที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำแตกต่างกัน

##### 4.1.1.1 น้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:0

วัสดุคูดซัabinที่เตรียมขึ้นจากอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:0 จากภาพที่ 4.2 (ก) พบว่า วัสดุคูดซัabinที่ไม่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต (S1, S9, S17, S25 และ S33) เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุคูดซัabinจะจับตัวกันแน่นเป็นก้อนแข็งขนาดใหญ่ ไม่มีรูพรุน ผิวภายนอกมีลักษณะเหมือนยางเคลือบอยู่บนพื้นผิว ในขณะที่ตัวอย่างวัสดุคูดซัabinที่มีการใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต (S2, S10, S18, S28 และ S34) เมื่อขึ้นรูปเป็นวัสดุคูดซัabinด้วยกรดซัลฟิวริก พบว่า จะได้วัสดุคูดซัabinที่กระจายตัวกันเป็นก้อนเล็กๆ มียางเคลือบที่ผิว จากการทดลองเตรียมวัสดุคูดซัabinจากอัตราส่วนนี้ พบว่าลักษณะทางกายภาพของอัตราส่วนผสมนี้ ไม่เหมาะสมที่จะนำมาทำเป็นวัสดุคูดซัabin เนื่องจากวัสดุคูดซัabinที่ได้จะแข็ง ขาดความยืดหยุ่นลักษณะภายนอกไม่มีรูพรุน เพราะน้ำยาวิสโคสมีความหนืดมาก ทำให้ไปเคลือบที่พื้นผิวของเส้นใยนุ่นและเส้นใยเรยอน และในขณะที่ขึ้นรูปวัสดุคูดซัabinด้วยกรดซัลฟิวริกผิวด้านนอกของตัวอย่างที่เตรียมเมื่อโดนกรดซัลฟิวริกก็จะเกิดเป็นยางล้อมรอบอย่างรวดเร็ว ทำให้ภายในตัวอย่างเกิดการทำปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ในการเป็นฟองน้ำ ดังภาพที่ 4.1 ด้านล่างนี้



ภาพที่ 4.1 ตัวอย่างของวัสดุคูดซัซที่มีการขึ้นรูปไม่สมบูรณ์

#### 4.1.1.2 น้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:2

วัสดุคูดซัซที่ได้เตรียมขึ้นจากอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:2 ที่อัตราส่วนผสมของเส้นใยต่างๆ พบว่า วัสดุคูดซัซที่ไม่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต (S3, S11, S19, S27 และ S35) เมื่อนำมาขึ้นรูปด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 10 จะจับตัวกันเป็นก้อนๆ มีลักษณะแข็ง ไม่มีรูพรุน ลักษณะภายนอกเหมือนมียางเคลือบที่พื้นผิว ไม่เหมาะสำหรับการนำมาเป็นวัสดุคูดซัซเช่นเดียวกับวัสดุคูดซัซที่มีการใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต (S4, S12, S20, S28 และ S36) เมื่อนำมาขึ้นรูปจะมีลักษณะเป็นก้อนเล็กๆ โดยภายนอกของวัสดุคูดซัซจะมีลักษณะคล้ายยางเคลือบที่พื้นผิวเช่นเดียวกับวัสดุคูดซัซที่ไม่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต ดังภาพที่ 4.3

#### 4.1.1.3 น้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:4

วัสดุคูดซัซที่ได้เตรียมขึ้นจากอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:4 ในทุกอัตราส่วนของเส้นใย พบว่า วัสดุคูดซัซที่ไม่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต (S5, S13, S21, S29 และ S37) เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุคูดซัซจะมีการจับตัวกันเป็นก้อนแข็งตามความยาวของเส้นใย ในขณะที่วัสดุคูดซัซที่มีการใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต (S6, S14, S22, S30 และ S38) เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุคูดซัซจะมีลักษณะฟู ที่ผิวของวัสดุคูดซัซจะอ่อนนุ่มคล้ายกับฟองน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 4.4

#### 4.1.1.4 น้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:6

วัสดุคูดซัซที่เตรียมขึ้นจากอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:6 ในทุกอัตราส่วนผสมของเส้นใย พบว่า วัสดุคูดซัซที่ไม่ได้ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต (S7, S15, S23, S31 และ S39) จะจับตัวกันเป็นก้อนแข็งตามความยาวของเส้นใยในขณะที่ขึ้นรูปคล้ายกับวัสดุคูดซัซที่ไม่ใส่เกลือของอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:4 และจากการทดลองพบว่า วัสดุคูดซัซที่มีการใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต (S8, S16, S24, S32 และ S40) เมื่อนำมาขึ้นรูปแล้วจะมีลักษณะฟู พื้นผิวจะอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่นคล้ายกับฟองน้ำ ไม่มียางเคลือบที่พื้นผิวภายนอกของวัสดุคูดซัซ ดังภาพที่ 4.5



S1



S2



S9



S10



S17



S18



S25



S26



S33



S34

(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.2 อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิส โคสต่อน้ำ 1:0 ของวัสดุชุบ

(ก) ไม่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต (ข) ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต



S3



S4



S11



S12



S19



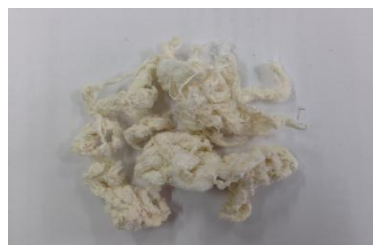
S20



S27



S28



S35



S36

(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.3 อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:2 ของวัสดุดูดซับ  
(ก) ไม่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต (ข) ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต



S5



S6



S13



S14



S21



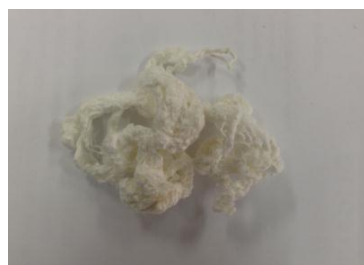
S22



S29



S30



S37



S38

(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.4 อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:4 ของวัสดุดูดซับ

(ก) ไม่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต (ข) ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต





S7



S8



S15



S16



S23



S24



S31



S32



S39



S40

(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.5 อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวีส โคสต่อน้ำ 1:6 ของวัสดุดูดซับ

(ก) ไม่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต (ข) ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต

## 4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุดูดซับ

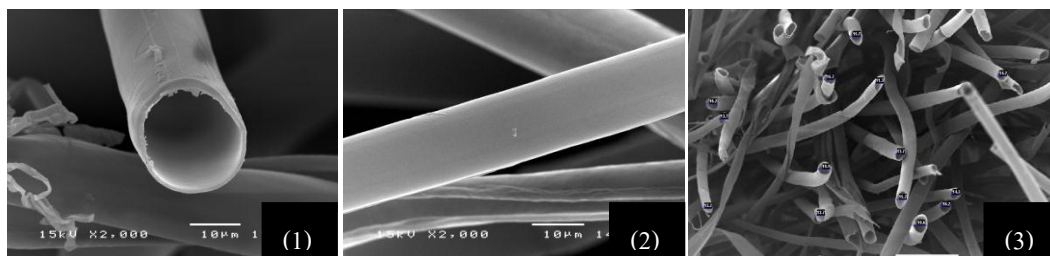
นำวัสดุดูดซับที่ได้เตรียมขึ้นมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ ลักษณะโครงสร้างพื้นผิว การหาหมู่ฟังก์ชัน พื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ ความหนืดของน้ำยา วิสโคส ความหนาแน่นที่แท้จริง และความชื้นของวัสดุดูดซับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ได้ผลดังนี้

### 4.2.1 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิว

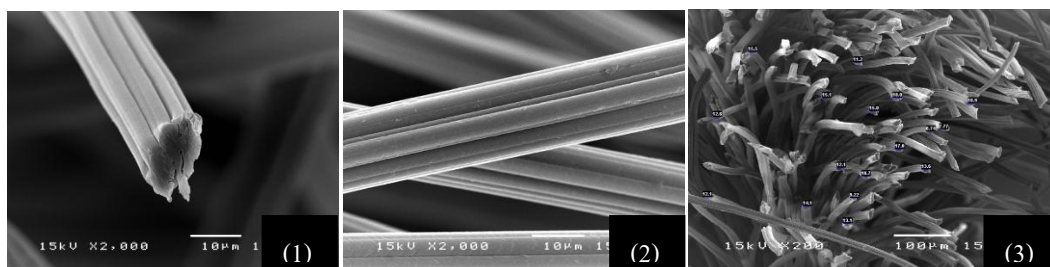
จากการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวปรากฏของวัสดุดูดซับ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน หรือ Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่า วัสดุดูดซับที่เตรียมได้ ทุกอัตราส่วนมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกัน ดังนี้

#### 4.2.1.1 เส้นใยนุ่นและเส้นใยเรยอน

ภาพลักษณะพื้นที่ผิวของเส้นใยนุ่นเทียบกับพื้นที่ผิวของเส้นใยเรยอนที่ยังไม่ได้ขึ้นรูป พบว่า นุ่นจะมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ ภายในเส้นใยนุ่นจะมีรูกลวงตรงกลาง ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 11-25 x 100 ไมโครเมตร ส่วนเส้นใยเรยอนภายในเส้นใยจะมีลักษณะทึบ ไม่มีรู มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-18 x 100 ไมโครเมตร ดังภาพที่ 4.6



(ก) เส้นใยนุ่น (1) ภาพตัดขวาง ที่กำลังขยาย 10 ไมโครเมตร (2) ภาพพื้นที่ผิวด้านข้าง ที่กำลังขยาย 10 ไมโครเมตร (3) ภาพตัดขวาง ที่กำลังขยาย 100 ไมโครเมตร



(ข) เส้นใยเรยอน (1) ภาพตัดขวาง ที่กำลังขยาย 10 ไมโครเมตร (2) ภาพพื้นที่ผิวด้านข้าง ที่กำลังขยาย 10 ไมโครเมตร (3) ภาพตัดขวาง ที่กำลังขยาย 100 ไมโครเมตร  
ภาพที่ 4.6 ลักษณะภาพตัดขวาง ผิวด้านข้าง และภาพตัดขวางที่กำลังขยายสูงขึ้นของเส้นใย

#### 4.2.1.2 วัสดุคูดซัฟที่เตรียมจากอัตราส่วนผสมน้ำยาวิสโคสต่อน้ำต่างกัน

##### 1) แบบไม่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต

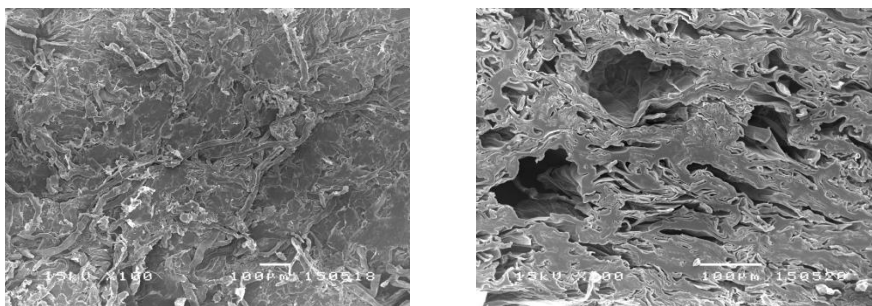
จากการเตรียมวัสดุคูดซัฟในทุกอัตราส่วนของเส้นใยแบบไม่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต เมื่อนำไปตรวจดูลักษณะที่ปรากฏของวัสดุคูดซัฟทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน พบว่า วัสดุคูดซัฟแบบไม่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต จะมีลักษณะของเส้นใยอัดตัวกันอย่างแน่นหนา และพบว่าในอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:0 และ 1:2 วัสดุคูดซัฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นก้อนแข็งขนาดใหญ่ ไม่มีรูพรุน เส้นใยรวมตัวและอัดตัวกันแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากน้ำยาวิสโคสในสัดส่วนนี้มีความหนืดมาก ในขณะที่วัสดุคูดซัฟที่เตรียมจากอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:4 และ 1:6 พบว่า วัสดุคูดซัฟที่ได้จะมีลักษณะของเส้นใยที่กระจายตัว มีน้ำยาวิสโคสตกค้างจากการขึ้นรูปเล็กน้อย แต่จากภาพที่ 4.7 (ก) และ (จ) ซึ่งเป็นภาพตัดขวางแสดงให้เห็นว่าเส้นใยของวัสดุคูดซัฟมีการอัดตัวกันแน่น

##### 2) แบบใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต

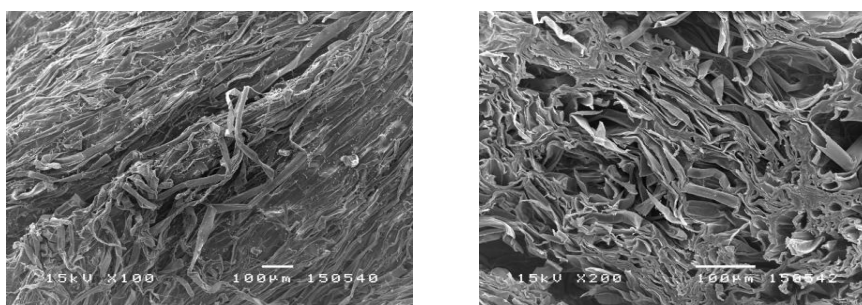
วัสดุคูดซัฟที่ได้จากการใส่เกลือโซเดียมซัลเฟตในทุกอัตราส่วนของเส้นใย พบว่า เส้นใยมีการกระจายตัว ไม่อัดตัวกันแน่นเหมือนวัสดุคูดซัฟที่ไม่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต เนื่องจากการขึ้นรูปเป็นวัสดุคูดซัฟ เกลือโซเดียมซัลเฟตจะไปแทรกตัวอยู่ตามช่องว่างและแทรกตัวในน้ำยาวิสโคส ทำให้วัสดุคูดซัฟมีการขึ้นรูปที่สมบูรณ์มากขึ้น และเพื่อเพิ่มความเป็รูพรุนให้กับวัสดุคูดซัฟ ซึ่งปริมาณของเกลือโซเดียมซัลเฟตที่ใส่ลงไปจะมีลักษณะเป็นผลึกเกลือที่มีขนาด 300 ไมโครกรัม และสาเหตุที่เลือกใส่เกลือโซเดียมซัลเฟตในการเพิ่มรูพรุนของวัสดุคูดซัฟ เพราะในการรีเจ็นเนอเรต ระหว่างของผสมหนืดกับกรดซัลฟิวริก จะมีเกลือโซเดียมซัลเฟตเกิดขึ้นอยู่แล้วและสามารถละลายออกเมื่อล้างกับน้ำสะอาดได้ (วิวัฒน์ ตันฑะพานิชกุล, 2547) และจากภาพที่ 4.8 พบว่าอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำก็มีผลต่อการขึ้นรูปวัสดุคูดซัฟเป็นอย่างมาก ซึ่งจะสังเกตได้จากภาพที่ 4.8 (ก) ที่เป็นอัตราส่วนผสมระหว่างวิสโคสต่อน้ำ 1:0 วัสดุคูดซัฟที่ได้มีการอัดตัวของเส้นใยแน่นและมีรูพรุนน้อยมาก รูพรุนส่วนใหญ่จะโดนวิสโคสที่มีความหนืดมากเกาะอยู่ที่ผิว ในขณะที่ภาพ 4.8 (จ) เป็นอัตราส่วนที่วิสโคสถูกเจือจางด้วยน้ำในปริมาณที่สูง ทำให้มีความหนืดน้อยที่สุด จึงขึ้นรูปเป็นวัสดุคูดซัฟได้สมบูรณ์ที่สุดและมีการกระจายตัวของเส้นใยที่ดีไม่อัดตัวกันแน่นทำให้วัสดุคูดซัฟมีรูพรุนและพื้นที่ผิวมาก

ดังนั้นจากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ผิวปรากฏของวัสดุคูดซัฟด้วยเครื่องอิเล็กตรอนแบบสแกน สามารถสรุปได้ว่าวัสดุคูดซัฟที่ขึ้นรูปด้วยอัตราส่วนผสม

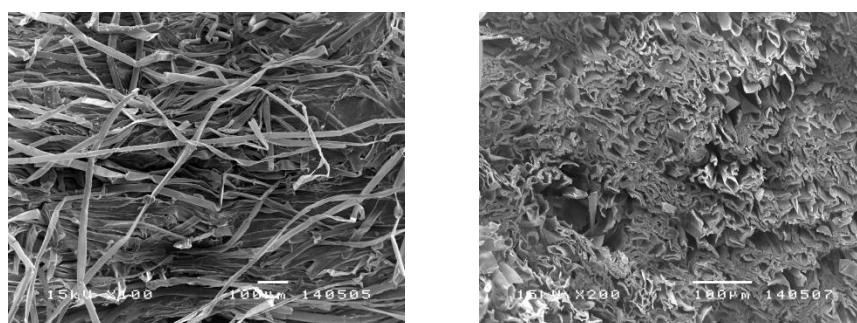
ระหว่างวิสโคสต่อน้ำ 1:6 และมีการใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต 50 กรัม เป็นอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดในการทำวัสดุคูดซับ เนื่องจากวัสดุคูดซับมีลักษณะของเส้นใยที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ไม่อัดตัวกันแน่นเป็นก้อน ทำให้มีพื้นที่ผิวและรูพรุนมาก เพราะเกลือโซเดียมซัลเฟตจะไปแทรกตัวอยู่ตามช่องว่างและแทรกตัวในน้ำยาวิสโคส ทำให้วัสดุคูดซับมีการขึ้นรูปที่สมบูรณ์มากขึ้น และเพิ่มความเป็รูพรุนให้กับวัสดุคูดซับ โดยน้ำยาวิสโคสจะทำหน้าที่ในการเป็นตัวประสานระหว่างเส้นใยนูนกับเส้นใยเรยอน เนื่องจากเป็นของเหลวที่มีความหนืดเมื่อโดนกรดซัลฟิวริกจะทำปฏิกิริยาและขึ้นรูปเป็นวัสดุคูดซับที่มีลักษณะคล้ายฟองน้ำ



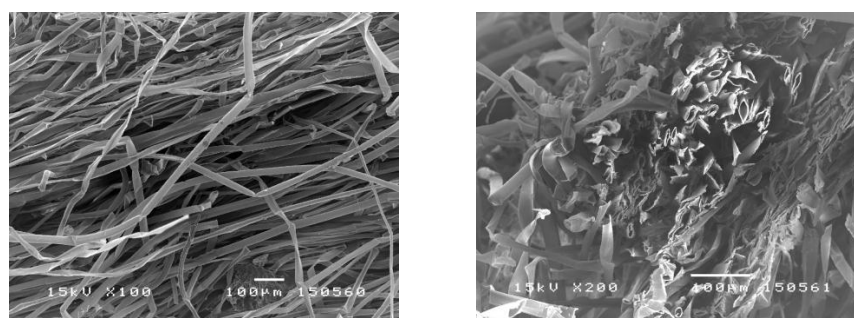
(ก) อัตราส่วนน้ำยาสีโคสต่อน้ำ 1:0



(ข) อัตราส่วนน้ำยาสีโคสต่อน้ำ 1:2

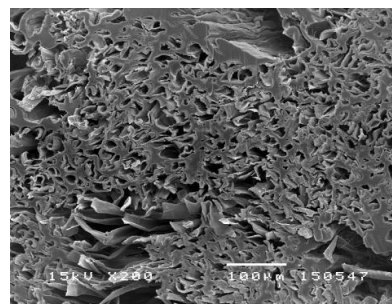
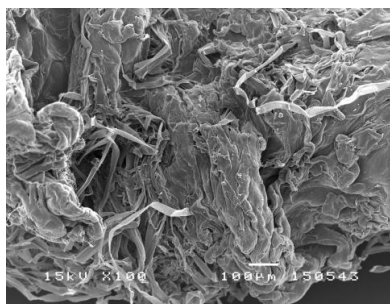


(ค) อัตราส่วนน้ำยาสีโคสต่อน้ำ 1:4

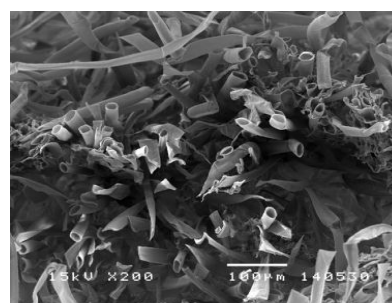
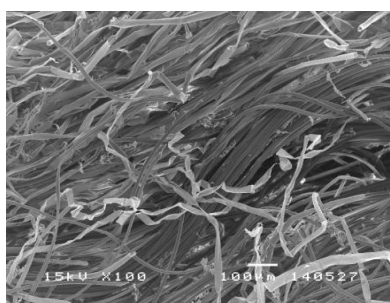


(ง) อัตราส่วนน้ำยาสีโคสต่อน้ำ 1:6

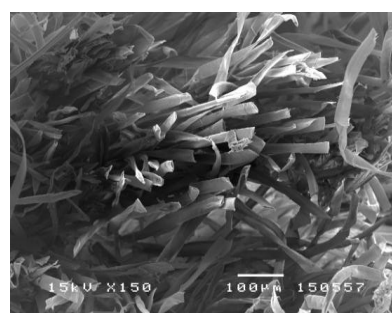
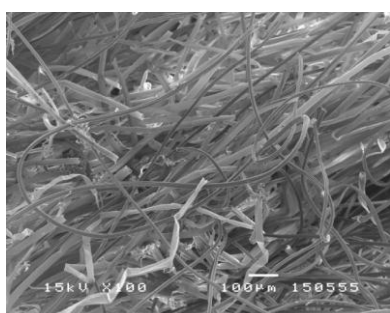
ภาพที่ 4.7 ลักษณะพื้นที่ผิวปรากฏของวัสดุคูดซับที่เตรียมจากอัตราส่วนผสมของน้ำยาสีโคสต่อ น้ำแตกต่างกันแบบไม่ได้เกลือโซเดียมซัลเฟต ภาพด้านซ้ายมือ คือ ภาพพื้นที่ผิวด้านข้าง ที่กำลัง ขยาย 100 ไมโครเมตร และภาพด้านขวามือ คือ ภาพตัดขวาง ที่กำลังขยาย 100 ไมโครเมตร



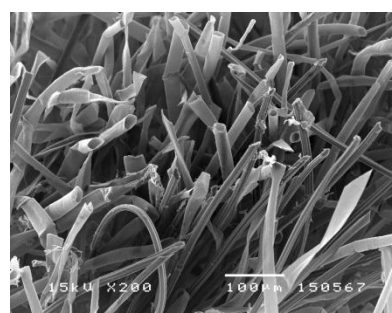
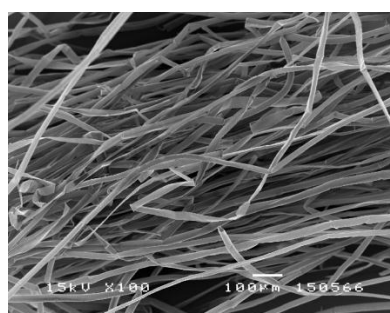
(ก) อัตราส่วนน้ำยาสีโคสต่อน้ำ 1:0



(ข) อัตราส่วนน้ำยาสีโคสต่อน้ำ 1:2



(ค) อัตราส่วนน้ำยาสีโคสต่อน้ำ 1:4

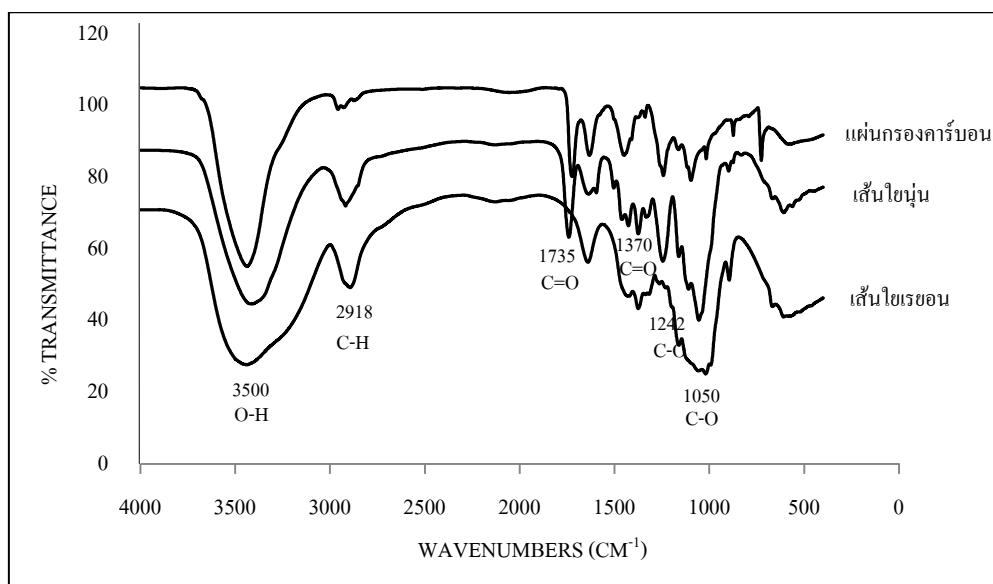


(ง) อัตราส่วนน้ำยาสีโคสต่อน้ำ 1:6

ภาพที่ 4.8 ลักษณะพื้นที่ผิวปรากฏของวัสดุดูดซับที่เตรียมจากอัตราส่วนผสมของน้ำยาสีโคสต่อ น้ำแตกต่างกัน แบบใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต ภาพด้านซ้ายมือ คือ ภาพพื้นที่ผิวด้านข้างที่กำลังขยาย 100 ไมโครเมตร และภาพด้านขวามือ คือ ภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 100 ไมโครเมตร

#### 4.2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของวัสดุคูดซับ

จากการตรวจวัดเพื่อหาหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยนุ่น เส้นใยเรยอน แผ่นกรองคาร์บอน และวัสดุคูดซับที่เตรียมขึ้นจากเส้นใยนุ่นผสมกับเส้นใยเรยอน ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) พบว่า จากภาพที่ 4.9 ที่พิกัดประมาณ 3500-3400  $\text{cm}^{-1}$  ของเส้นใยนุ่น เส้นใยเรยอน และแผ่นกรองคาร์บอน พบว่าเป็นหมู่ฟังก์ชัน O-H (Standerker และคณะ, 2009) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วสามารถที่จะไปจับกับไฮโดรเจนแล้วกลายเป็นน้ำได้ หรือเป็นหมู่ฟังก์ชันที่จะแสดงถึงความชอบน้ำของโมเลกุลนั้น จากพีคจะสังเกตได้ว่าเส้นใยเรยอนจะมีพื้นที่ใต้พีคมากที่สุด ในขณะที่เส้นใยนุ่นและแผ่นกรองคาร์บอนมีพื้นที่ใต้พีคน้อยกว่า



ภาพที่ 4.9 ความยาวคลื่นของของเส้นใยนุ่น เส้นใยเรยอนและแผ่นกรองคาร์บอน

ที่พิกัด 2918  $\text{cm}^{-1}$  ของเส้นใยนุ่น และพิกัด 2892  $\text{cm}^{-1}$  ของเส้นใยเรยอน เป็นหมู่ฟังก์ชันของ C-H stretching หมู่  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$  และ CH ของอัลเคนซึ่งพิกัด 2918  $\text{cm}^{-1}$  ของเส้นใยนุ่น แสดงถึงลักษณะของขี้ผึ้งที่เคลือบอยู่บนผิวของเส้นใย (Wisniewska และคณะ, 2003) ซึ่งปกติขี้ผึ้งที่เคลือบอยู่บนผิวของพีจะประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของอัลเคน แอลกอฮอล์ เอสเทอร์ อะลิฟาติก แอลดีไฮด์ และ คีโตน ต่อกันเป็นสายยาว (Tulloch, 1976; Baker, 1982; Bianchi, 1995; Velisek, 2006; Huang และ Lim, 2007)

ความยาวคลื่นของเส้นใยนุ่นที่พิกัดประมาณ 1735, 1370 และ 1242  $\text{cm}^{-1}$  ทั้ง 3 พิกัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน C=O ของเอสเทอร์ซึ่งเป็นหนึ่งในองค์ประกอบสำคัญของขี้ผึ้งที่เคลือบอยู่บนเส้นใยนุ่น (Sun และคณะ, 2003; Huang และ Lim, 2007) ทำให้เส้นใยนุ่นมีลักษณะเฉพาะตัวคือชอบสารที่

เป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้วและไม่ชอบน้ำซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว และได้พบพีค 1735 และ 1242  $\text{cm}^{-1}$  ในแผ่นกรองคาร์บอนเช่นเดียวกัน

จากการศึกษาพบว่าที่พีคประมาณ 1600, 1510 1470 และ 1425  $\text{cm}^{-1}$  ของเส้นใยนุ่น ทั้งสี่พีคนี้เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-O ของลิกนิน (Sun และคณะ, 2003; Huang และ Lim, 2007) และที่พีคประมาณ 1630 เป็นหมู่ของคาร์บอกซิล

และจากภาพจะพบว่าเส้นใยนุ่นและเส้นใยเรยอนจะมีพีคที่ความยาวคลื่นประมาณ 1050  $\text{cm}^{-1}$  แต่แผ่นกรองคาร์บอนไม่มีพีคนี้ เนื่องจากเส้นใยนุ่นเป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากพืช ซึ่งมีคาร์โบไฮเดรตหรือโพลีแซ็กคาไรด์เป็นองค์ประกอบ (Standerker และคณะ, 2009) เช่นเดียวกับเส้นใยเรยอนที่เป็นเส้นใยสังเคราะห์ที่สร้างมาจากการใช้เซลลูโลสเป็นวัตถุดิบในการผลิตเส้นใย ในขณะที่แผ่นกรองคาร์บอนเป็นเส้นใยสังเคราะห์โดยตรงที่เกิดจากวัสดุสังเคราะห์โพรลีนโพรพิลีนและแผ่นเคลือบคาร์บอน

นอกจากนี้ได้นำวัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยนุ่น 1:1 ผสมกับของผสมชนิดที่มีอัตราส่วนของน้ำยาล้างโคลสต่อน้ำ 1:6 ตรวจสอบวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน พบว่า มีพีคที่ ประมาณ 3500  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคของ หมู่ฟังก์ชัน O-H เพิ่มมากขึ้น และมีพีคที่ 1735  $\text{cm}^{-1}$  C=O ของเอสเทอร์ลดน้อยลงเมื่อเทียบกับเส้นใยนุ่น ซึ่งอาจจะสามารถสรุปได้ว่าวัสดุดูดซับที่ได้เตรียมขึ้นอาจมีแนวโน้มการชอบสารโมเลกุลที่ไม่มีขั้วน้อยลงเมื่อเทียบกับวัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้นจากอัตราส่วนที่เป็นเส้นใยนุ่นเพียงอย่างเดียว ซึ่งผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันนี้จะไม่นำมาเป็นเกณฑ์ในการเลือกวัสดุดูดซับที่เหมาะสมในการนำไปกำจัดสารบีเท็ก เนื่องจากวัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้นมีหมู่ฟังก์ชันใกล้เคียงกัน

#### ตารางที่ 4.3 ความยาวคลื่นของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

ความยาวคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
3600-3400	O-H stretching	กลุ่มไฮดรอกซิล
3000-2800	C-H stretching	หมู่ $\text{CH}_3$ , $\text{CH}_2$ และ CH ของอัลเคน
1735	C=O stretching	เอสเทอร์
1725-1715	C=O stretching	แอลดีไฮด์และคีโตน
1650-1550	C=C	อัลคีน
1450-1375	C-H bending	หมู่ $\text{CH}_3$
1300-1000	C-O stretching	อีเธอร์และเอสเทอร์
1100	C-O stretching	$\text{C}_2$ แอลกอฮอล์

(ที่มา: อินฟราเรด สเปกโตรสโกปี, 2556: ออนไลน์)



#### 4.2.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของวัสดุคูดซั้บ

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิววัสดุคูดซั้บด้วยเครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของอนุภาค (Surface Area Analyzer) พบว่า อัตราส่วนผสมของวัสดุคูดซั้บที่มีเส้นใยนุ่นเพียงอย่างเดียว จะมีพื้นที่ผิวมากที่สุดประมาณ 9.02 ตารางเมตรต่อกรัม เนื่องจากนุ่นเป็นเส้นใยพืชที่มีรูกลวงตรงกลางเส้นใย ในขณะที่อัตราส่วนของวัสดุคูดซั้บที่มีเส้นใยเรยอนเพียงอย่างเดียวจะมีพื้นที่ผิวประมาณ 4.77 ตารางเมตรต่อกรัม เนื่องจากเส้นใยเรยอนมีลักษณะเป็นท่อตัน และพบว่าวัสดุคูดซั้บที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอน 1:1 (โดยน้ำหนัก) จะมีพื้นที่ผิวแตกต่างกันดังตารางที่ 4.4 ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสกับน้ำ ถ้าเป็นอัตราส่วนผสมที่มีน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:6 จะมีพื้นที่ผิวประมาณ 5.54-5.93 ตารางเมตรต่อกรัม แต่ถ้าเป็นอัตราส่วนผสมน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:0 จะมีพื้นที่ผิวประมาณ 1.57 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมีพื้นที่ผิวน้อยมากเมื่อเทียบกับแผ่นกรองคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิว 11.21 ตารางเมตรต่อกรัม ดังนั้นจากการวิเคราะห์พบว่าอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคส 1:0 เป็นอัตราส่วนที่ไม่เหมาะสมที่จะนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุคูดซั้บ

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของวัสดุคูดซั้บในอัตราส่วนผสมต่างๆ

ชื่อตัวอย่าง	อัตราส่วนผสมระหว่างเส้นใยนุ่น : เรยอน (กรัม:กรัม)	อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคส : น้ำ (กรัม:กรัม)	เกลือโซเดียมซัลเฟต (กรัม)	พื้นที่ผิว (ตารางเมตร/กรัม)
S8	1 : 0	1 : 6	50	9.02
S17	1 : 1	1 : 0	0	1.57
S23	1 : 1	1 : 6	0	5.93
S24	1 : 1	1 : 6	50	5.54
S40	0 : 1	1 : 6	50	4.77
แผ่นกรองคาร์บอน	-	-	-	11.31

หมายเหตุ : อัตราส่วนผสมที่ใช้เป็นอัตราส่วนผสมขั้นต่ำในการเตรียมวัสดุคูดซั้บ

: พื้นที่ผิว ตรวจสอบวิเคราะห์ด้วย Surface Area Analyzer

#### 4.2.4 การวิเคราะห์ความหนืดของวิสโคส

จากการวิเคราะห์หาค่าความหนืดของน้ำยาวิสโคสในอัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบดิจิทัล (Brookfield Digital Viscometer) พบว่า เมื่อน้ำยาวิสโคสผสมกับน้ำมากขึ้น น้ำยาวิสโคสก็จะมีค่าความหนืดน้อยลง โดยอัตราส่วนของน้ำยาวิสโคสที่ไม่ผสมน้ำ จะมีค่าความหนืดมากที่สุดเท่ากับ 6,675 เซนติพอยส์ อัตราส่วนน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:2 มีค่าความหนืดเท่ากับ 72 เซนติพอยส์ อัตราส่วนน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:4 มีค่าความหนืดเท่ากับ 35.5 เซนติพอยส์ และที่อัตราส่วนน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:6 พบว่ามีค่าความหนืดน้อยที่สุดเท่ากับ 23.3 เซนติพอยส์ ในการนำน้ำมาเจือจางน้ำยาวิสโคสในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อลดความหนืดของน้ำยาวิสโคส เพราะว่า ถ้าน้ำยาวิสโคสมีความหนืดมากไป เมื่อขึ้นรูปกับกรดซัลฟิวริก น้ำยาวิสโคสจะมีลักษณะคล้ายยางรอบๆผิวของวัสดุอุดซัพ ทำให้ไม่มีช่องว่างในการอุดซัพหรือมีช่องว่างหรือขนาดของรูเกิดขึ้นน้อย แต่ถ้าน้ำยาวิสโคสน้อยไปจะทำให้ความแข็งและการยึดติดกันระหว่างเส้นใยนุ่มและเส้นใยเรยอนน้อยลง เพราะน้ำยาวิสโคสจะทำหน้าที่เป็นตัวประสานเส้นใยนุ่มกับเส้นใยเรยอนให้ติดกัน ซึ่งสามารถลดความหนืดได้ด้วยการเติมน้ำและเพิ่มรพูนด้วยการใส่เกลือในปริมาณที่มากพอ (วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, 2547)

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์หาค่าความหนืดของวิสโคสในอัตราส่วนผสมต่างๆ

อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ	ความหนืด * (เซนติพอยส์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1:0	6,675.0 ± 98.5	24.2
1:2	72.0 ± 1.8	24.2
1:4	35.3 ± 5.7	24.7
1:6	23.3 ± 2.3	24.8

\*เป็นค่าเฉลี่ยจากการวัด จำนวน 3 ครั้ง และอ่านค่า ณ เวลา 30 วินาที

#### 4.2.5 การวิเคราะห์ความหนาแน่น

จากการนำวัสดุอุดซัพที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยนุ่มต่อเส้นใยเรยอน 1:1 (โดยน้ำหนัก) ผสมกับของผสมที่มีอัตราส่วนของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:6 (โดยน้ำหนัก) นำมาใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต 50 กรัม และไม้ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต มาวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นที่แท้จริงด้วยเครื่องพิคโนมิเตอร์ (Gas Pycnometer) พบว่า วัสดุอุดซัพที่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต 50 กรัม (S24) มีค่าความหนาแน่นที่แท้จริงประมาณ 1040 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ

แผ่นกรองคาร์บอนซึ่งเป็นวัสดุดูดซับทางการค้าที่มีค่าความหนาแน่นที่แท้จริงเท่ากับ 1060 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่วัสดุดูดซับที่ไม่ได้ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต (S23) มีค่าความหนาแน่นประมาณ 1300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังตารางที่ 4.6 ซึ่งค่าความหนาแน่นที่แท้จริงเป็นค่าความหนาแน่นของวัสดุดูดซับที่ไม่รวมรูพรุนภายใน ถ้าความหนาแน่นของวัสดุดูดซับมีค่าน้อยแสดงว่าวัสดุดูดซับนั้นมีพื้นที่ผิวที่ไม่รวมรูพรุนมากและมีความฟูหรือเบากว่าวัสดุดูดซับที่มีความหนาแน่นสูง ดังนั้นถ้านำวัสดุดูดซับแต่ละชนิดอย่างละ 2 กรัมเท่ากันไปใส่ในคอลัมน์ดูดซับจะพบว่า วัสดุดูดซับที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าจะมีปริมาณของวัสดุดูดซับที่นำไปใส่คอลัมน์มากกว่าวัสดุดูดซับที่มีความหนาแน่นมากกว่า

ตารางที่ 4.6 ความหนาแน่นที่แท้จริงของวัสดุดูดซับ

ตัวอย่างวัสดุดูดซับ	ความหนาแน่นที่แท้จริง (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
1. S23	1300
2. S24	1040
3. แผ่นกรองคาร์บอน	1060

หมายเหตุ : S23 เป็นวัสดุดูดซับที่ไม่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต และ S24 เป็นวัสดุดูดซับที่มีการใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต โดยวัสดุดูดซับทั้ง 2 ตัว มีอัตราส่วนผสมระหว่างเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอน 1:1 เหมือนกัน และมีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:6 เหมือนกัน

#### 4.2.6 การวิเคราะห์ความชื้นของวัสดุดูดซับ

ผลการวิเคราะห์ความชื้นด้วยวิธี Hot air oven พบว่า วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:0 ในทุกอัตราส่วนของเส้นใย จะมีค่าความชื้นสูงที่สุดประมาณร้อยละ  $15.68 \pm 0.75$  เนื่องจากการขึ้นรูปวัสดุดูดซับด้วยกรดซัลฟิวริกจะไม่สมบูรณ์ เพราะอัตราส่วนนี้ น้ำยาวิสโคสจะมีความหนืดสูงมากเมื่อขึ้นรูปเป็นวัสดุดูดซับ น้ำยาวิสโคสจะเคลือบที่ผิวด้านนอกของวัสดุดูดซับเพียงอย่างเดียว ทำให้วัสดุดูดซับจับตัวกันเป็นก้อนมีลักษณะภายนอกแข็งแต่ภายในจะเปื่อยขึ้น ดังภาพที่ 4.1 ในขณะที่วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:6 ซึ่งมีอัตราส่วนผสมของเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอน 1:1 วัสดุดูดซับที่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต (S24) จะมีค่าความชื้นร้อยละ  $8.03 \pm 0.88$  และวัสดุดูดซับที่ไม่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต (S23) จะมีค่าความชื้นร้อยละ  $7.89 \pm 0.52$  แต่วัสดุดูดซับที่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟตที่มีอัตราส่วนของเส้นใย 1:0

ซึ่งเป็นเส้นใยนุ่มเพียงอย่างเดียว (S8) จะพบว่า วัสดุคูดซับมีค่าความชื้นร้อยละ  $8.22 \pm 0.34$  ซึ่งมีค่าความชื้นมากกว่าวัสดุคูดซับที่เป็นเส้นใยเรยอนเพียงอย่างเดียว (S40) ที่มีค่าความชื้นร้อยละ  $6.62 \pm 0.42$  ดังตารางที่ 4.6 นอกจากนี้ได้ทำการตรวจวิเคราะห์แผ่นกรองคาร์บอนที่มีขายทางการค้า พบว่ามีค่าความชื้นร้อยละ  $1.26 \pm 0.46$  น้อยกว่าวัสดุคูดซับที่ได้เตรียมขึ้น

โดยวัสดุคูดซับที่ดีควรมีค่าความชื้นต่ำ เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะนำวัสดุคูดซับที่มีความเป็นไฮโดรโฟบิกไปคูดซับแก๊สบีเท็กซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีประจุเช่นเดียวกัน ดังนั้นถ้าวัสดุคูดซับมีความชื้นมากจะทำให้มีปริมาณโมเลกุลของน้ำที่มีประจุในตัววัสดุคูดซับเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพการคูดซับทำให้ความสามารถในการคูดซับแก๊สที่ไม่มีประจุน้อยลง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2554) นอกจากนี้ความชื้นยังเป็นสาเหตุให้วัสดุคูดซับเป็นเชื้อราได้ง่าย (วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล, 2547)

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าความชื้นของวัสดุคูดซับ

ตัวอย่างวัสดุคูดซับ			ค่าความชื้น (ร้อยละ)
อัตราส่วนผสมของเส้นใยนุ่มต่อเส้นใยเรยอน	อัตราส่วนผสมของน้ำยาลิวโคสต่อหน้า	เกลือโซเดียมซัลเฟต (กรัม)	
1:0	1:6	50	$8.22 \pm 0.34$
1:1	1:6	50	$8.03 \pm 0.88$
1:1	1:6	0	$7.89 \pm 0.52$
1:1	1:0	0	$15.68 \pm 0.75$
1:1	1:2	50	$5.14 \pm 0.49$
1:1	1:4	50	$4.4 \pm 0.13$
แผ่นกรองคาร์บอน			$1.26 \pm 0.46$

หมายเหตุ : อัตราส่วนผสมระหว่างเส้นใยนุ่มต่อเส้นใยเรยอน 1:0, 3:1, 1:1, 1:3 และ 0:1 ในการเตรียมวัสดุคูดซับจะคิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 โดยน้ำหนัก (กรัม:กรัม) และอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาลิวโคสต่อหน้า 1:0, 1:2, 1:4 และ 1:6 ในการเตรียมวัสดุคูดซับจะคิดเป็นร้อยละ 100:0, 34:66, 20:80 และ 14:86 โดยน้ำหนัก (กรัม:กรัม)

#### 4.3 การคัดเลือกวัสดุคูดซับที่เหมาะสมสำหรับคูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก

จากการเตรียมวัสดุคูดซับและนำวัสดุคูดซับที่ได้มาศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ การสังเกตด้วยตาเปล่า โครงสร้างพื้นผิว ความหนืด ความหนาแน่น ความชื้น และพื้นที่ผิวของวัสดุคูดซับ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 เพื่อหาวัสดุคูดซับที่มีความเหมาะสม

ไปดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก ซึ่งในการคัดเลือกวัสดุดูดซับจะคำนึงถึงอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำมากที่สุด เนื่องจาก ในการทดลองพบว่าอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากในการเตรียมวัสดุดูดซับ

ตารางที่ 4.8 สรุปผลการวิเคราะห์และคัดเลือกวัสดุดูดซับที่ได้เตรียมขึ้น

พารามิเตอร์	วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ (กรัม:กรัม)			
	1:0	1:2	1:4	1:6
1. สังเกตด้วยตาเปล่า	ไม่ผ่านเพราะเป็นก้อนแข็ง มียางเคลือบ	ไม่ผ่านเพราะเป็นก้อนแข็งมียางเคลือบ	ผ่านเพราะมีลักษณะเหมือนฟองน้ำ	ผ่านเพราะมีลักษณะเหมือนฟองน้ำ
2. โครงสร้างพื้นผิว	ไม่ผ่านเพราะเส้นใยอัดตัวกันแน่น	ไม่ผ่านเพราะเส้นใยอัดตัวกันแน่น	ผ่านเพราะเส้นใยมีการกระจายตัว	ผ่านเพราะเส้นใยมีการกระจายตัว
3. ความหนืด (เซนติพอยส์)	ไม่ผ่านเพราะมีความหนืดมากถึง 6,675	ผ่านเพราะมีความหนืด 72	ผ่านเพราะมีความหนืด 35.3	ผ่านเพราะมีความหนืดเพียง 23.3
4. ความหนาแน่นที่แท้จริง (กรัม/ซีซี)	N/A	N/A	N/A	ผ่าน 1.03-1.30
5. ความชื้น (ร้อยละ)	ไม่ผ่านเพราะมีความชื้นมากกว่าร้อยละ 10 15.68± 0.75	5.14±0.49	4.48±0.13	ผ่านเพราะมีความชื้นร้อยละประมาณ 6-8
6. พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	ไม่ผ่าน 1.57	N/A	N/A	ผ่าน 5.54

หมายเหตุ: เครื่องหมาย N/A หมายถึงไม่ได้วิเคราะห์

เมื่อศึกษาวัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้นจากหลักเกณฑ์ต่างๆ ดังตารางที่ 4.8 พบว่า วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำในอัตราส่วน 1:0 และ 1:2 ไม่ผ่านการคัดเลือกในการนำมาเป็นอัตราส่วนผสมในการเตรียมวัสดุดูดซับ แต่พบว่าอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:4 และ 1:6 ผ่านการคัดเลือกที่จะนำมาเป็นอัตราส่วนผสมในการทำ

วัสดุคูดซับ เนื่องจากน้ำยาวิสโคสที่มีน้ำมาผสมมาก จะมีความหนืดน้อยลง ทำให้ขึ้นรูปวัสดุคูดซับ ได้สมบูรณ์ วัสดุคูดซับที่ได้ก็จะมีลักษณะเหมือนฟองน้ำ มีความยืดหยุ่นดี เหมาะสมที่จะนำมาทำ เป็นวัสดุคูดซับ

จากการศึกษาและวิเคราะห์การขึ้นรูปวัสดุคูดซับทั้งหมด พบว่า ในการทดลองนี้จะเลือกใช้วัสดุคูดซับทั้งหมด 7 อัตราส่วน ได้แก่ วัสดุคูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใย หนุนต่อเส้นใยเรยอน 1:1 โดยน้ำหนัก แต่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำแตกต่างกัน จำนวน 3 อัตราส่วน (S20, S22 และ S24) และวัสดุคูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:6 โดย น้ำหนัก แต่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยหนุนต่อเส้นใยเรยอนต่างกัน จำนวน 5 อัตราส่วน (S20, S22, S24, S32 และ S40) ซึ่งวัสดุคูดซับทั้งหมดที่เลือกใช้นำไปคูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก จะเป็นวัสดุคูดซับที่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต 50 กรัม(โดยน้ำหนัก) เนื่องจากเกลือโซเดียมซัลเฟตที่ใส่ ลงไปจะไปแทรกอยู่ระหว่างเส้นใยต่างๆ ทำให้เกิดเป็นช่องว่างเพิ่มมากขึ้นซึ่งจะส่งผลให้พื้นที่ผิว ของวัสดุคูดซับเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.9

เหตุผลที่เลือกวัสดุคูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยหนุนต่อเส้นใย เรยอน 1:1 โดยน้ำหนัก แต่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำแตกต่างกัน จำนวน 3 อัตราส่วน (S20, S22 และ S24) เนื่องจาก วัสดุคูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำแตกต่างกัน อาจส่งผลต่อการคูดซับสารบีเท็กแตกต่างกัน ซึ่งจากการทดลองเตรียมวัสดุคูดซับ พบว่า เมื่อนำ น้ำมาเจือจางน้ำยาวิสโคสมากขึ้น จะได้วัสดุคูดซับที่มีความฟู ยืดหยุ่นได้ดี มีลักษณะคล้ายฟองน้ำ ผิวภายนอกของวัสดุคูดซับไม่มียางเหนียวๆ มาเคลือบอยู่บนพื้นผิว

ตารางที่ 4.9 อัตราส่วนของวัสดุคูดซับที่นำมาใช้คูดซับแก๊สบีเท็ก

น้ำยาวิสโคส : น้ำ หนุน : เรยอน	น้ำยาวิสโคส : น้ำ			
	1 : 0	1 : 2	1 : 4	1 : 6
1 : 0	S2	S4	S6	S8
3 : 1	S10	S12	S14	S16
1 : 1	S18	S20	S22	S24
1 : 3	S26	S28	S30	S32
0 : 1	S34	S36	S38	S40

หมายเหตุ : ตัวอักษร S แล้วตามด้วยหมายเลข ใช้เป็นชื่อวัสดุคูดซับในอัตราส่วนต่างๆ

:  ตัวอย่างวัสดุคูดซับที่จะนำไปใช้คูดซับแก๊สบีเท็ก

และเหตุผลที่เลือกวัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:6 โดยน้ำหนัก แต่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยนุ่มต่อเส้นใยเรยอนต่างกัน จำนวน 5 อัตราส่วน (S20, S22, S24, S32 และ S40) เนื่องจาก อัตราส่วนผสมของเส้นใยที่ต่างกันอาจจะส่งผลต่อการดูดซับสารบีเท็กได้แตกต่างกัน ซึ่งวัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยนุ่มมากจะมีแนวโน้มในการกำจัดสารบีเท็กได้มากกว่า เนื่องจาก เส้นใยนุ่มเป็นเส้นใยที่มีลักษณะความเป็นไฮโดรโฟบิกสูง และมีรูกลวงตรงกลางเส้นใยส่งผลให้มีพื้นที่ผิวมากกว่าเส้นใยเรยอนที่มีลักษณะเป็นเส้นใยทึบและมีความเป็นไฮโดรโฟบิกต่ำ

#### 4.4 การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับบีเท็ก

ในการทดลองหาประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับเพื่อกำจัดสารบีเท็กผ่านคอลัมน์ดูดซับ จะต้องคำนึงถึงหลายปัจจัยที่จะส่งผลต่อการดูดซับ อาทิ อัตราการไหลของแก๊ส ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นของสารเริ่มต้น การเป็คคอลัมน์ อุณหภูมิ ระยะเวลาและปริมาตรของแก๊สที่จะเก็บไปตรวจวัด

##### 4.4.1 อัตราการไหลของแก๊สและระยะเวลาสัมผัส

อัตราการไหลของแก๊สเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดูดซับเป็นอย่างมาก เนื่องจากถ้ามีการปล่อยแก๊สผ่านคอลัมน์ดูดซับเร็วเกินไป จะทำให้แก๊สบีเท็กมีเวลาสัมผัสกับวัสดุดูดซับที่อยู่ในคอลัมน์ดูดซับน้อย ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ ในการทดลองนี้ได้ใช้อัตราการไหลของแก๊สผ่านคอลัมน์ประมาณ 6-8 ลิตรต่อชั่วโมง (Standeker และคณะ, 2009) และใช้ระยะเวลาที่แก๊สสัมผัสกับสารบีเท็ก 25 นาที

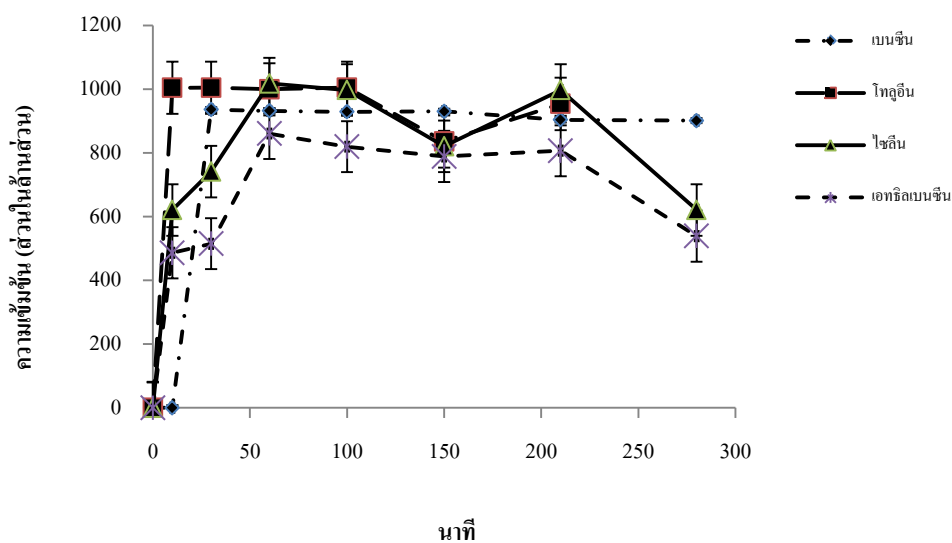
##### 4.4.2 อุณหภูมิ

การทดลองนี้ได้ใช้อุณหภูมิห้อง  $32 \pm 2$  องศาเซลเซียส (Standeker และคณะ, 2009) เนื่องจากสารที่ใช้ในการระเหยเป็นไอ เป็นสารอินทรีย์ระเหยง่ายสามารถระเหยกลายเป็นไอกระจายตัวไปในอากาศได้ง่ายที่อุณหภูมิห้องและความดันปกติ (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) ซึ่งก่อนหน้านี้ได้ทำการทดลองต้มสารละลายบีเท็กที่จุดเดือด ประมาณ 80 และ 95 องศาเซลเซียสเพื่อสังเกตความเข้มข้นของสารที่เกิดขึ้นพบว่า ความเข้มข้นของไอระเหยที่ได้มีความเข้มข้นเข้าระบบไม่คงที่ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการต้มควบคุมได้ยาก นอกจากนี้ยังพบปัญหาการควบแน่นของสารในระบบจากไอระเหยของแก๊สกลายเป็นของเหลวทำให้ มีของเหลวเกิดขึ้นในคอลัมน์ดูดซับและในถุงที่มีการเก็บแก๊ส และจากการศึกษาพบว่าหากแก๊สที่เข้าคอลัมน์ดูดซับมีความร้อนสูงส่งผลต่อการดูดซับ เพราะจะทำให้เกิดการคายซับ (Desorption)

#### 4.4.3 อัตราความเข้มข้นของสารเริ่มต้น

ในการทดลองนี้จะใช้เวลาตั้งสารทิ้งไว้ประมาณ 25-35 นาที เพื่อคุมความเข้มข้นเริ่มต้นก่อนเข้าระบบให้คงที่ ก่อนจะปล่อยสารเข้าระบบในแต่ละรอบ ดังแสดงในภาพที่ 4.10 เนื่องจากได้ทำการทดลองหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่สารทั้ง 4 ชนิดจะระเหยกลายเป็นไอที่มีความเข้มข้นของแก๊สใกล้เคียงกัน จากการทดลองพบว่า สารเบนซีนและโทลูอินมีความเข้มข้นของแก๊สเริ่มต้น ในช่วงเวลาที่ 10 และ 20 นาที ใกล้เคียงกันประมาณ 850-1,000 ส่วนในล้านส่วน เนื่องจากเบนซีนและโทลูอินมีจุดเดือดใกล้เคียงกัน ประมาณ 80.1 และ 86.7 องศาเซลเซียสตามลำดับ ในขณะที่ไซลีนและเอทิลเบนซีน ที่มีจุดเดือดประมาณ 137-144 และ 136.2 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 10 และ 20 นาทีมีค่าความเข้มข้นไอระเหยของแก๊สน้อยกว่าสารสองชนิดแรก ซึ่งมีค่าความเข้มข้นของไอระเหยประมาณ 400-800 ส่วนในล้านส่วน และในช่วงเวลา 25-60 นาที พบว่าสารทุกชนิดมีความเข้มข้นของไอระเหยเริ่มต้นคงที่ใกล้เคียงกันประมาณ 800-1200 ส่วนในล้านส่วน

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารก่อนเข้าระบบเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ เพราะถ้าไม่สามารถทราบความเข้มข้นเริ่มต้นที่คงที่จะทำให้คำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดสารบีเท็กของวัสดุดูดซับได้ยาก สารบีเท็กประกอบด้วย เบนซีน โทลูอิน ไซลีนและเอทิลเบนซีนซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมีแตกต่างกัน เช่น ความดันไอ จุดเดือด มวล โมเลกุล เป็นต้น โดยสารที่ได้จะระเหยเป็นไอได้มากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับความดันไอและจุดเดือดของสาร ซึ่งสารที่มีจุดเดือดต่ำจะมีความดันไอสูง ในขณะที่สารที่มีจุดเดือดสูงจะมีความดันไอต่ำ (กรมควบคุมมลพิษ, 2556: ออนไลน์)



ภาพที่ 4.10 ความเข้มข้นของไอระเหยของบีเท็ก



จากภาพที่ 4.10 จะพบว่าความเข้มข้นของแก๊สโทลูอินและเอทิลเบนซีนนาที่ที่ 280 มีความเข้มข้นลดลง เนื่องจากสารโทลูอินและสารเอทิลเบนซีนที่ผสมอยู่กับสารละลายในขวดเก็บแก๊สมีปริมาณลดลง เพราะว่าสารทั้ง 2 ชนิดที่อยู่ในรูปของเหลวได้ระเหยกลายเป็นไอตลอดเวลาและได้มีการนำแก๊สออก ส่งผลให้ปริมาณของสารในขวดเก็บแก๊สเริ่มต้นมีปริมาณลดลง ดังนั้นเมื่อปริมาณของเหลวที่ผสมอยู่กับสารละลายเริ่มลดลงก็จะทำให้ความเข้มข้นของแก๊สมีความเข้มข้นลดลงตามไปด้วย

#### 4.4.4 การแพ็คคอลัมน์ดูดซับ

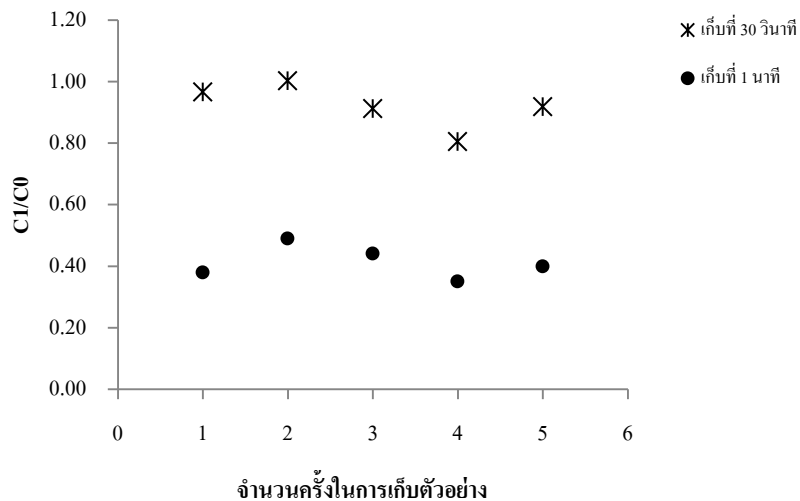
การแพ็คคอลัมน์ดูดซับจะใช้วิธีการชั่งน้ำหนักวัสดุดูดซับแต่ละชนิดจำนวน 2 กรัม มาบรรจุในคอลัมน์ดูดซับที่ทราบปริมาตรแน่นอน ในการทดลองนี้ใช้คอลัมน์ปริมาตร 15.386 ลูกบาศก์เซนติเมตร สาเหตุที่เลือกวัสดุดูดซับจำนวน 2 กรัมมาใส่คอลัมน์ เนื่องจากก่อนหน้านี้ได้ทำการทดลองชั่งน้ำหนักของวัสดุดูดซับ จำนวน 1, 1.5 และ 2.5 กรัม พบว่า วัสดุดูดซับจำนวน 2.5 กรัม เมื่อนำไปบรรจุในคอลัมน์ แล้วปล่อยแก๊สผ่านพบว่า แก๊สไหลผ่านออกจากคอลัมน์ได้น้อย เนื่องจากภายในคอลัมน์มีความหนาแน่นมาก และเมื่อนำวัสดุดูดซับจำนวน 1 และ 1.5 กรัมมาบรรจุใส่คอลัมน์แล้วปล่อยแก๊สผ่านพบว่าแก๊สจะไหลผ่านคอลัมน์ได้มาก เนื่องจากภายในคอลัมน์ดูดซับมีความหนาแน่นน้อย ปริมาณของวัสดุดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์น้อยไม่พอดีกับคอลัมน์

#### 4.4.5 ระยะเวลาและปริมาตรของแก๊ส

จากสูตร  $V = QT$  เมื่อ  $Q$  คือ อัตราการไหลของแก๊ส (ลิตรต่อชั่วโมง)  $T$  คือ เวลา (วินาที) และ  $V$  คือ ปริมาตรของแก๊ส (ลิตร) ซึ่งคำนวณได้จาก Mass (กรัม) / ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร) ดังนั้นจะพบได้ว่าปริมาตร น้ำหนักและความเข้มข้นของแก๊สจะไม่คงที่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและเวลาที่ปล่อยแก๊สเข้าไปยังอุปกรณ์เก็บแก๊ส ดังนั้นในการเก็บแก๊สไปตรวจวัดจะต้องมีการควบคุมระยะเวลาในการเก็บแก๊สให้เท่ากัน และคุมอัตราการไหลของแก๊สให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด

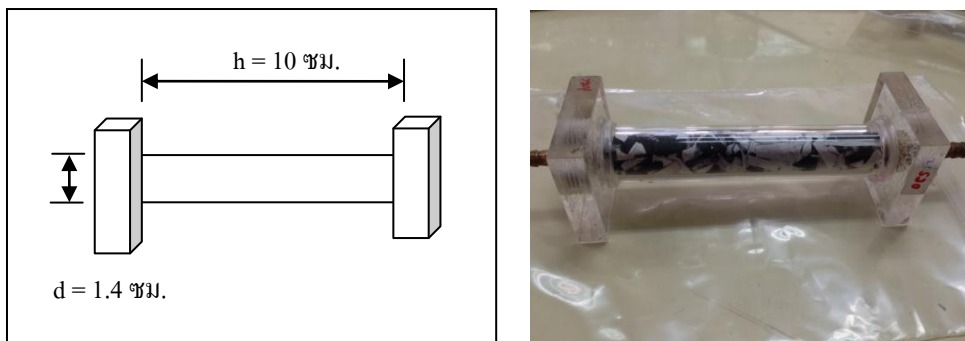
ซึ่งในการเก็บแก๊สเพื่อทำการตรวจวัดความเข้มข้นเริ่มต้นก่อนผ่านเข้าคอลัมน์และความเข้มข้นของไอระเหยหลังผ่านคอลัมน์ดูดซับ โดยไม่ใส่วัสดุดูดซับลงไปในคอลัมน์ โดยทำการเก็บไอระเหยของแก๊สด้วยถุงเก็บแก๊สที่มีปริมาตร 0.5 ลิตร อัตราการไหลของแก๊สประมาณ 6-8 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่อทำการเก็บแก๊สก่อนและหลังเข้าคอลัมน์อย่างละ 30 วินาที พบว่า ความเข้มข้นเริ่มต้นก่อนผ่านเข้าคอลัมน์มีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นของแก๊สหลังจากออกจากคอลัมน์ดูดซับ ดังภาพที่ 4.11 ในขณะที่เมื่อลองเก็บแก๊สก่อนและหลังเข้าคอลัมน์ดูดซับเป็นเวลา 1 นาที พบว่าความเข้มข้นของแก๊สก่อนและหลังเข้าคอลัมน์ดูดซับมีค่าไม่เท่ากัน ความเข้มข้นของแก๊สก่อนเข้า

คอลัมน์จะมีค่าสูงมากส่วนความเข้มข้นหลังออกจากคอลัมน์ดูดซับจะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกใช้เวลา 30 วินาทีในการเก็บแก๊สทั้งก่อนและหลังเข้าคอลัมน์ไปทำการตรวจวัด



ภาพที่ 4.11 ทหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเก็บไอระเหยของแก๊ส

4.4.6 คอลัมน์ดูดซับที่ใช้ในงานวิจัยนี้



ภาพที่ 4.12 คอลัมน์ดูดซับที่ใช้ในงานวิจัย

คอลัมน์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำขึ้นจากอะคริลิก มีเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 1.4 เซนติเมตร ความยาวของคอลัมน์เท่ากับ 10 เซนติเมตร ซึ่งในการทดลองจะบรรจุวัสดุดูดซับปริมาณ 2 กรัม เข้าไปในคอลัมน์ดูดซับ จะพบว่า ภายในคอลัมน์ดูดซับจะมีความหนาแน่นรวม (Bulk density) ประมาณ 130 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งคำนวณจากสูตร

$$\text{Bulk density} = M/V$$

เมื่อ	Bulk density	คือ ความหนาแน่นรวม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	M	คือ ปริมาณของวัสดุคูดซับที่ต้องการบรรจุในคอลัมน์ (กิโลกรัม)
	V	คือ ปริมาตรของวัสดุคูดซับในคอลัมน์ (ลูกบาศก์เมตร)

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นจะได้} \quad \text{Bulk density} &= (2 \text{ ก.}/15.393 \text{ ซม.}^3) \times (1 \text{ กก.}/100 \text{ ก.}) \\ &\quad \times [(100 \times 100 \times 100 \text{ ซม.}^3) / 1 \text{ ม.}^3] \\ &= 130 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความหนาแน่นรวมหรือค่าความหนาแน่นของวัสดุคูดซับรวมกับที่ว่างระหว่างชั้นวัสดุคูดซับภายในคอลัมน์มีค่าเท่ากับ 130 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

#### 4.4.7 การคำนวณหาปริมาตรของวัสดุคูดซับในคอลัมน์

ปริมาตรของวัสดุคูดซับในคอลัมน์ (Bed Volume) สามารถคำนวณได้จากสูตรด้านล่างนี้

$$\text{Bed Volume} = \frac{\pi d^2 h}{4} \quad (\text{ซม.}^3)$$

เมื่อ	d	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในคอลัมน์คูดซับ (เซนติเมตร)
	h	คือ ความสูงหรือความยาวของคอลัมน์คูดซับ (เซนติเมตร)

ในงานวิจัยนี้มีปริมาตรของวัสดุคูดซับในคอลัมน์ (Bed Volume) เท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{Bed Volume} &= \frac{\pi (1.4)^2 (10)}{4} \quad (\text{ซม.}^3) \\ &= 15.393 \text{ ซม.}^3 \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาตรของวัสดุคูดซับในคอลัมน์ เท่ากับ 15.393 ลูกบาศก์เซนติเมตร

#### 4.5 การนำวัสดุคูดซัฟที่ได้มาหาประสิทธิภาพในการกำจัดบีเท็ก

นำวัสดุคูดซัฟทั้ง 7 อัตราส่วน คือ วัสดุคูดซัฟที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:6 โดยน้ำหนัก แต่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอนต่างกัน (S20, S22, S24, S32 และ S40) และวัสดุคูดซัฟที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอน 1:1 โดยน้ำหนัก แต่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำแตกต่างกัน (S20, S22 และ S24) มาบรรจุในคอลัมน์คูดซัฟเพื่อคูดซัฟสารบีเท็ก ได้แก่ เบนซิน โทลูอิน ไซลีน เอทิลเบนซิน และสารผสมบีเท็ก ซึ่งพบว่าวัสดุคูดซัฟแต่ละชนิดมีความสามารถในการคูดซัฟสารแต่ละชนิดและสารผสมบีเท็กแตกต่างกัน ดังนี้

##### 4.5.1 เบนซิน

##### 4.5.1.1 วัสดุคูดซัฟที่มีอัตราส่วนของเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอนแตกต่างกัน

จากการทดลองนำวัสดุคูดซัฟไปคูดซัฟไอระเหยของสารเบนซิน พบว่าวัสดุคูดซัฟที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอน 1:0 โดยน้ำหนัก (S8) มีความสามารถในการคูดซัฟมากที่สุด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของเบนซินได้มากถึงร้อยละ  $78.84 \pm 10.01$  รองลงมาคือวัสดุคูดซัฟที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอน 3:1 โดยน้ำหนัก (S16) มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของเบนซินได้มากถึงร้อยละ  $73.13 \pm 7.27$  ซึ่งวัสดุคูดซัฟทั้ง 2 ตัวมีประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซินมากกว่าแผ่นกรองคาร์บอนที่เป็นวัสดุคูดซัฟทางการค้าที่มีความสามารถในการกำจัดเบนซินร้อยละ  $72.99 \pm 1.78$  ในขณะที่วัสดุคูดซัฟที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอน 1:1, 0:1 และ 1:3 โดยน้ำหนัก (S24, S40 และ S32) มีความสามารถในการกำจัดเบนซินได้น้อยกว่าแผ่นกรองคาร์บอน โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของเบนซินได้ร้อยละ  $66.32 \pm 11.12$ ,  $57.23 \pm 4.20$  และ  $52.46 \pm 12.45$  ตามลำดับ ซึ่งวัสดุคูดซัฟที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอน 1:3 โดยน้ำหนัก (S32) มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของเบนซินได้น้อยที่สุด ดังภาพที่ 4.13

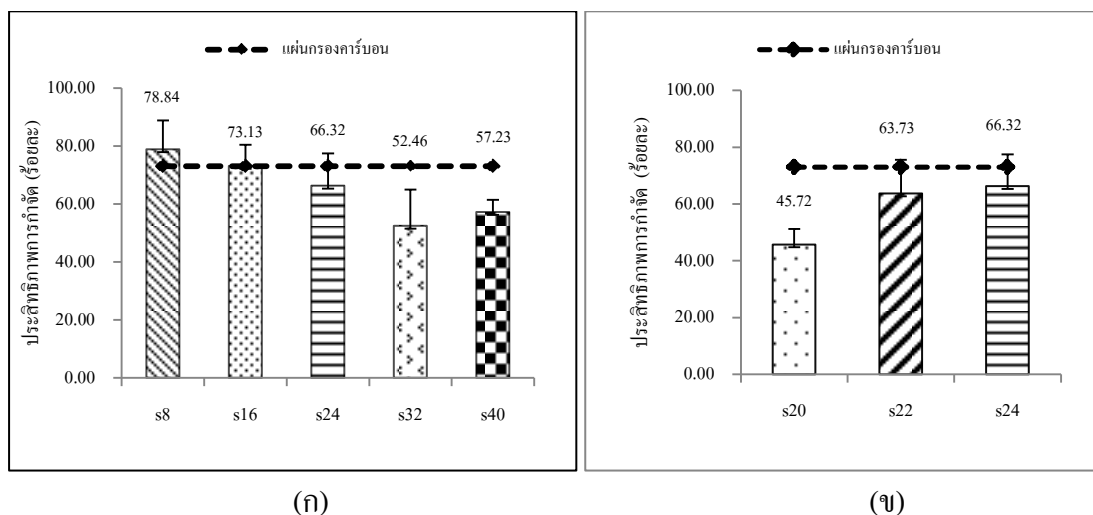
ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า วัสดุคูดซัฟที่มีปริมาณของเส้นใยุ่นผสมอยู่มากจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของสารเบนซินได้มากขึ้น เนื่องจากความเป็นไฮโดรโฟบิกของเส้นใยุ่นทำให้สามารถคูดซัฟไอระเหยของเบนซินที่เป็นโมเลกุลของสารที่ไม่มีขั้วเหมือนกันได้สูง และด้วยลักษณะของเส้นใยุ่นที่เป็นรูกลวงก็จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการคูดซัฟสารได้มากขึ้น และพบว่า เมื่อวัสดุคูดซัฟที่มีปริมาณของเส้นใยเรยอนเพิ่มมากขึ้นก็จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของเบนซินน้อยลง นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนของวัสดุคูดซัฟที่เป็นเส้นใยุ่นเพียง

อย่างเดียวมีประสิทธิภาพการกำจัดไอระเหยของสารเบนซีนได้มากกว่าแผ่นกรองคาร์บอนซึ่งเป็นวัสดุดูดซับทางการค้า

#### 4.5.1.2 วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำแตกต่างกัน

จากการทดลองพบว่า วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อ น้ำ 1:6 โดยน้ำหนัก (S24) มีความสามารถในการกำจัดไอระเหยของสารเบนซีนมากที่สุดร้อยละ  $66.32 \pm 11.12$  รองลงมาคือวัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:4 โดยน้ำหนัก (S22) มีความสามารถในการกำจัดไอระเหยของสารเบนซีนได้ร้อยละ  $63.73 \pm 11.84$  ในขณะที่วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:2 โดยน้ำหนัก (S20) มีความสามารถในการกำจัดไอระเหยของเบนซีนได้น้อยที่สุด สามารถกำจัดได้ร้อยละ  $45.72 \pm 5.46$  ซึ่งวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด มีความสามารถในการกำจัดไอระเหยของเบนซีนได้น้อยกว่าแผ่นกรองคาร์บอนซึ่งเป็นวัสดุดูดซับทางการค้า ซึ่งในการทดลองนี้สามารถกำจัดไอระเหยของเบนซีนได้ร้อยละ  $72.99 \pm 1.78$  ดังภาพที่ 4.13

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำมากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของสารเบนซีนเพิ่มมากขึ้น แต่มี ประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของสารโทลูอินน้อยกว่าแผ่นกรองคาร์บอนซึ่งเป็นวัสดุดูดซับที่ใช้ทางการค้า



ภาพที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดเบนซีนของวัสดุดูดซับ (ก) วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยต่างกัน (ข) วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำต่างกัน

#### 4.5.2 โทลูอิน

##### 4.5.2.1 วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอนแตกต่างกัน

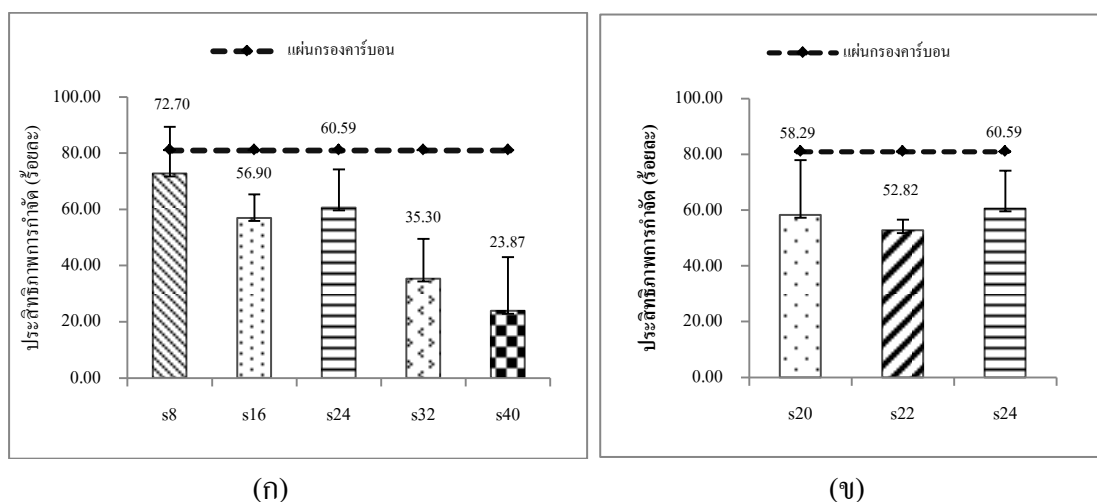
จากการทดลองนำวัสดุดูดซับมาดูดซับไอระเหยของโทลูอินผ่านคอลัมน์ดูดซับ พบว่า วัสดุดูดซับทั้ง 5 ชนิดมีความสามารถในการกำจัดไอระเหยของโทลูอินได้น้อยกว่าแผ่นกรองคาร์บอนที่เป็นวัสดุดูดซับทางการค้า ซึ่งสามารถกำจัดไอระเหยของโทลูอินได้ร้อยละ  $80.96 \pm 7.90$  ในขณะที่วัสดุดูดซับที่ได้เตรียมขึ้นมาพบว่า วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอน 1:0 โดยน้ำหนัก (S8) มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของโทลูอินได้มากที่สุด ซึ่งสามารถกำจัดได้ร้อยละ  $72.70 \pm 16.69$  ในขณะที่วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอน 1:1, 3:1 และ 1:3 โดยน้ำหนัก (S24, S16 และ S32) มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของโทลูอินได้ร้อยละ  $60.59 \pm 13.58$ ,  $56.90 \pm 8.44$  และ  $35.30 \pm 14.22$  ตามลำดับ และพบว่า วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอน 0:1 โดยน้ำหนัก (S40) สามารถกำจัดไอระเหยของสาร โทลูอินได้น้อยที่สุดเพียงร้อยละ  $23.87 \pm 19.17$  ดังภาพที่ 4.14

สามารถสรุปได้ว่า วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยุ่นเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของโทลูอินมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น และพบว่า วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยเรยอนเพิ่มมากขึ้นจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของสาร โทลูอินน้อยลง เนื่องจากเส้นใยเรยอนจะเป็นเส้นใยที่มีลักษณะที่บดทำให้มีพื้นที่ผิวน้อยกว่าเส้นใยุ่นแล้วเส้นใยเรยอนยังมีคุณสมบัติความเป็นไฮโดรโฟบิกน้อยกว่าเส้นใยุ่นด้วย

##### 4.5.2.2 วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำแตกต่างกัน

จากการทดลองนำวัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยเรยอนต่อเส้นใยุ่น 1:1 เหมือนกัน แต่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำแตกต่างกันมาดูดซับไอระเหยของสาร โทลูอิน พบว่า วัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดที่ได้เตรียมขึ้น มีความสามารถในการกำจัดไอระเหยของสาร โทลูอินได้น้อยกว่าวัสดุดูดซับทางการค้าที่นำมาใช้ในการดูดซับ คือ แผ่นกรองคาร์บอน ซึ่งแผ่นกรองคาร์บอนที่นำมาใช้ในการทดลองสามารถกำจัดไอระเหยของสาร โทลูอินได้มากถึงร้อยละ  $80.96 \pm 7.90$  ในขณะที่วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:6, 1:2 และ 1:0 โดยน้ำหนัก (S24, S20 และ S22) มีความสามารถในการกำจัดไอระเหยของสาร โทลูอินได้ร้อยละ  $60.59 \pm 13.58$ ,  $58.29 \pm 19.63$  และ  $52.82 \pm 3.82$  ตามลำดับ ซึ่งวัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:2 (S22) เป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสาร โทลูอินน้อยที่สุด

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคส ต่อหน้าเพิ่มมากขึ้น จะมีแนวโน้มประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของโทลูอินมากขึ้น ดังแสดงใน ภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดโทลูอินของวัสดุดูดซับ (ก) วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของ เส้นใยต่างกัน (ข) วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อหน้าต่างกัน

### 4.5.3 ไซลีน

#### 4.5.3.1 วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอนแตกต่างกัน

ในการนำวัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้นมาดูดซับไอระเหยของสารไซลีน พบว่า วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอน 3:1 โดยน้ำหนัก (S16) มีประสิทธิภาพ ในการกำจัดไอระเหยของไซลีนได้มากที่สุด รองลงมาคือวัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใย นุ่นต่อเส้นใย เรยอน 1:1, 1:0 และ 1:3 โดยน้ำหนัก (S24, S8 และ S32) ซึ่งวัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิด สามารถกำจัดไอระเหยของไซลีนได้ร้อยละ  $62.37 \pm 1.16$ ,  $60.67 \pm 15.34$ ,  $58.58 \pm 2.47$  และ  $48.35 \pm 15.62$  ตามลำดับ ซึ่งวัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของไซลีนได้ มากกว่าแผ่นกรองคาร์บอน ที่สามารถกำจัดไอระเหยของไซลีนได้เพียงร้อยละ  $46.79 \pm 10.86$  แต่ แผ่นกรองคาร์บอนก็ยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของไซลีนมากกว่าวัสดุดูดซับที่มีอัตรา ส่วนผสมของเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอน 0:1 โดยน้ำหนัก (S40) ที่สามารถกำจัดไอระเหยของไซลีน ได้น้อยที่สุดเพียงร้อยละ  $35.60 \pm 3.14$  ดังภาพที่ 4.15

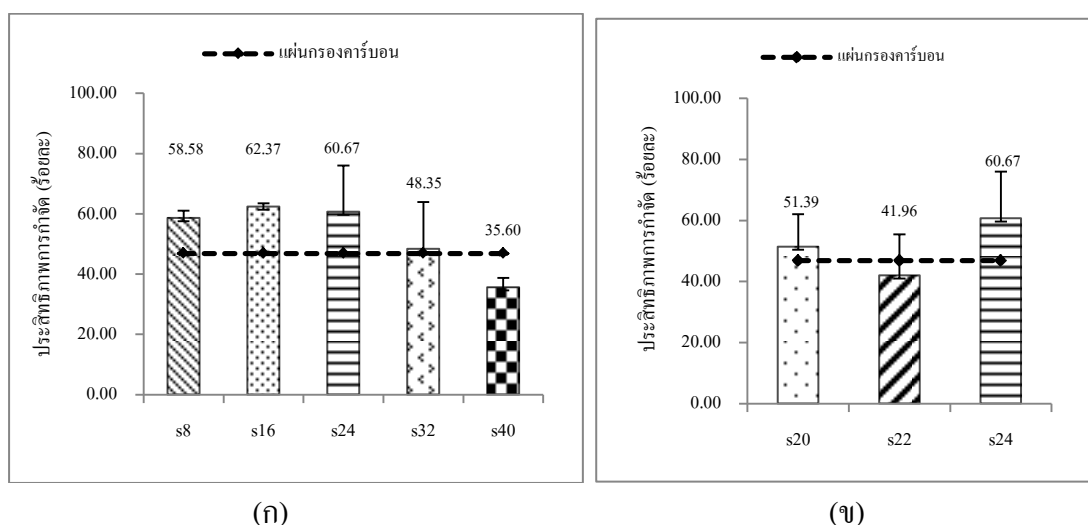
จากการทดลองสรุปได้ว่า วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยนุ่น มาก ก็จะมีแนวโน้มของประสิทธิภาพการกำจัดไอระเหยของไซลีนได้มากเช่นเดียวกัน ในขณะที่

วัสดุคูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยเรยอนเพิ่มมากขึ้น จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของไซลีนได้น้อยลง

#### 4.5.3.2 วัสดุคูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำแตกต่างกัน

จากการทดลองนำวัสดุคูดซับที่เตรียมขึ้นจากอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ พบว่า วัสดุคูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:6 และ 1:2 โดยน้ำหนัก (S24 และ S20) สามารถคูดซับไอระเหยของสารไซลีนได้มากกว่าแผ่นกรองคาร์บอน โดยสามารถกำจัดไอระเหยของไซลีนได้ร้อยละ 60.67±15.34 และ 51.39±10.70 ในขณะที่แผ่นกรองคาร์บอนสามารถกำจัดไอระเหยของไซลีนได้เพียงร้อยละ 46.79±10.86 แต่ยิ่งไปกว่าวัสดุคูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:4 โดยน้ำหนัก (S22) ซึ่งสามารถกำจัดไอระเหยของสารไซลีนได้เพียงร้อยละ 41.96±13.49 ดังภาพที่ 4.15

สามารถสรุปได้ว่า เมื่อนำน้ำมาเจือจางวิสโคสมากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของสารไซลีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดไซลีนของวัสดุคูดซับ (ก) วัสดุคูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยต่างกัน (ข) วัสดุคูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำต่างกัน

#### 4.5.4 เอทิลเบนซีน

##### 4.5.4.1 วัสดุคูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอนแตกต่างกัน

จากการทดลองนำวัสดุคูดซับที่ได้เตรียมขึ้นมาคูดซับไอระเหยของเอทิลเบนซีน พบว่า วัสดุคูดซับที่เตรียมขึ้นทั้ง 5 ชนิด มีความสามารถหรือประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของเอทิลเบนซีนน้อยกว่าวัสดุที่ขายตามท้องตลาดอย่างแผ่นกรองคาร์บอน ซึ่งสามารถ



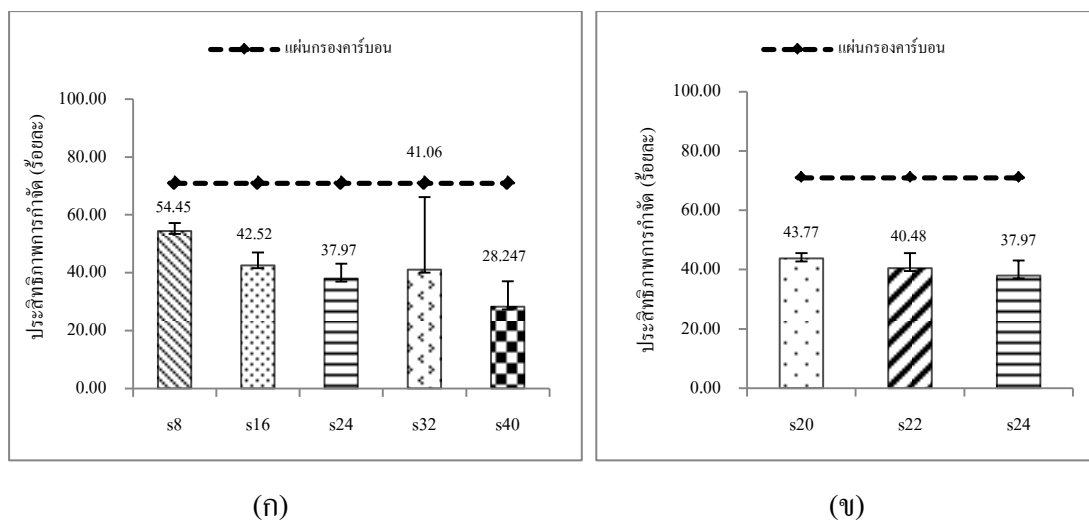
กำจัดไอรระเหยของเอทิลเบนซีนได้สูงถึงร้อยละ  $70.94 \pm 1.57$  ในขณะที่วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอน 1:0 โดยน้ำหนัก (S8) มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอรระเหยของสารเอทิลเบนซีนได้เพียงร้อยละ  $54.45 \pm 2.72$  ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอรระเหยของสารเอทิลเบนซีนมากที่สุด รองลงมาคือ วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอน 3:1, 1:3 และ 1:1 (S16, S32 และ S24) ซึ่งสามารถกำจัดไอรระเหยของเอทิลเบนซีนได้ร้อยละ  $42.52 \pm 4.46$ ,  $41.06 \pm 25.13$  และ  $37.97 \pm 5.14$  และพบว่า วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอน 0:1 โดยน้ำหนัก (S40) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เตรียมขึ้นจากเส้นใยเรยอนเพียงอย่างเดียว มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอรระเหยของสารเอทิลเบนซีนน้อยที่สุดซึ่งสามารถกำจัดไอรระเหยได้เพียงร้อยละ  $28.25 \pm 8.76$

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า วัสดุดูดซับที่มีเส้นใยุ่นเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดไอรระเหยของเอทิลเบนซีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และวัสดุดูดซับที่มีเส้นใยเรยอนมากขึ้นก็จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอรระเหยของเอทิลเบนซีนน้อยลง ดังภาพที่ 4.16

#### 4.5.4.2 วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำแตกต่างกัน

จากการทดลองพบว่า วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:2, 1:4 และ 1:6 โดยน้ำหนัก (S20, S22 และ S24) มีประสิทธิภาพการกำจัดไอรระเหยของเอทิลเบนซีนได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งวัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:0 โดยน้ำหนัก (S20) สามารถกำจัดไอรระเหยของเอทิลเบนซีนได้สูงสุดร้อยละ  $43.77 \pm 1.78$  เมื่อเทียบกับวัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้น รองลงมาคือวัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:2 โดยน้ำหนัก (S22) สามารถกำจัดไอรระเหยของเอทิลเบนซีนได้ร้อยละ  $40.48 \pm 5.07$  และวัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:6 โดยน้ำหนัก (S24) ซึ่งมีความสามารถในการกำจัดไอรระเหยของเอทิลเบนซีนได้น้อยสุด โดยกำจัดได้ร้อยละ  $37.97 \pm 5.14$  ในขณะที่แผ่นกรองคาร์บอนสามารถกำจัดไอรระเหยของเอทิลเบนซีนได้มากถึงร้อยละ  $70.94 \pm 1.57$  ซึ่งกำจัดไอรระเหยได้มากกว่าวัสดุดูดซับที่ได้เตรียมขึ้นเอง ดังภาพที่ 4.16

จากการทดลองไม่สามารถสรุปได้ว่า ปริมาณของวิสโคสที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดไอรระเหยของเอทิลเบนซีนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากประสิทธิภาพในการกำจัดไอรระเหยของเอทิลเบนซีน มีค่าใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วนผสม และเนื่องจากการหาประสิทธิภาพในการกำจัดไอรระเหยของเบนซีน โทลูอินและไซลีน พบว่า วัสดุดูดซับที่มีปริมาณวิสโคสเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดไอรระเหยของสารจะลดน้อยลงเหมือนกัน เพราะว่สารกลุ่มนี้มีความดันไอและน้ำหนักโมเลกุลที่ไม่ต่างกันมากนัก ดังนั้นผลการทดลองน่าจะออกมาในทิศทางเดียวกัน



ภาพที่ 4.16 ประสิทธิภาพการกำจัดเอทิลเบนซีนของวัสดุคูดซับ (ก) วัสดุคูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยต่างกัน (ข) วัสดุคูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิส โคสต่อน้ำต่างกัน

#### 4.5.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุคูดซับในการกำจัดไอระเหยของสารแต่ละชนิด

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้จากการหาประสิทธิภาพการกำจัดไอระเหยของสารบีเท็กแต่ละชนิดของวัสดุคูดซับทั้งหมดที่เตรียมขึ้นมาเปรียบเทียบกัน เพื่อหาวัสดุคูดซับที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดไอระเหยของสารบีเท็ก โดยนำมาเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการกำจัดไอระเหยของสารบีเท็กของสารทุกชนิด

##### 4.5.5.1 วัสดุคูดซับที่มีอัตราส่วนของเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอนแตกต่างกัน

จากการทดลอง พบว่า วัสดุคูดซับวัสดุคูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอน 1:0, 3:1 และ 1:1 โดยน้ำหนัก (S8, S16 และ S24) มีความสามารถในการกำจัดสารบีเท็กเกือบทุกชนิดได้สูงกว่าค่าเฉลี่ย ดังภาพที่ 4.17 (ก) โดยวัสดุคูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอน 1:0 โดยน้ำหนัก (S8) ที่เตรียมขึ้นจากอัตราส่วนผสมที่เป็นเส้นใยนุ่นเพียงอย่างเดียว มีประสิทธิภาพการกำจัดไอระเหยของสารทุกชนิดมากกว่าค่าเฉลี่ยในการกำจัดไอระเหยของสารทั้งหมด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอของสารได้ร้อยละ 54.45-78.84 ซึ่งมีประสิทธิภาพการดูดซับใกล้เคียงกับแผ่นกรองคาร์บอนที่สามารถกำจัดไอระเหยของสารแต่ละชนิดได้ร้อยละ 46.78-80.96 ในขณะที่วัสดุคูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอน 3:1 และ 1:1 โดยน้ำหนัก (S16 และ S24) มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของเอทิลเบนซีน น้อยกว่าค่าเฉลี่ย แต่สามารถกำจัดสารเบนซีน เอทิลเบนซีนและไซลีนได้มากกว่าค่าเฉลี่ย และจากภาพ

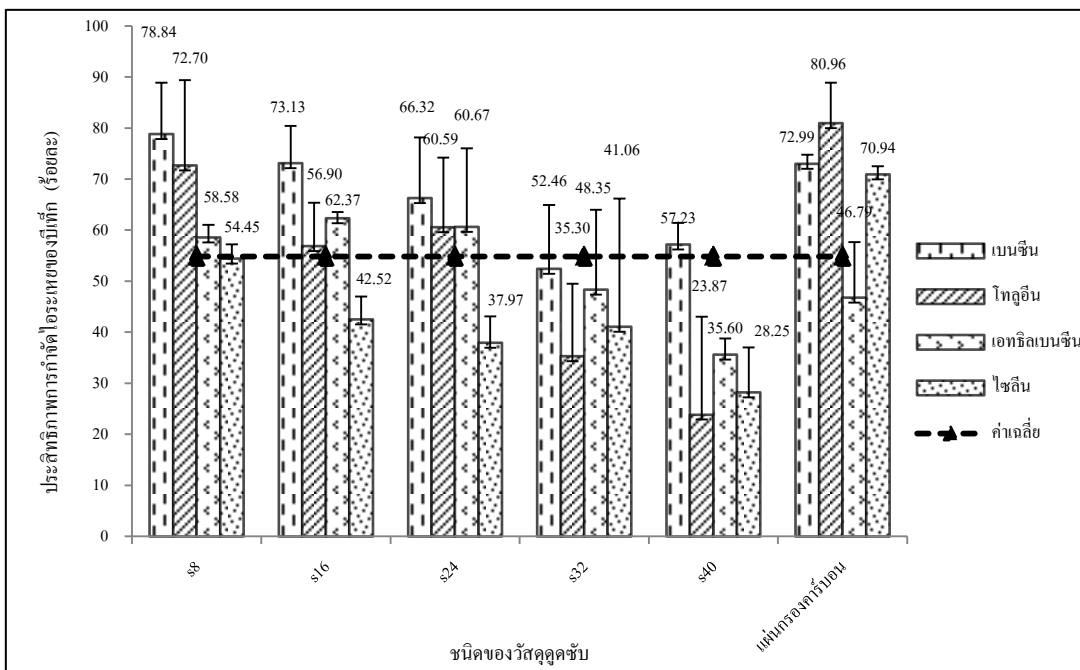
พบว่าวัสดุดูดซับ S32 และ S40 มีประสิทธิภาพการกำจัดไอระเหยของบีเท็กเกือบทุกชนิดน้อยกว่าค่าเฉลี่ย

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยุ่น ต่อเส้นใยเรยอน 1:0 โดยน้ำหนัก (S8) เป็นวัสดุดูดซับที่ดีที่สุดในการนำมาดูดซับไอระเหยของ บีเท็กแต่ละชนิด เพราะว่าเป็นอัตราส่วนที่มีเส้นใยุ่นเพียงอย่างเดียว ซึ่งคุณสมบัติความเป็น ไฮโดรโฟบิกของเส้นใยุ่นจะช่วยในการดูดซับสารที่ไม่มีขั้วเหมือนกัน ได้มากขึ้นและจาก ลักษณะเฉพาะของเส้นใยุ่นที่มีรูกลวงตรงกลางส่งผลให้วัสดุดูดซับมีพื้นที่ผิวมากขึ้นด้วย ซึ่งจากเหตุผลข้างต้นจึงทำให้วัสดุดูดซับ S8 สามารถดูดซับสารได้มากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ

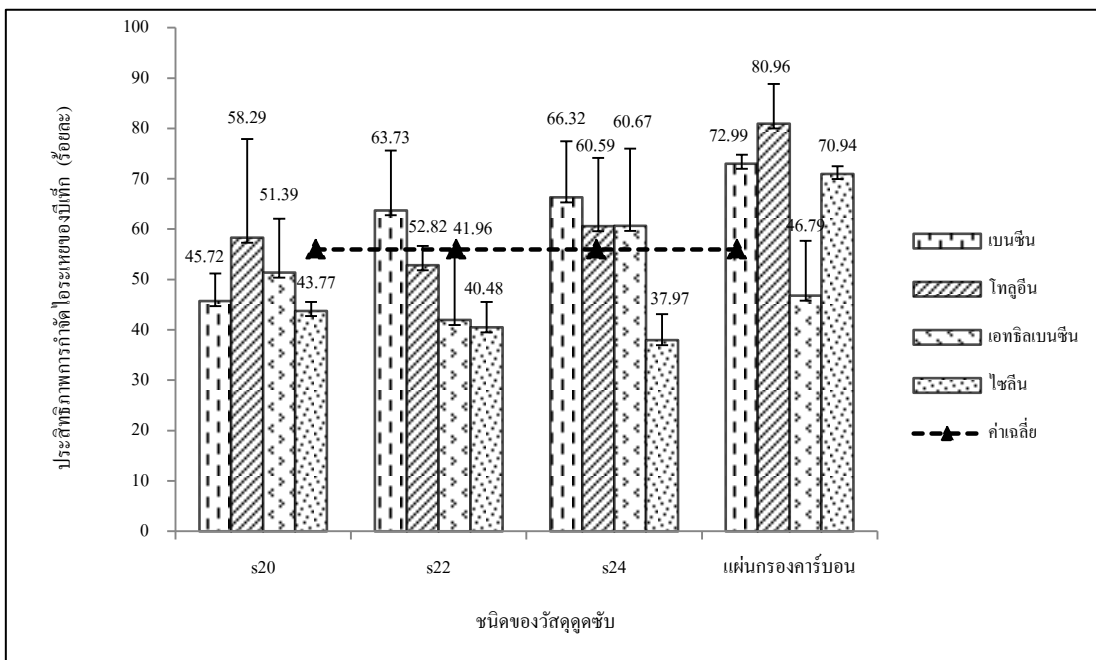
#### 4.5.5.2 วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำแตกต่างกัน

จากภาพที่ 4.17 (ข) พบว่า วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคส ต่อน้ำ 1:6 โดยน้ำหนัก (S24) มีประสิทธิภาพการกำจัดไอระเหยของสารบีเท็กเกือบทุกชนิดสูงกว่าค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการกำจัดไอระเหยของบีเท็กทั้งหมด โดยสามารถกำจัดไอระเหยของสารแต่ละชนิดได้ประมาณร้อยละ 60.67-66.32 แต่สามารถกำจัดไอระเหยของเอทิลเบนซีนได้เพียง ร้อยละ 37.97 ในขณะที่แผ่นกรองคาร์บอนสามารถกำจัดไอระเหยของสารบีเท็กเกือบทุกชนิดเกินค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณร้อยละ 70.94-80.96 แต่สามารถกำจัดไอระเหยของไซลีนได้เพียง 46.79 ซึ่งน้อยกว่าค่าเฉลี่ย ในขณะที่วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:2 และ 1:4 (S20 และ S22) สามารถกำจัดไอระเหยบีเท็กของสารแต่ละชนิดน้อยกว่าค่าเฉลี่ย

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคส ต่อน้ำ 1:6 (S24) เป็นวัสดุดูดซับที่ดีที่สุดในการนำมาดูดซับไอระเหยบีเท็กของสารแต่ละชนิด เพราะน้ำยาวิสโคสที่ใช้ขึ้นรูปวัสดุดูดซับมีการเจือจางด้วยน้ำมากกว่าอัตราส่วนอื่น ทำให้ความหนืดของวิสโคสน้อยลงเมื่อนำมาเตรียมขึ้นรูปเป็นวัสดุดูดซับ จะสามารถขึ้นรูปได้สมบูรณ์ ไม่มียางเคลือบที่ผิว (วิวัฒน์ ตันชนะพานิชกุล, 2547) เมื่อศึกษางานวิจัยของคุณปนัดดา คงศรีเจริญ ที่ได้มีการทำวัสดุดูดซับเพื่อนำไปดูดซับน้ำมัน โดยมีการขึ้นรูปวัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยุ่น และเส้นใยเรยอนและอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำเช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ พบว่า วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:6 เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุด สามารถดูดซับไอระเหยของน้ำมันทั้ง 3 ชนิดได้สูงสุด เมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่นๆ (ปนัดดา คงศรีเจริญ, 2555)



(ก) วัสดุคูดซั้บที่มีอัตราส่วนของเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอนแตกต่างกัน



(ข) วัสดุคูดซั้บที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิส โคสต่อน้ำต่างกัน

ภาพที่ 4.17 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุคูดซั้บในการกำจัดไอระเหยของสารแต่ละชนิด

#### 4.5.6 สารผสมบีเท็ก

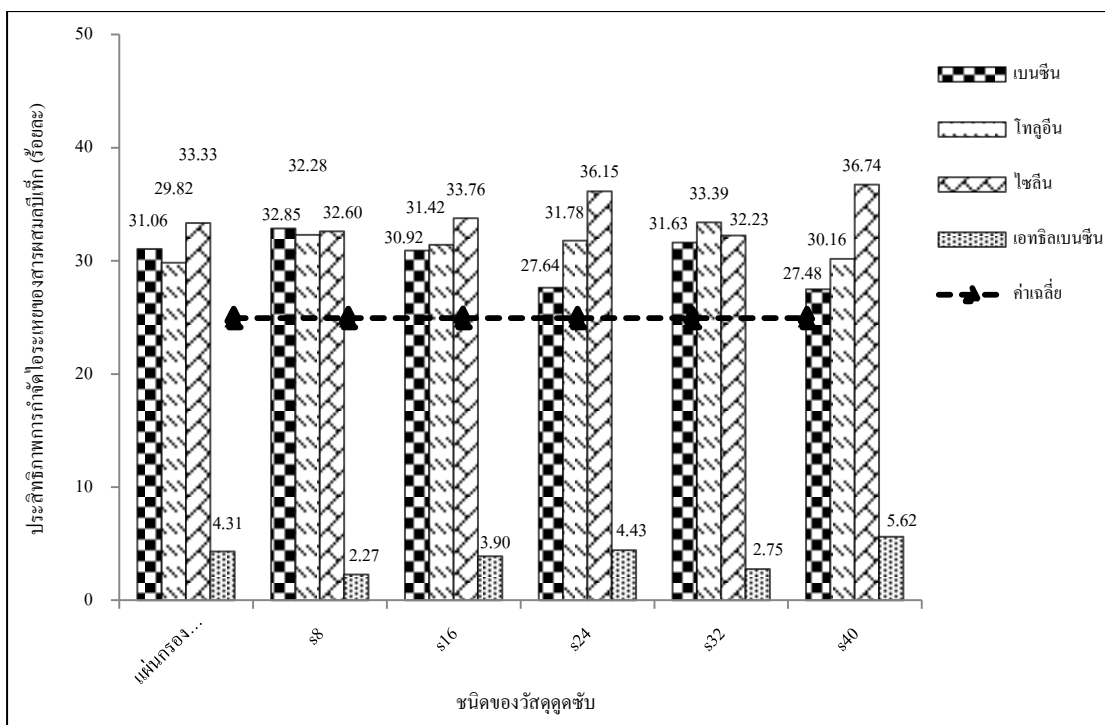
เมื่อนำสารเบนซีน โทลูอิน ไซลีน และเอทิลเบนซีนมาผสมกันแล้วนำวัสดุดูดซับที่เตรียมได้มาดูดซับไอระเหยของสารผสมบีเท็กผ่านคอลัมน์ดูดซับ เพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของสารผสมบีเท็ก พบว่า

##### 4.5.6.1 วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนของเส้นใยนุ่มต่อเส้นใยเรยอนแตกต่างกัน

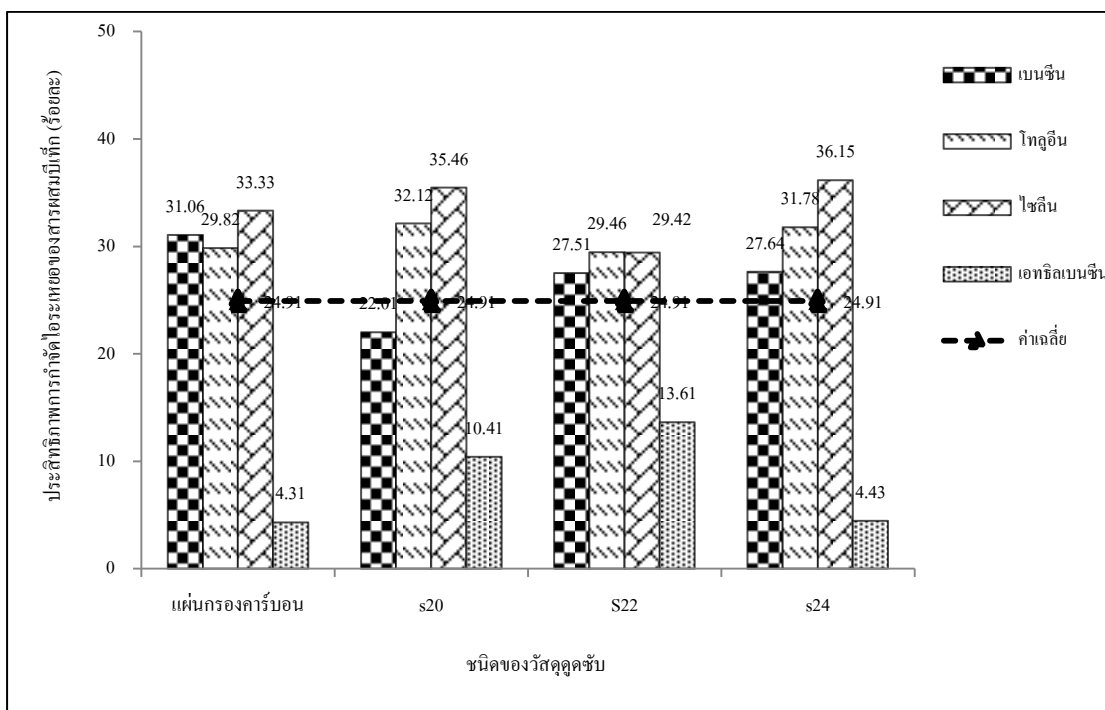
จากการทดลองพบว่า วัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้นทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยนุ่มต่อเส้นใยเรยอน 1:0, 3:1, 1:1, 1:3 และ 0:1 โดยน้ำหนัก (S8, S16, S24, S32 และ S40) รวมทั้งแผ่นกรองคาร์บอนที่เป็นวัสดุดูดซับทางการค้า มีแนวโน้มร้อยละของการดูดซับไอระเหยของเบนซีน โทลูอินและไซลีน ที่เป็นสารผสมบีเท็กสูงกว่าค่าเฉลี่ย และพบว่าสามารถกำจัดไอระเหยของสารเอทิลเบนซีนในสารผสมบีเท็กได้น้อยที่สุด เนื่องจากเอทิลเบนซีนเป็นสารที่มีจุดเดือดสูง ส่งผลให้ความดันไอของสารต่ำ อาจส่งผลให้ปริมาตรของสารเอทิลเบนซีนระเหยกลายเป็นไอได้น้อยกว่าสารชนิดอื่น ดังนั้นเมื่อสารผสมบีเท็กผ่านคอลัมน์ดูดซับ ไอระเหยของสารแต่ละชนิดจะถูกดูดซับไว้บนวัสดุดูดซับ ซึ่งไอระเหยของสารที่มีปริมาณมากกว่าจะสามารถถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับได้ดีกว่า

##### 4.5.6.2 วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำแตกต่างกัน

จากภาพที่ 4.18 (ข) พบว่าวัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:2, 1:4 และ 1:6 โดยน้ำหนัก (S20, S22, S24) และแผ่นกรองคาร์บอนมีประสิทธิภาพการกำจัดไอระเหยของสาร โทลูอินและไซลีนซึ่งเป็นสารผสมบีเท็กมากกว่าค่าเฉลี่ย ในขณะที่วัสดุดูดซับทุกชนิดสามารถกำจัดไอระเหยของสารเอทิลเบนซีนได้น้อยที่สุด และจากการทดลองพบว่า วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคส 1:6 โดยน้ำหนัก (S24) มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของสารผสมบีเท็กได้มากที่สุด



(ก) วัสดุคลุมที่มีอัตราส่วนของเส้นใยุ่นต่อเส้นใยเรยอนแตกต่างกัน



(ข) วัสดุคลุมที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำต่างกัน

ภาพที่ 4.18 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุคลุมชั้นในการกำจัดไอระเหยของสารผสมบีทีที

#### 4.5.7 ความแตกต่างของการดูดซับสารอินทรีย์ที่ไม่เท่ากัน

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารบีเท็กแต่ละชนิด พบว่า วัสดุดูดซับสามารถดูดซับสารอินทรีย์แต่ละชนิดไม่เท่ากัน เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารแต่ละตัวมีความแตกต่างกัน เช่น ความดันไอ น้ำหนักโมเลกุลและจุดเดือด โดยสารที่มีจุดเดือดต่ำจะมีความดันไอสูงสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ง่าย เพราะมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลน้อย (ฟิสิกส์ราชมงคล, 2555: ออนไลน์) และมีน้ำหนักโมเลกุลน้อย ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะส่งผลต่อการระเหยกลายเป็นไอและการเคลื่อนที่เข้าไปจับบนตัวดูดซับ ซึ่งสารที่ระเหยกลายเป็นไอได้ดีมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยจะเคลื่อนที่เข้าไปจับอยู่บนตัวของวัสดุดูดซับได้เร็วกว่าสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากและมีความดันไอที่สูงกว่า (Lee และคณะ, 2008)

ในการทดลองนี้ได้ผสมสารละลายบีเท็กแต่ละชนิดกับตัวทำละลายเฮกเซน ซึ่งสารละลายเฮกเซนมีค่าจุดเดือดและน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกับสารเบนซีนมากที่สุด ทำให้ไอระเหยของเบนซีนสามารถเคลื่อนที่เข้าไปใกล้ตัวของวัสดุดูดซับได้ใกล้เคียงหรือเร็วกว่าไอระเหยของเฮกเซน วัสดุดูดซับจึงสามารถกำจัดไอระเหยของเบนซีนได้ดีที่สุด รองลงมาคือไอระเหยของโทลูอิน ไซลีน และกำจัดไอระเหยของเอทิลเบนซีนได้น้อยที่สุด เนื่องจากสารเอทิลเบนซีนมีจุดเดือดสูง ส่งผลให้มีความดันไอน้อยกว่าเฮกเซนและมีน้ำหนักโมเลกุลที่มากกว่า เมื่อไอระเหยของสาร 2 ชนิด อยู่ในคอลัมน์ดูดซับไอระเหยของเอทิลเบนซีนจะเคลื่อนที่ไปล้อมรอบวัสดุดูดซับได้ช้ากว่าเฮกเซน ดังนั้นทำให้วัสดุดูดซับสามารถดูดซับไอระเหยของเอทิลเบนซีนได้น้อย

และจากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารบีเท็กที่ผสมกัน พบว่า วัสดุดูดซับสามารถกำจัดไอระเหยของเบนซีน โทลูอินและเอทิลเบนซีนได้ใกล้เคียงกัน แต่สามารถกำจัดไอระเหยของเอทิลเบนซีนได้น้อยที่สุด เนื่องจากไอระเหยของสารเอทิลเบนซีนมีแรงดึงดูดสูงกว่าและมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า ทำให้ระดับการกระจายตัวของสารน้อยลงเมื่อมีสัดส่วนของแก๊สผสมเพิ่มขึ้น (Lee และคณะ, 2008) จึงถูกไอระเหยของสารตัวอื่นๆแย่งชิงพื้นที่ในการเข้าถึงวัสดุดูดซับ

ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพการดูดซับจะแตกต่างกัน แต่มีความแตกต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากสารกลุ่มบีเท็กจะมี น้ำหนักโมเลกุลและค่าความดันไอที่ใกล้เคียงกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เส้นใยธรรมชาติจากนุ่นมาขึ้นรูปเป็นวัสดุคูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มบีเท็ก ร่วมกับวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตเส้นใยเรยอน ได้แก่ เส้นใยเรยอน น้ำยาวิสโคสและเกลือโซเดียมซัลเฟต ซึ่งจากงานวิจัยทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 เตรียมวัสดุคูดซับจำนวน 40 อัตราส่วน โดยแยกเป็นอัตราส่วนของวัสดุคูดซับที่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟต 20 อัตราส่วน และไม่ใส่เกลือโซเดียมซัลเฟตอีก 20 อัตราส่วน ซึ่งใน 20 อัตราส่วน จะมีสัดส่วนการผสมระหว่างเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอนทั้งหมด 5 อัตราส่วน คือ 1:0, 3:1, 1:1, 1:3 และ 0:1 ร่วมกับการใส่ของผสมที่ใช้ในการทำเป็นวัสดุคูดซับที่ได้จากการเตรียมของผสมที่ใช้อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 4 อัตราส่วน คือ 1:0, 1:2, 1:4 และ 1:6

5.1.2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุคูดซับที่เตรียมขึ้น สามารถเลือกวัสดุคูดซับที่เหมาะสมสำหรับการคูดซับไอระเหยของสารบีเท็กได้ 7 อัตราส่วน คือ วัสดุคูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอนแตกต่างกัน 5 อัตราส่วน (S8, S16, S24, S32 และ S40) และวัสดุคูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำแตกต่างกัน จำนวน 3 อัตราส่วน (S20, S22 และ S24)

5.1.3 วัสดุคูดซับที่เลือกทั้ง 7 อัตราส่วน จะมีการใส่เกลือโซเดียมซัลเฟตผสมลงไปใน การเตรียมวัสดุคูดซับ เนื่องจาก เกลือโซเดียมซัลเฟตมีลักษณะเป็นผลึกขนาดเล็กในขณะขึ้นรูปอนุภาคของเกลือจะแทรกตัวอยู่ในผิวของวัสดุที่เตรียมไว้ ดังนั้นเมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุคูดซับเกลือโซเดียมซัลเฟตจะช่วยให้วัสดุคูดซับขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น ไม่อัดตัวกันแน่นเป็นก้อนแข็ง

5.1.4 เลือกใส่เกลือโซเดียมซัลเฟตลงไปในวัสดุคูดซับ เนื่องจากในการรีเจนเนอเรตระหว่างของผสมหนักกับกรดซัลฟิวริกจะมีเกลือโซเดียมซัลเฟตเกิดขึ้นอยู่แล้วและสามารถละลายออกเมื่อล้างกับน้ำสะอาดได้ (วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, 2547)

5.1.5 เส้นใยนุ่นเป็นเส้นใยพืช ที่มีความเป็นไฮโดรโอฟิลิกสูง เนื่องจากมีแวกหรือซี่ฝั่งเคลือบอยู่บนผิวของเส้นใย ทำให้เกิดเป็นลักษณะเฉพาะตัว ไม่ชอบน้ำที่เป็นโมเลกุลมีขั้ว แต่จะชอบโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว



5.1.6 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดไอระเหยของสารบีเท็ก ในกระบวนการดูดซับจะต้องคำนึงถึงหลายปัจจัย ได้แก่ อัตราการไหลของแก๊ส ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นของสารเริ่มต้น การแผ่คอลลัมน์ อุณหภูมิ ระยะเวลาและปริมาตรของแก๊สที่จะเก็บไปตรวจวัด

ตารางที่ 5.1 สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดไอระเหยของสารบีเท็ก

พารามิเตอร์ที่ใช้	สภาวะที่ใช้ในงานวิจัย
ขนาดคอลัมน์	เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 ซม. ยาว 10 ซม. ปริมาตร 15.386 ลบ.ซม <sup>3</sup> .
อัตราการไหลของแก๊ส	6-8 ลิตรต่อชั่วโมง
ระยะเวลาสัมผัส	25 นาที
ระยะเวลาที่สารละลายจะระเหยกลายเป็นไอถึงจุดสมดุล	25-35 นาที
ความเข้มข้นของสารเริ่มต้น	800-1200 ส่วนในล้านส่วน
การแผ่คอลลัมน์	ปริมาณ 2 กรัม
อุณหภูมิ	32±2 องศาเซลเซียส
ระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บแก๊สใส่ถุงเก็บแก๊สเพื่อนำไปตรวจวัด	30 วินาที

5.1.7 วัสดุดูดซับที่มีเส้นใยนุ่มเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดไอระเหยของสารบีเท็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเป็นไฮโดรโฟบิกของเส้นใยนุ่มทำให้สามารถดูดซับไอระเหยของสารบีเท็กที่เป็นโมเลกุลของสารที่ไม่มีขั้วเหมือนกัน ได้สูง และด้วยลักษณะของเส้นใยนุ่มที่เป็นรูกลวงก็จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับสารได้มากขึ้น

5.1.8 วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยเรยอนเพิ่มมากขึ้นจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของสารบีเท็กน้อยลง เนื่องจากเส้นใยเรยอนมีคุณสมบัติความเป็นไฮโดรโฟบิกและมีพื้นที่ผิวน้อยกว่าเส้นใยนุ่ม เพราะเป็นเส้นใยกิ่งสังเคราะห์ที่มีลักษณะทึบ

5.1.9 วัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำยาวิสโคสต่อน้ำเพิ่มมากขึ้น จะมีแนวโน้มประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของสารบีเท็กมากขึ้น

5.1.10 วัสดุคูดซัฟที่เตรียมจากอัตราส่วนผสมของเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอน 1:0 ผสมกับน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:6 โดยน้ำหนัก (S8) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของเส้นใยนุ่นเพียงอย่างเดียว พบว่า เป็นวัสดุคูดซัฟที่มีประสิทธิภาพการกำจัดไอระเหยของสารบีเท็กดีที่สุด

5.1.11 แต่ถ้าเลือกวัสดุคูดซัฟที่มีการนำเส้นใยเรยอนซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานมาผสมกับเส้นใยนุ่น จะพบว่า วัสดุคูดซัฟที่เตรียมจากอัตราส่วนผสมของเส้นใยนุ่นต่อเส้นใยเรยอน 1:1 ผสมกับน้ำยาวิสโคสต่อน้ำ 1:6 โดยน้ำหนัก (S24) จะเป็นวัสดุคูดซัฟที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดไอระเหยของสารบีเท็ก เนื่องจากจะเป็นวัสดุคูดซัฟที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของสารบีเท็กสูงกว่าค่าเฉลี่ยแล้วยังเป็นวัสดุคูดซัฟที่ใช้เส้นใยเรยอนซึ่งเป็นของเสียที่ต้องนำไปกำจัดกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้ เพราะเส้นใยเรยอนจะทำให้วัสดุคูดซัฟมีความแข็งแรงมากขึ้น

5.1.12 เมื่อนำสารเบนซีน โทลูอิน ไซลีนและเอทิลเบนซีนมาผสมกัน จะพบว่า คุณสมบัติเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไอระเหยของสารบนตัวของวัสดุคูดซัฟได้ต่างกัน

ตารางที่ 5.2 วัสดุที่เลือกใช้ในงานวิจัย ประโยชน์ อัตราส่วนที่ดีที่สุด และอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	คุณสมบัติและการใช้ประโยชน์สำหรับงานวิจัย	วัสดุคูดซับที่ดีที่สุด ในการคูดซับไอระเหยของสารบีเท็ก	อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด ในการทำวัสดุคูดซับ
เส้นใยนุ่น	มีความเป็นไฮโดรโฟบิก สามารถคูดซับสารที่ไม่มีขั้วได้	เส้นใยนุ่น : เส้นใยเรยอน 1 : 0	เส้นใยนุ่น : เส้นใยเรยอน 1 : 1 เนื่องจากจะได้มีการนำเส้นใยเรยอน ซึ่งเป็นของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ และวัสดุคูดซับที่ได้จะมีความแข็งแรง และไม่ฟุ้งกระจาย
เส้นใยเรยอน	เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุคูดซับ และลดการฟุ้งกระจายของเส้นใยนุ่น		
น้ำยาวิสโคส	เป็นตัวประสานเส้นใย 2 ชนิด เข้าด้วยกันในการขึ้นรูปวัสดุคูดซับ	น้ำยาวิสโคส : น้ำ 1 : 6	น้ำยาวิสโคส : น้ำ 1 : 6
น้ำกลั่น	ลดความหนืดของน้ำยาวิสโคส		
เกลือโซเดียมซัลเฟต	เพิ่มรูพรุนและลดความหนาแน่นของวัสดุคูดซับ	50	50
กรดซัลฟิวริก	ช่วยในการขึ้นรูปวัสดุคูดซับ เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำยาวิสโคส	ไม่มีกรดซัลฟิวริกตกค้างบนตัวอย่าง	ไม่มีกรดซัลฟิวริกตกค้างบนตัวอย่าง

## 5.2 ข้อดี ข้อเสีย และการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์

งานวิจัยชิ้นนี้ได้มีการนำของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกลับมาใช้ประโยชน์ได้จริง และวัสดุคูดซัฟที่ได้เตรียมขึ้นสามารถที่จะคูดซัฟไอระเหยของสารบีเท็กได้ระดับหนึ่ง แต่มีความสามารถในการคูดซัฟบีเท็กได้น้อยกว่าวัสดุคูดซัฟทางการค้า ดังนั้นการฟื้นฟูวัสดุคูดซัฟในการกลับมาใช้ซ้ำอาจจะไม่คุ้มค่า วัสดุคูดซัฟที่เตรียมขึ้นหลังจากคูดซัฟบีเท็กแล้วจะต้องนำไปกำจัดอย่างถูกวิธี ซึ่งจะทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย

ซึ่งจากการทำงานวิจัยพบว่าวัสดุคูดซัฟที่เตรียมขึ้นควรจะมีการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมในงานวิจัยต่อไปเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของตัววัสดุคูดซัฟ ทั้งในเรื่องของเส้นใยที่จะนำมาผสม ขั้นตอนในการขึ้นรูปที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุคูดซัฟและไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม การเพิ่มปริมาตรของรูพรุน และการเพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุคูดซัฟ เพื่อให้สามารถนำไปคูดซัฟแก๊สได้ดียิ่งขึ้น หากวัสดุคูดซัฟมีประสิทธิภาพในการคูดซัฟแก๊สได้มากขึ้นอาจจะมีการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง โดยการนำวัสดุคูดซัฟใส่คอลัมน์ขนาดใหญ่เพื่อคูดซัฟแก๊สที่มีความเข้มข้นไม่สูงมาก (ความเข้มข้นน้อยกว่า 500 ส่วนในล้านส่วน) จากโรงงานอุตสาหกรรม หรือนำไปใช้เป็นตัวกรองอากาศได้ แต่วัสดุคูดซัฟที่เตรียมขึ้นไม่เหมาะสมที่จะนำไปบรรจุใส่ในหน้ากากคูดซัฟสารอินทรีย์ระเหยง่าย เนื่องจากในการขึ้นรูปวัสดุคูดซัฟมีการใช้สารเคมีในหลายขั้นตอน อาจจะทำให้มีกลิ่นของสารเคมีตกค้างอยู่บนตัวของวัสดุคูดซัฟ

## 5.3 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

5.3.1 เปลี่ยนชนิดหรือประเภทของเส้นใยที่จะนำมาผสมกับเส้นใยนุ่น ที่ใช้ทำเป็นวัสดุคูดซัฟแทนเส้นใยเรยอนเนื่องจาก ถ้าเลือกใช้เส้นใยที่มีคุณสมบัติความเป็นไฮโดรโฟบิกใกล้เคียงกับเส้นใยนุ่นแต่มีความแข็งแรงมากกว่า จะทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุคูดซัฟให้มากขึ้น

5.3.2 ลดปริมาณเกลือโซเดียมซัลเฟตที่ใช้ลง เนื่องจากในการทดลองนี้ได้มีการใช้เกลือโซเดียมซัลเฟตจำนวน 50 กรัม ในการเตรียมวัสดุคูดซัฟจากเส้นใยผสมที่หนัก 30 กรัม ซึ่งปริมาณเกลือที่ใส่มากเกินไปจนความจำเป็น หากลดปริมาณของเกลือที่ใส่ลงไปได้ จะช่วยทำให้ปริมาณของน้ำที่จะนำมาล้างวัสดุคูดซัฟและละลายเกลือออกไปมีปริมาณน้อยลง

5.3.3 ใช้กรดฟอสฟอริกหรือน้ำร้อน ในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุคูดซัฟ แทนการใช้กรดซัลฟิวริก เนื่องจากกรดซัลฟิวริกเป็นกรดแก่ถ้าไม่ได้นำไปกำจัดอย่างถูกวิธีจะเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม จากการศึกษาค้นคว้าในขั้นตอนการขึ้นรูปวัสดุคูดซัฟใช้กรดฟอสฟอริก ซึ่งเป็นกรดอ่อนที่จะไม่ทำลายโครงสร้างของเส้นใยและไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เพราะว่าสามารถนำ

กรดฟอสฟอริกที่ละลายอยู่ในน้ำออกมาได้ โดยวิธีการตกตะกอนด้วยแคลเซียมฟอสเฟต แล้วใช้กรดซัลฟิวริกมาทำปฏิกิริยาให้กลายเป็นปุ๋ยที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้ (Leguel, 2011)

5.3.4 ใช้สารเบนซีน โทลูอิน ไซลีน และเอทิลเบนซีนบริสุทธิ์ ไม่ใช่สารอื่นมาเป็นตัวทำละลาย เนื่องจากบีเท็กเป็นสารที่ไม่มีขั้วก็จะสามารถละลายได้ด้วยสารที่ไม่มีขั้วเช่นเดียวกัน ดังนั้นเมื่อนำสารละลายนี้ไปดูดซับ จะทำให้สารที่ใช้เป็นตัวทำละลายจะระเหยกลายเป็นไอและเข้าไปในคอลัมน์ดูดซับแข่งกับสารบีเท็กที่ต้องการศึกษา ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไอระเหยของสารบีเท็ก

5.3.5 ศึกษาการดูดซับของสารเคมีที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน อาทิ สมบัติความเป็นขั้วที่ต่างกัน น้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน เป็นต้น

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

กณิตา ธนเจริญชนภาส. มลสารและสภาวะแวดล้อมในอาคารและผลกระทบต่อสุขภาพ. [ออนไลน์].

2550. แหล่งที่มา: [www.agi.nu.ac.th/webvj/.../indoor%20air%20pollution%20-VOC.doc](http://www.agi.nu.ac.th/webvj/.../indoor%20air%20pollution%20-VOC.doc)

[2554, กันยายน 9]

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2546. ของเสียอันตราย. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยรังสิต. อ้างถึงใน กณิตา

ธนเจริญชนภาส. มลสารและสภาวะแวดล้อมในอาคารและผลกระทบต่อสุขภาพ. [ออนไลน์].

2550. แหล่งที่มา: [www.agi.nu.ac.th/webvj/.../indoor%20air%20pollution%20-VOC.doc](http://www.agi.nu.ac.th/webvj/.../indoor%20air%20pollution%20-VOC.doc)

[2554, กันยายน 9]

ควบคุมมลพิษ, กรม. กลไกการดูดซับ. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: [www.pcd.go.th/info\\_serv/](http://www.pcd.go.th/info_serv/DataSmell/design_absorbtion.htm)

[DataSmell/design\\_absorbtion.htm](http://www.pcd.go.th/info_serv/DataSmell/design_absorbtion.htm) [2554, พฤศจิกายน 12]

ควบคุมมลพิษ, กรม. สารอินทรีย์ระเหยง่าย. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: [http://aqnis.pcd.go.th](http://aqnis.pcd.go.th/VOCold/index.html)

[/VOCold/index.html](http://aqnis.pcd.go.th/VOCold/index.html) [2554, กันยายน 9]

ควบคุมวัตถุเสพติด สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, กอง. โทลูอิน. 2548. แหล่งที่มา [www.fda.](http://www.fda.moph.go.th/fda-net/html/product/addict/precursor/toluene.html)

[moph.go.th/fda-net/html/product/addict/precursor/toluene.html](http://www.fda.moph.go.th/fda-net/html/product/addict/precursor/toluene.html) [2554, กันยายน 9]

จักรกฤษณ์ ศิวะเดชา เทพ. อุปกรณ์ควบคุมมลพิษชนิดก๊าซและไอ. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา:

[www.stou.ac.th/Schools/Shs/upload/54114-6.pdf](http://www.stou.ac.th/Schools/Shs/upload/54114-6.pdf) [2554, พฤศจิกายน 12]

จันทิมา ชั่งสิริพร จุไรรัตน์ รัตนะพิสิฐ และจรัญ บุญกาญจน์. 2550. สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่าน

กัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา. โครงการวิจัย. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีมหาวิทยาลัย

สงขลานครินทร์.

จิระศักดิ์ แสงพุ่ม. 2542. การดูดซับไอของเบนซีน โทลูอิน และสารโอโซลินด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียม

จากผักตบชวาโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมีบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จิรายุ มั่งสุวรรณ. 2554. การประยุกต์ใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมเส้นใยเรยอนผสมกับเส้นใยุ่นเพื่อ

เป็นวัสดุดูดซับน้ำมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เชาวลิต เสนานุรักษ์วรกุล. ผู้จัดการฝ่ายความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม. สัมภาษณ์, 19 ธันวาคม 2554.

ฐานข้อมูลสมุนไพร คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. นุ่น. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: <http://www.phargarden.com/main.php?action=viewpage&pid=62> [2554, พฤศจิกายน 12] อ้างถึงใน นพมาศ สุนทรเจริญนนท์, ชนุชา บุญจรัส, รุ่งระวี เต็มศิริฤกษ์กุล, วิจิต เปานิล และ อาทรรี ไร่ไพบูลย์.กษยาอีสาน.สารานุกรมสมุนไพร 4 (2543).

เดชา นัตริศิริเวช. 2552. กระบวนการดูดซับ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นฤมล ศรีวิฑูรย์. 2548. การผลิตฟองน้ำเส้นใยธรรมชาติจากชานอ้อยเพื่อเป็นวัสดุดูดซับน้ำมันปนเปื้อนในทะเล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บริษัท ปตท. อะโรมาติกและการกลั่น จำกัด (มหาชน). ปริมาณการผลิตสารอะโรมาติกในประเทศไทย. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: [www.pttgc.listedcompany.com/.../FORM561/20110919-PTTAR-Form561](http://www.pttgc.listedcompany.com/.../FORM561/20110919-PTTAR-Form561) [2555, มีนาคม 4]

บริษัทไทยเรยอน จำกัด (มหาชน). การผลิตเส้นใยเรยอน. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: [www.thai-rayon.com](http://www.thai-rayon.com) [2554, ธันวาคม 19]

บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน). ผลิตภัณฑ์และผลิตภัณฑ์พลอยได้จากโครงการในปัจจุบันและภายหลังขยายกำลังการผลิต. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: [www.diw-ppp.go.th/doc/เอกสารประกอบการประชุม.pdf](http://www.diw-ppp.go.th/doc/เอกสารประกอบการประชุม.pdf) [2555, มีนาคม 4]

บริษัท NPC safety and Environmental Service. สารอินทรีย์ระเหยง่าย. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: [www.npc-se.co.th/read/m\\_read\\_detail.asp?read\\_id=383&cate\\_id=1](http://www.npc-se.co.th/read/m_read_detail.asp?read_id=383&cate_id=1)[2554, กันยายน 9]

ปนัดดา คงศรีเจริญ. 2555. การพัฒนาวัสดุดูดซับน้ำมันจากเส้นใยนุ่นและของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน. โครงร่างวิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปนัดดา ผู้มีจรรรยา. 2551. การทำตัวดูดซับสารกลุ่ม BTEX ในอากาศจากกากตะกอนเชื้อกระดาษ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.

พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล. 2553. การดูดซับและดูดติดผิว. เอกสารประกอบการสอน, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เพริศพิชญ์ คณาธารณา. 2526. ทฤษฎีแก๊สโครมาโตกราฟี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร:

O.S.PRINTINGHOUSE CO.,LTD.

- ฟิสิกส์ราชวมงคล. ความดันไอ. [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/286/2/3/gas/gas/data6.htm> [2556, เมษายน 27]
- ภัสรา พระยาครุฑ ภูติยา เผ่าเผด็จการ และรมชัช สวัสดิ์วีระกุล. อุตสาหกรรมสิ่งทอ. [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา: [www.ie.eng.chula.ac.th/academics/course/2104328/.../01.../24.pdf](http://www.ie.eng.chula.ac.th/academics/course/2104328/.../01.../24.pdf) [2554, พฤศจิกายน 12]
- มลิวรรณ บุญเสนอ. 2544. พิษวิทยาสิ่งแวดล้อม. นครปฐม: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์. อ้างถึงใน กณิตา ธนเจริญชนภาส. มลสารและสภาวะแวดล้อมในอาคารและผลกระทบต่อสุขภาพ. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: [www.agi.nu.ac.th/webvj/.../indoor%20air%20pollution%20-VOC.doc](http://www.agi.nu.ac.th/webvj/.../indoor%20air%20pollution%20-VOC.doc) [2554, กันยายน 9]
- มงคล ราชะนาคร. 2537. แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี. พิมพ์ครั้งที่ 1. เชียงใหม่: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- รุจิลักษณ์ รัตตะรมย์. ก๊าซโครมาโทกราฟี. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: [http://cyberclass.msu.ac.th/cyberclass/cyberclass.../lecture-GC\\_4b24.doc](http://cyberclass.msu.ac.th/cyberclass/cyberclass.../lecture-GC_4b24.doc) [2554, กันยายน 9]
- โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. การดูดซับทางกายภาพที่เกิดจากการมีขี้หรือไม่มีขี้. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: [www2.diw.go.th/km/pdf/%5Cknow%5Cgas.pdf](http://www2.diw.go.th/km/pdf/%5Cknow%5Cgas.pdf) [2554, พฤศจิกายน 12]
- โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. 2550. ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิกิพีเดีย. สูตรโมเลกุลของไซลีน. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://en.wikipedia.org/wiki/Xylene> [2554, กันยายน 9]
- วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล . 2547. การผลิตเซลล์โกลที่มีลักษณะคล้ายฟองน้ำจากวัสดุเหลือใช้เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับและ/หรือตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. 2542. วิทยาศาสตร์เส้นใย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรพจน์ สุนทรสุข. การกำจัดสารระเหยอินทรีย์ด้วยวิธีการทางชีวภาพ (ระยะที่ 1-2). [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: [www.kmutt.ac.th/rippc/volati.htm](http://www.kmutt.ac.th/rippc/volati.htm) [2554, กันยายน 9]
- ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์. เอทิลเบนซีน. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://msds.pcd.go.th/Name.asp?vID=1561> [2554, พฤศจิกายน 25]



- ศูนย์สารสนเทศชุมชน มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. นุ่น. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: <http://202.28.48.140/isaninfo/?p=164> [2554, สิงหาคม 25]
- เศรษฐกิจการพาณิชย์, กรม. 2523. รายงานผลการศึกษาวิจัยภาวะและปัญหานุ่น. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์อักษรไทย.
- สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ. มูลค่าการส่งออกสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มของไทย. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: [www.thaitextile.org](http://www.thaitextile.org) [2554, ธันวาคม 9]
- สุภาภรณ์ มั่นไทรทอง. 2541. การหาการดูดซับไอของโทลูอินและไซลีนบนถ่านกัมมันต์ซึ่งเตรียมจากซังข้าวโพดโดยใช้เทคนิคโครมาโทกราฟี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- โสธิญา ม้วยแก้ว . 2550. การศึกษาการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อินฟราเรด สเปกโตรสโกปี. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: [e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM328-10.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM328-10.pdf) [2556, มีนาคม 14]

## ภาษาอังกฤษ

- ASTM. Destination F 726-06, Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents, 2008. Annual Book of ASTM Standard. ASTM committee on standard, West Conmmohocken PA.
- Chuang, C.L., Chiang, P.C. and Chang, E.E. 2003. Column study of benzene adsorption onto activated carbon. Carbon 41: 2427-2451.
- Daifullah, A.A.M. and Girgis, B.S. 2003. Impact of surface characteristics of activated carbon on adsorption of BTEX. Colloids and Surfaces A 214: 181-193.
- Hori, K., Flavier M.E., Kuga, S., Lam T. and Iiyama K. 2000. Excellent oil absorbent kapok [*Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.] fiber: fiber structure, chemical characteristics, and application. J wood Sci 46: 401-404.
- Huang, X. and Lim, T. 2006. Performance and mechanism of a hydrophobic–oleophilic kapok filter for oil/water separation. Desalination 190: 295–307.
- Jacobson, M.Z. 2002. Atmospheric Pollution: History, Science and Regulation. New York, USA: Cambridge University Press. อ้างถึงใน กนิดา ชนเจริญชนภาส. มลสารและสภาวะแวดล้อมในอาคารและผลกระทบต่อสุขภาพ. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: [www.agi.nu.ac.th/webvj/.../indoor%20air%20pollution%20-VOC.doc](http://www.agi.nu.ac.th/webvj/.../indoor%20air%20pollution%20-VOC.doc) [2554, กันยายน 9]
- Keith, L.H. and Walker, M.M. 1995. Handbook of Air Toxics; sampling, analysis, and properties. Lewis publishers. อ้างถึงใน กนิดา ชนเจริญชนภาส. มลสารและสภาวะแวดล้อมในอาคารและผลกระทบต่อสุขภาพ. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: [www.agi.nu.ac.th/webvj/.../indoor%20air%20pollution%20-VOC.doc](http://www.agi.nu.ac.th/webvj/.../indoor%20air%20pollution%20-VOC.doc) [2554, กันยายน 9]
- Ko, Y.G., Choi, U.S., Ahn, D.J., Kim, J.S. and Kim, T.Y. 2001. Physicochemical and Thermal Studies of Viscose Rayon Borate Fiber and Its Carbon Fiber. Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry 39: 3875-3883.
- Laokiat, L., Khemthong, P., Grisdanurak, N., Sreearunothai, P., Pattanasiriwisawa, W. and Klysubun, W. 2012. Photocatalytic degradation of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene (BTEX) using transition metal-doped titanium dioxide immobilized on fiberglass cloth. Korean J. Chem. Eng 29: 377-383.

- Lee, M.G., Lee, S.W. and Lee, S.H. 2006. Comparison of vapor adsorption characteristics of acetone and toluene based on polarity in activated carbon fixed-bed reactor. Korean J. Chem. Eng 23: 773-778.
- Lee, S.W., Cheon, J.K., Park, H.J. and Lee, M.G. 2008. Adsorption characteristics of binary vapors among acetone, MEK, benzene, and toluene. Korean J. Chem. Eng 25: 1154-1159.
- Leguel, C. 2011. European Biorefinery Joint Strategic Research Roadmap [Online]. Available from: <http://www.star-colibri.eu/files/files/roadmap-web.pdf> (2013, March 12)
- Lillo-Rodenas, M.A., Fletcher, A.J., Thomas, K.M., Cazorla-Amoros, D. and Linares-Solano, A. 2006. Competitive adsorption of a benzene-toluene mixture on activated carbons at low concentration. Carbon 44: 1455-1463.
- Lim, T. and Huang, X. 2007. Evaluation of kapok (*Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.) as a natural hollow hydrophobic-oleophilic fibrous sorbent for oil spill cleanup. Chemosphere 66: 955-963.
- Lim, T. and Huang, X. 2007. Evaluation of hydrophobicity/oleophilicity of kapok and its performance in oily water filtration: Comparison of raw and solvent-treated fibers. Industrial Crops and Products 26: 125-134.
- Lin, C.L. and Cheng, Y.H. 2012. Adsorption and oxidation of high concentration toluene with activated carbon fibers. J Porous Mater : doi 10.1007/s10934-012-9665-z.
- Lua, A. and Yang, T. 2009. Theoretical and experimental SO<sub>2</sub> adsorption onto pistachio-nut-shell activated carbon for a fixed-bed column. Chemical Engineering Journal 155: 175-183.
- McLaughlin, E., Wang, D., Pfeffer, R. and Lin, Y.S. 2011. Adsorption of Organic Compounds in Vapor, Liquid, and Aqueous Solution Phases on Hydrophobic Aerogels. Industrial and Engineering Chemistry Research 50: 12177-12185.
- Mitra, S. and Roy, P. 2011. BTEX: A Serious Ground-water Contaminant. Research Journal of Environmental Sciences DOI: 10.3923/rjes.2011.
- Pan, J.F., Wu, R.P. and Chen, X.J. 2012. Preparation of Benzene Adsorption Materials Using Waste Activated Alumina. J. Shanghai Jiaotong Univ 17: 373-376.
- Rajakovic, V., Aleksic, G. and Rajakovic, Lj. 2008. Governing factors for motor oil removal from water with different sorption materials. Hazardous Materials 154: 558-563.

- Robbins, G.A., Wang, S. and Stuart, D. 1993. Using the static headspace method to determine Henry's Law constants. Analytical Chemistry 65: 3113-3118. Cited in Dinerman, E., Dubowski, Y. and Friedler, E. 2011. Fuel derived pollutants and boating activity patterns in the sea of galilee. Journal of Environmental Management 92: 3002-3010.
- Ryu, C.Y. and Yeo, S.D. 2010. Adsorption and desorption of m-xylene vapor on organically modified montmorillonite. Chem Eng 27: 602-608.
- Standeker, S., Novak, Z. and Knez, Z. 2009. Removal of BTEX vapours from waste gas streams using silica aerogels of different hydrophobicity. Hazardous Materials 165: 1114-1118.
- Sun, F.X., Sun, R.C. and Sun, J.X. 2002. Acetylation of Rice Straw with or without Catalysts and Its Characterization as a Natural Sorbent in Oil Spill Cleanup. Journal of Agricultural and Food Chemistry 50: 6428-6433.
- Wei, Q.F., Mather, R.R. and Fotheringham, A.F. 2004. Oil removal from used sorbents using a biosurfactant. Bioresource Technology 96: 331-334.
- Wisniewska, S.K., Nalaskowski, J., Witka-Jezewska, E., Hupka, J. and Miller, J.D. 2003. Surface properties of barley straw. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 29: 131-142.
- Wood, H.G. 1946. The fixation of carbon dioxide and the interrelationships of the tricarboxylic acid cycle. Physiol. Revs 28: 198-246. อ้างถึงใน กรมโรงงานอุตสาหกรรม. การออกแบบอุปกรณ์ควบคุมแก๊ส. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: [www2.diw.go.th/km/pdf/%5Cknow%5Cgas.pdf](http://www2.diw.go.th/km/pdf/%5Cknow%5Cgas.pdf) [2555, มีนาคม 1]
- Zytner, R. 1994. Sorption of benzene, toluene, ethylbenzene and xylenes to various media. Hazardous Materials 38: 113-126.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
วิธีการวิเคราะห์

## การวิเคราะห์ความชื้นของวัสดุดูดซับ

### Moisture content of sorbent

#### (Hot air oven method)

#### 1. เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1.1 ภาชนะอลูมิเนียมพร้อมฝาปิด
- 1.2 ตู้อบความร้อน
- 1.3 เครื่องชั่งไฟฟ้า ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 1.4 โถดูดความชื้น

#### 2. วิธีการทดลอง

2.1 นำภาชนะอลูมิเนียมไปอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส หลังจากอบเสร็จทิ้งไว้ให้เย็นโดยการนำภาชนะอลูมิเนียมที่ได้ไปใส่ในโถดูดความชื้น

2.2 นำภาชนะอลูมิเนียมมาชั่งน้ำหนักก่อนอบ แล้วบันทึกผล

2.3 ชั่งวัสดุดูดซับ 3 กรัม จากนั้นนำวัสดุดูดซับมาใส่ลงในภาชนะอลูมิเนียม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.4 เมื่ออบครบ 24 ชั่วโมง นำภาชนะอลูมิเนียมที่บรรจุวัสดุดูดซับออกจากตู้อบ ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นชั่งน้ำหนักที่หายไป เพื่อนำผลที่ได้มาคำนวณหาค่าความชื้น ดังสูตรด้านล่าง

$$\text{ความชื้น (ร้อยละ)} = \left[ \frac{\text{น้ำหนักของวัสดุดูดซับก่อนอบ} - \text{น้ำหนักวัสดุดูดซับหลังอบ}}{\text{น้ำหนักของวัสดุดูดซับหลังอบ}} \right] \times 100$$

ภาคผนวก ข

ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สบีเท็ก



ตารางที่ ข.1 ผลการดูดซับแก๊สเบนซีนของแผ่นกรองคาร์บอน

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0) x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1						
	1	2	3	1	2	3	C0	C1		
1	821.196	763.971	972.606	170.956	266.631	191.223	852.591	209.603	24.584	75.416
4	612.317	873.037	473.329	81.303	513.697	153.604	652.895	249.535	38.220	61.780
7	1587.485	947.657	1092.874	392.669	182.372	123.328	1209.339	232.790	19.249	80.751
11	176.135	1054.975	576.164	147.164	249.245	208.418	602.424	201.609	33.466	66.534
15	1312.976	1110.127	833.266	254.463	299.847	324.626	1085.456	292.979	26.991	73.009
19	1260.460	809.735	712.310	184.622	225.639	187.802	927.502	199.355	21.494	78.506
22	1120.143	955.187	921.621	272.944	322.814	239.100	998.984	278.286	27.857	72.143
25	1208.990	837.475	916.043	270.444	219.844	446.232	987.503	312.173	31.612	68.388
เฉลี่ย							914.587	247.041	27.011	72.989

ตารางที่ ข.2 ผลการดูดซับแก๊สโทลูอินของแผ่นกรองคาร์บอน

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0) x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	804.948	873.023	903.456	80.606	26.790	-	860.475	35.799	4.160	95.840
4	988.243	-	-	264.983	695.964	456.913	988.243	472.620	47.824	52.176
7	662.763	1025.991	-	505.878	231.725	74.008	844.377	270.537	32.040	67.960
11	933.185	688.964	790.410	57.326	126.733	120.833	804.187	101.631	12.638	87.362
15	-	484.668	1388.587	41.808	-	171.216	936.627	106.512	11.372	88.628
19	717.542	677.682	1339.316	118.679	143.818	193.533	911.513	152.010	16.677	83.323
22	-	848.274	-	74.317	207.648	-	848.274	93.988	11.080	88.920
25	826.525	705.081	-	127.114	-	56.586	765.804	91.850	11.994	88.006
เฉลี่ย							869.938	165.618	19.038	80.962

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.3 ผลการดูดซับแก๊สไฮลีนของแผ่นกรองคาร์บอน

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0) x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	899.605	1605.173	1084.601	557.191	-	-	1196.460	557.191	46.570	53.430
4	973.459	973.334	693.004	831.793	507.233	463.739	879.932	600.922	68.292	31.708
7	1019.660	-	793.212	505.007	336.606	453.536	906.436	431.716	47.628	52.372
11	833.005	754.073	932.784	441.301	462.786	431.940	839.954	445.342	53.020	46.980
15	644.225	965.828	833.768	366.464	689.335	334.987	814.607	463.596	56.910	43.090
19	774.661	932.617	1304.492	603.494	547.691	613.879	1003.923	588.354	58.606	41.394
22	606.629	1096.690	1309.668	405.173	525.817	511.453	1004.329	480.815	47.874	52.126
25	906.610	910.519	-	525.803	490.876	337.855	908.565	451.511	49.695	50.305
เฉลี่ย							944.276	502.431	53.208	46.792

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.4 ผลการดูดซับแก๊สเอทิลเบนซีนของแผ่นกรองคาร์บอน

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0) x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	2354.236	951.227	542.386	1086.227	178.080	80.301	1282.616	448.203	34.944	65.056
4	814.971	1012.424	1432.350	239.922	243.641	405.524	1086.581	296.362	27.275	72.725
7	770.468	1030.739	1217.599	207.190	155.514	393.639	1006.269	252.114	25.054	74.946
11	1110.464	816.537	548.051	334.847	235.156	110.128	825.017	226.710	27.479	72.521
15	1315.339	1167.852	259.689	408.730	264.342	139.128	914.293	270.733	29.611	70.389
19	834.386	158.640	1261.410	178.320	138.988	393.417	751.479	236.909	31.526	68.474
22	889.386	1117.059	1155.096	207.674	378.612	506.701	1053.847	364.329	34.571	65.429
25	953.029	1066.702	1249.029	216.503	86.800	394.323	1089.587	232.542	21.342	78.658
เฉลี่ย							1001.211	290.988	29.064	70.936

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.5 ผลการดูดซับแก๊สเบนซีนของ ตัวอย่าง S8

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	877.330	582.250	770.868	203.730	93.913	73.349	743.483	123.664	16.633	83.367
4	957.817	864.295	1085.603	258.842	211.401	133.201	969.239	201.148	20.753	79.247
7	1222.354	461.638	1137.252	392.684	82.973	190.270	940.415	221.976	23.604	76.396
11	1110.117	1000.000	948.618	260.991	153.251	189.060	1019.578	201.100	19.724	80.276
15	1066.004	559.223	795.786	371.131	49.852	111.411	807.004	177.465	21.991	78.009
19	834.345	875.256	903.842	313.870	-	147.694	871.148	230.782	26.492	73.508
22	994.181	1040.390	1164.613	437.102	118.651	81.559	1066.394	212.437	19.921	80.079
25	927.482	686.313	825.479	289.850	113.278	80.435	813.091	161.188	19.824	80.176
เฉลี่ย							903.794	191.220	21.157	78.843

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.6 ผลการดูดซับแก๊สเบนซีนของ ตัวอย่าง S16

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	1015.578	1118.436	1125.055	238.341	286.1627	191.22	1086.356	238.575	21.961	78.039
4	987.582	1198.405	1067.724	254.89	317.9043	-	1084.57	286.397	26.407	73.593
7	1048.392	902.392	-	360.135	278.6588	441.6115	975.392	360.135	36.922	63.078
11	976.85	1218.392	809.8462	326.979	291.5214	362.4379	1001.696	326.979	32.643	67.357
15	1077.598	1043.996	-	154.0055	72.10943	241.9016	1060.797	156.006	14.706	85.294
19	1015.476	865.0548	776.1955	251.3114	240.7587	261.8691	885.5754	251.313	28.379	71.621
22	921.239	759.0082	717.1404	226.8122	192.972	260.6524	799.1292	226.812	28.382	71.618
25	1225.49	634.6082	659.8688	231.7166	123.8784	339.5548	839.989	231.717	27.586	72.414
เฉลี่ย							966.6881	259.742	26.869	73.131

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.7 ผลการดูดซับแก๊สเบนซีนของ ตัวอย่าง S20

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	901.2161	1205.22	983.9957	427.7306	340.7612	343.5025	1030.144	370.665	35.982	64.018
4	753.0829	854.5223	1125.032	247.8099	354.3901	469.023	910.8791	357.074	39.201	60.799
7	834.6216	954.3594	1051.943	407.8845	484.215	386.2431	946.9745	426.114	44.997	55.003
11	856.6638	889.9291	1054.038	416.8435	510.3583	312.4196	933.5436	413.207	44.262	55.738
15	884.4708	763.4803	363.4005	470.3105	763.4803	556.191	670.4505	596.661	88.994	11.006
19	798.596	-	-	368.1179	662.298	675.4062	798.596	568.607	71.201	28.799
22	706.7828	-	912.3535	378.8766	409.1963	534.5432	809.5682	440.872	54.458	45.542
25	789.9664	1003.264	998.2069	381.4467	-	495.302	930.4791	438.374	47.113	52.887
เฉลี่ย							831.7228	451.447	54.279	45.721

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.8 ผลการดูดซับแก๊สเบนซีนของ ตัวอย่าง S22

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	998.3877	1032.098	964.6769	133.9035	226.6187	126.5037	998.3877	176.561	17.685	82.315
4	892.8935	1055.737	730.0502	152.3545	561.7613	117.144	892.8934	339.453	38.017	61.983
7	1124.635	1296.689	952.5803	214.3143	765.1739	182.3216	1124.635	473.748	42.125	57.875
11	941.3364		580.4029	129.4703	650.2749	606.0778	760.8696	628.176	82.560	17.440
15	836.4216	1079.125	803.5478	294.2294	242.3872	95.88356	906.3648	169.135	18.661	81.339
19	941.3364	876.2529		129.4915		90.34559	908.7947	90.346	9.941	90.059
22	706.7828		859.562	147.4635	231.1625	611.1753	783.1724	421.169	53.777	46.223
25		1105.541	424.5528	164.2988		106.0867	765.0471	106.087	13.867	86.133
เฉลี่ย							892.5206	300.584	33.678	66.322

หมายเหตุ: เครื่องหมาย – มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)



ตารางที่ ข.9 ผลการดูดซับแก๊สเบนซีนของ ตัวอย่าง S24

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	939.0621	946.6335	618.8298	460.3681	197.0954	179.702	834.8418	279.055	33.426	66.574
4	-	1315.842	813.5535	154.8136	500	289.6895	1064.698	314.834	29.570	70.430
7	675.032	1175.254	793.6233	622.2228	560.8975	191.2206	881.3032	458.114	51.981	48.019
11	1036.077	1211.558	757.6677	512.6827	315.643	181.1319	1001.767	336.486	33.589	66.411
15	801.395	1152.107	-	504.4365	355.3615	274.8395	976.7512	378.212	38.721	61.279
19	906.6647	1105.541	168.9398	521.0914	430.1451	-	727.0486	475.618	65.418	34.582
22	778.4488	1064.118	-	139.837	260.4921	160.2013	921.2833	186.843	20.281	79.719
25	792.0871	1067.631	648.2491	164.2988	231.5663	-	835.9892	197.933	23.676	76.324
เฉลี่ย							905.4603	328.387	36.267	63.733

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.10 ผลการดูดซับแก๊สเบนซีนของ ตัวอย่าง S32

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	966.637	1032.221	625.117	350.189	400.232	278.000	874.659	342.807	39.193	60.807
4	958.005	1020.000	600.681	339.384	637.666	384.990	859.562	454.013	52.819	47.181
7	1231.594	1049.094	256.282	533.660	521.701	443.811	845.657	499.724	59.093	40.907
11	1077.690	1135.011	681.795	415.114	501.223	465.700	964.832	460.679	47.747	52.253
15	1206.254	876.253	1118.600	327.355	554.207	256.826	1067.036	379.463	35.562	64.438
19	782.242	779.988	601.287	380.878	760.396	324.351	721.172	488.542	67.743	32.257
22	904.448	1000.000	767.777	269.036	500.000	320.645	890.742	363.227	40.778	59.222
25	1011.189	1080.063	892.223	477.999	689.139	161.953	994.492	443.030	44.548	55.452
เฉลี่ย							902.269	428.936	47.540	52.460

ตารางที่ ข.11 ผลการดูดซับแก๊สเบนซีนของ ตัวอย่าง S40

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0) x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1						
	1	2	3	1	2	3	C0	C1		
1	-	764.670	1387.734	199.155	470.878	424.142	1076.202	364.725	33.890	66.110
4	878.365	777.325	1107.944	152.604	518.229	714.275	921.211	461.703	50.119	49.881
7	735.927	1178.360	1134.096	221.684	534.207	625.656	1016.128	460.515	45.321	54.679
11	823.102	1215.059	1100.861	185.168	593.768	528.706	1046.341	435.881	41.658	58.342
15	-	1326.996	1171.723	247.022	560.946	430.626	1249.360	412.864	33.046	66.954
19	640.026	1185.657	790.402	185.994	544.735	483.900	872.028	404.876	46.429	53.571
22	487.989	1266.549	1047.670	816.384	342.784	337.776	934.069	498.981	53.420	46.580
25	-	1158.450	1087.033	583.290	527.371	341.904	1122.742	484.188	43.125	56.875
เฉลี่ย							1029.760	440.467	42.774	57.226

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.12 ผลการดูดซับแก๊สโทลูอินของ ตัวอย่าง S8

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	990.077	953.647	819.733	150.363	208.191	85.958	921.152	148.170	16.085	83.915
4	1014.816	1034.386	843.705	254.134	369.446	81.566	964.302	235.049	24.375	75.625
7	1014.816	984.440	718.530	76.370	483.959	72.989	905.929	211.106	23.303	76.697
11	869.581	984.440	778.106	630.309	254.272	79.040	877.376	321.207	36.610	63.390
15	871.562	1150.729	997.943	408.720	613.173	86.723	1006.745	369.538	36.706	63.294
19	871.562	1150.729	997.943	26.659	589.540	86.723	1006.745	234.307	23.274	76.726
22	888.901	1192.512	1080.930	106.182	575.238	90.643	1054.115	257.354	24.414	75.586
25	885.209	1206.684	1166.564	304.542	675.991	96.675	1086.152	359.070	33.059	66.941
เฉลี่ย							977.814	266.975	27.303	72.697

ตารางที่ ข.13 ผลการดูดซับแก๊สโทลูอินของ ตัวอย่าง S16

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	888.303	934.222	849.047	136.977	280.617	722.354	890.524	379.983	42.670	57.330
4	1004.040	805.275	866.484	222.527	416.722	603.951	891.933	414.400	46.461	53.539
7	904.973	1017.644	1287.780	512.218	319.217	508.689	1070.132	446.708	41.743	58.257
11	975.717	129.401	1125.677	320.761	189.711	288.187	743.598	266.220	35.802	64.198
15	1032.419	927.164	908.921	543.209	358.625	252.050	956.168	384.628	40.226	59.774
19	1149.169	1016.356	1040.556	724.175	595.735	399.428	1068.694	573.113	53.627	46.373
22	996.689	941.965	1040.556	456.214	517.400	495.407	993.070	489.674	49.309	50.691
25	1215.677	1117.053	1010.212	418.515	462.939	246.694	1114.314	376.050	33.747	66.253
เฉลี่ย							966.054	416.347	43.098	56.902

ตารางที่ ข.14 ผลการดูดซับแก๊สโทลูอินของ ตัวอย่าง S20

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	1081.500	825.480	738.235	292.192	402.719	161.901	881.738	285.604	32.391	67.609
4	1033.700	983.777	1042.403	306.645	731.925	295.878	1019.960	444.816	43.611	56.389
7	861.134	960.233	1149.779	207.118	807.576	335.532	990.382	450.075	45.445	54.555
11	998.470	1186.869	1245.583	230.328	583.792	325.605	1143.641	379.908	33.219	66.781
15	1029.107	899.436	1034.738	304.208	858.224	465.428	987.760	542.620	54.934	45.066
19	997.169	917.381	1076.958	303.055	557.385	504.827	997.169	455.089	45.638	54.362
22	974.128	1103.990	1543.052	348.753	542.421	573.309	1207.057	488.161	40.442	59.558
25	1226.017	890.490	1411.997	349.613	509.942	517.469	1176.168	459.008	39.026	60.974
เฉลี่ย							1050.484	438.160	41.710	58.290

ตารางที่ ข.15 ผลการดูดซับแก๊สโทลูอินของ ตัวอย่าง S22

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	792.853	1205.080	866.213	216.930	465.417	78.203	954.715	253.517	26.554	73.446
4	695.106	-	-	338.884	-	330.585	695.106	334.734	48.156	51.844
7	1081.499	1080.147	717.663	512.888	579.346	390.477	959.770	494.237	51.495	48.505
11	1312.161	1046.453	997.240	649.290	482.910	359.961	1118.618	497.387	44.464	55.536
15	1179.350	944.933	1117.620	321.919	645.757	527.184	1080.634	498.287	46.111	53.889
19	934.881	1241.499	828.575	456.613	643.671	376.880	1001.652	492.388	49.158	50.842
22	971.175	1036.602	910.000	533.007	483.163	398.793	972.592	471.654	48.495	51.505
25	671.630	1022.417	658.364	554.269	562.826	467.595	784.137	528.230	67.365	32.635
เฉลี่ย							945.903	446.304	47.183	52.817

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.16 ผลการดูดซับแก๊สโทลูอินของ ตัวอย่าง S24

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	1206.535	996.327	924.829	473.614	105.721	324.732	1042.564	301.355	28.905	71.095
4	1024.373	783.452	983.759	609.233	260.522	481.750	930.528	450.501	48.414	51.586
7	903.475	887.270	1163.654	380.158	344.602	426.388	984.800	383.716	38.964	61.036
11	744.708	976.026	1135.018	393.830	129.595	720.182	951.917	414.535	43.547	56.453
15	1046.238	991.528	1090.941	442.925	43.268	656.884	1042.902	381.025	36.535	63.465
19	915.224	1022.064	-	175.064	333.220	656.884	968.644	388.389	40.096	59.904
22	1021.983	1107.519	1056.596	501.306	425.955	744.000	1062.033	557.087	52.455	47.545
25	1111.149	1193.394	1202.306	59.010	342.993	607.170	1168.950	336.391	28.777	71.223
เฉลี่ย							1019.042	401.625	39.412	60.588

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)



ตารางที่ ข.17 ผลการดูดซับแก๊สโทลูอินของ ตัวอย่าง S32

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	853.172	667.179	742.882	611.859	591.428	509.149	754.411	570.812	75.663	24.337
4	768.402	1025.820	975.816	512.1527	537.152	435.533	923.346	494.946	53.604	46.396
7	818.011	1035.128	1196.253	629.0775	736.772	329.294	1016.464	565.048	55.590	44.410
11	900.000	946.333	889.190	632.3964	338.500	521.790	911.841	497.562	54.567	45.433
15	803.699	892.184	753.895	665.8493	582.176	148.232	816.593	465.419	56.995	43.005
19	987.512	948.175	1002.777	670.1006	959.509	563.596	979.488	731.069	74.638	25.362
22	1153.333	-	1076.055	892.2574	1127.336	370.227	1114.694	796.607	71.464	28.536
25	926.879	-	915.584	676.8922	800.000	596.299	921.231	691.064	75.015	24.985
เฉลี่ย							929.758	601.566	64.701	35.299

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.18 ผลการดูดซับแก๊สโทลูอินของ ตัวอย่าง S40

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100-[(C/- C1)x100]
	C0			C1						
	1	2	3	1	2	3	C0	C1		
1	1094.731	1395.826	884.884	1070.196	570.383	-	1125.147	820.289	72.905	27.095
4	1033.80742	964.290	835.995	860.928	-	897.726	944.698	879.327	93.080	6.920
7	852.497	-	1997.511	853.2093	1483.832	1123.761	1425.004	1153.601	80.954	19.046
11	1180.934	979.936	1085.915	756.772	632.6281	998.451	1082.261	795.950	73.545	26.455
15	1199.648	1196.235	986.307	488.2934	830.6447	666.604	1127.396	661.847	58.706	41.294
19	971.283	-	805.659	813.4831	631.8253	540.539	888.471	661.949	74.504	25.496
22	1127.396	964.872	-	859.635	-	-	1046.134	859.635	82.173	17.827
25	888.471	-	1213.14531	-	515.1774	1050.808	1050.808	782.993	74.513	25.487
เฉลี่ย							1086.240	826.949	76.129	23.871

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.19 ผลการดูดซับแก๊สเอทิลเบนซีนของ ตัวอย่าง S8

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	846.880	1114.301	729.556	446.006	139.441	413.960	896.912	333.135	37.142	62.858
4	815.009	865.343	1031.684	434.828	248.987	539.831	904.012	407.882	45.119	54.881
7	706.428	970.569	1158.913	477.648	613.612	668.012	945.304	586.424	62.036	37.964
11	855.557	568.836	1091.730	-	214.871	570.290	838.708	392.581	46.808	53.192
15	1332.207	1009.556	848.445	450.487	451.784	481.573	1063.402	461.281	43.378	56.622
19	911.545	829.606	1264.799	245.032	462.102	-	1001.983	353.567	35.287	64.713
22	1182.679	613.290	1086.254	541.679	373.699	353.208	960.741	422.862	44.014	55.986
25	911.306	779.949	732.331	467.369	375.227	-	807.862	421.298	52.150	47.850
เฉลี่ย							927.365	422.379	45.546	54.454

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.20 ผลการดูดซับแก๊สเอทิลเบนซีนของ ตัวอย่าง S16

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	1049.125	745.016	908.464	-	342.669	754.719	900.869	548.694	60.907	39.093
4	851.395	1021.367	1409.525	451.973	514.471	730.412	1094.096	565.619	51.697	48.303
7	817.127	1092.794	844.823	492.769	726.126	481.119	918.248	566.672	61.712	38.288
11	619.426	484.225	1334.181	368.354	391.268	776.921	812.611	512.181	63.029	36.971
15	847.603	1027.839	934.337	531.058	542.312	635.868	936.593	569.746	60.832	39.168
19	926.577	859.086	932.995	587.906	416.758	493.365	906.219	499.343	55.102	44.898
22	817.918	1010.492	964.884	435.026	476.250	515.828	931.098	475.701	51.090	48.910
25	775.533	1001.891	939.006	478.572	509.443	567.239	905.477	518.418	57.254	42.746
เฉลี่ย							925.651	532.047	57.478	42.522

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.21 ผลการดูดซับแก๊สเอทิลเบนซีนของ ตัวอย่าง S20

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	901.121	877.474	891.365	404.845	555.734	606.948	889.987	522.509	58.710	41.290
4	789.879	822.168	936.642	387.407	430.362	511.156	849.563	442.975	52.142	47.858
7	976.593	981.181	902.823	553.538	593.475	544.295	953.532	563.769	59.124	40.876
11	978.883	1253.468	997.737	523.989	647.194	628.060	1076.696	599.748	55.703	44.297
15	731.377	580.692	1193.395	537.395	555.734	376.963	835.155	490.031	58.675	41.325
19	987.451	929.747	766.477	512.199	481.573	529.570	894.559	507.781	56.763	43.237
22	896.945	1039.736	1318.467	574.617	-	546.612	1085.049	560.614	51.667	48.333
25	841.586	821.640	896.338	496.345	425.913	563.214	853.188	495.157	58.036	41.964
เฉลี่ย							929.716	522.823	56.235	43.765

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.22 ผลการดูดซับแก๊สเอทิลเบนซีนของ ตัวอย่าง S22

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	923.580	804.646	1050.831	525.944	537.491	649.835	926.353	571.090	61.649	38.351
4	845.807	879.920	788.021	578.233	492.371	724.146	837.916	598.250	71.397	28.603
7	850.836	910.385	943.172	451.773	468.090	584.514	901.465	501.459	55.627	44.373
11	712.749	1150.970	863.329	421.021	527.659	406.813	909.016	451.831	49.706	50.294
15	790.414	1048.398	954.145	490.024	544.492	594.706	930.986	543.074	58.333	41.667
19	970.055	1169.338	1209.984	605.958	601.036	594.706	1116.459	600.567	53.792	46.208
22	639.505	998.409	941.693	466.653	531.131	564.020	859.869	520.601	60.544	39.456
25	1026.257	1167.821	957.446	685.998	686.833	715.769	1050.508	696.200	66.273	33.727
เฉลี่ย							941.571	560.384	59.516	40.484

หมายเหตุ: เครื่องหมาย – มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.23 ผลการดูดซับแก๊สเอทิลเบนซีนของ ตัวอย่าง S24

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1						
	1	2	3	1	2	3	C0	C1		
1	910.973	1077.769	732.331	563.749	579.197	413.960	907.024	518.969	57.217	42.783
4	1048.725	910.841	-	749.634	592.654	729.556	979.783	690.615	70.486	29.514
7	1257.363	1086.003	1031.684	845.052	576.146	539.830	1125.017	653.676	58.104	41.896
11	849.651	691.310	1158.913	433.876	712.749	668.012	899.958	604.879	67.212	32.788
15	692.945	1063.777	1091.130	457.997	506.752	570.290	949.284	511.679	53.902	46.098
19	1114.224	1026.257	848.445	684.673	863.080	481.573	996.308	676.442	67.895	32.105
22	-	1248.144	1321.320	993.984	629.861	500.173	1284.732	708.006	55.109	44.891
25	924.227	980.113	1086.254	554.513	668.834	829.244	996.865	684.197	68.635	31.365
เฉลี่ย							1017.371	631.058	62.028	37.972

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.24 ผลการดูดซับแก๊สเอทิลเบนซีนของ ตัวอย่าง S32

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	856.153	815.009	773.599	336.254	266.113	461.658	814.920	354.675	43.523	56.477
4	1069.914	906.582	960.176	981.753	297.327	629.213	978.890	636.098	64.981	35.019
7	933.238	694.029	792.670	414.922	420.257	434.973	806.646	423.384	52.487	47.513
11	821.599	857.330	934.180	342.465	-	565.341	871.036	453.903	52.111	47.889
15	899.669	981.711	897.772	348.180	612.839	533.219	926.384	498.080	53.766	46.234
19	89.933	1182.679	896.945	376.910	713.912	601.198	723.185	564.007	77.989	22.011
22	934.486	929.403	667.448	443.361	687.336	472.632	843.779	534.443	63.339	36.661
25	719.514	969.092	747.153	450.000	767.173	371.893	811.920	529.689	65.239	34.761
เฉลี่ย							847.095	499.285	58.941	41.059

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)



ตารางที่ ข.25 ผลการดูดซับแก๊สเอทิลเบนซีนของ ตัวอย่าง S40

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100[(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	1119.208	823.497	747.153	714.994	622.569	460.700	896.619	599.421	66.853	33.147
4	951.487	1011.782	846.292	770.074	594.217	584.925	936.520	649.739	69.378	30.622
7	1273.536	847.424	-	1089.430	494.613	774.803	1060.480	786.282	74.144	25.856
11	1074.101	903.521	1040.318	758.307	673.042	623.951	1005.980	685.100	68.103	31.897
15	1494.613	1034.133	810.122	931.399	669.841	-	1112.956	800.620	71.936	28.064
19	1133.235	896.438	898.911	900.424	669.841	519.273	976.194	696.513	71.350	28.650
22	1181.859	945.968	1000.061	900.424	656.187	721.283	1042.629	759.298	72.825	27.175
25	-	1018.922	973.265	986.473	619.651	742.882	996.094	783.002	78.607	21.393
เฉลี่ย							1003.434	719.997	71.753	28.247

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.26 ผลการดูดซับแก๊สไฮลิ่นของ ตัวอย่าง S8

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100- [(C0/C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	-	1164.531	1188.731	100.650	419.306	446.673	1176.631	322.210	27.384	72.616
4	983.680	630.772	-	266.023	365.560	244.126	807.226	291.903	36.161	63.839
7	-	993.824	1039.678	185.796	-	378.506	1016.751	282.151	27.750	72.250
11	703.806	816.859	-	347.164	455.677	375.693	760.333	392.844	51.667	48.333
15	844.330	1065.512	767.019	301.490	559.206	371.875	892.287	410.857	46.045	53.955
19	-	871.663	692.493	255.987	446.661	346.157	782.078	349.602	44.702	55.298
22	700.647	760.622	673.537	511.011	495.367	352.189	711.602	452.856	63.639	36.361
25	673.368	1085.382	690.503	371.204	338.592	435.539	816.418	381.778	46.763	53.237
เฉลี่ย							870.416	360.525	41.420	58.580

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.27 ผลการดูดซับแก๊สไฮลิโนของ ตัวอย่าง S16

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100-[(C0- C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	892.947	723.725	906.645	273.208	267.863	335.697	841.106	292.256	34.747	65.253
4	855.184	839.302	905.057	322.399	460.863	178.015	866.514	320.426	36.979	63.021
7	1172.895	815.472	866.191	390.424	300.541	245.678	951.519	312.214	32.812	67.188
11	1013.450	1007.769	579.496	321.992	448.952	318.425	866.905	363.123	41.887	58.113
15	947.837	828.467	1107.091	453.656	245.774	448.712	961.132	382.714	39.819	60.181
19	1038.320	-	691.180	299.313	288.079	260.491	864.750	282.628	32.683	67.317
22	848.258	1069.891	630.368	461.804	302.198	422.079	849.506	395.360	46.540	53.460
25	996.844	831.164	776.910	344.697	384.417	206.404	868.306	311.839	35.914	64.086
เฉลี่ย							883.717	332.570	37.633	62.367

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.28 ผลการดูดซับแก๊สไฮลินของ ตัวอย่าง S20

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100-[(C0-C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	601.588	669.812	893.903	445.231	377.863	478.545	721.768	433.880	60.113	39.887
4	1081.656	696.346	752.054	536.457	394.151	438.235	843.352	456.281	54.103	45.897
7	839.227	736.618	-	582.821	385.149	501.948	787.923	489.973	62.185	37.815
11	1154.909	-	1084.822	547.763	460.550	-	1119.865	504.156	45.019	54.981
15	895.639	701.687	905.754	254.799	283.072	354.875	834.360	297.582	35.666	64.334
19	1122.312	721.966	980.644	351.727	258.413	363.245	941.641	324.462	34.457	65.543
22	-	745.015	1457.300	574.817	645.438	-	1101.157	610.128	55.408	44.592
25	1109.842	828.590	985.239	-	448.402	439.793	974.557	444.098	45.569	54.431
เฉลี่ย							915.578	445.070	48.611	51.389

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.29 ผลการดูดซับแก๊สไฮลินของ ตัวอย่าง S22

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100-[(C0-C1)x100]
	C0			C1						
	1	2	3	1	2	3	C0	C1		
1	671.245	857.519	784.923	522.412	367.980	408.510	771.229	432.967	56.140	43.860
4	771.507	961.845	1384.376	775.442	558.907	679.109	1039.243	671.153	64.581	35.419
7	888.224	989.338	905.168	579.711	448.654	-	927.577	514.183	55.433	44.567
11	1025.635	1005.641	-	696.168	622.964	605.641	1015.638	641.591	63.171	36.829
15	1023.393	-	908.382	696.168	507.386	574.519	965.888	592.691	61.362	38.638
19	-	1507.386	1208.386	899.975	717.781	479.168	1357.886	698.974	51.475	48.525
22	705.320	669.869	1095.354	360.028	306.404	579.711	823.514	415.381	50.440	49.560
25	665.463	543.424	-	378.609	399.378	-	604.443	388.994	64.356	35.644
เฉลี่ย							938.177	544.492	58.037	41.963

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.30 ผลการดูดซับแก๊สไฮลิโนของ ตัวอย่าง S24

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100-[(C0-C1)x100]
	C0			C1						
	1	2	3	1	2	3	C0	C1		
1	921.675	608.606	985.228	204.297	307.457	796.472	838.503	436.075	52.006	47.994
4	1567.196	660.256	916.807	368.907	264.316	577.197	1048.086	403.474	38.496	61.504
7	963.630	928.240	1030.639	255.752	234.061	498.550	974.170	329.454	33.819	66.181
11	1419.259	779.087	1298.639	464.298	346.029	540.642	1165.661	450.323	38.632	61.368
15	999.177	958.364	1148.200	116.773	388.034	776.045	1035.247	426.951	41.241	58.759
19	1040.279	842.919	1189.186	305.099	340.787	667.755	1024.128	437.880	42.756	57.244
22	1285.050	675.396	903.916	422.079	191.338	249.918	954.787	287.778	30.141	69.859
25	1289.293	1263.147	548.461	384.106	459.331	368.280	1033.634	403.906	39.076	60.924
เฉลี่ย							1009.277	396.980	39.333	60.667

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.31 ผลการดูดซับแก๊สโซลินของ ตัวอย่าง S32

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100-[(C0-C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	525.295	505.060	-	337.560	357.999	385.962	515.177	360.507	69.977	30.023
4	650.245	615.012	856.925	324.087	384.100	372.098	707.394	360.095	50.904	49.096
7	777.014	884.276	702.863	416.454	737.214	-	788.051	576.834	73.198	26.802
11	760.116	1701.352	-	576.780	683.265	-	1230.734	630.023	51.191	48.809
15	667.727	880.003	1202.679	213.797	276.764	363.418	916.803	284.660	31.049	68.951
19	920.957	1418.514	912.042	320.858	420.702	430.678	1083.838	390.746	36.052	63.948
22	1362.555	4191.922	-	345.173	2867.429	-	2777.238	1606.301	57.838	42.162
25	718.744	689.895	737.214	286.548	318.576	-	715.284	302.562	42.300	57.700
เฉลี่ย							1091.815	563.966	51.654	48.346

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)

ตารางที่ ข.32 ผลการดูดซับแก๊สไฮลินของ ตัวอย่าง S40

นาที่	การทดลอง						ค่าเฉลี่ย		(C1/C0)x100	%Capacity = 100-[(C0-C1)x100]
	C0			C1			C0	C1		
	1	2	3	1	2	3				
1	479.682	619.156	843.156	391.752	373.693	749.329	647.331	504.925	78.001	21.999
4	422.607	702.935	751.271	237.412	411.922	641.571	625.604	430.302	68.782	31.218
7	881.683	738.322	1148.200	505.753	294.072	374.113	922.735	391.313	42.408	57.592
11	733.656	747.163	1553.012	509.832	465.151	586.817	1011.277	520.600	51.479	48.521
15	444.428	575.155	964.404	301.962	298.445	501.270	661.329	367.226	55.528	44.472
19	857.603	631.825	922.920	650.405	546.738	755.672	804.116	650.938	80.951	19.049
22	1687.215	935.271	-	1000.833	712.148	-	1311.243	856.490	65.319	34.681
25	864.071	623.206	717.191	689.830	419.455	705.320	734.823	604.868	82.315	17.685
เฉลี่ย							839.807	540.833	64.400	35.600

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Septum รั่ว)



ตารางที่ ข.33 ผลการดูดซับแก๊สผสมบีเท็กซ์ของแผ่นกรองคาร์บอน

Benzene		toluene		xylene		Ethylbenzene		%capacity			
C0	C1	C0	C1	C0	C1	C0	C1	Benzene	Toluene	Xylene	Ethylbenzene
892.91	233.61	984.32	391.43	885.19	430.73	1178.05	-	73.84	60.23	51.34	-
862.97	333.92	755.26	329.58	914.88	246.11	913.14	-	61.31	56.36	73.10	-
829.12	308.72	826.77	311.75	535.60	204.27	957.63	-	62.76	62.29	61.86	-
850.86	315.99	776.02	330.97	705.52	261.74	1029.45	-	62.86	57.35	62.90	-
978.91	321.75	923.02	420.31	1206.96	392.42	1027.68	916.63	67.13	54.46	67.49	10.81
1004.66	310.32	1181.30	363.46	1480.39	367.20	1069.00	-	69.11	69.23	75.20	-
820.31	514.59	1174.77	543.73	1690.96	546.46	1118.79	979.33	37.27	53.72	67.68	12.47
960.52	361.41	1037.18	371.96	1044.20	339.61	1009.95	-	62.37	64.14	67.48	-
900.03	337.54	957.33	382.90	1057.96	348.57	1037.96	947.98	62.50	60.00	67.05	11.64

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ตารางที่ ข.34 ผลการดูดซับแก๊สผสมบีเท็กซ์ของ ตัวอย่าง S8

Benzene		toluene		xylene		Ethylbenzene		%capacity			
C0	C1	C0	C1	C0	C1	C0	C1	Benzene	Toluene	Xylene	Ethylbenzene
1106.28	543.33	1021.20	515.50	1016.02	464.86	994.07	-	50.89	49.52	54.25	-
907.80	600.85	830.68	574.86	831.53	629.45	935.12	-	33.81	30.80	24.30	-
978.60	546.51	913.38	530.27	887.27	464.76	983.13	-	44.15	41.94	47.62	-
970.44	525.68	1058.87	564.83	889.41	618.61	1100.54	1003.63	45.83	46.66	30.45	8.81
868.21	498.44	803.06	482.27	738.85	389.25	943.69	-	42.59	39.95	47.32	-
890.31	437.56	853.97	447.23	762.20	359.45	1024.57	977.87	50.85	47.63	52.84	4.56
819.91	497.33	840.59	502.00	694.57	421.07	1072.33	938.62	39.34	40.28	39.38	12.47
830.23	381.60	852.74	362.50	864.59	331.54	985.16	-	54.04	57.49	61.65	-
921.47	503.91	896.81	497.43	835.55	459.87	1004.83	973.37	45.31	44.53	44.96	3.13

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ตารางที่ ข.35 ผลการดูดซับแก๊สผสมบีเท็กของ ตัวอย่าง S16

Benzene		toluene		xylene		Ethylbenzene		%capacity			
C0	C1	C0	C1	C0	C1	C0	C1	Benzene	Toluene	Xylene	Ethylbenzene
1005.64	497.30	991.73	524.22	1031.01	545.05	1090.98	889.01	50.55	47.14	47.13	14.26
1127.57	530.76	1114.08	517.87	1112.35	489.72	1099.19	900.42	52.93	53.52	55.97	1.52
1005.44	869.32	1273.80	886.17	1391.78	892.10	1148.77	1144.22	13.54	30.43	35.90	3.10
933.01	495.63	925.34	478.48	910.66	462.83	999.75	-	46.88	48.29	49.18	-
1175.57	429.92	1295.93	447.47	1319.43	410.58	1067.03	-	63.43	65.47	68.88	-
1022.28	395.73	938.47	398.11	922.97	295.64	1120.61	-	61.29	57.58	67.97	-
1031.81	366.67	957.78	389.02	842.99	321.93	-	-	64.46	59.38	61.81	-
808.91	434.84	799.28	448.07	715.37	363.41	922.96	-	46.24	43.94	49.20	-
1013.78	502.52	1037.05	511.18	1030.82	472.66	1064.19	977.88	49.92	50.72	54.51	6.30

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ตารางที่ ข.36 ผลการดูดซับแก๊สผสมบีเท็กซ์ของ ตัวอย่าง S20

Benzene		toluene		xylene		Ethylbenzene		%capacity			
C0	C1	C0	C1	C0	C1	C0	C1	Benzene	Toluene	Xylene	Ethylbenzene
953.71	620.78	1318.31	618.88	1208.00	690.23	1144.98	690.23	34.91	53.05	42.86	18.14
878.11	485.10	902.20	440.64	839.66	368.13	909.38	368.13	44.76	51.16	56.16	-
789.52	518.24	1098.48	520.41	1104.31	467.77	973.95	467.77	34.36	52.62	57.64	-
853.96	589.14	1232.60	556.62	1218.41	493.80	1175.27	493.80	31.01	54.84	59.47	21.87
916.51	493.01	1104.28	452.38	1014.04	341.49	1011.61	341.49	46.21	59.03	66.32	-
542.47	493.05	1422.02	469.65	1600.84	373.59	1116.67	373.59	9.11	66.97	76.66	8.72
1283.95	499.60	1169.80	485.86	1187.87	377.68	1303.81	377.68	61.09	58.47	68.21	22.64
521.80	498.92	682.79	469.99	583.88	323.01	921.90	323.01	4.38	31.17	44.68	-
842.50	524.73	1116.31	501.81	1094.63	429.46	1069.70	429.46	37.72	55.05	60.77	17.84

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ตารางที่ ข.37 ผลการดูดซับแก๊สผสมบีเท็กซ์ของ ตัวอย่าง S22

Benzene		toluene		xylene		Ethylbenzene		%capacity			
C0	C1	C0	C1	C0	C1	C0	C1	Benzene	Toluene	Xylene	Ethylbenzene
893.23	415.22	910.87	555.11	1101.71	379.77	1260.36	-	52.27		69.09	-
870.02	426.30	919.68	427.31	1485.23	459.03	1243.99	-	65.68	53.09	47.83	-
1242.00	445.45	1608.34	484.76	951.10	496.20	1169.92	968.41	55.15	47.29	54.96	17.22
993.30	455.64	894.66	459.58	687.88	309.85	968.41	429.15	46.50	71.42	60.43	55.69
851.69	416.06	819.39	430.92	709.24	280.66	955.26	-	48.25	51.83	55.47	-
804.05	427.79	780.48	437.64	1005.64	447.82	1227.77	-	58.24	46.59	44.34	-
1024.41	478.87	1003.50	486.47	712.13	396.37	1022.63	950.11	50.36	37.67	68.98	7.09
964.62	434.35	1106.32	461.79	1133.66	351.71	-	923.88	54.54	53.98	59.91	-
955.42	437.46	1005.41	467.95	973.32	390.18	1121.19	817.89	53.87	57.70	57.63	26.67

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ตารางที่ ข.38 ผลการดูดซับแก๊สผสมบีเท็กซ์ของ ตัวอย่าง S24

Benzene		toluene		xylene		Ethylbenzene		%capacity			
C0	C1	C0	C1	C0	C1	C0	C1	Benzene	Toluene	Xylene	Ethylbenzene
1000.75	577.82	930.75	532.12	952.32	428.02	1027.82	960.83	42.26	42.83	55.05	6.52
988.37	624.22	949.45	607.20	971.35	540.76	981.47	-	36.84	36.05	44.33	-
1020.88	568.58	1008.38	486.55	999.13	493.08	939.98	-	44.31	51.75	50.65	-
1075.03	625.46	1171.93	623.80	1417.91	629.00	1019.09	963.91	41.82	46.77	55.64	5.41
898.77	551.63	1031.11	535.04	969.31	411.43	977.91	-	38.62	48.11	57.55	-
1071.38	696.54	1438.34	704.72	1576.87	663.03	1178.76	1092.07	34.99	51.00	57.95	7.35
933.83	611.93	864.59	620.74	758.50	535.48	1034.80	974.08	34.47	28.20	29.40	5.87
1015.35	609.19	1232.27	626.67	1130.17	572.64	1043.64	-	40.00	49.15	49.33	-
1000.54	608.17	1078.35	592.11	1096.94	534.18	1025.43	83.43	39.22	45.09	51.30	-

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ตารางที่ ข.39 ผลการดูดซับแก๊สผสมบีเท็กซ์ของ ตัวอย่าง S32

Benzene		toluene		xylene		Ethylbenzene		%capacity			
C0	C1	C0	C1	C0	C1	C0	C1	Benzene	Toluene	Xylene	Ethylbenzene
769.78	396.20	755.07	354.67	612.82	259.38	919.84	-	48.53	53.03	57.67	-
807.13	476.00	853.54	421.38	595.00	314.25	924.58	-	41.03	50.63	47.19	-
760.35	397.61	755.56	366.21	526.14	305.82	927.22	-	47.71	51.53	41.88	-
933.78	493.18	870.35	488.89	695.79	379.65	-	-	47.19	43.83	45.44	-
775.49	369.33	784.70	363.79	471.62	269.40	-	-	52.37	53.64	42.88	-
909.31	416.46	832.85	417.78	579.75	306.96	954.18	914.04	54.20	49.84	47.05	4.21
642.48	359.38	759.70	377.88	422.99	280.36	-	-	44.06	50.26	33.72	-
905.43	453.81	1002.72	450.83	962.75	355.29	917.29	-	49.88	55.04	63.10	-
812.97	420.25	826.81	405.18	608.36	308.89	928.62	914.04	48.31	50.99	49.23	4.21

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ตารางที่ ข.40 ผลการดูดซับแก๊สผสมบีเท็กซ์ของ ตัวอย่าง S40

Benzene		toluene		xylene		Ethylbenzene		%capacity			
C0	C1	C0	C1	C0	C1	C0	C1	Benzene	Toluene	Xylene	Ethylbenzene
1146.91	616.03	1275.45	631.40	1678.88	691.99	1038.30	1017.35	46.29	50.50	58.78	2.02
990.53	611.54	949.60	583.43	953.55	512.23	1006.17	-	38.26	38.56	46.28	-
1099.79	655.97	1207.69	631.56	1403.66	549.18	1075.11	908.54	40.35	47.71	60.88	15.49
819.76	505.63	858.66	431.15	1089.51	339.90	984.29	-	38.32	49.79	68.80	-
829.10	534.44	763.49	534.50	714.38	505.62	1011.58	941.66	35.54	29.99	29.22	6.91
753.03	518.90	721.99	484.33	646.67	394.28	-	-	31.09	32.92	39.03	-
944.40	556.95	1030.84	578.15	1105.49	486.11	997.82	-	41.03	43.91	56.03	-
1029.18	582.25	1116.25	586.82	1099.57	586.12	983.11	-	43.43	47.43	46.70	-
951.59	572.71	990.50	557.67	1086.46	508.18	1013.77	955.85	39.81	43.70	53.23	8.14

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - มีปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี



ภาคผนวก ค  
ผลการตรวจวิเคราะห์

## ผลการตรวจวิเคราะห์

ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าความหนืดของน้ำยาวิสกอสในอัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วนผสมระหว่าง น้ำยาวิสกอสต่อน้ำ	ความหนืด (เซนติพอยส์)			ค่าเฉลี่ย	SD
	1	2	3		
1:0	6,645.0	6,595.0	6,785.1	6,675.0	98.5
1:2	71.7	70.4	74.0	72.0	1.8
1:4	35.8	29.4	40.8	35.3	5.7
1:6	24.0	20.8	25.2	23.3	2.3

ตารางที่ ค.2 ตัวอย่างผลการตรวจ MULTIPOINT BET ของแผ่นกรองคาร์บอน

MULTIPOINT BET		
$P/P_0$	Volume [มล./ก.] STD	$1/(W((P_0/P)-1))$
4.7718e-02	1.0578	3.790E+01
7.5306e-02	1.3564	4.804E+01
1.0207e-01	1.6132	5.638E+01
1.5029e-01	2.0117	7.035E+01
2.0152e-01	2.4042	8.399E+01
2.5346e-01	2.6778	1.014E+02
3.0170e-01	3.2042	1.079E+02
<b>Area</b>	1.131E+01 m <sup>2</sup> /g (11.31 m <sup>2</sup> /g)	
<b>Slope</b>	2.811E+02	
<b>Y-Intercept</b>	2.682E+01	
<b>Correlation Coefficient</b>	0.996080	
<b>C</b>	1.148E+01	

ภาคผนวก จ

ภาพประกอบการทดลองและวิธีการทดลองการดูดซับไอระเหยของสารบีเท็ก

## ภาพประกอบการทดลองและวิธีการทดลองการดูดซับไอระเหยของสารบีเท็ก

### 1. ภาพประกอบการทดลองดูดซับไอระเหยของสารบีเท็ก



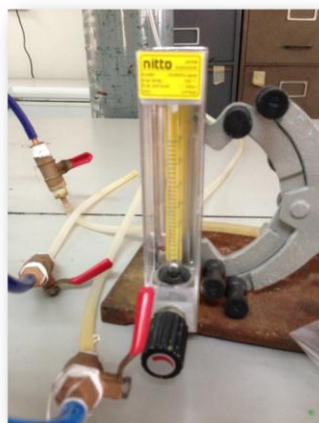
ภาพที่ จ.1 แผ่นกรองคาร์บอน ปริมาณ 2 กรัม ที่บรรจุในคอลัมน์ดูดซับ



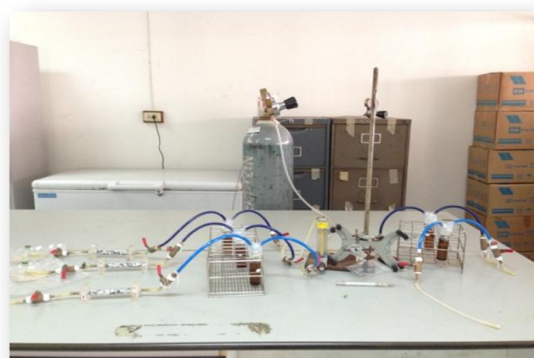
ภาพที่ จ.2 วัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้น ปริมาณ 2 กรัม ที่บรรจุในคอลัมน์ดูดซับ



ภาพที่ จ3. ถุงเก็บแก๊ส



ภาพที่ จ.4 Mass flow meter

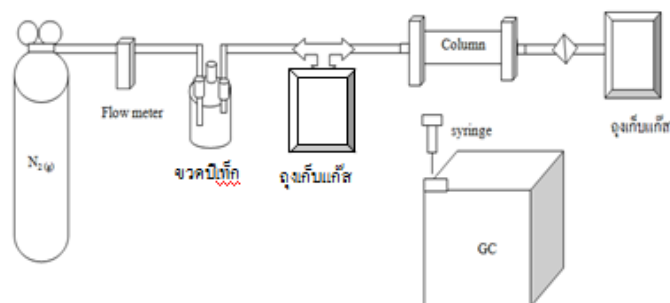


ภาพที่ จ.5 การต่อระบบดูดซับ



ภาพที่ จ.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

## 2. วิธีการทดลองการดูดซับไอระเหยของสารบีเท็ก



ภาพที่ จ.7 แผนการไหลของอุปกรณ์สำหรับกระบวนการดูดซับ

ต่อขวดสารบีเท็กที่อยู่ในบรรจุสารละลายเข้มข้น 1,000 ส่วนในล้านส่วน เข้ากับคอลัมน์ดูดซับ ซึ่งจะทำให้การปิดวาล์วขวดแก๊สให้สนิทแล้วตั้งขวดสารทิ้งไว้เป็นเวลา 25-35 นาที เพื่อให้ไอระเหยของแก๊สอิ่มตัว จากนั้นจะทำการเปิดวาล์วแก๊สที่ติดอยู่ที่ขวดบีเท็กเพื่อปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในขวดบีเท็ก โดยแก๊สไนโตรเจนจะเป็นตัวพาไอระเหยของบีเท็กผ่านเข้าไปยังคอลัมน์ดูดซับเป็นเวลา 1 นาที ซึ่งจะควบคุมอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 6-8 ลิตรต่อชั่วโมง จากนั้นจะทำการปิดวาล์วที่ขวดบีเท็กเพื่อจะตั้งสารทิ้งไว้เป็นเวลา 25-35 นาที เพื่อเปิดระบบไปเรื่อยๆ จนครบ 25 นาที (ทุกครั้งที่เดินระบบเป็นเวลา 1 นาที ก็จะตั้งสารทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 25-35 นาทีทุกครั้ง)

โดยการเก็บแก๊สที่ความเข้มข้นขาเข้าและความเข้มข้นขาออก 8 ช่วงเวลา ในนาทีที่ 1, 4, 7, 11, 15, 19, 22 และ 25 นาที ด้วยถุงเก็บแก๊ส เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นจะนำไปตรวจวัดความเข้มข้นขาเข้าและความเข้มข้นขาออกด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ในการเก็บแก๊สจะมีการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สในช่วง 6-8 ลิตรต่อชั่วโมง

**ภาคผนวก ง**

**ตัวอย่างความเข้มข้นขาเข้าและความเข้มข้นขาออกของสารปีเท็ก**

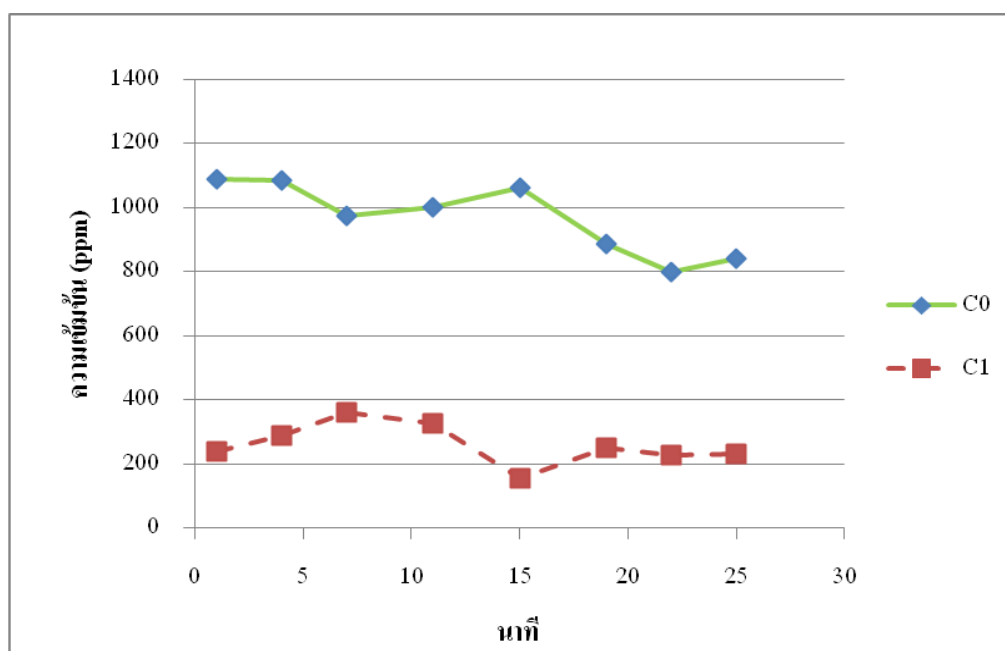
ตัวอย่างความเข้มข้นขาเข้าและความเข้มข้นขาออกของสารบีเท็ก

1. ผลการดูดซับไอระเหยของเบนซีนของตัวอย่าง S16

ตารางที่ ง.1 ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นขาเข้าและขาออกที่นาที่ต่างๆ

นาที่	C0	C1
1	1086.356	238.575
4	1084.57	286.397
7	975.392	360.135
11	1001.696	326.979
15	1060.797	156.006
19	885.5754	251.313
22	799.1292	226.812
25	839.989	231.717

ตารางที่ ง.2 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยความเข้มข้นขาเข้าและขาออกที่นาที่ต่างๆ



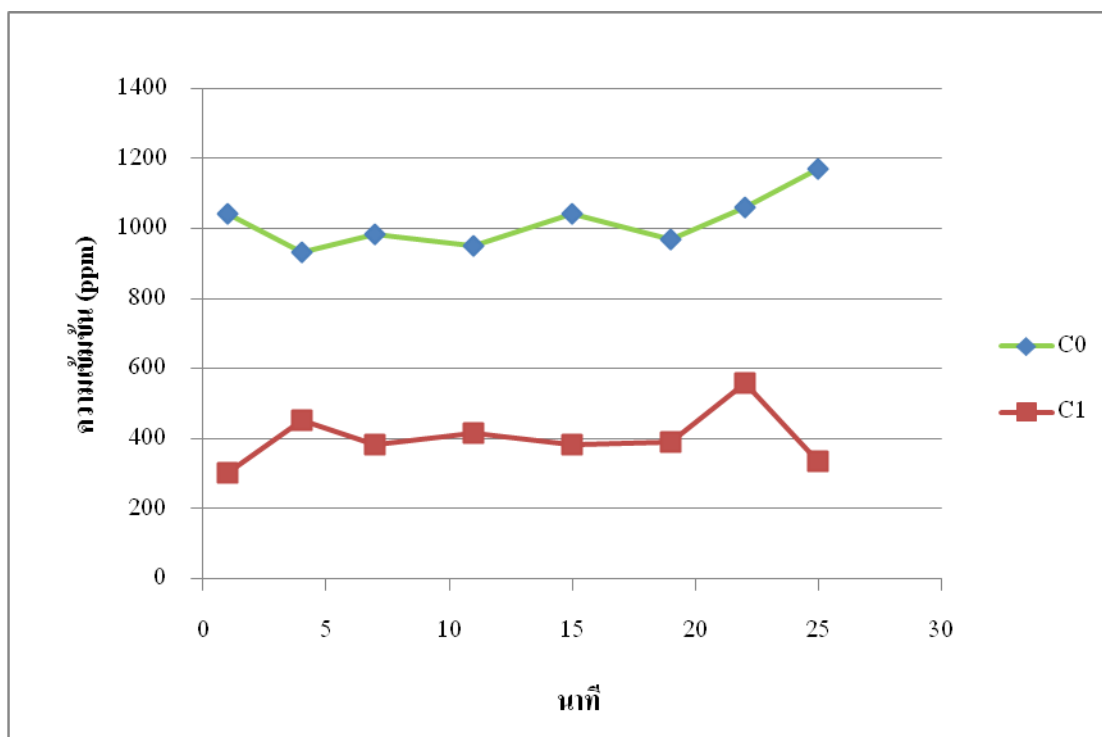


## 2. ผลการดูดซับไอระเหยของโทลูอินของตัวอย่าง S24

ตารางที่ ง.3 ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นขาเข้าและขาออกที่นาที่ต่างๆ

นาที่	C0	C1
1	1042.564	301.355
4	930.528	450.501
7	984.8	383.716
11	951.917	414.535
15	1042.902	381.025
19	968.644	388.389
22	1062.033	557.087
25	1168.95	336.391

ตารางที่ ง.4 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยความเข้มข้นขาเข้าและขาออกที่นาที่ต่างๆ

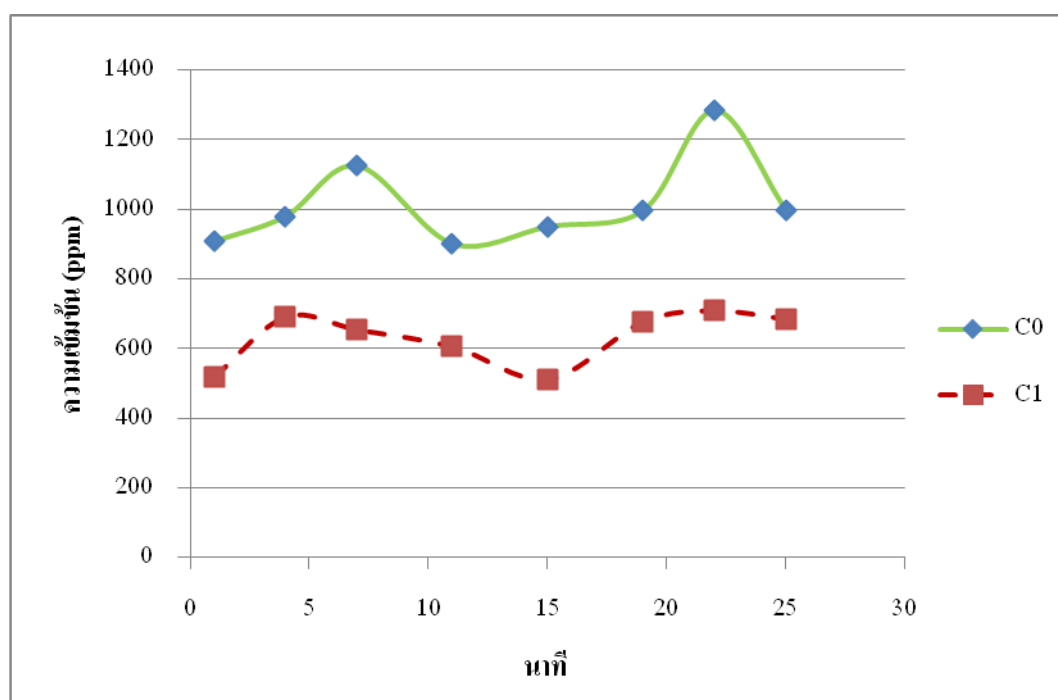


### 3. ผลการดูดซับไอระเหยของเอทริลเบนซีนของตัวอย่าง S24

ตารางที่ ง.5 ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นขาเข้าและขาออกที่นาที่ต่างๆ

นาที่	C0	C1
1	907.024	518.969
4	979.783	690.615
7	1125.017	653.676
11	899.958	604.879
15	949.284	511.679
19	996.308	676.442
22	1284.732	708.006
25	996.865	684.197

ตารางที่ ง.6 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยความเข้มข้นขาเข้าและขาออกที่นาที่ต่างๆ

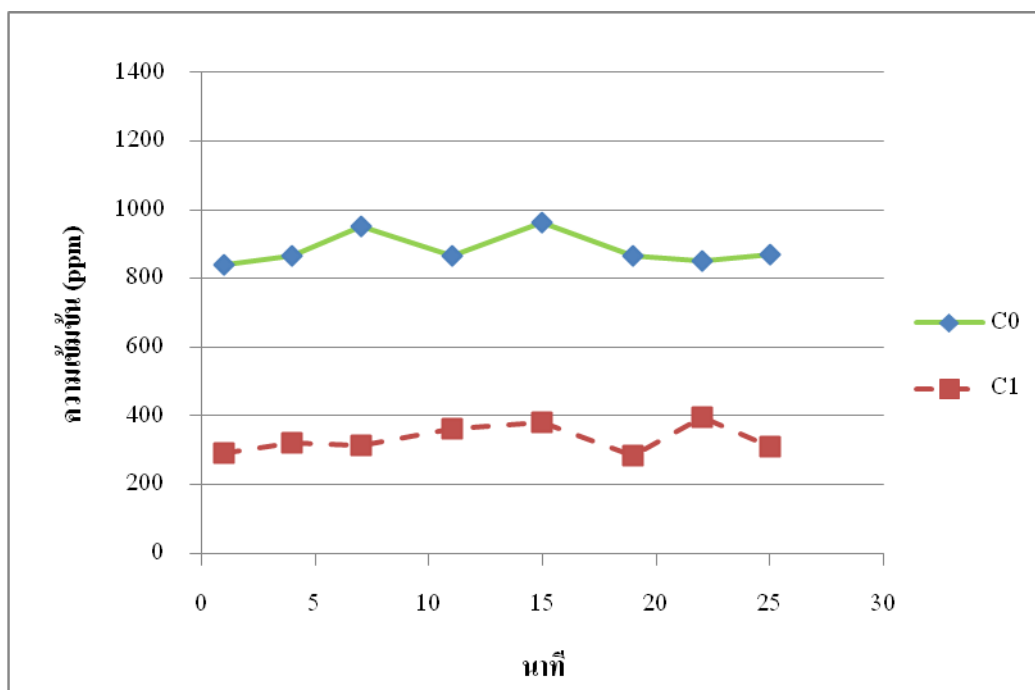


#### 4. ผลการดูดซับไอระเหยของเอทริลเบนซีนของตัวอย่าง S16

ตารางที่ ง.7 ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นขาเข้าและขาออกที่นาที่ต่างๆ

นาที่	C0	C1
1	841.106	292.256
4	866.514	320.426
7	951.519	312.214
11	866.905	363.123
15	961.132	382.714
19	864.75	282.628
22	849.506	395.36
25	868.306	311.839

ตารางที่ ง.8 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยความเข้มข้นขาเข้าและขาออกที่นาที่ต่างๆ



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวดาราริป์ เพ็ชรพรหม เกิดเมื่อวันที่ 12 กันยายน พ.ศ.2530 ที่จังหวัดสงขลา สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2552 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2553

## การเผยแพร่วิทยานิพนธ์

- [1] ดาราริป์ เพ็ชรพรหม ปนัดดา คงศรีเจริญ เซวลิต เสนานุรักษ์วรกุล และสุธา ขาวเชียร. “การดูดซับบีทีทีด้วยตัวดูดซับนุ่นผสมวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน”. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 12, โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออร์คิด, ขอนแก่น. 27-29 มีนาคม, 2556. หน้า 13-14.