

การดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคารด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟ

นางสาวศศิกร แสงพงษ์ชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
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 VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS (VOCs) IN INDOOR
ENVIRONMENT USING ACTIVATED CARBON PRODUCED FROM
COFFEE BEAN RESIDUE

Miss Sasikorn Sangpongchai

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

(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคารด้วยถ่านกัมมันต์
ที่ผลิตจากกากกาแฟ

โดย

นางสาวศศิกร แสงพงษ์ชัย

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.ทรรศนีย์ พฤกษาสีหิ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ทรรศนีย์ พฤกษาสีหิ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ตุลวิทย์ สถาปนจารุ)

ศศิกร แสงพงษ์ชัย : การดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคารด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟ. (ADSORPTION OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS (VOCs) IN INDOOR ENVIRONMENT USING ACTIVATED CARBON PRODUCED FROM COFFEE BEAN RESIDUE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร.ทรรศนีย์ พลกษาศิทธิ, 153 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดฟอสฟอริก และศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคารชนิดที่สำคัญ ได้แก่ เบนซีน โทลูอิน เอทิลเบนซีน และไซลีน หรือสารบีเทค (BTEX) จากการศึกษพบว่า กากกาแฟที่ถู้อะราบิก้าและพันธุ์โรบัสตามีองค์ประกอบโดยน้ำหนักของเซลลูโลสประมาณ 9 - 20 % เฮมิเซลลูโลส 77 - 91% และลิกนิน 0.3 - 3% กากกาแฟทั้งสองชนิดมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ประมาณ 64 - 68 % โดยน้ำหนัก ถ่านที่ผลิตจากกากกาแฟพันธุ์โรบัสตามีความเหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เพราะให้ค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงกว่าถ่านจากกากกาแฟพันธุ์โรบัสตามากกว่าที่ เหมาะสมที่สุดในการเตรียมถ่านกัมมันต์ คือ การคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ในอัตราส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวแบบ BET ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนสูงที่สุดเท่ากับ 1,769 m^2/g 0.7947 nm และ 0.7517 cm^3/g ตามลำดับ ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ และถ่านกัมมันต์เกรดการค้าเป็นชนิดเดียวกัน คือ ไอโซเทอมชนิดที่ 1 แสดงถึงลักษณะการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) และเป็นการดูดซับก๊าซบนถ่านกัมมันต์ที่ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก หมู่หน้าที่ที่ปรากฏบนผิวถ่านกัมมันต์ คือ หมู่ไฮดรอกซิล (O-H) และหมู่คาร์บอนิล (C=O) เป็นหลัก เมื่อนำถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่เตรียมได้มาทดสอบการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยที่เกิดจากสีทาภายในชนิดสีน้ำ พบว่า ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟมีประสิทธิภาพในการดูดซับ Benzene และ Toluene สูงสุดเท่ากับ 99.76% และ 99.71% ตามลำดับ และจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารบีเทครวม (Total BTEX) ที่พบในสีทาภายในอาคารชนิดสีน้ำมัน พบว่า ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุด รองลงมาเป็นถ่านกากกาแฟที่เผาที่ 400 °C ยังไม่ผ่านกระตุ้นด้วยสารเคมี และกากกาแฟก่อนเผา โดยมีค่าเท่ากับ 97.65% 80.06% และ 61.27% ตามลำดับ

สาขาวิชา..... วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต.....

ปีการศึกษา..... 2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5187279720 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS : ACTIVATED CARBON / COFFEE BEAN RESIDUE / CHEMICAL ACTIVATION / VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS (VOCs)

SASIKORN SANGPONGCHAI : ADSORPTION OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS (VOCs) IN INDOOR ENVIRONMENT USING ACTIVATED CARBON PRODUCED FROM COFFEE BEAN RESIDUE. ADVISOR: TASSANEE PRUEKSASIT, Ph.D., 153 pp.

This research aimed to study the preparation of activated carbon from coffee residue by chemical activation with $ZnCl_2$, NaOH, and H_3PO_4 , and the efficiency of activated carbon to adsorb important volatile organic compounds (VOCs) in indoor air including benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (or BTEX). From this study, composition of cellulose, hemicelluloses, and lignin determined in Arabica and Robusta coffee were approximately 9 - 20, 77 - 91, and 0.3 - 3 % by weight. The major elemental composition was carbon which account for 64.43 - 68.19 % by weight. The charcoal produced from Arabica coffee residue was selected for further activation step because their iodine number was higher than those of Robusta. The coffee residue carbonized at $400^\circ C$ for 1 hr. following by the activation with H_3PO_4 at 1:1 impregnation ratio and carbonized again at $700^\circ C$ for 1 hr. was the optimum condition of activated carbon preparation. This condition gave the highest iodine number, BET surface area, pore width, and pore volume, with the values of 300.56 ± 5.11 mg/g, $1,769$ m²/g, 0.7947 nm, and 0.7517 cm³/g, respectively. The nitrogen adsorption isotherm at 77 K of activated carbon produced from coffee residue and that of the commercial were classified as type I which showed the monolayer adsorption and consisted of micropores. The result of FTIR showed the main functional groups, namely hydroxyl (O-H) and carbonyl (C=O). For the adsorption study of activated carbon produced from coffee residue, the result showed that the efficiency of the absorbent to adsorb VOCs particularly benzene and toluene emitted from water base paints were up to 99.76% and 99.71%, respectively. Furthermore, the efficiency of adsorption total BTEX released from oil base paints were presented the highest at 97.65% by using activated carbon prepared from coffee residue, and followed by the coffee residue char carbonized at $400^\circ C$ and the coffee residue before carbonization which were at 80.06% and 61.27%, respectively.

Field of Study : Environmental Science Student's Signature

Academic Year : 2011..... Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความเมตตากรุณา การดูแลเอาใจใส่ ให้กำลังใจ รวมทั้งให้คำแนะนำ และแนวทางในการทำงานทุกขั้นตอน ตลอดจนการตรวจแก้ไขอย่างละเอียดจากอาจารย์ ดร.ทรรศนีย์ พุกษาสัทธี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณของท่านอาจารย์เป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธิกุล และรองศาสตราจารย์ ดร.ตุลวิทย์ สถาปนจารุ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก “ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณบริษัทออกแบบไร่นา (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์หากกาแพในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้เตาเผาในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ห้องปฏิบัติการในการทำวิจัย และขอขอบพระคุณพี่เพ็ญศรี ชูบรรจง ที่คอยให้ความช่วยเหลือเรื่องอุปกรณ์การทำวิจัย

ขอขอบพระคุณหลักสูตรสหสาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่อง GC/FID ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณพี่จิตตรี พละกุล ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่น้องทุกคนที่ให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฏ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon).....	5
2.2 การดูดซับ (Adsorption).....	18
2.3 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm).....	23
2.4 การทดสอบสมบัติของถ่านกัมมันต์.....	29
2.5 สารอินทรีย์ระเหย.....	36
2.6 กาแฟ.....	46
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	49
3. วิธีดำเนินการศึกษา.....	54
3.1 พื้นที่ทำการศึกษา.....	54
3.2 วิธีดำเนินการศึกษา.....	54
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	65

บทที่	หน้า
3.4 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	65
4. ผลการศึกษาและอภิปรายผล.....	66
4.1 ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของกาแฟ.....	66
4.2 การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านจากกากกาแฟก่อนการกระตุ้นทางเคมี.....	70
4.3 สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ.....	75
4.4 กราฟมาตรฐาน BTEX และความเข้มข้นต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้.....	91
4.5 ประสิทธิภาพการดูดซับสาร BTEX ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ.....	93
4.6 ประสิทธิภาพการดูดซับของกากกาแฟ ถ่านกากกาแฟที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นและถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่เผากระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$	100
5. สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ.....	104
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	104
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	106
รายการอ้างอิง.....	107
ภาคผนวก.....	112
ภาคผนวก ก การหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM D 4607 - 94.....	113
ภาคผนวก ข Chromatograms ของสารละลายมาตรฐาน BTEX.....	118
ภาคผนวก ค ผลการทดลอง.....	120
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	130
ภาคผนวก จ FTIR สเปกตรัม.....	151
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	153

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 วัตถุประสงค์ชนิดต่างๆ ที่ได้มีการศึกษาเพื่อใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์.....	12
2.2 แหล่งกำเนิดสาร VOCs ที่สามารถตรวจพบได้ ภายนอกอาคาร และภายในอาคาร.....	39
2.3 ปริมาณความเข้มข้นของ VOCs ทั้ง 6 ชนิดที่พบในทุกพื้นที่ศึกษาในเขต กรุงเทพมหานคร.....	40
2.4 ตัวอย่างสาร VOCs บางชนิด ที่มีผลกระทบต่อระบบเนื้อเยื่อ และเป็นอันตรายต่อ สุขภาพ.....	45
2.5 สาร VOCs ที่เป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) และสารส่งเสริมการเกิดเนื้องอก (tumor promoter) และชนิดของมะเร็ง.....	46
3.1 ชุดการทดลองถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	58
3.2 ชุดการทดลองการทดสอบการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย.....	60
3.3 สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างสารอินทรีย์ระเหย.....	60
3.4 Retention time ของสารละลายมาตรฐาน BTEX.....	61
3.5 ผลการทดสอบ % Recovery ของ Volatile Organic Compounds.....	64
4.1 ปริมาณองค์ประกอบของเฮลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในกาแฟพันธุ์อะราบิกา และพันธุ์โรบัสตา.....	67
4.2 ปริมาณองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ในกาแฟพันธุ์อะราบิกา และพันธุ์โรบัสตา.....	69
4.3 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านจากกากกาแฟที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น.....	75
4.4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ และถ่านกัมมันต์เกรดการค้า.....	87
4.5 ค่าพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่เตรียมใน การศึกษานี้และการศึกษาที่ผ่านมา.....	89
4.6 ค่าพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากวัตถุประสงค์ต่างๆ ที่มี การนำไปใช้ในการดูดซับมลสารในอากาศ.....	89
4.7 ค่า R ² ของสารละลายมาตรฐาน BTEX จากการสร้าง Calibration curve.....	92
4.8 ค่า LOD และ LOQ ของสารละลายมาตรฐาน BTEX.....	93

ตารางที่	หน้า
4.9 ปริมาณ Benzene และ Toluene เฉลี่ยในสีทาภายในชนิดสีน้ำแต่ละชนิด.....	95
4.10 ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยเฉลี่ยในสีทาภายในชนิดสีน้ำทั้ง 2 ประเภท.....	96
4.11 ปริมาณการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยบนถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟของสีทาภายในชนิดสีน้ำ.....	99
4.12 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยเฉลี่ยบนถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟในสีทาภายในชนิดสีน้ำทั้ง 2 ประเภท.....	99
4.13 ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยในสีทาภายในชนิดสีน้ำ.....	100
4.14 ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟในการดูดซับ BTEX ในสีทาภายในชนิดสีน้ำมัน.....	102

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous).....	6
2.2 ขนาดและการวางตัวของรูพรุน.....	7
2.3 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารบนถ่านกัมมันต์.....	7
2.4 โครงสร้างของแกรไฟต์ (Graphite).....	8
2.5 การดูดซับของตัวดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น.....	20
2.6 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวดูดซับไปยังตัวดูดซับ.....	22
2.7 กลไกการดูดซับแบบชั้นเดียว.....	24
2.8 ตัวดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว ปริมาณตัวดูดซับที่ ดูดซับสูงสุดบนพื้นที่ผิวเท่ากับ q_m	24
2.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์.....	25
2.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของฟรุนดลิช.....	27
2.11 ไอโซเทอมการดูดซับทั้ง 5 ชนิด.....	28
2.12 ส่วนประกอบต่างๆ ของเมล็ดกาแฟ.....	47
2.13 กระบวนการผลิตกาแฟสำเร็จรูป.....	49
3.1 เครื่อง Elemental Analyzer Model FlashEA 1112.....	56
3.2 Tin Capsule และ Sealing Device.....	56
3.3 ชุดการทดลองในการเก็บตัวอย่าง.....	59
3.4 ชุดการทดลองก่อนและขณะเก็บตัวอย่าง.....	59
3.5 เครื่อง GC/FID รุ่น 6890N.....	61
3.6 ขั้นตอนการสกัดสารอินทรีย์ระเหยจากหลอด Active gas tube.....	63
4.1 องค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในตัวอย่างกาแฟ และวัตถุดิบชนิด อื่นๆ.....	67
4.2 องค์ประกอบของ C H N ในตัวอย่างกาแฟ.....	69
4.3 ลักษณะโครงสร้าง พื้นที่ผิว และความเป็นรูพรุน ของกากกาแฟบ้านไร่กาแฟพันธุ์ อะราบิกา ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 OC เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่กำลัง ขยาย 500 และ 1000 เท่า.....	71

ภาพที่	หน้า
4.4 ลักษณะโครงสร้าง พื้นที่ผิว และความเป็นรูพรุน ของกากกาแฟบ้านไร่กาแฟพันธุ์โรบัสตา ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 500 และ 1000 เท่า.....	72
4.5 ลักษณะโครงสร้าง พื้นที่ผิว และความเป็นรูพรุนของถ่านที่กระตุ้นด้วย H ₃ PO ₄ และเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	77
4.6 ลักษณะโครงสร้าง พื้นที่ผิว และความเป็นรูพรุนของถ่านที่กระตุ้นด้วย ZnCl ₂ และเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	78
4.7 ลักษณะโครงสร้าง พื้นที่ผิว และความเป็นรูพรุนของถ่านที่กระตุ้นด้วย NaOH และเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	79
4.8 ลักษณะโครงสร้าง พื้นที่ผิว และความเป็นรูพรุนของถ่านกากกาแฟก่อนการกระตุ้นที่เผาที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	79
4.9 ลักษณะโครงสร้าง พื้นที่ผิว และความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวเกรดการค้า ที่กำลังขยาย 500 และ 1,000 เท่า.....	80
4.10 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K บนถ่านกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย H ₃ PO ₄ ที่อุณหภูมิ 500 600 700 และ 800 °C.....	81
4.11 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K บนถ่านกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย ZnCl ₂ ที่อุณหภูมิ 500 600 700 และ 800 °C.....	82
4.12 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K บนถ่านกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 500 600 700 และ 800 °C.....	83
4.13 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K บนถ่านกัมมันต์เกรดการค้า.....	84
4.14 พื้นที่ผิวแบบ BET (m ² /g) ขนาดรูพรุน (nm) และปริมาตรรูพรุนสูง (cm ³ /g) ของถ่านกากกาแฟที่ผ่านกระตุ้นด้วยสารชนิดต่างๆ และที่อุณหภูมิต่างๆ.....	88
4.15 Calibration curve ของสารละลายมาตรฐาน BTEX.....	92
4.16 ปริมาณ Benzene ในสีทาภายในชนิดสีน้ำ (ประเภทธรรมดา และประเภท Low VOCs).....	95

ภาพที่	หน้า
4.17 ปริมาณ Toluene ในสีทาภายในชนิดสีน้ำ (ประเภทธรรมดา และประเภท Low VOCs).....	96
4.18 ความสามารถในการดูดซับ Benzene ในสีทาภายในชนิดสีน้ำ (ประเภทธรรมดา และประเภท Low VOCs).....	97
4.19 ความสามารถในการดูดซับ Toluene ในสีทาภายในชนิดสีน้ำ (ประเภทธรรมดา และประเภท Low VOCs).....	97

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

°C	หมายถึง	องศาเซลเซียส
K	หมายถึง	องศาเคลวิน
kPa	หมายถึง	กิโลพาสคาล
mg/g	หมายถึง	มิลลิกรัมต่อกรัม
µg/m ³	หมายถึง	ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
m ² /g	หมายถึง	ตารางเมตรต่อกรัม
cm ³ /g	หมายถึง	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม
VOCs	หมายถึง	Volatile Organic Compounds หรือสารอินทรีย์ระเหย
BTEX	หมายถึง	เบนซีน โทลูอีน เอทิลเบนซีน และไซลีน
p/p ₀	หมายถึง	ความดันสัมพัทธ์ (relative pressure) เป็นความดัน ของสารถูกดูดซับ ณ จุดสมดุลของการดูดซับ เทียบกับความดัน มาตรฐาน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมนุษย์ได้ตระหนักถึงคุณภาพอากาศ และให้ความสำคัญกับคุณภาพอากาศ ภายในอาคารมากขึ้น เนื่องจากในหนึ่งวันประชากรส่วนใหญ่ใช้เวลามากกว่าร้อยละ 80 อาศัยอยู่ ในบ้านหรือในที่ทำงาน (Srivastava และคณะ, 2000) ดังนั้นจึงมีความเสี่ยงสูงที่จะได้รับสัมผัส สารมลพิษภายในอาคาร โดยผู้ที่อาศัยอยู่ในอาคารนั้นมักมีอาการปวดศีรษะ ระบายเคืองในตา จมูก หรือลำคอ หน้ามืด วิงเวียน คลื่นไส้ ไอแสบๆ ผิวหนังแสบและคัน ไม่ค่อยมีสมาธิในการทำงาน อ่อนเพลียง่าย และมีความไวต่อกลิ่นมาก ซึ่งมีสาเหตุมาจากสารเคมีที่ฟุ้งกระจายภายในอาคาร หรือจากเครื่องใช้ในสำนักงาน สารมลพิษภายในอาคารที่สำคัญ ได้แก่ สารอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds, VOCs) ชนิดที่พบได้บ่อย คือ เบนซีน โทลูอีน เอทิลเบนซีน และไซลีน (Ilgen และคณะ, 2000) ที่อุณหภูมิห้อง สาร VOCs บางชนิดสามารถระเหยเป็นไอจากสถานะ ของแข็ง หรือของเหลวได้ สารเหล่านี้ได้แก่ พอร์มาลีน สารกำจัดแมลง สารละลาย สารทำความสะอาด เบนซีน และเปอร์โคโรเอททีลีน เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแหล่งปลดปล่อยสาร VOCs ภายในอาคาร ยกตัวอย่างเช่น เครื่องหอม สเปรย์ฉีดผม เครื่องเรือน สีเคลือบเงา น้ำยาทำความสะอาด สี ทินเนอร์ เครื่องถ่ายและเครื่องพิมพ์เอกสารบางชนิด กาวบางชนิด และสีเมจิก มีการ รายงานผลการศึกษาที่พบว่า สาร VOCs ในอาคารมีปริมาณสูงเป็นสิบเท่าของปริมาณภายนอก อาคาร (ซีพีเอฟ เอสเอชอี ออฟฟิศ, 2552) Srivastava และคณะ (2000) ได้ศึกษาสาร VOCs ใน สิ่งแวดล้อมภายในอาคารของเมือง Mumbai ประเทศอินเดีย พบสาร toluene และ xylene เป็น หลัก ภายในอาคารที่มีการซ่อมแซม ขัดเงา และเคลือบเงาเฟอร์นิเจอร์ นอกจากนี้ Ilgen และคณะ (2000) ได้ศึกษาความเข้มข้นของสาร BTEX ในอาคาร พบว่า ห้องที่มีการทาสีใหม่ มีความเข้มข้น ของ toluene สูงถึง $663.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ รองลง มาคือ m/p-xylene $100.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ เป็นต้น

สารอินทรีย์ระเหยที่ปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมส่วนมากจะอยู่ในสถานะก๊าซหรือ ของเหลว ซึ่งยากต่อการกำจัด วิธีการกำจัดอาจใช้วิธีทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ การใช้เยื่อแผ่นหรือ การดูดซับ ซึ่งในปัจจุบันตัวดูดซับเป็นอุปกรณ์หลักชนิดหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการตรวจวัดคุณภาพ อากาศ และเป็นการทำบำบัดสารมลพิษทางอากาศ ทำให้ลดการปลดปล่อยมลสารออกสู่สิ่งแวดล้อม

(Harper, 2000) การดูดซับจึงเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากมีความสะดวกในการดำเนินการ และความเหมาะสมทางด้านราคา โดยชนิดตัวดูดซับที่นิยมใช้ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่มีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวสูง สามารถดูดติดสารที่อยู่ในสภาพของก๊าซและของเหลวได้ จึงมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท (อังคณา โพธิ์เจริญโยธิน, 2548 อ้างถึงใน ปรีชญา ชัยสาร, 2551) ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น วิธีการเตรียม โครงสร้างทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ และประเภทของหมู่หน้าที่บนผิวถ่านกัมมันต์ เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ว โครงสร้างทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ จะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาใช้ ในขณะที่ประเภทของหมู่หน้าที่จะขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้น วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์นิยมใช้วัสดุที่มีราคาถูกลงหรือเป็นของเหลือทิ้งที่มีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูง มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ มีปริมาณเถ้าต่ำ และมีความทนทานสูง คือ ไม่สลายตัวเมื่อเก็บไว้นาน จากงานวิจัยที่ผ่านมา วัตถุดิบที่นิยมนำมาใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ส่วนมาก ได้แก่ แกลบ ชี้เลื่อย กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม และเปลือกผลไม้ ส่วนงานวิจัยที่ใช้กากกาแฟนั้นยังพบไม่มากนัก

ปัจจุบันร้านกาแฟในประเทศไทยค่อนข้างเป็นที่นิยมอย่างมาก ซึ่งจะเห็นได้จากการที่มีร้านกาแฟทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ได้เปิดขึ้นทั่วไปในประเทศไทย ไม่ว่าจะเป็นในห้างสรรพสินค้า สำนักงาน โรงพยาบาล สถานบริการน้ำมันเชื้อเพลิง เป็นต้น ส่วนที่เหลือจากการชงกาแฟอย่างเช่น กากกาแฟ จึงกลายเป็นสิ่งเหลือทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ จากข้อมูลของกระทรวงพาณิชย์ปี 2551 พบว่า ปริมาณความต้องการใช้กาแฟภายในประเทศโดยสอบถามโรงงานผู้ผลิตกาแฟสำเร็จรูป และกาแฟคั่วบดสูงถึง 51,000 ตัน และคาดว่าในปี 2552 จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 56,100 ตัน (กรมการค้าภายใน, 2551) ซึ่งพบว่า การใช้กาแฟปริมาณเท่าไร ก็เหลือกากกาแฟทั้งเป็นปริมาณที่เท่ากัน ดังนั้น การใช้กาแฟถึง 56,100 ตันนั้น ย่อมส่งผลให้เกิดกากกาแฟที่เหลือทิ้งเป็นจำนวนมากเท่ากับ 56,100 ตันด้วย และกากกาแฟที่เหลือทิ้งเป็นจำนวนมากนี้ จะต้องนำไปกำจัดโดยการนำไปฝังรวมกับมูลฝอยทั่วไป เผาทิ้งเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง หรือใช้ทำปุ๋ย เป็นต้น

จากการศึกษางานวิจัยของ Nabais และคณะ (2007) พบว่า กากกาแฟมีความน่าสนใจในการนำมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบค่อนข้างสูง และมีปริมาณเถ้าต่ำ เมื่อนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์แล้วพบว่า ถ่านที่ได้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูง (Nabais และคณะ, 2007; Boudrahem, Benissad และ Amar, 2009) กากกาแฟจึงมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำมาสร้างมูลค่าเพิ่ม โดยการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่าย เพราะในเชิงพาณิชย์ราคาถ่านกัมมันต์นั้นค่อนข้างสูง จึงถูกจำกัดการใช้งานอยู่แค่เพียงบางกลุ่มเท่านั้น การใช้

ถ่านกัมมันต์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสม และเกิดการตกค้างในสิ่งแวดล้อมต่ำ และจากงานวิจัยของ Nabais และคณะ (2007) ยังพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟนั้น มีความหลากหลายของหมู่หน้าที่ ซึ่งปรากฏให้เห็นจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared (FTIR) ประกอบไปด้วย อีเทอร์ คิวโนน แล็กโตน คีโตน และไฮดรอกซิล จึงเกิดแนวความคิดที่จะนำกากกาแฟมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์

การศึกษาคั้งนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ ด้วยการกระตุ้นทางเคมี โดยใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นตัวกระตุ้น และนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปใช้ประโยชน์ในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคารชนิดที่สำคัญ ได้แก่ เบนซีน (Benzene) โทลูอีน (Toluene) เอทิลเบนซีน (Ethylbenzene) และไซลีน (Xylene) หรือสารบีเทค (BTEX)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)
- 2) เพื่อหาประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคารด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ให้คุณสมบัติการดูดซับที่ดีที่สุดหลังผ่านการกระตุ้น

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) พันธุ์กาแฟที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ กาแฟพันธุ์อะราบิกา (*Coffea arabica*) และพันธุ์โรบัสตา (*Coffea canephora*, var. *robusta*)
- 2) ศึกษาวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และปัจจัยที่มีต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ คือ ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น
- 3) วิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ เช่น ค่าการดูดซับไอโอดีน ลักษณะโครงสร้าง พื้นที่ผิว ความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์ หมู่หน้าที่ปรากฏบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ และไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์
- 4) ศึกษาความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคาร ได้แก่ เบนซีน (Benzene) โทลูอีน (Toluene) เอทิลเบนซีน (Ethylbenzene) และไซลีน (Xylene) หรือสารบีเทค (BTEX) โดยใช้สีทาภายในชนิดสีน้ำ และชนิดสีน้ำมัน เป็นแหล่งกำเนิดของสาร BTEX การทดลองนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory

scale) และทดสอบการดูดซับโดยควบคุมอัตราการไหลของอากาศเป็น 100 มิลลิลิตรต่อนาที ตามมาตรฐาน NIOSH 1501

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)
- 2) ทราบถึงประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากกาแฟ
- 3) เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาตัวดูดซับจากกากกาแฟ และวัสดุชนิดอื่น ในการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในการดูดซับสารชนิดอื่นๆ ต่อไป
- 4) ผลที่ได้จากการวิจัยสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในการทำงานวิจัยในระดับสูงต่อไป

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

2.1.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ คือ ถ่านที่มีคุณสมบัติดูดซับสี กลิ่น รส บางชนิดได้เป็นอย่างดี ถ่านชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นรูพรุน ผลิตได้จากถ่านหิน ถ่านไม้ ถ่านกะลามะพร้าว หรือถ่านกระดูก ด้วยกรรมวิธี ก่อถ่านกัมมันต์ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547)

ถ่านกัมมันต์ เป็นถ่านที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพโดยการกระตุ้น (Activation) ให้มีความสามารถในการดูดซับสารอื่นดีขึ้น ลักษณะทั่วไปเป็นของแข็งสีดำ มีทั้งที่เป็นเม็ดและเป็นผง ถ่านชนิดนี้มีพื้นที่ผิวสูงมาก วัตถุดิบที่นำมาเผาและปรับปรุงคุณภาพให้เป็นถ่านกัมมันต์มีมากมาย อาทิ กะลามะพร้าว ถ่านหิน กระดูก เลือด แกลบ และซีลี้อย (กระทรวงวิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี, 2551)

ถ่านกัมมันต์ คือ วัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ และมีความพรุน ซึ่งนำมาทำปฏิกิริยากับก๊าซ บางครั้งก็มีการเติมสารเคมีเข้าไป เช่น $ZnCl_2$ ก่อน ในระหว่างหรือหลังจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ (Marsh และ Rodriguez-Reinoso, 2006)

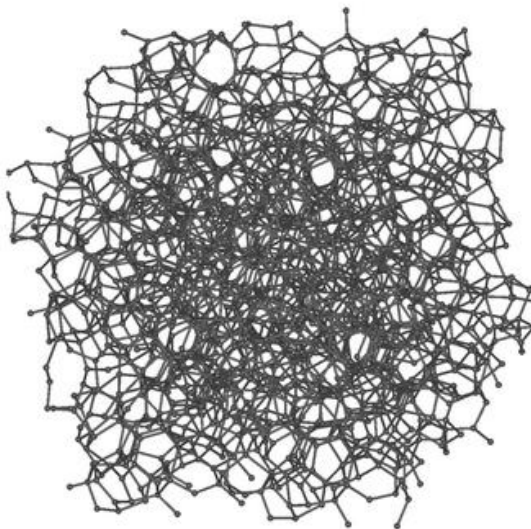
ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นถ่านที่ได้รับการเพิ่มคุณภาพ หรือประสิทธิภาพการดูดซับให้มากขึ้น โดยการใช้เทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์ โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง และมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่บนผิวและรูพรุนเหล่านั้น ทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง สามารถดูดซับสารที่อยู่ในสภาพของก๊าซและของเหลวได้ โดยทั่วไป ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขั้ว แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นเสมอที่ผิวหน้า และการจัดเรียงอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนัล (Hexagonal) ทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าสารดูดซับอื่น ๆ เช่น ซิลิกาเจล (Silica Gel) จึงทำให้ดูดซับสารได้มากกว่า (พรชชกร ใจประดับเพชร, 2549)

2.1.2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

2.1.2.1 โครงสร้างทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

2.1.2.1.1 ความเป็นผลึก

ถ่านกัมมันต์มีลักษณะโครงสร้างความเป็นผลึกที่ไม่แน่นอน คือ เป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous) ดังภาพที่ 2.1 ซึ่งมีความแตกต่างกับถ่านแกรไฟต์ (Graphite Carbon) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างความเป็นผลึกชัดเจน (Crystalline)



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous)

ที่มา: Wikimedia (2009)

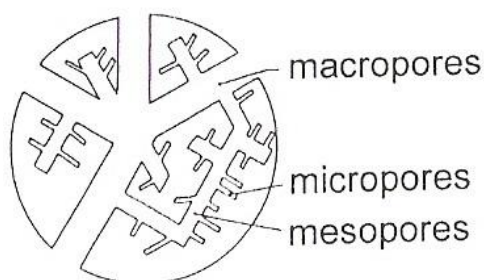
2.1.2.1.2 ขนาดของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดเล็ก จะมีอัตราการดูดซับเร็วกว่าขนาดใหญ่ ดังนั้น ถ่านกัมมันต์ชนิดผง จึงมีอัตราเร็วในการดูดซับที่สูงกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าขนาดใหญ่

2.1.2.1.3 พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์

พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูพรุนของถ่านกัมมันต์ คือ ถ้ามีรูพรุนมากก็จะมีพื้นที่ผิวมาก ถ้ามีรูพรุนน้อยพื้นที่ผิวก็จะน้อย โดยทั่วไปมักพิจารณาขนาดของรูพรุนเป็นอันดับแรกในการเลือกใช้ตัวดูดซับ เพราะโมเลกุลที่จะถูกดูดซับจะต้องมีขนาดเล็กกว่าขนาดของรูพรุน ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุและวิธีการกระตุ้นที่แตกต่างกัน ผิวของถ่านกัมมันต์ก็จะมีลักษณะรูพรุนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันด้วย รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบ และความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูพรุนเหล่านี้เปรียบได้กับหลอดแก้วขนาดเล็ก (Capillary tube) ที่เสียบเข้าไปในเนื้อถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปจะเรียกรูพรุนเหล่านี้ตามขนาด ซึ่ง Biniak Swiatkowski และ Pakula (2001) ได้แบ่งขนาดรูพรุนตามมาตรฐานของระบบ IUPAC เป็น 3 ขนาด ดังภาพที่ 2.2 ดังนี้

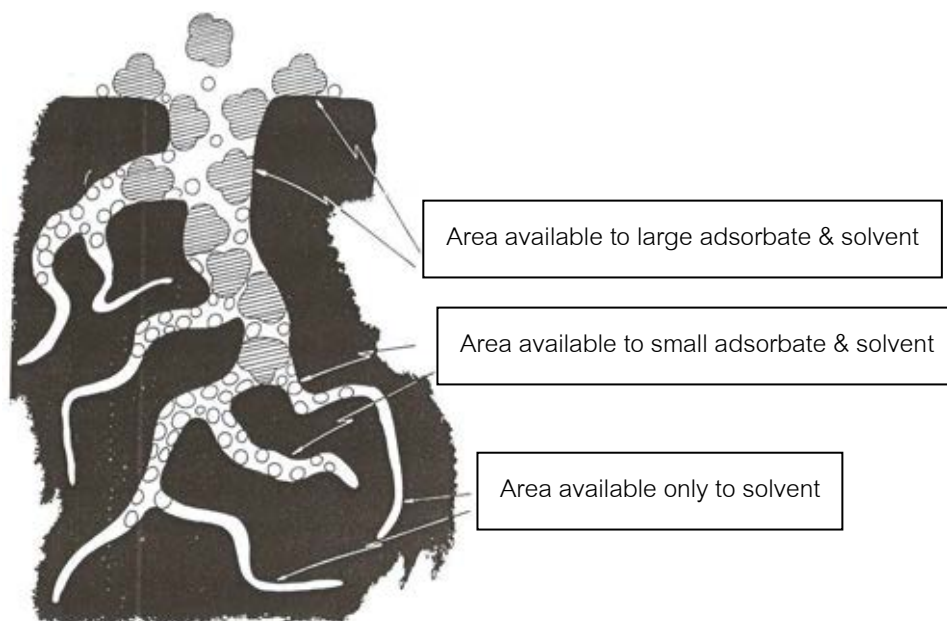
- ไมโครพอร์ (Micropores) มีขนาดรูพรุนน้อยกว่า 2 nm
- มีโซพอร์ (Mesopores) มีขนาดรูพรุน 2.0 - 50 nm
- แมคโครพอร์ (Macropores) มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่า 50 nm



ภาพที่ 2.2 ขนาดและการวางตัวของรูพรุน

ที่มา: Biniak Swiatkowski และ Pakula (2001)

โดยโมเลกุลของสารที่ถูกดูดติดจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของถ่านกัมมันต์ก่อน จะฟุ้งกระจายเข้าไปในรูพรุนใหญ่ (Macropores) แล้วจึงเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) และขนาดเล็กต่อไป (Micropores) ดังภาพที่ 2.3



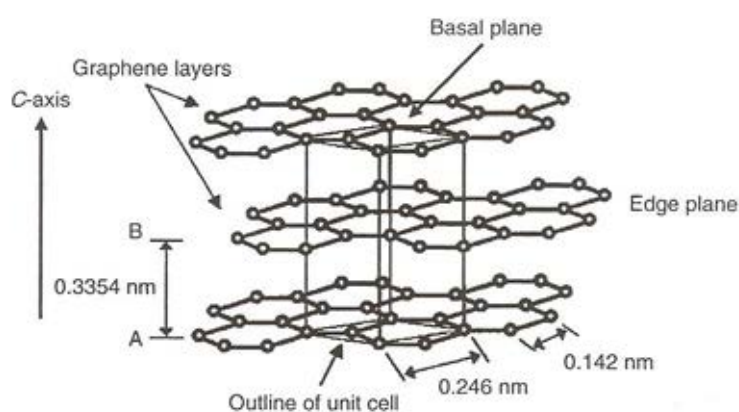
ภาพที่ 2.3 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารบนถ่านกัมมันต์

ที่มา: Radovic และ Rodríguez-Reinoso (1997)

โดยจะเคลื่อนที่เข้ารูพรุนขนาดเล็กได้ก็ต่อเมื่อสารที่ถูกดูดติดนั้นไม่ใหญ่กว่ารูพรุนขนาดเล็ก ดังนั้นอัตราการดูดติดผิวจึงถูกควบคุมด้วยด้วยอัตราการฟุ้งกระจายของโมเลกุลเข้าไปในรูพรุนของถ่าน (ภัทรินถน บุษสาย, 2547) ไมโครพอร์จึงมีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากพื้นที่การดูดซับและพลังงานดูดซับ (Adsorption energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความดันต่ำๆ รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาด หรือที่เรียกว่า การกระจายขนาดของรูพรุน (Pore size distribution) จะขึ้นกับชนิดวัสดุที่ใช้ และวิธีการกระตุ้น

2.1.2.2 โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ มีโครงสร้างที่แตกต่างจากถ่านแกรไฟต์ คือ ถ่านแกรไฟต์ จะมีโครงสร้างเป็นผลึกที่ชัดเจน ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนที่มีโครงสร้าง คล้ายรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า (Regular Hexagonal) อย่างต่อเนื่องและเป็นชั้นๆ แสดงดังภาพที่ 2.4 ระยะระหว่างอะตอมของคาร์บอนในแต่ละชั้นมีขนาด 0.142 nm โดยในแต่ละชั้นเรียงตัวขนานในระนาบเดียวกัน ระยะห่างระหว่างชั้นมีขนาด 0.3354 nm ส่วนถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะโครงสร้างเป็น คาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous Carbon) และมีโครงสร้างเป็นผลึกที่เล็กมาก (Microcrystallites) ประกอบด้วยวงหกเหลี่ยมด้านเท่าของอะตอมคาร์บอนผสมกัน เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นคาร์บอน มีขนาดประมาณ 15 nm และระยะห่างระหว่างผลึกเล็กๆ มีค่าระหว่าง 2-5 nm



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของแกรไฟต์ (Graphite)

ที่มา: Marsh และ Rodríguez-Reinoso (2006)

ถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่ มักเตรียมจากถ่านที่ได้จากการเผาผลาญสารอินทรีย์ด้วยความร้อน (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 °C ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า การคาร์บอนไนเซชัน

(Carbonization) ในระหว่างการเผาผลาญอะตอมต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน จะถูกกำจัดออกไปในรูปของก๊าซ อะตอมของคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยวงแหวนเฮลิยม (Aromatic ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และเกิดช่องว่างหรือโพรง ซึ่งจะเป็นที่อยู่ของพวกทาร์และสารอื่นที่ได้จากการเผาผลาญ ช่องว่างเหล่านี้ จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดติดผิว ด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้น (Activation) โดยการล้างพวกทาร์และสารต่างๆ ที่ได้จากการเผาผลาญออกจากช่องว่างหรือโพรง และสร้างหมู่ฟังก์ชันนอลขึ้นมาแทน ซึ่งความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ จึงเป็นผลสืบเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีด้วย

โดยทั่วไปแล้ว ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขี้ หรือมีขี้เล็กน้อย เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นที่ผิวหน้าเสมอ หรือสารอนินทรีย์ปริมาณเล็กน้อยที่เกาะอยู่บนพื้นผิว และการจัดเรียงตัวของอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนัล (Hexagonal) จึงทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับอื่นๆ เช่น ซิลิกาเจล เป็นต้น และเนื่องจากถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวในรูพรุนมาก จึงทำให้สามารถดูดซับสารอินทรีย์ที่ไม่มีขี้ หรือมีขี้เพียงเล็กน้อยได้มากกว่าตัวดูดซับชนิดอื่น

พื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะมีอะตอมที่สามารถเกิดพันธะเคมีกับอะตอมอื่นๆ ได้ เช่น อะตอมของออกซิเจน และไฮโดรเจน ในกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ จะทำให้ธาตุเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการผลิต ทั้งในขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชัน และการเกิดพันธะเคมีบนพื้นผิวในขั้นตอนการกระตุ้น การที่มีอะตอมของออกซิเจน และไฮโดรเจนนี้ส่งผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากอะตอมเหล่านี้เมื่อเกิดการรวมตัวกับอะตอมของคาร์บอนโดยเกิดพันธะเคมี จะเกิดเป็นกลุ่มฟังก์ชันนอล (Functional groups) บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ กลุ่มฟังก์ชันนอลที่พบบ่อย ได้แก่ Carbonyl group Phenolic hydroxyl group Quinone type carbonyl groups Normal lactones groups และ Carboxylic acid anhydrides groups เป็นต้น

เมื่อพิจารณาหมู่ฟังก์ชันนอลที่บริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ พบว่า หมู่ฟังก์ชันนอลที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบมีความสำคัญมากที่สุด เมื่อตรวจสอบที่บริเวณผิวของคาร์บอนโดยใช้เอกซ์เรย์ พบว่า อะตอมของออกซิเจนจะสร้างพันธะกับอะตอมของคาร์บอนซึ่งจะมีเป็นจำนวนมากที่บริเวณขอบของโมเลกุลคาร์บอนที่เกาะตัวเป็นอโรมาติก โดยพันธะระหว่าง O กับ H จะมีอิทธิพลมากที่สุดต่อลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ เช่น ความเป็นกรดที่บริเวณผิว การแลกเปลี่ยนไอออนบวก รวมถึงการดูดซับก๊าซ และไอที่มีขี้ และไม่มีขี้ และยังพบว่าเมื่อมีหมู่ที่แสดงความเป็นกรดที่

บริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ จะทำให้มีสมบัติในการชอบดูดน้ำมากขึ้น (Hydrophilic) ถ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างพื้นผิวของออกซิเจนที่มีขั้ว (Polar) เหมาะสำหรับการดูดซับสารอินทรีย์ที่มีขั้ว (Polar organic) ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีโครงสร้างพื้นผิวของออกซิเจน เหมาะสำหรับการดูดซับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Non-polar)

2.1.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์

กระทรวงอุตสาหกรรม (2547) ได้กำหนดชนิดของถ่านกัมมันต์ไว้ 2 ชนิด คือ

- ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon: PAC) เป็นถ่านที่มีขนาดปริมาณที่ร่อนผ่านร่อน 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก

- ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon: GAC) เป็นถ่านที่มีขนาดปริมาณที่ร่อนผ่านร่อน 150 ไมโครเมตร ต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

นอกจากนี้เกศรา นุตาลัย และคณะ (2531) ยังได้แบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ตามเกณฑ์ต่างๆ ดังนี้

1) แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

- ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Activated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวคาร์บอน มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดใหญ่

- ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีทางฟิสิกส์ (Physical Activated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้ก๊าซออกซิไดซ์ มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดเล็ก

2) แบ่งตามขนาดรูพรุนบนผิวคาร์บอน

- ขนาดเล็ก (Micropores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนไม่เกิน 15 นาโนเมตร มักใช้ในการดูดซับก๊าซ หรือไอระเหย

- ขนาดกลาง (Transitional pores หรือ Mesopores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 15 - 100 นาโนเมตร มักใช้ในปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Reaction)

- ขนาดใหญ่ (Macropores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร มักใช้ในการฟอกสี และการผลิตยา

3) แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ที่ได้

- ความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ในสภาวะที่เป็นสารละลาย เช่น การฟอกสีน้ำตาลดิบ หรือการทำน้ำให้บริสุทธิ์ เป็นต้น

- ความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ดูดก๊าซพิษ หรือไอระเหย

4) แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

- ก๊าซ (Gas Adsorbent) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับก๊าซพิษ และไอระเหยของสารอินทรีย์ มักใช้ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์ และมีความแข็ง (Hard Artificial Char) เป็นวัตถุดิบในการผลิต

- สี (Color Adsorbent) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการฟอกสี มักใช้ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์ และไม่แข็ง (Soft Artificial Char)

- โลหะ (Metal Adsorbent) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการแยกโลหะต่างๆ เช่น แยกทอง เงิน ออกจากแร่ที่ขุดได้

5) แบ่งตามรูปร่างลักษณะ

- ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon) ทำได้โดยการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาบด รูปร่างจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับวิธีการบด ซึ่งจะมีผลทำให้คุณสมบัติการดูดติดผิวแตกต่างกันออกไป ถ่านกัมมันต์ชนิดผงนี้นิยมใช้สำหรับการดูดสีในสภาวะที่เป็นของเหลวส่วนใหญ่ โดยทั่วไปมีขนาด 5 - 100 ไมโครเมตร

- ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon) ทำจากวัตถุดิบที่เป็นเม็ดหรือแบบผง ทำให้เป็นเม็ดโดยการเติมตัวประสาน (Binding agent) ตัวอย่าง เช่น ทาร์ (Tar) แล้วนำมาอัดเป็นเม็ด วัตถุดิบที่นิยมทำถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด ได้แก่ วัตถุดิบที่ค่อนข้างแข็งและมีความหนาแน่นสูง เช่น กะลามะพร้าว ถ่านหิน ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้ในการดูดกลิ่นก๊าซพิษ และไอของสารละลายอินทรีย์

2.1.4 การผลิตถ่านกัมมันต์

2.1.4.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบหลายชนิดที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ดังตารางที่ 2.1 เช่น ไม้ ชี้อเลื่อย กะลามะพร้าว ช้างข้าวโพด หรือ วัตถุดิบที่เป็นถ่าน เช่น ถ่านลิกไนท์ ถ่านพีท เป็นต้น ในการผลิตเพื่อการค้า สมบัติบางประการของวัตถุดิบเป็นสิ่งที่สำคัญในกระบวนการผลิต

วัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ ควรมีลักษณะดังนี้

- มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ
- มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง และมีค่าคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) สูง
- เป็นวัสดุเหลือทิ้ง มีราคาถูก และหาได้ง่าย

- มีปริมาณความชื้น (Moisture) ต่ำ
- มีสารที่ระเหยได้ (Volatile Matter) ต่ำ
- มีปริมาณขี้เถ้า (Ash) ต่ำ
- มีความสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ

อินทรีย์วัตถุที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดหลัก (เกศรา นุตาลัย และคณะ, 2531) ดังนี้

- 1) พวกเซลลูโลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ขี้เลื่อย ชานอ้อย ชังข้าวโพด เมล็ดในของผลไม้ เปลือกหุ้มเมล็ดผลไม้บางชนิด เป็นต้น
- 2) พวกถ่านหิน เช่น ลิกไนท์ พีท บิทูมินัส เป็นต้น
- 3) วัตถุดิบที่มาจากสัตว์ เช่น กระดูก เลือด

ตารางที่ 2.1 วัตถุดิบชนิดต่างๆ ที่ได้มีการศึกษาเพื่อใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

ชานอ้อย (Bagasse)	แกรไฟท์ (Graphite)
กากน้ำตาล (Beet-sugar sludges)	สาหร่ายทะเล (Kelp and Seaweed)
เลือด (Blood)	เขม่า (Lampblack)
กระดูก (Bones)	กากหนัง (Leather waste)
สารจำพวกแป้ง (Carbohydrates)	ลิกนิน (Lignin)
เมล็ดพืช (Cereals)	ถ่านลิกไนท์ (Lignite)
ถ่านหิน (Coal)	กากน้ำตาล (Molasses)
กะลามะพร้าว (Coconut shells)	เปลือกถั่ว (Nut shells)
เมล็ดกาแฟ (Coffee beans)	หินน้ำมัน (Oil shale)
ชังข้าวโพด (Corn cobs and corn stalks)	ถ่านพีท (Peat)
เปลือกเมล็ดฝ้าย (Cottonseed hulls)	กากกรดปิโตรเลียม (Petroleum acid sludge)
ของเสียจากโรงงานกลั่นสุรา (Distillery waste)	ถ่านหินน้ำมัน (Petroleum coke)
ปลา (Fish)	กากโปแตสเซียมเฟอร์โรไซยาไนด์
ฝุ่นของปล่องไฟ (Flue dust)	(Potassium ferrocyanide residue)
เมล็ดผลไม้ (Fruit pits)	เศษยาง (Rubber waste)
ของเสียจากโรงงานกลั่นสุรา (Distillery waste)	ขี้เลื่อย (Sawdust)
ปลา (Fish)	ไม้ (Wood)

ที่มา: Hassler (1974)

การคัดเลือกวัตถุดิบที่เหมาะสมแก่การผลิตนั้น นอกจากพิจารณาสมบัติบางประการของวัตถุดิบแล้ว ยังต้องคำนึงถึงราคาต้นทุน และกระบวนการผลิต ตลอดจนวัตถุประสงค์ของการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้งานด้วย สำหรับการเตรียมวัตถุดิบ อาจนำวัตถุดิบมาร่อนคัดขนาดหรือบดเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมก่อนที่จะนำไปสู่กระบวนการเผาหรือการกระตุ้นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ ซึ่งบางครั้งวัตถุดิบอาจมีความแข็งและเหนียว ยากแก่การบดวัตถุดิบโดยตรง ก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปเผาให้เป็นถ่านหรือการคาร์บอนไนซ์ก่อน แล้วจึงนำมาบดคัดขนาดก็ได้

โดยทฤษฎีแล้ว อินทรีย์วัตถุทุกชนิดสามารถนำมาทำถ่านกัมมันต์ได้ แต่คุณสมบัติของถ่าน และความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านที่ได้จะแตกต่างกันไป นอกจากนี้ อุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) รวมถึงวิธีการที่ใช้ในการกระตุ้น (Activation) มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ (ลลิตา นิตศนจารกุล, 2544)

2.1.4.2 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

ปัจจุบันกรรมวิธีในการผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ซึ่งโดยทั่วไปนั้น กระบวนการผลิตดังกล่าว ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 2 ขั้นตอน คือ การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) และการกระตุ้น (Activation)

2.1.4.2.1 การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

ขั้นตอนนี้เป็นการนำวัตถุดิบมาเผาแบบไพโรไลซิส (Pyrolysis) กล่าวคือ เป็นการเผาวัตถุดิบในสภาวะอับอากาศ หรือไร้ออกซิเจน ซึ่งจะทำการที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ถูกไล่ออกมาในรูปของก๊าซ ส่วนคาร์บอนที่มีอยู่ในรูปของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จะรวมตัวกันเป็นผลึก (Microcrystalline) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่าน ซึ่งขนาดของผลึกจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา ระยะเวลาในการเผา และโครงสร้างของวัตถุดิบ โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา คือ 200 - 500 °C แต่จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 °C การสูญเสียมวลส่วนใหญ่ยังไม่สามารถกำจัด ไฮโดรเจน และออกซิเจน ออกจากวัสดุได้หมด ทำให้ถ่านที่ได้มีคุณสมบัติไม่ดี หรือที่เรียกว่า หัวถ่าน ถ้าเผาถ่านที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 °C พบว่า ปริมาณร้อยละของคาร์บอนของถ่านที่ได้สูงขึ้น แต่ถ้าทำถ่านที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 °C จะทำให้ได้ถ่านต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 600 °C ดังนั้น ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตถ่านเพื่อให้ได้ผลผลิต และประสิทธิภาพในการแปรสภาพวัตถุดิบ หรืออินทรีย์วัตถุให้เป็นถ่านสูงสุด คือช่วงอุณหภูมิ 400 - 600 °C และควรเผาถ่านให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนที่สิ้นสุดโดยเร็ว เพื่อลดการสูญเสียของสารที่สลายตัวด้วยความร้อน

การคาร์บอนในเซชันเป็นกระบวนการไพโรไลซิสรูปแบบหนึ่งที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปแบบของชาร์ ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันชาร์ และก๊าซ อาจกล่าวได้ว่าการคาร์บอนในเซชันเป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น

การคาร์บอนในเซชันเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของโครงสร้างที่เป็นรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ออกมาในรูปของก๊าซ คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันในรูปของถ่านชาร์ (Char) ถ่านชาร์ที่ได้ควรมีลักษณะดังนี้

- เป็นของแข็งสีดำตลอด
- เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวที่เป็นมันเงา
- ปลายที่หักแหลมคม
- ปราศจากผงฝุ่นและซีเถ้า

ถ่านชาร์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนในเซชันนี้ ยังมีความสามารถในการดูดซับต่ำ เพราะยังคงมีน้ำมันดิน (Tar) ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (pore) หรือเกาะอยู่ตามผิวของถ่าน จึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ

2.1.4.2.2 การกระตุ้น (Activation)

การกระตุ้น (Activation) คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิว และการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น

การกระตุ้นเป็นขั้นตอนที่ทำให้ความพรุน และพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยการกำจัดน้ำมันดินให้หลุดออกมา จึงทำให้ผิวที่ได้มีอะตอมคาร์บอนอิสระอยู่ด้วย ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ซึ่งความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระในวงโคจรนอกสุดที่ไม่ครบ 2 หรือ 8 ตามกฎออกเตต จึงทำให้บริเวณดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่ว่องไว พยายามที่จะเกาะกับโมเลกุลอื่นๆ เช่น ออกซิเจนในอากาศ หรืออะตอมอื่นๆ ที่อยู่ในสารตั้งต้น กระบวนการกระตุ้นจะช่วยให้การเกาะกันของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่นกลายเป็นพันธะเคมีที่แข็งแรง มักเกิดกับอะตอมที่อยู่ที่วง aromatic ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแบบเคมี (Chemisorption) กับออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 400 - 500 °C และเปลี่ยนเป็นออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น

วัตถุประสงค์ของการกระตุ้น คือ

- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (Active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน

- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดติดผิว ทำให้พื้นผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึงทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ ทำให้มีความว่องไวในการดูดติดผิวสูงขึ้น

- เป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุ หรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดติดผิว (Active centers)

การกระตุ้นถ่านกัมมันต์แบ่งตามกลไกที่เกิดขึ้นได้ 2 ประเภท คือ การกระตุ้นทางกายภาพ และการกระตุ้นทางเคมี

1) การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น เนื่องจากรูพรุนจะกว้างมากขึ้น และมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น นิยมใช้ก๊าซออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น ไอน้ำ อิมิตวียิงยวด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซออกซิเจน เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อน ปฏิกริยาการกระตุ้นอาจเกิดความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากถึง $1,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ แต่พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Hassler, 1974) คือ

- ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ
- คุณสมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา

ข้อดีการกระตุ้นทางกายภาพ คือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง หลังจากกระตุ้นแล้วสามารถนำถ่านกัมมันต์ไปใช้งานได้ทันที ข้อเสีย คือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าแบบกระตุ้นด้วยสารเคมีประมาณ $700 - 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ จึงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน และรูพรุนของถ่านที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่าชนิดที่กระตุ้นด้วยวิธีการทางเคมี

2) การกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยเติมสารเคมีให้เป็นสารกระตุ้น ผสมคลุกเคล้ากับวัตถุดิบ และทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ สารประกอบโพแทสเซียมและโซเดียม เช่น โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) และโพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) และการกระตุ้นโดยใช้สารดูดน้ำ (Dehydrating agent) เช่น สารในกลุ่มเกลือโลหะคลอไรด์ เช่น ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) และกรดฟอสฟอริก

(H_3PO_4) เป็นต้น ซึ่งทำให้โมเลกุลของน้ำหลุดออกจากเซลลูโลส และลิกนินที่เป็นส่วนประกอบใน วัสดุดิบ อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นประมาณ 400 - 600 °C

ถ้าการกระตุ้นโดยใช้ $ZnCl_2$ ใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก จะทำให้อนุภาคคาร์บอนไม่สามารถรวมตัวกันเป็นผลึกขนาดใหญ่ขึ้นได้ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่ อุณหภูมิเหมาะสมจะมีรูพรุนมาก เพราะ $ZnCl_2$ จะละลายน้ำมันดิน (Tar) ซึ่งถ่านกัมมันต์ดูดซับอยู่ ออกไป ถ่านที่ได้จัดเป็น acid carbon

วิธีการกระตุ้นทางเคมี แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

- แบบที่ 1 นำวัสดุดิบมาทำการเผาในที่อับอากาศให้เป็นถ่านก่อน แล้วจึงนำไปแช่ หรือผสมกับสารเคมีที่ใช้กระตุ้น จากนั้นจึงทำการเผากระตุ้นแบบไพโรไลซิสอีกครั้ง

- แบบที่ 2 นำวัสดุดิบแช่หรือผสมกับสารเคมีที่ใช้กระตุ้นก่อน แล้วจึงทำการเผา กระตุ้นแบบไพโรไลซิสควบคู่ไปกับการทำให้วัสดุดิบเป็นถ่านในขั้นตอนเดียว

การกระตุ้นแบบนี้เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว โดยทำให้ถ่านมีรูพรุนมากขึ้น และเป็นการ เพิ่มความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ ประสิทธิภาพของการกระตุ้นขึ้นอยู่กับชนิดของ วัสดุดิบ ชนิดของสารกระตุ้น รวมถึงวิธีการอื่นๆ ที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วย

ข้อดีการกระตุ้นทางเคมี คือ ใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นไม่สูงมากประมาณ 400 - 600 °C ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีรูพรุนค่อนข้างใหญ่ ข้อเสีย คือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้ ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวเพิ่มขึ้น เครื่องมือที่ใช้ก็ต้องเป็นชนิดที่พิเศษ สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน

2.1.5 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในหลายกิจกรรม จึงจำเป็นที่จะต้องเลือกถ่านที่ เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานแต่ละประเภท ลักษณะสมบัติของถ่านที่เป็นตัวกำหนดการใช้งาน ได้แก่

- พื้นที่ผิว (Surface area) ใช้กำหนดขีดความสามารถในการดูดซับ
- ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density) เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการ ฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์
- ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Bulk density) ใช้กำหนดปริมาณถ่านที่ใช้
- ขนาดประสิทธิผล (Effective size) ใช้กำหนดภาวะทางชลศาสตร์
- ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) ใช้กำหนดการดูดติดผิวของโมเลกุล

- การวิเคราะห์ค่าผ่านตะแกรง (Sieve analysis) ใช้ตรวจสอบและกำหนดการบังคับควบคุมระบบ

- อะบราชันนัมเบอร์ (Abrasion number) ระบุถึงความคงทนต่อการขัดสี
- ร้อยละของเถ้า (% Ash) บอกระดับปริมาณกากของถ่านกัมมันต์ที่เหลือจากการเผา
- ความชื้น (Moisture) บอกระดับปริมาณน้ำในถ่านกัมมันต์
- ไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine number) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของถ่านกัมมันต์

ในการดูดติดผิวสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

- โมลาสนัมเบอร์ (Molasses number) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

- ขนาดรูพรุน (Pore size) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดติดผิวโมเลกุลจำเพาะบางชนิด

2.1.6 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ในอุตสาหกรรมมีการใช้ถ่านกัมมันต์อย่างแพร่หลาย โดยจะใช้ประโยชน์แตกต่างกันออกไป ได้แก่

2.1.6.1 ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับของเหลว (Liquid phase carbon)

เป็นการฟอกสี และทำให้ของเหลวบริสุทธิ์ อุตสาหกรรมที่นำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในสารละลายหรือในของเหลว ได้แก่

- อุตสาหกรรมน้ำตาล ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น
- อุตสาหกรรมน้ำมันและไขมันสำหรับบริโภค นอกจากใช้ในการฟอกสีแล้ว ยังใช้ในการแยกสบู่และเปอร็อกไซด์ออกจากน้ำมันและไขมันได้ด้วย

- อุตสาหกรรมอาหาร ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่น และฟอกสีของผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งดีกว่าการใช้สารเคมีชนิดอื่น เนื่องจากไม่เป็นอันตรายและไม่เกิดปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์อาหาร

- อุตสาหกรรมเครื่องดีมีแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ วิสกี้ มักใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการ ทำให้เครื่องดีมีที่มีรสชาติดีขึ้น

- อุตสาหกรรมเคมีและยา เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนในยา และเคมีภัณฑ์อื่นๆ เช่น สเตรปโตมัยซิน (Streptomycin) คาเฟอีน (Cafein) โซเดียมอะซิเตท (Sodium acetate) รวมทั้งกรดต่างๆ

- อุตสาหกรรมการให้น้ำให้บริสุทธิ์ เป็นการกำจัดรส สี และกลิ่น นอกจากนี้ยังใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

- อุตสาหกรรมแยกสารที่ต้องการ เช่น การแยกทองหลังการสกัดจากแร่ด้วยวิธีไฮยาไนต์ การแยกไอโอดีนออกจากน้ำเกลือที่เกิดในหลุมน้ำมัน (Petroleum oil-well brines) ตลอดจนการผลิตวิตามินและฮอร์โมนอีกหลายชนิด

- กระบวนการที่มีการใช้สารเร่ง (Catalytic Process) ถ่านจะทำหน้าที่เป็นตัวพาสารเร่ง (Catalyst carrier) ในปฏิกิริยาที่มีการใช้สารเร่งหลายชนิด เป็นตัวรองรับสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst support) สำหรับซิงค์อะซิเตท ในโรงงานผลิตไวนิลอะซิเตท รวมทั้งทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นการทำงานของตัวเร่งให้ดีขึ้นด้วย

- ใช้ในทางการแพทย์ เช่น ให้นำมาดูดซับบนถ่านกัมมันต์ ยาจะค่อยๆ ออกฤทธิ์โดยมีความเข้มข้นสม่ำเสมอ ตัวอย่างคือ Hydroxylaminophenylarosonic acid สำหรับรักษาโรคที่เกิดจากการติดเชื้ออะมีบา และพาราไซต์ และยังใช้ดูดสารพิษจากผู้ที่ได้รับยาเกินขนาด หรือ กินยาพิษ นอกจากนี้ยังใช้รักษาอาการมีก๊าซในกระเพาะมาก

2.1.6.2 ประเภทที่ใช้ในการดูดก๊าซและไอ (Gas Phase Carbon)

- อุตสาหกรรมทำหน้าที่ปกป้องกันก๊าซพิษ ทั้งที่ใช้กันในราชการทหารและที่ใช้กันทั่วไป ทั้งนี้ เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซพิษและไอของสารอินทรีย์ได้

- ใช้แยกก๊าซไซลีนออกจากก๊าซธรรมชาติ

- การนำไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ ถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้อง และจะคายออกที่ความดันของไอระเหยต่ำๆ

- ใช้แยกเบนซอล (Benzol) ออกจากก๊าซอุตสาหกรรม

- อุตสาหกรรมปรับอากาศ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดก๊าซพิษในอากาศต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และอะเซทิลีน

- ใช้ดูดซับกัมมันตภาพรังสีที่ออกมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ สำหรับหน่วยปฏิบัติการให้การสลายตัวเกิดขึ้นสมบูรณ์ ขณะที่ยังถูกจับไว้ในแอตติเวตเต็ดคาร์บอนเบด (Activated carbon bed)

- ใช้ในการกำจัดสารประกอบออร์แกนิกซัลเฟอร์ (Organic sulfur) เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสิ่งเจือปนในอื่นๆ จากโรงงานอุตสาหกรรม

- อุตสาหกรรมบุหรี โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นกั้นกรองบุหรี

2.2 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) หรือ การดูดติดผิว เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมากอย่างหนึ่ง และมีการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย ทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและ

ทางด้านสิ่งแวดล้อม การใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเลียม และปิโตรเคมี อุตสาหกรรมอาหารและยา อุตสาหกรรมการผลิตถ่านกัมมันต์ อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องกรองน้ำดื่ม และใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปาเพื่อการบริโภค เป็นต้น สำหรับการประยุกต์ใช้งานทางด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การกำจัดสารพิษต่างๆ ทั้งที่อยู่ในรูปของก๊าซและของเหลว เช่น การดูดซับมลพิษในอากาศ การลดปริมาณโลหะหนักที่เป็นพิษที่ละลายในน้ำ การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุล หรือคอลลอยด์ที่อยู่ในก๊าซหรือของเหลวให้มาเกาะจับ หรือติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายมา เรียกว่า “ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate)” ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า “ตัวดูดซับ (Adsorbent)” คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับ คือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ (นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์, 2550)

กระบวนการดูดซับจึงเป็นกระบวนการหนึ่งที่สารประกอบต่างๆ เคลื่อนย้ายจากสารละลาย จนกระทั่งสู่สถานะสมดุลระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกับปริมาณผิวของตัวดูดซับ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักคาร์บอน และความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่ ด้วยเส้นความสัมพันธ์ที่เรียกว่า Adsorption Isotherm สำหรับถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะของไอโซเทอมแตกต่างกันไปตามชนิดของรูพรุน ดังนี้

- ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ที่มีขนาดไม่แตกต่างกันมากนัก เส้นความสัมพันธ์จะขนานกับแกนราบ

- ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก และมีขนาดแตกต่างกันมากกว่าแบบแรก เส้นความสัมพันธ์จะขนานกับแกนราบ แต่ก่อนที่จะเข้าสู่แนวราบเส้นความสัมพันธ์จะมีความโค้งมนมากกว่า และความเข้มข้นที่สมดุลของสารที่ถูกดูดซับสูงกว่า

2.2.1 รูปแบบของการดูดซับ

รูปแบบของการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

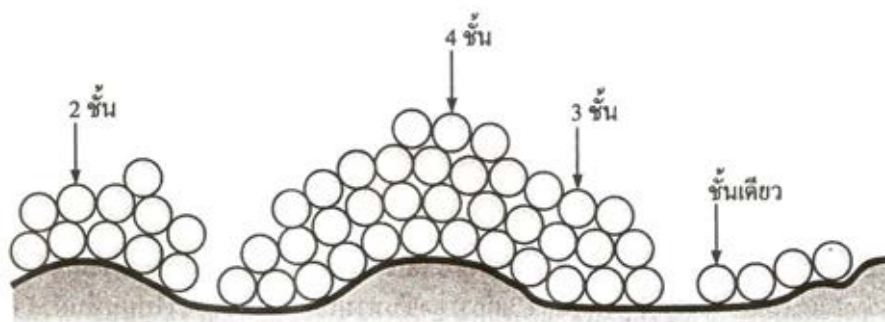
2.2.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption หรือ Physical adsorption)

เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะ หรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่พื้นผิวหน้าของตัวดูดซับ จัดเป็นแรงดูดค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล-ไดโพล เป็นกระบวนการที่ไม่เกิดการใช้หรือถ่ายอิเล็กตรอน และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี

ทั้งของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับ ในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (Multilayer) และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 2.5 การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไป จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น (นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์, 2550)

2.2.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือ จะต้องมีการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (สร้างพันธะโคเวเลนต์) ทำแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ มีผลทำให้การดูดซับทางเคมีโดยส่วนใหญ่ จะผันกลับไม่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพที่สามารถจะเกิดการผันกลับได้ ภายใต้สภาวะเดียวกัน และเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณที่จำเพาะเจาะจงเท่านั้น โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่เกาะอยู่บริเวณดังกล่าวจะเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer) และเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง ดังภาพที่ 2.5 (นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์, 2550)



ภาพที่ 2.5 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น
ที่มา: นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์ (2550)

2.2.2 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ (นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์, 2550)

- ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (External Diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของเหลวเข้าถึงผิวหน้าตัวดูดซับ
- ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (Internal Diffusion) การแพร่ภายในเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่บริเวณพื้นที่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ
- ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

2.2.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

อัตราการดูดซับมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังภาพที่ 2.6 ดังนี้ (นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์, 2550)

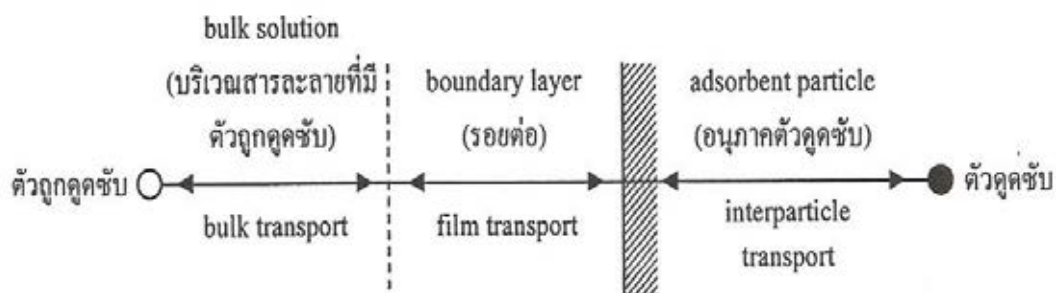
2.2.3.1 การขนส่งอนุภาค (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลว จะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

2.2.3.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

2.2.3.3 การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ เรียกว่า การแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับผิวเช่นเดียวกัน

การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ (Physical force) หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง

โมเลกุลแบบทางเคมี (Chemical force) หรือในบางกรณีอาจเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้ง 2 แบบ



ภาพที่ 2.6 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ
ที่มา: นิพนธ์ ตั้งคณานุกรักษ์ และคณิตา ตั้งคณานุกรักษ์ (2550)

2.2.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

2.2.4.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ

พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ เมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะบ่งบอกได้ถึงความสามารถในการดูดซับ โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมากเกินไป พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน ขนาดของตัวดูดซับจะไม่มีผลกับความสามารถในการดูดซับ

2.2.4.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ

ความสามารถในการละลายน้ำของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีผลต่อการดูดซับ ซึ่งแนวโน้มของการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับจะลดลงเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับละลายน้ำได้ดี เพราะว่ก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับ จะต้องมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลของน้ำ เพื่อให้โมเลกุลตัวถูกดูดซับหลุดออกจากน้ำไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับขนาดใหญ่มีความสามารถในการละลายน้ำลดลง จึงมีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับมากขึ้น

2.2.4.3 อัตราเร่งการปั่นกววน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการขนส่งโมเลกุลของระบบ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) และการแพร่เข้าสู่รูพรุน (Pore Diffusion) ซึ่งแล้วแต่การปั่นกววน

ของระบบ ถ้าการปั่นกวต้ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าการปั่นกวต้ำสูง จะทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นขั้นตอนในการกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.2.4.4 อุณหภูมิ

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

2.2.4.5 pH

การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรด (pH ต่ำ) ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นผิวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น และเมื่อสารละลายมี pH เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ OH^- บนพื้นผิวดูดซับเพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น แต่ถ้าสารละลายมี pH สูงกว่า 9 จะทำให้โลหะไอออนตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ และโลหะไอออนจะถูกดูดซับได้น้อยลง

2.3 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

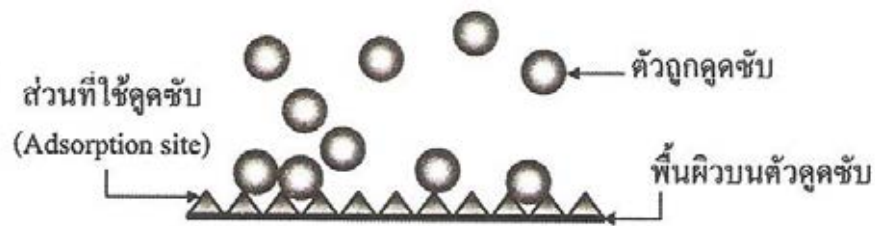
ไอโซเทอมการดูดซับ เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอมการดูดซับมีหลายรูปแบบ ดังนี้ (นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์, 2550)

2.3.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ คือ

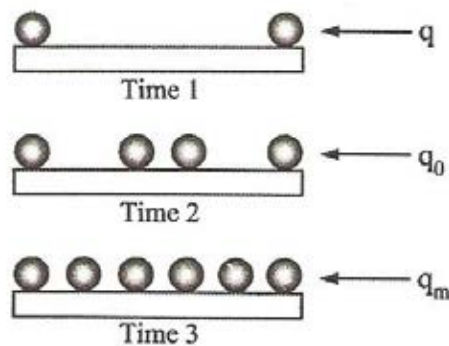
- พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface)
- มีกลไกของการดูดซับเหมือนกัน
- การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว
- ตัวถูกดูดซับจะเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน
- พื้นผิวบนตัวถูกดูดซับจะมีจำนวนจำกัด

- เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มี การเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ ดังภาพที่ 2.7
- พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.7 กลไกการดูดซับแบบชั้นเดียว

ที่มา: นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์ (2550)



ภาพที่ 2.8 ตัวถูกดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นที่ผิวเท่ากับ q_m

ที่มา: นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์ (2550)

รูปแบบของสมการ แสดงดังสมการที่ 2.1

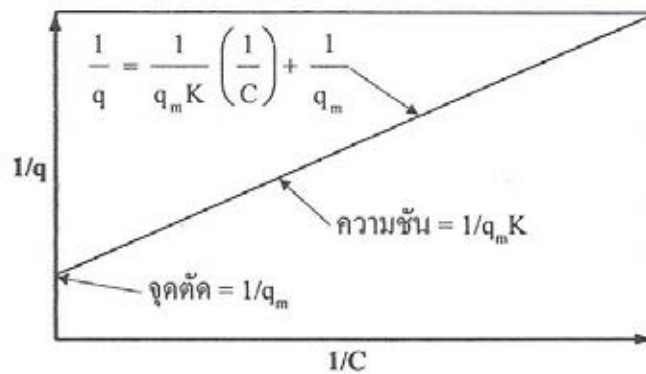
$$q = \frac{q_m KC}{1+KC} \tag{2.1}$$

โดย q	=	ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ/มวลตัวถูกดูดซับ (mg/kg mol/kg หรือ mol/g)
q_m	=	ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นผิว (mg/kg mol/kg หรือ mol/g)
C	=	ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลือนอยู่ในสารละลายที่สภาวะ สมดุล (mol/l)
K	=	ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ

เมื่อจัดรูปสมการที่ 2.1 ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้เป็น

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K} \left(\frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m} \quad (2.2)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{q}$ กับ $\frac{1}{C}$ จะได้กราฟเส้นตรง มีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{q_m K}$ และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์
ที่มา: นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์ (2550)

2.3.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนดิช (Freundlich adsorption isotherm)

สมการการดูดซับแบบฟรอนดิชใช้กันอย่างแพร่หลาย ภายใต้สมมติฐานที่ว่า

- พื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous adsorption surface พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด)

รูปแบบของสมการ แสดงดังสมการที่ 2.3

$$q = KC^{1/n} \quad (2.3)$$

โดย q = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูดูดซับ/มวลตัวดูดซับ
(mg/kg mol/kg หรือ mol/g)

C = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลือนอยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mol/l)

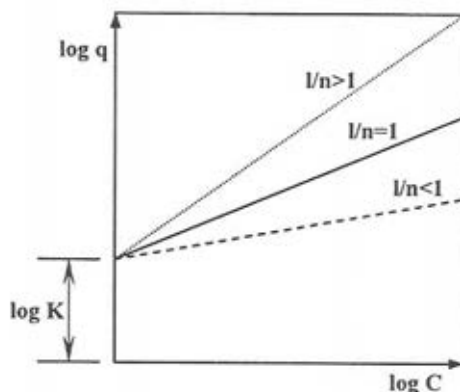
K = ค่าคงที่

n = ค่าคงที่

สมการที่ 2.3 ไม่ให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรอนดิช (Freundlich constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอรัมของการดูดซับ โดยทั่วไป n จะมีค่ามากกว่า 1 เพื่อให้สามารถหาค่า K และ n ได้ด้วยวิธีกราฟ จึงต้องใช้ logarithm มาจัดรูปแบบสมการ แสดงดังสมการที่ 2.4

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad (2.4)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดเท่ากับ $\log K$ ดังภาพที่ 2.10



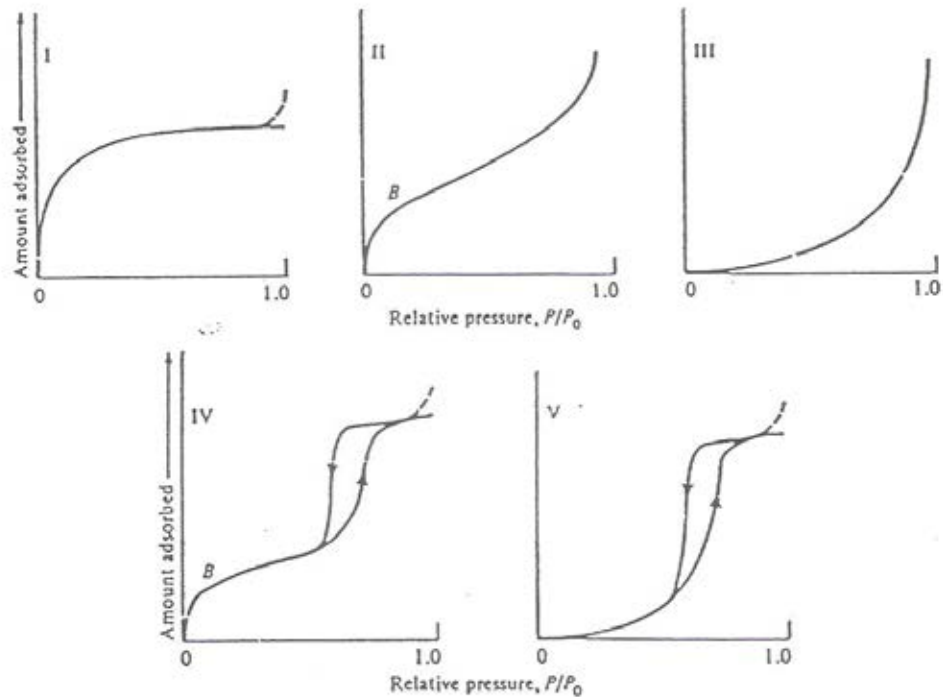
ภาพที่ 2.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของฟรุนดิช
ที่มา: นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์ (2550)

ถ้า $\frac{1}{n} = 1$ ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

$\frac{1}{n} < 1$ บอกถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น C หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

$\frac{1}{n} > 1$ บอกถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มากหรือกล่าวว่ามีบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับทางกายภาพทั้งหมดสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ชนิด โดยในตอนแรกเสนอโดย Brunauer, Deming, Deming and Teller (BDDT) ในปัจจุบันการแบ่งกลุ่มได้ถูกเรียกว่า Brunauer, Emmett and Teller (BET) classification ในการดูดซับนั้นเมื่อค่าความดันย่อยเพิ่มขึ้น (p/p_0) ปริมาณการดูดซับก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยจนการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเป็นแบบหลายชั้น ชนิดของไอโซเทอม แสดงดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 ไอโซเทอมการดูดซับทั้ง 5 ชนิด
ที่มา: วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์ (2543)

ไอโซเทอมแต่ละชนิด สามารถอธิบายได้ดังนี้

- ไอโซเทอมชนิดที่ 1 หรือไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ เป็นการดูดซับของตัวดูดซับที่มีลักษณะเป็นของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็ก และการดูดซับส่วนใหญ่จะเป็นการดูดซับในรูพรุนขนาดเล็ก พื้นที่ผิวภายนอก (external surface area) จะต่ำ ที่ความดันย่อยต่ำ ($< 0.1 p/p_0$) ก็สามารถดูดซับได้มาก ซึ่งการดูดซับจะเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยประมาณ $0.5 p/p_0$ ตัวอย่างการดูดซับของไอโซเทอมชนิดที่ 1 คือ การดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านที่มีรูพรุนขนาดเล็กที่อุณหภูมิ 77 K การดูดซับของแอมโมเนียบนผิวถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 273 K และการดูดซับบนซีโอไลต์

- ไอโซเทอมชนิดที่ 2 บางครั้งอาจเรียกว่าไอโซเทอมที่มีรูปแบบซิกมอยด์ หรือแบบเอส (sigmoid or S-shaped) เป็นรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับของตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน หรือตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งอาจเกิดการดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) จากไอโซเทอมบริเวณจุด B จะแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) จากนั้นจึงเริ่มการดูดซับแบบหลายชั้น และจะเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูงๆ ดังนั้นปริมาณการดูดซับที่จุด B จะสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ การดูดซับแบบนี้สามารถย้อนกลับได้

- ไอโซเทอมชนิดที่ 3 เป็นรูปแบบการดูดซับที่มีแรงดึงดูดที่อ่อนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่แรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันมีค่อนข้างมาก จากกรณีนี้จะทำให้เกิดการรวมตัวของตัวถูกดูดซับ ก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ ตัวอย่างไอโซเทอมชนิดที่ 3 ได้แก่ การดูดซับของไอน้ำบนแกรไฟต์

- ไอโซเทอมชนิดที่ 4 มักจะพบในวัสดุที่มีขนาดรูพรุนประมาณ 2 - 50 nm เมื่อความดันเพิ่มขึ้น ตัวถูกดูดซับจะเริ่มเข้าไปในรูพรุน ความชันของกราฟจะเพิ่มขึ้น และมีการเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งเป็นผลมาจากการควบแน่นภายในรูพรุนของของแข็ง (capillary condensation in pores) ซึ่งทำให้เกิดฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) โดยลักษณะของกราฟในช่วงแรกจะเหมือนกับชนิดที่ 2 ซึ่งจุดเปลี่ยนโค้งหรือจุด B จะแสดงถึงการดูดซับชั้นแรกอย่างสมบูรณ์ ตัวอย่างเช่น การดูดซับเบนซีน (benzene) บนไอรอนออกไซด์เจล (iron(III) oxide gel) ที่อุณหภูมิ 320 K

- ไอโซเทอมชนิดที่ 5 เป็นการดูดซับที่มีลักษณะคล้ายกับไอโซเทอมชนิดที่ 4 แต่เพียงการควบแน่นในรูพรุนในกรณีนี้เกิดขึ้นเมื่อค่า p/p_0 สูงกว่า เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับมีค่าต่ำ ส่วนฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) เกิดจากการดูดซับและการคาย เกิดจากการเอาชนะแรงคะปิลารีในการดึงตัวถูกดูดซับออกมา ไอโซเทอมชนิดนี้พบไม่บ่อยนัก

2.4 การทดสอบสมบัติของถ่านกัมมันต์

2.4.1 การศึกษาลักษณะโครงสร้าง พื้นที่ผิว และความเป็นรูพรุน

การศึกษาลักษณะโครงสร้าง พื้นที่ผิว และความเป็นรูพรุนนั้น ศึกษาจากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยมีรายละเอียดดังนี้ (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ, 2543)

2.4.1.1 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง

ในเครื่อง SEM ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักๆ ที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

- 1) แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron source)
- 2) อิเล็กโทรแมกเนติกเลนส์ (Electromagnetic lens) หรือขดลวดทำหน้าที่ควบคุมการส่องกราดของลำอิเล็กตรอน
- 3) ปัมสุญญากาศ และระบบควบคุมความดัน (Control pressure system)
- 4) ช่องใส่ตัวอย่าง (Specimen chamber)
- 5) ตัวตรวจวัดสัญญาณอิเล็กตรอน (Electron signal detector)
- 6) อุปกรณ์สร้างภาพ (Imaging device)

2.4.1.2 การเตรียมตัวอย่าง

ในการวิเคราะห์และศึกษาการใช้เครื่อง SEM เพื่อให้ได้ภาพที่ดีนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพหรือความสามารถของเครื่องแล้ว ยังขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่างและเทคนิคการเตรียมตัวอย่างที่เหมาะสมอีกด้วย ซึ่งสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงในการเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาโดยเครื่อง SEM มีรายละเอียดโดยสังเขปดังนี้

- ประเภทตัวอย่าง

เป็นวัสดุตัวอย่าง หรือผงวัสดุตัวอย่างที่เป็นของแข็งความดันไอต่ำมากกว่า 1 หรือเท่ากับ 10^{-3} ทอร์

- ขนาด (size)

ขนาดของตัวอย่างถูกจำกัดโดยขนาดของช่องใส่ตัวอย่าง และแท่นวางตัวอย่างของเครื่อง SEM ซึ่งแตกต่างกันแล้วแต่บริษัทและรุ่นที่ผลิต โดยในบางรุ่นอาจวางตัวอย่างขนาดใหญ่ได้ถึงประมาณ 15 ถึง 30 เซนติเมตร อย่างไรก็ตาม ขอบเขตการส่องกราดของลำอิเล็กตรอนจะจำกัดอยู่ในวงพื้นที่ไม่เกิน 4 ถึง 8 เซนติเมตร

- การเตรียมตัวอย่าง

ในห้องวางตัวอย่างของเครื่อง SEM มีแท่นควบคุมการเคลื่อนที่ของฐานใส่ตัวอย่าง (specimen holder) ที่มีตัวอย่างติดบนก้านวางตัวอย่าง (specimen stub) วางอยู่บนฐานใส่ตัวอย่าง ในการเตรียมตัวอย่างนั้นก็เพื่อให้ตัวอย่างอยู่ในสภาพที่พร้อมก่อนการวิเคราะห์ทดสอบ ซึ่งการเตรียมตัวอย่างแยกอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

- การติดตัวอย่างบนแท่นวางตัวอย่าง

ในกรณีตัวอย่างเป็นผง มักใช้สารยึดติดตัวอย่างจำพวกที่เป็นเทปกาวสองหน้า หรือเทปกาวคาร์บอนติดด้านบนของก้านวางตัวอย่าง และโรยผงตัวอย่างให้กระจายลงบนด้านหน้าของก้านวางตัวอย่างที่มีเทปกาวอยู่ จากนั้นใช้ลูกยางเป่าลมและปัดฝุ่นและเศษของผงตัวอย่างที่ไม่ยึดติดบนก้านวางตัวอย่างออก จากนั้นจึงนำเข้าเครื่อง SEM เพื่อทำการศึกษาต่อไป หรือทำการฉาบผิวด้วยโลหะ กรณีตัวอย่างไม่นำไฟฟ้า

- การเคลือบ (Coating) ผิวชิ้นงาน

ในการเคลือบหรือฉาบผิวตัวอย่าง นิยมใช้สารตัวนำไฟฟ้าจำพวกโลหะหนักที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น คาร์บอน (Carbon, C) ทอง (Gold, Au) และโลหะผสมทอง-พัลลาเดียม (Gold-Palladium Alloy, Au-Pd) เป็นต้น โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้าให้กับตัวอย่าง ทั้งนี้มีหลักการเบื้องต้นของการฉาบผิวคือ ต้องกระทำภายใต้ภาวะสุญญากาศ และให้

กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อให้โลหะหนักเปลี่ยนสภาพจากแห่งโลหะมาเป็นโมเลกุล และตกลงบนผิวตัวอย่างในอัตราส่วนเดียวกัน ทำให้โลหะตกตัวอย่างได้เป็นเนื้อเดียวกัน

2.4.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุน

พื้นที่ผิว (Surface area) ของสาร เป็นสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญต่อการนำไปใช้ประกอบการพิจารณาเพื่อนำสารนั้นไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ หรือตามที่มาตราฐานกำหนด การวัดพื้นที่ผิวสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่จะกล่าวนี้อาศัยการวัดจากปริมาณของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ (Adsorb) บนผิวของสาร แล้วนำมาคำนวณเป็นพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ของสารต่อไป (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ, 2543)

2.4.2.1 ทฤษฎีพื้นฐาน

บรูว์นอร์ เอ็มเมทท์ และเทลเลอร์ ได้ศึกษาการดูดซับ (Adsorption) ก๊าซไนโตรเจนบนผิวของสารที่อยู่ในสถานะของแข็งที่มีลักษณะเป็นโมเลกุลหลายชั้น (Multilayer) ภายใต้อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (Standard Temperature and Pressure, STP) พบว่าก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้น จะมีส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียว (Monolayer) และในขณะเดียวกันก๊าซไนโตรเจนส่วนที่เหลือจะเคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็นโมเลกุลหลายชั้น ซึ่งจากผลการศึกษาสามารถเขียนเป็นสมการที่เรียกว่า “สมการของ BET” (BET equation) ได้ดังสมการที่ 2.5

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \left(\frac{1}{V_m C} \right) + \left(\frac{C-1}{V_m C} \right) \times \frac{P}{P_0} \quad (2.5)$$

- โดย P = ความดันของก๊าซ (ตัวถูกดูดซับ) ที่ใช้ขณะทำการทดลอง (มิลลิเมตรปรอท)
- P_0 = ความดันอิ่มตัวของก๊าซที่เป็นตัวถูกดูดซับ (มิลลิเมตรปรอท)
- V = ปริมาตรของก๊าซที่ถูกดูดซับทั้งหมดที่ความดัน P (ลูกบาศก์เมตร)
- V_m = ปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้ในการคลุมผิวของสารด้วยความหนา 1 ชั้นโมเลกุลเต็มพอดี (ลูกบาศก์เมตร)
- C = ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ

จากสมการของ BET สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะของสารได้ โดยนำค่าปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้ในการคลุมผิวของสาร หรือค่า V_m ที่ได้จากสมการ 2.5 ไปคำนวณหาจำนวน โมเลกุลของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับในสภาพ 1 ชั้นโมเลกุล แล้วจึงนำไปคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยใช้สมการที่ 2.6

$$S_{sp} = \frac{N_A \times a_{max} \times S_0}{W} \quad (2.6)$$

โดย S_{sp} = พื้นที่ผิวจำเพาะของสาร (ตารางเมตรต่อกรัม)

N_A = เลขอาโวคาโดรน์มเบอร์ (6.023×10^{23})
(โมเลกุลต่อกรัมโมล)

a_{max} = จำนวนโมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับในสภาพ 1 ชั้นโมเลกุล
หรือเท่ากับ $\frac{V_m}{22414}$

S_0 = พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับ (16.2×10^{-20})
(ตารางเมตร)

W = น้ำหนักของสาร หรือตัวดูดซับ (กรัม)

2.4.2.2 การคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้ทฤษฎีของ BET

ในการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของสารสามารถวัดได้โดยวิธีวัดจุดเดียว (Single point method) หรือวิธีวัดหลายจุด (Multipoint method) แต่โดยทั่วไป จะใช้วิธีวัดหลายจุด เพราะให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำกว่าวิธีวัดจุดเดียว สำหรับวิธีวัดหลายจุดจะใช้ความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนในอัตราส่วนตามต้องการ (ไม่เกิน 30%) ดังนั้น ข้อมูลที่ได้จะเป็นปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับหรือคาย (Desorb) ออกจากผิวของสารที่ความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนต่างๆ กัน หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ในแต่ละจุดหรือความเข้มข้นของไนโตรเจนไปคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยใช้ทฤษฎีของ BET ตามสมการที่ 2.5 ซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.7

$$Y = a + bx \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \text{โดย } Y &= \frac{P}{V(P_0 - P)} \\ a &= \frac{1}{V_m C} \\ b &= \frac{C-1}{V_m C} \\ X &= \frac{P}{P_0} \end{aligned}$$

ซึ่งมีส่วนตัด (Intercept) แกน Y เป็น $\frac{1}{V_m C}$ และความชัน (Slope) เป็น $\frac{C-1}{V_m C}$ และ

ค่าความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนแต่ละค่าที่ใช้ในการวัด สามารถนำไปคำนวณเป็นค่า $\frac{P}{P_0}$ ได้

ในขณะที่ค่า V เป็นค่าที่ได้จากเครื่อง ดังนั้น เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่าง $\frac{P}{P_0}$ กับ

$\frac{P}{V(P_0 - P)}$ หรือ $\frac{P}{P_0}$ กับ $\frac{P/P_0}{V[1 - (P/P_0)]}$ ตามสมการที่ 2.7 จะได้กราฟเส้นตรงที่สามารถ

หาค่า V_m และ C ได้จากส่วนตัดแกน Y และความชัน แล้วจึงนำค่า V_m ที่ได้จากกราฟนี้ไปคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะของสาร โดยใช้สมการที่ 2.6

2.4.3 การวิเคราะห์หมู่หน้าที่ (Functional groups)

การวิเคราะห์หมู่หน้าที่ (Functional groups) ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานซฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) เพื่อดูความหลากหลายของหมู่หน้าที่ปรากฏบนผิวถ่านกัมมันต์ มีรายละเอียดดังนี้ (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ, 2543)

2.4.3.1 หลักการของเครื่อง

ฟูเรียร์ทรานซฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) ใช้วิธีวัดที่ต่างไปจากเครื่องมือสเปกโทรสโกปีทั่วไป คือ วัดความเข้มของแสงต่อความยาวคลื่น หรือกำลังขยายที่ความยาวคลื่นต่างๆ กันอย่างต่อเนื่องเทียบกับเวลา เรียกว่า Time-domain Spectroscopy จากนั้น Time-domain spectrum จะถูกเปลี่ยนเป็น Frequency-domain spectrum ด้วย Fourier transform จากการใช้ดิฟิรอลคอมพิวเตอ์ สิ่งนี้สเปกตรัมทั้งสองแตกต่างกันจริงๆ ก็คือ Frequency-domain spectrum เป็นสเปกตรัมที่ได้จากการวัดการดูดกลืน

แสงที่ความถี่ต่างๆ กันทีละครั้งในช่วงระยะเวลาอันหนึ่งแต่ Fourier transform spectrum ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงที่ความถี่ต่างๆ กันพร้อมกันหมด ดังนั้น Fourier transform จึงช่วยทำให้การวิเคราะห์หรือวัดเร็วขึ้น การแยก (resolution) ก็ดีขึ้น หรือเป็นการทำให้ signal-to-noise ratio ดีกว่าวิธีธรรมดา เพราะการวัดด้วยเครื่องธรรมดาจะเป็นแบบวัดทีละความถี่ (sequentially) แต่ FTIR วัดที่ความถี่ต่างๆ อย่างต่อเนื่อง (simultaneously) เรียกว่า Fellgett's advantage สามารถใช้ circular entrance aperture แทน entrance slit ได้ ทำให้กำลังแสงสูงขึ้นด้วย ทำให้การแยกดีขึ้น และการวิเคราะห์ง่ายและสะดวกด้วยการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน อย่างไรก็ตาม เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์มีราคาแพง และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง เนื่องจากต้องเก็บในห้องควบคุมความชื้นตลอดเวลา

2.4.3.2 การเตรียมตัวอย่าง

การวิเคราะห์สารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง โดยไม่มีผลของตัวทำละลายหรือสารอื่นๆ ผสมอยู่เกี่ยวข้อง นั่นคือมีแต่เฉพาะตัวอย่างเท่านั้น จำเป็นจะต้องทำให้สารตัวอย่างมีลักษณะบางมากๆ เป็นฟิล์มที่หนาประมาณ 0.01 - 0.1 mm เพื่อให้แสงผ่านได้ เทคนิคต่างๆ ที่เลือกใช้ยังขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของสารนั้นด้วย เทคนิคต่างๆ มีดังต่อไปนี้

1) ใช้วิธีอัดและรีดให้เป็นแผ่นบางๆ ด้วยโลหะบนแผ่นโลหะเรียบ หรือแผ่นพลาสติก หรือบนแผ่นที่ฉาบด้วยพวกพอลิเมอร์ที่ทนความร้อน เมื่อนำสารตัวอย่างไปอัดและรีดจนได้แผ่นบางๆ หรืออาจให้ความร้อนในขณะที่อัดและรีดด้วยก็ได้ เทคนิคนี้เหมาะที่จะใช้กับสารตัวอย่างที่เป็นพลาสติก ถ้าสารตัวอย่างไม่แข็งมากนัก อาจใช้ windows 2 แผ่น รีดสารตัวอย่างก็ได้ แต่จะต้องระวังการแตกของ windows ด้วย

2) ใช้วิธีหลอม ถ้าสารตัวอย่างมีมวลโมเลกุลต่ำ อาจหลอมเหลวได้ง่าย แล้วนำสารตัวอย่างที่หลอมเหลวเทลงไปในบนแผ่นโลหะเรียบให้เป็นแผ่นบางๆ หรือเทลงไปในระหว่างแผ่น windows 2 แผ่นประกบกัน แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

3) ในกรณีที่สารตัวอย่างเป็นพวกชีวะสาร พลาสติก หรือซีเมนต์ เป็นต้น อยู่ในรูปเป็นก้อนหรือเป็นแท่ง สามารถใช้ไมโครโทมตัดให้เป็นแผ่นบางๆ ได้

4) ใช้วิธีทำให้เป็นสารละลาย โดยให้สารตัวอย่างละลายในตัวทำละลายที่ระเหยง่ายๆ แล้วนำสารละลายนั้นเทลงบนแผ่นกระดาษ หรือแผ่นโลหะที่ขัดมัน หรือแผ่นพลาสติก หลังจากตัวทำละลายระเหยออกไปแล้ว ใช้มีดตัดแผ่นฟิล์มออกมา ถ้าสารตัวอย่างนั้นไม่ละลายน้ำให้นำแผ่นฟิล์มจุ่มลงในน้ำ หลังจากทำให้แห้งแล้วสังเกตเห็นว่าแผ่นฟิล์มตรงกลางจะบางกว่าที่ขอบ เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสามารถแก้ไขได้ โดยใช้

สารละลายให้มีความเข้มข้นมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ยังคงมีตัวทำละลายหลงเหลืออยู่อีกบ้างเล็กน้อย

5) ใช้ Mull technique วิธีนี้ได้รับความนิยมมากสำหรับการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ใช้สารตัวอย่าง 2 - 3 mg บดให้ละเอียดด้วยโกร่งอะเกต (agate mortar) หรือ ball mill เล็กๆ แล้วหยด Nujol ลงไป 1 - 2 หยด แล้วบดต่อไปจนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำสารตัวอย่างที่บดได้นี้ไปใส่ลงบน NaCl window หรือ window อย่างอื่นเพียงเล็กน้อย แล้วเอาอีกแผ่นประกบคู่ไปมาจนทั่วแผ่น นำไปใส่ใน sample holder เพื่อวิเคราะห์ต่อไป

6) ใช้ KBr-pellet technique นับว่าเป็นเทคนิคที่มีประโยชน์มากอีกเทคนิคหนึ่ง โดยใช้สารพวกอัลคาไลเฮไลด์ เช่น โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ที่เป็นของแข็งผสมกับสารตัวอย่าง บดให้เข้ากันโกร่งอะเกต (agate mortar) แล้วนำไปอัดจะได้สารเป็นแผ่นใส สามารถนำไปวิเคราะห์ได้เลย ส่วนวิธีทำ KBr-pellet ใช้สารตัวอย่างประมาณ 2.0 mg ผสมกับ KBr 100 - 200 mg ในโกร่งอะเกต (agate mortar) หรือ Ball mill แล้วบดให้ละเอียดจนเป็นเนื้อเดียวกัน ตามปกติการทำ KBr-pellet ควรให้มีสารตัวอย่างเข้มข้นประมาณ 0.1 - 2 % แต่ก็อาจจะเปลี่ยนแปลงปริมาณได้ ขึ้นอยู่กับสารตัวอย่างนั้นดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ดีเพียงใด เมื่อบดดีแล้วนำไปใส่ในเครื่องอัด ซึ่งเรียกว่า die หลังจากเปิดปั๊มดูดอากาศออกประมาณ 1 นาที จึงจะเริ่มอัดด้วยเครื่องอัด ซึ่งอาจเป็น hydraulic press อัดประมาณ 10 ตัน หลังจากลดความดันและปลดปั๊มออกจาก die แล้ว จึงนำตัวอย่างที่เป็น pellet ใส่บางออกมาอย่างระมัดระวัง เพราะอาจแตกหรือหักได้ จากนั้นใส่ลงใน disc holder เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป ข้อดีของเทคนิคนี้คือ

- Background Absorption ของสารประกอบเฮไลด์มีค่าน้อย และใช้ได้โดยทั่วไป

- แผ่นใสที่อัดได้ (pellet, disc) อาจเก็บไว้ใช้วิเคราะห์ใหม่ได้
- สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างในระดับไมโครได้

สิ่งสำคัญของการใช้เทคนิคนี้คือ โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ควรจะต้องใช้เกรดที่ดีที่สุด อย่างน้อยก็ควรเป็น AR เกรด และจะต้องแห้ง นั่นคือ ควรจะต้องอบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำมาเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นที่ใส่ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5) หรือซิลิกาเจลไว้ และก่อนใช้ควรจะต้องบดให้ละเอียดเสียก่อน

2.5 สารอินทรีย์ระเหย

2.5.1 ลักษณะสมบัติของ VOCs

VOCs คือ สารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ และมีความดันไออย่างน้อย 0.13 กิโลพาสคาล (kPa) ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (ที่ 293 K และ 101 kPa) หรือมีความดันไอมากกว่า 1 มิลลิเมตรปรอทที่อุณหภูมิห้อง ทั้งนี้ไม่รวมก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบกลุ่มออกแกโนเมทัลลิก หรือกรดอินทรีย์ต่างๆ (มลิวรรณ บุญเสนอ, 2544) โมเลกุลส่วนใหญ่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจน อาจมีออกซิเจนหรือคลอรีนร่วมด้วยการแบ่ง VOCs ออกตามลักษณะของโมเลกุล สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1) Non-chlorinated VOCs หรือ Non-halogenated hydrocarbon

ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอนระเหยที่ไม่มีธาตุคลอรีนเป็นองค์ประกอบ เช่น สารในกลุ่ม aliphatic hydrocarbons เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซโซลีน (gasoline) hexane solvents ในอุตสาหกรรม alcohols aldehydes ketone และกลุ่ม aromatic hydrocarbon เช่น toluene benzene ethylbenzene xylene styrene phenol สาร VOCs กลุ่มนี้มาจากการเผาไหม้ของขยะ พลาสติก วัสดุ และอุปกรณ์เครื่องใช้ สีทาวัสดุ เป็นต้น

2) Chlorinated VOCs หรือ halogenated hydrocarbon

ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่มีธาตุคลอรีนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ สารเคมีสังเคราะห์ในอุตสาหกรรม สาร Chlorinated VOCs นี้มีความเสถียรและสะสมได้นานในสิ่งแวดล้อมมากกว่ากลุ่มแรก (Non-chlorinated VOCs) เพราะมีพันธะระหว่างคาร์บอน และธาตุกลุ่มฮาโลเจน ซึ่งทนทาน และยากต่อการสลายตัวในธรรมชาติ เช่น Trichloroethylene (TCE) ซึ่งเป็นตัวทำละลายในน้ำยาซักแห้ง น้ำยาละลายคราบน้ำมัน หรือคราบไขมัน และเรซินต่างๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม

2.5.2 การปลดปล่อย VOCs

การปลดปล่อย VOCs จะมีกระบวนการเกิดขึ้น 4 แบบ ดังนี้

2.5.2.1 การแพร่กระจายเป็นก๊าซที่แขวนลอย (Dispersion)

การแพร่กระจายเป็นก๊าซที่แขวนลอย (Dispersion) เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการกระจายตัว และการเคลื่อนตัว ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่ไหลเข้ามา (turbulent motion) และเกิดการหมุนเวียนของมวลอากาศ ซึ่งเป็นผลมาจากพื้นที่และแรงโน้มถ่วงโลก VOCs ที่ปลดปล่อยออกมาจะแพร่กระจายเจือจางแตกต่างกันอยู่เหนือกลุ่มชั้นบรรยากาศ

2.5.2.2 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (Physical transformation)

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (Physical transformation) เช่น VOCs จะรวมตัวกันแน่นเข้าไปในอนุภาคเกิดการดูดซับอยู่บนพื้นผิว หรือละลายในหยดน้ำ VOCs จะเปลี่ยนจากสถานะก๊าซเข้าสู่กระบวนการที่สมดุล

2.5.2.3 การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical reaction)

การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical reaction) VOCs จะเปลี่ยนแปลงกลายเป็นโมเลกุลอินทรีย์และอนินทรีย์ ในทางกลับกันก็จะเกิดการแพร่กระจายและการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ

2.5.2.4 VOCs เกิดการสะสม (Deposition)

VOCs เกิดการสะสม (Deposition) VOCs จะเคลื่อนย้ายจากบรรยากาศลงสู่ดิน และสะสมในน้ำโดยจะเกิดการตกตะกอนอย่างช้าๆเกิดอัตราความสมดุลระหว่างการปลดปล่อย การแพร่กระจาย การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี และการตกสะสมจะเป็นส่วนประกอบในบรรยากาศ

2.5.3 แหล่งกำเนิดของ VOCs

VOCs ถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศได้ทั้งจากกระบวนการต่างๆ ตามธรรมชาติ และการกระทำของมนุษย์ โดยแหล่งกำเนิดจากธรรมชาติที่พบได้แก่ ภูเขาไฟระเบิดและไฟป่า อย่างไรก็ตาม VOCs ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากธรรมชาติ แต่จากการกระทำของมนุษย์นั้นเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และก่อให้เกิดปัญหาสุขภาพกับมนุษย์โดยตรงจากกิจกรรมของมนุษย์ VOCs ส่วนใหญ่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง แหล่งกำเนิดของ VOCs สามารถแบ่งออกเป็น

2.5.3.1 Mobile sources (แหล่งกำเนิดเคลื่อนที่)

VOCs ที่เกิดจากแหล่งกำเนิด ประเภท mobile sources นั้นส่วนใหญ่มาจากการปลดปล่อยของยานพาหนะ และถังเชื้อเพลิงซึ่งเกิดในพื้นที่เมืองมากที่สุด เนื่องจากในพื้นที่เมืองจะมีการจราจรที่คับคั่งกว่าในเขตชนบท

2.5.3.2 Point sources (แหล่งกำเนิดไม่เคลื่อนที่)

VOCs ที่เกิดจากแหล่งกำเนิด ประเภท Point sources นั้น ส่วนใหญ่มาจากการปลดปล่อยจากกระบวนการอุตสาหกรรมที่ขยายเป็นวงกว้าง รวมทั้งกระบวนการที่ใช้ตัวทำละลายสี หรือ การใช้สารเคมี จะเป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญที่สุด นอกจากนี้กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงของโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ถ่านโค้ก หรือน้ำมันปิโตรเลียม ทำให้เพิ่มระดับความเข้มข้น VOCs

ในบรรยากาศ จึงทำให้บริเวณเมืองและแหล่งที่มีโรงงานอุตสาหกรรมมีระดับความเข้มข้น VOCs มากกว่าบริเวณชนบท

2.5.3.3 Consumer products

สารอินทรีย์ระเหยส่วนใหญ่ จะปลดปล่อยมาจากผ้าพรม กระดานไม้อัด ผลิตภัณฑ์พลาสติก กาว ตัวทำละลาย กระจกสเปร์ย วัสดุพิมพ์ สี น้ำมันขัดเงา ชี้นั่ง ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด สารฆ่าเชื้อโรค เครื่องสำอาง น้ำมันหล่อลื่น เชื้อเพลิง อัตราการปลดปล่อยจะลดน้อยลงขึ้นอยู่กับเวลาที่มันระเหย

2.5.3.4 บ้านเรือนและภายในอาคาร

ปัญหาด้านสุขภาพภายในอาคารนั้น สามารถพบได้ในอาคารทุกประเภท ไม่ว่าจะใหม่ กำลังปรับปรุง หรือเก่ามากแล้วก็ตาม ผู้ที่อาศัยอยู่มักมีอาการปวดศีรษะ ระบายเคืองในตา จมูก หรือลำคอ หน้ามืด วิงเวียน คลื่นไส้ ไอแสบๆ ผิวหนังแสบและคัน ไม่ค่อยมีสมาธิในการทำงาน อ่อนเพลียง่าย และมีความไวต่อกลิ่นมาก ซึ่งมีสาเหตุมาจากสารเคมีที่ฟุ้งกระจายภายในอาคาร หรือจากเครื่องใช้ในสำนักงาน

แหล่งกำเนิด VOCs ที่ใหญ่ที่สุดที่ปลดปล่อย VOCs สู่อากาศ คือ การเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในบ้าน ทั้งนี้ขึ้นกับประสิทธิภาพการเผาไหม้ และระบบการควบคุมการปลดปล่อย (สาวิตรี พูลมา, 2548) สำหรับบริเวณภายในอาคาร การสูบบุหรี่ การทำอาหาร รวมทั้งเครื่องทำความร้อน เครื่องถ่ายและเครื่องพิมพ์เอกสารบางชนิด ทำให้เพิ่มระดับความเข้มข้น VOCs ในอาคารได้ ในสิ่งแวดล้อมภายในที่พักอาศัย VOCs จะสามารถปลดปล่อยมาจากแหล่งกำเนิด เช่น เฟอร์นิเจอร์ สารยึดติด สี เครื่องเรือน ทินเนอร์ สีเคลือบเงา พรม น้ำมันทำความสะอาด สเปร์ยฉีดผม เป็นต้น ซึ่งความเข้มข้นของ VOCs ภายในอาคารโดยทั่วไปจะมีความเข้มข้นสูงกว่าภายนอกอาคาร เพราะแหล่งกำเนิดภายในอาคารจะมาจากผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในกิจกรรมของมนุษย์

สาร VOCs ที่สามารถตรวจพบได้ ภายนอกอาคารและภายในอาคารนั้นมีชนิดที่สามารถพบได้บ่อยจากแหล่งกำเนิดที่สามารถระบุได้ ดังตารางที่ 2 .2

ตารางที่ 2.2 แหล่งกำเนิดสาร VOCs ที่สามารถตรวจพบได้ ภายนอกอาคาร และภายในอาคาร

ชนิดสาร VOCs	แหล่งกำเนิด
Benzene	การสูบบุหรี่ และน้ำมันเชื้อเพลิงจากรถยนต์
1,4-Dichlorobenzene	ลูกเหม็น ยาดับกลิ่นห้อง
Styrene	ยาฆ่าเชื้อ สี และพลาสติก
Toluene Xylene Ethylbenene และ Trimethylbenzene (Aromatic hydrocarbons) และ aliphatic hydrocabons	สี กาว น้ำมันเชื้อเพลิง และผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้
Limonene alpha-pinene (Terpenes)	อาหาร พืชตระกูลส้ม และน้ำมันหอมระเหย ต้นไม้ ดอกไม้ และเครื่องสำอาง
Tetrachloroethane	น้ำยาซักแห้ง
Chloroform	คลอรีนในน้ำ
1,1,1-Trichloroethane	น้ำยาซักแห้ง
Ketone	แล็กเกอร์ น้ำมันขัดเงา และกาว
Ethers	เรซิน สี น้ำมันขัดเงา แล็กเกอร์ สบู่ เครื่องสำอาง
Esters	เรซิน พลาสติก แล็กเกอร์ และตัวทำละลาย

ที่มา: สาวิตรี พูลมา (2548)

2.5.4 การกระจายตัวของ VOCs ในบรรยากาศ

2.5.4.1 ความเข้มข้น VOCs ในสิ่งแวดล้อม

โดยทั่วไประดับความเข้มข้น VOCs ในฤดูหนาวสูงกว่าในฤดูร้อน โดยในฤดูหนาว VOCs มีแหล่งกำเนิดจากการทำความร้อนในบ้านเรือน ดังได้กล่าวแล้วว่า VOCs ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้หลายทางโดยเฉพาะการเผาไหม้ จึงทำให้ VOCs ปนเปื้อนในบรรยากาศ สาวิตรี พูลมา (2548) ได้ทำการศึกษาการรับสัมผัสสารอินทรีย์ระเหยของผู้พักอาศัยใน 9 เขตพื้นที่ศึกษา ในเขตกรุงเทพมหานคร โดยการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณสาร VOCs ที่ปรากฏบริเวณพื้นที่ภายในและภายนอกอาคาร และที่บุคคลทั่วไปได้รับสัมผัส ในช่วงเดือน กรกฎาคม 2548 พบสาร VOCs ทั้งหมด 16 ชนิด และมี 6 ชนิดที่พบในทุกพื้นที่ศึกษา จากการวิเคราะห์ชนิด และปริมาณความเข้มข้นของ VOCs แต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.3

นอกจากนี้พบว่า ความเข้มข้นของ VOCs แต่ละชนิดในเขตกรุงเทพมหานครบริเวณที่พักอาศัยที่อยู่ริมถนน พบว่าสาร VOCs ภายนอกอาคารมีปริมาณสูงกว่าภายในอาคาร และภายในอาคารมากกว่าที่บุคคลได้รับสัมผัส

ตารางที่ 2.3 ปริมาณความเข้มข้นของ VOCs ทั้ง 6 ชนิดที่พบในทุกพื้นที่ศึกษาในเขตกรุงเทพมหานคร

ชนิด VOCs	ปริมาณความเข้มข้น ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Benzene	18.9 – 76.1
Toluene	60.2 – 213.7
Ethylbenzene	2.6 – 15.9
m-Xylene	5.7 – 26.2
p-Xylene	4.1 – 21.5
o-Xylene	3.7 – 18.9

ที่มา: สภาวิศวกร พูลมา (2548)

2.5.4.2 ปฏิกริยาเคมี

ปฏิกริยาเคมีของ VOCs มีบทบาทสำคัญที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยการทำปฏิกริยากับสารมลพิษบางชนิด เช่น O_3 และ NO_2 ซึ่งมีผู้ทำการศึกษาดังกล่าวถึงบทบาทของ VOCs ที่มีต่อการเกิดปฏิกริยาต่าง ดังนี้

2.5.4.2.1 VOCs เป็นตัวทำให้เกิด photochemical smog และการตกสะสมของกรด

VOCs เป็นมลพิษที่เป็นตัวกำหนด photochemical smog ตั้งแต่ปี 1950 เป็นต้นมา ปฏิกริยา photochemical ได้เกิดขึ้นที่ Los Angeles และบ่อยครั้งจะเป็น Los Angeles smog การเกิด smog จะทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ เมื่อ 20 ปีที่ผ่านมาจะรู้จัก smog ว่าเป็นตัวที่ทำให้เกิดปัญหาภัยพิบัติในเมืองใหญ่ที่สุดในสหรัฐอเมริกา (US Department of Health, Education and Welfare (USDHEW), 1970) (สภาวิศวกร พูลมา, 2548) ญี่ปุ่นออสเตรเลีย (OECD 1975) เมื่อ VOCs ผสมกับไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และรังสีจากแสง UV ทำให้เกิดปฏิกริยาต่อเนื่องกันเป็นลูกโซ่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารมลพิษชนิดอื่นๆ จาก photochemical ในบรรยากาศจะมีปฏิกริยาเคมี photochemical ที่ได้จากธรรมชาติ และการ

ปลดปล่อยจากกิจกรรมมนุษย์ และจากการรวมกันของสารในบรรยากาศโดยมีแสง UV เป็นตัวกระตุ้น มีผลทำให้เกิดการกระจายตัว (Diffusion) และการหมุนวนของสาร (Eddies) ซึ่งสารจะผสมกัน และมีการเคลื่อนที่ตามแนวนอนของอากาศ จะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนของเศษวัสดุที่รวมตัวกันในบรรยากาศ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับกลุ่มธาตุเป็นหลัก และทำให้เกิดผลกับโอโซนมากที่สุด คือ aldehydes hydrogenperoxide peroxyacetyl nitrate (PAN) กรดอินทรีย์ และกรดอินทรีย์

2.5.4.2.2 VOCs เป็นตัวทำให้อโอโซนในชั้น Stratosphere ลดลง

ออกซิเจนจะสลายตัวภายใต้อิทธิพลของแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 242 นาโนเมตร ซึ่งปฏิกิริยาจะเกี่ยวข้องกับโมเลกุลที่ไม่มีลักษณะเฉพาะ พื้นฐานกลไกของโอโซนจะอยู่ในชั้นที่สูง ก๊าซโอโซนสามารถเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างไฮโดรคาร์บอน-สารเคมีอินทรีย์ระเหยได้ง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs) ทำปฏิกิริยากับ nitrogen oxides (NO_x) ทั้งที่เกิดจากการปลดปล่อยในชีวิตประจำวันของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้ของเครื่องยนต์และจากที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติภายใต้สภาวะที่มีแสง ซึ่งกระบวนการนี้เป็นสาเหตุให้เกิดมลภาวะทางอากาศที่จะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศในระยะยาว

2.5.5 การได้รับสัมผัส VOCs ของมนุษย์

การรับสัมผัส VOCs ที่ปรากฏอยู่ในบรรยากาศจะคุกคามสุขภาพของมนุษย์ โดยทำให้เกิดการก่อกลายพันธุ์ สารก่อมะเร็ง หรือทำให้เกิดการบกพร่องของการพัฒนาทางกายของทารกในครรภ์ หรือเป็นสาเหตุให้เกิดโรคเฉียบพลันหรือโรคเรื้อรัง ในกรณีนี้ถ้ามีการควบคุมก็จะไม่เกิดภัยพิบัติอันเป็นสาเหตุมาจากการปลดปล่อยสารเคมีอินทรีย์ปริมาณสูงและเป็นพิษมาก

สาร VOCs เข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ การหายใจ ทางปากโดยการกิน-ดื่ม และการสัมผัสทางผิวหนัง ซึ่งความเป็นพิษต่อร่างกายจะมากขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

- ช่วงครึ่งชีวิตของสาร VOCs ในร่างกาย ในเลือด การตรวจวัดสารระเหย VOCs ในเลือด สามารถบอกประวัติการได้รับ หรือ การสัมผัส VOCs ในประชากรได้
- สภาวะความสมบูรณ์ของร่างกายและปฏิกิริยาชีวเคมีทางเมตาบอลิซึมในตับและเนื้อเยื่อ แปรสภาพให้เป็นพิษมากขึ้นหรือน้อยลงได้ และขึ้นอยู่กับปริมาณแอลกอฮอล์หรือสารเคมีอื่นในกระแสเลือดและเนื้อเยื่อด้วย ตัวอย่างเช่น การดื่มเหล้าหรือเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์จะเพิ่มการดูดซึมและเพิ่มระดับของ 2-butanone และ acetone ในเลือดของนักดื่มเหล้าทั้งหลาย

- การขับถ่ายของเสีย สาร VOCs ถูกขับผ่านทางไตโดยปัสสาวะ ทางลมหายใจทาง ตับ และน้ำดี ถ้าสารนั้นถูกขับออกทิ้งได้ง่าย ความเป็นพิษจะน้อยลงกว่าสารเคมีที่ถูกขับออกทิ้งได้ ยาก

2.5.5.1 ผลกระทบต่อสุขภาพของสารอินทรีย์ระเหย

ผลกระทบต่อสุขภาพของสารอินทรีย์ระเหยต่อมนุษย์ แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่

1) พิษแบบเฉียบพลัน คือ อาการที่มักเกิดขึ้นทันที ได้แก่ อาการระคายเคืองต่อตา เยื่อบุทางเดินหายใจ และโดยส่วนใหญ่ถ้าระดับในอากาศต่ำกว่า 50 ppm จะรู้สึกฝืนหวน รำเริง ตื่นเต้น และมีอาการเหมือนเมาสุรา ได้แก่ ปวดศีรษะ มึนงง คลื่นไส้ อาเจียน อ่อนเพลีย ประสาท หลอน และควบคุมตนเองไม่ได้ ถ้าระดับสูงกว่า 50 ppm จะทำให้วังงซึม ชัก หมดสติ และเสียชีวิต ได้

2) พิษเรื้อรัง คือ อาการที่เกิดขึ้นเมื่อร่างกายได้รับสารอินทรีย์ระเหยต่างๆ ปริมาณ น้อยเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดพยาธิสภาพกับอวัยวะเป้าหมาย เช่น สมอง ตับ ไต มีผลทำให้อวัยวะทำงานผิดปกติไปจนถึงทำงานไม่ได้ นอกจากนี้ Benzene ยังเป็นสารก่อมะเร็งที่อวัยวะ เป้าหมายต่างๆ และมะเร็งเม็ดเลือดขาวได้ (กรรชิต คุณาวุฒิ, 2544)

2.5.5.2 ผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยต่อระบบต่างๆ ของร่างกาย

2.5.5.2.1 ระบบประสาท

สารอินทรีย์ระเหยจะมีฤทธิ์กดประสาท ทำลายระบบประสาทส่วนกลาง การได้รับ สารอินทรีย์ระเหยจะทำให้เกิดอาการทางการกดประสาทหลายอย่าง เช่น Benzene Toluene สามารถทำให้เกิดอาการปวดศีรษะ มึนงง คลื่นไส้ อาเจียน และประสาทหลอน เมื่อได้รับปริมาณ สูงอาจทำให้หมดสติ และเสียชีวิต นอกจากนี้ยังมีการศึกษาที่พบว่า การรับสัมผัสในปริมาณน้อยก็ สามารถทำลายการพัฒนาสมองของทารกในครรภ์ได้ ซึ่งมีการศึกษาทดลองกับหนูฟูกขาว และ หนูถีบจักร พบว่า การได้รับ 1,1,1-trichloroethane (TRI) 5000 ppm ทางลมหายใจนาน 40 นาที ทำให้การส่งกระแสประสาทผิดปกติได้ หนูมีการเรียนรู้สิ่งเร้าในสิ่งแวดล้อมลดลง กลไกคือ TRI ทำให้สาร cyclic GMP ซึ่งเป็นสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้เซลล์ประสาททำงานนั้น มีระดับลดลง และ Medulla oblongata ลดลงจากกลุ่มควบคุมถึง 55 - 58% และระดับ cyclic GMP จะลดลง มากเมื่อได้รับสารระเหยมากขึ้นเป็น 100 นาที (สาวิตรี พูลมา, 2548)

ในกลุ่มช่างทำรองเท้า ซึ่งได้รับ VOCs จากการหายใจเอาสารตัวทำละลายสีหรือ น้ำยาทำรองเท้า (dichloromethane n-hexane) plastic compounds (isocyanates และ polyvinyl chloride) เป็นประจำ มักจะมีอาการทางประสาท คือ ปวดศีรษะ (65%) จิตใจกังวล (53%) รู้สึกคันที่ขาและเท้า (46%) เจ็บตา (43%) หายใจลำบากและมีอาการรวมหลายอย่าง (1.1

- 3.5%) ในคนตั้งครรภ์ มีการศึกษาในหญิงตั้งครรภ์จำนวน 14,000 คน ใน Bristol, U.K. ที่ใช้สเปรย์ปรับอากาศ (aerosols) เป็นประจำพบว่าในเลือดมีสารพวก VOCs (xylene ketone และ aldehydes) ค่อนข้างสูง และประชากรเหล่านี้จะมีการหลายอย่าง เช่น 25% ปวดศีรษะ 19% มีอาการซึมเศร้าหลังคลอด เด็กที่คลอดออกมาแล้วมักมีอาการท้องเสียบ่อยกว่าเด็กกลุ่มอื่น 22% (สาวิตรี พูลมา, 2548)

2.5.5.2.2 ระบบหายใจ

เมื่อได้รับการสูดดมจะมีผลระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ ทำให้เกิดหลอดลมอักเสบ และการหดเกร็ง อาจจะทำให้เสียชีวิตได้จากระบบหายใจล้มเหลว

2.5.5.2.3 ระบบเลือด

จากการศึกษาการรับสัมผัสสาร Benzene ทำให้เกิดการทำลายไขกระดูกเป็นผลทำให้เกิดโลหิตจางแบบ aplastic anemia จำนวนเม็ดเลือดขาวและเกร็ดเลือดต่ำลง นอกจากนี้ยังเป็นสารก่อมะเร็งทำให้เกิดมะเร็งเม็ดเลือดขาว หากมีการสะสมโอโรเอซิสของ Benzene ในปริมาณสูงอาจก่อให้เกิดมะเร็งปอดได้ สำหรับ Toluene ทำให้เกิดสภาวะ Granulocytopenia (จำนวนเม็ดเลือดขาวชนิด granulocyte ลดน้อยลง) ได้ นอกจากนี้มีการศึกษาพบว่า Benzene ในระดับต่ำมีผลต่อความผิดปกติของเลือดในกลุ่มเด็ก

2.5.5.2.4 ระบบสืบพันธุ์

สารอินทรีย์ระเหยประเภทตัวทำละลาย จะมีผลต่อการลดจำนวนการตกไข่ จำนวนอสุจิ และเกิดการเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ นอกจากนี้ยังมีผลต่อตัวอ่อนในครรภ์ มีผลทำให้เกิดการผิดปกติแต่กำเนิด การแท้ง และการตายก่อนคลอด จากผลการศึกษาในต่างประเทศระยะ 20 ปีที่ผ่านมาพบว่า ในประเทศอุตสาหกรรมที่มีการใช้ตัวทำละลายมาก จะประสบปัญหาการเจริญพันธุ์ที่ไม่สมบูรณ์ (infertile) เพิ่มมากขึ้น ร้อยละ 8 - 15 นอกจากนี้ยังพบว่า สารอินทรีย์ระเหยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงฮอร์โมนหลายชนิด เช่น LH (Lutinizing Hormone) FSH (Follicle Stimulating Hormone) T (Testosterone) และ cortisol มีการทำลาย DNA ในระบบสืบพันธุ์ และพบว่าสาร MTBE (Methyl Tertiary Butyl Ether) สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดมะเร็งใน leydic cell (สาวิตรี พูลมา, 2548)

2.5.5.2.5 ผิวหนังและตา

เมื่อได้รับสัมผัสจะมีอาการระคายเคือง และทำให้เกิดอักเสบที่ผิวหนัง มีผื่นแดงพุพอง และเยื่อหุ้มตาอักเสบได้

2.5.5.2.6 ตับและไต

สารอินทรีย์ระเหยเกือบทุกชนิดจะถูกเปลี่ยนแปลงที่ตับ และถูกขับออกทางไต สำหรับ Toluene มีผลทำลายตับ ทำให้เกิดภาวะ fatty liver และตับวายได้ นอกจากนี้ยังพบภาวะ renal tubular acidosis กรวยไตอักเสบ และไตวายได้

2.5.5.2.7 ระบบภูมิคุ้มกัน

ผลต่อระบบภูมิคุ้มกันทำให้ประสิทธิภาพลดลง สารอินทรีย์ระเหยหลายชนิดทำให้ระบบภูมิคุ้มกันถูกรบกวนหรือทำลาย ศักยภาพทางการป้องกันโรคการติดเชื้อจะลดและพร้อมลงจากเดิม เช่น จากการศึกษาพบว่า คนงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับตัวทำละลายมีอัตราเกิดภูมิแพ้สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเด็กที่รับสัมผัสสารอินทรีย์ระเหยจะมีความไวต่อการแพ้ลมและไข้หวาด

2.5.6 ความเป็นพิษของ VOCs

สาร VOCs เข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทางคือ (1) การหายใจ ได้รับทางปอด (2) การกิน-ดื่มทางปาก และ (3) การสัมผัสทางผิวหนัง หลังจากการเข้าสู่ร่างกายแล้วจะผ่านเข้าสู่ตับ ซึ่งจะมีเอนไซม์และวิถีทางเมตาบอลิซึม (metabolism) หลากหลายที่แตกต่างกัน จะทราบกลไกการเกิดพิษของสาร VOCs ต้องอาศัยความรู้ด้านเภสัชวิทยาและพิษจุลศาสตร์ เช่น สารพิษถูกเปลี่ยนแปลงทางเมตาบอลิซึมในตับในระยะแรก โดยอาศัยเอนไซม์ในระบบ P450 และในระยะหลังรวมตัวกับสาร glutathione ชนิดเอนไซม์ P450 ที่ใช้จะแตกต่างกันแล้วแต่ชนิดของ VOCs เช่น เอนไซม์ชนิด CYP2E1 มีบทบาทมากต่อเมตาบอลิซึมของ trichloroethylene ซึ่งจะกลายเป็น chloral hydrate และต่อมาถูกเอนไซม์ชนิด CYP2B เร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็น trichloroethanol ซึ่งในที่สุดจะถูกขับทิ้งทางปัสสาวะในรูปของ trichloroacetic acid เซลล์ตับจะทำให้ toluene กลายเป็น benzyl alcohol และ benzoic acid ละลายในน้ำได้ง่าย แล้วถูกขับออกทางปัสสาวะ

2.5.6.1 การเป็นสารก่อมะเร็ง

VOCs หลายชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง การได้รับควัน VOCs จากการสูบบุหรี่ ทำให้มนุษย์เป็นมะเร็งปอดมากขึ้น การเป็นมะเร็งจากการได้รับสัมผัส VOCs ขึ้นอยู่กับเส้นทางการรับสัมผัส เช่น จากการหายใจ หรือทางผิวหนัง

สารอินทรีย์ระเหยหลายชนิดอันตรายโดยการทำลายโครโมโซมเซลล์ของระบบอวัยวะต่างๆ เช่น เม็ดเลือดแดง ตับ ไต ปะสาท ดังสรุปในตารางที่ 2.4 และตัวอย่าง สาร VOCs ที่เป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) และส่งเสริมการเกิดเนื้องอก (tumor promoter) และชนิดของมะเร็งที่พบ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างสาร VOCs บางชนิด ที่มีผลกระทบต่อระบบเนื้อเยื่อ และเป็นอันตรายต่อสุขภาพ

สาร VOCs	เนื้อเยื่อที่ถูกทำลายโดย VOCs	ผลร้ายต่อสุขภาพ
Benzene	Hemopoietic system, Red blood cell, Nerve	ทำลายไขกระดูก เม็ดเลือดแดงแตก โรคโลหิตจาง และอาการหรือโรคทางประสาทส่วนกลาง
Carbon tetrachloride (CCl ₄)	Liver, CNS	ตับเสื่อม ตับแข็ง
Chloroform (trichloromethane , CHCl ₃)	Liver, Kidney, Heart muscle, Eyes, Skin	ตับเสื่อม ตับแข็ง ไตเสื่อม หัวใจ เต้านมผิดปกติ การสับระคายเคืองของตาและผิวหนัง
Dichlorobenzene (methylene chloride, DCM)	Liver, Kidney, blood, Skin, Eyes, Upper respiratory tract	ฤทธิ์แสบ ระคายเคือง โรคตับ กดประสาทส่วนกลาง อาจหมดสติและตายได้
Ethyl alcohol (methylene)	Liver, CNS Nerve, Placenta	ตับเสื่อม ตับแข็ง เร่งการเกิดมะเร็งตับ มีอาการกดประสาท ทำให้ทารกคลอดพิการ
Ethyl benzene (ethylbenzol) n-Hexane	Eyes, CNS Nerve, Nasal cavity Nerve	ทำให้ระคายเคือง แสบตา แสบจมูก กดประสาทส่วนกลาง ทำให้ปวดหัว สับสน งุนงง อาจหมดสติได้
Methyl alcohol (methanol)	Liver, CNS Nerve	ตับเสื่อม อาการกดประสาท ทำให้ตาบอด
Toluene (methylbenzene, toluol)	CNS Nerve	อาการทางประสาทส่วนกลาง
Trichlorobenzene	Liver, Kidney	ตับแข็ง ตับเสื่อม ไตเสื่อม
1,1,1-Trichloroethane (methylchloroform)	Liver, Nerve, Kidney	อาการทางประสาทส่วนกลาง ชักหมดสติและอาจตายได้
Xylene (dimethylbenzene)	Skin, Nerve	ระคายเคือง โรคผิวหนัง และอาการเกิดจากการกดประสาทส่วนกลาง

ที่มา: ประสงค์ คุณานุกุลชัยเดช และไมตรี สุทธิจิตต์ (2544)

ตารางที่ 2.5 สาร VOCs ที่เป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) และสารส่งเสริมการเกิดเนื้องอก (tumor promoter) และชนิดของมะเร็ง

ชนิดสาร VOCs	ชนิดของมะเร็ง	ชนิดสาร VOCs	ชนิดของมะเร็ง
Benzene	Acute myeloblastic leukemia	Vinyl Chloride	Lung cancer
Toluene	Lung cancer	Hexachlorobenzene	Lung cancer
Carbon Tetrachloride	Hepatoma	Dichloromethane	Lung cancer
Dichloropropane	Lung cancer	Dibromochloropropane	Lung cancer
Ethylbenzene	Lung cancer	Ethylene Dibromide	Lung cancer
Pentachloropheno	Lung cancer	Trichloroacetylene	Lung cancer
Trichloroethylene	Lung cancer	Haloacetic Acid	Lung cancer

ที่มา: ประสงค์ คุณานุกุลวัฒน์ชัยเดช และไมตรี สุทธิจิตต์ (2545)

2.5.6.2 การเป็นสารก่อเกิดการกลายพันธุ์ (Mutagenicity)

VOCs ที่เป็นสารก่อมะเร็งจะมีฤทธิ์เป็นสารก่อเกิดการกลายพันธุ์ด้วย VOCs บางชนิดเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกเมแทบอลิซึมโดยเอนไซม์ cytochrome P-450

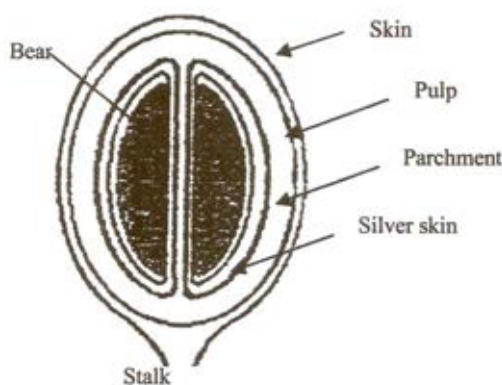
2.5.6.3 การเสริมพิษ/การต้านพิษ (Potentiation/Antagonism)

อันตรายและโทษต่อสุขภาพของสาร VOCs จะยิ่งมีผลกระทบมากขึ้น (Additive effect) ถ้าได้รับสารอินทรีย์ระเหยผสมกันหลายชนิดในระยะเดียวกัน อาจส่งเสริมความรุนแรงต่อสุขภาพมากขึ้น มากกว่าผลกระทบรวมกันที่เกิดจากสารเดี่ยวๆ แต่ละชนิดได้

2.6 กาแฟ

กาแฟเป็นพืชที่อยู่ในตระกูล Rubiaceae สายพันธุ์ Coffea มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Coffea Arabica* L. กาแฟจัดเป็นไม้พุ่ม ส่วนใหญ่มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อน และกึ่งร้อนของทวีปแอฟริกา ซึ่งเป็นที่รู้จักกันตั้งแต่ปี ค.ศ. 1820 ผลของกาแฟแต่ละผลจะให้สองเมล็ด ลักษณะผลเมื่อยังอ่อนอยู่จะมีสีเขียว เมื่อแก่จัดแล้วสีจะเข้มขึ้น และเมื่อสุกจะเปลี่ยนเป็นสีแดงเข้ม ส่วนประกอบต่างๆ ของเมล็ดกาแฟ แสดงดังภาพที่ 2.12

กาแฟจะติดเป็นผล มีลักษณะคล้ายลูกหว่า ซึ่งภายในผลกาแฟแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนหนึ่ง มีเมล็ดกาแฟ 1 เมล็ด ซึ่งมีลักษณะแบนยาวไปตามรูปของเปลือกหุ้ม ถ้าหากเมล็ดหนึ่งเมล็ดใดลีบ เพราะการผสมพันธุ์ไม่ดี เมล็ดที่เหลืออยู่จะมีรูปกลม ส่วนยาวจะมีรูปโค้งเป็นรูปทรงกระบอก ติดเมล็ดที่สูงซึ่งจะมีสีน้ำตาลปนแดง เมื่อผลสุกแล้วกะเทาะเปลือกออก จะได้เมล็ดกาแฟที่มีเปลือกสีขาว (Parchment) หุ้มอยู่ ซึ่งเมื่อขัดออกแล้วจะเหลือเยื่อบางๆ สีขาว เรียกว่า Silver skin หุ้มอยู่ภายในอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งถ้าผ่านกระบวนการขัดอีกชั้นหนึ่ง จะได้เมล็ดกาแฟที่ใช้บริโภค ที่เรียกว่า กาแฟเขียว (Green coffee หรือ Clean coffee)



ภาพที่ 2.12 ส่วนประกอบต่างๆ ของเมล็ดกาแฟ

ที่มา: ไชยยันต์ ไชยยะ วราภรณ์ ธนะกุลรังสรรค์

และปทุมทิพย์ ต้นทับทิมทอง (2550)

ในปัจจุบันนี้มีการปลูกกาแฟที่นิยมปลูกกันมาก 2 พันธุ์ใหญ่ๆ คือพันธุ์อะราบิกา (*Coffea arabica*) และพันธุ์โรบัสตา (*Coffea canephora*, var. *robusta*)

2.6.1 กาแฟพันธุ์อะราบิกา

เป็นพันธุ์ที่มีชื่อเรียกหลายชื่อ เช่น บราซิลเลียน อะบิสซิเนียน และอะราบิกา กาแฟพันธุ์นี้เป็นพันธุ์ที่นิยมปลูกมากที่สุดในโลก มีถิ่นกำเนิดดั้งเดิมแถบบริเวณประเทศเอธิโอเปีย ตามลาดเขาของอะบิสซิเนีย และเยเมน ให้ผลผลิตสูง มีปริมาณ คาเฟอีนต่ำ และรสชาติหอมอร่อย จึงเป็นที่นิยมบริโภคมากกว่าพันธุ์อื่นๆ โดยมากนิยมนำมาผลิตเป็นกาแฟ คั่วบดผล (Roast Coffee) กาแฟพันธุ์อะราบิกาแบ่งได้หลายชนิด ซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่ปลูก เช่น มอคค่า ปลูกมากบริเวณคาบสมุทรอาราเบีย เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้บริเวณประเทศโคลัมเบีย และอเมริกากลาง

2.6.2 กาแฟพันธุ์โรบัสตา

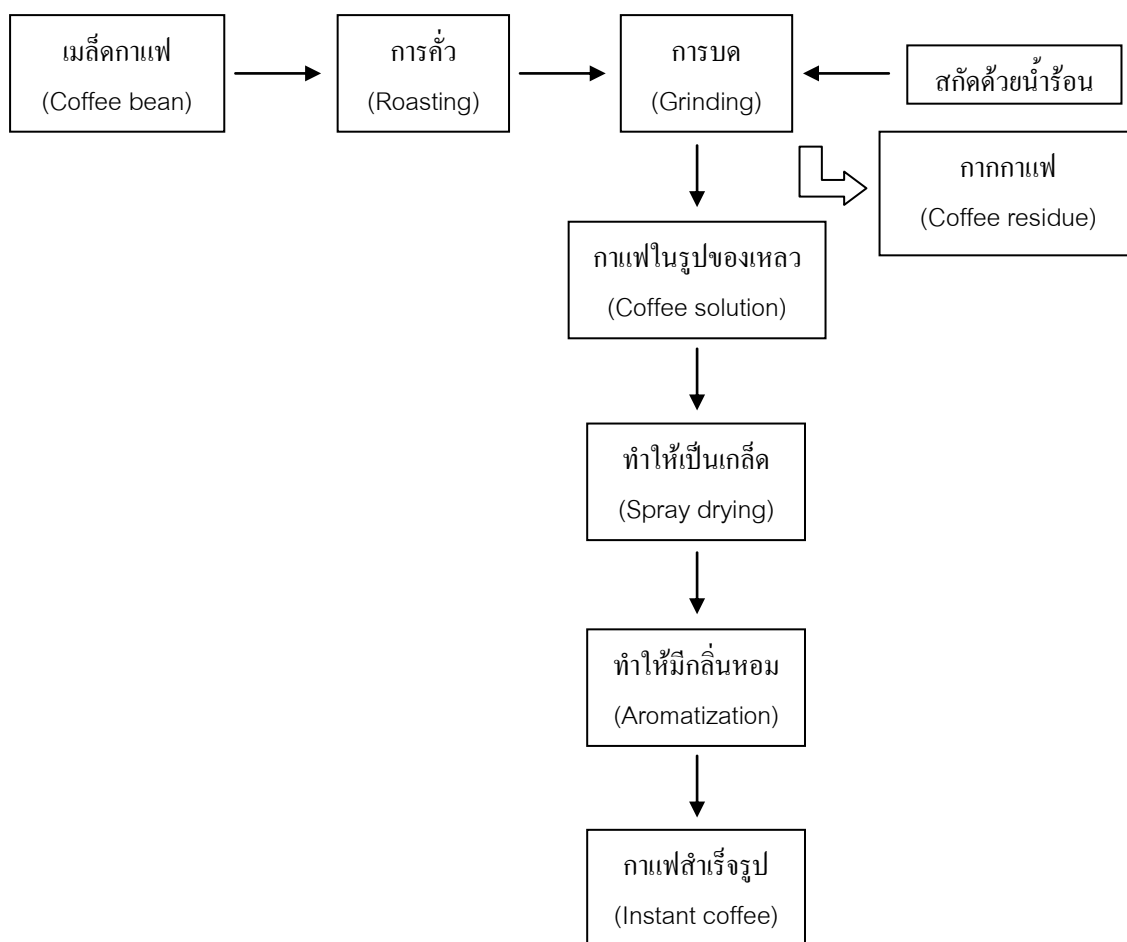
เป็นพันธุ์ที่มีถิ่นกำเนิดจากแอฟริกากลาง มีคุณสมบัติทนทานต่อสภาพดิน ฟ้า อากาศ โรคพืช และแมลงได้ดี มีปริมาณคาเฟอีนค่อนข้างสูง และสามารถคงกลิ่นไว้ได้นานกว่าพันธุ์อะราบิกา ให้ผลผลิตสูงกว่า แต่รสชาติและกลิ่นของพันธุ์โรบัสตาไม่เป็นที่นิยมเท่ากับพันธุ์อะราบิกา จึงนิยมนำไปผลิตเป็นกาแฟสำเร็จรูป พันธุ์โรบัสตานี้พบมากในแถบหมู่เกาะชวา และอินโดนีเซีย

ประเทศไทยถือเป็นประเทศหนึ่งที่มีพื้นที่ที่มีการปลูกกาแฟค่อนข้างมาก โดยร้อยละ 97 ของการปลูกทั้งหมดในประเทศปลูกเป็นพันธุ์โรบัสตา ซึ่งปลูกบริเวณแถบภาคใต้ คือ จังหวัดชุมพร นครศรีธรรมราช กระบี่ ยะลา ระนอง และตรัง ส่วนพันธุ์อะราบิกาปลูกเป็นร้อยละ 3 ของการปลูกทั้งหมดในประเทศ ซึ่งปลูกมาบริเวณทางเหนือตอนล่าง โดยองค์ประกอบทางเคมีของกาแฟทั้งสองพันธุ์ จำแนกได้ดังนี้

- ส่วนเปลือก คือส่วนที่เป็นเปลือกสีขาว และส่วนที่เป็นเปลือกหุ้ม ซึ่งในส่วนนี้กาแฟทั้งสองพันธุ์มีองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกัน คือ ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส แพลคติน และลิกนิน ซึ่งคล้ายๆ กับส่วนเปลือกของพืชทั่วไป

- ส่วนเมล็ด คือ ส่วนที่นำไปบริโภค เรียกว่า Bean ประกอบด้วยสารระเหย (Volatile Matter) คือ สารพวกอะโรมาติก และเฮทเทอร์โรไซคลิก โดยเฉพาะคาเฟอีน และประกอบด้วยแร่ธาตุหลายชนิด แต่ที่เป็นหลักๆ คือ โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแมงกานีส

กระบวนการผลิตกาแฟสำเร็จรูป แสดงดังภาพที่ 2.13 เริ่มต้นจากการนำเมล็ดกาแฟที่กะเทาะเปลือกออกแล้วมาผ่านการคั่ว (Roasting) แล้วจึงบดย่อยขนาด (Grinding) จากนั้นผ่านขั้นตอนการสกัด (Extraction) ด้วยน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิ 180 °C ภายใต้ความดันสูงโดยเครื่องปฏิกรณ์ที่มี 6 คอลัมน์ เพื่อให้ได้ผลผลิตของเนื้กาแฟมากที่สุด แล้วจึงกรองแยกออก ซึ่งของแข็งที่เหลืออยู่ คือ กากกาแฟ ส่วนของเหลวที่ได้ เรียกว่า น้ำกาแฟ นำไปพักไว้ที่ถังพัก แล้วนำไปผ่านขั้นตอนการอบแห้งแบบฉีกพัน โดยการฉีดน้ำกาแฟออกมาเป็นสาย โดยใช้วาล์วที่หมุนได้ ซึ่งอุณหภูมิถูกควบคุมไว้ที่ 250 °C จะทำให้เกิดการระเหยจนกลายเป็นของแข็ง แล้วจึงผ่านการระเหิด (Evaporation) อีกครั้ง เพื่อนำน้ำส่วนเกินออกอีกในขั้นตอนการอบแห้งแบบแช่แข็ง จนท้ายสุดจะได้กาแฟ ซึ่งสามารถชงดื่มได้ทันที แต่ในระหว่างขั้นตอนการสกัดจนถึงการอบแห้งแบบแช่แข็ง จะมีการสูญเสียสารระเหยที่มีกลิ่น ซึ่งทำให้มีกลิ่นหอมหายไปบางส่วน จึงต้องผ่านกระบวนการเติมกลิ่น เพื่อเติมสารเหล่านี้อีกครั้งก่อนที่จะมีการบรรจุลงถุงพร้อมกับเติมก๊าซเฉื่อย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อลดความเสี่ยงต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction)



ภาพที่ 2.13 กระบวนการผลิตกาแฟสำเร็จรูป

ที่มา: ไชยยันต์ ไชยยะ วราภรณ์ ธนะกุลรังสรรค์

และปทุมทิพย์ ต้นทับทิมทอง (2550)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิจิตร จินดาพันธุ์ไพโรจน์ (2543) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส โดยการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนอย่างรวดเร็ว พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนเซชัน คือที่อุณหภูมิ $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 45 นาที และภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น คือใช้ไอน้ำเป็นตัวกระตุ้นที่ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 150 นาที ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีขนาด $0.3 - 0.6$ มิลลิเมตร ร้อยละปริมาณแก้ว 6.37 ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ $1,233\text{ mg/g}$ ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 242 mg/g ค่าพื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์ $1,497.32\text{ m}^2/\text{g}$ ค่าพื้นที่ผิวแบบ BET $1,076.15\text{ m}^2/\text{g}$ และสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ มีค่าใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

สุจันีย์ ค่อยเสงี่ยม (2544) ศึกษาการกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว เเผาะกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้ NaCl เป็นตัวกระตุ้น และเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายในท้องตลาด พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายในท้องตลาดมีคุณสมบัติดีกว่า ส่วนถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวมีคุณสมบัติดีกว่าถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม อัตราส่วนโดยน้ำหนักของกะลามะพร้าวต่อ NaCl ที่ดีที่สุดเท่ากับ 1:3 ถ่านที่ได้มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 532.29 mg/g พื้นที่ผิว 492.42 m²/g

มานพ ตีระรัตนสมโภช (2545) ศึกษาการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อย จากการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อย คือการกระตุ้นด้วย NaCl ใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของขี้เลื่อยต่อ NaCl เท่ากับ 1:1 เเผาะกระตุ้นที่ 800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และการกระตุ้นด้วย ZnCl₂ ใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของขี้เลื่อยต่อ ZnCl₂ เท่ากับ 1:1 เเผาะกระตุ้นที่ 700 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เท่ากับ 519.4 และ 1021.3 mg/g และมีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 593.79 และ 1572.51 m²/g ตามลำดับ

จักริน นักรู้ (2549) ศึกษาการกำจัดสีจากน้ำชะมูลฝอยโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนเซชันคือ ที่อุณหภูมิ 350 °C เป็นเวลา 30 นาที และอุณหภูมิในการเผาะกระตุ้นที่เหมาะสมคือ 700 °C อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเมล็ดมะขามต่อ ZnCl₂ เข้มข้น 50% เท่ากับ 1:2 และล้างด้วยกรด HCl เข้มข้นร้อยละ 5 ซึ่งจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 724 mg/g มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 719.36 m²/g

ไชยยันต์ ไชยยะ วราภรณ์ ธนะกุลรังสรรค์ และปทุมทิพย์ ตันทับทิมทอง (2550) ศึกษาอิทธิพลของสารกระตุ้นที่มีต่อหมู่หน้าที่ และประสิทธิภาพในการดูดซับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟ จากการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนเซชัน คือที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งแสดงให้เห็นพื้นที่ผิวสูงสุดเท่ากับ 143 m²/g และผลจากเครื่อง SEM แสดงให้เห็นว่า ZnCl₂ และ NaOH สามารถทำให้ถ่านกัมมันต์มีขนาดรูพรุนที่สม่ำเสมอ และจากการดูดซับ N₂ ที่อุณหภูมิ 77 K ด้วยเครื่อง Gas sorption analyzer แสดงให้เห็นพื้นที่ผิวสูงสุด คือ 914 m²/g โดยการกระตุ้นด้วย ZnCl₂ ที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สัดส่วนโดยน้ำหนักเป็น 1:1 ในขณะที่ NaCl และ NaOH ให้ค่าพื้นที่ผิวที่ใกล้เคียงกันที่ 300 - 330 m²/g โดยประมาณ ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจาก ZnCl₂ มีขนาดกว้างที่สุดคือ 2.90 - 3.4 nm ซึ่งอยู่ในช่วงของ mesopore รองลงมาเป็น NaOH และ NaCl ซึ่งมีขนาด 2.32 และ 1.40 nm ตามลำดับ ในส่วนการวิเคราะห์ทางเคมีโดยใช้ FTIR พบหมู่ทำหน้าที่บนผิวถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากสาร

กระตุ้นทั้ง 3 ชนิด ว่ามีหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) และหมู่คาร์บอนิล (C=O) เป็นหลัก ส่วนถ่านที่กระตุ้นด้วย NaOH ยังพบโลหะตกค้างอยู่ เนื่องมาจากการใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นต่ำเกินไป

จิตตรี พลทะกุล (2552) ศึกษาการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากแกลบ โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วย NaOH H_3PO_4 และ $ZnCl_2$ พบว่า ถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ในอัตราส่วน 2:1 ที่อุณหภูมิ 700 °C มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดเท่ากับ 572.72 mg/g พื้นที่ผิวแบบ BET เท่ากับ 648.28 m^2/g แต่ถ่านที่กระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นตัวดูดซับที่ดีที่สุด โดยสามารถดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ได้ถึง 394.25 ± 3.94 mg/g ซึ่งสามารถดูดซับได้มากกว่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้าที่ผลิตจากกะลามะพร้าวเล็กน้อย

Hayashi และคณะ (2000) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากลิกนินโดยใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมี จากการศึกษพบว่า การใช้ $ZnCl_2$ และ H_3PO_4 เป็นสารกระตุ้นนั้น ทำให้มีพื้นที่ผิวสูงสุดซึ่งใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 600 °C และพบว่า pore volume (micropore volume + mesopore volume) เกิดได้ดีในการศึกษาครั้งนี้ และมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และ H_3PO_4 ที่อุณหภูมิช่วง 500 - 600 °C แต่จะลดลงเมื่ออุณหภูมิ 600 - 900 °C และยังพบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 °C โครงสร้างของคาร์บอนมีการหดตัว พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลง ในการศึกษาครั้งนี้มีข้อสรุปว่า $ZnCl_2$ ทำงานเช่นเดียวกับ dehydration reagent $ZnCl_2$ จะช่วยยับยั้งการเกิด Tar และกระตุ้นการเกิดถ่านของคาร์บอนภายใต้อุณหภูมิ 600 °C อย่างไรก็ตาม ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 600 °C $ZnCl_2$ จะไม่สามารถทำงานเป็นสารกระตุ้นได้ ส่งผลให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลง การกระตุ้นที่มากเกินไป จะส่งผลต่อรูพรุนและพื้นที่ผิวคือรูพรุนจะรวมตัวกัน mesopore volume จะเพิ่มขึ้น และพื้นที่ผิวจะลดลง

Virote Boonamnuayvitaya Srisuda Sae-ung และ Wiwut Tanthapanichakoon (2005) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ โดยการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ในอัตราส่วนกากกาแฟต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1:3 ที่อุณหภูมิ 600 °C พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วย $ZnCl_2$ แล้วกระตุ้นด้วยก๊าซไนโตรเจน ($CZn-N_2$) มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด เนื่องจาก hydrophilic group ของ O-H C=O และ C-O ซึ่งพบบนผิวหน้าถ่านกัมมันต์ ส่วนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วย $ZnCl_2$ แล้วกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CZn-N_2-CO_2$) นั้น ให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด เท่ากับ 914 ± 21 m^2/g และ 1.010 ± 0.003 cm^3/g แต่การดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วย $ZnCl_2$ แล้วกระตุ้นด้วยก๊าซไนโตรเจน ($CZn-N_2$) ซึ่งจากผลของ FTIR พบ hydrophobic group ของ C-H และ C-C แสดงให้เห็นว่าผิวหน้าทางเคมีของถ่านกัมมันต์มีผลต่อ

ประสิทธิภาพการดูดซับอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ลักษณะของพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมีบทบาทน้อยในการดูดซับสารฟอร์มาลดีไฮด์

Nabais และคณะ (2008) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดกาแฟ (coffee endocarp) โดยการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีพื้นที่ผิวแบบ BET สูงกว่า คือ 426 - 1,287 m²/g ส่วนถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำมีพื้นที่ผิวแบบ BET 355 - 630 m²/g จากการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบและปริมาณเถ้าของเมล็ดกาแฟ พบธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก คือ คาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน และเถ้า โดยคิดเป็นหน่วยร้อยละโดยน้ำหนัก เท่ากับ 47.3 37.3 6.4 และ 6.27 ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์พื้นผิวเชิงเคมีด้วยเครื่อง FTIR พบความหลากหลายของหมู่หน้าที่ คือ อีเทอร์ คิวโนน แล็กโตน คีโตน ไฮดรอกซิล

Boudrahem Benissad และ Amar (2009) ศึกษาการดูดซับแบบแบทและภาวะสมดุลของการกำจัด Pb²⁺ จากสารละลาย โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย ZnCl₂ พบว่า อัตราส่วนที่ดีที่สุดในการเตรียมถ่านกัมมันต์ให้มีรูพรุนชนิด microporous ที่มีพื้นที่ผิวรูพรุนสูง (890 m²/g) และปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็กสูง (0.772 cm³/g) คือกากกาแฟต่อ ZnCl₂ เป็น 1:1 โดยน้ำหนัก ทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากกาแฟนั้นเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัด Pb²⁺ จากสารละลาย นอกจากนี้ยังพบว่า ZnCl₂ เป็นสารกระตุ้นที่เหมาะสมในการเตรียมคาร์บอนให้มีรูพรุนสูง และ ZnCl₂ ยังมีหน้าที่ในการขัดขวางการเกิด Tar ในกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน

Katsiri Laowachirasuwan (2009) ทำการเตรียมและศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยวิธีกระตุ้นทางเคมี พบว่า การใช้ ZnCl₂ เป็นสารกระตุ้น ในอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเป็น 3:1 แล้วเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่สภาวะนี้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงที่สุดเท่ากับ 926 mg/g พื้นที่ผิวแบบ BET เท่ากับ 1,218.18 m²/g และปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 0.86 cm³/g

Chiravoot Pechyen Duangdao Aht-Ong Viboon Sricharoenchaikul และ Duangduen Atong (2010) ศึกษาสภาวะที่ดีที่สุดในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกาแฟ (Coffea Arabica L.) ด้วยการกระตุ้นทางเคมี พบว่า ถ่านที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 900 °C นั้น ให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง และปริมาณสารระเหยต่ำ เมื่อนำไปกระตุ้นด้วย NaOH ในอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเป็น 1:1 แล้วเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 15 นาที

ภายใต้ก๊าซ N_2 100 ml/min พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวแบบ BET สูงเท่ากับ $802 \text{ m}^2/\text{g}$ และ ปริมาตรของรูพรุนเท่ากับ $0.80 \text{ cm}^3/\text{g}$

Nabais และคณะ (2011) ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกอัลมอนด์ พบเซลลูโลสเป็น องค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 32.5 โดยน้ำหนัก รองลงมาคือ เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ร้อยละ 25.5 และ 24.8 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สภาวะที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์คือ คาร์บอนไนเซชันที่ อุณหภูมิ $400 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้ก๊าซ N_2 $85 \text{ cm}^3/\text{ml}$ แล้วกระตุ้นโดยใช้ก๊าซ CO_2 ใน อัตราการไหล $85 \text{ cm}^3/\text{ml}$ ที่อุณหภูมิ $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวแบบ BET สูงถึง $1,138 \text{ m}^2/\text{g}$ และปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก เท่ากับ $0.49 \text{ cm}^3/\text{g}$ การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR พบหมู่ไฮดรอกซิล อีเทอร์ เอสเทอร์ และแลกโตน เป็นต้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 พื้นที่ศึกษาวิจัย

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เป็นการศึกษาค้นคว้าวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) สถานที่ปฏิบัติงาน คือ ห้องปฏิบัติการชั้น 17 สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม อาคารมหามกุฏ คณะวิทยาศาสตร์ และห้องปฏิบัติการชั้น 4 ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พื้นที่ที่นำตัวอย่างมาศึกษา ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทออกแบบไรโน (ประเทศไทย) จำกัด โดยตัวแทนของตัวอย่างกากกาแฟ ได้จากบ้านไร่กาแฟสาขาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 วิธีดำเนินการศึกษา

3.2.1 ขั้นตอนเตรียมการศึกษา

1) สำรวจ ค้นหาเอกสารและงานวิจัย เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดสถานะในการเตรียมถ่านกัมมันต์

2) ติดต่อขอข้อมูลกากกาแฟจากบริษัทออกแบบไรโน (ประเทศไทย) จำกัด โดยตัวอย่างกากกาแฟพันธุ์อะราบิกา และพันธุ์โรบัสตา ขอความอนุเคราะห์จากร้านค้าที่เป็นเครือข่ายของบริษัท

3) ศึกษาเครื่องมือ และวิธีการในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ

4) ศึกษาวิธีการเตรียมสารละลายในการกระตุ้นผงถ่าน ได้แก่ สารละลายซิงค์คลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดฟอสฟอริก ใช้ซิงค์คลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดฟอสฟอริก ชนิด AR. Grade

3.2.2 ขั้นตอนการศึกษา

3.2.2.1 วิเคราะห์ลักษณะสมบัติเบื้องต้น

นำเมล็ดกาแฟพันธุ์อะราบิกา และพันธุ์โรบัสตมาก่อนทำการทดลองที่บดแล้ว มาทดสอบลักษณะสมบัติพื้นฐานต่างๆ ดังนี้

1) วิเคราะห์หาองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

นำตัวอย่างเมล็ดกาแฟก่อนทำการทดลองที่บดแล้ว 6 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งเป็นพันธุ์อะราบิกา ได้แก่ กาแฟ Starbucks กาแฟ Coffee world และกาแฟบ้านไร่กาแฟ และพันธุ์โรบัสตา ได้แก่ กาแฟ Thai Robusta กาแฟ Vietnam Robusta และกาแฟบ้านไร่กาแฟ มาวิเคราะห์หาองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน มีขั้นตอนดังนี้

(1) นำตัวอย่างกาแฟ 1 กรัม มาอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักแห้ง โดยน้ำหนักที่ชั่งได้เป็น A

(2) นำตัวอย่างแห้งจากขั้นตอนที่ 1 มาแช่ใน 24% KOH ปริมาตร 10 ml. เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง แบ่งตัวอย่างเป็น 2 ส่วน ดังนี้

- ส่วนที่ 1 นำมาชั่งน้ำหนัก แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบ 24 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนักแห้ง โดยน้ำหนักที่ชั่งได้เป็น B โดยค่าของ B คิดได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$\% \text{ ความชื้น} = \frac{[W_{\text{ก่อนอบ}} - W_{\text{หลังอบ}}]}{W_{\text{ก่อนอบ}}} \times 100 \quad (3.1)$$

$$B = (100 - \% \text{ ความชื้น}) \times \text{น้ำหนักเปียกทั้งหมด} \quad (3.2)$$

- ส่วนที่ 2 นำมาชั่งน้ำหนัก เพื่อนำไปทำการทดลองในขั้นตอนที่ 3 ต่อไป

(3) นำตัวอย่างหลังจากการย่อยในขั้นตอนที่ 2 มาแช่ใน 72% H₂SO₄ ปริมาตร 10 ml. เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และนำมาต้มเดือดใน 5% H₂SO₄ ปริมาตร 10 ml. เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบ 24 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนักแห้ง โดยน้ำหนักที่ชั่งได้เป็น C โดยค่าของ C คิดได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 เช่นกัน

(4) นำตัวอย่างแห้งจากขั้นตอนที่ 3 ไปเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ จากนั้นชั่งน้ำหนักส่วนที่เหลืออยู่ โดยน้ำหนักที่ชั่งได้เป็น D

การคำนวณปริมาณสัดส่วนของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน คิดจากน้ำหนักที่หายไปจากการย่อยในแต่ละขั้นตอน ดังสมการที่ 3.3 - 3.5

$$\% \text{ Cellulose} = \frac{B - C}{A} \times 100 \quad (3.3)$$

$$\% \text{ Hemicellulose} = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (3.4)$$

$$\% \text{ Lignin} = \frac{C-D}{A} \times 100 \quad (3.5)$$

2) วิเคราะห์หาองค์ประกอบของ C H N ด้วยเครื่อง Elemental Analyzer

นำตัวอย่างเมล็ดกาแฟก่อนทำการทดลองที่บดแล้วทั้ง 6 ตัวอย่างข้างต้น มาวิเคราะห์หาองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ด้วยเครื่อง Elemental Analyzer Model FlashEA 1112 ดังภาพที่ 3.1 โดยชั่งตัวอย่างกาแฟประมาณ 8 กรัม ใส่ใน Tin Capsule ทำการบรรจุ Tin Capsule ลงใน Sealing Device เพื่อปิด Tin Capsule ดังภาพที่ 3.2 แล้วนำไปใส่ใน Autosampler เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบของ C H N



ภาพที่ 3.1 เครื่อง Elemental Analyzer Model FlashEA 1112



ภาพที่ 3.2 Tin Capsule และ Sealing Device

3.2.2.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์

3.2.2.2.1 การคาร์บอนเซชัน

นำกากกาแฟที่เลือกจากขั้นการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติเบื้องต้น มาอบที่อุณหภูมิ 80 °C เพื่อไล่ความชื้น จากนั้นนำกากกาแฟมาผ่านตะแกรง เพื่อเอาสิ่งเจือปนออก และนำกากกาแฟที่ได้มาทำให้แห้ง โดยอบที่อุณหภูมิ 110 °C แล้วจึงนำไปใส่ในเตาเคเตอร์ จากนั้นนำกากกาแฟไปเผาในเตาเผาประเภท laboratory furnace ยี่ห้อ Nabertherm รุ่น Controller P 320 ที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C ใช้เวลาในการเผา 1 ชั่วโมง โดยใส่ในครุชีเบิลที่มีฝาปิด หลังจากนั้นนำถ่านที่ได้มาทำให้เย็น โดยการเก็บในเตาเคเตอร์ จากนั้นนำผงถ่านที่ได้ มาทดสอบลักษณะสมบัติต่างๆ ดังนี้

- 1) การศึกษาลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และความเป็นรูพรุน โดยศึกษาจากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
- 2) การหาค่าไอโอดีนนมเบอร์ หรือค่าการดูดติดผิวไอโอดีน ด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM D 4607 - 94 แสดงดังภาคผนวก ก

3.2.2.2.2 การกระตุ้นผงถ่านด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดฟอสฟอริก

เลือกพันธุ์กาแฟที่ให้ลักษณะสมบัติดีที่สุดที่สุดมาทำการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) โดยนำถ่านที่เผาในที่อับอากาศแล้ว (ข้อ 3.2.2.2.1) ผสมกับสารที่ใช้ในการกระตุ้นในบีกเกอร์ ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักผงถ่านต่อสารกระตุ้น เท่ากับ 1:1 ผสมให้เข้ากัน แล้วปิดให้สนิทด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ จากนั้นแช่ไว้ 24 ชั่วโมง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 °C จนแห้ง นำผงถ่านที่ผ่านการกระตุ้นแล้ว แบ่งใส่ในครุชีเบิล แล้วนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 500 600 700 และ 800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำถ่านที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นแล้วไปล้างด้วยน้ำร้อนหลายๆ ครั้ง เพื่อล้างสารเคมีที่อาจจะตกค้างอยู่ให้หมดไป จนมีสภาพเป็นกลาง นำถ่านไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 °C แล้วทิ้งให้เย็นในเตาเคเตอร์

ชุดการทดลองในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบด้วย 5 ชุดการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยชุดการทดลองที่ 5 เป็นการทำการทดสอบถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวเกรดการค้า (Anasorb CSC รุ่น 226-01) เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับอ้างอิงในการเปรียบเทียบค่าตัวแปรต่างๆ ในการศึกษาครั้งนี้

ตารางที่ 3.1 ชุดการทดลองถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิต่างๆ

ชุดการทดลอง	อุณหภูมิ (°C)
1	500
2	600
3	700
4	800
5	ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว

จากนั้นนำผงถ่านที่ผ่านการกระตุ้นแล้ว และถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว มาทดสอบลักษณะสมบัติต่างๆ เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจว่าสารกระตุ้นชนิดใด และที่อุณหภูมิใดให้สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ดีที่สุด ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ทดสอบเป็นดังนี้

1) ศึกษาลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และความเป็นรูพรุน โดยศึกษาจากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

2) วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุน และศึกษาไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์ ด้วยเครื่อง Surface Area Analyzer

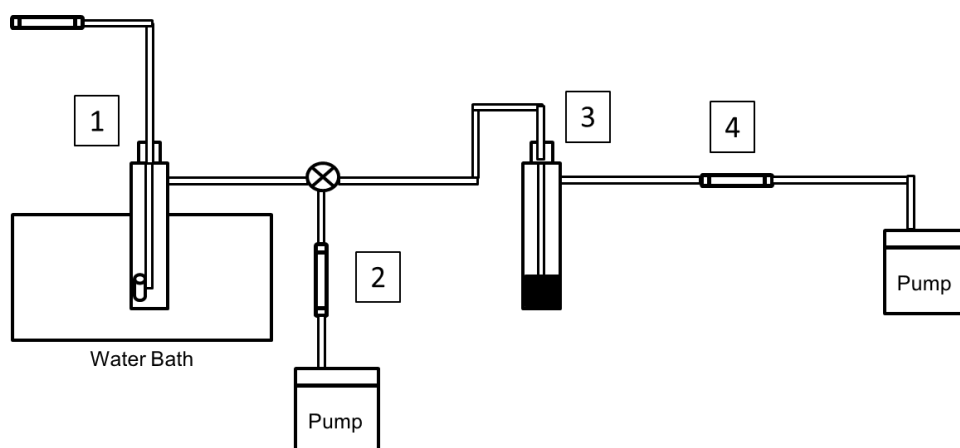
จากนั้นนำถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ให้ลักษณะสมบัติดีที่สุดมาวิเคราะห์หมู่หน้าที่ (Functional groups) ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานซโฟรม อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) เพื่อดูความหลากหลายของหมู่หน้าที่ปรากฏบนผิวถ่านกัมมันต์

3.2.2.3 การทดสอบการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย

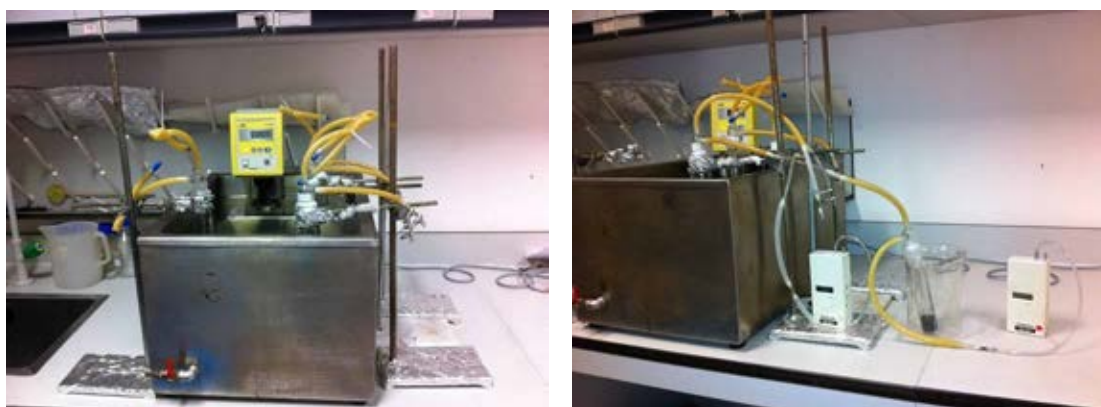
ทดสอบการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ ทำการเก็บตัวอย่างใน Glass Bubbler ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วนเชื่อมต่อกัน แสดงดังภาพที่ 3.3 ดังนี้ ส่วนที่ 1 คือ หลอดแก้วที่ภายในบรรจุแหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหย ปริมาตร 1 ml ส่วนที่ 2 คือ หลอด Active gas tube ที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณของสาร VOCs จากแหล่งกำเนิด ซึ่งเชื่อมต่อกับปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศ ส่วนที่ 3 คือ หลอดแก้วที่ภายในบรรจุถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ผลิตได้ 5 กรัม และส่วนที่ 4 คือ หลอด Active gas tube ที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณของสาร VOCs ที่เหลือหลังจากที่ดูดซับที่ผลิตจากกากกาแฟ ซึ่งเชื่อมต่อกับปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศ โดยทำการทดลองดังนี้

- ทดสอบการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ (ชุดการทดลองที่ดีที่สุด) โดยใช้แหล่งกำเนิดซึ่งได้แก่ สีทาภายในชนิดสีน้ำ โดยแบ่งเป็นประเภทธรรมดา

และประเภท Low VOCs ประเภทละ 3 ยี่ห้อ และเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่างกากกาแฟ ถ่านกากกาแฟที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น (คุณภาพที่ดีที่สุด) และถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ (ชุดการทดลองที่ดีที่สุด) โดยใช้สีทาภายในชนิดสีน้ำมัน ชุดการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.2 ปลอ่ยให้มีการระเหยของสารแหล่งกำเนิดจนวนอิมตัวในส่วนที่ 1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ โดยใช้ water bath จากนั้นต่ออุปกรณ์ในการเก็บตัวอย่าง แสดงดังภาพที่ 3.3 - 3.4 เปิดวาล์วในส่วนที่ 2 และเปิดปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศพร้อมกัน โดยควบคุมอัตราการไหลของอากาศเป็น 100 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อให้อากาศไหลผ่านหลอด Active gas tube เก็บตัวอย่างอากาศเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ในหลอด Active gas tube ไปสกัดในขั้นตอนต่อไป โดยแต่ละการทดลองทำ 3 ซ้ำ



ภาพที่ 3.3 ชุดการทดลองในการเก็บตัวอย่าง



ภาพที่ 3.4 ชุดการทดลองก่อนและขณะเก็บตัวอย่าง

ตารางที่ 3.2 ชุดการทดลองการทดสอบการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย

ชนิดสี	ประเภท	สัญลักษณ์	ชุดการทดสอบ
สีทากายใน ชนิดสีน้ำ	ธรรมดา	A B C	ใช้ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่เตรียมได้ (ชุดการทดลองที่ดีที่สุด)
	Low VOCs	A (low) B (low) C (low)	
สีทากายใน ชนิดสีน้ำมัน			ใช้กากกาแฟ ถ่านกากกาแฟที่ยังไม่ผ่านการ กระตุ้น (อุณหภูมิที่ดีที่สุด) และถ่านกัมมันต์ จากกากกาแฟ (ชุดการทดลองที่ดีที่สุด)

3.2.2.4 วิเคราะห์หาชนิดและปริมาณสารอินทรีย์ระเหย

3.2.2.4.1 การหาสภาวะที่เหมาะสม

จากการศึกษาของ Mingkwan Kitwattanavong (2010) พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารอินทรีย์ระเหย โดยใช้เครื่อง GC/FID รุ่น 6890N คอลัมน์ชนิด HP-5 ขนาด 30 m x 0.32 mm x 0.25 μm (19091J-413) และใช้ Nitrogen (N_2) Helium (He) Hydrogen (H_2) และ Air zero เป็น carrier gas ซึ่งเบื้องต้นใช้เทคนิค Scan mode เพื่อหา Retention time ของสารละลายมาตรฐาน BTEX สภาวะการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.3 โดยสภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 35 $^{\circ}\text{C}$ จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 120 $^{\circ}\text{C}$ ที่อัตรา 5 $^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ 17 นาที หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 230 $^{\circ}\text{C}$ ที่อัตรา 20 $^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ และคงไว้ที่อุณหภูมินี้ 5 นาที เวลารวมทั้งสิ้น 27.5 นาที Retention time ที่ได้จากการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 3.4 และ chromatograms แสดง peak ที่ Retention time ต่างๆ ทั้งหมด 6 peak ซึ่งรวม Peak ของ Toluene d-8 (internal standard) แสดงดังภาคผนวก ข (ภาพที่ ข-1) เครื่อง GC/FID รุ่น 6890N แสดงดังภาพที่ 3.5 ปริมาตรในการฉีดเข้าเครื่อง GC/FID คือ 1.0 μL

ตารางที่ 3.3 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างสารอินทรีย์ระเหย

Oven Ramp	$^{\circ}\text{C}/\text{min}$	Next $^{\circ}\text{C}$	Hold (min)	Run Time (min)
Initial		35	0.00	0.00
Ramp 1	5.00	120	0.00	17.00
Ramp 2	20.00	230	5.00	27.50

ตารางที่ 3.4 Retention time ของสารละลายมาตรฐาน BTEX

ชื่อสารประกอบ	Retention time (min)
Benzene	3.2
Toluene d-8	4.6
Toluene	4.7
Ethylbenzene	6.7
m,p-Xylene	6.9
o-Xylene	7.6



ภาพที่ 3.5 เครื่อง GC/FID รุ่น 6890N

3.2.2.4.2 การสร้าง Calibration curve

สร้าง Calibration curve โดยใช้สารละลายมาตรฐาน BTEX ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 6 ความเข้มข้น ดังนี้ 8,000 4,000 2,000 1,000 500 และ 250 ng/ml ซึ่งแต่ละความเข้มข้นจะมีสารละลายมาตรฐาน toluene-d8 (internal standard) ที่ความเข้มข้น 6,350 ng/ml รวมอยู่ด้วย

3.2.2.4.3 Limit of detection (LOD) และ Limit of Quantification (LOQ)

Limit of detection (LOD) และ Limit of Quantification (LOQ) เป็นการหาขีดความสามารถในการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานของเครื่อง GC/FID โดยดูจากค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่เครื่องมือสามารถวัดสารนั้นได้ โดยพิจารณาจากค่า Signal เปรียบเทียบกับ Noise ซึ่งนิยมใช้ค่า Signal : Noise = 3 : 1 สำหรับ LOD และ 10 : 1 สำหรับ LOQ โดยรายงานผลของตัวอย่าง

ที่ตรวจวัดได้ต่ำกว่าค่า LOQ เป็นค่า BLQ (Below Limit of Quantification) ซึ่งมีสูตรการคำนวณดังสมการที่ 3.6 - 3.8

$$\text{LOD} = \frac{3 \times \text{ความเข้มข้นต่ำสุดที่ใช้ (ng/ml)} \times \delta}{\bar{X}} \quad (3.6)$$

$$\text{LOQ} = \frac{10 \times \text{ความเข้มข้นต่ำสุดที่ใช้ (ng/ml)} \times \delta}{\bar{X}} \quad (3.7)$$

$$\delta = \sqrt{(X_i - \bar{X})^2 / (n - 1)} \quad (3.8)$$

โดย δ = Standard deviation

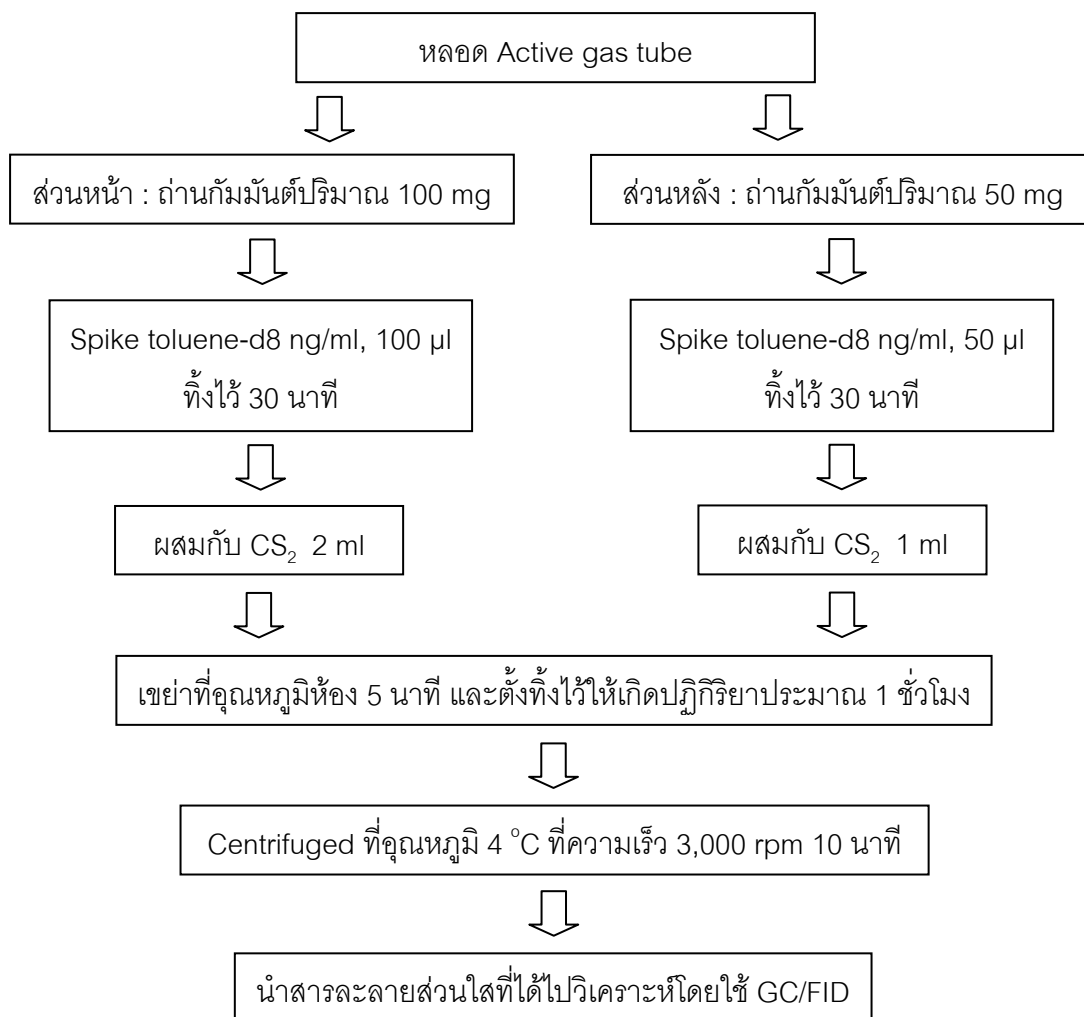
X_i = peak area ของ VOCs target ที่ตรวจวัดครั้งที่ i

\bar{X} = peak area เฉลี่ยของ VOCs target ที่ตรวจวัดครั้งที่ i ถึงครั้งที่ n

n = จำนวนครั้งในการตรวจวัด

3.2.2.4.4 การสกัดสาร VOCs

ขั้นตอนการสกัดสาร VOCs แสดงดังภาพที่ 3.6 ตามวิธีการสกัดของ Olansandan Amagai และ Matsushita (1999) อ้างถึงใน ไพลิน ทวีวงษ์ (2551) โดยนำถ่านกัมมันต์ในหลอด Active gas tube ที่ผ่านการทดสอบการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยแล้ว ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนหน้าและส่วนหลัง ใส่ในหลอดแก้วทดลอง จากนั้น spike toluene-d8 (internal standard) ที่ความเข้มข้น 6,350 ng/ml ปริมาตร 100 μl สำหรับส่วนหน้า และ 50 μl สำหรับส่วนหลัง ทิ้งไว้ 30 นาที หลังจากนั้นผสมกับตัวทำละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) ปริมาตร 2 ml สำหรับส่วนหน้า และ 1 ml สำหรับส่วนหลัง ทำการเขย่าที่อุณหภูมิห้อง 5 นาที และตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไป centrifuged ที่อุณหภูมิ 4 °C ที่ความเร็ว 3,000 rpm (รอบ/นาที) เป็นเวลา 10 นาที นำสารละลายส่วนใสที่ได้จากการสกัดไปวิเคราะห์โดยใช้ GC/FID



ภาพที่ 3.6 ขั้นตอนการสกัดสารอินทรีย์ระเหยจากหลอด Active gas tube

3.2.2.4.5 การทดสอบวิธีการสกัดโดยใช้ Recovery Test

เนื่องจากการสกัดสารตัวอย่างตามขั้นตอนที่แสดงในภาพที่ 3.6 ได้ผ่านการทดสอบวิธีการสกัดโดยใช้ Recovery Test โดย ไพลิติน ทวีวงษ์ (2551) แล้ว ซึ่งได้ทดสอบโดยการ Spike สารละลายมาตรฐาน Japanese 50 component indoor air ความเข้มข้น 1,000 ng/ml เข้าไปในหลอดเก็บตัวอย่างแบบ Active gas tube แล้วนำมาสกัด ผลที่ได้จากการทดสอบ คำนวณเป็น % Recovery ได้อยู่ในช่วง 86.40 - 120.37% แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบ % Recovery ของ Volatile Organic Compounds

สารประกอบ	% Recovery *
Benzene	120.37
Toluene	95.99
Ethybenzene	92.41
m,p-Xylene	89.54
o-Xylene	86.40

หมายเหตุ: * งานวิจัยของไพลิน ทวีวงษ์ (2551)

3.2.2.4.6 การคำนวณหาปริมาณสารตัวอย่าง VOCs

การตรวจหาปริมาณสาร VOCs ในตัวอย่างสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐาน BTEX ที่มีสารละลายมาตรฐาน toluene-d8 (internal standard) ที่ความเข้มข้น 6,350 ng/ml สารตัวอย่าง VOCs ที่ได้จากการวิเคราะห์ จะได้ค่าในหน่วย นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งแสดงวิธีการคำนวณความเข้มข้นของสารตัวอย่าง ดังสมการที่ 3.8

$$\text{Conc. of VOCs (ng/m}^3\text{)} = \frac{(P_{t/s} / P_{it/s}) - (P_{t/sb} / P_{it/sb})}{(P_s / P_{it})} \times C_{\text{std}} \times V_s \times \frac{1}{V_A} \quad (3.8)$$

- โดย C_{std} = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน (ng/ml)
- $P_{t/s} / P_{it/s}$ = Peak area ของ VOCs ในตัวอย่าง ต่อ Peak area ของ internal standard
- $P_{t/sb} / P_{it/sb}$ = Peak area ของ VOCs ใน blank ต่อ Peak area ของ internal standard
- P_s / P_{it} = Peak area ของ VOCs ในสารละลายมาตรฐาน ต่อ Peak area ของ internal standard
- V_s = ปริมาตรของสารตัวอย่าง 2 ml
- V_A = ปริมาตรอากาศ (m^3)

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.3.1 วิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างพื้นที่ผิวแบบ BET ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน ด้วย Pearson's Correlation

3.3.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ผลิตได้ วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยใช้ t-test และ ANOVA ในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ คือ Statistical Package for the Social Science (SPSS)

3.4 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

4.1 ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของกาแฟ

4.1.1 องค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

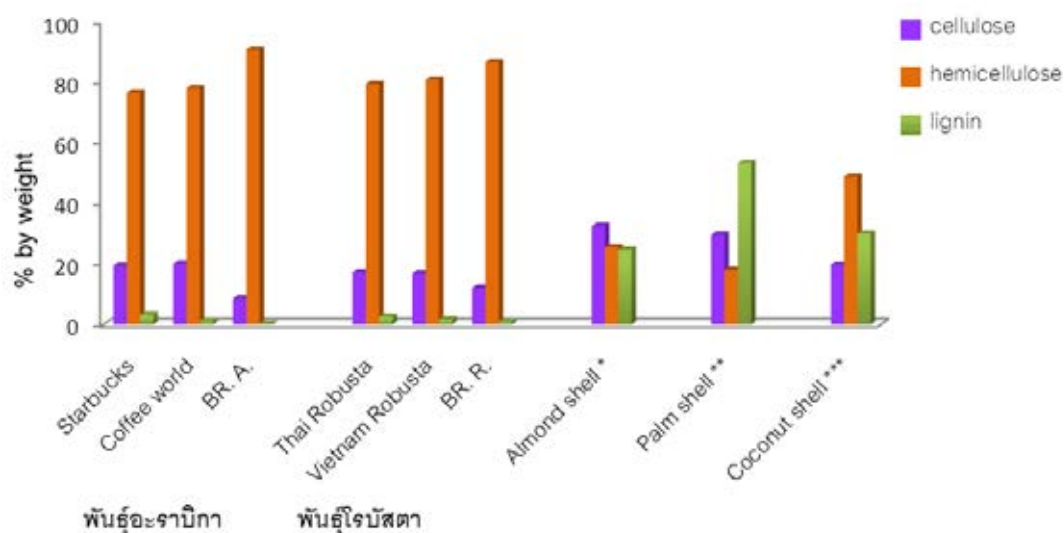
นำเมล็ดกาแฟก่อนทำการทดลองที่บดแล้วทั้ง 6 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งเป็น พันธุ์อะราบิกา ได้แก่ กาแฟ Starbucks กาแฟ Coffee world และกาแฟบ้านไร่กาแฟ ส่วนพันธุ์โรบัสตา ได้แก่ กาแฟ Thai Robusta กาแฟ Vietnam Robusta และกาแฟบ้านไร่กาแฟ มาวิเคราะห์หาองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ค (ตารางที่ ค-1 ถึง ค-2)

ค่าเฉลี่ยปริมาณองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในกาแฟพันธุ์อะราบิกา และพันธุ์โรบัสตา แสดงดังตารางที่ 4.1 จากการทดลองพบว่า เฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุดในตัวอย่งกาแฟ โดยพบมากในกาแฟบ้านไร่กาแฟพันธุ์อะราบิกา คิดเป็นร้อยละ 90.80 โดยน้ำหนัก และจากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า มีค่าสูงกว่าปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่วิเคราะห์ได้จากกาแฟชนิดอื่นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในภาคผนวก ง (ตารางที่ ง-1 ถึง ง-3) รองลงมา คือ เซลลูโลส และลิกนิน คิดเป็นร้อยละ 8.68 และ 0.28 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ผลที่ได้สอดคล้องกับปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบหลักในกะลามะพร้าวเช่นเดียวกัน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 48.9 โดยน้ำหนัก รองลงมาเป็นลิกนิน และเซลลูโลส (Daud และ Ali, 2004) แต่ให้ผลที่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบของเปลือกอัลมอนด์ที่พบเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักมีค่าเท่ากับร้อยละ 32.5 โดยน้ำหนัก รองลงมาเป็นเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ตามลำดับ (Nabais และคณะ, 2011) และกะลาปาล์มที่พบลิกนินเป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 53.4 โดยน้ำหนัก รองลงมาเป็น เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ตามลำดับ (Daud และ Ali, 2004) แสดงดังภาพที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในกาแฟพันธุ์อะราบิกา และพันธุ์โรบัสตา

ตัวอย่าง	Total \pm SD (wt.%)	ค่าเฉลี่ย \pm SD (wt.%)		
		เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน
Starbucks	99.37 \pm 0.23	19.53 ^b \pm 3.01	76.59 ^a \pm 1.66	3.25 ^b \pm 1.85
Coffee world	99.53 \pm 0.33	20.18 ^b \pm 3.97	78.04 ^{ab} \pm 2.45	1.30 ^{ab} \pm 1.84
บ้านไร่กาแฟพันธุ์อะราบิกา (BR. A.)	99.76 \pm 0.14	8.68 ^a \pm 1.23	90.80 ^d \pm 1.29	0.28 ^a \pm 0.25
Thai Robusta	99.38 \pm 0.25	17.30 ^b \pm 2.39	79.45 ^{ab} \pm 2.09	2.63 ^{ab} \pm 1.49
Vietnam Robusta	99.54 \pm 0.26	16.88 ^b \pm 1.11	80.90 ^b \pm 0.34	1.76 ^{ab} \pm 0.78
บ้านไร่กาแฟพันธุ์โรบัสตา (BR. R.)	99.75 \pm 0.20	12.09 ^a \pm 2.30	86.68 ^c \pm 1.71	0.98 ^{ab} \pm 1.06

หมายเหตุ: ตัวอักษรหมวมขวาด้านบนที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ภาพที่ 4.1 องค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในตัวอย่างกาแฟ และวัสดุชนิดอื่นๆ

หมายเหตุ: * งานวิจัยของ Nabais และคณะ, 2011 **, *** งานวิจัยของ Daud และ Ali, 2004

4.1.2 องค์ประกอบของ C H N ในกาแฟ

วิเคราะห์หาองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ด้วยเครื่อง Elemental Analyzer Model FlashEA 1112 ของเมล์ติกาแฟก่อนทำการทดลองที่บดแล้วทั้ง 2 สายพันธุ์ คือ พันธุ์อะราบิกา ได้แก่ กาแฟ Starbucks กาแฟ Coffee world และกาแฟบ้านไร่กาแฟ ส่วนพันธุ์ โรบัสตา ได้แก่ กาแฟ Thai Robusta กาแฟ Vietnam Robusta และกาแฟบ้านไร่กาแฟ ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ค (ตารางที่ ค-3 ถึง ค-4)

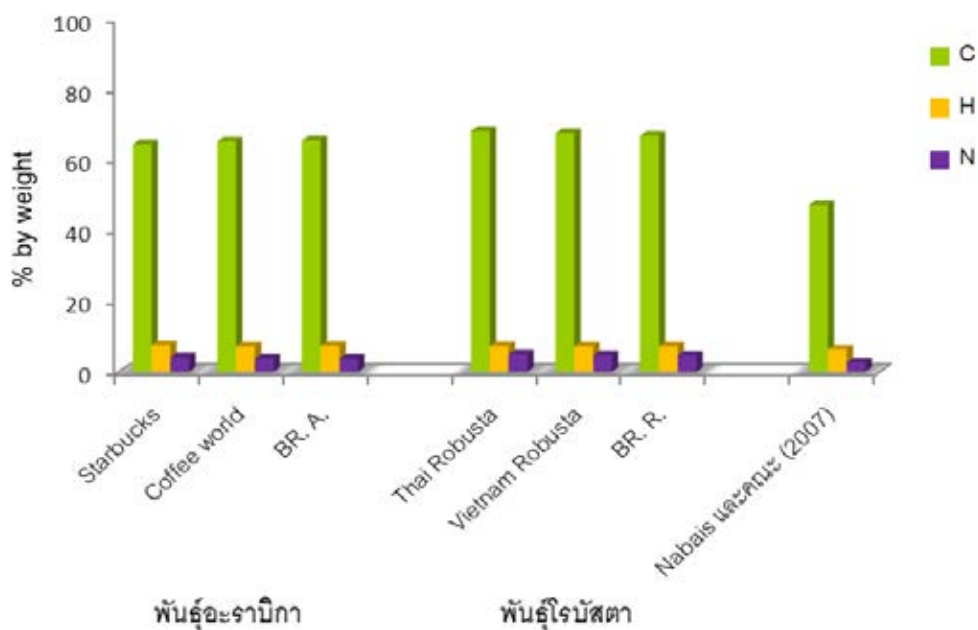
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ในกาแฟพันธุ์อะราบิกา และพันธุ์โรบัสตา จากการวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณองค์ประกอบของคาร์บอนในเมล็ดกาแฟทั้ง 6 ตัวอย่างมากที่สุด รองลงมาคือ ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.2 ในตัวอย่างกาแฟพันธุ์อะราบิกาทั้ง 3 นั้น พบว่า กาแฟบ้านไร่กาแฟมีปริมาณองค์ประกอบของคาร์บอนสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 65.50 โดยน้ำหนัก และในตัวอย่างกาแฟพันธุ์โรบัสตา พบว่า กาแฟ Thai Robusta มีปริมาณองค์ประกอบของคาร์บอนสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 68.19 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการทดลองนั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nabais และคณะ (2008) ที่ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดกาแฟ (coffee endocarp) โดยการกระตุ้นด้วยก๊าซ CO₂ และไอน้ำ พบว่า ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักมากที่สุด คือ คาร์บอนเช่นเดียวกัน รองลงมา คือ ออกซิเจน และไฮโดรเจน ซึ่งคิดเป็นหน่วยร้อยละโดยน้ำหนักได้เท่ากับ 47.3 37.3 และ 6.4 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีศึกษาในวัตถุบิขชนิดอื่นๆ เช่น เศษไม้ยางพารา โดยพบว่า ธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักที่มีมากที่สุดเช่นเดียวกัน รองลงมา คือ ออกซิเจน ไฮโดรเจน และซัลเฟอร์ ซึ่งคิดเป็นหน่วยร้อยละโดยน้ำหนักได้เท่ากับ 47.03 41.6 10.99 และ 0.38 ตามลำดับ (ปรีชญา ชัยสาร, 2551) แสดงให้เห็นว่า ธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญในวัตถุบิขที่นิยมนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ปริมาณองค์ประกอบของคาร์บอน และไฮโดรเจน ในตัวอย่างกาแฟทั้ง 6 ชนิดนั้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่พบความแตกต่างของปริมาณองค์ประกอบของไนโตรเจนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในภาคผนวก ง (ตารางที่ ง-4 ถึง ง-6) และเมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของปริมาณองค์ประกอบของคาร์บอนในกาแฟทั้ง 2 สายพันธุ์นั้น พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในภาคผนวก ง (ตารางที่ ง-7)

ตารางที่ 4.2 ปริมาณองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ในกาแฟพันธุ์อะราบิกา และพันธุ์โรบัสตา

ตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย \pm SD (wt.%)			ธาตุอื่นๆ (wt.%)
	C	H	N	
Starbucks	64.43 ^a \pm 4.41	7.63 ^a \pm 0.43	4.20 ^{ab} \pm 0.48	23.74
Coffee world	65.23 ^a \pm 1.26	7.31 ^a \pm 0.19	3.82 ^a \pm 0.01	23.64
บ้านไร่กาแฟพันธุ์อะราบิกา (BR. A.)	65.50 ^a \pm 3.02	7.42 ^a \pm 0.14	3.85 ^a \pm 0.05	23.24
Thai Robusta	68.19 ^a \pm 2.11	7.36 ^a \pm 0.31	5.01 ^c \pm 0.09	19.44
Vietnam Robusta	67.55 ^a \pm 1.81	7.28 ^a \pm 0.17	4.77 ^c \pm 0.02	20.40
บ้านไร่กาแฟพันธุ์โรบัสตา (BR. R.)	66.85 ^a \pm 1.36	7.29 ^a \pm 0.33	4.70 ^{bc} \pm 0.03	21.16

หมายเหตุ: ตัวอักษรหมทขวาด้านบนที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ภาพที่ 4.2 องค์ประกอบของ C H N ในตัวอย่างกาแฟ

เนื่องจากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในตัวอย่างกาแพ้ง 2 สายพันธุ์นั้น มีปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ แตกต่างกันเล็กน้อย ประกอบกับผลของการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันของปริมาณคาร์บอนที่พบในกาแพ้ง 2 สายพันธุ์ และเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ชัดเจนขึ้น จึงเลือกกาแพ้งของบ้านไร่กาแพ้งพันธุ์อะราบิกา และบ้านไร่กาแพ้งพันธุ์โรบัสตามาทำการทดลองในขั้นต่อไป

4.2 การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านจากกาแพ้งก่อนการกระตุ้นทางเคมี

นำกาแพ้งบ้านไร่กาแพ้งพันธุ์อะราบิกา และพันธุ์โรบัสตาดำผ่านการเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มาทดสอบลักษณะสมบัติต่างๆ ดังนี้

4.2.1 ลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และความเป็นรูพรุน

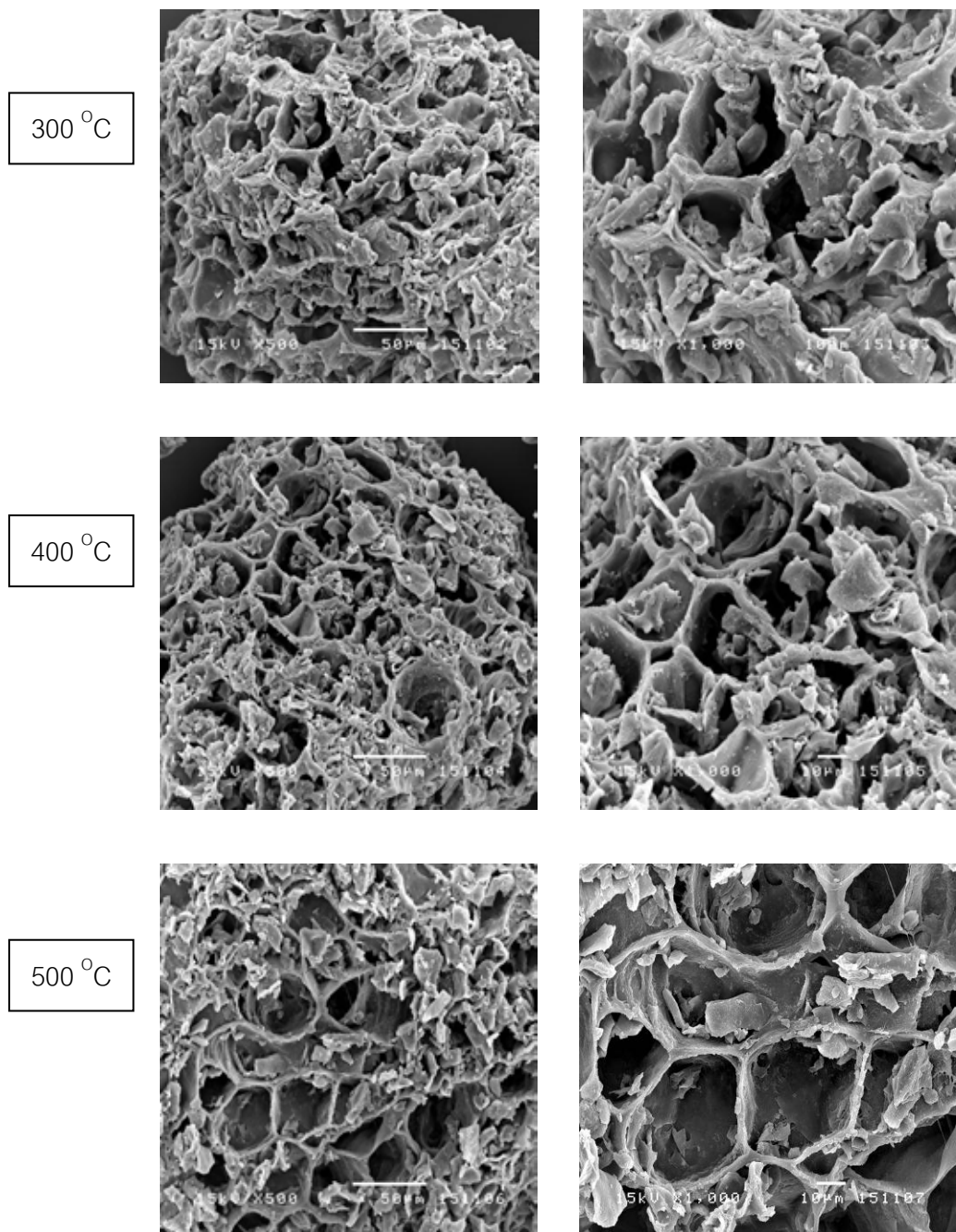
ศึกษาลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และความเป็นรูพรุนของกาแพ้งบ้านไร่กาแพ้งพันธุ์อะราบิกา และพันธุ์โรบัสตา ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งยังไม่ผ่านการกระตุ้น โดยศึกษาจากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) JEOL รุ่น JSM-5410 LV แสดงดังภาพที่ 4.3 - 4.4

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวภายนอกของกาแพ้งบ้านไร่กาแพ้งพันธุ์อะราบิกา ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งยังไม่ผ่านการกระตุ้น พบว่า ถ่านจากกาแพ้งพันธุ์อะราบิกา ที่เผาที่อุณหภูมิ 400 และ 500 °C นั้น มีลักษณะเป็นรูพรุน และมีความเป็นระเบียบมากกว่าถ่านที่ได้จากกาแพ้งที่เผาที่อุณหภูมิ 300 °C ซึ่งลักษณะเป็นรูพรุนมากกว่า รวมถึงรูพรุนมีลักษณะเปิดกว้างกว่าด้วย

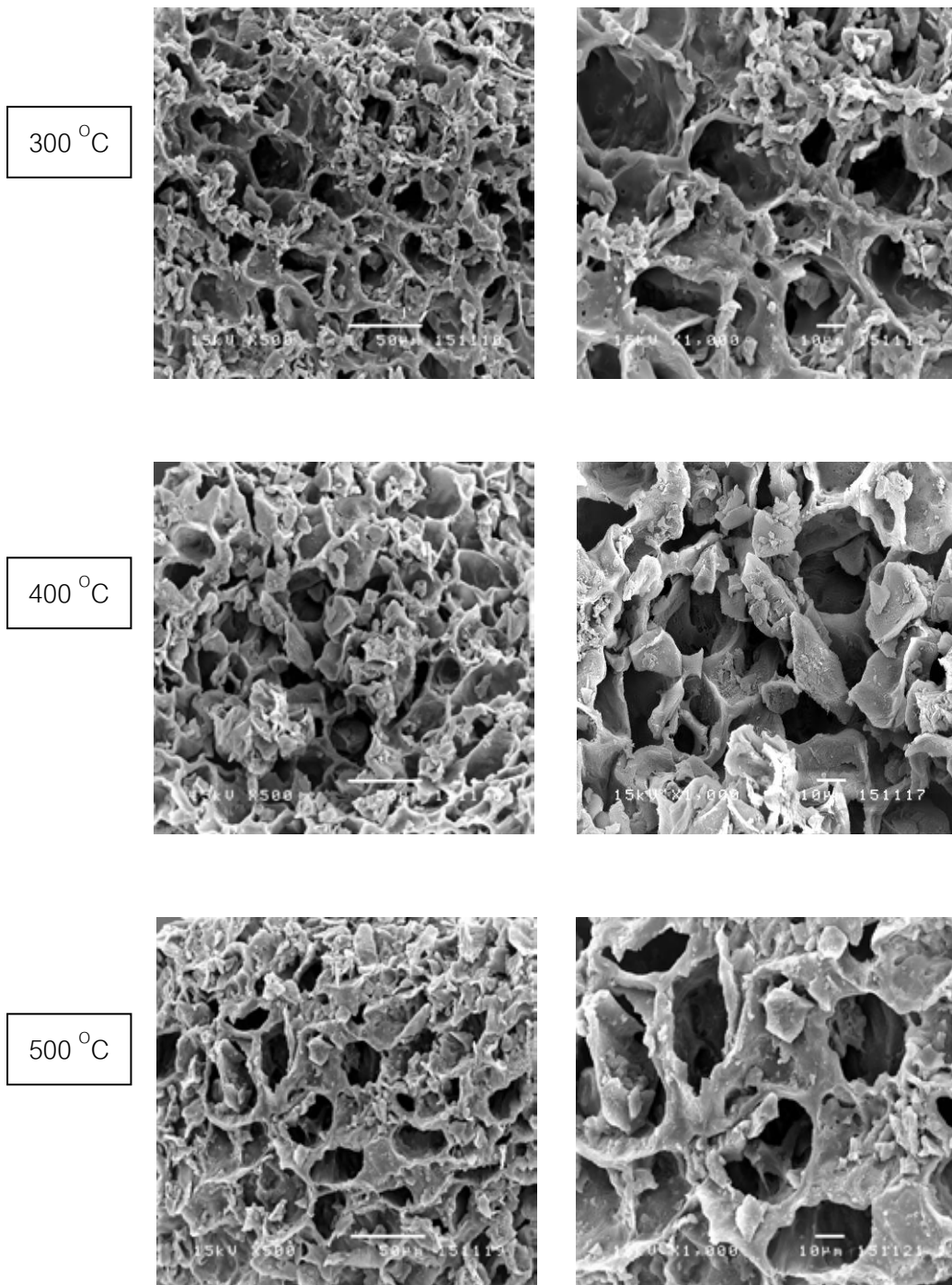
เมื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวภายนอกของกาแพ้งบ้านไร่กาแพ้งพันธุ์โรบัสตา ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งยังไม่ผ่านการกระตุ้น พบว่า ถ่านจากกาแพ้งพันธุ์โรบัสตา ที่เผาที่อุณหภูมิ 300 °C นั้น มีลักษณะเป็นรูพรุน และความเป็นระเบียบมากกว่าถ่านจากกาแพ้งที่เผาที่อุณหภูมิ 400 และ 500 °C ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถ่านที่ได้มีรูพรุนค่อนข้างน้อย และมีความเป็นระเบียบน้อยกว่า

จากการศึกษาลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และความเป็นรูพรุนของกาแพ้งที่ทำการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเพียงการศึกษาลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่านเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับลักษณะถ่านเมื่อผ่านการกระตุ้นแล้วในขั้นตอนต่อไป ซึ่งขั้นตอนนี้ยังไม่สามารถระบุได้ว่า

ที่อุณหภูมิใดมีความเหมาะสมในการเตรียมถ่านจากกากกาแฟก่อนการกระตุ้นทางเคมี ดังนั้น จึงต้องมีการทดสอบการดูดซับไอโอดีนต่อไป



ภาพที่ 4.3 ลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และความเป็นรูพรุน ของกากกาแฟบ้านไร่กาแฟพันธุ์อะราบิก้า ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 500 และ 1,000 เท่า



ภาพที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และความเป็นรูพรุน ของกากกาแฟบ้านไร่กาแฟพันธุ์โรบัสตา ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 500 และ 1,000 เท่า

4.2.2 ค่าไอโอดีนนมเบอร์ หรือค่าการดูดติดผิวไอโอดีน

การหาค่าไอโอดีนนมเบอร์ หรือค่าการดูดติดผิวไอโอดีนด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM D 4607-94 เป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับของไอโอดีนในหน่วยมิลลิกรัมบนถ่านกัมมันต์ 1 กรัม กล่าวคือ ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนมเบอร์สูง จะมีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนมเบอร์ต่ำ ซึ่งการหาค่าไอโอดีนนมเบอร์ในขั้นตอนนี้ ใช้เพื่อเป็นเกณฑ์ในการเลือกคุณสมบัติที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านจากกากกาแฟก่อนการกระตุ้นทางเคมี

รายละเอียดผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ค (ตารางที่ ค-5 ถึง ค-6) และตารางที่ 4.3 แสดงค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านจากกากกาแฟที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น แบ่งเป็น ถ่านจากกากกาแฟบ้านไร่กาแฟพันธุ์อะราบิกา และถ่านจากกากกาแฟบ้านไร่กาแฟพันธุ์โรบัสตา ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C โดยเบื้องต้นได้ประมาณค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านจากกากกาแฟที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น ไว้ที่ 300 mg/g เมื่อทำการทดลองแล้ว พบว่า ถ่านจากกากกาแฟบ้านไร่กาแฟพันธุ์อะราบิกา มีค่าใกล้เคียงค่าที่ประมาณไว้ตอนแรก คือ 300 mg/g โดยถ่านที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 °C มีค่าการดูดซับไอโอดีนต่ำที่สุด คือ 228.10 ± 2.95 mg/g ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผานั้นต่ำเกินไป ทำให้ภายในรูพรุนยังคงมีน้ำมันดิน (Tar) หลงเหลืออยู่ จึงเป็นเหตุให้สามารถดูดซับไอโอดีนได้น้อยกว่าถ่านที่ทำการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าคือ 400 °C ซึ่งมีค่าการดูดซับไอโอดีน เท่ากับ 300.56 ± 5.11 mg/g โดยมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ประมาณไว้ตอนแรกมากที่สุด คือ 300 mg/g แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น คือที่ 500 °C กลับพบว่า ค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าลดลง คือ 252.85 ± 2.66 mg/g ทั้งนี้เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C นั้นทำให้เกิดเถ้าในวัสดุ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของถ่านถูกทำลายไป จึงส่งผลให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลงด้วย

เมื่อพิจารณาถ่านจากกากกาแฟบ้านไร่กาแฟพันธุ์โรบัสตา พบว่า ค่าการดูดซับไอโอดีนที่ได้จากถ่านที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C มีค่าต่ำกว่าค่าการดูดซับไอโอดีนที่ได้จากถ่านจากกากกาแฟบ้านไร่กาแฟพันธุ์อะราบิกา และค่า R^2 นั้น มีค่าตั้งแต่ 0.0024 ถึง 0.9614 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่น่าเชื่อถือของข้อมูล และเมื่อสังเกตค่าการดูดซับไอโอดีนที่ได้จากการทดลอง พบว่า มีค่าประมาณ 200 mg/g ดังนั้นจึงทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง โดยเลือกเฉพาะถ่านจากกากกาแฟบ้านไร่กาแฟพันธุ์โรบัสตา ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 400 และ 500 °C มาทดลองหาค่าการดูดซับไอโอดีน โดยประมาณค่าการดูดซับไอโอดีนไว้ที่ 200 mg/g ผลการทดลอง พบว่า ถ่านที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 400 °C มีค่าการดูดซับไอโอดีน 245.19 ± 2.46 mg/g มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9705 - 0.9762 และถ่านที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C มีค่าการดูดซับไอโอดีน 220.29

$\pm 1.94 \text{ mg/g}$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าถ่านที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และค่า R^2 ที่ได้อยู่ในช่วง $0.9799 - 0.9999$ เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิ $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ นั้น ทำให้เกิดเถ้าที่วัสดุเช่นเดียวกัน จึงส่งผลให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลงด้วย จะเห็นได้ว่า ค่าการดูดซับไอโอดีนที่ได้จากการทดลองซ้ำนั้น มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ประมาณไว้เบื้องต้น คือ 200 mg/g ส่วนค่า R^2 ที่ได้มีค่าเข้าใกล้ 1 มากขึ้น แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

โดยทฤษฎีแล้ว การคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิต่ำกว่า $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ การสูญเสียมวลส่วนใหญ่ยังไม่สามารถกำจัด ไฮโดรเจน และออกซิเจนออกจากวัสดุได้หมด ทำให้ถ่านที่ได้มีคุณสมบัติไม่ดีหรือที่เรียกว่า หัวถ่าน ถ้าเผาถ่านที่อุณหภูมิต่ำกว่า $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่า ปริมาณร้อยละของคาร์บอนของถ่านที่ได้สูงขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จะทำให้ได้ถ่านต่ำกว่า ดังนั้น ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านเพื่อให้ได้ผลผลิต และประสิทธิภาพในการแปรสภาพวัตถุดิบหรืออินทรีย์วัตถุให้เป็นถ่านสูงสุด คือช่วงอุณหภูมิ $400 - 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และควรเผาถ่านให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนที่สิ้นสุดโดยเร็ว เพื่อลดการสูญเสียของสารที่สลายตัวด้วยความร้อน

จากการทดลองสรุปได้ว่า การคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ในกากกาแฟ ทำให้ถ่านที่ได้นั้นมีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงเกินไป ค่าการดูดซับไอโอดีนจะลดลง เนื่องจากการเกิดเถ้าที่วัสดุในกระบวนการเผา และจากผลการทดลอง ถ่านจากกากกาแฟบ้านไร่กาแฟพันธุ์อะราบิกา มีค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงกว่าถ่านจากกากกาแฟบ้านไร่กาแฟพันธุ์โรบัสตา ดังนั้น จึงเลือกถ่านกากกาแฟจากบ้านไร่กาแฟพันธุ์อะราบิกา มาทำการกระตุ้นทางเคมีต่อไป โดยในขั้นตอนการคาร์บอนในเซชันนี้ อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการเผา คือ $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และค่า R^2 ที่ได้ยังมีค่าเข้าใกล้ 1 คือ $0.9934 - 0.9969$

ตารางที่ 4.3 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านจากกากกาแฟที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น

ถ่าน	ค่าการดูดซับ ไอโอดีนที่ 300 (ค่าเฉลี่ย \pm SD) (mg/g)	R ²	ค่าการดูดซับ ไอโอดีนที่ 200 (ค่าเฉลี่ย \pm SD) (mg/g)	R ²
BR. A. 300 °C	228.10 \pm 2.95	0.9600 - 0.9996	-	-
BR. A. 400 °C	300.56 \pm 5.11	0.9934 - 0.9969		
BR. A. 500 °C	252.85 \pm 2.66	0.9895 - 0.9998		
BR. R. 300 °C	194.98 \pm 3.34	0.0024 - 0.3057		
BR. R. 400 °C	265.85 \pm 37.61	0.6947 - 0.9614	245.19 \pm 2.46	0.9705 - 0.9762
BR. R. 500 °C	219.72 \pm 0.83	0.7261 - 0.9319	220.29 \pm 1.94	0.9799 - 0.9999

หมายเหตุ: BR. A. และ BR. R. หมายถึง ถ่านจากกากกาแฟบ้านไร่กาแฟพันธุ์อะราบิกา และพันธุ์โรบัสตา ตามลำดับ

4.3 สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ

นำถ่านจากกากกาแฟที่เตรียมได้จากขั้นตอนการคาร์บอนในเซชัน คือ ถ่านกากกาแฟพันธุ์อะราบิกา มาทำการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักถ่านต่อสารกระตุ้น เท่ากับ 1:1 แล้วนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 500 600 700 และ 800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวเกรดการค้า มาทดสอบลักษณะสมบัติต่างๆ ดังนี้

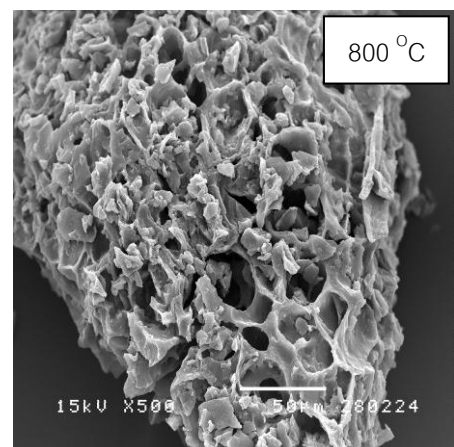
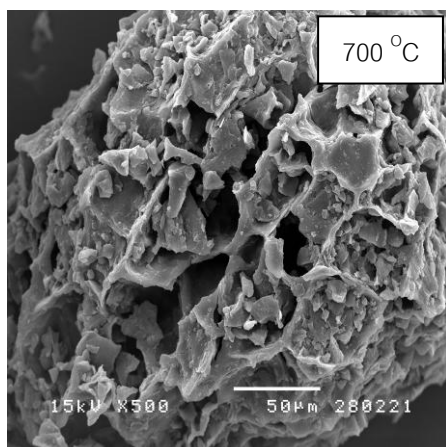
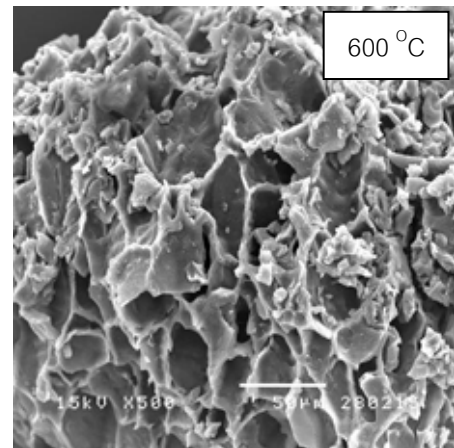
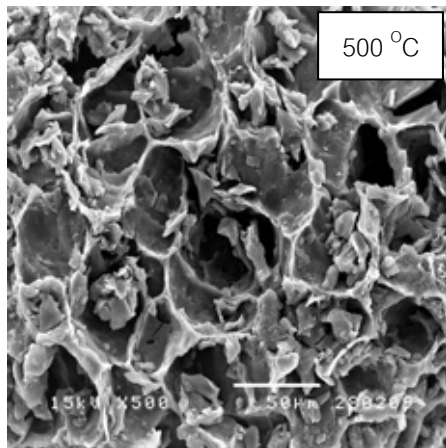
4.3.1 ลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และความเป็นรูพรุน

ศึกษาลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และความเป็นรูพรุนของถ่านจากกากกาแฟบ้านไร่กาแฟพันธุ์อะราบิกา ที่ผ่านการกระตุ้นและเผาที่อุณหภูมิ 500 600 700 และ 800 °C เป็น เวลา 1 ชั่วโมง

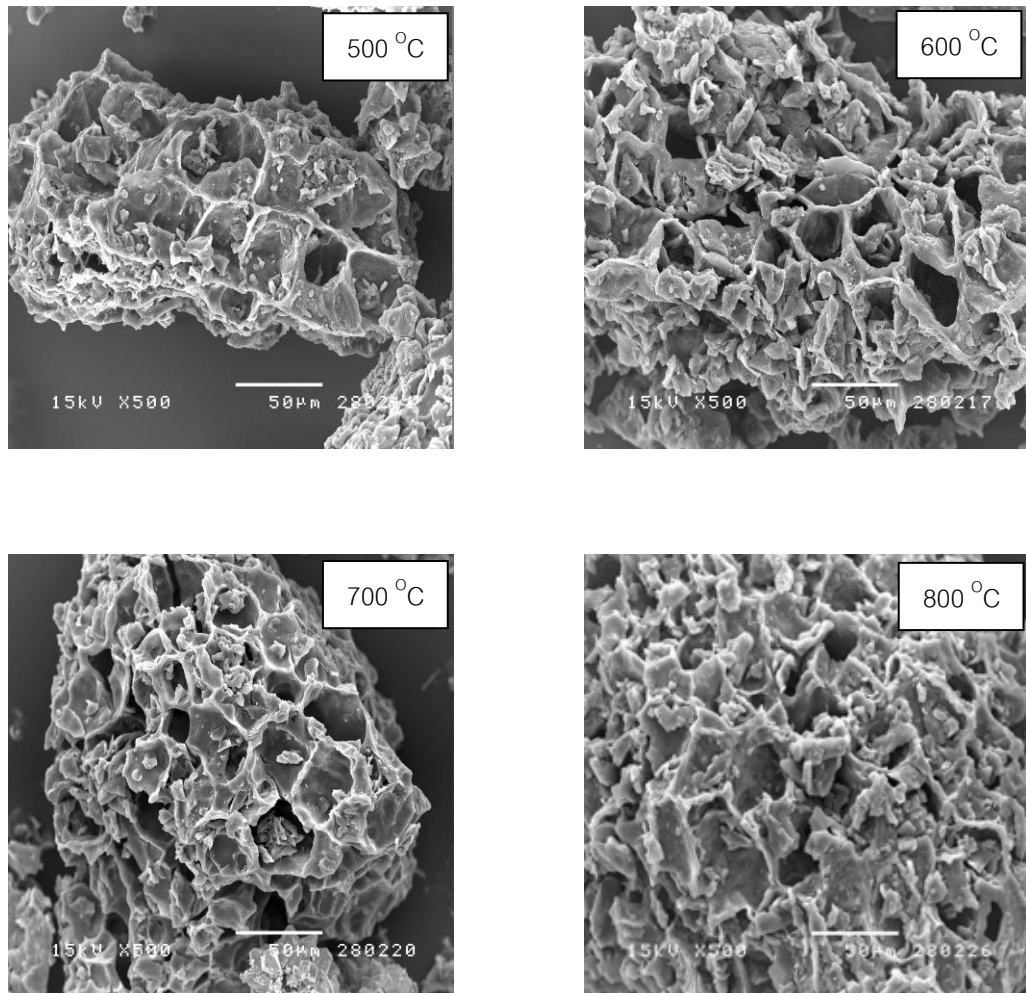
โดยศึกษาจากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) แสดงดังภาพที่ 4.5 - 4.7 ถ่านกากาแฟที่เผาที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวเกรดการค้า แสดงดังภาพที่ 4.8 - 4.9

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวภายนอกของกากกาแฟบ้านไร่กาแฟพันธุ์อะราบิกา ที่ผ่านการกระตุ้น และเผาที่อุณหภูมิ 500 600 700 และ 800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า ถ่านที่กระตุ้นด้วยสารกระตุ้นทั้ง 3 ชนิด มีลักษณะเป็นรูพรุนที่เด่นชัด ผนังของรูพรุนบางลง และมีความเป็นระเบียบมากขึ้น เมื่อเทียบกับถ่านที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น แสดงดังภาพที่ 4.8 แต่ถ่านที่กระตุ้นด้วย NaOH นั้น มีความแตกต่างจากถ่านที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 และ $ZnCl_2$ อย่างเห็นได้ชัด คือ ลักษณะพื้นผิวมีรูเล็กๆ คล้ายกับลักษณะของฟองน้ำ แสดงดังภาพที่ 4.9 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของไชยยันต์ ไชยยะ วราภรณ์ ธนะกุลรังสรรค์ และปทุมทิพย์ ตันทับทิมทอง (2550) ที่พบว่า พื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ผ่านกระตุ้นด้วย NaOH มีลักษณะเช่นเดียวกับภาพที่ 4.9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารกระตุ้นชนิดนี้ มีผลกระทบอย่างรุนแรงต่อผิวหน้าของถ่านกัมมันต์ และเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์เกรดการค้าแล้ว พบว่า รูพรุนของถ่านกัมมันต์เกรดการค้ามีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และมีความสม่ำเสมอมากกว่าถ่านที่ผลิตจากกากกาแฟ แสดงดังภาพที่ 4.9

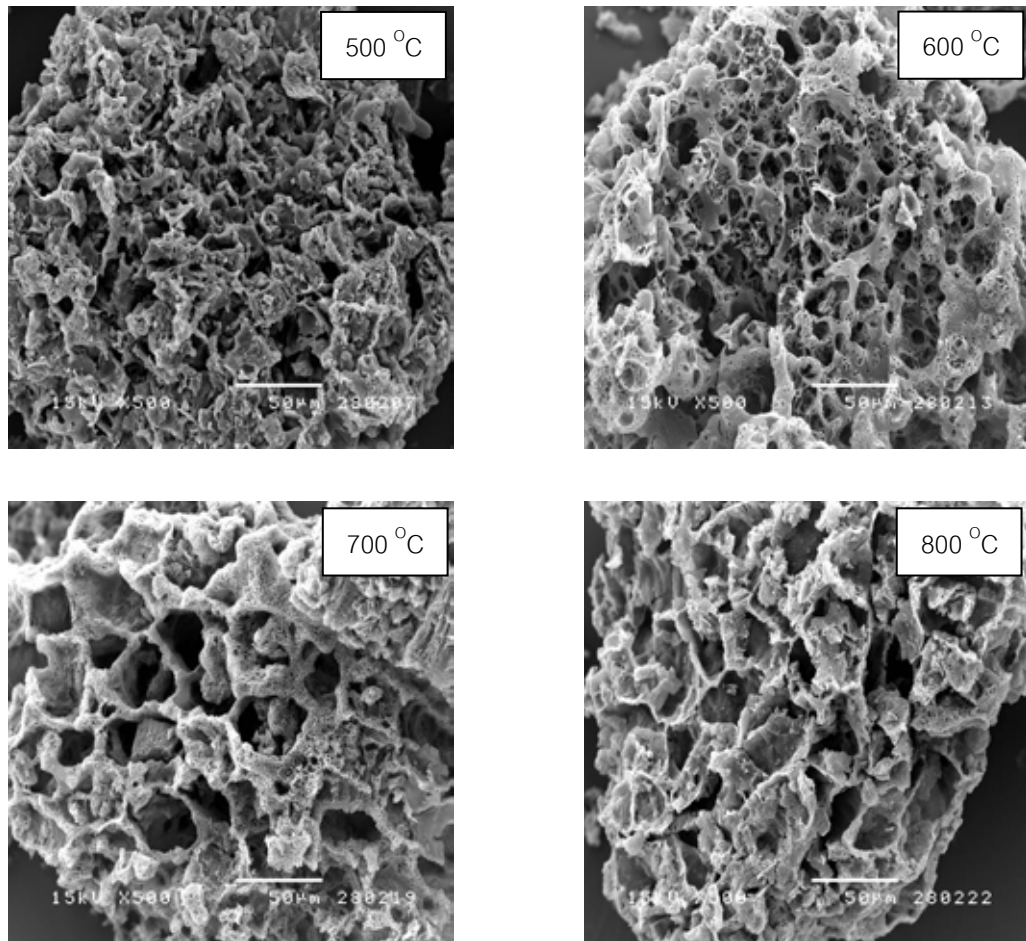
จากการศึกษาลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และความเป็นรูพรุนของถ่านจากกากกาแฟที่ผ่านการกระตุ้น และเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ยังไม่สามารถสรุปได้ว่า ถ่านจากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยสารกระตุ้นชนิดใดและที่อุณหภูมิใด มีความสามารถในการดูดซับดีที่สุด เพราะในขั้นตอนนี้เป็นเพียงการศึกษาเฉพาะลักษณะพื้นผิวภายนอกเท่านั้น ดังนั้น จึงต้องมีการทดสอบหาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ต่อไป



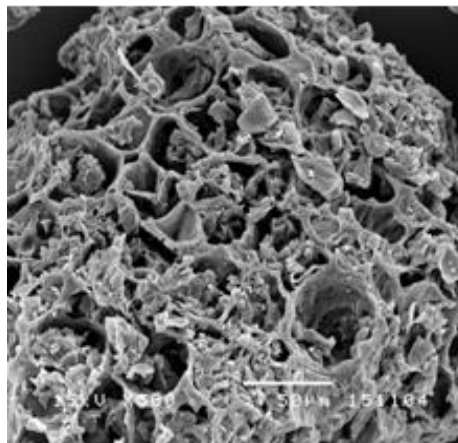
ภาพที่ 4.5 ลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และความเป็นรูพรุนของถ่านที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 และเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 500 เท่า



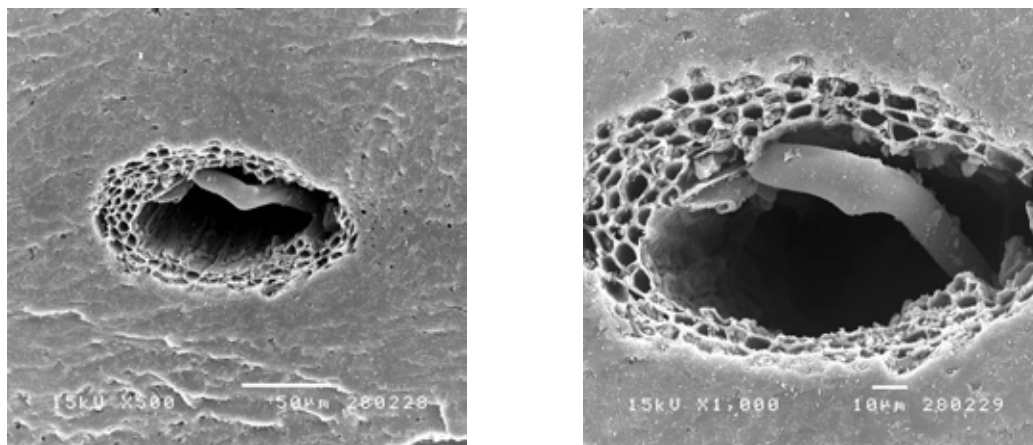
ภาพที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และความเป็นรูพรุนของถ่านที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 500 เท่า



ภาพที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และความเป็นรูพรุนของถ่านที่กระตุ้นด้วย NaOH และเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 500 เท่า



ภาพที่ 4.8 ลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และความเป็นรูพรุนของถ่านกากกาแฟก่อนการกระตุ้น ที่เผาที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 500 เท่า

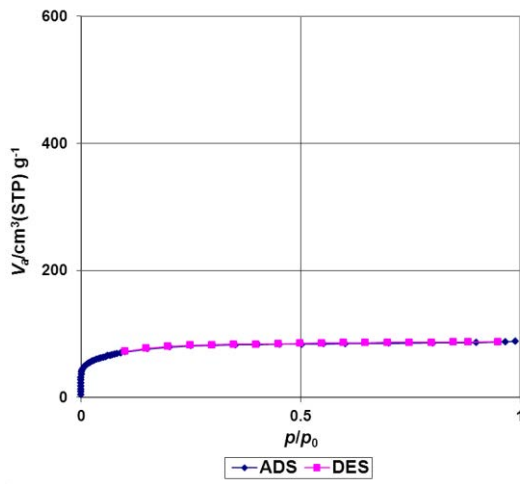


ภาพที่ 4.9 ลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เกรดการค้า ที่กำลังขยาย 500 และ 1,000 เท่า

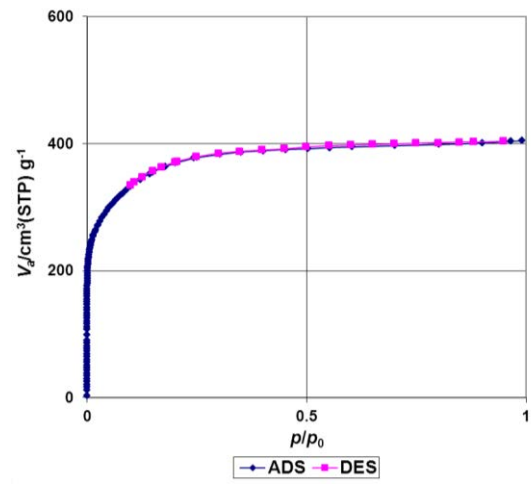
4.3.2 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟ และถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟ ที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 , $ZnCl_2$ และ $NaOH$ แล้วเผาที่อุณหภูมิ 500 600 700 และ 800 °C เป็น เวลา 1 ชั่วโมง และถ่านกัมมันต์เกรดการค้าด้วยเครื่อง Surface Area Analyzer

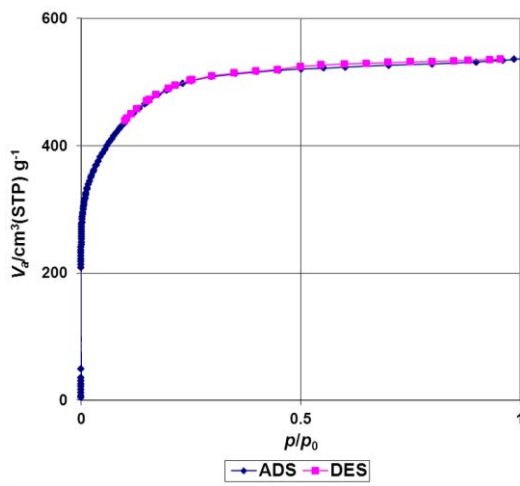
ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์ เป็นเส้นกราฟที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์กับความดันของก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 77 K โดย p/p_0 หมายถึง ความดันสัมพัทธ์ (relative pressure) เป็นความดันของสาร ถูกดูดซับ ณ จุดสมดุลของการดูดซับเทียบกับความดันมาตรฐาน ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4.10 - 4.13



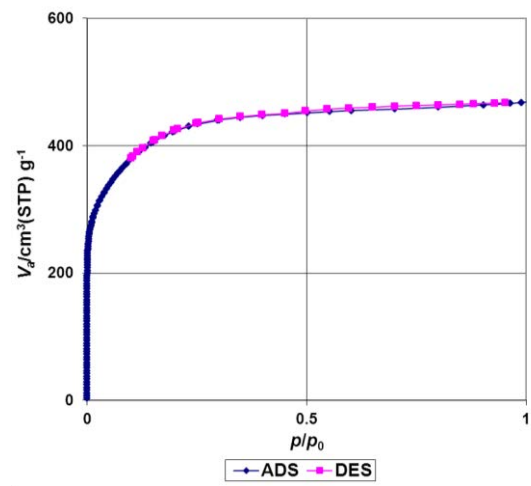
500 °C



600 °C

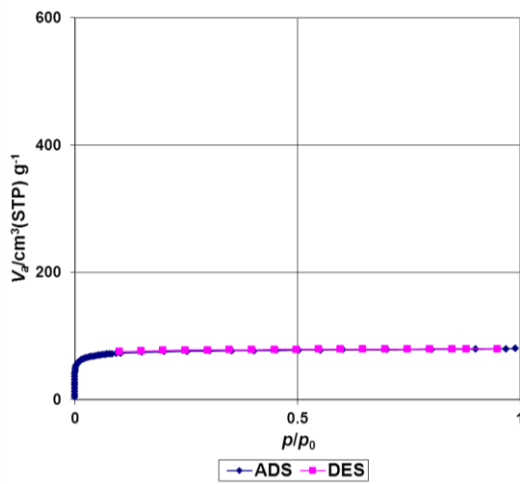


700 °C

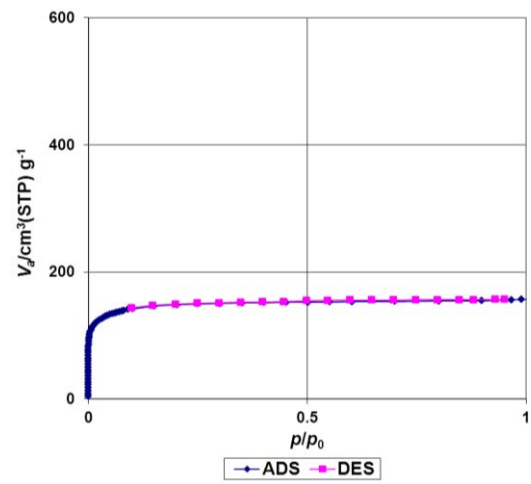


800 °C

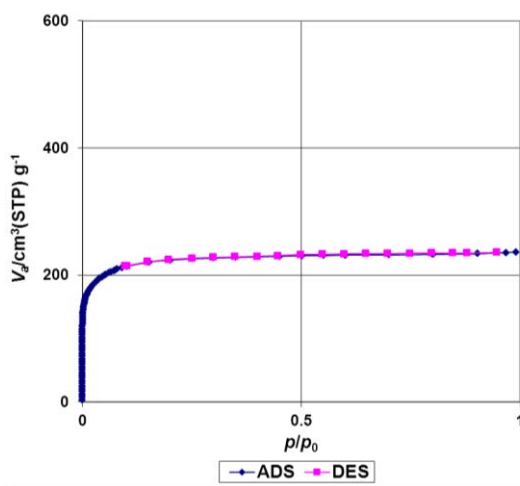
ภาพที่ 4.10 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K บนถ่านกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 500 600 700 และ 800 °C



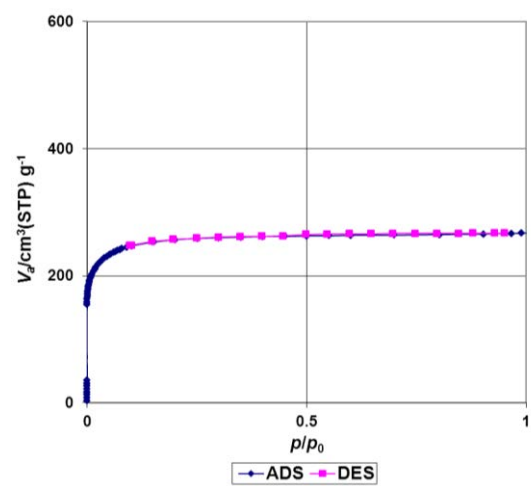
500 °C



600 °C

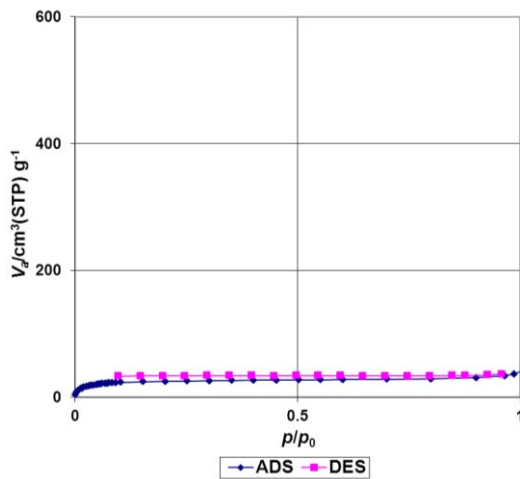


700 °C

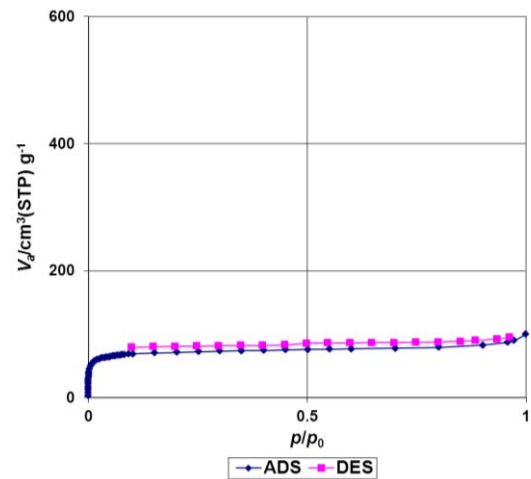


800 °C

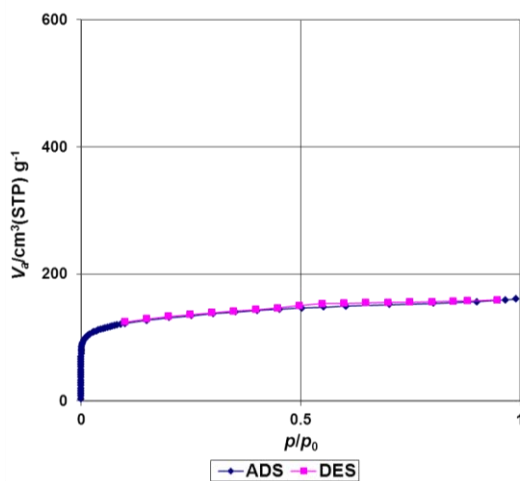
ภาพที่ 4.11 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K บนถ่านกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย ZnCl_2 ที่อุณหภูมิ 500 600 700 และ 800 °C



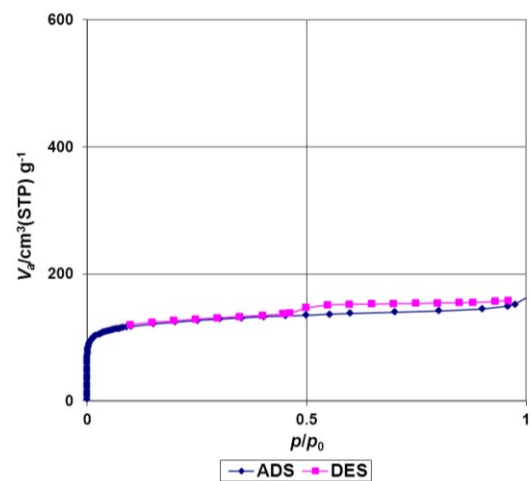
500 °C



600 °C

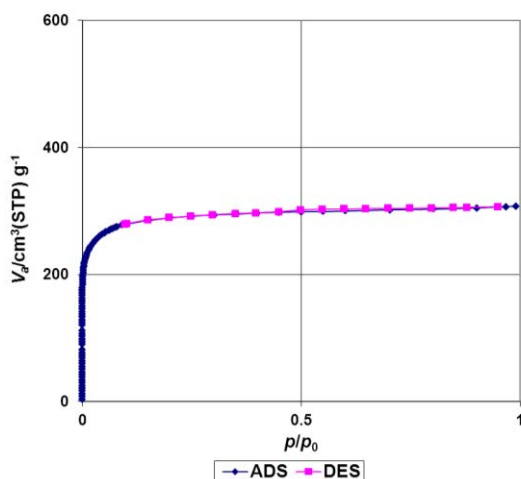


700 °C



800 °C

ภาพที่ 4.12 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K บนถ่านกากกาแพะที่กระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 500 600 700 และ 800 °C



ภาพที่ 4.13 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K บนถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

จากภาพที่ 4.10 - 4.13 แสดงให้เห็นถึงไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด คือ ถ่านกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 , ZnCl_2 และ NaOH ที่อุณหภูมิ 500 600 700 และ 800 °C เป็น เวลา 1 ชั่วโมง และถ่านกัมมันต์เกรดการค้า ซึ่งผลการศึกษาไอโซเทอมสามารถอธิบายได้ดังนี้

ไอโซเทอมของถ่านกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 , ZnCl_2 และ NaOH ที่อุณหภูมิ 500 600 700 และ 800 °C และถ่านกัมมันต์เกรดการค้า เป็นแบบเดียวกัน คือ ไอโซเทอมชนิดที่ 1 ตามข้อเสนองานของ Brunauer, Deming, Deming and Teller (BDDT) กล่าวคือ เมื่อความดันเพิ่มขึ้น จำนวนโมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเริ่มคงที่ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) นั้นเกิดเสรีจสมบรูณ์ แสดงว่าเป็นการดูดซับก๊าซบนถ่านกัมมันต์ที่ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก

ในการศึกษาครั้งนี้ลักษณะไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟมีความสอดคล้องงานวิจัยของ Nabais และคณะ (2008) ซึ่งทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K บนของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดกาแฟ (coffee endocarp) โดยการกระตุ้นด้วยก๊าซ CO_2 และไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 700 °C พบว่า เป็นไอโซเทอมชนิดที่ 1 นอกจากนี้ Nabais และคณะ (2011) ได้ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากเปลือกอัลมอนด์ ที่กระตุ้นโดยใช้ก๊าซ CO_2 ที่อุณหภูมิ 700 และ 800 °C พบว่า เป็นไอโซเทอมชนิดที่ 1 เช่นเดียวกัน และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของจิตตรี พละกุล (2552) ที่ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากแกลบ พบว่า ถ่านกัมมันต์จากแกลบที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 และ ZnCl_2 ที่อุณหภูมิ 350

$^{\circ}\text{C}$ เป็นไอโซเทอมชนิดที่ 1 ซึ่งการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดในงานวิจัยนี้ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว แสดงให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ผลิตได้ ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก

4.3.3 พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุน

จากการศึกษาไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด ทำให้สามารถวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน ได้จากสมการ BET ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Surface Area Analyzer ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.14

จากตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.14 พบว่า ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิวแบบ BET สูงที่สุด เท่ากับ $1,769\text{ m}^2/\text{g}$ แสดงให้เห็นว่า H_3PO_4 มีประสิทธิภาพในการกระตุ้นดีที่สุด ซึ่งพบว่ามีค่าสูงกว่างานวิจัยที่ผ่านมา ดังตารางที่ 4.5 คือ การกระตุ้นด้วย ZnCl_2 ควบคู่กับการใช้ CO_2 การกระตุ้นด้วย ZnCl_2 และ NaOH เพียงอย่างเดียวที่ให้พื้นที่ผิวแบบ BET เพียง $914\text{ m}^2/\text{g}$ (Virote Boonamnuayvitaya Srisuda Sae-ung และ Wiwut Tanthapanichakoon, 2005) $1,218.18\text{ m}^2/\text{g}$ (Katsiri Laowachirasuwan, 2009) และ $802\text{ m}^2/\text{g}$ (Chiravoot Pechyen และคณะ, 2010) ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะ H_3PO_4 จะทำหน้าที่แตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ได้ด้วยตัวเอง จึงเกิดการกัดกร่อน ทำให้ตัวดูดซับที่ได้มีความพรุนและมีพื้นที่ผิวมากขึ้น

ในขณะที่ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย ZnCl_2 NaOH ที่อุณหภูมิ 500 600 และ 700°C และถ่านกัมมันต์เกรดการค้า มีพื้นที่ผิวแบบ BET ต่ำกว่า คือ 833.79 477.61 และ $1,089\text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ โดยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย NaOH มีพื้นที่ผิวแบบ BET ต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวภายนอกที่ได้จากภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยถ่านที่กระตุ้นด้วย NaOH นั้น มีความแตกต่างจากถ่านที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 และ ZnCl_2 อย่างเห็นได้ชัด คือ ลักษณะพื้นผิวมีรูเล็กๆ คล้ายกับลักษณะของฟองน้ำ แสดงดังภาพที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่า NaOH มีผลกระทบอย่างรุนแรงต่อผิวหน้าของถ่านกัมมันต์ ทำให้ถ่านเกิดการเสียหาย จึงเป็นผลให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวแบบ BET น้อยที่สุด

นอกจากนี้ ยังพบว่าถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิวแบบ BET ใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากวัตถุดิบชนิดต่างๆ เช่น เศษไม้ยางพารา เปลือกทุเรียน และเมล็ดปาล์มน้ำมัน ซึ่งการนำไปใช้ประโยชน์ในการดูดซับมลสารในอากาศ เช่น VOCs Toluene NH_3 และ NO_2 ดังตารางที่ 4.6

ส่วนขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 0.7947 nm และ $0.7517\text{ cm}^3/g$ ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าถ่านที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ $NaOH$ และถ่านกัมมันต์เกรดการค้า ซึ่งขนาดรูพรุนที่ได้นั้นมีค่าน้อยกว่า 2 nm จึงจัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กตามระบบ IUPAC และพบว่าขนาดรูพรุนที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Boudrahem Benissad และ Amar (2009) คือ 0.772 nm ที่กระตุ้นถ่านจากกากกาแฟด้วย $ZnCl_2$ และผลการทดลองที่ได้ยังสอดคล้องกับผลไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K บนถ่านกัมมันต์ ที่แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้นั้นประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก

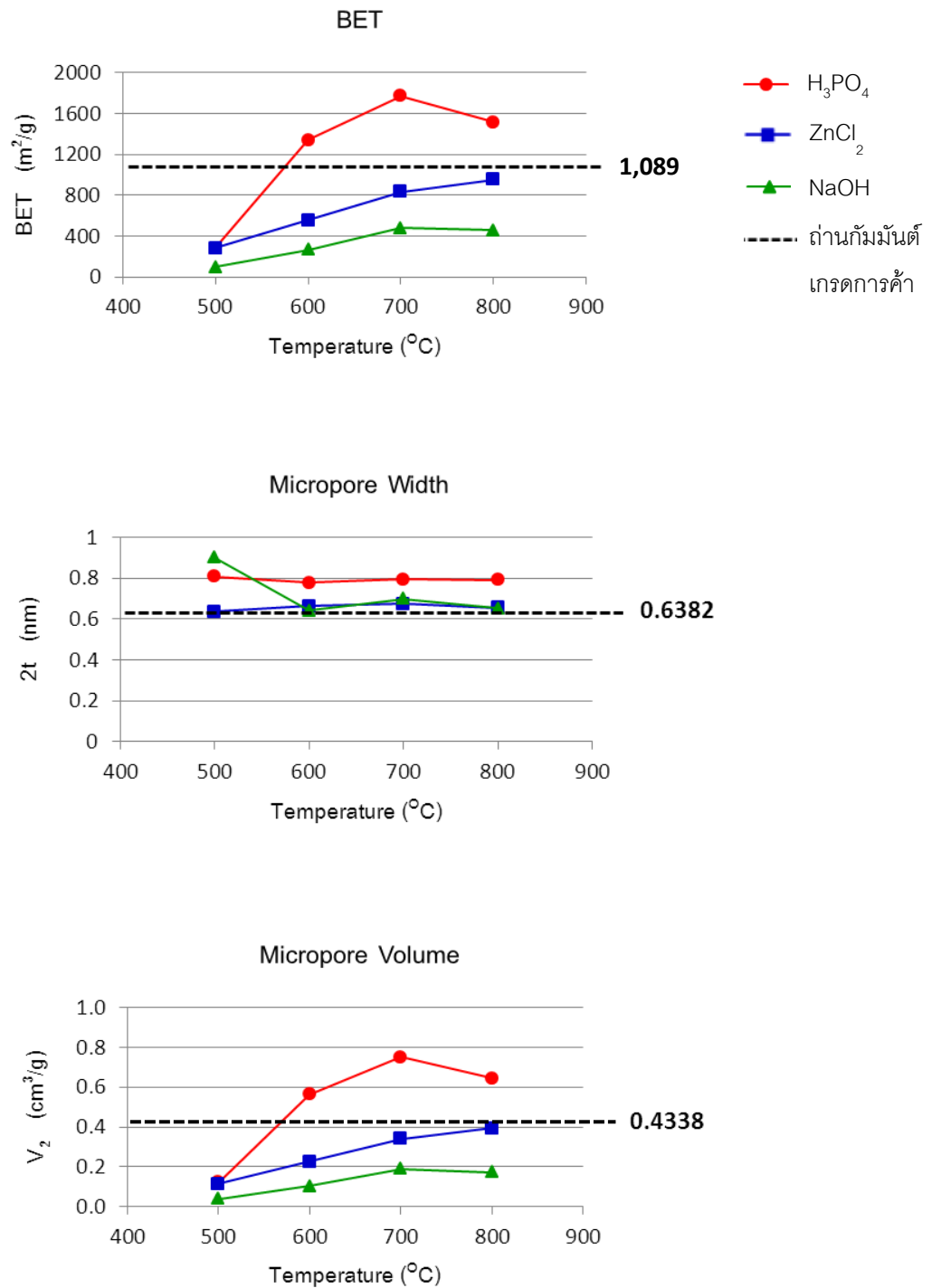
แม้ว่าขนาดรูพรุนของถ่านที่ได้จากการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 $ZnCl_2$ และ $NaOH$ ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ นั้น จะมีค่าแตกต่างกันไม่มาก แต่ถ่านกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 มีปริมาตรรูพรุนสูงที่สุด จึงส่งผลให้ถ่านที่ได้มีพื้นที่ผิวสูงด้วย ในขณะที่ถ่านกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และ $NaOH$ นั้น มีปริมาตรรูพรุนน้อย จึงส่งผลให้ถ่านมีพื้นที่ผิวน้อยด้วย ซึ่งขนาดรูพรุนนั้นมีความสอดคล้องกับจำนวนรูพรุนที่มาก ส่งผลให้ถ่านที่ได้มีพื้นที่ผิวสูงด้วย ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีของถ่านกัมมันต์

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสถิติ (Pearson's Correlation) ระหว่างพื้นที่ผิวแบบ BET ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน แสดงดังภาคผนวก ค (ตารางที่ ค-8) พบว่า พื้นที่ผิวแบบ BET มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาตรรูพรุนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ($r = 1.000$) หมายความว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงจะมีปริมาตรรูพรุนสูงไปด้วย

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า กระบวนการกระตุ้นทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวที่สูงขึ้น แสดงว่าสารเคมีที่ใช้มีประสิทธิภาพในการกระตุ้น ซึ่งการกระตุ้นโดยใช้สารดูดน้ำ (Dehydrating agent) เช่น $ZnCl_2$ และ H_3PO_4 จะทำให้โมเลกุลของน้ำหลุดออกจากเซลล์โลสและลิกนินที่เป็นส่วนประกอบในวัตถุดิบ การกระตุ้นที่อุณหภูมิเหมาะสมจะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีรูพรุนมาก เพราะสารกระตุ้นจะละลายน้ำมันดิน (Tar) ซึ่งถ่านกัมมันต์ดูดซับอยู่ออกไป นอกจากนี้ยังช่วยยับยั้งการเกิด Tar ในกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน และกระตุ้นการเกิดถ่านของคาร์บอนอีกด้วย (Hayashi และคณะ, 2000; Boudrahem และคณะ, 2009)

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์
จากกากกาแฟ และถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

สารกระตุ้น	อุณหภูมิในการ กระตุ้น ($^{\circ}\text{C}$)	ผลการทดสอบ		
		พื้นที่ผิวแบบ BET (m^2/g)	ขนาดรูพรุน (nm)	ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g)
H_3PO_4	500	284.49	0.8091	0.1229
	600	1,340.00	0.7775	0.5630
	700	1,769.00	0.7947	0.7517
	800	1,516.70	0.7927	0.6440
ZnCl_2	500	283.40	0.6363	0.1131
	600	552.48	0.6634	0.2250
	700	833.79	0.6747	0.3392
	800	953.81	0.6554	0.3939
NaOH	500	96.309	0.9013	0.0382
	600	267.73	0.6426	0.1019
	700	477.61	0.6984	0.1883
	800	458.52	0.6542	0.1733
ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า		1,089.00	0.6382	0.4338



ภาพที่ 4.14 พื้นที่ผิวแบบ BET (m²/g) ขนาดรูพรุน (nm) และปริมาตรรูพรุนสูง (cm³/g) ของถ่านกอกกาแพทที่ผ่านกระตุ้นด้วยสารชนิดต่างๆ และที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.5 ค่าพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่เตรียมในการศึกษานี้และการศึกษาที่ผ่านมา

ผลการศึกษา	พื้นที่ผิวแบบ BET (m ² /g)	ขนาดรูพรุน (nm)	ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)
<u>การศึกษานี้</u>			
H ₃ PO ₄ *	1,769.00	0.7947	0.7517
ZnCl ₂ *	833.79	0.6747	0.3392
NaOH*	477.61	0.6984	0.1883
ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า	1,089.00	0.6382	0.4338
<u>การศึกษาที่ผ่านมา</u>			
ZnCl ₂ + CO ₂ ⁽¹⁾	914.00	4.424	1.010
ZnCl ₂ ⁽²⁾	1,218.18	2.82	0.86
ZnCl ₂ ⁽³⁾	890.00	NA	0.772
NaOH ⁽⁴⁾	802.00	NA	0.80

หมายเหตุ: * คือ เผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 700 °C, ⁽¹⁾งานวิจัยของ Virote Boonamnuayvitaya และคณะ (2005),

⁽²⁾งานวิจัยของ Katsiri Laowachirasuwan (2009), ⁽³⁾งานวิจัย Boudrahem และคณะ (2009),

⁽⁴⁾งานวิจัยของ Chiravoot Pechyen และคณะ (2010) และ NA หมายถึง ไม่ปรากฏข้อมูล

ตารางที่ 4.6 ค่าพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบชนิดต่างๆ ที่มีการนำไปใช้ในการดูดซับมลสารในอากาศ

การทดสอบ	เศษไม้ยางพารา ⁽¹⁾ ดูดซับ VOCs	เปลือกทุเรียน ⁽²⁾ ดูดซับ Toluene	เมล็ดปาล์มน้ำมัน ⁽³⁾	
			ดูดซับ NH ₃	ดูดซับ NO ₂
	H ₃ PO ₄	H ₃ PO ₄	H ₃ PO ₄	KOH
พื้นที่ผิวแบบ BET (m ² /g)	1,635.65	1,404.00	1,563.00	1,408.00
ขนาดรูพรุน (nm)	2.541	NA	NA	NA
ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)	1.039	NA	1.03	0.77

หมายเหตุ: ⁽¹⁾งานวิจัยของ ปรีชญา ชัยสาร (2551), ⁽²⁾งานวิจัยของ Tham (2011), ⁽³⁾งานวิจัยของ Guo และ Lua (2000) และ NA หมายถึง ไม่ปรากฏข้อมูล

4.3.4 หมู่หน้าที่ (Functional groups) ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟ

จากการนำถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ให้ลักษณะสมบัติที่ดีที่สุด คือ ถ่านกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มาวิเคราะห์หมู่หน้าที่ (Functional groups) ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) เพื่อดูความหลากหลายของหมู่หน้าที่ที่ปรากฏบนผิวถ่านกัมมันต์ ผลการวิเคราะห์พบหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) ที่ $3,422\text{ cm}^{-1}$ และหมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่ $1,566\text{ cm}^{-1}$ เป็นหลัก ดังแสดงในภาคผนวก จ (ภาพที่ จ-1) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของไชยยันต์ ไชยยะ และคณะ (2550) ที่ศึกษาอิทธิพลของสารกระตุ้นที่มีต่อหมู่หน้าที่บนผิวถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และ $NaOH$ จากการทดลอง ถ่านที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ พบหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) ที่ $3,440\text{ cm}^{-1}$ และหมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่ $1,600\text{ cm}^{-1}$ เป็นหลักเช่นเดียวกัน ส่วนถ่านที่กระตุ้นด้วย $NaOH$ พบหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) ที่ $3,400\text{ cm}^{-1}$ และยังพบว่าที่ $1,560\text{ cm}^{-1}$ มีหมู่ COO-M ปรากฏอยู่ หมายถึง มีโลหะ Na ตกค้างอยู่ เป็นสาเหตุที่ทำให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยการกระตุ้นด้วย $NaOH$ มีค่าน้อย

นอกจากงานวิจัยที่ใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมีแล้ว ยังมีการศึกษาที่ใช้วิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วย ซึ่งจากงานวิจัยของ Nabais และคณะ (2008) พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดกาแฟ (coffee endocarp) โดยการกระตุ้นด้วยก๊าซ CO_2 และไอน้ำ พบความหลากหลายของหมู่หน้าที่ เช่น อีเทอร์ คิวโนน แล็กโตน คีโตน และไฮดรอกซิล นอกจากนี้ Nabais และคณะ (2011) ยังมีการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกอัลมอนด์ ที่กระตุ้นโดยใช้ก๊าซ CO_2 ผลจากการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR พบหมู่ไฮดรอกซิล อีเทอร์ เอสเทอร์ และแล็กโตน เป็นต้น

โดยทั่วไปผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขั้ว หรือมีขั้วเล็กน้อย เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นที่ผิวหน้าเสมอ หรือสารอินทรีย์ปริมาณเล็กน้อยที่เกาะอยู่บนพื้นผิว และการจัดเรียงตัวของอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนัล (Hexagonal) จึงทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับอื่นๆ และเนื่องจากถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวในรูพรุนมาก จึงทำให้สามารถดูดซับสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว หรือมีขั้วเพียงเล็กน้อยได้มากกว่าตัวดูดซับชนิดอื่นเช่นกัน โดยพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะมีอะตอมที่สามารถเกิดพันธะเคมีกับอะตอมอื่นๆ ได้ เช่น อะตอมของออกซิเจนและไฮโดรเจน ในกระบวนการกระตุ้นจะทำให้ธาตุเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการผลิต ทั้งในขั้นตอนการคาร์บอนเซชัน และการเกิดพันธะเคมีบนพื้นผิวในขั้นตอนการกระตุ้น การที่มีอะตอมของออกซิเจนและไฮโดรเจนนี้ส่งผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของถ่าน

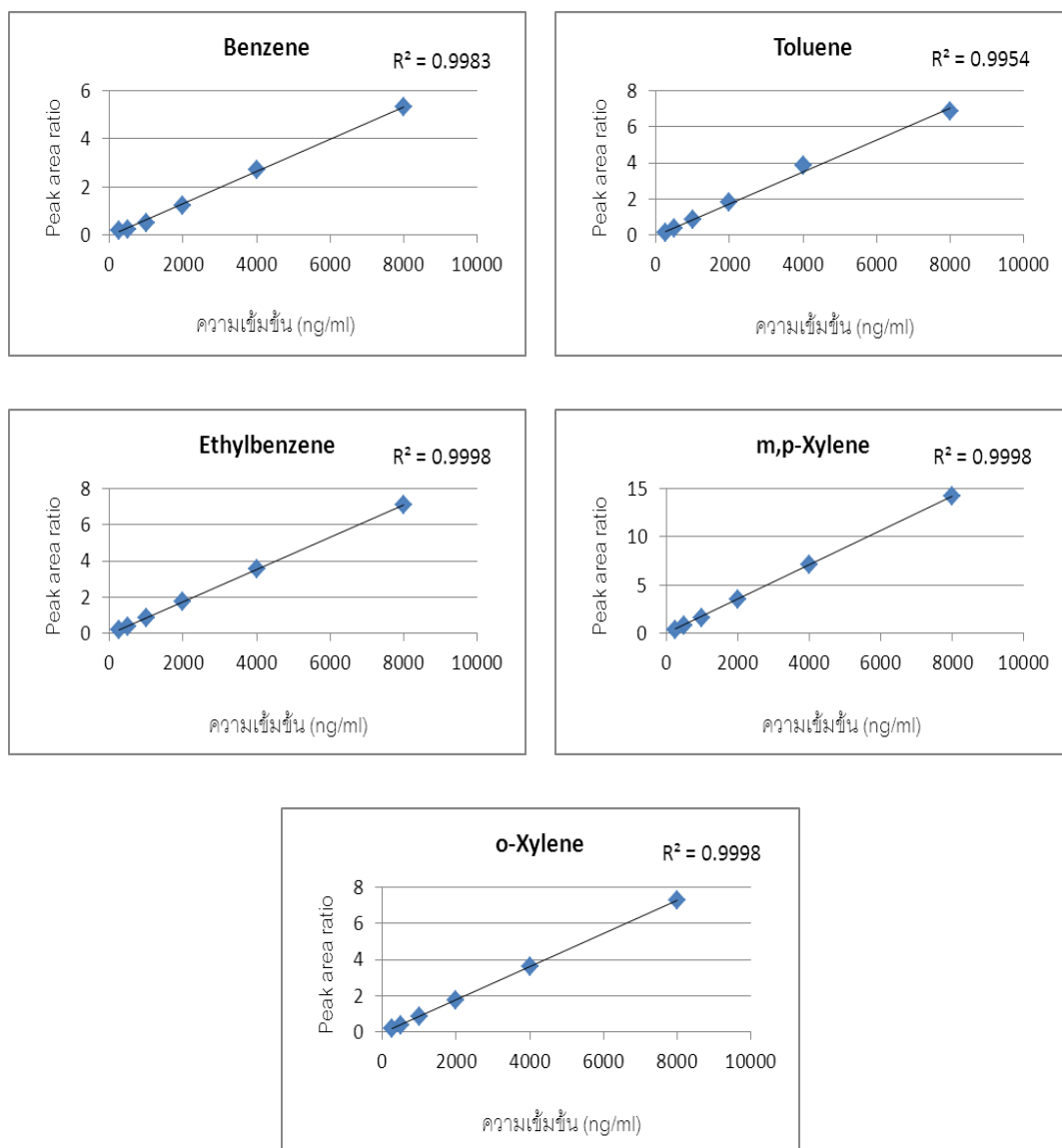
กัมมันต์ เนื่องจากอะตอมเหล่านี้เมื่อเกิดการรวมตัวกับอะตอมของคาร์บอนโดยเกิดพันธะเคมี จะเกิดเป็นกลุ่มฟังก์ชันนอล (Functional groups) บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ขึ้น

เมื่อพิจารณาหมู่ฟังก์ชันนอลที่บริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ พบว่า หมู่ฟังก์ชันนอลที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบมีความสำคัญมากที่สุด โดยพบว่า อะตอมของออกซิเจนจะสร้างพันธะกับอะตอมของคาร์บอน ซึ่งจะมีเป็นจำนวนมากที่บริเวณขอบของโมเลกุลคาร์บอนที่เกาะตัวเป็นอโรมาติก โดยพันธะระหว่าง O กับ H จะมีอิทธิพลมากที่สุดต่อลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ เช่น ความเป็นกรดที่บริเวณผิว การแลกเปลี่ยนไอออนบวก รวมถึงการดูดซับก๊าซ และโอที่มีขั้วและไม่มีขั้วได้ ซึ่งจากงานวิจัยของ Virote Boonamnuayvitaya และคณะ (2005) พบว่าผิวหน้าทางเคมีของถ่านกัมมันต์มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ลักษณะของพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมีบทบาทน้อยในการดูดซับ

4.4 กราฟมาตรฐาน BTEX และความเข้มข้นต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้

4.4.1 การสร้างกราฟมาตรฐาน BTEX

สร้าง Calibration curve ของสารละลายมาตรฐาน BTEX เพื่อใช้เป็นกราฟเปรียบเทียบการวิเคราะห์ตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง GC/FID รุ่น 6890N คอลัมน์ชนิด HP-5 ขนาด 30 m x 0.32 mm x 0.25 μm (19091J-413) และใช้ Nitrogen (N_2) Helium (He) Hydrogen (H_2) และ Air zero เป็น carrier gas ใช้สารละลายมาตรฐาน BTEX ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 6 ความเข้มข้น ดังนี้ 8,000 4,000 2,000 1,000 500 และ 250 ng/ml ซึ่งแต่ละความเข้มข้นจะมีสารละลายมาตรฐาน toluene-d8 (internal standard) ที่ความเข้มข้น 6,350 ng/ml รวมอยู่ด้วย ดังนั้นจึงนำ peak ที่ได้มาแสดงเป็น peak ratio และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง peak ratio ของสารละลายมาตรฐานต่อ internal standard ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของกราฟมาตรฐาน แสดงด้วยค่า R^2 ซึ่งค่า R^2 ของแต่ละสารสรุปได้ดังตารางที่ 4.7 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.9954 - 0.9998



ภาพที่ 4.15 Calibration curve ของสารละลายมาตรฐาน BTEX

ตารางที่ 4.7 ค่า R^2 ของสารละลายมาตรฐาน BTEX จากการสร้าง Calibration curve

สารประกอบ	R^2
Benzene	0.9983
Toluene	0.9954
Ethylbenzene	0.9998
m,p-Xylene	0.9998
o-Xylene	0.9998

4.4.2 ค่า Limit of detection (LOD) และ Limit of Quantification (LOQ) ของเครื่อง GC/FID ในการวิเคราะห์

จากการหาค่า Limit of detection (LOD) และ Limit of Quantification (LOQ) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาความเข้มข้นต่ำสุดที่เครื่อง GC/FID จะสามารถวิเคราะห์สารละลายมาตรฐาน BTEX ได้ ซึ่งค่า LOD และ LOQ คำนวณได้จากสมการที่ 3.6 - 3.8 (บทที่ 3) โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาร่วมกับ Mingkwan Kitwattanavong (2010) พบว่า สารละลายมาตรฐาน BTEX มีค่า LOQ อยู่ในช่วง 7.99 - 125.66 ng/ml ซึ่งสาร Benzene มีค่า LOQ ต่ำสุด และ o-Xylene มีค่า LOQ สูงสุด และค่า LOQ ที่แสดงในหน่วยของ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ คิดเทียบจากปริมาตรอากาศในงานวิจัยนี้คือ 0.003 m^3 ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่า LOD และ LOQ ของสารละลายมาตรฐาน BTEX

สารประกอบ	LOD		LOQ	
	ng/ml *	$\mu\text{g}/\text{m}^{3**}$	ng/ml *	$\mu\text{g}/\text{m}^{3**}$
Benzene	2.40	0.80	7.99	2.66
Toluene	27.14	9.05	90.48	30.16
Ethylbenzene	22.38	7.46	74.59	24.86
m,p-Xylene	3.80	1.27	12.65	4.22
o-Xylene	37.70	12.57	125.66	41.89

หมายเหตุ: * ศึกษาพร้อมกับ Mingkwan Kitwattanavong (2010), ** ขึ้นอยู่กับปริมาตรอากาศที่ศึกษา

4.5 ประสิทธิภาพการดูดซับสาร BTEX ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ

4.5.1 ชนิดและปริมาณสารอินทรีย์ระเหยก่อนผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ทำการทดสอบการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยจากแหล่งกำเนิดซึ่งได้แก่ สีทาภายในชนิดสีน้ำ โดยแบ่งเป็น ประเภทธรรมดา และประเภท Low VOCs ประเภทละ 3 ยี่ห้อ ปริมาตร 1 ml โดยปล่อยให้มีการระเหยของสารแหล่งกำเนิดจนอิ่มตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ $25 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยใช้ water bath แสดงดังภาพที่ 3.4 (บทที่ 3) จากนั้นทำการเก็บตัวอย่าง และนำมาทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/FID

การระบุชนิดของสารอินทรีย์ระเหยทำโดยการเปรียบเทียบค่า Retention time ของสารแต่ละชนิดกับสารละลายมาตรฐาน BTEX พบว่า สามารถระบุชนิดของสารอินทรีย์ระเหยในสี

ทากายในชนิดสีน้ำได้เพียง 2 ชนิด คือ Benzene และ Toluene ทั้งนี้เนื่องจากในสีทากายในชนิดสีน้ำมีน้ำเป็นตัวทำละลาย จึงทำให้พบสารอินทรีย์ระเหยเพียงไม่กี่ชนิด

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยในสีทากายในชนิดสีน้ำ ประเภทธรรมดา และประเภท Low VOCs ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ค (ตารางที่ ค-7 และ ค-8) ปริมาณ Benzene และ Toluene เฉลี่ยในสีทากายในชนิดสีน้ำแต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 4.9

ผลการทดลอง พบว่า ปริมาณ Benzene ในสีทากายในชนิดสีน้ำประเภทธรรมดา และประเภท Low VOCs นั้น มีแนวโน้มไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงดังภาพที่ 4.16 โดยสีทากายในชนิดสีน้ำประเภทธรรมดา มีปริมาณ Benzene เฉลี่ย $1,101.24 - 1,824.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และสีทากายในชนิดสีน้ำประเภท Low VOCs มีปริมาณ Benzene เฉลี่ย $582.34 - 1,911.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$

ส่วนปริมาณ Toluene เฉลี่ยในสีทากายในชนิดสีน้ำแต่ละชนิด พบว่า ในสีทากายในชนิดสีน้ำประเภท Low VOCs มีแนวโน้มต่ำกว่าสีทากายในชนิดสีน้ำประเภทธรรมดา แสดงดังภาพที่ 4.17 โดยสีทากายในชนิดสีน้ำประเภทธรรมดา มีปริมาณเฉลี่ย $597.96 - 11,052.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และสีทากายในชนิดสีน้ำประเภท Low VOCs มีปริมาณเฉลี่ย $30.16 \text{ (BLQ)} - 248.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ โดยปริมาณสารก่อนดูดซับในสีตัวอย่าง A(low) นั้น วิเคราะห์ไม่พบ Toluene (BLQ) เนื่องจากปริมาณของสารที่มีอยู่ในสีชนิดนี้อาจมีปริมาณต่ำกว่าค่า LOQ คือมีปริมาณต่ำกว่า $30.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$

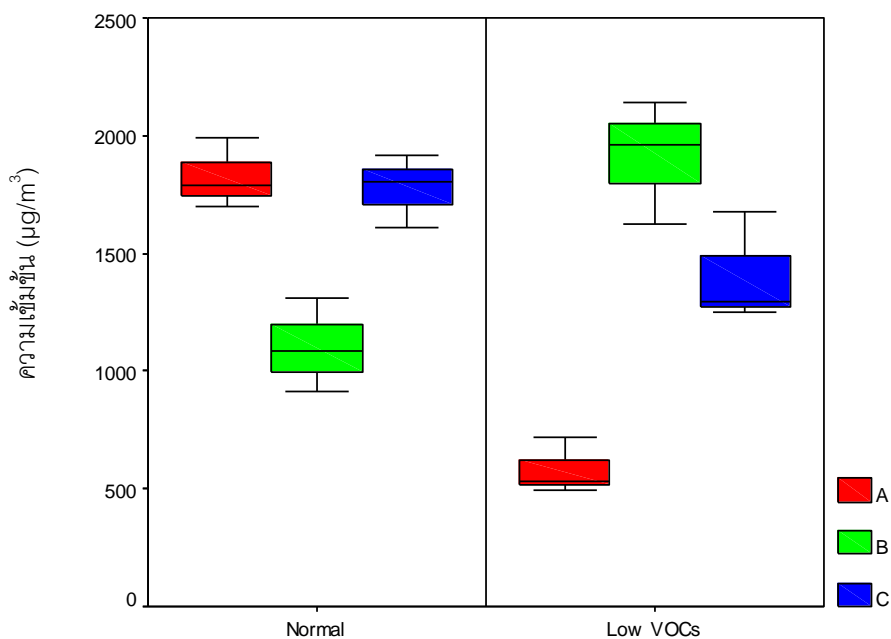
ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยเฉลี่ยในสีทากายในชนิดสีน้ำทั้ง 2 ประเภท แสดงดังตารางที่ 4.10 และผลการวิเคราะห์ปริมาณความแตกต่างของปริมาณ Benzene และ Toluene เฉลี่ยในสีทากายในชนิดสีน้ำประเภทธรรมดา และประเภท Low VOCs แสดงในภาคผนวก ง (ตารางที่ ง-9) พบว่า ทั้งปริมาณ Benzene เฉลี่ยในสีทากายในทั้ง 2 ประเภทนั้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่พบความแตกต่างของปริมาณ Toluene เฉลี่ยในสีทากายในทั้ง 2 ประเภทอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาสาร VOCs ในสิ่งแวดล้อมภายในอาคารของเมือง Mumbai ประเทศอินเดีย ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างด้วย Tedlar bag ที่ระดับความสูงจากพื้น 1.5 เมตร เป็นเวลา 30 นาที แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/FID พบว่า ห้องที่มีการทาสีใหม่ (ชนิดสีน้ำ) มีปริมาณ Benzene $48.56 - 397.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และ Toluene $136.80 - 265.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ นอกจากนี้ยังพบ Ethlybenzene ปริมาณ $0.87 - 9.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ p-Xylene $129.39 - 751.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และ o-Xylene $90.75 - 129.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Srivastava และคณะ, 2000) ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณสารอินทรีย์ระเหยที่วิเคราะห์ได้นั้นมีปริมาณต่ำกว่าปริมาณที่วิเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ทำการเก็บตัวอย่างที่แหล่งกำเนิดโดยตรง จึงทำให้ปริมาณของสารที่วิเคราะห์ได้สูงกว่า

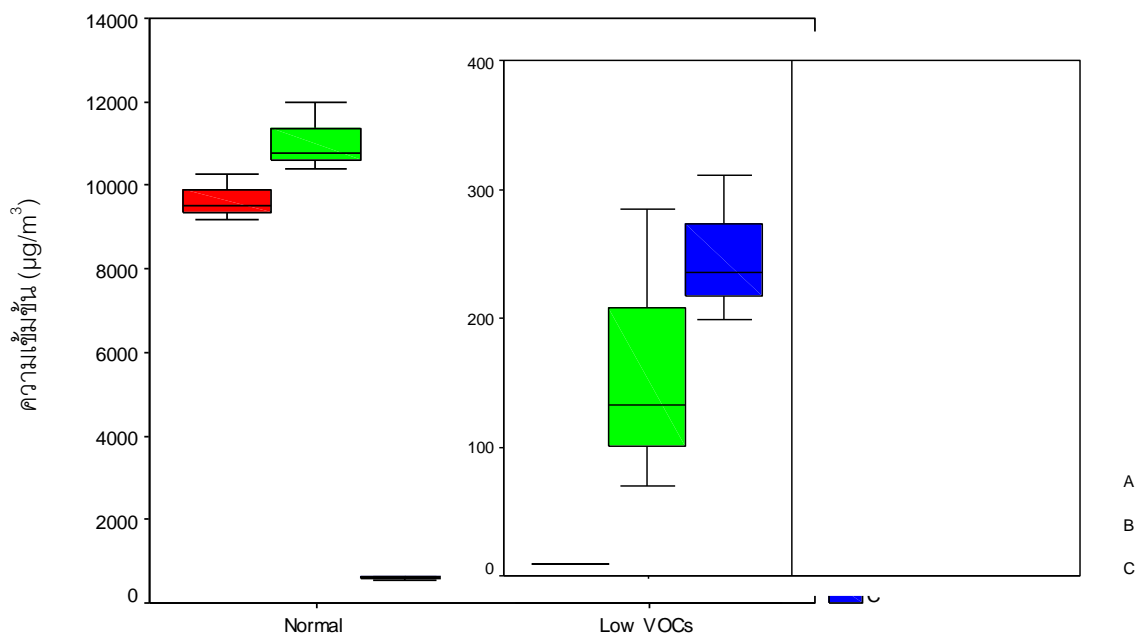
ตารางที่ 4.9 ปริมาณ Benzene และ Toluene เฉลี่ยในสีทาภายในชนิดสีน้ำแต่ละชนิด

ชนิดสี	ปริมาณ Benzene เฉลี่ย \pm SD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		ปริมาณ Toluene เฉลี่ย \pm SD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	ปริมาณสารก่อนผ่านการดูดซับ	ปริมาณสารที่เหลืออยู่หลังการดูดซับ	ปริมาณสารก่อนผ่านการดูดซับ	ปริมาณสารที่เหลืออยู่หลังการดูดซับ
A	1,824.47 \pm 148.05	924.94 \pm 104.98	9,661.89 \pm 546.58	BLQ
B	1,101.24 \pm 199.59	BLQ	11,052.94 \pm 813.80	8,395.23 \pm 602.53
C	1,777.30 \pm 154.00	266.85 \pm 42.24	597.96 \pm 60.14	395.97 \pm 75.34
A (low)	582.34 \pm 117.52	269.59 \pm 63.11	BLQ	BLQ
B (low)	1,911.01 \pm 262.03	122.77 \pm 27.39	161.97 \pm 110.31	BLQ
C (low)	1,407.54 \pm 236.48	201.12 \pm 73.05	248.41 \pm 57.00	BLQ

หมายเหตุ: BLQ (Below Limit of Quantification) หมายถึง ค่าที่ได้ต่ำกว่าค่า LOQ คือ $2.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ สำหรับ Benzene และ $30.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ สำหรับ Toluene



ภาพที่ 4.16 ปริมาณ Benzene ในสีทาภายในชนิดสีน้ำ (ประเภทธรรมดา และประเภท Low VOCs)



ภาพที่ 4.17 ปริมาณ Toluene ในสีทาภายในชนิดสีน้ำ (ประเภทธรรมดา และประเภท Low VOCs)

ตารางที่ 4.10 ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยเฉลี่ยในสีทาภายในชนิดสีน้ำทั้ง 2 ประเภท

สารประกอบ	ปริมาณเฉลี่ย \pm SD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	สีประเภทธรรมดา	สีประเภท Low VOC
Benzene	1,567.67 \pm 379.68 ^a	1,300.30 \pm 609.98 ^a
Toluene	7,104.26 \pm 4,941.23 ^a	205.19 \pm 91.70 ^b

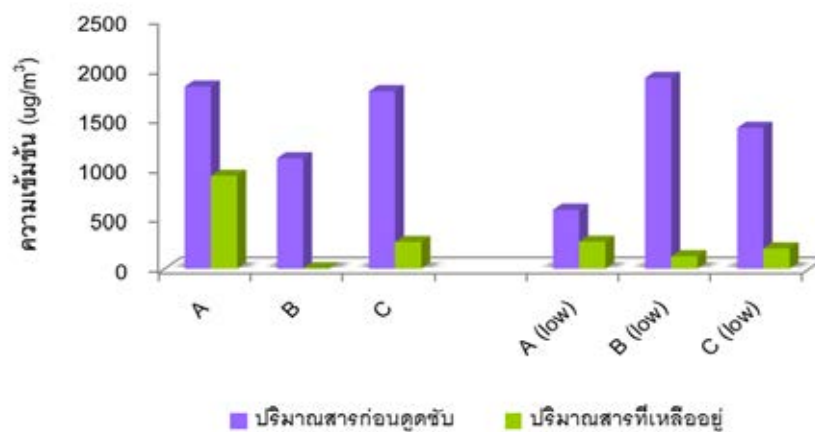
หมายเหตุ: ตัวอักษรหมวขาวด้านบนที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.5.2 ชนิดและปริมาณของสารอินทรีย์ระเหยหลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

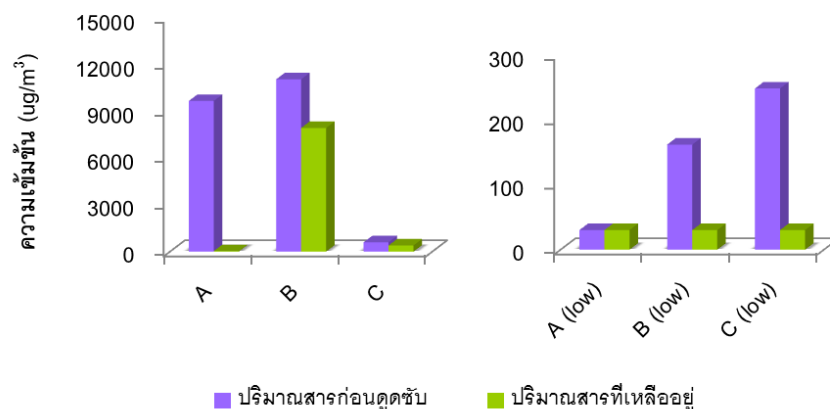
ปริมาณสารที่เหลืออยู่หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแพที่ผลิตได้นั้น แสดงดังตารางที่ 4.9 พบว่า ปริมาณ Benzene และ Toluene ที่เหลืออยู่ในสีทาภายในชนิดสีน้ำ ประเภทธรรมดา และประเภท Low VOCs มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงดังภาพที่ 4.18 - 4.19 โดยสีทาภายในประเภทธรรมดา มีปริมาณ Benzene เหลืออยู่เฉลี่ย 2.66 (BLQ) - 924.94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ โดยวิเคราะห์ไม่พบปริมาณ Benzene ในสีตัวอย่าง B เป็นเพราะปริมาณของสารที่มีอยู่ใน

สีอาจมีปริมาณต่ำกว่าค่า LOQ คือต่ำกว่า $2.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และสีทากายในประเภท Low VOCs มีปริมาณ Benzene เหลืออยู่เฉลี่ย $122.77 - 269.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$

ส่วนปริมาณ Toluene นั้น พบว่า สีทากายในประเภทธรรมดา มีปริมาณ Toluene เหลืออยู่เฉลี่ย $30.16 \text{ (BLQ)} - 8,395.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ โดยวิเคราะห์ไม่พบปริมาณ Toluene ในสีตัวอย่าง A และประเภท Low VOCs วิเคราะห์ไม่พบ Toluene ในสีตัวอย่าง A(low) B(low) และ C(low) การที่วิเคราะห์ไม่พบปริมาณสารนั้น เนื่องจากปริมาณของสารที่มีอยู่ในสีอาจมีปริมาณต่ำกว่าค่า LOQ คือมีปริมาณต่ำกว่า $30.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$



ภาพที่ 4.18 ความสามารถในการดูดซับ Benzene ในสีทากายในชนิดสีน้ำ (ประเภทธรรมดา และประเภท Low VOCs)



ภาพที่ 4.19 ความสามารถในการดูดซับ Toluene ในสีทากายในชนิดสีน้ำ (ประเภทธรรมดา และประเภท Low VOCs)

4.5.3 ประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยของถ่านกัมมันต์

การศึกษาครั้งนี้ เป็นการทดลองที่เก็บตัวอย่างอากาศในเวลา 30 นาที โดยควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ดังนั้นปริมาณการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยที่คำนวณได้ จึงคิดเทียบกับปริมาตรอากาศที่ 0.003 m^3

ปริมาณการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยบนถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ผลิตได้ โดยพิจารณาการดูดซับสารต่อถ่านกัมมันต์ 1 กรัม แสดงดังตารางที่ 4.11 พบว่า ปริมาณการดูดซับ Benzene ในสีทาภายในชนิดสีน้ำประเภทธรรมดาสูงสุดเท่ากับ $1.10 \pm 0.04 \text{ } \mu\text{g/g}$ และปริมาณการดูดซับ Benzene ในสีทาภายในชนิดสีน้ำประเภท Low VOCs สูงสุดเท่ากับ $1.09 \pm 0.15 \text{ } \mu\text{g/g}$

ส่วนปริมาณการดูดซับ Toluene ในสีทาภายในชนิดสีน้ำประเภทธรรมดาสูงสุดเท่ากับ $6.15 \pm 0.41 \text{ } \mu\text{g/g}$ และปริมาณการดูดซับ Toluene ในสีทาภายในชนิดสีน้ำประเภท Low VOCs สูงสุดเท่ากับ $0.14 \pm 0.04 \text{ } \mu\text{g/g}$

ผลการเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยเฉลี่ยบนถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ แสดงดังตารางที่ 4.12 พบว่า ทั้งปริมาณ Benzene และ Toluene ที่มีในสีทาภายในชนิดสีน้ำประเภทธรรมดา และประเภท Low VOCs ที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ 1 กรัม นั้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงในภาคผนวก ง (ตารางที่ ง-10) จากผลการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของสารอินทรีย์ระเหยที่มีอยู่ในสีต่างประเภทกัน ไม่ว่าจะมีความมากหรือน้อยก็ไม่มีผลต่อการดูดซับบนถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ผลิตได้ เมื่อนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพในการการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย พบว่า ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟมีประสิทธิภาพในการดูดซับ Benzene ต่ำสุดเท่ากับ 50.49% และสูงสุดเท่ากับ 99.76% ส่วนประสิทธิภาพในการดูดซับ Toluene นั้น ต่ำสุดเท่ากับ 27.83% และสูงสุดเท่ากับ 99.71% แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.11 ปริมาณการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยบนถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟของสีทาภายในชนิดสีน้ำ

ชนิดสี	ปริมาณการดูดซับเฉลี่ย \pm SD ($\mu\text{g/g}$)	
	Benzene	Toluene
A	0.59 ± 0.05	6.15 ± 0.41
B	0.69 ± 0.13	1.94 ± 0.19
C	1.10 ± 0.04	0.15 ± 0.08
A (low)	0.20 ± 0.06	-
B (low)	1.09 ± 0.15	0.09 ± 0.07
C (low)	0.72 ± 0.16	0.14 ± 0.04

หมายเหตุ: - หมายถึง ไม่สามารถระบุได้เนื่องจากวิเคราะห์ไม่พบปริมาณ Toluene ในตัวอย่าง ทั้งก่อนและหลังผ่านการดูดซับ

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยเฉลี่ยบนถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ ในสีทาภายในชนิดสีน้ำทั้ง 2 ประเภท

สารประกอบ	ปริมาณการดูดซับเฉลี่ย \pm SD ($\mu\text{g/g}$)	
	สีประเภทธรรมดา	สีประเภท Low VOC
Benzene	0.76 ± 0.20^a	2.74 ± 2.67^a
Toluene	2.75 ± 2.68^a	0.11 ± 0.06^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรมุมขวาด้านบนที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.13 ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟในการการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยในสีทาภายในชนิดสีน้ำ

ชนิดสี	ประสิทธิภาพการดูดซับต่อถ่าน 1 กรัม (%)	
	Benzene	Toluene
A	50.49	99.71
B	99.76	27.83
C	85.96	37.44
A (low)	53.79	-
B (low)	93.39	74.62
C (low)	85.59	87.34

หมายเหตุ: - หมายถึง ไม่สามารถระบุได้เนื่องจากวิเคราะห์ไม่พบปริมาณ Toluene ในตัวอย่าง ทั้งก่อนและหลังผ่านการดูดซับ

4.6 ประสิทธิภาพการดูดซับของกากกาแฟ ถ่านกากกาแฟที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น และ ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่เผากระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$

จากผลการทดสอบการดูดซับโดยใช้สีทาภายในชนิดสีน้ำดังกล่าวข้างต้น ซึ่งให้เห็นว่าสีทาภายในชนิดสีน้ำนั้น มีชนิดและปริมาณของสารอินทรีย์ระเหยน้อย ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ชัดเจนขึ้นในผลของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยระหว่างวัสดุที่เป็นกากกาแฟและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ในขั้นตอนนี้จึงเลือกสีทาภายในชนิดสีน้ำมันมาใช้ในการทดสอบ โดยทำการทดลองเช่นเดียวกันและเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างกากกาแฟ ถ่านกากกาแฟที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น (เผา $400\text{ }^{\circ}C$) และถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่เผากระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$

4.6.1 ชนิดของสารอินทรีย์ระเหย

การระบุชนิดของสารอินทรีย์ระเหยทำโดยการเปรียบเทียบค่า Retention time ของสารแต่ละชนิดกับสารละลายมาตรฐาน BTEX พบว่า สีทาภายในชนิดสีน้ำมัน พบสารอินทรีย์ระเหยทั้ง 4 ชนิด คือ Benzene Toluene Ethylbenzene และ Xylene ซึ่งแบ่งเป็น m,p-Xylene และ o-Xylene เนื่องจากในสีทาภายในชนิดสีน้ำมันนั้น มีทินเนอร์เป็นตัวทำละลาย ซึ่งทินเนอร์ถือเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสารระเหยเป็นส่วนประกอบ ตามพระราชกำหนดป้องกันการใช้สารระเหย

พ.ศ.2533 มาตรา 31 (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2533) จึงเป็นสาเหตุให้ในสีทาภายในชนิดสีน้ำมันพบชนิดของสารอินทรีย์ระเหยมากกว่าในสีทาภายในชนิดสีน้ำซึ่งมีน้ำเป็นตัวทำละลาย

4.6.2 ประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสาร BTEX แสดงดังตารางที่ 4.14 พบว่า ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่เผากระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ มีประสิทธิภาพ 95 - 100% ถ่านกากกาแฟที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น (เผา $400\text{ }^{\circ}C$) มีประสิทธิภาพ 30.19 - 98.04% และกากกาแฟมีประสิทธิภาพ 12.21 - 82.49% จะเห็นได้ว่า ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่เผากระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ชุดการทดลองที่ดีที่สุดที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์นั้นมีประสิทธิภาพดีที่สุดในการดูดซับ BTEX ในสีทาภายในชนิดสีน้ำมัน

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า กากกาแฟมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารบางชนิดแตกต่างกับถ่านกากกาแฟที่ยังไม่ผ่านกระตุ้น (เผา $400\text{ }^{\circ}C$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เช่น Benzene และ Toluene แต่ไม่พบความแตกต่างในการดูดซับ Ethylbenzene m,p-Xylene และ o-Xylene อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่เผากระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ พบว่า กากกาแฟมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารทุกชนิดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ส่วนประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกากกาแฟที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น (เผา $400\text{ }^{\circ}C$) กับถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่เผากระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ พบว่า การดูดซับสารบางชนิดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เช่น Toluene Ethylbenzene และ m,p-Xylene และ o-Xylene แต่พบความแตกต่างในการดูดซับ Benzene อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสาร BTEX ทั้งหมด (Total BTEX) ที่พบในสีทาภายในชนิดสีน้ำมัน พบว่า กากกาแฟ ถ่านกากกาแฟที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น (เผา $400\text{ }^{\circ}C$) และถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่เผากระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ มีประสิทธิภาพในการดูดซับแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากตารางที่ 4.14 จะเห็นได้ว่า ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่เผากระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ มีประสิทธิภาพในการดูดซับสาร BTEX สูงที่สุดเท่ากับ 97.65% รองลงมาเป็นถ่านกากกาแฟที่ยังไม่ผ่านกระตุ้น (เผา $400\text{ }^{\circ}C$) และกากกาแฟ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 80.06% และ 61.27% ตามลำดับ

ทั้งนี้เนื่องจากการคาร์บอนในเซชัน หรือการทำให้เป็นถ่านเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของโครงสร้างที่เป็นรูพรุน โดยจะทำให้สารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ถูกไล่ออกมาในรูปแบบของก๊าซ ส่วนคาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันเป็นผลึก ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่านชาร์ (Char) แต่ถ่านชาร์ที่ได้จากขั้นตอนคาร์บอนในเซชันนี้ ยังคงมีความสามารถในการดูดซับต่ำ เพราะยังคงมีน้ำมันดิน (Tar) ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง หรือเกาะอยู่ตามผิวของถ่าน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ โดยกระบวนการกระตุ้นจะช่วยให้การเกาะกันของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่นกลายเป็นพันธะเคมีที่แข็งแรง ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารต่างๆ มากขึ้น

ตารางที่ 4.14 ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟในการดูดซับ BTEX ในสีทาภายในชนิดสีน้ำมัน

สารประกอบ	ประสิทธิภาพการดูดซับต่อถ่าน 1 กรัม (%)		
	กากกาแฟ	ถ่านที่ยังไม่กระตุ้น (เผา 400 °C)	ถ่านที่กระตุ้นแล้ว (H ₃ PO ₄)
Benzene	12.21 ^a	30.19 ^b	95.15 ^c
Toluene	59.16 ^a	98.04 ^b	98.39 ^b
Ethylbenzene	74.30 ^a	91.66 ^{ab}	99 ^b
m,p-Xylene	78.18 ^a	91.63 ^{ab}	100 ^b
o-Xylene	82.49 ^a	88.76 ^{ab}	95 ^b
Total BTEX	61.27 ^a	80.06 ^b	97.65 ^c

หมายเหตุ: ตัวอักษรมุมขวาด้านบนที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

อย่างไรก็ตาม การทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับสาร BTEX ในงานวิจัยนี้ใช้แหล่งกำเนิดที่เป็นสีทาภายในอาคาร จึงทำให้ไม่สามารถควบคุมชนิดของสารอินทรีย์ระเหยทั้งในเชิงปริมาณและองค์ประกอบได้ ซึ่งสีทาภายในอาคารที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดนั้น อาจมีสารประกอบอื่นๆ

เป็นองค์ประกอบนอกเหนือจากสาร BTEX ซึ่งอาจจะรบกวนกระบวนการดูดซับระหว่างสารในกลุ่ม BTEX กับตัวดูดซับในระบบการทดลองได้

จากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า กากกาแพที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์นั้นมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญถึงร้อยละ 65.50 ± 3.02 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านกากกาแพที่ได้ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงที่สุดคือ $300.56 \pm 5.11\text{ mg/g}$ และเมื่อนำมาเผากระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ในอัตราส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวแบบ BET สูงที่สุดเท่ากับ $1,769\text{ m}^2/\text{g}$ ซึ่งมีความมากกว่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้า จากการนำถ่านกัมมันต์จากกากกาแพที่ผลิตได้มาทดสอบการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยในสีทาภายในอาคารชนิดสีน้ำ พบว่า มีประสิทธิภาพในการดูดซับ Benzene และ Toluene สูงถึง 99.76% และ 99.71% ตามลำดับ และจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสารบีเทครวม (Total BTEX) ที่พบในสีทาภายในชนิดสีน้ำมันถ่านกัมมันต์จากกากกาแพที่ผลิตได้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุดเท่ากับ 97.65%

ความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยของถ่านกัมมันต์จากกากกาแพในการศึกษา นี้ นอกจากลักษณะทางกายภาพที่ดีแล้ว ยังเป็นผลมาจากหมู่หน้าที่ที่ปรากฏบนผิวหน้าถ่านกัมมันต์ อันได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล (O-H) และหมู่คาร์บอนิล (C=O) ซึ่งจากงานวิจัยของ Virote Boonamnuayvitaya และคณะ (2005) ได้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของหมู่หน้าที่ที่ปรากฏบนผิวถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยซึ่งทดสอบกับสารฟอร์มัลดีไฮด์ โดยพบว่า ถ่านกัมมันต์จากกากกาแพที่กระตุ้นด้วย ZnCl_2 มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์สูงที่สุด ซึ่งประสิทธิภาพการดูดซับสารมีความเกี่ยวข้องกับหมู่หน้าที่ที่ปรากฏบนผิวหน้าถ่านกัมมันต์อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการปรากฏของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) หมู่คาร์บอนิล (C=O) และหมู่คีโตน (C-O)

จากผลดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่า กากกาแพเหลือทิ้งเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำมาสร้างมูลค่าเพิ่ม โดยการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่าย เพราะในเชิงพาณิชย์ราคาถ่านกัมมันต์นั้นค่อนข้างสูง จึงถูกจำกัดการใช้งานอยู่แค่เพียงบางกลุ่มเท่านั้น การใช้ถ่านกัมมันต์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสม เกิดการตกค้างในสิ่งแวดล้อมต่ำ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการดูดซับสารมลพิษทางอากาศได้

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของกาแฟที่นำมาใช้ศึกษาและการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคารชนิดที่สำคัญ ได้แก่ Benzene Toluene Ethylbenzene และ Xylene (m,p-Xylene และ o-Xylene) ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากกาแฟ สามารถสรุปผลการทดลองดังนี้

1) เฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุดในตัวอย่างกาแฟ โดยพบมากในกาแฟบ้านไร่กาแฟพันธุ์อะราบิกา คิดเป็นร้อยละ 90.80 โดยน้ำหนัก รองลงมา คือ เซลลูโลส และลิกนินตามลำดับ

2) คาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักในกาแฟคิดเป็นร้อยละ 65.50 ± 3.02 โดยน้ำหนัก รองลงมาคือ ไฮโดรเจน และไนโตรเจนร้อยละ 7.42 ± 0.14 และ 3.85 ± 0.05 โดยน้ำหนัก ตามลำดับผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ปริมาณองค์ประกอบของคาร์บอนในกาแฟทั้งพันธุ์อะราบิกา และพันธุ์โรบัสตา ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3) สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ คือ การคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงที่สุดคือ $300.56 \pm 5.11\text{ mg/g}$ ค่า R^2 ที่ได้ยังมีค่าเข้าใกล้ 1 คือ 0.9934 - 0.9969 จากนั้นเผากระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ในอัตราส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวแบบ BET สูงที่สุดเท่ากับ $1,769\text{ m}^2/\text{g}$ แสดงให้เห็นว่า H_3PO_4 มีประสิทธิภาพในการกระตุ้นดีที่สุด ส่วนขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟยังมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 0.7947 nm และ $0.7517\text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าถ่านที่กระตุ้นด้วย ZnCl_2 NaOH และถ่านกัมมันต์เกรดการค้า และขนาดรูพรุนที่ได้นั้นมีค่าน้อยกว่า 2 nm จึงจัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กตามระบบ IUPAC

4) ไอโซเทอมของถ่านกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ และถ่านกัมมันต์เกรดการค้าเป็นแบบเดียวกัน คือ ไอโซเทอมชนิดที่ 1 ตามข้อเสนอของ Brunauer, Deming, Deming and Teller (BDDT) แสดงให้เห็นว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) ซึ่งเป็นการดูดซับก๊าซบนถ่านกัมมันต์ที่ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก

5) หมู่หน้าที่ (Functional groups) ที่ปรากฏบนถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) และหมู่คาร์บอนิล (C=O) เป็นหลัก

6) ปริมาณของสารอินทรีย์ระเหยที่วิเคราะห์ได้ในสีทาภายในอาคารชนิดสีน้ำประเภทธรรมดา และประเภท Low VOCs นั้น มีปริมาณ Benzene ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยสีทาภายในอาคารชนิดสีน้ำประเภทธรรมดา มีปริมาณ Benzene เฉลี่ย $1,101.24 - 1,824.47\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ และสีประเภท Low VOCs มีปริมาณเฉลี่ย $582.34 - 1,911.01\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ส่วนปริมาณ Toluene ในสีทาภายในอาคารชนิดสีน้ำประเภท Low VOCs มีแนวโน้มต่ำกว่าสีประเภทธรรมดา โดยสีทาภายในอาคารชนิดสีน้ำประเภทธรรมดา มีปริมาณเฉลี่ย $597.96 - 11,052.94\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ และประเภท Low VOCs มีปริมาณเฉลี่ย $30.16\text{ (BLQ)} - 248.41\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ปริมาณ Benzene เฉลี่ยในสีทาภายในทั้ง 2 ประเภทนั้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่พบความแตกต่างของปริมาณ Toluene เฉลี่ยในสีทาภายในทั้ง 2 ประเภทอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

7) ปริมาณการดูดซับ Benzene ในสีทาภายในชนิดสีน้ำประเภทธรรมดา และประเภท Low VOCs สูงสุดเท่ากับ $1.10 \pm 0.04\text{ }\mu\text{g}/\text{g}$ และ $1.09 \pm 0.15\text{ }\mu\text{g}/\text{g}$ ตามลำดับ ส่วนปริมาณการดูดซับ Toluene ในสีทาภายในชนิดสีน้ำประเภทธรรมดา และประเภท Low VOCs สูงสุดเท่ากับ $6.15 \pm 0.41\text{ }\mu\text{g}/\text{g}$ และ $0.14 \pm 0.04\text{ }\mu\text{g}/\text{g}$ ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยเฉลี่ยบนถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ พบว่า ทั้งปริมาณ Benzene และ Toluene ที่มีในสีทาภายในชนิดสีน้ำประเภทธรรมดา และประเภท Low VOCs ที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ 1 กรัม นั้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

8) ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ผลิตได้ในการการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยในสีทาภายในชนิดสีน้ำประเภทธรรมดา และประเภท Low VOCs พบว่า ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟมีประสิทธิภาพในการดูดซับ Benzene ต่ำสุด 50.49% และสูงสุด 99.76% ส่วนประสิทธิภาพในการดูดซับ Toluene นั้น ต่ำสุด 27.83% และสูงสุด 99.71%

9) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารบีเทครวม (Total BTEX) ที่พบในสีทาภายในอาคารชนิดสีน้ำมัน โดยใช้กากกาแฟ ถ่านกากกาแฟที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น (เผา $400\text{ }^{\circ}C$) และถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่เผากระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ ผลการเปรียบเทียบ พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่เผากระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุด เท่ากับ

97.65% รองลงมาเป็นถ่านกากกาแฟที่ยังไม่ผ่านกระตุ้น (เผา 400 °C) เท่ากับ 80.06% และกากกาแฟ เท่ากับ 61.27%

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการกระตุ้น เช่น อัตราส่วนในการกระตุ้น ระยะเวลาในการกระตุ้น และสารกระตุ้นชนิดอื่น

2) ควรศึกษาเปรียบเทียบการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี

3) ควรศึกษาการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยจากผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในอาคารประเภทอื่นๆ

4) ควรนำผลการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการไปวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการดูดซับสารมลพิษภายในอาคารจริง

5) ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์นั้นนอกจากการนำวัตถุดิบมาคาร์บอนไนเซชันก่อนทำการกระตุ้นแล้ว ยังสามารถนำวัตถุดิบไปทำการกระตุ้นก่อนแล้วจึงนำมาคาร์บอนไนเซชันได้

6) เนื่องจากในงานวิจัยได้ออกแบบให้ใช้สีทาภายในเป็นแหล่งกำเนิดของสารระเหยในกลุ่ม BTEX จึงไม่สามารถควบคุมชนิดของสารอินทรีย์ระเหยทั้งในเชิงปริมาณและองค์ประกอบได้ ดังนั้น ในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสาร Benzene Toluene Ethylbenzene และ Xylene (m,p-Xylene และ o-Xylene) ของถ่านกัมมันต์ ควรศึกษาเพิ่มเติมโดยทดสอบกับสารมาตรฐานที่มีสารเพียงชนิดเดียวในระบบ ซึ่งจะทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับสารแต่ละชนิดได้อย่างแท้จริงและเปรียบเทียบได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรรชิต คุณวฑูฒติ. 2544. คู่มือการวินิจฉัยและการเฝ้าระวังโรคจากการประกอบอาชีพ. กรุงเทพมหานคร : กองอาชีวอนามัย กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข.
- การค้าภายใน, กรม. 2551. สถานการณ์กาแพ่เดือนพฤษภาคม 2551. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: http://agri.dit.go.th/web_dit_sec6/admin/uploadfiles/multi_files/cof0551.pdf. [10 ธันวาคม 2551]
- เกศรา นุตาลัย และคณะ. 2531. รายงานการวิจัยการผลิตถ่านกัมมันต์จากดินพรุในห้องปฏิบัติการ. รายงานฉบับที่ 1 โครงการวิจัยที่ ภ30-14 โครงการวิจัยและพัฒนาดินพรุเพื่อประโยชน์ทางอุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
- คณะกรรมการอาหารและยา, สำนักงาน. 2533. วัตถุเสพติด. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.fda.moph.go.th/fda-net/html/product/addict/narcotics2/Inhalants.html> [5 มกราคม 2554]
- จักริน นักรไ้. 2549. การกำจัดสีจากน้ำชะมูลฝอยโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จิตตรี พละกุล. 2552. การดูดซับไ้ระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากแกลบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไชยยันต์ ไชยยะ, วราภรณ์ ธนะกุลรังสรรค์ และปทุมทิพย์ ต้นทับทิมทอง. 2550. โครงการวิจัยเรื่องอิทธิพลของสารกระตุ้นที่มีต่อหนู่น้ำที่ และประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแพ่. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล.
- ซีพีเอฟ เอสเอสอี ออฟฟิส. 2552. Sick building Syndrome [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://cpfshe.cportal.net/article/tabid/121/articleType/ArticleView/articleId/67/Sick-building-Syndrome.aspx> [28 กันยายน 2552]
- นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิตา ตั้งคณานุรักษ์. 2550. หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- ประสงค์ คุณานุกัณณ์ชัยเดช และไมตรี สุทธิจิตต์. 2544. สารอินทรีย์ระเหยง่ายในสิ่งแวดล้อม. พิษวิทยาสาร 11, 4: 25-30.
- ประสงค์ คุณานุกัณณ์ชัยเดช และไมตรี สุทธิจิตต์. 2545. สารอินทรีย์ระเหยง่ายในสิ่งแวดล้อม. พิษวิทยาสาร 12, 1: 41-46.
- ปรีชญา ชัยสาร. 2551. การพัฒนาตัวดูดซับเพื่อศึกษาการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยใน โรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพารา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พรชกร ใจประดับเพชร. 2549. การกำจัดแคดเมียมและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไพลิน ทวีวงศ์. 2551. การรับสัมผัสสารประกอบอินทรีย์ระเหยจากสถานีบริการน้ำมันเชื้อเพลิงใน กรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภัทรินถน นุชสาย. 2547. ขนาดรูพรุนที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด สำหรับการปรับปรุง คุณภาพน้ำทิ้งของกระบวนการซักกรีด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มลิวรรณ บุญเสนอ. 2544. พิษวิทยาสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร : กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.
- มานพ ตีระรัตนสมโภช. 2545. การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ลลิตา นิต์สนจากรุกุล. 2544. การกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดซับผิว โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์. 2543. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส *Eucalyptus Camaldulensis* Dehnh. โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อน ยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กระทรวง. 2551. ถ่านกัมมันต์[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.tistr.or.th/t/publication/page_area_show_bc.asp?i1=77&i2=18[10 ธันวาคม 2551]
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ. 2543. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ : ทฤษฎีและหลักการ
ทำงานเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สาวิตรี พูลมา. 2548. การรับสัมผัสสารอินทรีย์ระเหยจากสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัยในเขต
กรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุเจนี๋ย์ คุ่มเสงี่ยม. 2544. การกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ถ่าน
กัมมันต์จากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชา
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2547. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์. กรุงเทพมหานคร:
สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.

ภาษาอังกฤษ

- Biniak, S., Swiatkowski, A., and Pakula, M. 2001. Electrochemical Studies of Phenomena at Active Carbon-Electrolyte Solution Interfaces. In Radovic, L., R. (ed.). Chemistry and Physics of Carbon, pp.128-130. United States of America: Marcel Dekker.
- Boonamnuayvitaya, V., Sae-ung, S., and Tanthapanichakoon, W. 2005. Preparation of activated carbons from coffee residue for the adsorption of formaldehyde. Separation and Purification Technology 42: 159-168.
- Boudrahem, F., Benissad, F. A., and Amar, H. A. 2009. Batch sorption dynamics and equilibrium for the removal of lead ions from aqueous phase using activated carbon developed from coffee residue activated with zinc chloride. Journal of Environmental Management 90: 3031-3039.
- Daud, W. M. A. W., and Ali, W. S. W. 2004. Comparison on pore development of activated carbon produced from palm shell and coconut shell. Bioresource Technology. 93: 63-69.

- Guo, J., and Lua, A. C. 2000. Effect of surface chemistry on gas-phase adsorption by activated carbon prepared from oil-palm stone with pre-impregnation. Separation and Purification Technology 18: 47-55.
- Harper, M. 2000. Sorbent trapping of volatile organic compounds from air. Journal of chromatography 885: 129-151.
- Hassler, J. W. 1974. Purification with Activated Carbon. New York: Chemical Publishing.
- Hayashi, J., Kazehaya, A., Muroyama, K., and Watkinson, A. P. 2000. Preparation of activated carbon from lignin by chemical activation. Carbon 38: 1873-1878.
- Ilgen, E., et al. 2001. Aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment-Part II: univariate and multivariate analysis and case studies of indoor concentrations. Atmospheric Environment 35: 1253-1264.
- Kitwattanavong, M. 2010. Inhalation Exposure to Carbonyl Compounds and BTEX and Health Risk Assessment of Gas Station Workers in Bangkok Metropolitan. Master's Thesis Program in Environmental Management Graduate School Chulalongkorn University.
- Laowachirasuwan, K. 2009. Preparation and Characteristics of Activated Carbons from Coffee Residue by Chemical Activation Method. University of the Thai Chamber of Commerce Journal 29: 116-131.
- Marsh, H., and Rodriguez-Reinoso, F. 2006. Activated Carbon. Great Britain: Charon Tec.
- Nabais, J. M. V. et al. 2008. Production of activated carbons from coffee endocarp by CO₂ and steam activation. Fuel Processing Technology 89: 262-268.
- Nabais, J. M. V., Laginhas, C. E. C., Carrott, P. J. M., and Carrott, M. M. L. R. 2011. Production of activated carbons from almond shell. Fuel Processing Technology 92: 234-240.
- NIOSH Manual of Analytical Methods. 2003. HYDROCARBONS, AROMATIC 1501 [Online]. Available from: www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/1501.pdf [2011, September 15]

- Pechyen, C., Aht-Ong, D., Sricharoenchaikul, V., and Atong, D. 2010. Optimization of Manufacturing Condition for Activated Carbon from coffee (*Coffea Arabica* L.) Bean Waste by Chemical Activation. Materials Science Forum 658: 113-116.
- Radovic, L. R., and Rodríguez-Reinoso, F. 1997. Carbon Material in Catalysis. In Thrower, P., A. (ed.), Chemistry and Physics of Carbon, p.254. United States of America: Marcel Dekker.
- Srivastava, P. R., Pandit, G. G., Sharma, S., and Rao, A. M. M. 2000. Volatile organic compounds in indoor environments in Mumbai, India. The Science of the Total Environment 255: 161-168.
- Tham, Y. J., Latif, P. A., Abdullah, A. M., Shamala-Devi, A., and Taufiq-Yap, Y. H. 2011. Performances of toluene removal by activated carbon derived from durian shell. Bioresource Technology 102: 724-728.
- Wikimedia. 2009. Amorphous Carbon[Online]. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Amorphous_Carbon.png[2009, April 2]

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM D 4607 - 94

ภาคผนวก ก

1. การเตรียมสารละลาย

- สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (5% โดยน้ำหนัก)

เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 70 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น 550 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

- สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (0.100 N)

ละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 24.820 กรัม ในน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มให้เดือด 75 ± 25 มิลลิลิตร เติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) 0.10 ± 0.01 กรัม ถ่ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรทั้งหมดเป็น 1000 มิลลิลิตร เก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดสีชา และทิ้งไว้อย่างน้อย 4 วัน ก่อนทำการเทียบมาตรฐานสารละลาย

- สารละลายมาตรฐานไอโอดีน (0.100 \pm 0.001 N)

ชั่งไอโอดีน 12.700 กรัม และโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 19.100 กรัม ผสมให้เข้ากันในปิកเกอร์ เติมน้ำ 2 - 5 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน แล้วค่อยๆ เติมน้ำทีละน้อย (ครั้งละประมาณ 5 มิลลิลิตร) จนกระทั่งปริมาตรทั้งหมด เป็น 50 - 60 มิลลิลิตร ตั้งสารละลายทิ้งไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมง แล้วคนเป็นระยะเพื่อให้ละลายหมด ถ่ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรทั้งหมด เป็น 1000 มิลลิลิตร เก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดสีชา และทิ้งไว้อย่างน้อย 4 วัน ก่อนทำการเทียบมาตรฐานสารละลาย

- สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (0.1000 N)

อบโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3) ที่ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์ จากนั้นละลายโพแทสเซียมไอโอเดต 3.5667 ± 0.1 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ถ่ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรทั้งหมด เป็น 1000 มิลลิลิตร

- สารละลายแป้ง

ผสมแป้ง 1.0 ± 0.5 กรัม ในน้ำเย็น 5 - 10 มิลลิลิตร คนสารละลายให้เข้ากัน แล้วเติมน้ำกลั่นเพิ่มอีก 25 ± 5 มิลลิลิตร จากนั้นเทสารละลายลงในน้ำเดือด 1 ลิตร แล้วต้มต่อจนเดือด 4 - 5 นาที น้ำแป้งควรเตรียมวันต่อวันเท่านั้น

2. การเทียบมาตรฐานสารละลาย

- การเทียบมาตรฐานสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.100 N

ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3) 25.0 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วเติมโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2.00 ± 0.01 กรัม เขย่าจนละลาย จากนั้นปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วไทเทรตต่อด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต จนกระทั่งสารละลายเป็นสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแบ่ง 2 - 3 หยด แล้วไทเทรตต่อจนสารละลายไม่มีสี คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ดังสมการที่ 1

$$N_1 = (P \cdot R) / S \quad (1)$$

โดย	N_1	=	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (N)
	P	=	ปริมาตรสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (ml)
	R	=	ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (N)
	S	=	ปริมาตรสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ (ml)

- การเทียบมาตรฐานสารละลายไอโอดีน 0.100 \pm 0.001 N

ปิเปตสารละลายไอโอดีน 25.0 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต จนกระทั่งสารละลายไอโอดีนเป็นสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแบ่ง 2 - 3 หยด แล้วไทเทรตต่อจนสารละลายไม่มีสี คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน ดังสมการที่ 2

$$N_2 = (S \cdot N_1) / I \quad (2)$$

โดย	N_2	=	ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (N)
	S	=	ปริมาตรสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ (ml)
	N_1	=	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (N)
	I	=	ปริมาตรสารละลายไอโอดีน (ml)

3. วิธีการวิเคราะห์

- บดถ่านกัมมันต์ที่จะวิเคราะห์ให้ละเอียดจนสามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 mesh ได้ 60% โดยน้ำหนัก และผ่านตะแกรงเบอร์ 100 mesh ได้ 95% โดยน้ำหนัก

- อบถ่านกัมมันต์ให้แห้งที่อุณหภูมิ 145 - 155 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ (ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 2867)

- กำหนดค่าไอโอดีนนมเบอร์ที่ต้องการ เพื่อนำไปคำนวณค่าน้ำหนักถ่าน (carbon dosage) ที่จะใช้ในการทดลอง 3 ค่า โดยใช้สมการที่ 3 หลังจากประมาณค่าน้ำหนักถ่านแล้วชั่งถ่านที่อบแห้งแล้วตามน้ำหนักที่คำนวณได้ ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีจุกแก้วปิด ขนาด 250 มิลลิลิตร

- ปิเปตสารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ ปิดจุกแล้วเขย่าเบาๆ จนกระทั่งถ่านเปียกทั่ว เปิดฝาแล้วนำไปตั้งบน hot plate ในตู้ดูดควัน ทิ้งให้เดือดเป็นเวลา 30 ± 2 วินาที เพื่อไล่ซัลเฟอร์ในตัวอย่าง นำขวดรูปชมพู่ออกจาก hot plate แล้วทิ้งให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง

- ปิเปตสารละลายไอโอดีน 0.1 N จำนวน 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ ปิดจุกทันที แล้วเขย่าอย่างแรงเป็นเวลา 30 ± 1 วินาที จากนั้นกรองสารละลายอย่างรวดเร็วผ่านกระดาษกรองพับจีบเบอร์ 42

- ทิ้งสารละลายที่กรองได้ 20 - 30 มิลลิลิตรแรก จากนั้นปิเปตสารละลายที่กรองได้แต่ละใบ 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.100 N จนกระทั่งสารละลายเป็นสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแบ่ง 2 มิลลิลิตร แล้วไทเทรตต่อจนสารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้

- คำนวณหาค่า residual filtrate (C) แสดงดังสมการที่ 4

4. การคำนวณ

- การคำนวณหาค่าน้ำหนักถ่าน (carbon dosage) แสดงดังสมการที่ 3

$$M = [A - (DF) (C) (126.93) (50)] / E \quad (3)$$

โดย $M =$ น้ำหนักของถ่านที่ใช้ (g)

$A =$ (N_2) (12693.0)

$DF =$ dilution factor = $(100 + 10) / 50 = 2.2$

$C =$ residual iodine

$E =$ ค่า iodine number โดยประมาณ

การคำนวณหาค่าน้ำหนักถ่าน (carbon dosage) ทั้ง 3 ค่า จะคำนวณโดยใช้ค่า C 3 ค่า ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ค่า $C = 0.01$ 0.02 และ 0.03

- การคำนวณหาค่า residual filtrate (C) แสดงดังสมการที่ 4

$$C = (N_1 \cdot S) / F \quad (4)$$

โดย	C	=	residual filtrate (N)
	N_1	=	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (N)
	S	=	ปริมาตรสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ (ml)
	F	=	ปริมาตรของสารละลายที่กรองได้ (ml)

ค่า C ที่ได้ต้องมีค่าอยู่ในช่วง 0.008 - 0.0334 N ถ้าไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวต้องทำการทดลองใหม่ โดยการเปลี่ยนน้ำหนักของถ่านตัวอย่าง ถ้าค่า C น้อยกว่าที่กำหนดต้องลดปริมาณถ่านตัวอย่างลง ถ้าค่า C มากกว่าที่กำหนดต้องเพิ่มปริมาณถ่านตัวอย่าง จนได้ค่า C อยู่ในช่วงดังกล่าว

- การคำนวณหาค่าการดูดซับจำเพาะ แสดงดังสมการที่ 5

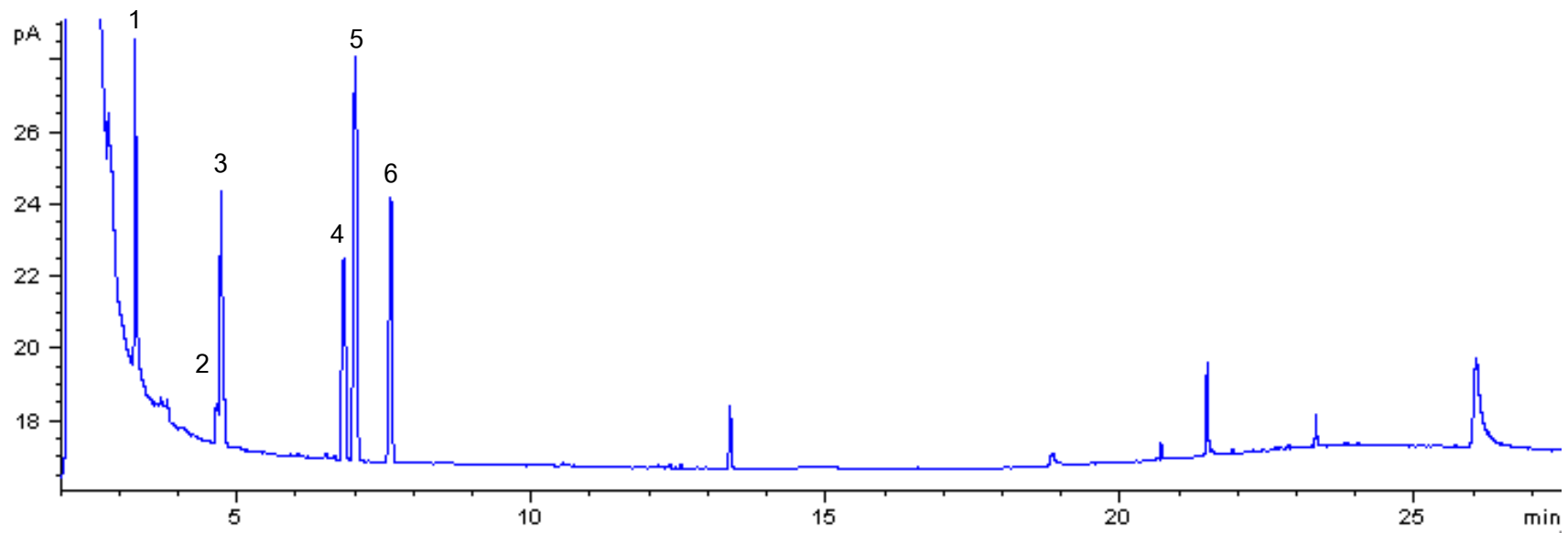
$$X / M = [A - (DF) (B) (S)] / M \quad (5)$$

โดย	X / M	=	การดูดซับจำเพาะ (mg/g)
	A	=	(N_2) (12693.0)
	DF	=	dilution factor = (100 + 10) / 50 = 2.2
	B	=	(N_1) (126.93)
	S	=	ปริมาตรสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (ml)
	M	=	น้ำหนักของถ่านที่ใช้ (g)

นำค่า C และค่า X / M ที่ได้ทั้งสามค่า มาสร้างกราฟบนกราฟ log โดยแกน x คือค่า C และแกน y คือค่า X / M จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง คำนวณหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ได้โดยการแทนค่า x ในสมการด้วย 0.02

ภาคผนวก ข
Chromatograms ของสารละลายมาตรฐาน BTEX

ภาคผนวก ข



- | | |
|-----------------------------------|-----------------|
| 1. Benzene | 4. Ethylbenzene |
| 2. Toluene-d8 (internal standard) | 5. m,p-Xylene |
| 3. Toluene | 6. o-Xylene |

ภาพที่ ข-1 chromatograms ของสารละลายมาตรฐาน BTEX ความเข้มข้น 8,000 ng/ml และ toluene-d8 (internal standard)

ภาคผนวก ค
ผลการทดลอง

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค-1 ปริมาณองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในกาแฟพันธุ์อะราบิกา

ตัวอย่าง	ครั้ง	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)	รวม
Starbucks	1	17.48	76.45	5.28	99.21
	2	18.11	78.32	2.85	99.27
	3	22.99	75.01	1.64	99.63
Coffee world	1	16.90	79.00	3.41	99.32
	2	19.06	79.86	0.44	99.36
	3	24.59	75.25	0.06	99.90
บ้านไร่กาแฟ พันธุ์อะราบิกา	1	10.05	89.53	0.16	99.74
	2	8.31	90.76	0.56	99.63
	3	7.68	92.12	0.12	99.91

ตารางที่ ค-2 ปริมาณองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในกาแฟพันธุ์โรบัสตา

ตัวอย่าง	ครั้ง	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)	รวม
Thai Robusta	1	14.63	81.71	2.77	99.12
	2	19.25	79.07	1.07	99.39
	3	18.01	77.58	4.03	99.63
Vietnam Robusta	1	15.60	81.25	2.66	99.51
	2	17.50	80.57	1.23	99.30
	3	17.54	80.88	1.40	99.82
บ้านไร่กาแฟ พันธุ์โรบัสตา	1	9.52	88.16	2.14	99.82
	2	13.97	84.81	0.76	99.53
	3	12.77	87.09	0.05	99.91

ตารางที่ ค-3 องค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ในกาแฟพันธุ์อะราบิกา

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	% Element (wt.%)			ธาตุอื่นๆ (wt.%)
		C	H	N	
Starbucks	8.824	61.3072	7.3230	3.8604	27.5094
	8.820	67.5492	7.9305	4.5460	19.9743
Coffee world	8.513	64.3432	7.1718	3.8250	24.6600
	8.451	66.1233	7.4463	3.8130	22.6174
บ้านไร่กาแฟ พันธุ์อะราบิกา	9.015	63.3632	7.3156	3.8809	25.4403
	8.663	67.6326	7.5201	3.8115	21.0358

ตารางที่ ค-4 องค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ในกาแฟพันธุ์โรบัสตา

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	% Element (wt.%)			ธาตุอื่นๆ (wt.%)
		C	H	N	
Thai Robusta	8.757	66.6998	7.1438	5.0663	21.0901
	8.885	69.6820	7.5803	4.9437	17.7940
Vietnam Robusta	8.757	66.2731	7.3993	4.7833	21.5443
	8.616	68.8350	7.1659	4.7501	19.2490
บ้านไร่กาแฟ พันธุ์โรบัสตา	9.106	67.8156	7.5206	4.7215	19.9423
	8.831	65.8933	7.0545	4.6723	22.3799

ตารางที่ ค-5 ค่าการดูดซับไอโอดีนที่ 300 ของถ่านจากกากกาแฟที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น

ถ่านจากกากกาแฟ	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)
บ้านไร่กาแฟ พันธุ์อะราบิกา	300	227.76
		231.20
		225.34
	400	304.72
		294.86
		302.10
	500	254.11
		249.80
		254.64
บ้านไร่กาแฟ พันธุ์โรบัสตา	300	191.36
		195.65
		197.93
	400	292.85
		281.80
		222.89
	500	218.77
		220.09
		220.31

ตารางที่ ค-6 ค่าการดูดซับไอโอดีนที่ 200 ของถ่านจากกากกาแฟที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น

ถ่านจากกากกาแฟ	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)
บ้านไร่กาแฟ พันธุ์โรบัสตา	400	245.09
		247.70
		242.78
	500	221.02
		221.76
		218.10

ตารางที่ ค-7 ปริมาณ Benzene ในสีทาภายในชนิดสีน้ำยี่ห้อต่างๆ

ชนิดสี	ปริมาณ Benzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	ปริมาณสารเริ่มต้น	ปริมาณสาร ที่เหลืออยู่หลังการดูดซับ
A	1,987.85	988.14
	1,786.34	982.92
	1,699.21	803.76
B	1,081.63	BLQ
	1,309.91	
	912.18	
C	1,803.16	312.26
	1,612.01	228.74
	1,916.73	259.55
A (low)	716.45	289.48
	533.22	320.35
	497.35	198.93
B (low)	1,627.53	154.05
	1,961.19	103.07
	2,144.33	111.18
C (low)	1,679.13	202.54
	1,296.17	273.46
	1,247.30	127.37

หมายเหตุ: BLQ หมายถึง ค่าที่ได้ต่ำกว่าค่า LOQ คือ $2.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$

ตารางที่ ค-8 ปริมาณ Toluene ในสีทาภายในชนิดน้ำยี่ห้อต่างๆ

ชนิดสี	ปริมาณ Toluene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	ปริมาณสารเริ่มต้น	ปริมาณสาร ที่เหลืออยู่หลังการดูดซับ
A	9,529.86	BLQ
	9,193.42	
	10,262.40	
B	11,968.93	8,022.77
	10,413.32	7,706.49
	10,776.56	8,072.55
C	623.41	480.04
	641.18	334.56
	529.27	373.32
A (low)	BLQ	BLQ
B (low)	132.05	BLQ
	69.70	
	284.15	
C (low)	310.91	BLQ
	235.00	
	199.31	

หมายเหตุ: BLQ หมายถึง ค่าที่ได้ต่ำกว่าค่า LOQ คือ $30.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$

ตารางที่ ค-9 ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟในการดูดซับ Benzene และ Toluene ในสภาวะภายในชนิดสีน้ำ

ชนิดสี	Benzene (ต่อถ่าน 1 g.)			Toluene (ต่อถ่าน 1 g.)		
	มวลเริ่มต้น (µg)	มวลที่เหลือ (µg)	ปศภ. (%)	มวลเริ่มต้น (µg)	มวลที่เหลือ (µg)	ปศภ. (%)
A	1.23	0.59	51.89	5.91	0.0181	99.69
	1.15	0.62	46.00	5.94	0.0181	99.70
	1.10	0.51	53.58	6.63	0.0181	99.73
B	0.67	0.0016*	99.76	7.47	5.31	28.89
	0.83	0.0016*	99.81	6.60	4.76	27.86
	0.58	0.0016*	99.72	6.81	4.99	26.75
C	1.18	0.20	82.84	0.41	0.31	23.70
	1.12	0.14	87.86	0.44	0.20	55.36
	1.21	0.16	87.19	0.33	0.22	33.26
A (low)	0.44	0.18	59.86	BLQ	BLQ	-
	0.34	0.20	40.87	BLQ	BLQ	-
	0.31	0.12	60.64	BLQ	BLQ	-
B (low)	1.03	0.10	90.62	0.07	0.0181*	78.32
	1.16	0.06	94.66	0.02	0.0181*	56.00
	1.31	0.07	94.90	0.16	0.0181*	89.56
C (low)	1.02	0.12	88.41	0.17	0.0181*	90.46
	0.76	0.17	77.40	0.12	0.0181*	86.95
	0.74	0.07	90.97	0.10	0.0181*	84.61

หมายเหตุ: BLQ หมายถึง ค่าที่ได้ต่ำกว่าค่า LOQ และ * หมายถึง ใช้ค่า LOQ ในการคำนวณ

ตารางที่ ค-10 ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟในการดูดซับ Benzene ในสีทา
ภายในชนิดสีน้ำมัน

ชนิด	Benzene (ต่อถ่าน 1 g.)		
	มวลเริ่มต้น (μg)	มวลที่เหลือ (μg)	ประสิทธิภาพ (%)
กากกาแฟ	20.58	17.91	12.95
	18.76	16.69	11.02
	18.25	15.94	12.67
ถ่านที่ไม่ผ่านการกระตุ้น (เผา 400 °C)	17.19	11.81	31.30
	16.36	12.48	23.70
	20.92	13.48	35.58
ถ่านที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 (เผา 700 °C)	24.17	0.91	96.23
	25.93	1.38	94.70
	21.39	1.17	94.52

ตารางที่ ค-11 ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟในการดูดซับ Toluene ในสีทา
ภายในชนิดสีน้ำมัน

ชนิด	Toluene (ต่อถ่าน 1 g.)		
	มวลเริ่มต้น (μg)	มวลที่เหลือ (μg)	ประสิทธิภาพ (%)
กากกาแฟ	12.98	4.91	62.17
	9.55	4.04	57.71
	8.11	3.44	57.60
ถ่านที่ไม่ผ่านการกระตุ้น (เผา 400 °C)	7.68	0.19	97.51
	7.54	0.13	98.29
	8.62	0.14	98.33
ถ่านที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 (เผา 700 °C)	23.47	0.33	98.59
	22.02	0.32	98.56
	19.94	0.40	98.01

ตารางที่ ค-12 ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟในการดูดซับ Ethylbenzene ในสีกาภายในชนิดสีน้ำมัน

ชนิด	Benzene (ต่อถ่าน 1 g.)		
	มวลเริ่มต้น (µg)	มวลที่เหลือ (µg)	ประสิทธิภาพ (%)
กากกาแฟ	14.30	1.02	92.88
	11.60	4.50	61.22
	8.15	2.54	68.79
ถ่านที่ไม่ผ่านการกระตุ้น (เผา 400 °C)	6.28	0.42	93.34
	7.10	0.73	89.70
	8.50	0.69	91.93
ถ่านที่กระตุ้นด้วย H ₃ PO ₄ (เผา 700 °C)	2.12	0.0149*	99
	2.41	0.0149*	99
	2.01	0.0149*	99

หมายเหตุ: * หมายถึง ใช้ค่า LOQ ในการคำนวณ

ตารางที่ ค-13 ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟในการดูดซับ m,p-Xylene ในสีกาภายในชนิดสีน้ำมัน

ชนิด	Benzene (ต่อถ่าน 1 g.)		
	มวลเริ่มต้น (µg)	มวลที่เหลือ (µg)	ประสิทธิภาพ (%)
กากกาแฟ	17.96	0.88	95.10
	13.97	4.40	68.51
	8.81	2.56	70.91
ถ่านที่ไม่ผ่านการกระตุ้น (เผา 400 °C)	7.20	0.49	93.25
	8.16	0.79	90.36
	9.77	0.85	91.29
ถ่านที่กระตุ้นด้วย H ₃ PO ₄ (เผา 700 °C)	3.13	0.0025*	100
	3.53	0.0025*	100
	2.90	0.0025*	100

หมายเหตุ: BLQ หมายถึง ค่าที่ได้ต่ำกว่าค่า LOQ และ * หมายถึง ใช้ค่า LOQ ในการคำนวณ

ตารางที่ ค-14 ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟในการดูดซับ o-Xylene ในสีทา
ภายในชนิดสีน้ำมัน

ชนิด	Benzene (ต่อถ่าน 1 g.)		
	มวลเริ่มต้น (µg)	มวลที่เหลือ (µg)	ประสิทธิภาพ (%)
กากกาแฟ	3.11	0.31	90.08
	2.84	0.49	82.84
	2.08	0.53	74.55
ถ่านที่ไม่ผ่านการกระตุ้น (เผา 400 °C)	1.38	0.21	84.49
	1.46	0.14	90.11
	1.64	0.14	91.67
ถ่านที่กระตุ้นด้วย H ₃ PO ₄ (เผา 700 °C)	0.58	0.0251*	96
	0.55	0.0251*	95
	0.54	0.0251*	95

หมายเหตุ: * หมายถึง ใช้ค่า LOQ ในการคำนวณ

ภาคผนวก ง
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง-1 ปริมาณองค์ประกอบของเซลลูโลส

Oneway

Descriptives

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
Cellulose TYPE 1	3	19.5267	3.0158	1.7412	12.0348	27.0185	17.48	22.99
2	3	20.1833	3.9662	2.2899	10.3307	30.0359	16.90	24.59
3	3	8.6800	1.2276	.7087	5.6305	11.7295	7.68	10.05
4	3	17.2967	2.3912	1.3805	11.3566	23.2367	14.63	19.25
5	3	16.8800	1.1087	.6401	14.1258	19.6342	15.60	17.54
6	3	12.0867	2.3024	1.3293	6.3672	17.8061	9.52	13.97
Total	18	15.7756	4.7287	1.1146	13.4240	18.1271	7.68	24.59

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Cellulose	Between Groups	302.963	5	60.593	9.423	.001
	Within Groups	77.161	12	6.430		
	Total	380.124	17			

ตารางที่ ง-1(ต่อ) ปริมาณองค์ประกอบของเซลลูโลส

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Cellulose

LSD

(I) TYPE	(J) TYPE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	-.6567	2.070	.757	-5.1678	3.8544
	3	10.8467*	2.070	.000	6.3356	15.3578
	4	2.2300	2.070	.303	-2.2811	6.7411
	5	2.6467	2.070	.225	-1.8644	7.1578
	6	7.4400*	2.070	.004	2.9289	11.9511
2	1	.6567	2.070	.757	-3.8544	5.1678
	3	11.5033*	2.070	.000	6.9922	16.0144
	4	2.8867	2.070	.189	-1.6244	7.3978
	5	3.3033	2.070	.137	-1.2078	7.8144
	6	8.0967*	2.070	.002	3.5856	12.6078
3	1	-10.8467*	2.070	.000	-15.3578	-6.3356
	2	-11.5033*	2.070	.000	-16.0144	-6.9922
	4	-8.6167*	2.070	.001	-13.1278	-4.1056
	5	-8.2000*	2.070	.002	-12.7111	-3.6889
	6	-3.4067	2.070	.126	-7.9178	1.1044
4	1	-2.2300	2.070	.303	-6.7411	2.2811
	2	-2.8867	2.070	.189	-7.3978	1.6244
	3	8.6167*	2.070	.001	4.1056	13.1278
	5	.4167	2.070	.844	-4.0944	4.9278
	6	5.2100*	2.070	.027	.6989	9.7211
5	1	-2.6467	2.070	.225	-7.1578	1.8644
	2	-3.3033	2.070	.137	-7.8144	1.2078
	3	8.2000*	2.070	.002	3.6889	12.7111
	4	-.4167	2.070	.844	-4.9278	4.0944
	6	4.7933*	2.070	.039	.2822	9.3044
6	1	-7.4400*	2.070	.004	-11.9511	-2.9289
	2	-8.0967*	2.070	.002	-12.6078	-3.5856
	3	3.4067	2.070	.126	-1.1044	7.9178
	4	-5.2100*	2.070	.027	-9.7211	-.6989
	5	-4.7933*	2.070	.039	-9.3044	-.2822

*. The mean difference is significant at the .05 level.

ตารางที่ ง-2 ปริมาณองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส

Oneway

Descriptives

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
Hemi cellulose TYPE 1	3	76.5933	1.6596	.9582	72.4705	80.7162	75.01	78.32
2	3	78.0367	2.4513	1.4153	71.9472	84.1262	75.25	79.86
3	3	90.8033	1.2955	.7480	87.5850	94.0217	89.53	92.12
4	3	79.4533	2.0915	1.2075	74.2577	84.6490	77.58	81.71
5	3	80.9000	.3404	.1966	80.0543	81.7457	80.57	81.25
6	3	86.6867	1.7110	.9879	82.4362	90.9372	84.81	88.16
Total	18	82.0789	5.3792	1.2679	79.4039	84.7539	75.01	92.12

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Hemi cellulose Between Groups	456.185	5	91.237	30.651	.000
Within Groups	35.720	12	2.977		
Total	491.905	17			

ตารางที่ ง-2(ต่อ) ปริมาณองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Hemicellulose

LSD

(I) TYPE	(J) TYPE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	-1.4433	1.409	.326	-4.5126	1.6260
	3	-14.2100*	1.409	.000	-17.2793	-11.1407
	4	-2.8600	1.409	.065	-5.9293	.2093
	5	-4.3067*	1.409	.010	-7.3760	-1.2374
	6	-10.0933*	1.409	.000	-13.1626	-7.0240
2	1	1.4433	1.409	.326	-1.6260	4.5126
	3	-12.7667*	1.409	.000	-15.8360	-9.6974
	4	-1.4167	1.409	.334	-4.4860	1.6526
	5	-2.8633	1.409	.065	-5.9326	.2060
	6	-8.6500*	1.409	.000	-11.7193	-5.5807
3	1	14.2100*	1.409	.000	11.1407	17.2793
	2	12.7667*	1.409	.000	9.6974	15.8360
	4	11.3500*	1.409	.000	8.2807	14.4193
	5	9.9033*	1.409	.000	6.8340	12.9726
	6	4.1167*	1.409	.013	1.0474	7.1860
4	1	2.8600	1.409	.065	-.2093	5.9293
	2	1.4167	1.409	.334	-1.6526	4.4860
	3	-11.3500*	1.409	.000	-14.4193	-8.2807
	5	-1.4467	1.409	.325	-4.5160	1.6226
	6	-7.2333*	1.409	.000	-10.3026	-4.1640
5	1	4.3067*	1.409	.010	1.2374	7.3760
	2	2.8633	1.409	.065	-.2060	5.9326
	3	-9.9033*	1.409	.000	-12.9726	-6.8340
	4	1.4467	1.409	.325	-1.6226	4.5160
	6	-5.7867*	1.409	.001	-8.8560	-2.7174
6	1	10.0933*	1.409	.000	7.0240	13.1626
	2	8.6500*	1.409	.000	5.5807	11.7193
	3	-4.1167*	1.409	.013	-7.1860	-1.0474
	4	7.2333*	1.409	.000	4.1640	10.3026
	5	5.7867*	1.409	.001	2.7174	8.8560

*. The mean difference is significant at the .05 level.

ตารางที่ ง-3 ปริมาณองค์ประกอบของลิกนิน

Oneway

Descriptives

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
Lignin TYPE 1	3	3.2567	1.8538	1.0703	-1.3484	7.8617	1.64	5.28
2	3	1.3033	1.8343	1.0590	-3.2534	5.8600	.06	3.41
3	3	.2800	.2433	.1405	-.3244	.8844	.12	.56
4	3	2.6233	1.4854	.8576	-1.0667	6.3134	1.07	4.03
5	3	1.7633	.7812	.4510	-.1772	3.7039	1.23	2.66
6	3	.9833	1.0627	.6136	-1.6567	3.6234	.05	2.14
Total	18	1.7017	1.5246	.3593	.9435	2.4598	.05	5.28

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Lignin Between Groups	17.901	5	3.580	1.988	.153
Within Groups	21.613	12	1.801		
Total	39.514	17			

ตารางที่ ง-3(ต่อ) ปริมาณองค์ประกอบของลิกนิน

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Lignin

LSD

(I) TYPE	(J) TYPE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	1.9533	1.096	.100	-.4342	4.3408
	3	2.9767*	1.096	.019	.5892	5.3642
	4	.6333	1.096	.574	-1.7542	3.0208
	5	1.4933	1.096	.198	-.8942	3.8808
	6	2.2733	1.096	.060	-.1142	4.6608
2	1	-1.9533	1.096	.100	-4.3408	.4342
	3	1.0233	1.096	.369	-1.3642	3.4108
	4	-1.3200	1.096	.252	-3.7075	1.0675
	5	-.4600	1.096	.682	-2.8475	1.9275
	6	.3200	1.096	.775	-2.0675	2.7075
3	1	-2.9767*	1.096	.019	-5.3642	-.5892
	2	-1.0233	1.096	.369	-3.4108	1.3642
	4	-2.3433	1.096	.054	-4.7308	4.415E-02
	5	-1.4833	1.096	.201	-3.8708	.9042
	6	-.7033	1.096	.533	-3.0908	1.6842
4	1	-.6333	1.096	.574	-3.0208	1.7542
	2	1.3200	1.096	.252	-1.0675	3.7075
	3	2.3433	1.096	.054	-4.42E-02	4.7308
	5	.8600	1.096	.448	-1.5275	3.2475
	6	1.6400	1.096	.160	-.7475	4.0275
5	1	-1.4933	1.096	.198	-3.8808	.8942
	2	.4600	1.096	.682	-1.9275	2.8475
	3	1.4833	1.096	.201	-.9042	3.8708
	4	-.8600	1.096	.448	-3.2475	1.5275
	6	.7800	1.096	.490	-1.6075	3.1675
6	1	-2.2733	1.096	.060	-4.6608	.1142
	2	-.3200	1.096	.775	-2.7075	2.0675
	3	.7033	1.096	.533	-1.6842	3.0908
	4	-1.6400	1.096	.160	-4.0275	.7475
	5	-.7800	1.096	.490	-3.1675	1.6075

*. The mean difference is significant at the .05 level.

ตารางที่ ง-4 ปริมาณองค์ประกอบของคาร์บอน

Oneway

Descriptives

		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
						Lower Bound	Upper Bound		
						Carbon TYPE 1	2		
2	2	65.233250	1.258721	.890050	53.924097	76.542403	64.3432	66.1233	
3	2	65.497900	3.018922	2.134700	38.373975	92.621825	63.3632	67.6326	
4	2	68.190900	2.108734	1.491100	49.244685	87.137115	66.6998	69.6820	
5	2	67.554050	1.811537	1.280950	51.278043	83.830057	66.2731	68.8350	
6	2	66.854450	1.359271	.961150	54.641886	79.067014	65.8933	67.8156	
Total	12	66.293125	2.359431	.681109	64.794014	67.792236	61.3072	69.6820	

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Carbon	Between Groups	21.480	5	4.296	.648	.674
	Within Groups	39.756	6	6.626		
	Total	61.236	11			

ตารางที่ ง-4(ต่อ) ปริมาณองค์ประกอบของคาร์บอน

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Carbon

LSD

(I) TYPE	(J) TYPE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	-.805050	2.574	.765	-7.103618	5.493518
	3	-1.069700	2.574	.692	-7.368268	5.228868
	4	-3.762700	2.574	.194	-10.0613	2.535868
	5	-3.125850	2.574	.270	-9.424418	3.172718
	6	-2.426250	2.574	.382	-8.724818	3.872318
2	1	.805050	2.574	.765	-5.493518	7.103618
	3	-.264650	2.574	.921	-6.563218	6.033918
	4	-2.957650	2.574	.294	-9.256218	3.340918
	5	-2.320800	2.574	.402	-8.619368	3.977768
	6	-1.621200	2.574	.552	-7.919768	4.677368
3	1	1.069700	2.574	.692	-5.228868	7.368268
	2	.264650	2.574	.921	-6.033918	6.563218
	4	-2.693000	2.574	.336	-8.991568	3.605568
	5	-2.056150	2.574	.455	-8.354718	4.242418
	6	-1.356550	2.574	.617	-7.655118	4.942018
4	1	3.762700	2.574	.194	-2.535868	10.061268
	2	2.957650	2.574	.294	-3.340918	9.256218
	3	2.693000	2.574	.336	-3.605568	8.991568
	5	.636850	2.574	.813	-5.661718	6.935418
	6	1.336450	2.574	.622	-4.962118	7.635018
5	1	3.125850	2.574	.270	-3.172718	9.424418
	2	2.320800	2.574	.402	-3.977768	8.619368
	3	2.056150	2.574	.455	-4.242418	8.354718
	4	-.636850	2.574	.813	-6.935418	5.661718
	6	.699600	2.574	.795	-5.598968	6.998168
6	1	2.426250	2.574	.382	-3.872318	8.724818
	2	1.621200	2.574	.552	-4.677368	7.919768
	3	1.356550	2.574	.617	-4.942018	7.655118
	4	-1.336450	2.574	.622	-7.635018	4.962118
	5	-.699600	2.574	.795	-6.998168	5.598968

ตารางที่ ง-5 ปริมาณองค์ประกอบของไฮโดรเจน

Oneway

Descriptives

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
Hydrogen TYPE 1	2	7.626750	.429567	.303750	3.767242	11.486258	7.3230	7.9305
2	2	7.309050	.194101	.137250	5.565124	9.052976	7.1718	7.4463
3	2	7.417850	.144603	.102250	6.118641	8.717059	7.3156	7.5201
4	2	7.362050	.308652	.218250	4.588922	10.135178	7.1438	7.5803
5	2	7.282600	.165039	.116700	5.799786	8.765414	7.1659	7.3993
6	2	7.287550	.329582	.233050	4.326370	10.248730	7.0545	7.5206
Total	12	7.380975	.242271	6.99E-02	7.227043	7.534907	7.0545	7.9305

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Hydrogen	Between Groups	.171	5	3.428E-02	.434	.811
	Within Groups	.474	6	7.904E-02		
	Total	.646	11			

ตารางที่ ง-5(ต่อ) ปริมาณองค์ประกอบของไฮโดรเจน

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Hydrogen

LSD

(I) TYPE	(J) TYPE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	.317700	.281	.302	-.370227	1.005627
	3	.208900	.281	.486	-.479027	.896827
	4	.264700	.281	.383	-.423227	.952627
	5	.344150	.281	.267	-.343777	1.032077
	6	.339200	.281	.273	-.348727	1.027127
2	1	-.317700	.281	.302	-1.005627	.370227
	3	-.108800	.281	.712	-.796727	.579127
	4	-5.30E-02	.281	.857	-.740927	.634927
	5	2.645E-02	.281	.928	-.661477	.714377
	6	2.150E-02	.281	.942	-.666427	.709427
3	1	-.208900	.281	.486	-.896827	.479027
	2	.108800	.281	.712	-.579127	.796727
	4	5.580E-02	.281	.849	-.632127	.743727
	5	.135250	.281	.648	-.552677	.823177
	6	.130300	.281	.659	-.557627	.818227
4	1	-.264700	.281	.383	-.952627	.423227
	2	5.300E-02	.281	.857	-.634927	.740927
	3	-5.58E-02	.281	.849	-.743727	.632127
	5	7.945E-02	.281	.787	-.608477	.767377
	6	7.450E-02	.281	.800	-.613427	.762427
5	1	-.344150	.281	.267	-1.032077	.343777
	2	-2.64E-02	.281	.928	-.714377	.661477
	3	-.135250	.281	.648	-.823177	.552677
	4	-7.94E-02	.281	.787	-.767377	.608477
	6	-4.95E-03	.281	.987	-.692877	.682977
6	1	-.339200	.281	.273	-1.027127	.348727
	2	-2.15E-02	.281	.942	-.709427	.666427
	3	-.130300	.281	.659	-.818227	.557627
	4	-7.45E-02	.281	.800	-.762427	.613427
	5	4.950E-03	.281	.987	-.682977	.692877

ตารางที่ ง-6 ปริมาณองค์ประกอบของไนโตรเจน

Oneway

Descriptives

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
Nitrogen TYPE	1	4.20320	.484792	.342800	-.152485	8.558885	3.8604	4.5460
	2	3.81900	8.49E-03	6.00E-03	3.742763	3.895237	3.8130	3.8250
	3	3.84620	4.91E-02	3.47E-02	3.405295	4.287105	3.8115	3.8809
	4	5.00500	8.67E-02	6.13E-02	4.226110	5.783890	4.9437	5.0663
	5	4.76670	2.35E-02	1.66E-02	4.555777	4.977623	4.7501	4.7833
	6	4.69690	3.48E-02	2.46E-02	4.384327	5.009473	4.6723	4.7215
	Total	12	4.38950	.503507	.145350	4.069587	4.709413	3.8115

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Nitrogen	Between Groups	2.542	5	.508	12.360	.004
	Within Groups	.247	6	4.113E-02		
	Total	2.789	11			

ตารางที่ ง-6(ต่อ) ปริมาณองค์ประกอบของไนโตรเจน

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Nitrogen

LSD

(I) TYPE	(J) TYPE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	.384200	.203	.107	-.112047	.880447
	3	.357000	.203	.129	-.139247	.853247
	4	-.801800*	.203	.008	-1.298047	-.305553
	5	-.563500*	.203	.032	-1.059747	-6.7E-02
	6	-.493700	.203	.051	-.989947	2.55E-03
2	1	-.384200	.203	.107	-.880447	.112047
	3	-2.72E-02	.203	.898	-.523447	.469047
	4	-1.186000*	.203	.001	-1.682247	-.689753
	5	-.947700*	.203	.003	-1.443947	-.451453
	6	-.877900*	.203	.005	-1.374147	-.381653
3	1	-.357000	.203	.129	-.853247	.139247
	2	2.720E-02	.203	.898	-.469047	.523447
	4	-1.158800*	.203	.001	-1.655047	-.662553
	5	-.920500*	.203	.004	-1.416747	-.424253
	6	-.850700*	.203	.006	-1.346947	-.354453
4	1	.801800*	.203	.008	.305553	1.298047
	2	1.186000*	.203	.001	.689753	1.682247
	3	1.158800*	.203	.001	.662553	1.655047
	5	.238300	.203	.285	-.257947	.734547
	6	.308100	.203	.180	-.188147	.804347
5	1	.563500*	.203	.032	6.73E-02	1.059747
	2	.947700*	.203	.003	.451453	1.443947
	3	.920500*	.203	.004	.424253	1.416747
	4	-.238300	.203	.285	-.734547	.257947
	6	6.980E-02	.203	.742	-.426447	.566047
6	1	.493700	.203	.051	-2.5E-03	.989947
	2	.877900*	.203	.005	.381653	1.374147
	3	.850700*	.203	.006	.354453	1.346947
	4	-.308100	.203	.180	-.804347	.188147
	5	-6.98E-02	.203	.742	-.566047	.426447

*. The mean difference is significant at the .05 level.

ตารางที่ ง-7 ปริมาณองค์ประกอบของคาร์บอนในกาแฟพันธุ์อะราบิกา และพันธุ์โรบัสตา

T-Test

Paired Samples Statistics

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	ARABICA	65.0531	6	2.5068	1.0234
	ROBUSTA	67.5331	6	1.5075	.6155

Paired Samples Correlations

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	ARABICA & ROBUSTA	6	.321	.535

Paired Samples Test

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	ARABICA - ROBUSTA	-2.4800	2.4760	1.0108	-5.0784	.1184	-2.45	5	.058

ตารางที่ ง-8 ความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างพื้นที่ผิวแบบ BET ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน

Correlations

Correlations

		BET	VOLUMN	WIDTH
Pearson Correlation	BET	1.000	1.000**	-.636
	VOLUMN	1.000**	1.000	-.626
	WIDTH	-.636	-.626	1.000
Sig. (2-tailed)	BET	.	.000	.364
	VOLUMN	.000	.	.374
	WIDTH	.364	.374	.
N	BET	4	4	4
	VOLUMN	4	4	4
	WIDTH	4	4	4

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

ตารางที่ ง-9 ปริมาณ Benzene และ Toluene ในสีทาภายในชนิดน้ำทั้ง 2 ประเภท

T-Test

Paired Samples Statistics

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	B	1567.6689	9	379.6836	126.5612
	B_LOW	1300.2967	9	609.9796	203.3265
Pair 2	T	8764.8417	6	4068.0159	1660.7606
	T_LOW	205.1867	6	91.6969	37.4351

Paired Samples Correlations

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	B & B_LOW	9	-.718	.029
	T & T_LOW	6	.199	.706

Paired Samples Test

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	B - B_LOW	267.3722	921.3770	307.1257	-440.8609	975.6053	.871	8	.409
Pair 2	T - T_LOW	8559.6550	4050.7930	1653.7293	4308.6085	12810.70	5.176	5	.004

หมายเหตุ: ค่าของ Toluene ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติ เป็นค่าเฉลี่ย เพื่อให้จำนวนตัวอย่างในการวิเคราะห์เท่ากัน

ตารางที่ ง-10 ปริมาณดูดซับสารอินทรีย์ระเหยบนถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ

T-Test

Paired Samples Statistics

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	B_LOW	.6711	9	.4051	.1350
	B_NORMAL	.7611	9	.2037	6.791E-02
Pair 2	T_LOW	.1067	6	5.645E-02	2.305E-02
	T_NORMAL	2.0967	6	2.4968	1.0193

Paired Samples Correlations

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	B_LOW & B_NORMAL	9	.280	.465
Pair 2	T_LOW & T_NORMAL	6	-.695	.125

Paired Samples Test

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	B_LOW - B_NORMAL	-9.0E-02	.3992	.1331	-.3968	.2168	-.676	8	.518
Pair 2	T_LOW - T_NORMAL	-1.9900	2.5364	1.0355	-4.6517	.6717	-1.922	5	.113

หมายเหตุ: ค่าของ Toluene ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติ เป็นค่าเฉลี่ย เพื่อให้จำนวนตัวอย่างในการวิเคราะห์เท่ากัน

ตารางที่ ง-11 ประสิทธิภาพการดูดซับ BTEX ในสีทาภายในชนิดสีน้ำมันของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟ (วิเคราะห์แยกสาร)

Oneway

Descriptives

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum	
					Lower Bound	Upper Bound			
Benzene TYPE	1	3	12.2133	1.0429	.6021	9.6226	14.8041	11.02	12.95
	2	3	30.1933	6.0168	3.4738	15.2466	45.1401	23.70	35.58
	3	3	95.1500	.9396	.5425	92.8158	97.4842	94.52	96.23
	Total	9	45.8522	37.9102	12.6367	16.7119	74.9926	11.02	96.23
Toluene TYPE	1	3	59.1600	2.6073	1.5053	52.6830	65.6370	57.60	62.17
	2	3	98.0433	.4623	.2669	96.8949	99.1918	97.51	98.33
	3	3	98.3867	.3265	.1885	97.5755	99.1979	98.01	98.59
	Total	9	85.1967	19.5736	6.5245	70.1511	100.2422	57.60	98.59
Ethyl benzene TYPE	1	3	74.2967	16.5327	9.5452	33.2266	115.3667	61.22	92.88
	2	3	91.6567	1.8353	1.0596	87.0974	96.2159	89.70	93.34
	3	3	99.0000	.0000	.0000	99.0000	99.0000	99.00	99.00
	Total	9	88.3178	13.7793	4.5931	77.7261	98.9095	61.22	99.00
m,p-Xylene TYPE	1	3	78.1733	14.7080	8.4916	41.6363	114.7103	68.51	95.10
	2	3	91.6333	1.4753	.8517	87.9685	95.2982	90.36	93.25
	3	3	100.000	.0000	.0000	100.0000	100.0000	100.00	100.00
	Total	9	89.9356	12.0653	4.0218	80.6613	99.2098	68.51	100.00
o-Xylene TYPE	1	3	82.4900	7.7709	4.4865	63.1858	101.7942	74.55	90.08
	2	3	88.7567	3.7765	2.1803	79.3753	98.1380	84.49	91.67
	3	3	95.3333	.5774	.3333	93.8991	96.7676	95.00	96.00
	Total	9	88.8600	7.0484	2.3495	83.4421	94.2779	74.55	96.00

หมายเหตุ: 1 หมายถึง กากกาแฟ

2 หมายถึง ถ่านกากกาแฟ (ผ่านการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 400 °C)

3 หมายถึง ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ (ผ่านการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 400 °C และเผากระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 700 °C)

ตารางที่ ง-11(ต่อ) ประสิทธิภาพการดูดซับ BTEX ในสีทาภายในชนิดสีน้ำมันของถ่านกัมมันต์
ที่ผลิตจากกากกาแฟ (วิเคราะห์แยกสาร)

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Benzene	Between Groups	11421.140	2	5710.570	448.795	.000
	Within Groups	76.345	6	12.724		
	Total	11497.485	8			
Toluene	Between Groups	3050.763	2	1525.381	642.855	.000
	Within Groups	14.237	6	2.373		
	Total	3065.000	8			
Ethyl benzene	Between Groups	965.549	2	482.774	5.234	.048
	Within Groups	553.400	6	92.233		
	Total	1518.949	8			
m,p-Xylene	Between Groups	727.576	2	363.788	4.995	.053
	Within Groups	437.001	6	72.833		
	Total	1164.577	8			
o-Xylene	Between Groups	247.475	2	123.737	4.951	.054
	Within Groups	149.964	6	24.994		
	Total	397.439	8			

ตารางที่ ง-11(ต่อ) ประสิทธิภาพการดูดซับ BTEX ในสีกาภายในชนิดสีน้ำมันของถ่านกัมมันต์
ที่ผลิตจากกากกาแฟ (วิเคราะห์แยกสาร)

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable		(I) TYPE	(J) TYPE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
							Lower Bound	Upper Bound
Benzene	LSD	1	2	-17.9800*	2.913	.001	-25.1067	-10.8533
			3	-82.9367*	2.913	.000	-90.0634	-75.8100
		2	1	17.9800*	2.913	.001	10.8533	25.1067
			3	-64.9567*	2.913	.000	-72.0834	-57.8300
		3	1	82.9367*	2.913	.000	75.8100	90.0634
			2	64.9567*	2.913	.000	57.8300	72.0834
Toluene	LSD	1	2	-38.8833*	1.258	.000	-41.9609	-35.8058
			3	-39.2267*	1.258	.000	-42.3042	-36.1491
		2	1	38.8833*	1.258	.000	35.8058	41.9609
			3	-.3433	1.258	.794	-3.4209	2.7342
		3	1	39.2267*	1.258	.000	36.1491	42.3042
			2	.3433	1.258	.794	-2.7342	3.4209
Ethyl benzene	LSD	1	2	-17.3600	7.841	.069	-36.5474	1.8274
			3	-24.7033*	7.841	.020	-43.8908	-5.5159
		2	1	17.3600	7.841	.069	-1.8274	36.5474
			3	-7.3433	7.841	.385	-26.5308	11.8441
		3	1	24.7033*	7.841	.020	5.5159	43.8908
			2	7.3433	7.841	.385	-11.8441	26.5308
m,p-Xylene	LSD	1	2	-13.4600	6.968	.102	-30.5105	3.5905
			3	-21.8267*	6.968	.020	-38.8772	-4.7761
		2	1	13.4600	6.968	.102	-3.5905	30.5105
			3	-8.3667	6.968	.275	-25.4172	8.6839
		3	1	21.8267*	6.968	.020	4.7761	38.8772
			2	8.3667	6.968	.275	-8.6839	25.4172
o-Xylene	LSD	1	2	-6.2667	4.082	.176	-16.2550	3.7216
			3	-12.8433*	4.082	.020	-22.8316	-2.8550
		2	1	6.2667	4.082	.176	-3.7216	16.2550
			3	-6.5767	4.082	.158	-16.5650	3.4116
		3	1	12.8433*	4.082	.020	2.8550	22.8316
			2	6.5767	4.082	.158	-3.4116	16.5650

*. The mean difference is significant at the .05 level.

หมายเหตุ: 1 หมายถึง กากกาแฟ

2 หมายถึง ถ่านกากกาแฟ (ผ่านการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 400 °C)

3 หมายถึง ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ (ผ่านการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 400 °C และเผากระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 700 °C)

ตารางที่ ง-12 ประสิทธิภาพการดูดซับ BTEX ในสีทาภายในชนิดสีน้ำมันของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟ (Total BTEX)

T-Test

Paired Samples Statistics

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	AC	97.5740	15	2.0886	.5393
	C_400	80.0567	15	26.1518	6.7524
Pair 2	AC	97.5740	15	2.0886	.5393
	COFFEE	61.2667	15	28.1146	7.2591
Pair 3	C_400	80.0567	15	26.1518	6.7524
	COFFEE	61.2667	15	28.1146	7.2591

Paired Samples Correlations

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	AC & C_400	15	.625	.013
Pair 2	AC & COFFEE	15	.483	.068
Pair 3	C_400 & COFFEE	15	.862	.000

Paired Samples Test

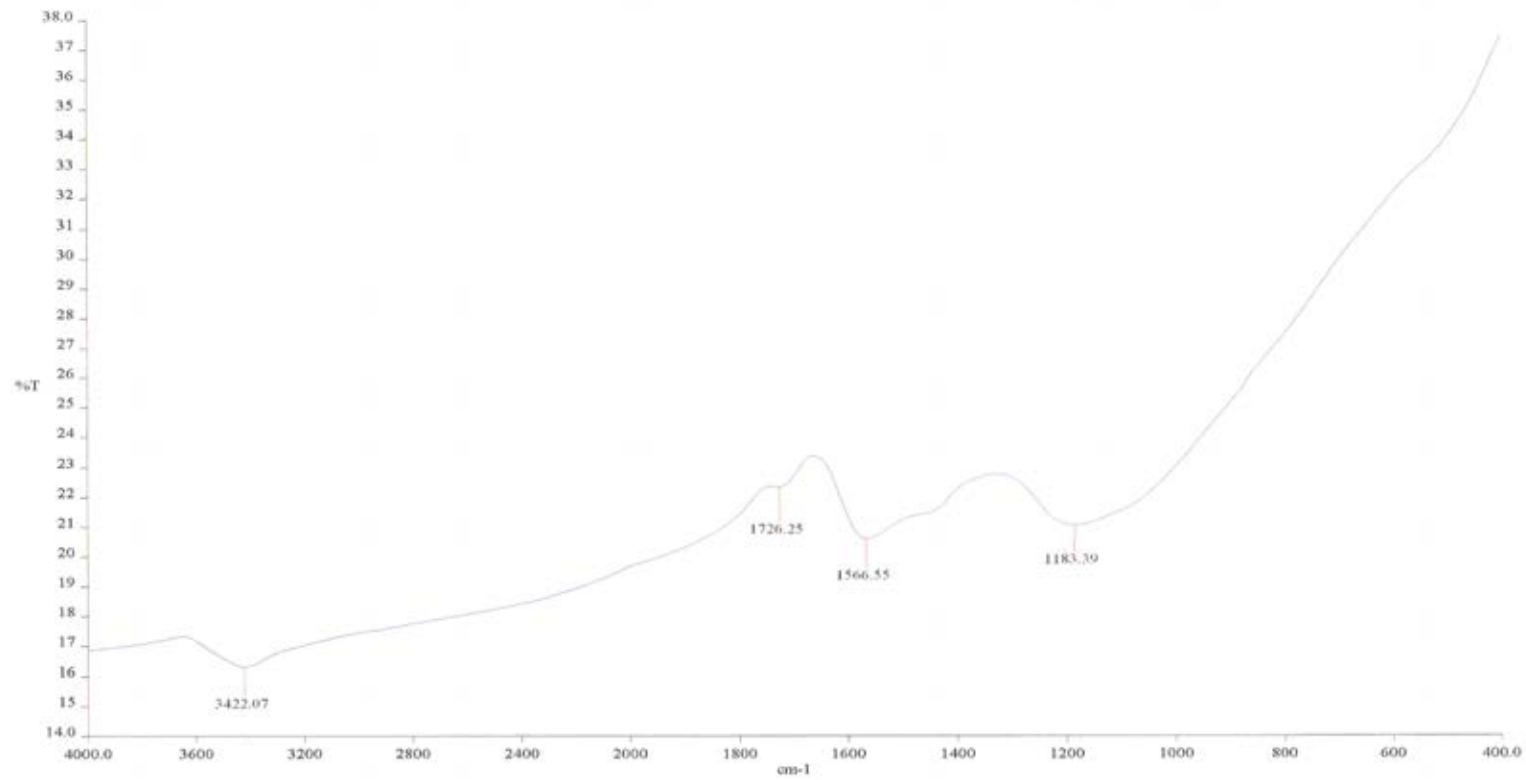
		Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower				Upper
Pair 1	AC - C_400	17.52	24.8993	6.4290	3.7286	31.3061	2.725	14	.016
Pair 2	AC - COFFEE	36.31	27.1668	7.0144	21.2629	51.3518	5.176	14	.000
Pair 3	C_400 - COFFEE	18.79	14.3953	3.7169	10.8181	26.7619	5.055	14	.000

ภาคผนวก จ
FTIR สเปกตรัม

ภาคผนวก จ

Scientific and Technological Research Equipment Centre
Chulalongkorn University

Fourier Transform Infrared Spectrometer, PerkinElmer (Spectrum One)



ภาพที่ จ-1 FTIR สเปกตรัมของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศศิกร แสงพงษ์ชัย เกิดวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2529 ที่จังหวัดระยอง ที่อยู่ปัจจุบัน 7/18 ถนนข้างอำเภอ ซอย 8/1 ต.เชิงเนิน อ.เมือง จ.ระยอง 21000 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 สายสามัญ แผนการเรียนวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ จากโรงเรียนระยองวิทยาคม จังหวัดระยอง เมื่อปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป (ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน) คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547 เมื่อจบการศึกษา ในปี 2551 ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก “ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ

เข้าร่วมเสนอผลงานแบบบรรยายในงานการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 9 “วิทยาศาสตร์ และวิทยาศาสตร์เพื่อสุขภาพ” ณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต วันที่ 30 มิถุนายน - 1 กรกฎาคม 2554