

การจัดได้เบนโซโทไอฟีนจากนอร์มัล-ออกเทนโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์
ที่เตรียมจากกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย

นางสาวธิดาวรรณ นันทปรีชาชาญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

REMOVAL OF DIBENZOTHIOPHENE FROM n-OCTANE BY ADSORPTION WITH
ACTIVATED CARBONS PREPARED FROM SEWAGE SLUDGE

Miss Thitiwan Nunthapreechachan

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

ธิดาวรรณ นันทปรีชาชาญ : การขจัดไดเบนโซไทโอเฟนจากนอร์มัล-ออกเทนโดยการดูดซับ
ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย (REMOVAL OF
DIBENZOTHIOPHENE FROM n-OCTANE BY ADSORPTION WITH ACTIVATED
CARBONS PREPARED FROM SEWAGE SLUDGE)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. มะลิ หนู่นสม, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม:
ผศ.ดร. สิทธิพงษ์ เพ็งพานิช, 88 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียเพื่อนำไปใช้
ในการขจัดกำมะถันในน้ำมันดีเซลด้วยวิธีการดูดซับ น้ำมันเชื้อเพลิงต้นแบบที่ใช้คือ ไดเบนโซไทโอเฟน
ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็มในนอร์มัล-ออกเทนสารกระตุ้นที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ ได้แก่
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซิงค์คลอไรด์ และกรดไนตริก ที่อัตราส่วนของสารกระตุ้นและถ่านชาร์
0.5 1 2 4 และ 6 โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษาพบว่าชนิดของสารกระตุ้น อัตราส่วนของสาร
กระตุ้นและถ่านชาร์ และวิธีการกระตุ้นมีผลต่อความสามารถในการดูดซับไดเบนโซไทโอเฟน โดย
ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 6 ต่อ 1 แบบสองขั้นตอนที่อุณหภูมิ
600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่ออนาที และ
อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที มีความสามารถในการดูดซับไดเบนโซไทโอเฟน
สูงที่สุด (14.12 มิลลิกรัมต่อกรัม) เมื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม
ถ่านกัมมันต์ พบว่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ
ไดเบนโซไทโอเฟนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ นอกจากนี้ยังพบว่าหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิว
ของถ่านกัมมันต์มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ แต่ลักษณะทางกายภาพรวมทั้งองค์ประกอบ
ที่อยู่ในถ่านกัมมันต์ไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับไดเบนโซไทโอเฟน และถ่านกัมมันต์ที่ได้
มีลักษณะการดูดซับไดเบนโซไทโอเฟนจากนอร์มัล-ออกเทนในรูปแบบของไอโซเทอมแบบ
แลงเมียร์

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา 2555 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม.....

5272345023: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: SEWAGE SLUDGE / DIBENZOTHIOPHENE / ACTIVATED CARBON

THITIWAN NUNTHAPREECHACHAN: REMOVAL OF DIBENZOTHIOPHENE FROM *n*-OCTANE BY ADSORPTION WITH ACTIVATED CARBONS PREPARED FROM SEWAGE SLUDGE. ADVISOR: ASSOC. PROF. MALI HUNSOM, Ph.D., CO ADVISOR: ASST. PROF. SITTHIPHONG PENG PANICH, Ph.D., 88 pp.

This work was carried out to investigate the effect of parameters on the preparation of activated carbon from sewage sludge for adsorption of sulfur compound in diesel fuel. The utilized model fuel was dibenzothiophene at concentration of 100 ppm in *n*-octane. Three types of activating agent were utilized including KOH, ZnCl₂ and HNO₃ at different ratios of activating agent to char (0.5, 1, 2, 4 and 6 (w/w)). The results showed that types of activating agent, ratios of activating agent to char and step of heat treatment had important roles on the adsorption capacity of dibenzothiophene. The activated carbon activated by KOH as two-step heat treatment at the ratio between KOH and char of 6:1 at temperature of 600 °C for 1 hr, flow rate of N₂ of 50 ml/min and heating rate of 10 °C/min provided the maximum adsorption capacity and dibenzothiophene removal of 14.12 mg/g and 72 %, respectively. Besides, the carbonization temperatures and times during activated carbon preparation have significant effects on the adsorption capacity of sulfur. The oxygen containing surface functional groups on the surface of activated carbon played an important role on the adsorption capacity of dibenzothiophene; while, the physical properties and constituent of activated carbon were not. The adsorption isotherm of dibenzothiophene by activated carbon was related to the Langmuir isotherm.

Department Chemical Technology Student's Signature:

Field of Study ... Chemical Technology Advisor's Signature:

Academic Year 2012 Co advisor's Signature:

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หนู่นสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิพงษ์ เพ็งพานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำในการทำวิจัย อาจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ และ ดร.เรืองวิทย์ สว่างแก้ว ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาในเรื่องของการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล รวมทั้งคุณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำและให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

งานวิจัยเรื่อง “การขจัดไคเบนโซโทไอฟีนจากนอร์มัล-ออกเทนโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

กราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวดี พฤษาทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรธม ประศาสน์สารกิจ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริลักษณ์ เจียรากร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ เสนอแนะและให้ความคิดเห็นในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและกรุณาช่วยเหลือพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ และ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลังที่คอยให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 องค์ประกอบของน้ำมันปิโตรเลียม	5
2.1.1 ไฮโดรคาร์บอนที่พบได้ในน้ำมันดิบ	5
2.1.2 สารปนเปื้อนที่พบได้ในน้ำมันดิบ	7
2.2 มาตรฐานของน้ำมันดีเซล	9
2.3 กระบวนการกำจัดกำมะถัน	12
2.3.1 กระบวนการทำให้หวาน	12
2.3.2 ไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน	12
2.3.3 การใช้สารเคมี	13
2.3.4 การดูดซับ	15
2.4 การดูดซับ	15

บทที่	หน้า
2.5	ไอโซเทอมของการดูดซับ 16
2.5.1	ไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ 17
2.5.2	ไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนดิช 18
2.6	ตัวดูดซับ 19
2.6.1	อะลูมินากัมมันต์ 19
2.6.2	ซิลิกาเจล 19
2.6.3	ตัวกรองระดับโมเลกุล 20
2.6.4	ถ่านกัมมันต์ 20
2.7	กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย 25
2.7.1	กระบวนการบำบัดทางกายภาพ 26
2.7.2	กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ 26
2.7.3	กระบวนการบำบัดทางเคมี 26
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 29
3	เครื่องมือและวิธีการทดลอง 33
3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย 33
3.1.1	การไพโรไลซิสกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียและ การคาร์บอนไนซ์ถ่านชาร์ 33
3.1.2	การกระตุ้นถ่านชาร์และการดูดซับไดเบนโซไทโอฟิน จากนอร์มัล – ออกเทน 34
3.1.3	การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์และการดูดซับ ไดเบนโซไทโอฟินจากนอร์มัล – ออกเทน 34
3.2	วัสดุดิบ 34
3.3	สารเคมี 35
3.4	ขั้นตอนดำเนินการวิจัย 36
3.4.1	การเตรียมตัวอย่างจากกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย 36
3.4.2	การไพโรไลซิส 36

บทที่	หน้า
3.4.3 การกระตุ้น	37
3.4.4 การทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับกำมะถัน	38
3.4.5 การวิเคราะห์สมบัติของกากตะกอน ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์	39
4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	40
4.1 สมบัติของกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียและถ่านชาร์	40
4.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย	41
4.2.1 ผลของชนิดของสารกระตุ้นและอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้น และถ่านชาร์	42
4.2.2 ผลของตัวแปรในการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบสองขั้นตอนนี้ต่อ ความสามารถในการดูดซับไดเบนโซไทโอฟีนจาก นอร์มัล - ออกเทน	52
4.3 ภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไดเบนโซไทโอฟีนจากนอร์มัล - ออกเทน ...	60
4.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ	62
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	66
รายการอ้างอิง	68
ภาคผนวก	72
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์	73
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลลีนบลูของถ่านกัมมันต์	78
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์	81
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับด้วย เครื่องวัดการดูดกลืนแสงยูวี	85
ภาคผนวก จ สมบัติของถ่านกัมมันต์ทางการค้า	87
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	88

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	8
2.2	9
2.3	10
2.4	22
2.5	24
4.1	40
4.2	45
4.3	46
4.4	53
4.5	54
4.6	65
ก.1	76
ค.1	84
จ.1	87

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ปริมาณการใช้พลังงานทั่วโลกในปี พ.ศ. 2533 – 2578	4
2.2 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเหลวทั่วโลกภายในปี พ.ศ. 2551 - 2578	5
2.3 โครงสร้างของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน	6
2.4 กรดแนฟทีนิก	9
2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน	14
2.6 รูปแบบของไอโซเทอมของการดูดซับที่จำแนกโดย IUPAC	17
2.7 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์	18
2.8 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนดิช	19
2.9 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์	23
2.10 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์	25
2.11 แหล่งที่มาและชนิดของของแข็งที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย	28
3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง	33
3.2 กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย	35
3.3 กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียผ่านการทำความสะอาดแล้ว	36
3.4 แผนภาพการดำเนินการของการไดซัลไฟไรเซชันของกากตะกอน และการคาร์บอนไนซ์ถ่านชาร์	37
4.1 ผลการวิเคราะห์การสลายตัวของกากตะกอนด้วยเทคนิค TGA	41
4.2 ลักษณะพื้นผิวของกากตะกอนและถ่านชาร์ที่ได้จาก SEM	42
4.3 ค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์	43
4.4 ความสามารถในการดูดซับเมทิลลินบลูของถ่านกัมมันต์	43
4.5 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จาก SEM	44
4.6 ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	47
4.7 ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์	48

ภาพที่	หน้า
4.8 ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ ถูกกระตุ้นด้วยกรดไนตริก	48
4.9 ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนทั้งหมดบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์	49
4.10 ความสามารถในการดูดซับไดเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล – ออกเทน	50
4.11 ร้อยละการขจัดไดเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล – ออกเทนของถ่านกัมมันต์	51
4.12 ความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ของความสามารถในการดูดซับไดเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล – ออกเทน	55
4.13 ส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของความสามารถในการดูดซับ ไดเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล – ออกเทน	55
4.14 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ	56
4.15 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ที่มีผลต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชัน ที่มีออกซิเจน	57
4.16 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ที่มีผลต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชัน ที่มีออกซิเจนทั้งหมด	58
4.17 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ	59
4.18 ผลของความเร็วยวอบในการเขย่าที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ	60
4.19 ผลของอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไดเบนโซไทโอพีนที่มีผลต่อ ความสามารถในการดูดซับ	61
4.20 ร้อยละการขจัดไดเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล – ออกเทนของถ่านกัมมันต์	62
4.21 ความเข้มข้นของไดเบนโซไทโอพีนในนอร์มัล – ออกเทนกับปริมาณ ไดเบนโซไทโอพีนที่ถูกดูดซับในถ่านกัมมันต์ที่ภาวะสมดุล	63
4.22 ไอโซเทอมของการดูดซับไดเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล – ออกเทน ด้วยถ่านกัมมันต์แบบแลงเมียร์	64
4.23 ไอโซเทอมของการดูดซับไดเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล – ออกเทน ด้วยถ่านกัมมันต์แบบฟรุนดิช	65
ง.1 กราฟมาตรฐานของไดเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทน	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

กำมะถันหรือซัลเฟอร์เป็นธาตุในตารางธาตุที่มีสัญลักษณ์ S และเลขอะตอม 16 กำมะถันในรูปแบบปกติเป็นผลึกของแข็งสีเหลืองเป็นอโลหะที่ไม่มีรสหรือกลิ่น กำมะถันในธรรมชาติพบได้หลายรูปแบบ เช่น ซัลเฟอร์ซัลเฟต (Sulfate sulfur) ซัลเฟอร์ซัลไฟด์ (Sulfide sulfur) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide, SO₂) เป็นต้น กำมะถันแต่ละชนิดมีประโยชน์และโทษแตกต่างกัน เช่น ถ้าสัมผัส SO₂ โดยตรงในระยะเวลา 1 ถึง 6 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 1 ส่วนในล้านส่วน (ppm, พีพีเอ็ม) จะมีผลทำให้การทำงานของปอดลดลง เมื่อสัมผัสนาน 10 ถึง 30 นาที ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 5 พีพีเอ็ม จะมีอาการแสบหน้าอก เมื่อ SO₂ อยู่ในชั้นบรรยากาศเมื่อฝนตกจะทำให้ปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นกรดซัลฟูริก (Sulfuric acid, H₂SO₄) ทำให้เกิดฝนกรดส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ด้วยเช่นกัน โดย SO₂ ที่พบไม่ได้มาจากธรรมชาติเพียงอย่างเดียวเท่านั้นแต่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับการคมนาคม อุตสาหกรรม และเกษตรกรรม (Büchel และคณะ, 2000; ATSDR, 1998)

น้ำมันดีเซลเป็นน้ำมันที่ใช้สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลที่เป็นเครื่องจักรสำหรับกระบวนการต่าง ๆ และยานพาหนะ ซึ่งน้ำมันดีเซลจะได้ออกมาจากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันดิบที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส น้ำมันดีเซลจะประกอบด้วยส่วนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (Saturated hydrocarbon) ร้อยละ 75 ได้แก่ นอร์มัล-พาราฟิน (n-paraffin) ไอโซ-พาราฟิน (iso-paraffin) และไซโคลพาราฟิน (Cycloparaffin) และสารประกอบแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic hydrocarbon) ร้อยละ 25 ได้แก่ แนฟทาลีน (Naphthalene) และแอลคิลเบนซีน (Alkylbenzene) ซึ่งในน้ำมันปิโตรเลียมดิบที่นำมากลั่นประกอบด้วยสิ่งเจือปนต่างๆ มากมายรวมทั้งกำมะถันซึ่งมีอยู่ร้อยละ 0.001 - 7 ดังนั้นก่อนการนำไปใช้งานจึงต้องมีการกำจัดกำมะถันออกก่อน ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี (ปราโมทย์, 2548) ได้แก่ การใช้ไฮโดรเจน (Hydrogen desulfurization) การใช้สารละลายเคมี (Wet treating process) การทำให้หวาน (Sweetening process) ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีข้อเสียหลายประการ เช่น การใช้ไฮโดรเจนต้องดำเนินการที่ความดันและอุณหภูมิสูงทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เสื่อมสภาพเร็ว ส่วนการใช้สารละลายเคมีและการทำให้หวานจะทำให้เกิดของเสียเป็นจำนวนมากและมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งยากในการกำจัด แต่มีอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถกำจัดกำมะถันได้และกำลังได้รับความสนใจอยู่ในขณะนี้ คือ วิธีการดูดซับ

เนื่องจากวิธีการดูดซับเป็นวิธีที่ดำเนินการที่ไม่อันตราย และง่ายต่อการดำเนินการ งานวิจัยนี้สนใจศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียเพื่อขจัดสารประกอบกำมะถันต้นแบบ (Model compound) คือ ไดเบนโซไทโอเฟน (Dibenzothiophene) จากนอร์มัล-ออกเทน (*n*-octane) โดยตัวดูดซับที่ใช้คือถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย
2. หาภาวะที่เหมาะสมในการขจัดไดเบนโซไทโอเฟนจากนอร์มัล-ออกเทน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

เตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไดเบนโซไทโอเฟนจากนอร์มัล-ออกเทนด้วยเครื่องยูวี-สเปกโทโฟโตมิเตอร์ (UV-spectrophotometer) เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ
2. จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการดำเนินงานวิจัย
3. วิเคราะห์สมบัติของกากตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียโดยวิธี Proximate analysis
4. ศึกษาปัจจัยที่มีผลในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียต่อความสามารถในการดูดซับไดเบนโซไทโอเฟนจากนอร์มัล-ออกเทน
 - (ก) ปัจจัยในการกระตุ้น (Activation) ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที โดยตัวแปรที่จะศึกษาคือ
 - ชนิดของสารกระตุ้น ได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl₂) และกรดไนตริก (HNO₃)

- อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อถ่านกัมมันต์อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 6 โดยน้ำหนัก
 - เวลาในการกระตุ้นในช่วง 0.5 ถึง 48 ชั่วโมง
 - อุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) ในช่วง 400 ถึง 800 องศาเซลเซียส
 - เวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ในช่วง 0.5 ถึง 2 ชั่วโมง
- (ข) วิเคราะห์สมบัติการตกตะกอนที่ผ่านการไพโรไลส์และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate) การสลายตัวทางความร้อน (TGA) ค่าไอโอดีน ความสามารถในการดูดซับเมทิลลีนบลู ลักษณะพื้นผิวและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์
5. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไดเบนโซไทโอเฟนจากนอร์มัล-ออกเทน โดยตัวแปรที่ศึกษา คือ
- ความเร็วรอบในการเขย่าอยู่ในช่วง 100 ถึง 300 รอบต่อนาที
 - อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไดเบนโซไทโอเฟนอยู่ในช่วง 1:0.01 ถึง 1:1.20 โดยน้ำหนัก
6. ศึกษาแบบจำลองของการดูดซับไดเบนโซไทโอเฟนของถ่านกัมมันต์
7. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เป็นแนวทางสำหรับการนำของเสียจากอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์

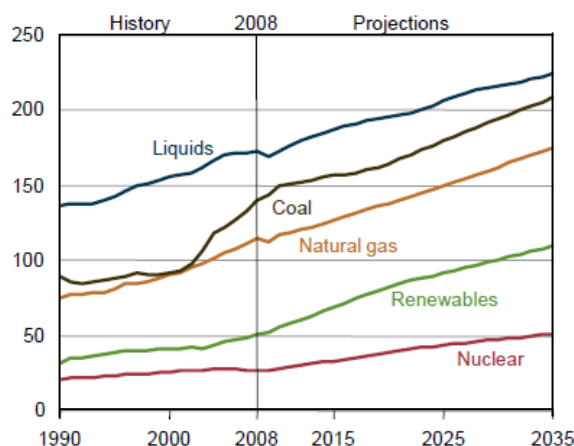
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พลังงานที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับความต้องการในการนำไปใช้ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

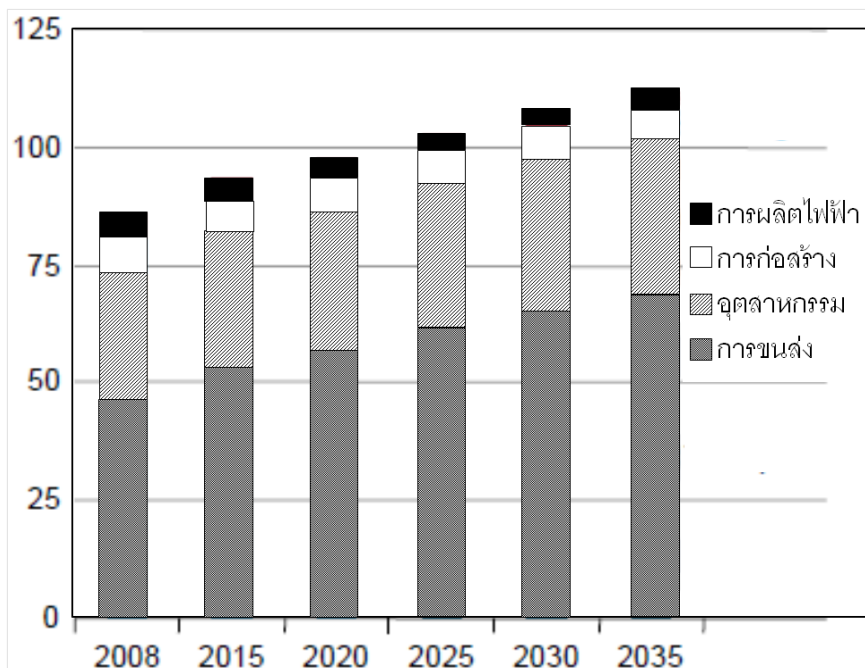
1. พลังงานใช้แล้วไม่หมดไป (Renewable energy) เช่น น้ำ แสงแดด ลม ชีวมวล เป็นต้น
2. พลังงานที่ใช้แล้วหมดไป (Non-renewable energy) เช่น พลังงานนิวเคลียร์ (Nuclear energy) พลังงานที่ได้จากฟอสซิล (Fossil) มีอยู่ 3 ชนิด คือ เชื้อเพลิงเหลว (Liquid fuel) แก๊สธรรมชาติ (Natural gas) และถ่านหิน (Coal)

จากการรวบรวมข้อมูลและการประเมินสถานการณ์การใช้พลังงานภายในปี พ.ศ. 2533 จนถึงปี พ.ศ. 2578 (ค.ศ. 1990 – ค.ศ. 2035) โดย EIA (Energy information administration) พบว่าพลังงานที่ถูกนำไปใช้มากที่สุดคือ เชื้อเพลิงเหลว ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ พลังงานที่ใช้แล้วไม่หมดไปและพลังงานนิวเคลียร์ ตามลำดับดังภาพที่ 2.1 โดยส่วนใหญ่เชื้อเพลิงเหลวจะถูกนำไปใช้ในการขนส่ง (Transportation) อุตสาหกรรม (Industrial) การก่อสร้าง (Buildings) และการผลิตไฟฟ้า (Electric power) ตามลำดับ ดังภาพที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณการใช้ในส่วนของอุตสาหกรรมและการขนส่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ในส่วนของ การก่อสร้างและการผลิตไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง โดยเชื้อเพลิงเหลวที่ใช้ในการขนส่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของน้ำมันดีเซลและน้ำมันเบนซิน ซึ่งได้มาจากน้ำมันดิบ (Crude oil) หรือปิโตรเลียม (Petroleum)



ภาพที่ 2.1 ปริมาณการใช้พลังงานทั่วโลกภายในปี พ.ศ. 2533 – 2578 (10^{15} บีทียู (BTU))

(EIA, 2011)



ภาพที่ 2.2 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเหลวทั่วโลกภายในปี พ.ศ. 2551–2578
(10³ บาร์เรล (Barrel) ต่อวัน) (EIA, 2011)

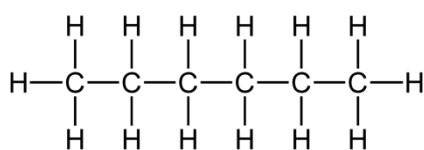
2.1 องค์ประกอบของน้ำมันปิโตรเลียม

น้ำมันปิโตรเลียมดิบ หรือน้ำมันดิบโดยส่วนใหญ่จะประกอบด้วยธาตุไฮโดรเจน (Hydrogen) และคาร์บอน (Carbon) เป็นหลัก ซึ่งเรียกว่าสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) และมีธาตุอื่น ๆ ปะปนอยู่ด้วย ได้แก่ ออกซิเจน (Oxygen) ไนโตรเจน (Nitrogen) และกำมะถัน (Sulfur) รวมทั้งโลหะ และสารอนินทรีย์บางชนิด (Nelson, 1985; ปราโมทย์ไชยเวช, 2548)

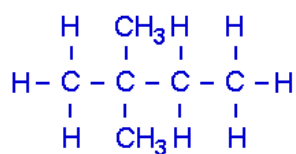
2.1.1 ไฮโดรคาร์บอนที่พบได้ในน้ำมันดิบ มีดังนี้

1. พาราฟิน (Paraffin) สูตรโครงสร้าง คือ C_nH_{2n+2} แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ พาราฟินแบบสายตรง (Straight-chain paraffin hydrocarbons) และพาราฟินแบบกิ่ง (Branched-chain paraffin hydrocarbons) (ภาพที่ 2.3 ก และ ข)
2. โอลิฟิน (Olefin) สูตรโครงสร้าง คือ C_nH_{2n} ไฮโดรคาร์บอนรูปแบบนี้เป็นไฮโดรคาร์บอนแบบสายตรงชนิดไม่อิ่มตัว มีพันธะคู่ (Double bonds) เชื่อมระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน 1 ตำแหน่ง (ภาพที่ 2.3 ค)
3. แนฟทีน (Naphthene) สูตรโครงสร้าง คือ C_nH_{2n} ไฮโดรคาร์บอนรูปแบบนี้จะมีลักษณะเป็นวง (Cyclic compounds) (ภาพที่ 2.3 ง)

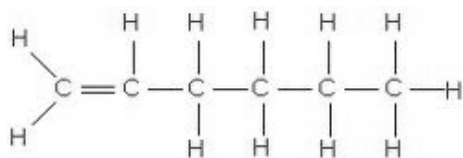
4. แอโรแมติก (Aromatic) สูตรโครงสร้าง คือ C_nH_{2n-2} หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เบนซีน (Benzene) ไฮโดรคาร์บอนรูปแบบนี้เป็นไฮโดรคาร์บอนแบบวง โดยในวงจะมีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว (Single bonds) (ภาพที่ 2.3 จ)
5. ไดโอเลฟิน (Diolenin) สูตรโครงสร้าง คือ C_nH_{2n-6} ไฮโดรคาร์บอนรูปแบบนี้มีลักษณะคล้ายโอเลฟินยกเว้นจำนวนอะตอมของไฮโดรเจนที่ลดลงจำนวน 2 อะตอม และจำนวนพันธะคู่มี 2 ตำแหน่ง (ภาพที่ 2.3 ฉ)



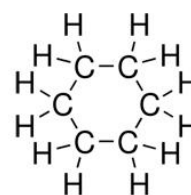
(ก) นอร์มัล-เฮกเซน (*n*-Hexane, C_6H_{14})



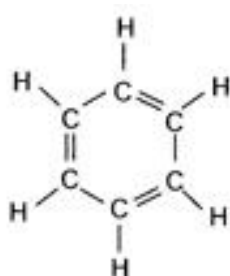
(ข) 2,2-ไดเมทิลบิวเทน
(2,2 Dimethylbutane, C_6H_{14})



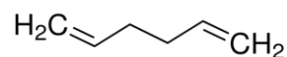
(ค) นอร์มัล-เฮกซีน (*n*-Hexene, C_6H_{12})



(ง) ไซโคลเฮกเซน
(Cyclohexane, C_6H_{12})



(จ) เบนซีน (Benzene, C_6H_6)



(ฉ) เฮกซะไดอีน
(Hexadiene-1,5, C_6H_{10})

ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Nelson, 1985; ปราโมทย์ ไชยเวช, 2548)

2.1.2 สารปนเปื้อนที่พบได้ในน้ำมันดิบ มีดังนี้

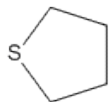
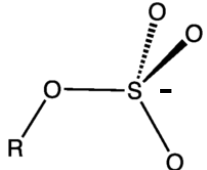
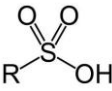
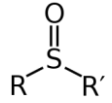
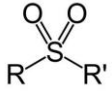

1. สารประกอบกำมะถัน ปริมาณกำมะถันที่พบในน้ำมันดิบมีประมาณร้อยละ 0.04 – 5 โดยน้ำหนักขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบ สารประกอบกำมะถันที่อยู่ในน้ำมันดิบมีโครงสร้างซับซ้อนและสลายตัวเมื่อถูกความร้อนเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ หรือแก๊สไข่เน่า และสารอินทรีย์ที่มีกำมะถัน (Organic sulfur compounds) ที่มีโครงสร้างที่ง่ายกว่า ซึ่งสามารถพบได้หลายรูปแบบ แสดงดังตารางที่ 2.1 สารประกอบกำมะถันบางชนิดไม่พบในน้ำมันดิบแต่พบได้หลังจากผ่านกระบวนการกลั่น (Distillation) แสดงดังตารางที่ 2.2

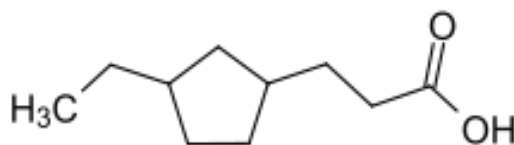
สารประกอบกำมะถันที่มีอยู่ในน้ำมันดิบจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการผลิตเสื่อมคุณภาพ รวมทั้งสารประกอบกำมะถันเมื่อเผาไหม้แล้วเกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อทำให้อากาศเป็นพิษ และเมื่อแก๊สที่เกิดขึ้นรวมตัวกับน้ำจะทำให้เกิดกรดซัลฟูรัส (Sulfurous acid, H_2SO_3) และ กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H_2SO_4) ทำให้เครื่องมืออุปกรณ์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดกำมะถันในน้ำมันดิบออก

2. สารประกอบออกซิเจน ปริมาณออกซิเจนที่พบในน้ำมันดิบมีประมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก พบในน้ำมันได้ 3 ลักษณะ คือ
 - ก. กรดอินทรีย์ (Organic acid) หรือ กรดแนฟทีนิก (Naphthenic acid) (ภาพที่ 2.4) ซึ่งมีหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic group) อาจพบเพียงหมู่เดียวหรือหลายหมู่ติดต่อกับไฮโดรคาร์บอน ถ้าในน้ำมันดิบมีกรดเหล่านี้มากจะทำให้เครื่องมืออุปกรณ์ได้
 - ข. ฟีนอล (Phenol) หรือสารในตระกูลเดียวกัน คือ ครีซอล (Cresol)
 - ค. สารอื่น ๆ เช่น เอสเทอร์ (Ester) เอไมด์ (Amide) คีโตน (Ketone)
3. สารประกอบไนโตรเจน ปริมาณไนโตรเจนที่พบในน้ำมันดิบมีประมาณร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก พบในรูปของไนโตรเจนที่เป็นต่าง หรือเป็นกลาง ถ้าไนโตรเจนที่เป็นต่างอยู่ในน้ำมันเบนซิน หรือน้ำมันก๊าดจะเปลี่ยนสีน้ำมันให้เข้มขึ้น แต่ถ้าอยู่ในน้ำมันเครื่องเมื่อนำไปใช้งานจะทำให้เกิดยางเหนียว
4. สารประกอบอนินทรีย์ ในน้ำมันดิบมีสารประกอบอนินทรีย์อยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ น้ำและเกลือ โดยเกลือทุกชนิดส่งผลกระทบต่อเครื่องมือที่ใช้ในการกลั่นน้ำมัน เนื่องจากจะทำให้เกิดคราบตะกอนและโค้กในเครื่องมือ

5. สารประกอบอินทรีย์ที่มีโลหะ โลหะที่พบได้แก่ วาเนเดียม (Vanadium) และนิกเกิล (Nickel) แต่พบในปริมาณน้อย แต่ถ้ามีการสะสมในน้ำมันเตามากเกินไปจะทำให้น้ำมันมีปริมาณกำมะถันสูง ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนปล่องไฟได้

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างของสารประกอบกำมะถัน (Nelson, 1985)

สารประกอบกำมะถัน	โครงสร้าง
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogensulfide)	$H-S-H$
เมอร์แคปแทน	$R-S-H$
ซัลไฟด์	$R-S-R'$
ไดซัลไฟด์ (Disulfide)	$R-S-S-R'$
ไซคลิกซัลไฟด์ (Cyclic sulfide)	
แอลคิลซัลเฟต (Alkyl sulfate)	
กรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid)	
ซัลฟอกไซด์ (Sulfoxide)	
ซัลโฟน (Sulfone)	
ไทโอเฟน	



ภาพที่ 2.4 กรดเนแฟนทินิก

ตารางที่ 2.2 สารประกอบกำมะถันที่พบในน้ำมันดิบ (Song, 2003)

สารประกอบกำมะถัน	โครงสร้าง
เมอร์แคปแทน	R - S - H
ซัลไฟด์ (Sulfides)	R - S - R'
ไทโอฟิน (Thiophene)	
เบนโซไทโอฟิน (Benzothiophene)	
ไดเบนโซไทโอฟิน (Dibenzothiophene)	
4, 6-ไดเมทิลไดเบนโซไทโอฟิน (4, 6-Dimethyldibenzothiophene)	

2.2 มาตรฐานของน้ำมันดีเซล

จากองค์ประกอบของน้ำมันดิบจะเห็นได้ว่ามีสารปนเปื้อนหลายชนิด ซึ่งสารปนเปื้อนดังกล่าวถึงแม้ว่าจะมีปริมาณไม่มากนักแต่ส่งผลต่อคุณภาพน้ำมันเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะเมื่อนำน้ำมันไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ เช่น น้ำมันดีเซล สารปนเปื้อนเหล่านี้โดยเฉพาะกำมะถันถูกปล่อยสู่บรรยากาศซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ รวมทั้งเมื่อมีการเผาไหม้เครื่องมือที่ใช้ในการทำงานก็อาจเสียหายได้ ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ในระดับที่เพิ่มมากขึ้นจึงมีมาตรการด้านสิ่งแวดล้อมที่มีความเข้มงวดมากขึ้น โดยมีการควบคุมระดับของกำมะถันในน้ำมันเชื้อเพลิงให้อยู่ในระดับที่ต่ำมาก (ต่ำกว่า 50 ส่วน

ในล้านส่วน) ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน เพื่อรองรับเทคโนโลยียานยนต์ที่ได้มีการพัฒนาเพื่อลดปัญหามลพิษตามแนวทางของมาตรฐานน้ำมันเชื้อเพลิง EURO4 โดยการปรับปรุงจากมาตรฐานคุณภาพน้ำมันที่บังคับใช้อยู่เดิมแสดงดังตารางที่ 2.3 จึงเป็นเหตุผลสำคัญที่จะต้องหาแนวทางในการขจัดกำมะถันออกจากน้ำมันเชื้อเพลิงให้มากขึ้น

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล ฉบับที่ 5 พ.ศ. 2554

(สำนักนโยบายและพลังงาน, 2554)

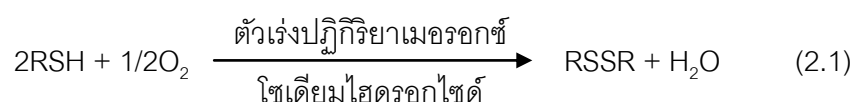
ข้อกำหนด	อัตรา สูงต่ำ	น้ำมันดีเซล		วิธีทดสอบ
		หมุนเร็ว	หมุนช้า	
ความถ่วงจำเพาะ ที่อุณหภูมิ 15.6/15.6 องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	0.81 0.87	- 0.920	ASTM D 1298
จำนวนซีเทน ก่อนวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555 ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555	ไม่ต่ำกว่า ไม่ต่ำกว่า	47 50	45 45	ASTM D 613
ความหนืด (เซนติสโตกส์) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส หรือ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า ไม่สูงกว่า	1.8 4.1 -	- 8.0 6.0	ASTM D 445
จุดไหลเท (องศาเซลเซียส)	ไม่สูงกว่า	10	16	ASTM D 97
กำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ก่อนวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555 ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555	ไม่สูงกว่า ไม่สูงกว่า	0.035 0.005	1.5 1.5	ASTM D 4294 ASTM D 2622
การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	-	ASTM D 130
เสถียรภาพต่อการเกิด ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ไม่สูงกว่า	25	-	ASTM D 2274

ข้อกำหนด	อัตรา สูงต่ำ	น้ำมันดีเซล		วิธีทดสอบ
		หมุนเร็ว	หมุนช้า	
กากถ่าน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.05	-	ASTM D 189
น้ำและตะกอน (ร้อยละโดยปริมาตร)	ไม่สูงกว่า	0.05	0.3	ASTM D 2709
เถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.01	0.02	ASTM D 482
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	ไม่ต่ำกว่า	52	52	ASTM D 93
การกลั่น (องศาเซลเซียส) อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดย ปริมาตรในอัตราร้อยละ 90	ไม่สูงกว่า	357	-	ASTM D 86
พอลิไซคลิกแอโรแมติก ไฮโดรคาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555	ไม่สูงกว่า	11	-	ASTM D 2425
สี ชนิดของสี ความเข้มของสี	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	เหลือง - 4.0	น้ำตาล 4.5 7.5	ASTM D 1500
คุณสมบัติการหล่อลื่น รอยขีด ข่วน (ไมโครเมตร)	ไม่สูงกว่า	460	-	CEC F-06-96
ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอ์ ของกรดไขมัน (ร้อยละโดย ปริมาตร)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	3 5	- -	EN 14078
สารเติมแต่ง (ถ้ามี)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจาก อธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน			

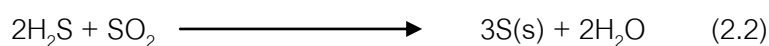
2.3 กระบวนการกำจัดกำมะถัน

วิธีการกำจัดมีด้วยกันหลายวิธี (Nelson, 1985; ปราโมทย์ไชยเวช, 2548) ดังนี้

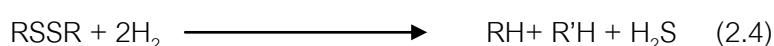
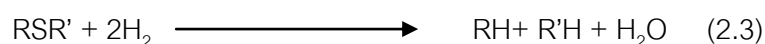
2.3.1 กระบวนการทำให้หวาน (Sweetening process) เนื่องจากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียมสามารถกำจัดสารประกอบกำมะถันบางชนิด เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แต่ไม่สามารถขจัดเมอร์แคปแทนได้ ดังนั้นก่อนนำปิโตรเลียมไปใช้งานจึงต้องมีการขจัดเมอร์แคปแทนออกซึ่งสามารถดำเนินการได้โดยการเปลี่ยนเมอร์แคปแทนให้อยู่ในรูปของสารประกอบกำมะถันอื่น คือ ไตซัลไฟด์ ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อเครื่องมือ ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน และไม่เหม็น โดยการเติมออกซิเจนและใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) เพื่อให้เมอร์แคปแทนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ ซึ่งกระบวนการที่นิยม คือ กระบวนการเมอร์ออกซ์ (Merox process) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นสารอินทรีย์ที่มีโลหะแมงกานีสอยู่ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นดังปฏิกิริยาที่ 2.1

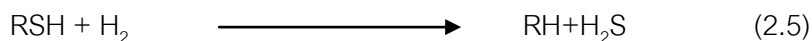


2.3.2 ไฮโดรดีซัลฟิเดชัน (Hydro desulfurization) เป็นวิธีขจัดกำมะถันออกจากน้ำมันเชื้อเพลิงผ่านปฏิกิริยาเคมีบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาในภาวะที่มีไฮโดรเจน (Hydrogen, H₂) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ข้อดีของกระบวนการนี้คือ เมื่อแก๊สไฮโดรเจนเข้ามาทำปฏิกิริยากับสารประกอบกำมะถันจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยตรง และไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกแยกออกและเปลี่ยนเป็นธาตุกำมะถันด้วย Claus process ซึ่งไฮโดรเจนซัลไฟด์บางส่วนจะถูกออกซิไดส์เป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยอากาศและจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เป็นกำมะถันของแข็งดังปฏิกิริยาที่ 2.2



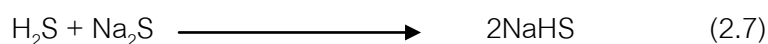
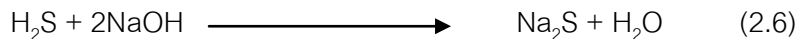
เมอร์แคปแทนและซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนดังปฏิกิริยาที่ 2.3 – 2.5 เมื่อ R และ R' คือ ไฮโดรคาร์บอนต่างๆ



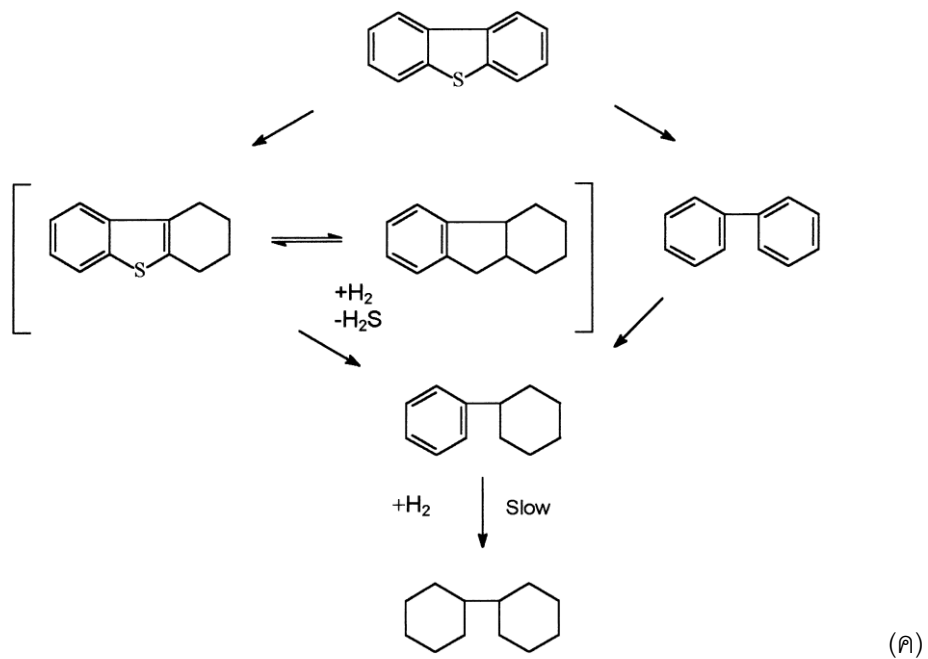
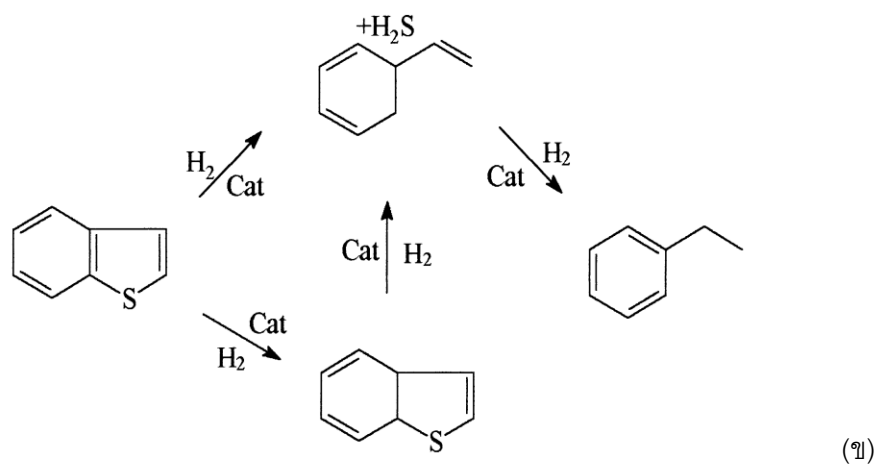
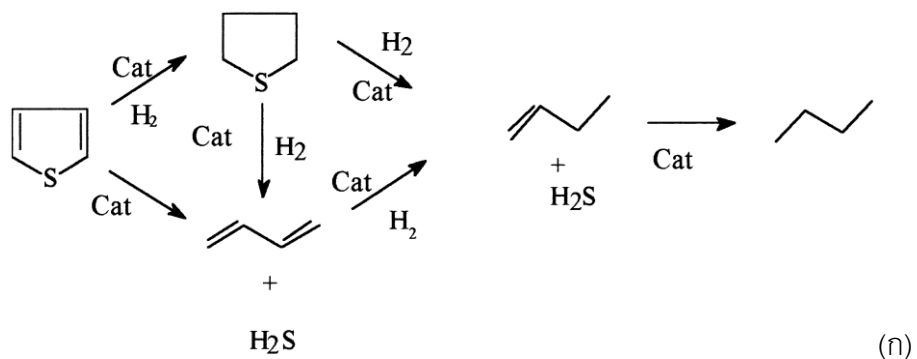


ไฮโดรดีซัลไฟด์เฟอโรเซชันของไทโอพีน เบนโซไทโอพีน และ ไดเบนโซไทโอพีน แสดงดังภาพที่ 2.5 โดยในการทำปฏิกิริยาต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด คือ โคบอลต์-โมลิบดีนัม (Co/Mo) และนิกเกิล-โมลิบดีนัม (Ni/Mo) โลหะโคบอลต์ นิกเกิลและโมลิบดีนัม มีความจำเพาะเจาะจงสูงในการเปลี่ยนกำมะถัน ออกซิเจน ไนโตรเจน ที่มีอยู่ในสารอินทรีย์ให้เป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ น้ำและแอมโมเนีย (Ammonia, NH_3)

2.3.3 การใช้สารเคมี (Wet treating process) วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายซึ่งสามารถกำจัดทั้งกำมะถัน ไนโตรเจน ออกซิเจน รวมทั้งยังกำจัดโอเลฟินส์ (Olefin) ด้วยสารเคมี เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากสารที่ต้องการกำจัดส่วนใหญ่แล้วเป็นสารประเภทกรดซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ดี ปฏิกิริยาที่เกิดแสดงดังสมการ 2.6 และ 2.7



ตัวทำละลายที่ใช้มักเป็นสารอินทรีย์ เนื่องจากตัวทำละลายมีฤทธิ์เป็นด่างอ่อนๆ จึงสามารถดูดซับกรดได้ ตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นสารประเภทเอมีน เช่น ไดเอทานอลามีน (Di-Ethanolamine, DEA) โมโนเอทานอลามีน (Mono-Ethanolamine, MEA) ไดไอโซโพรพานอลามีน (Di-isopropanolamine, DIPA) เป็นต้น การเลือกใช้ตัวทำละลายขึ้นอยู่กับภาวะของสารป้อน และปริมาณของสารป้อน



ภาพที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลไฟด์ของ (ก) ไทโอฟิน (ข) เบนโซไทโอฟิน (ค) ไดเบนโซไทโอฟิน (Shafi และ Hutchings, 2000)

2.3.4 การดูดซับ (Adsorption) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้กับการกำจัดกำมะถันออกจากน้ำมันดิบ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ดำเนินการได้ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ สามารถดูดซับสารที่อยู่ในภาวะแก๊สและของเหลวได้ สามารถแยกสารที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกันได้ และสามารถนำตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานมาฟื้นฟูสภาพและนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก โดย Bu และคณะ (2011) ใช้ถ่านกัมมันต์ทางการค้าในการกำจัดสารประกอบกำมะถันที่มีอยู่ในน้ำมันดีเซลจากโรงกลั่นน้ำมันเปรียบเทียบกับน้ำมันต้นแบบที่มีสารประกอบกำมะถันชนิดต่าง ๆ เช่น 4,6-ไดเมทิลไดเบนโซโทโอฟิน สารประกอบกำมะถันที่มีวงแโรแมติก 1 วง และ 2 วง เป็นต้น จากเฮกซะเดเคน (Hexadecane) ส่วน Ania และคณะ (2007) ได้นำพลาสติกที่ไม่ใช้แล้วมาทำเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ในการดูดซับไดเบนโซโทโอฟินจากเฮกเซน

2.4 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับสารสองสถานะซึ่งจะมีการสะสมความเข้มข้นของอนุภาคที่ผิวหน้าหรือระหว่างผิวของสารสองสถานะ โดยสารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่พื้นผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) โดยการเกาะติดบนพื้นผิวดังกล่าวจะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การเกาะติดทางกายภาพ และการเกาะติดทางเคมี ขึ้นกับสมบัติของตัวถูกดูดซับและสมบัติของพื้นผิวตัวดูดซับ (Satterfield, 1991; จตุพร และนุรักษ์, 2547)

2.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่ไม่แข็งแรงมากนักเนื่องจากไม่มีพันธะทางเคมีเกิดขึ้น โดยแรงที่ดึงดูดระหว่างอะตอมผิวหน้ากับตัวถูกดูดซับ คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) มีค่าความร้อนของการดูดซับต่ำ (น้อยกว่า 25 กิโลจูลต่อโมล) เป็นกระบวนการคายความร้อน ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation Energy) และไม่มี การแตกของพันธะ ดังนั้นจึงสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วเมื่อมีโมเลกุลเดินทางมาถึงผิวหน้า แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีความพรุนสูงอัตราการดูดซับจะช้าลง เนื่องจากถูกจำกัดด้วยอัตราเร็วของการแพร่ (Diffusion rate) การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับหลายชั้น (Multi-layer) และปริมาณของการดูดซับเป็นแบบไม่เลือก กล่าวคือขึ้นกับจุดเดือดของตัวถูกดูดซับ แต่ไม่ขึ้นกับชนิดของพื้นผิวและชนิดของตัวถูกดูดซับ

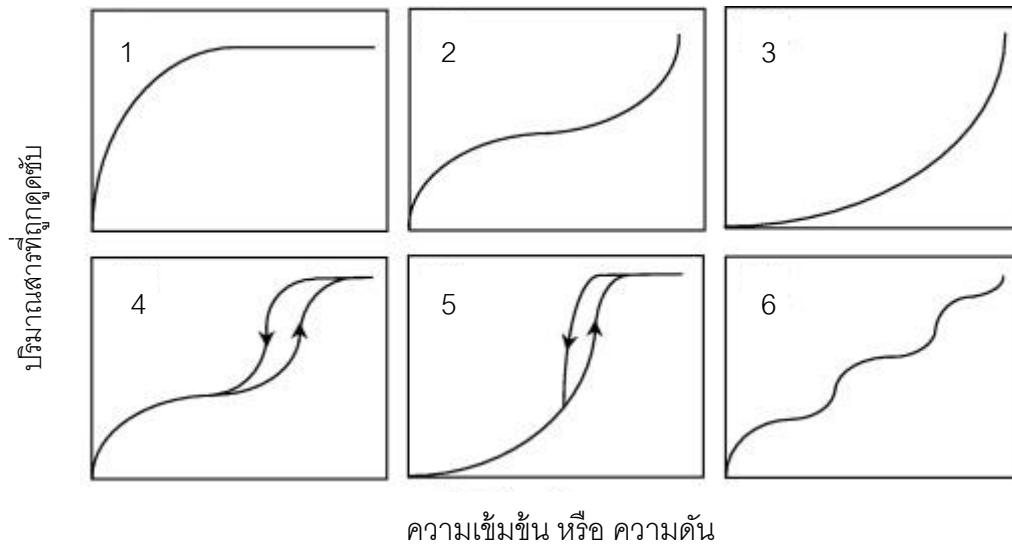
2.4.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่แข็งแรงเนื่องจากมีการเกิดพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ความร้อนของการดูดซับมี

ค่าประมาณ 60-85 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับแบบนี้เป็นแบบเฉพาะเจาะจง ขึ้นกับชนิดโมเลกุลสารและชนิดของผิวหน้า โดยเกิดขึ้นจากการใช้อิเล็กทรอนิกส์ร่วมกันระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ หรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กทรอนิกส์ และการเปลี่ยนรูปของพันธะเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ หลังการดูดซับโมเลกุลสารที่ผิวหน้าจะเป็นชั้นเดียว การที่จะให้การดูดซับด้วยแรงเชิงเคมีเข้าสู่สมดุลนั้นจะต้องใช้เวลานาน โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณที่ดูดซับที่ภาวะสมดุลจะขึ้นกับชนิดของระบบ ปริมาณของสารที่ดูดซับจะมีค่ามากที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของสารนั้นมาก และการดูดซับที่อุณหภูมิต่ำมักจะมีค่าน้อยเนื่องจากอัตราเร็วของการดูดซับมีค่าต่ำทำให้ไม่เกิดการอิ่มตัว เนื่องจากการดูดซับเชิงเคมีเกี่ยวข้องกับพันธะทางเคมีจึงมักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง และมีความสัมพันธ์กับพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ดังนั้นจึงทำให้โมเลกุลที่ถูกดูดซับติดอยู่ที่ใดที่หนึ่งเฉพาะที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้บนพื้นผิวดังกล่าว จึงอาจกล่าวได้ว่าการดูดซับเชิงเคมีเป็นปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับ (Irreversible reaction) และเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Mono-layer)

เมื่อกระบวนการดูดซับดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งอัตราการดูดซับและอัตราการคายซับมีค่าเท่ากัน ที่ภาวะต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิจึงที่ ความดันคงที่ เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงที่ภาวะอุณหภูมิจึงที่ที่ภาวะสมดุลของการดูดซับ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับและความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในสารละลายแล้วนำไปเขียนกราฟ โดยให้ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในสารละลายเป็นแกนนอน (แกน x) และปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับเป็นแกนตั้ง (แกน y) เส้นกราฟที่ได้เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) ซึ่งมีประโยชน์มากในการหาความสามารถในการดูดซับเพื่อเปรียบเทียบชนิดตัวดูดซับที่ดีที่สุด รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอมของการดูดซับในสารละลายมี 6 รูปแบบ แสดงดังภาพที่ 2.6

2.5 ไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับมีหลายรูปแบบเนื่องจากมีหลายทฤษฎีอธิบายสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ ทฤษฎีของแลงเมียร์ (Langmuir) และฟรุนดลิช (Freundlich)



ภาพที่ 2.6 รูปแบบของไอโซเทอมของการดูดซับที่จำแนกโดย IUPAC
(Carmody และคณะ, 2007)

2.5.1 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) เป็นไอโซเทอมที่ง่ายที่สุด โดยรูปแบบของการดูดซับเป็นแบบที่ 1 (ภาพที่ 2.6) ซึ่งใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียวและการดูดซับทางกายภาพ สมมุติฐานของการดูดซับมีดังนี้

1. โมเลกุลจะถูกดูดซับบนพื้นที่จำกัดของผิวตัวดูดซับ
2. พื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะจำกัดปริมาณของโมเลกุลที่จะดูดซับ
3. พลังงานของการดูดซับเหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ
4. แต่ละพื้นที่ของตัวดูดซับมีการดูดซับแบบชั้นเดียว
5. โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาหรือเคลื่อนที่ไปยังโมเลกุลข้างเคียงได้

จากสมมุติฐานสามารถเขียนเป็นสมการของแลงเมียร์ (Langmuir equation) ได้ดังนี้

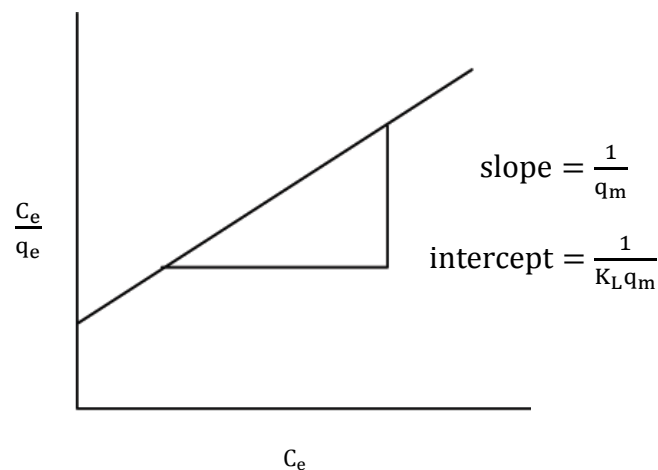
$$q_e = \frac{K_L q_m C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.1)$$

หรือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2.2)$$

- เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 K_L คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบแลงก์เมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

จากสมการที่ 2.2 เมื่อนำไปเขียนกราฟระหว่าง C_e กับ $\frac{C_e}{q_e}$ จะได้กราฟดังภาพที่ 2.7 ซึ่ง q_m และ K_L สามารถหาได้จากความชัน (Slope) และจุดตัดแกน (Intercept) ตามลำดับ โดยเมื่อ q_m มีค่ามากแสดงว่าตัวดูดซับที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับมาก และถ้า K_L มากแสดงว่าตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับดี



ภาพที่ 2.7 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงก์เมียร์

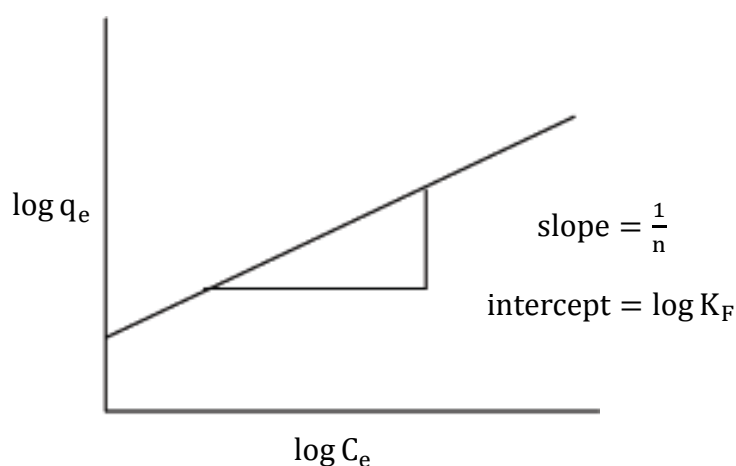
2.5.2 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm) เป็นไอโซเทอมที่ใช้กับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพโดยลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบหลายชั้น ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารถูกดูดซับกับความเข้มข้นที่ภาวะสมดุลแสดงดังสมการ

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2.3)$$

หรือ
$$\log q_e = \log K_F + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e \quad (2.4)$$

เมื่อ K_F คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบฟรอนดิช
 n คือ ค่าคงที่ที่มีผลขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลาย

เมื่อนำสมการที่ 2.4 ไปเขียนกราฟระหว่าง $\log C_e$ กับ $\log q$ ดังภาพที่ 2.8 ซึ่ง n และ K_F สามารถหาได้จากความชันและจุดตัดแกนตามลำดับ โดย n จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 ถ้าค่า n มากแสดงว่าตัวดูดซับที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับตัวถูกดูดซับได้ดี และถ้า K_F มากแสดงว่าตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับตัวถูกดูดซับได้ดี



ภาพที่ 2.8 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรอนดิช

2.6 ตัวดูดซับ (Adsorbent)

ตัวดูดซับที่ใช้สำหรับการดูดซับแก๊สและของเหลวส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแข็งแต่ต้องมีการเลือกเกิด (Selectivity) กับสารที่ถูกดูดซับ คุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของตัวดูดซับคือ ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของรูพรุน เป็นต้น โดยชนิดของตัวดูดซับมีดังนี้ (บุญชัย, 2536; ปรินทร, 2551; เตชา, 2552; Henley และคณะ, 2011)

2.6.1 อะลูมินาแกมมันต์ (Activated alumina, Al_2O_3) มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เหมาะสำหรับการดูดซับน้ำหรือความชื้นในแก๊ส ซึ่งจะมีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับน้ำให้มีปริมาณน้ำอยู่น้อยกว่า 1 ส่วนในล้านส่วน

2.6.2 ซิลิกาเจล (Silica gel, SiO_2) มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และเป็นตัวดูดซับที่ชอบดูดซับน้ำและโมเลกุลอื่น ๆ ที่มีขั้ว ขนาดของรูพรุนของซิลิกาเจลที่ใช้มีทั้งขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการนำไปใช้

2.6.3 ตัวกรองระดับโมเลกุล (Molecular sieve) มี 2 แบบ คือ แบบที่เป็นถ่าน (Carbon) และแบบที่เป็นซีโอไลต์ (Zeolite) ทั้งสองแบบมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 2 – 10 อังสตรอม แต่ตัวกรองระดับโมเลกุลแบบซีโอไลต์มีการเลือกเกิดสูงกว่าเพราะมีธาตุอยู่บนพื้นผิว เช่น โซเดียม (Sodium, Na) โพแทสเซียม (Potassium, K) เป็นต้น

2.6.4 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับชนิดหนึ่งซึ่งจะอยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous Carbon) ที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักและมีธาตุอื่นๆ ประกอบด้วย ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน โดยถูกผลิตขึ้นมาเป็นพิเศษด้วยกระบวนการก่อกัมมันต์ (Activation) ทำให้พื้นที่ผิวภายใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้นเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก เมื่อศึกษาด้วยเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffraction) หรือศึกษาโครงสร้างจากการสะท้อนและการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อตกกระทบวัตถุแล้วโครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีความเป็นผลึกอยู่บ้างแต่ไม่สมบูรณ์เหมือนแกรไฟต์ จากคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ถ่านกัมมันต์แตกต่างจากถ่านชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านลิกไนท์ ถ่านโค้ก ถ่านไม้ เป็นต้น โดยถ่านกัมมันต์จะมีความสามารถในการดูดซับสูงเนื่องจากมีพื้นที่ผิวมาก มีความจุในการดูดซับสูง ผิวโครงสร้างเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (Microporous structure) และมีความว่องไวในการดูดซับสูง โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขี้ขั้ว แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นที่ผิวหน้า และการจัดเรียงของอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนัล (Hexagonal) ทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับอื่นๆ เช่น ซิลิกาเจล (Silica Gel) เป็นต้น

1. ชนิดของถ่านกัมมันต์ ชนิดของถ่านกัมมันต์จำแนกตามเกณฑ์ต่างๆ คือ

(ก) จำแนกตามชนิดของตัวกระตุ้น

1) การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวคาร์บอน จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่

2) การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้แก๊สออกซิไดส์ จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก

(ข) จำแนกตามขนาดของรูพรุนบนผิวคาร์บอน

1) รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) ถ่านกัมมันต์มีขนาดรูพรุนไม่เกิน 2 นาโนเมตร มักใช้ในการดูดซับแก๊สหรือไอระเหย

- 2) รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) ถ่านกัมมันต์มีขนาดรูพรุนประมาณ 2-50 นาโนเมตร มักใช้ในปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reaction)
 - 3) รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) ถ่านกัมมันต์มีขนาดรูพรุนมากกว่า 50 นาโนเมตร มักใช้ในการฟอกสี และผลิตยา
- (ค) จำแนกตามความหนาแน่น
- 1) ความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ในภาวะที่เป็นสารละลาย เช่น การฟอกสีน้ำตาลดิบ การทำน้ำให้บริสุทธิ์ เป็นต้น
 - 2) ความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ในการดูดแก๊สพิษ หรือไอระเหย
- (ง) จำแนกตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ
- 1) การดูดซับแก๊ส (Gas adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับสารพิษ กลิ่น และไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเผาถ่านที่ได้จากเมล็ดผลไม้ หรือถ่านไม้ที่เผาที่ความดันสูง
 - 2) การดูดซับสี (Color adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสี ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเผาถ่านที่ได้จากถ่านไม้ ถ่านชานอ้อย ถ่านจากเกล็ด ถ่านจากถ่านหินน้ำมัน และ ถ่านจากกากน้ำตาล
 - 3) การดูดซับโลหะ (Metal adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวแยกพวกโลหะชนิดต่างๆ เช่น ถ่านที่ใช้ในการแยกทอง เงิน แพลทินัม และแร่
- (จ) จำแนกตามรูปร่างลักษณะ
- 1) ประเภทผง (Powder) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผง ใช้สำหรับฟอกสีในของเหลว ดูดกลิ่นในสารละลายได้หลายชนิด
 - 2) ประเภทเม็ด (Pellet) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
- ซึ่งคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผงและเม็ดตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 900-2547 ตามมาตรฐาน American Water Works Association (AWWA) ดังตารางที่ 2.4

(จ) จำแนกตามค่าความเป็นกรด-ด่างเมื่อละลายน้ำ

- 1) ถ่านกัมมันต์ชนิดแอล (L type) เป็นถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในสารละลายแล้วมีสมบัติเป็นกรด โดยส่วนใหญ่หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวเป็นหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl)
- 2) ถ่านกัมมันต์ชนิดเอช (H type) เป็นถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในสารละลายแล้วมีสมบัติเป็นด่าง โดยส่วนใหญ่หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิว ได้แก่ ควินิน (Quinine) ฟีนอล (Phenol) และ คาร์บอกซิเลท (Carboxylate)

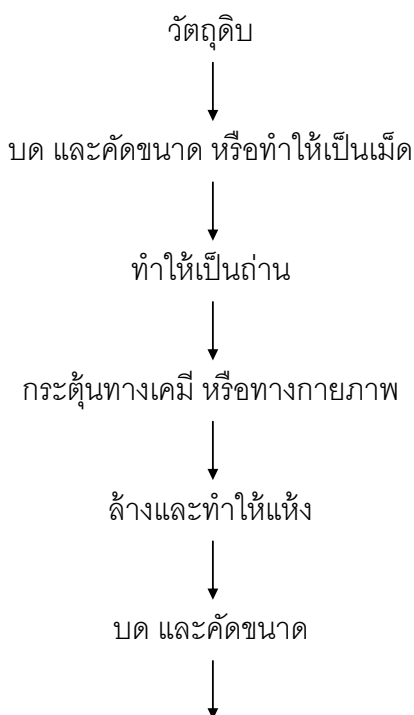
ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ (มาตรฐานอุตสาหกรรม, 2547)

คุณสมบัติเกณฑ์ที่กำหนด	ชนิดของถ่านกัมมันต์	
	ชนิดผง	ชนิดเม็ด
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600	600
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.20-0.75	ไม่น้อยกว่า 0.36
ความชื้น ร้อยละ 5 ไม่นเกิน	-	8
ความแข็ง ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	-	70

2. การผลิตถ่านกัมมันต์ (Processing of activated carbon)

ในการผลิตถ่านกัมมันต์มีด้วยกันหลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ ลักษณะ และสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปกระบวนการดังกล่าวประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆ 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ ขั้นตอนการทำให้เป็นถ่านหรือการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) และขั้นตอนการกระตุ้น แสดงดังภาพที่ 2.9

(ก) การเตรียมวัตถุดิบ ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้เลื่อย กะลามะพร้าว แกลบ เปลือกถั่ว เมล็ดผลไม้ ยางพลาستيك ถ่านหิน เป็นต้น ซึ่งการผลิตสามารถเริ่มจากวัตถุดิบได้โดยตรง หรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการผลิต แต่โดยทั่วไปแล้วมักนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำไปคาร์บอนไนซ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ แต่บางครั้งวัตถุดิบที่ใช้มีความแข็งและเหนียวทำให้การบดวัตถุดิบโดยตรงนั้นทำได้ยากก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปคาร์บอนไนซ์ก่อนแล้วจึงนำมาบดคัดขนาดก็ได้



ภาพที่ 2.9 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ (Demirbas, 2009)

(ข) การทำให้เป็นถ่านหรือคาร์บอนในเซชันเป็นกระบวนการไพโรไลซิสที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่านชาร์ (Char) ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (Tar) และแก๊ส อาจกล่าวได้ว่าการคาร์บอนในเซชันเป็นการเพิ่มปริมาณของคาร์บอนให้สูงขึ้นสามารถทำได้ง่าย โดยการเผาในที่อับอากาศที่อุณหภูมิ 200 – 500 องศาเซลเซียส

คาร์บอนในเซชันเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของการทำให้โครงสร้างมีรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน ออกมาในรูปของแก๊ส คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันอยู่ในรูปของถ่านชาร์ โดยลักษณะของถ่านชาร์ที่ได้จากคาร์บอนในเซชันควรมีลักษณะ ดังต่อไปนี้

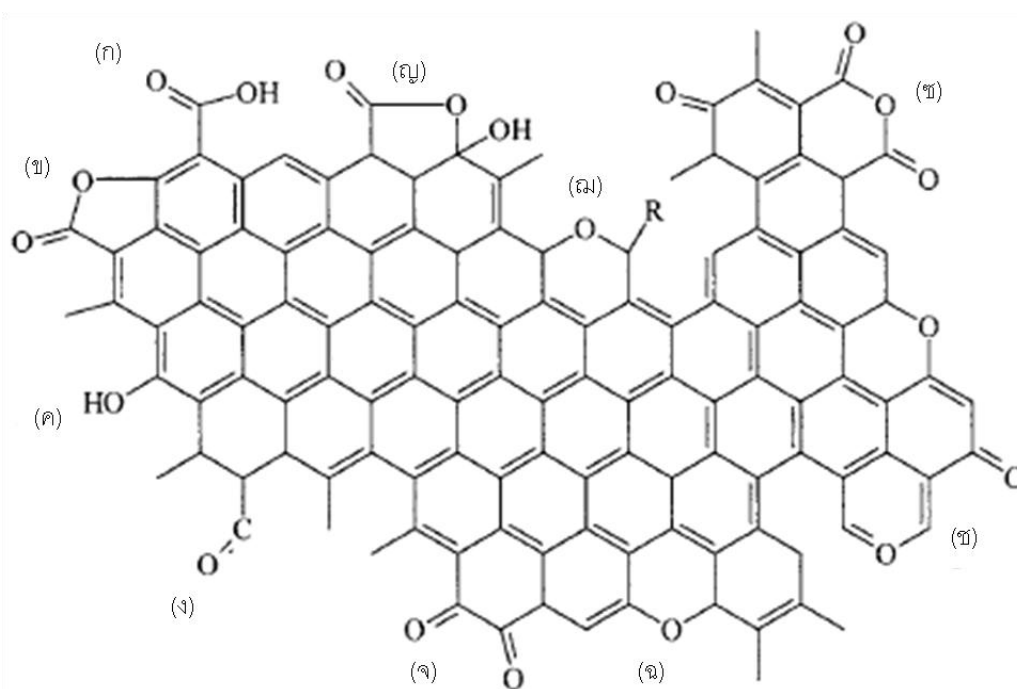
- 1) มีสีดำสม่ำเสมอ (Uniformly black)
- 2) เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวที่เป็นมันเงา (Shiny surface)
- 3) ปลายที่หักจะแหลมคม (Sharp)
- 4) ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า

(ค) การกระตุ้น (Activation) คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับที่สูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวของถ่านมีความว่องไวมากขึ้น โดยการกระตุ้นถ่านกัมมันต์แบ่งได้ 2 ประเภท คือ

- 1) วิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวของคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ข้อดีของวิธีการนี้คือ ใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก (400 – 600 องศาเซลเซียส) แต่มีข้อเสียคือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวออก รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องสามารถทนการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อน ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นแสดงดังตารางที่ 2.5
- 2) วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ การเปลี่ยนแปลงขนาดรูพรุน เป็นต้น ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ให้สูงขึ้น โดยนิยมใช้แก๊สออกซิไดส์ต่างๆ เช่น ไอน้ำ อิมัตวียังยวด (Steam) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แก๊สออกซิเจน (O₂) และอากาศ (Air) เป็นต้น ซึ่งจะทำงานร่วมกับความร้อน ปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียวก็ได้ แต่ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงถึง 1200 องศาเซลเซียส แต่พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดส์ข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพคือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าการกระตุ้นทางเคมี (700 – 1200 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 2.5 สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์ (Ioannidou และ Zabaniotou, 2007; Smith และคณะ, 2009)

ชนิดที่เป็นกรด	ชนิดที่เป็นด่าง	ชนิดที่เป็นเกลือ
กรดฟอสฟอริก (H ₃ PO ₄)	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl ₂)
กรดไนตริก (HNO ₃)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	โพแทสเซียมซัลไฟด์ (K ₂ S)
กรดซัลฟูริก (H ₂ SO ₄)		โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K ₂ CO ₃)
กรดไฮโดรคลอริก (HCl)		



ภาพที่ 2.10 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีจะมีลักษณะทางเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แตกต่างกันไป (Bandosz และ Ania, 2006) โดยหมู่ฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ พื้นผิวที่เป็นกรดจะพบเมื่อคาร์บอนทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง หมู่ฟังก์ชันที่พบได้แก่ คาร์บอกซิล (ภาพที่ 2.10 ก) แลคโตน (ภาพที่ 2.10 ข) ไฮดรอกซิล (ภาพที่ 2.10 ค) และคาร์บอนิล (ภาพที่ 2.10 ง) และพื้นผิวที่เป็นเบสจะพบเมื่อบริเวณพื้นผิวของคาร์บอนมีการปลดปล่อยสารประกอบต่างๆ ออกมาที่อุณหภูมิสูง หมู่ฟังก์ชันที่พบได้แก่ ควิโนน (ภาพที่ 2.10 จ) อีเทอร์ (ภาพที่ 2.10 ฉ) ไพโรน (ภาพที่ 2.10 ช) คาร์บอกซิลิกแอนไฮไดรด์ (ภาพที่ 2.10 ฌ) ไครมีน (ภาพที่ 2.10 ฎ) และแลคตอล (ภาพที่ 2.10 ฏ)

2.7 กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย

น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากชุมชนนั้นไม่ใช่เสียเพียงแหล่งเดียวที่ต้องมีการบำบัดแต่มียังมีน้ำเสียที่เกิดจากภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมเคมีหรือปิโตรเคมี อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมโลหะ อุตสาหกรรมกระดาษและเยื่อกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมรถยนต์ และอุตสาหกรรมยา เป็นต้น วิธีในการบำบัดน้ำเสียไม่แตกต่างกันมากนัก

ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบในน้ำเสียที่ปล่อยออกมา โดยวิธีในการบำบัดน้ำเสียประกอบด้วย 3 กระบวนการหลักๆ คือ

2.7.1 กระบวนการบำบัดทางกายภาพ (Physical method) เป็นการแยกเอาสิ่งปนเปื้อนในน้ำโดยใช้ลักษณะทางกายภาพของสิ่งปนเปื้อน ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยากมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ โดยวิธีการนี้มีวัตถุประสงค์ต่างๆ กัน เช่น ดักขยะ ตกตะกอนของแข็งแขวนลอย กำจัดน้ำมันหรือไขมัน ลดการแปรผันของอัตราการไหลและบีโอดี เป็นต้น ซึ่งจะประกอบด้วยหน่วยย่อยต่างๆ ดังนี้ ถังปรับเสมอ (Equalizing tank) ตะแกรง (Screen) ถังดักทราย (Grit chamber) การลอยตัวด้วยอากาศ (Dissolved air floatation, DAF) ถังตกตะกอนขั้นต้น (Primary sedimentation tank) ถังตกตะกอนขั้นที่สอง (Secondary sedimentation tank) ถังกรอง (Filtration tank) เครื่องบดของแข็งขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็ก (Comminutor) ฯลฯ

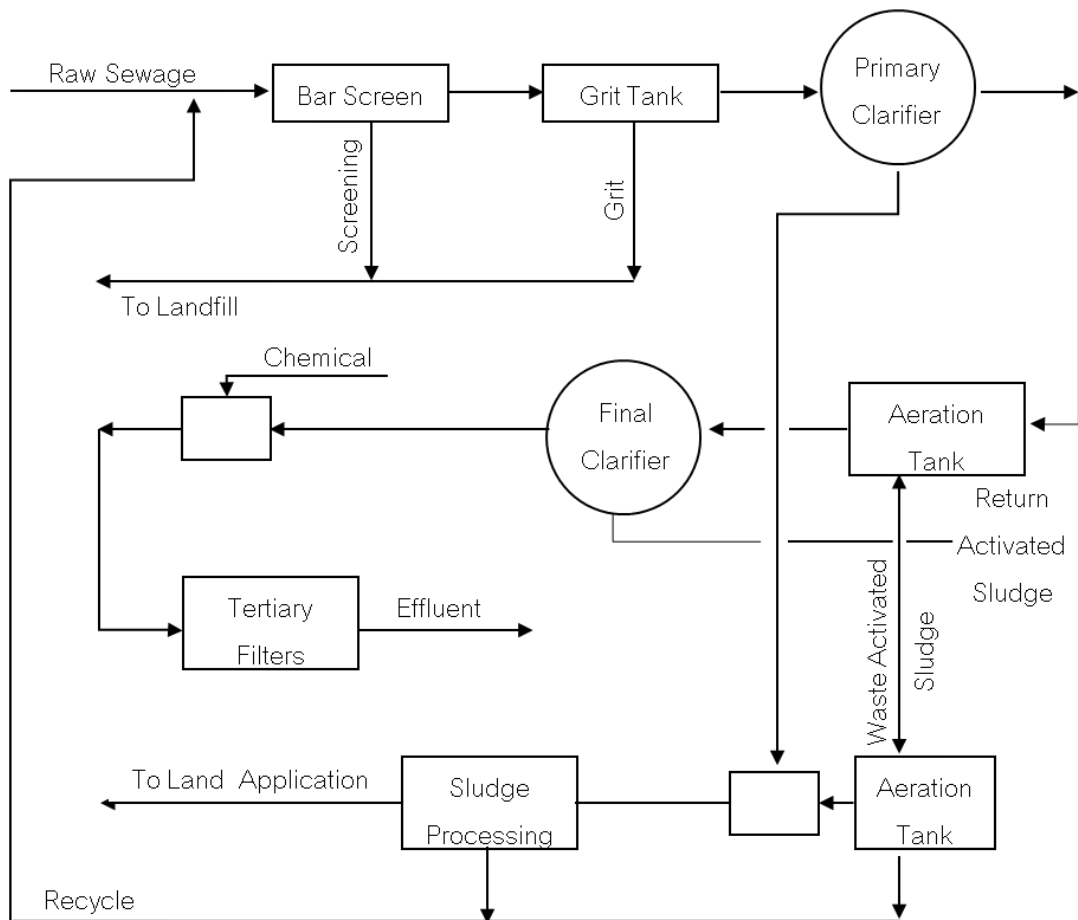
2.7.2 กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological method) เป็นการบำบัดน้ำเสียเพื่อลดค่าบีโอดี กำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยใช้จุลินทรีย์ย่อยสารอินทรีย์เหล่านั้นและเปลี่ยนรูปเป็นสารอนินทรีย์ เช่น น้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO_2) แก๊สมีเทน (Methane, CH_4) เป็นต้น วิธีการนี้เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้กันมากที่สุด เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อย และยังสามารถบำบัดน้ำเสียได้เกือบทุกชนิดอีกด้วย ดังนั้นเพื่อให้เสียค่าใช้จ่ายและออกแบบระบบให้สามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงต้องมีความเข้าใจถึงกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแต่ละประเภท รวมทั้งต้องมีความรู้ความเชี่ยวชาญด้านปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพด้วย เช่น ชนิดของจุลินทรีย์ ลักษณะการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ อาหารและปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เป็นต้น

2.7.3 กระบวนการบำบัดทางเคมี (Chemical method) เป็นการบำบัดน้ำเสียที่มีสิ่งปนเปื้อนที่เป็นโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ หรือน้ำที่ได้มายังมีค่าความเป็นกรด-ด่างยังไม่ได้ตามมาตรฐาน รวมทั้งเป็นการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วย โดยวิธีที่ใช้มีทั้งการเติมคลอรีน (Chlorination) การเติมโอโซน (Ozonation) เป็นต้น ในกระบวนการบำบัดทางเคมีจะประกอบด้วยกระบวนการต่างๆ ดังนี้ การเตรียมสารเคมี การกวนผสม (ถังกวนเร็ว) และส่วนทำปฏิกิริยา (ถังกวนช้า) กระบวนการบำบัดทางเคมีเป็นกระบวนการที่มีขั้นตอนที่ยุ่งยาก และมีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากต้องใช้สารเคมีในกระบวนการ ซึ่งสารเคมีที่ใช้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการบำบัด โดยจะแบ่งออกเป็นหมวดหมู่ต่างๆ ดังนี้

1. การตกตะกอนเพื่อลดปริมาณสารแขวนลอย สารอินทรีย์และแร่ธาตุต่างๆ ในน้ำเสีย สารเคมีที่ใช้ ได้แก่ สารส้ม (Alum) และปูนขาว (Lime) เป็นต้น
2. การดูดซับเพื่อกำจัดสารต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น การใช้ผงถ่านเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (Dissolved organic matter)
3. การปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเพื่อให้เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ รวมทั้งการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด
4. การฆ่าเชื้อโรค ก่อนที่จะระบายน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะต้องทำการฆ่าเชื้อโรคก่อนเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีเชื้อโรคที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพปะปนอยู่ สารเคมีที่นิยมใช้ในขั้นตอนนี้ ได้แก่ คลอรีน

ในการบำบัดน้ำเสียแต่ละกระบวนการจะมีของแข็งเกิดขึ้นทั้งที่อยู่ในรูปของกากตะกอน (Sludge) กรวด ททราย และขยะ เป็นต้น โดยสามารถแบ่งชนิดของของแข็งเหล่านี้ได้ตามแหล่งที่มาและวิธีการ คือ การบำบัดขั้นต้นหรือวิธีทางกายภาพ การบำบัดขั้นที่สองหรือวิธีทางชีวภาพ และการบำบัดขั้นที่สามหรือวิธีทางเคมี แสดงดังภาพที่ 2.11 โดยกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ กากตะกอนขั้นต้น กากตะกอนขั้นที่สอง และกากตะกอนเคมี

1. กากตะกอนขั้นต้น (Primary sludge) จะได้มาจากการแยกตะกอนโดยกระบวนการบำบัดทางกายภาพ จากภาพที่ 2.11 คือ Bar screen และ Grit tank โดยปริมาณของตะกอนที่ได้เมื่อคิดเทียบกับน้ำหนักแห้งของกากตะกอนทั้งหมดอยู่ที่ร้อยละ 50 เมื่อเปรียบเทียบกับกากตะกอนขั้นที่สองและกากตะกอนเคมีแล้วกากตะกอนขั้นต้นสามารถแยกน้ำออกได้ง่ายกว่าเพราะองค์ประกอบที่มีในกากตะกอนแยกออกจากกันชัดเจน ซึ่งประกอบด้วย เศษขยะ อนุภาคต่างๆ แต่กากตะกอนนี้จะเน่าเสียได้ง่าย และมีกลิ่นเหม็น
2. กากตะกอนขั้นที่สอง (Secondary sludge) หรือ กากตะกอนทางชีวภาพ (Biological sludge) กากตะกอนนี้จะได้จากกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ จากภาพที่ 2.11 คือ Aeration tank กระบวนการบำบัดมีหลายรูปแบบ เช่น ระบบแอกทีเวเต็ดสลัดจ์ (Activated sludge) ระบบเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเยื่อ (Membrane bioreactor) เป็นต้น



ภาพที่ 2.11 แหล่งที่มาและชนิดของของแข็งที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

(Turovskit และ Mathai, 2006)

3. กากตะกอนเคมี (Chemical sludge) เป็นกากตะกอนที่ได้จากการบำบัดด้วยสารเคมีจะพบในภาคอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่เพื่อใช้ในการกำจัดสารที่กำจัดออกได้ยากหรือมีสารที่ไม่สามารถบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพได้ จากภาพที่ 2.11 เมื่อผ่าน Aeration tank แล้วได้ออกมาเป็น Final clarifier จะถูกนำไปเติมสารเคมี โดยส่วนใหญ่จะใช้น้ำยาคอกตะกอนร่วมกับฟอสฟอรัส สารประกอบฟอสฟอรัสที่ใช้ได้แก่ สารส้ม แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) สารประกอบเหล็กต่างๆ ได้แก่ เฟอร์รัสคลอไรด์ (FeCl_2) เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) เฟอร์รัสซัลเฟต (Ferrous Sulfate, FeSO_4) และ เฟอร์ริกซัลเฟต ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) โรงบำบัดบางแห่งอาจเติมสารเคมีเข้าไปในขั้นตอนการบำบัดทางชีวภาพทำให้สารที่ตกตะกอนรวมอยู่ในกากตะกอนชีวภาพ

กากตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนต่างๆ ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเหลว หรือ กึ่งเหลว กึ่งแข็ง โดยมีส่วนประกอบที่เป็นของแข็งตั้งแต่ร้อยละ 0.25 – 12 โดยน้ำหนักขึ้นอยู่กับกระบวนการบำบัด ซึ่งกากตะกอนที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการทำให้เกิดปัญหาต่างๆ เช่น กากตะกอนที่เกิดขึ้นในแต่ละวันมีปริมาณมาก กากตะกอนที่เกิดจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพประกอบด้วยสารอินทรีย์ซึ่งยังสามารถย่อยสลายต่อได้ และกากตะกอนประกอบด้วยของแข็งในปริมาณน้อย ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการกำจัดกากตะกอนที่เกิดขึ้นซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ขึ้นกับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน แต่วิธีที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่ การทำให้กากตะกอนมีความเข้มข้นมากขึ้น (Thickening) การปรับสภาพ (Sludge Conditioning) การลดปริมาณน้ำในกากตะกอน (Dewatering) และการทำให้แห้ง (Drying) วิธีการเหล่านี้เป็นการนำน้ำหรือความชื้นออกจากกากตะกอน ส่วนวิธีการบำบัดหรือปรับสภาพกากตะกอนให้อยู่ตัว (Stabilization) ก่อนนำไปทิ้งประกอบด้วย การย่อยสลาย (Digestion) การหมัก (Composting) การเผา (Incineration) การทำปฏิกิริยากับอากาศเปียก (Wet air oxidation) และการแยกโลหะออกด้วยเครื่องปฏิกรณ์

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bandosz และ Block (2006) ศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการไพโรไลซิสต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนและอุตสาหกรรมน้ำมัน พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนทั้ง 2 แหล่งจะมีความสามารถในการออกซิไดซ์แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิส โดยการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการไพโรไลซิสกากตะกอนจากอุตสาหกรรมน้ำมันจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็กและรูพรุนขนาดกลางลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการออกซิไดซ์แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลง แต่การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการไพโรไลซิสกากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสียจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็กและรูพรุนขนาดกลางเพิ่มขึ้นส่งผลให้ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการออกซิไดซ์แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงขึ้น เนื่องจากกากตะกอนทั้ง 2 แหล่งมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน

Dai และคณะ (2008) ศึกษาการกำจัดกำมะถันในเชื้อเพลิงโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ร่วมกับกรดซัลฟูริก โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ ชนิดของเชื้อเพลิงต้นแบบ (นอร์มัล-ออกเทน และเบนซีน) ชนิดของสารประกอบกำมะถัน (ไทโอฟิน และ 4,6-ไดเมทิลไดเบนโซไทโอฟิน) อุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสารประกอบกำมะถัน จากผล

การทดลองพบว่าความสามารถในการดูดซับสารประกอบกำมะถันจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์โดยความสามารถในการดูดซับไทโอไฟน์จะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดของรูพรุนเพิ่มขึ้น โดยถ่านกัมมันต์จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับไทโอไฟน์ใน นอร์มัล-ออกเทนมากกว่าไทโอไฟน์ในเบนซีน โดยภาวะที่เหมาะสมคือในการดูดซับคือที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 1.5 ชั่วโมง ส่วนภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ 4,6-ไดเมทิลไดเบนโซไทโอไฟน์คือที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง และเมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปดูดซับ สารประกอบกำมะถันในเชื้อเพลิงทางการค้า พบว่าการดูดซับครั้งแรกสามารถลดกำมะถันที่มีอยู่ใน เชื้อเพลิงจาก 1697 พีพีเอ็ม ลงเหลือ 970 พีพีเอ็ม และลดลงเหลือเพียง 14 พีพีเอ็ม เมื่อผ่านการ ดูดซับครั้งที่สอง

Zhou และคณะ (2009) ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับกำมะถันของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการ ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเคมี โดยสารที่ใช้ในการปรับปรุงคือกรดไนตริกและแก๊สออกซิเจน พบว่ากรดไนตริกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยรูพรุนขนาดกลางจะถูก เปลี่ยนไปเป็นรูพรุนขนาดเล็ก และยังเพิ่มปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของ ถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการดูดซับกำมะถันจะไม่ขึ้นกับพื้นที่ผิวและ ปริมาตรของรูพรุนแต่จะขึ้นกับปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ โดย ความสามารถในการดูดซับสารประกอบกำมะถันของตัวดูดซับเรียงจากมากไปน้อยคือ 4,6-ได เมทิลไดเบนโซไทโอไฟน์ 4-เมทิลไดเบนโซไทโอไฟน์ ไดมัลไดเบนโซไทโอไฟน์ และเบนโซไทโอไฟน์ ตามลำดับ

Liu และคณะ (2010) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย ของโรงบำบัดน้ำเสียที่ปรับปรุงด้วยซิงค์คลอไรด์และกรดซัลฟูริกที่ทำให้มีเม็ดด้วยแร่แมงกานีสได ออกไซด์ (Pyrolusite) ตัวแปรที่ศึกษาคือ ปริมาณของแร่แมงกานีสไดออกไซด์ พบว่าความสามารถ ในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนขึ้นกับปริมาณของคาร์บอนที่มีอยู่ในถ่านกัมมันต์และปริมาณแร่ แมงกานีสไดออกไซด์ โดยถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณคาร์บอนมากและมีปริมาณแร่แมงกานีสไดออกไซด์ ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักจะมีพื้นที่ผิวมากที่สุด เมื่อพิจารณาขนาดของรูพรุนพบว่าถ่านกัมมันต์ ที่ไม่เติมแร่แมงกานีสไดออกไซด์จะมีรูพรุนขนาด 4-8 นาโนเมตร และ 10-30 นาโนเมตร ใน ปริมาณใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเติมแร่แมงกานีสไดออกไซด์ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีรูพรุนขนาด 1-60 นาโนเมตร โดยปริมาณของแร่แมงกานีสไดออกไซด์ที่ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักจะมีปริมาตรของรู พรุนขนาด 20-30 นาโนเมตรมากที่สุด เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับเมทิลลีนบลูของ ถ่านกัมมันต์ที่เติมแร่แมงกานีสไดออกไซด์ที่ปริมาณต่างกันพบว่าถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณคาร์บอน มากและมีปริมาณของแร่แมงกานีสไดออกไซด์ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักจะมีความสามารถในการ

ดูดซับเมทิลลีนบลูและ Reactive Brilliant Red x-3B มากที่สุด เมื่อศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับ Reactive Brilliant Red x-3B พบว่าความสามารถในการดูดซับ Reactive Brilliant Red x-3B เข้าได้กับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์

Hernandez และคณะ (2010) ศึกษาการดูดซับสารประกอบกำมะถันในน้ำมันดีเซลด้วยตัวดูดซับ 2 ชนิด คือ ซิลิกาอะลูมินาและถ่านกัมมันต์ทางการค้า โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ ปริมาณนิกเกิลบนตัวดูดซับ (ร้อยละ 5-60 โดยน้ำหนัก) อุณหภูมิและเวลาในการแคลไซต์ โดยใช้สารประกอบกำมะถันต้นแบบคือ เบนโซไทโอเฟน ไดเบนโซไทโอเฟน และ 4,6-ไดเมทิลไดเบนโซไทโอเฟน พบว่าเมื่ออุณหภูมิ เวลา และปริมาณนิกเกิลเพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิวของรูพรุนของตัวดูดซับลดลง และส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสารประกอบกำมะถัน โดยถ่านกัมมันต์ทางการค้าจะมีความจำเพาะเจาะจงในการดูดซับกำมะถันที่มีโมเลกุลขนาดเล็กก่อนสารประกอบกำมะถันที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ แต่เมื่อเติมโลหะนิกเกิลลงไปพบว่าความจำเพาะเจาะจงในการดูดซับกำมะถันแต่ละชนิดจะเท่ากันในขณะที่ซิลิกาอะลูมินาที่มีการเติมโลหะนิกเกิลจะมีความจำเพาะเจาะจงในการดูดซับสารประกอบกำมะถันที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ก่อนสารประกอบกำมะถันที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก การเติมนิกเกิลร้อยละ 30 และ 45 จะมีความสามารถในการดูดซับสารประกอบกำมะถันมากกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าประมาณ 2.6 และ 2 เท่าตามลำดับ และการเติมนิกเกิลร้อยละ 30 บนตัวรองรับทั้ง 2 ชนิดจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสารประกอบกำมะถัน

Seredych และ Bandosz (2011) วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัดกำมะถันแบบเฮเทอโรอะตอม ได้แก่ ไดเบนโซไทโอเฟน 4,6- ไดเมทิลไดเบนโซไทโอเฟน ในน้ำมันดีเซลต้นแบบคือ เดกเคนและเฮกซะเดเคนที่อัตราส่วนโดยปริมาตร 1:1 โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิ 650 และ 800 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 และ 3 ชั่วโมง ภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจนที่มีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ปริมาณ 1000 พีพีเอ็ม และไม่มีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่าในภาวะที่มีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง จะมีผลทำให้ความสามารถในการกำจัดกำมะถันดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นภายใต้ภาวะเดียวกันแต่ไม่มีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ แสดงว่าเมื่อถ่านกัมมันต์มีการเพิ่มกำมะถันเข้าไปบนพื้นผิวทำให้ความสามารถในการกำจัดกำมะถันในน้ำมันดีเซลต้นแบบดีขึ้นและยังทำให้มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยพื้นที่ผิวมีผลต่อความสามารถในการกำจัดกำมะถันน้อยกว่าผลของกำมะถันที่อยู่บนพื้นผิว

Fallah และ Azizian (2012) ศึกษาการดูดซับสารประกอบกำมะถันในน้ำมันต้นแบบโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผ้าและที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ ชนิดของสารที่ใช้ในการปรับปรุง (กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตและโซเดียมไฮดรอกไซด์) ชนิดของสารประกอบกำมะถัน (เบนโซไทโอฟิน ไดเบนโซไทโอฟินและไดเมทิลไดเบนโซไทโอฟินจากเฮปเทน) พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงด้วยกรดไนตริกมีความสามารถในการดูดซับสารประกอบกำมะถันได้ดีที่สุดโดยสามารถดูดซับเบนโซไทโอฟิน ไดเบนโซไทโอฟิน และไดเมทิลไดเบนโซไทโอฟินเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งการปรับปรุงถ่านกัมมันต์มีผลต่อพื้นผิวของถ่านกัมมันต์โดยจะทำให้หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เปลี่ยนไปส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสารประกอบกำมะถันดีขึ้นซึ่งเกิดจากหมู่กรดที่อยู่บนถ่านกัมมันต์กับหมู่ต่างของสารประกอบกำมะถัน และยังพบอีกว่าถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงด้วยกรดไนตริกมีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนอยู่บนพื้นผิวเป็นจำนวนมากซึ่งอาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้มีความสามารถในการดูดซับสารประกอบกำมะถันดีที่สุด

จากงานวิจัยที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่าถ่านกัมมันต์สามารถนำมาใช้ในการขจัดกำมะถันที่มีอยู่ในน้ำมันดีเซลด้วยวิธีการดูดซับได้ โดยถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้สามารถเตรียมได้จากวัตถุดิบหลายชนิด เช่น ไม้ ผ้าคาร์บอน เป็นต้น ซึ่งจะนำมาขจัดกำมะถันที่มีอยู่ในน้ำมันในรูปแบบของสารละลายหรือแก๊ส แต่งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ไม่ได้ศึกษาถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียที่นำไปขจัดกำมะถันในน้ำมันที่อยู่ในรูปแบบสารละลาย ซึ่งจากงานวิจัยจะนำวัตถุดิบ หรือ ถ่านกัมมันต์มาปรับปรุงให้สามารถขจัดกำมะถันได้ โดยความสามารถในการขจัดกำมะถันของถ่านกัมมันต์ที่ได้ส่วนใหญ่จะขึ้นกับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ โดยหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นจะเกิดจากชนิดของสารที่นำมาปรับปรุงดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการขจัดไดเบนโซไทโอฟินจากนอร์มัล-ออกเทนด้วยวิธีการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย โดยนำกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียมากระตุ้น และศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการขจัดไดเบนโซไทโอฟินจากนอร์มัล-ออกเทน

บทที่ 3

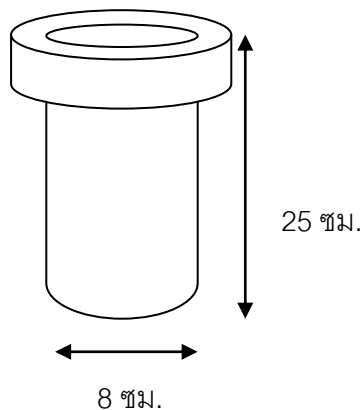
เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดไดเบนไซโทโอฟินจากนอร์มัล-ออกเทนด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย โดยในการทดลองได้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ ภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดไดเบนไซโทโอฟินจากนอร์มัล-ออกเทน โดยเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ รวมถึงขั้นตอนการทดลองแสดงได้ดังนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 การไฟโรไลซิสกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียและการคาร์บอนไนซ์ถ่านชาร์

1. เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อ (Tubular furnace) ยี่ห้อ Vecstar Furnances รุ่น VCTF7
2. เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) ทำจากสแตนเลส แสดงดังภาพที่ 3.1
3. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด K
4. ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ยี่ห้อ TAIE รุ่น PFY400
5. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (Rotameter) ยี่ห้อ Newflow รุ่น FBC-V-P-A-500C



ภาพที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

3.1.2 การกระตุ้นถ่านชาร์และการดูดซับไดเบนไซโทไธโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทน

1. เครื่องเขย่าแนวราบ (Orbital shaker) ยี่ห้อ CTL รุ่น SK3
2. ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ Binder รุ่น ED115
3. ตะแกรงร่อน (Sieve) เบอร์ 10 (2 มิลลิเมตร) เบอร์ 18 (1 มิลลิเมตร) เบอร์ 60 (0.25 มิลลิเมตร)
4. โถดูดความชื้น (Desiccator)
5. เครื่องทำสุญญากาศ (Vacuum pump) ยี่ห้อ Sibata รุ่น WJ-20
6. กรวยกรองแบบสุญญากาศ (Buchner funnel)
7. ขวดกรอง (Suction flask)
8. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 125 และ 250 มิลลิลิตร
9. ขวดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 25 100 250 และ 1000 มิลลิลิตร
10. บิวเรต (Burette)
11. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และ เบอร์ 1
12. โกร่งบดสาร

3.1.3 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์และการดูดซับไดเบนไซโทไธโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทน

1. เครื่องวัดการดูดกลืนแสงยูวี (UV-VIS Spectrophotometer) ยี่ห้อ Jasco รุ่น V530
2. เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน (Thermal gravimetric analysis, TGA) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Pyris diamond
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5800LV

3.2 วัตถุประสงค์

ภาคตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียจากบริษัท นันยางการทออุตสาหกรรม จำกัด ซึ่งมาจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบแอกทีเวเต็ดสลัดจ์ (Activated sludge) แสดงดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย

3.3 สารเคมี

1. แก๊สไนโตรเจน (N_2 , 99.99%, Praxair)
2. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH, AR grade, Ajax Finechem)
3. ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$, AR grade, Ajax Finechem)
4. กรดไนตริก (HNO_3 , 70%, Lobal Chemie)
5. กรดไฮโดรคลอริก (HCl, 37%, Carlo Erba)
6. นอร์มอล-ออกเทน (*n*-octane, 99%, Lab Scan)
7. ไดเบนโซไทโอฟีน (Dibenzothiophene, 99%, Sigma Aldrich)
8. เมทิลีนบลู (Methylene blue, AR grade, Fisher Scientific)
9. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4 , AR grade, Carlo Erba)
10. โซเดียมโมโนฟอสเฟต (Na_2HPO_4 , AR grade, Merck)
11. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, AR grade, Carlo Erba)
12. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3 , AR grade, BDH Chemicals)
13. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$, AR grade, Loba Chemie)
14. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4 , 96%, Mallinckrodt Chemical)
15. ไอโอดีน (I_2 , AR grade, Lab Scan)
16. โพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3 , AR grade, Lab Scan)
17. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI, AR grade, Ajax Finechem)

18. โซเดียมเปอร์ซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, AR grade, Ajax Finechem)
19. แป้ง (Starch, AR grade, Ajax Finechem)
20. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.4.1 การเตรียมตัวอย่างกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย

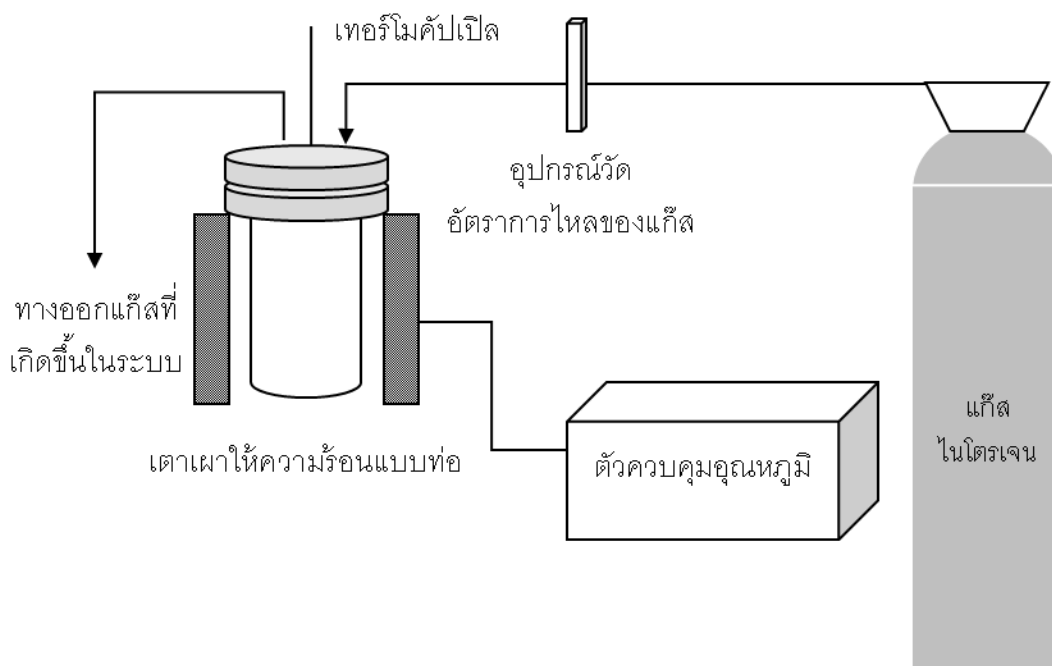
นำกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอมาล้างทำความสะอาดเพื่อเอาสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ออก เช่น กววด ทวาย (ภาพที่ 3.3) และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักคงที่ บดให้มีขนาด 1 ถึง 2 มิลลิเมตร ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 18 และ เบอร์ 10

3.4.2 การไพโรไลซิส

1. ชั่งน้ำหนักกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียที่เตรียมได้ในข้อ 3.4.1 ประมาณ 50 กรัม ใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ติดตั้งระบบดังภาพที่ 3.4
2. ให้ความร้อนอย่างช้า ๆ ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที (Yu และ Zhong, 2006)
3. ทิ้งให้เย็นก่อนนำออกจากเตาเผา ชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาร้อยละผลได้ของถ่านชาร์
4. นำถ่านชาร์ที่ได้มาบดให้มีขนาดเล็กลงกว่า 0.25 มิลลิเมตร และร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 60
5. อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อนำไปทำการกระตุ้นต่อไป



ภาพที่ 3.3 กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว



ภาพที่ 3.4 แผนภาพการดำเนินการของการไพโรไลซิสกากตะกอน และการคาร์บอนไนซ์ถ่านซาร์

3.4.3 การกระตุ้น

การกระตุ้นเป็นวิธีการในการเพิ่มรูพรุนให้กับถ่านซาร์โดยในงานวิจัยนี้จะทำการกระตุ้นถ่านซาร์ด้วยวิธีทางเคมี ซึ่งรูปแบบในการกระตุ้นมีด้วยกัน 2 วิธี ดังนี้

1. วิธีการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียว

- (ก) ชั่งน้ำหนักถ่านซาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสในข้อ 3.4.3 ประมาณ 10 กรัม บรรจุลงในขวดรูปชมพูนขนาด 250 มิลลิลิตร
- (ข) เตรียมสารละลายโดยชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ น้ำหนัก 5.8824 กรัม (คิดเป็นอัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และถ่านซาร์ เท่ากับ 0.5 : 1 โดยน้ำหนัก) ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วปรับให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร
- (ค) เติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้ในข้อ ข. ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีถ่านซาร์อยู่ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่อัตราการเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง
- (ง) กรองแยกถ่านซาร์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนมีค่าความเป็นกรด - ด่าง คงที่ นำไปอบที่อุณหภูมิ 105

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นแบบ
ชั้นตอนเดียว

- (จ) ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนอัตราส่วนของสารที่ใช้กระตุ้นต่อถ่านชาร์เป็น 1:1 2:1
4:1 และ 6:1 โดยน้ำหนัก และเปลี่ยนสารที่ใช้กระตุ้นเป็นซิงค์คลอไรด์ และกรด
ไนตริก

2. วิธีการกระตุ้นแบบสองขั้นตอน

- (ก) นำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นแบบชั้นตอนเดียวแต่ไม่ต้องล้างด้วยน้ำปราศจาก
ไอออน ไปคาร์บอนไนซ์ต่อโดยบรรจุถ่านกัมมันต์ดังกล่าวลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบ
เบดนิ่ง ให้ความร้อนในเตาเผาแบบท่อภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล
50 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง
อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- (ข) ทิ้งถ่านกัมมันต์ให้เย็นก่อนนำออกจากเตาเผา แล้วนำมาล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก
ความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร และล้างด้วยน้ำปราศจาก
ไอออนหลาย ๆ ครั้งจนมีค่าความเป็นกรด - ด่าง คงที่
- (ค) นำไปถ่านกัมมันต์อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้
ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นแบบสองขั้นตอน
- (ง) ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนอัตราส่วนของสารที่ใช้กระตุ้นต่อถ่านชาร์เป็น 1 2 4
และ 6 โดยน้ำหนัก และเปลี่ยนสารที่ใช้กระตุ้นเป็นซิงค์คลอไรด์ และกรดไนตริก
อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์เป็น 600 และ 800 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการ
คาร์บอนไนซ์เป็น 1 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ

3.4.4 การทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับกำมะถัน

การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับกำมะถันจากน้ำมันดีเซล โดยใช้สารประกอบ
กำมะถันต้นแบบ คือ ไทเบนโซไทโอฟินและใช้น้ำมันดีเซลต้นแบบ คือ นอร์มัล-ออกเทน วิธี
ในการดำเนินการมีดังนี้

1. เตรียมสารละลายต้นแบบที่มีปริมาณไทเบนโซไทโอฟินในนอร์มัล-ออกเทน 100
มิลลิกรัมต่อลิตร (100 พีพีเอ็ม)
2. ชั่งน้ำหนักถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร

3. เติมสารละลายจำลองปริมาตร 20 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีถ่านกัมมันต์อยู่ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 14 ชั่วโมง
4. กรองสารละลายที่ได้แล้วนำไปวัดปริมาณกำมะถันด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงยูวี ยี่ห้อ Lasco รุ่น V-530
5. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราส่วนของไคเบนโซไทโอพีนต่อถ่านกัมมันต์ 1:0.01 1:0.02 1:0.05 1:0.10 1:0.15 1:0.20 1:0.30 1:0.40 1:0.60 1:0.80 1:1.00 และ 1:1.20 กรัมต่อกรัม และความเร็วรอบในการเขย่าเป็น 50 100 150 250 และ 300 รอบต่อนาที

3.4.5 การวิเคราะห์สมบัติของกากตะกอน ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์

1. การวิเคราะห์กากตะกอนและถ่านชาร์
 - (ก) การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis, ASTM D3172 – 3175) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว
 - (ข) การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน โดยใช้เทคนิควิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (TGA)
 - (ค) การวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยกล้องอิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope SEM) เพื่อดูลักษณะพื้นที่ผิวของกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์
2. การวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์
 - (ก) การวิเคราะห์ค่าไอโอดีน (ASTM D4607-94(2006)) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณรูพรุนขนาดเล็กของถ่านกัมมันต์ (ภาคผนวก ก)
 - (ข) การวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (JIS 1474 – 1991) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณรูพรุนขนาดกลางของถ่านกัมมันต์ (ภาคผนวก ข)
 - (ค) การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ใช้วิธี Boehm titration (Chen และคณะ 2002) (ภาคผนวก ค)

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีกระตุ้นทางเคมีเพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการนำไปดูดซับสารไดเบนโซโทไฮโอฟินจากน้ำมันดีเซลต้นแบบคือ นอร์มัล-ออกเทน ในการทดลองจะศึกษาผลของชนิดของสารเคมีที่ใช้กระตุ้น อัตราส่วนของสารเคมีที่ใช้กระตุ้นต่อถ่านชาร์ ระยะเวลาในการกระตุ้น อุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์ จากนั้นจึงนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ที่ภาวะที่เหมาะสมมาศึกษาภาวะที่เหมาะสมและแบบจำลองของการดูดซับ รวมทั้งวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่ได้

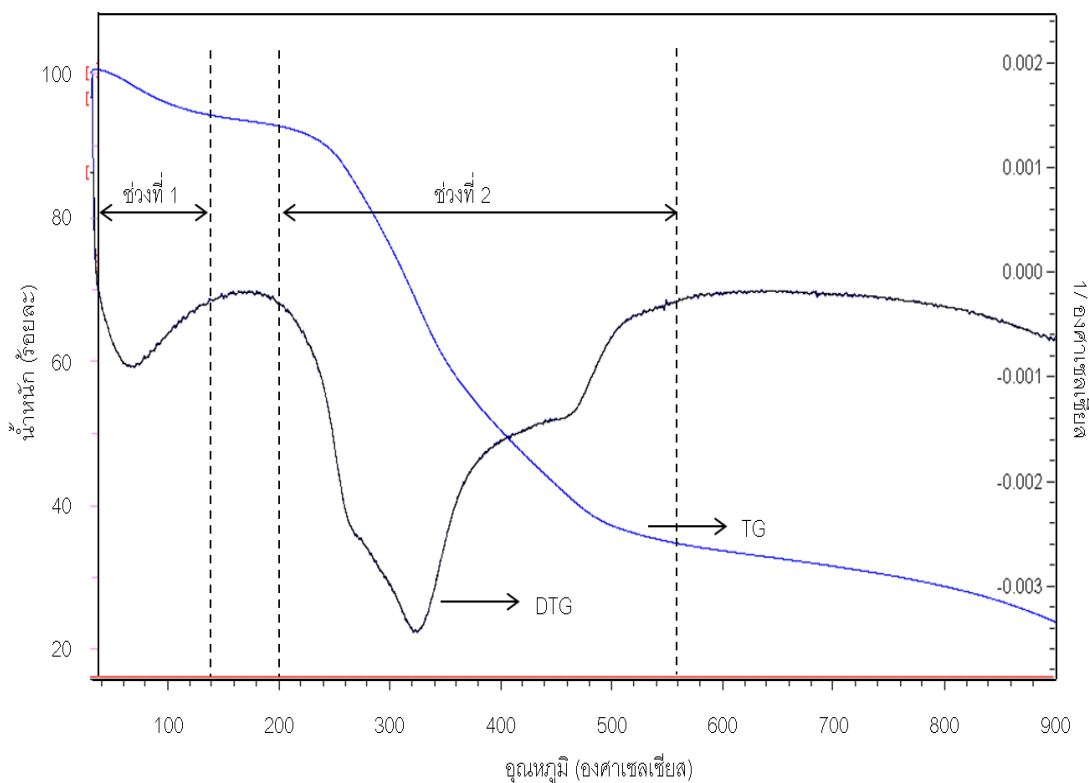
4.1 สมบัติของกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียและถ่านชาร์

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัวของกากตะกอนและถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซ์กากตะกอน พบว่ากากตะกอนมีความชื้นร้อยละ 9.29 ± 0.02 เถ้าร้อยละ 15.78 ± 0.21 สารระเหยร้อยละ 58.97 ± 0.37 และคาร์บอนคงตัวร้อยละ 15.96 ± 0.29 เมื่อนำกากตะกอนไปผ่านการไพโรไลซ์พบว่าปริมาณความชื้นและสารระเหยลดลง 4.79 เท่า และ 2.92 เท่า ตามลำดับ ส่วนปริมาณเถ้าและคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น 1.91 เท่า และ 3.01 เท่า ตามลำดับ โดยความชื้นและสารระเหยที่ลดลงเป็นผลมาจากการสลายตัวของสารระเหยได้ (Volatile matter) ของกากตะกอนเมื่อได้รับความร้อนระหว่างการไพโรไลซ์ส่งผลให้สัดส่วนของเถ้าและคาร์บอนคงตัวในถ่านชาร์มีปริมาณมากขึ้น โดยปริมาณของกำมะถันที่มีในกากตะกอนและถ่านชาร์มีอยู่ร้อยละ 1.78 และ 1.72 ตามลำดับ

ภาพที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์การละลายตัวของกากตะกอนด้วยเทคนิค TGA พบว่ามีการสลายตัวของกากตะกอนสองช่วง คือ ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 40 -120 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของวัตถุดิบและถ่านชาร์

ตัวอย่าง	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	ความชื้น	เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว
วัตถุดิบ	9.29 ± 0.02	15.78 ± 0.21	58.97 ± 0.37	15.96 ± 0.29
ถ่านชาร์	1.87 ± 0.72	30.08 ± 0.16	20.19 ± 0.12	48.01 ± 0.98

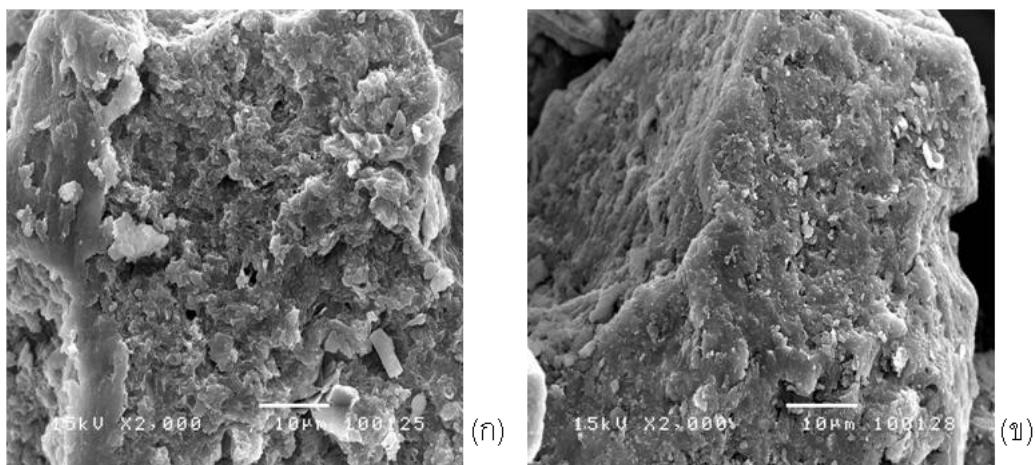


ภาพที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์การสลายตัวของกากตะกอนด้วยเทคนิค TGA

ตั้งแต่ 200 – 540 องศาเซลเซียส ในการสลายตัวช่วงแรกเป็นการสลายตัวของความชื้นที่มีอยู่ในกากตะกอนซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ส่วนการสลายตัวในช่วงที่สองเป็นการสลายตัวของสารระเหยที่มีอยู่ในกากตะกอนซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ปริมาณที่เหลือเป็นส่วนของเถ้าและคาร์บอนคงตัว ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบประมาณของกากตะกอนในตารางที่ 4.1 โดยลักษณะพื้นผิวของกากตะกอนและถ่านชาร์แสดงดังภาพที่ 4.2 ก และ ข ตามลำดับ

4.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย

การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียจะศึกษาผลของชนิดของสารที่ใช้ในการกระตุ้น วิธีการกระตุ้น อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ ระยะเวลาที่สารกระตุ้นสัมผัสกับถ่านชาร์ โดยประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จะพิจารณาจากความสามารถในการดูดซับไดเบนไซโทโอฟินจากนอร์มัล-ออกเทน

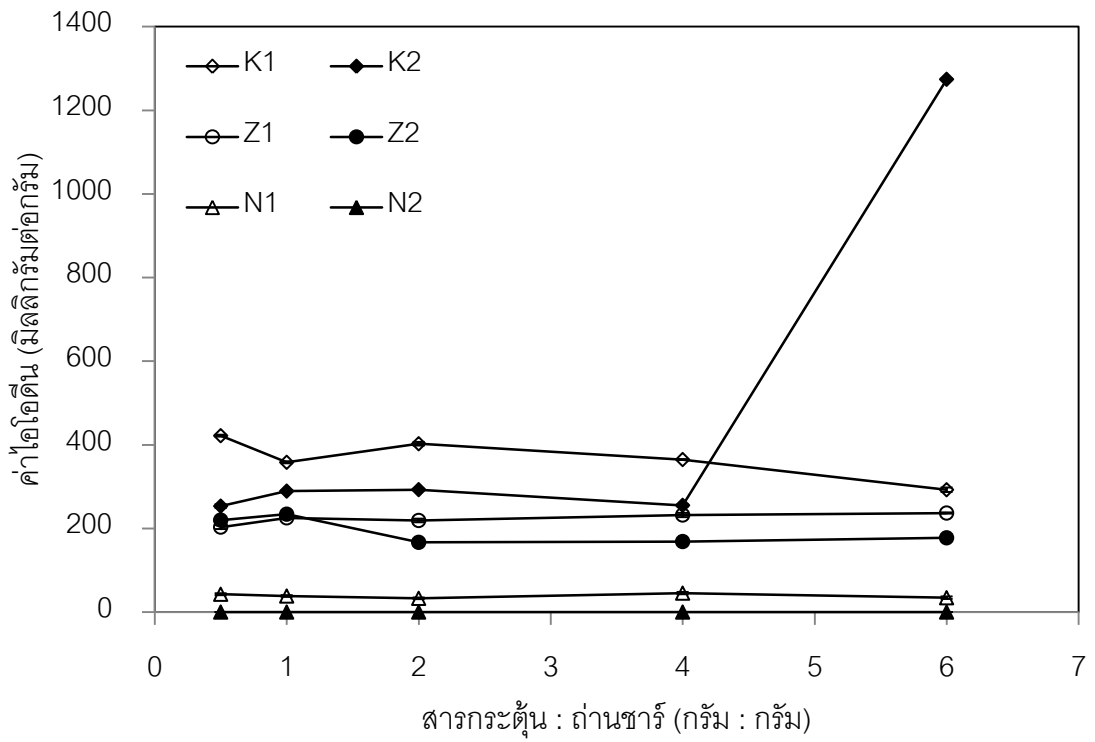


ภาพที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของกากตะกอนและถ่านชาร์ที่ได้จาก SEM

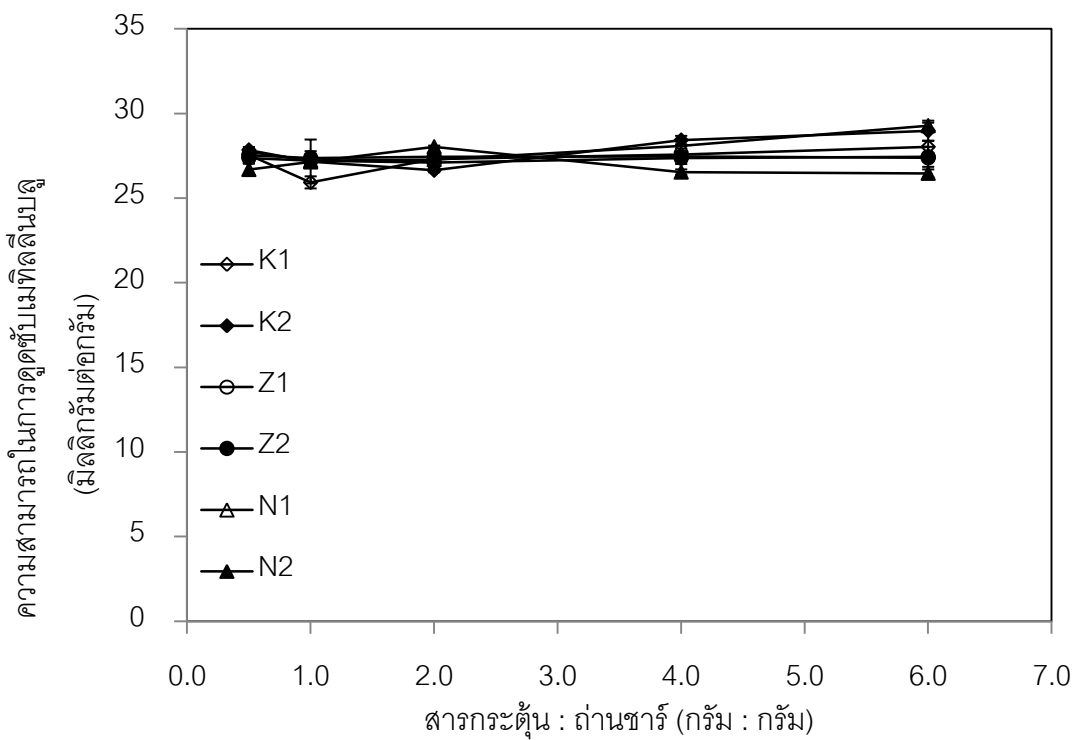
4.2.1 ผลของชนิดของสารกระตุ้นและอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์

ชนิดและอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์จะมีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้แตกต่างกัน กล่าวคือจะให้ลักษณะรูพรุนและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แตกต่างกัน (Guo และ Lua, 2003; Chen และคณะ, 2002; Moreno-Castilla และคณะ, 2001; Yin และคณะ, 2007; Fallah และ Azizian, 2012) ในการวิจัยนี้จะศึกษาผลของสารกระตุ้น 3 ชนิด ได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซิงค์คลอไรด์ และกรดไนตริก อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 0.5 1 2 4 และ 6 โดยน้ำหนัก ภาวะที่ใช้ในการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียว คือ อัตราการเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้น เรียกว่า K_1 , Z_1 และ N_1 ตามลำดับ สำหรับการกระตุ้นแบบสองขั้นตอน คือ อัตราการเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิของการคาร์บอน 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้น เรียกว่า K_2 , Z_2 และ N_2 ตามลำดับ

ภาพที่ 4.3 แสดงค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่าไอโอดีนอยู่ระหว่าง 0 ถึง 500 มิลลิกรัมต่อกรัม ยกเว้นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีการกระตุ้นแบบสองขั้นตอนที่อัตราส่วนของสารกระตุ้นและถ่านชาร์เป็น 6 ต่อ 1 จะมีค่าไอโอดีนสูงที่สุด โดยมีค่าถึง 1,403.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีค่าไอโอดีน 2,027.3 มิลลิกรัมต่อกรัม และในภาพที่ 4.4 แสดงความสามารถในการดูดซับเมทิลลีนบลูของถ่านกัมมันต์พบว่าความสามารถในการดูดซับเมทิลลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าอยู่ในช่วง 25 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วน

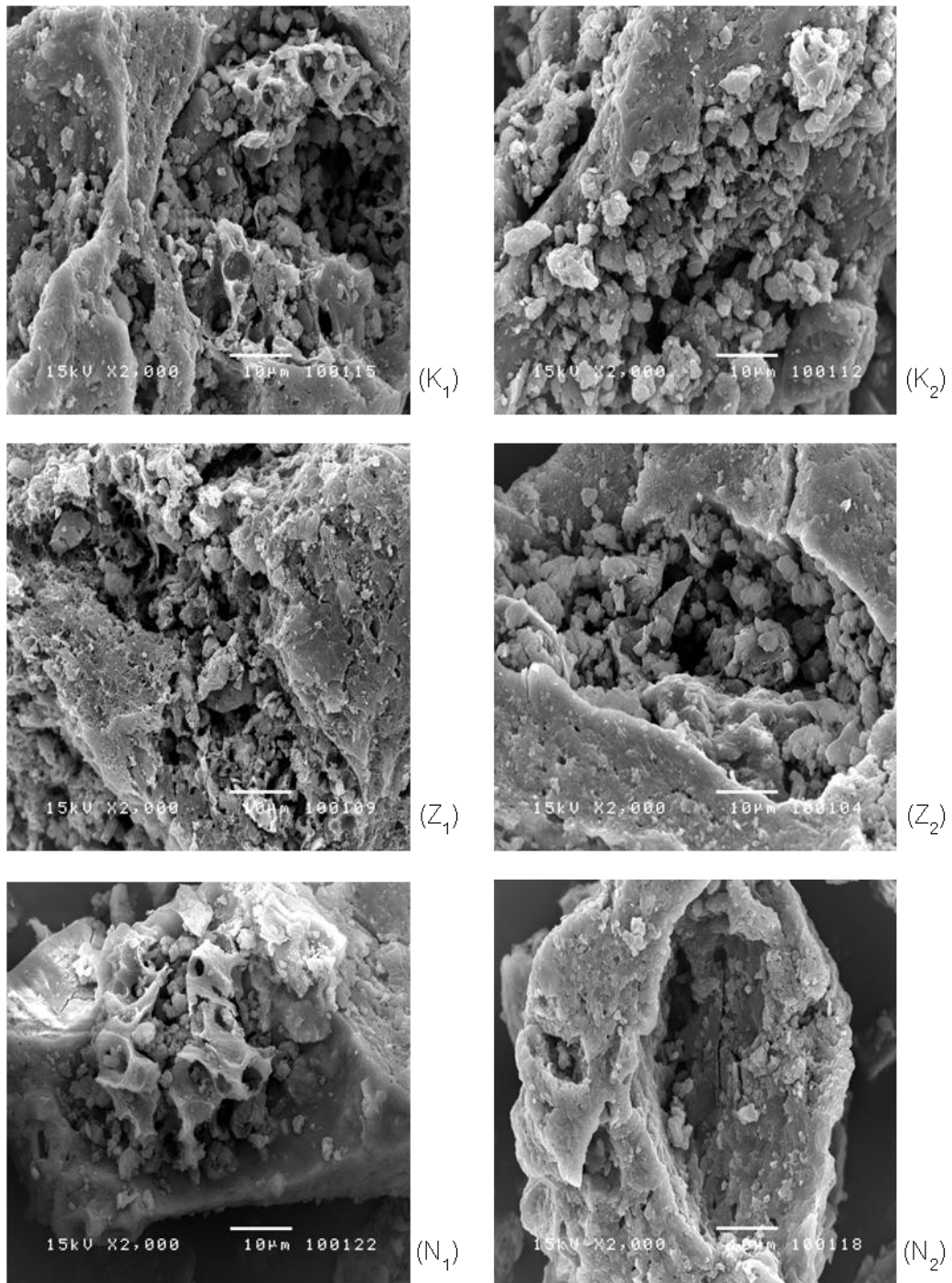


ภาพที่ 4.3 ค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 4.4 ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ทางการค้าสามารถดูดซับเมทิลลีนบลูได้ถึง 181.0 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงว่าชนิดของสารกระตุ้น อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ และวิธีการกระตุ้นไม่มีผลต่อปริมาณรูพรุนขนาดกลางของถ่านกัมมันต์แต่มีผลกับปริมาณรูพรุนขนาดเล็กของถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จาก SEM

และเมื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นที่อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 6 ต่อ 1 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังภาพที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าสภาพพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้มีลักษณะไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงว่าชนิดของสารกระตุ้นไม่มีผลต่อลักษณะของรูพรุน

จากตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้ส่วนใหญ่จะมีความชื้นอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.5 แก๊สร้อยละ 1.5 ถึง 4.0 สารระเหยร้อยละ 0.5 ถึง 1.5 และคาร์บอนคงตัวร้อยละ 95 ถึง 98 แสดงว่าชนิดของสารกระตุ้น อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ และวิธีการกระตุ้นไม่มีผลต่อองค์ประกอบโดยรวมของถ่านกัมมันต์ที่ได้ อย่างไรก็ตามปริมาณแก๊สในถ่านกัมมันต์จะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณแก๊สในถ่านชาร์เนื่องจากสารที่ใช้ในการกระตุ้นไปชะละลายแก๊สในโครงสร้างของถ่านชาร์ทำให้ปริมาณแก๊สที่ตกค้างในถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ลดลง

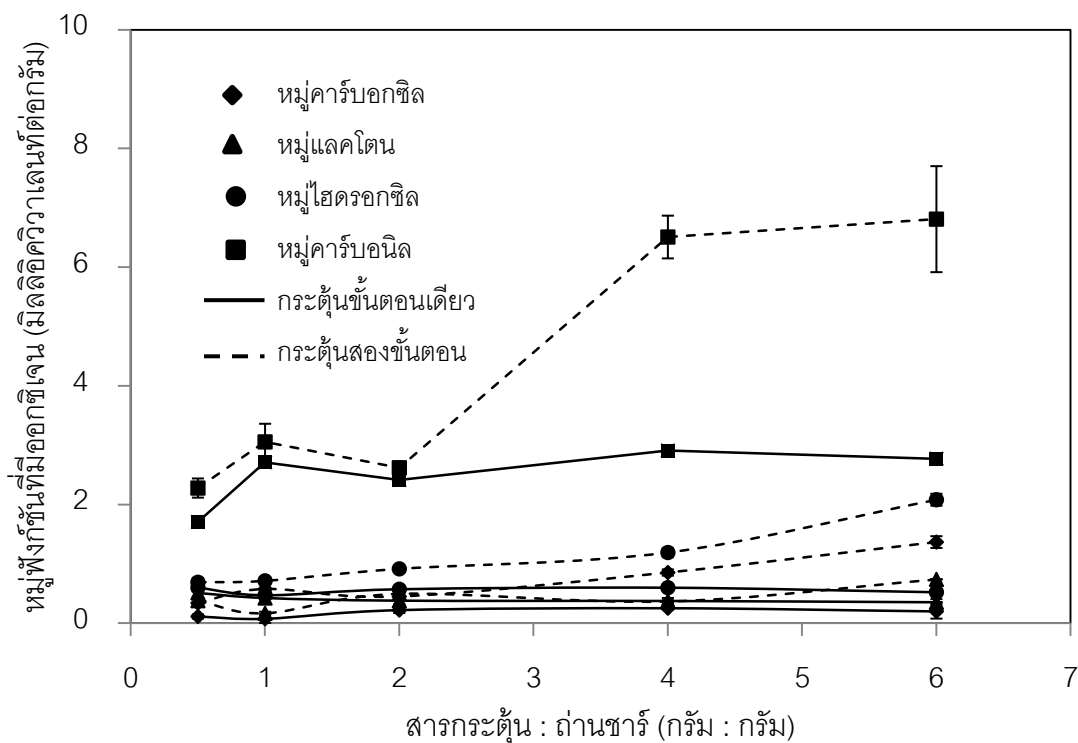
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วยการกระตุ้นแบบ
ขั้นตอนเดียว

สารกระตุ้น	สารกระตุ้น:ถ่านชาร์	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
		ความชื้น	แก๊ส	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว
KOH	0.5	0.16	2.42	1.19	96.23
	1	0.36	2.37	0.86	96.41
	2	0.34	1.88	0.29	97.48
	4	0.20	1.54	0.95	96.86
	6	0.18	2.02	0.91	97.37
ZnCl ₂	0.5	0.30	2.40	0.90	96.40
	1	0.30	2.51	0.84	96.34
	2	0.45	1.24	0.78	97.53
	4	0.29	2.29	0.46	96.96
	6	0.37	3.08	0.39	96.15
HNO ₃	0.5	0.36	2.02	1.10	96.52
	1	0.26	2.74	1.03	95.97
	2	0.28	2.28	1.15	96.29
	4	0.25	2.14	1.05	96.56
	6	0.27	2.48	1.29	95.95

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วยการกระตุ้นแบบ
สองขั้นตอน

สารกระตุ้น	สารกระตุ้น:ถ่านชาร์	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
		ความชื้น	เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว
KOH	0.5	0.19	2.42	1.36	96.03
	1	0.31	2.03	0.69	96.97
	2	0.39	2.21	0.27	97.12
	4	0.24	1.91	1.10	96.75
	6	0.23	1.41	0.93	97.43
ZnCl ₂	0.5	0.45	2.42	0.76	96.37
	1	0.25	2.49	0.86	96.39
	2	0.56	1.22	0.71	97.52
	4	0.29	2.25	0.49	96.97
	6	0.28	3.10	0.42	96.20
HNO ₃	0.5	0.30	2.04	1.00	96.66
	1	0.25	2.76	1.06	95.93
	2	0.19	2.35	1.10	96.37
	4	0.30	2.16	1.20	96.34
	6	0.32	2.53	1.13	96.02

ภาพที่ 4.6 แสดงปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน (Oxygen containing surface functional group) แต่ละชนิดบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นแบบสองขั้นตอนจะมีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนแต่ละชนิดมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียว โดยจะมีหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) มากที่สุดและมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 2 ถึง 6 มิลลิกรัมต่อกรัม หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) 1 ถึง 2 มิลลิกรัมต่อกรัม หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) 0.5 ถึง 1 มิลลิกรัมต่อกรัม และหมู่แลคโตน (Lactone group) 0 ถึง 0.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นแบบขั้นตอน

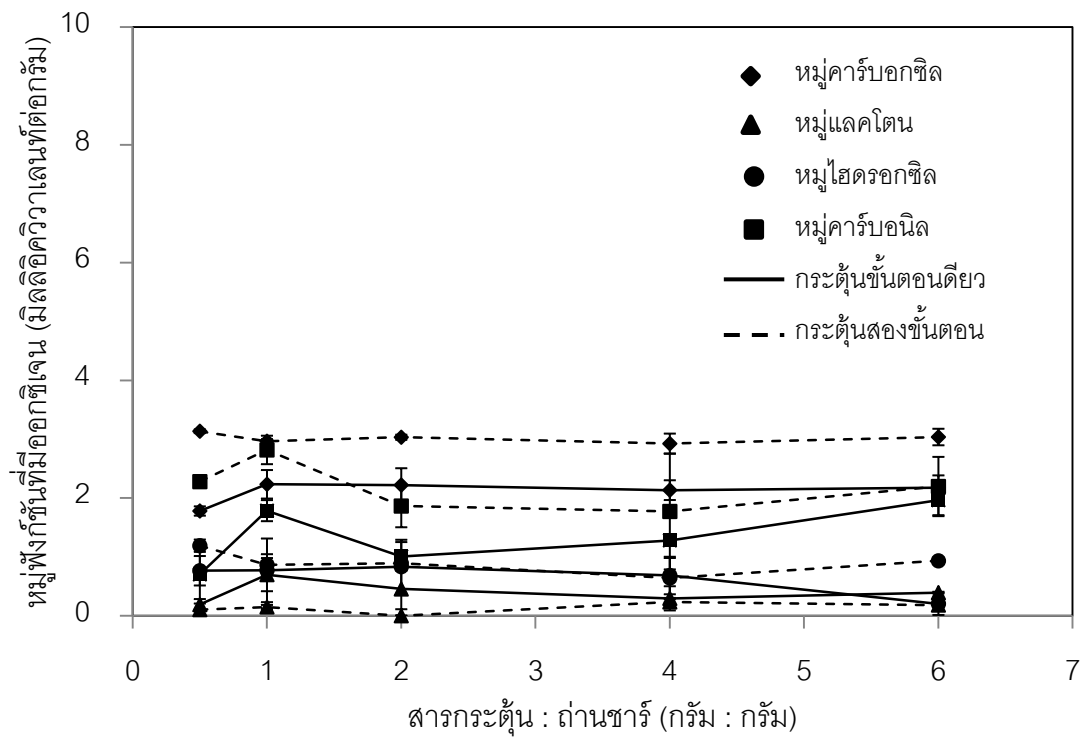


ภาพที่ 4.6 ปริมาณหมูฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์

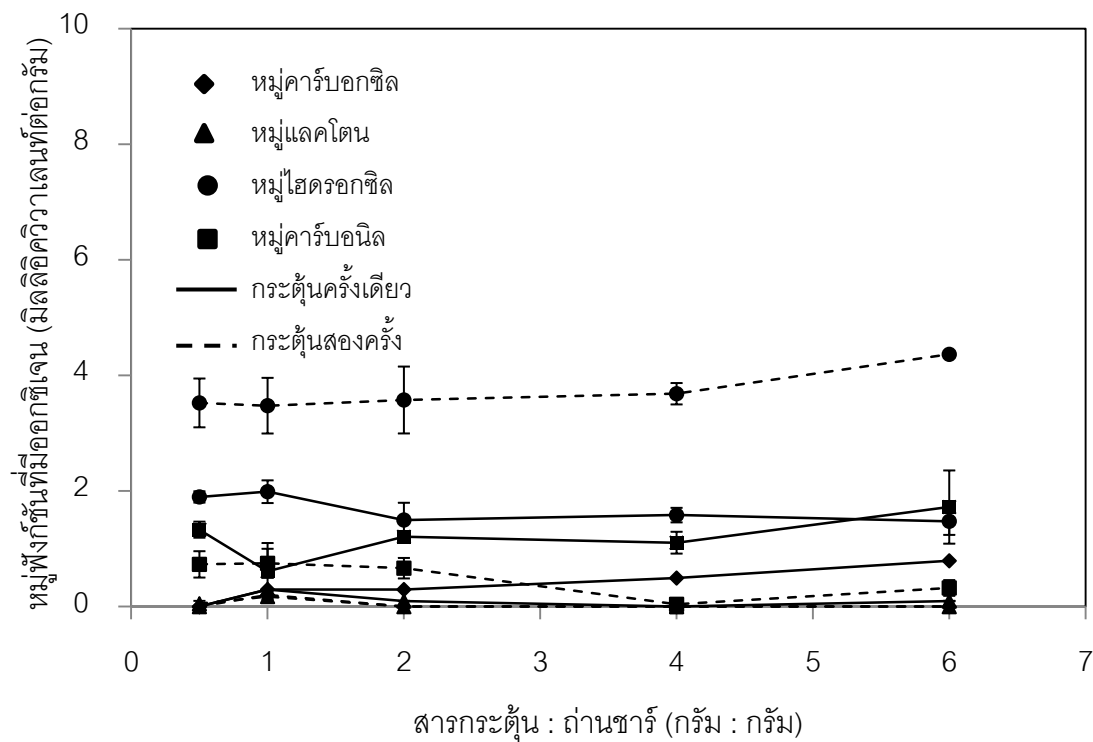
เดี่ยวจะมีหมูฟังก์ชันที่มีออกซิเจนแต่ละชนิดเท่ากับ 2 0.5 0.3 และ 0.1 มิลลิคิกิวาเลนท์ต่อกรัม ตามลำดับ

ภาพที่ 4.7 แสดงปริมาณหมูกรดแต่ละชนิดบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย ซิงค์คลอไรด์ จะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นแบบสองชั้นตอนจะมีหมูฟังก์ชันที่มีออกซิเจนแต่ละชนิดมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นแบบชั้นตอนเดียว โดยจะมีหมูคาร์บอกซิลมากที่สุดอยู่ที่ 3 มิลลิคิกิวาเลนท์ต่อกรัม หมูคาร์บอนิล 2 มิลลิคิกิวาเลนท์ต่อกรัม หมูไฮดรอกซิล 1 มิลลิคิกิวาเลนท์ต่อกรัม และหมูแลคโตน 0.1 มิลลิคิกิวาเลนท์ต่อกรัม ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นแบบชั้นตอนเดียวจะมีหมูฟังก์ชันที่มีออกซิเจนแต่ละชนิดเท่ากับ 2 1 0.5 และ 0.1 มิลลิคิกิวาเลนท์ต่อกรัม ตามลำดับ

ภาพที่ 4.8 แสดงปริมาณหมูฟังก์ชันที่มีออกซิเจนแต่ละชนิดบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดไนตริก จะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นแบบสองชั้นตอนจะมีเพียงหมูไฮดรอกซิลเท่านั้นที่มีปริมาณมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นแบบชั้นตอนเดียวโดยมีปริมาณ 4 และ 2



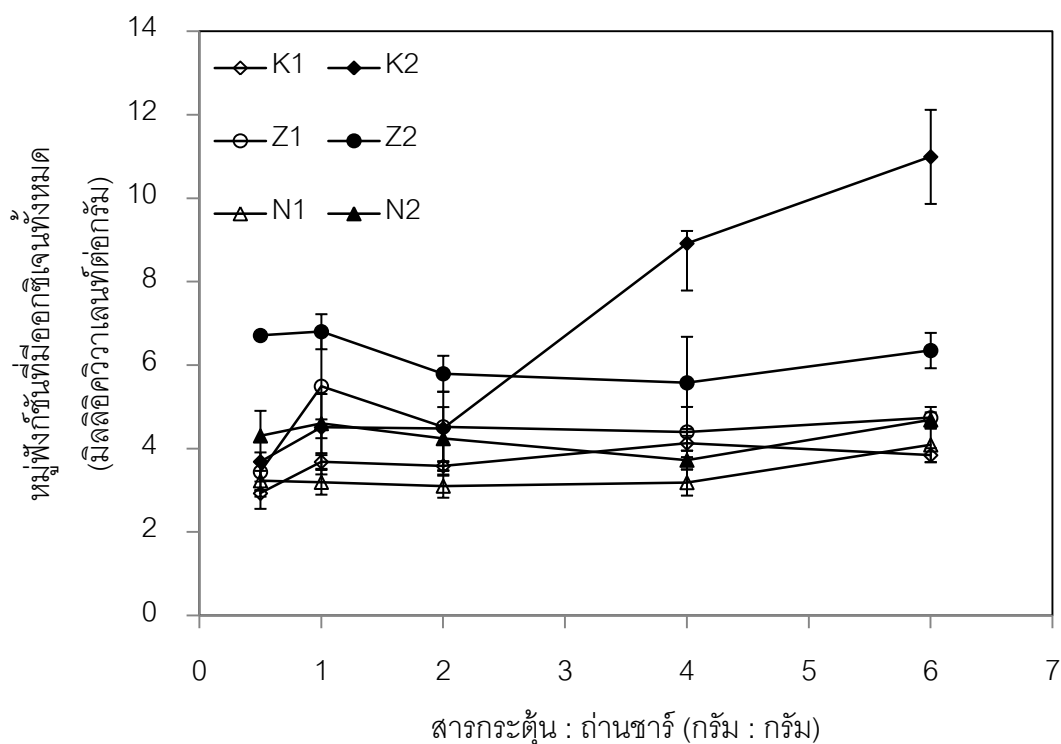
ภาพที่ 4.7 ปริมาณหมูฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์



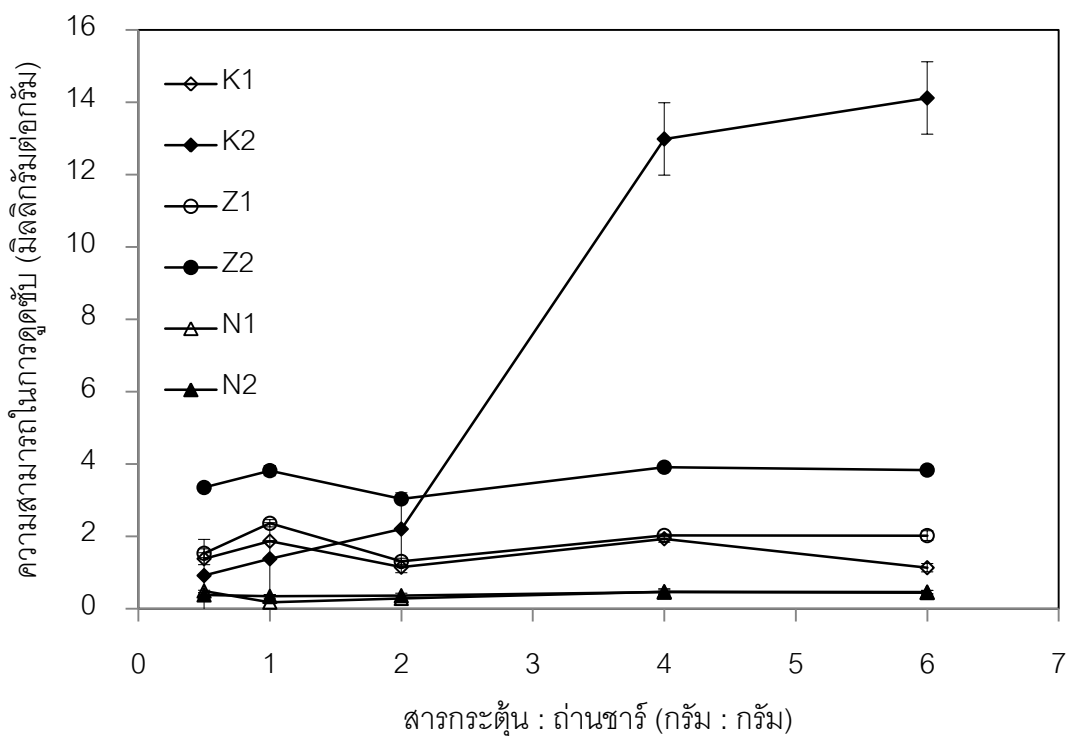
ภาพที่ 4.8 ปริมาณหมูฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดไนตริก

มิลลิอิกิวาเลนท์ต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนหมู่คาร์บอนิล หมู่แลคโตน และหมู่คาร์บอกซิลจะมีปริมาณ 0 ถึง 2 มิลลิอิกิวาเลนท์ต่อกรัมบนถ่านกัมมันต์ที่ได้จากทั้งสองวิธี ในขณะที่ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ทางการค้าพบว่ามีหมู่คาร์บอนิล 0.3008 มิลลิอิกิวาเลนท์ต่อกรัม หมู่คาร์บอกซิล 0.1742 มิลลิอิกิวาเลนท์ต่อกรัม หมู่แลคโตน 0.0995 มิลลิอิกิวาเลนท์ต่อกรัม และหมู่ไฮดรอกซิล 0.5262 มิลลิอิกิวาเลนท์ต่อกรัม

เมื่อพิจารณาปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนทั้งหมดบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้รับการกระตุ้นแบบสองขั้นตอน (K_2) ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 6 ต่อ 1 จะมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนทั้งหมดบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์สูงที่สุดซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 11 มิลลิอิกิวาเลนท์ แสดงดังภาพที่ 4.9 ในส่วนของถ่านกัมมันต์ทางการค้าจะมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนทั้งหมดบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เพียง 1.1006 มิลลิอิกิวาเลนท์ต่อกรัม

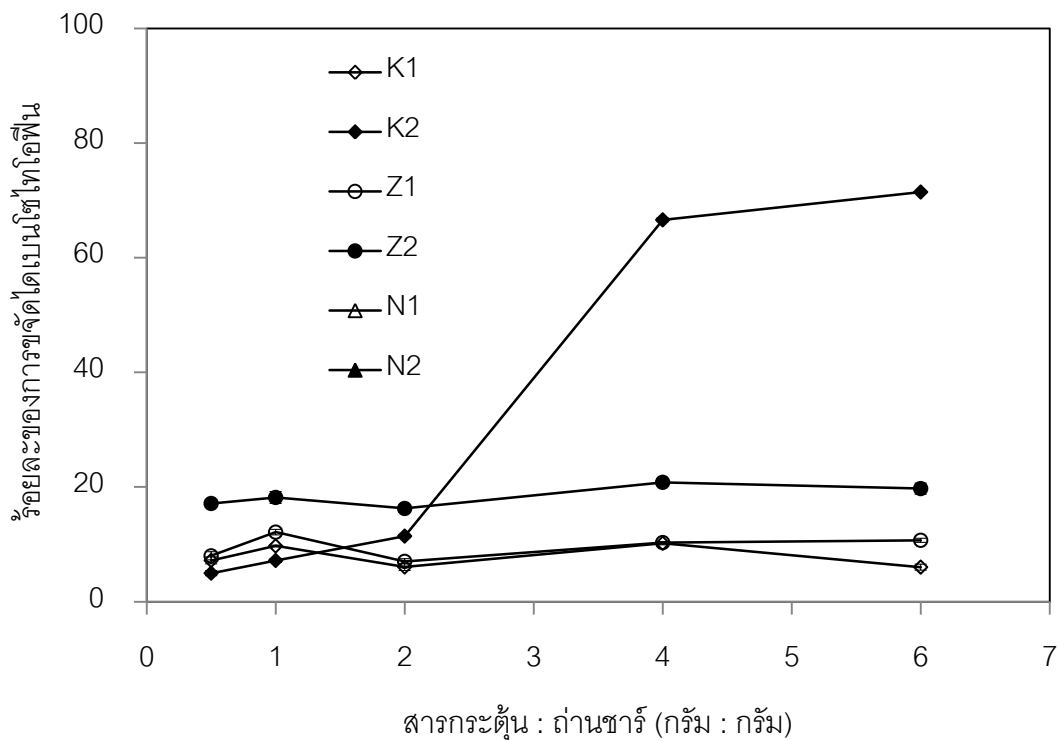


ภาพที่ 4.9 ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนทั้งหมดบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 4.10 ความสามารถในการดูดซับไดเบนโซโทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทน

ภาพที่ 4.10 แสดงความสามารถในการดูดซับไดเบนโซโทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทน และภาพที่ 4.11 แสดงร้อยละการกำจัดไดเบนโซโทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทนของถ่านกัมมันต์ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการกระตุ้นแบบสองขั้นตอนจะสามารถดูดซับไดเบนโซโทโอพีนได้เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของสารกระตุ้นและถ่านชาร์เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่อัตราส่วน 4 และ 6 จะมีความสามารถในการดูดซับไดเบนโซโทโอพีนได้ถึง 13.13 และ 14.25 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ หรือคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดไดเบนโซโทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทนได้ถึงร้อยละ 67.34 และ 71.44 ตามลำดับ ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ทางการค้าสามารถดูดซับไดเบนโซโทโอพีนได้ประมาณ 11 มิลลิกรัมต่อกรัม หรือคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดไดเบนโซโทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทนได้ถึงร้อยละ 58 ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนที่อยู่บนพื้นผิวโดยเฉพาะหมู่คาร์บอนิลมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เพิ่มขึ้น แต่หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนอื่นเมื่ออัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เพิ่มขึ้นจะมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากหมู่คาร์บอนิลเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ทำให้ปรับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (Two unpaired electron) ของอะตอมซัลเฟอร์ของไดเบนโซโทโอพีนซึ่งเป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Yu และคณะ, 2009;



ภาพที่ 4.11 ร้อยละของการจัดไดเบนไซโทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทนของถ่านกัมมันต์

Bu และคณะ, 2011; Wang และคณะ, 2012) ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่มีหมู่คาร์บอนิลสามารถดูดซับไดเบนไซโทโอพีนได้ดีกว่า โดยที่ลักษณะทางกายภาพไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับไดเบนไซโทโอพีน (Zhou และคณะ, 2006; Yu และคณะ, 2009)

เมื่อพิจารณาผลของวิธีการกระตุ้นและอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อความสามารถในการดูดซับไดเบนไซโทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทนของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ พบว่าการกระตุ้นแบบสองขั้นตอนจะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับไดเบนไซโทโอพีนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นแบบขั้นตอนเดียว กล่าวคือ การกระตุ้นแบบสองขั้นตอนจะมีความสามารถในการดูดซับไดเบนไซโทโอพีนประมาณ 3.59 มิลลิกรัมต่อกรัม หรือคิดเป็นประสิทธิภาพในการจัดไดเบนไซโทโอพีนจากนอร์มัล - ออกเทนประมาณร้อยละ 18.43 ในขณะที่การกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวจะมีความสามารถในการดูดซับไดเบนไซโทโอพีนประมาณ 1.85 มิลลิกรัมต่อกรัม หรือคิดเป็นประสิทธิภาพในการจัดไดเบนไซโทโอพีนจากนอร์มัล - ออกเทนประมาณร้อยละ 9.64 เพราะถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นแบบสองขั้นตอนมีปริมาณหมู่คาร์บอนิลบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นแบบขั้นตอนเดียว โดยมีปริมาณหมู่คาร์บอนิลบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์

ประมาณ 2 และ 1.5 มิลลิลิตรวาลูเลนที่ต่อกรัมซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ถึงแม้ว่าถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์จะมีหมู่คาร์บอกซิลในปริมาณมากแต่ก็ไม่สอดคล้องกับความสามารถในการดูดซับไดเบนโซไทโอฟีนของถ่านกัมมันต์ แสดงว่าหมู่คาร์บอกซิลไม่มีสมบัติในการดูดซับไดเบนโซไทโอฟีน

ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดไนตริกพบว่าวิธีการกระตุ้นและอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับไดเบนโซไทโอฟีนจากนอร์มัล - ออกเทน โดยความสามารถในการดูดซับไดเบนโซไทโอฟีนจะคงที่ที่ประมาณ 0.18 ถึง 0.49 มิลลิกรัมต่อกรัม หรือคิดเป็นประสิทธิภาพในการขจัดไดเบนโซไทโอฟีนจากนอร์มัลออกเทน ประมาณร้อยละ 3.94 ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณหมู่คาร์บอนิลบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้มีปริมาณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยมีหมู่คาร์บอนิลปริมาณเพียง 0.5 มิลลิลิตรวาลูเลนที่ต่อกรัม ทำให้ปริมาณไดเบนโซไทโอฟีนที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับได้มีปริมาณน้อยตามไปด้วย ถึงแม้ว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยกรดไนตริกจะมีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลมากที่สุดก็ตามแต่หมู่ดังกล่าวไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ

จากที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าวิธีการกระตุ้นที่เหมาะสมที่สุดคือ วิธีการกระตุ้นแบบสองขั้นตอน สารกระตุ้นที่เหมาะสมในการนำไปกระตุ้นถ่านชาร์ คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 6 ต่อ 1 โดยความสามารถในการดูดซับไดเบนโซไทโอฟีนจากนอร์มัล-ออกเทนจะขึ้นอยู่กับปริมาณของหมู่คาร์บอนิลและหมู่ฟังก์ชันทั้งหมดบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

4.2.2 ผลของตัวแปรในการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบสองขั้นตอนต่อความสามารถในการดูดซับไดเบนโซไทโอฟีนจากนอร์มัล-ออกเทน

ความสามารถในการดูดซับไดเบนโซไทโอฟีนจากนอร์มัล-ออกเทนของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ เช่น ระยะเวลาที่สารกระตุ้นสัมผัสกับถ่านชาร์ อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ต่อความสามารถในการดูดซับไดเบนโซไทโอฟีนจากนอร์มัล-ออกเทนของถ่านกัมมันต์ โดยทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบ 2^k ตัวแปรที่นำมาออกแบบการทดลองมี 3 ตัวแปร ด้วยกัน คือ

- A ระยะเวลาที่สารกระตุ้นสัมผัสกับถ่านชาร์ ค่าต่ำสุด (-) คือ 0.5 ชั่วโมง ค่าสูงสุด (+) คือ 48 ชั่วโมง
- B อุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ ค่าต่ำสุด (-) คือ 400 องศาเซลเซียส ค่าสูงสุด (+) คือ 800 องศาเซลเซียส
- C ระยะเวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ ค่าต่ำสุด (-) คือ 0.5 ชั่วโมง ค่าสูงสุด (+) คือ 2 ชั่วโมง

โดยผลตอบสนองของการทดลองนี้คือ ความสามารถในการดูดซับไคเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทน (Q) ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การทดลอง	A	B	C	Q (มิลลิกรัมต่อกรัม)	
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1	-	-	-	2.46	2.48
a	+	-	-	3.58	3.29
b	-	+	-	12.76	12.48
ab	+	+	-	11.88	11.96
c	-	-	+	2.19	2.12
ac	+	-	+	3.64	3.68
bc	-	+	+	11.95	11.95
abc	+	+	+	10.62	10.6

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความสามารถในการดูดซับไคเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทนพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 หรือระดับความสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 ซึ่งค่าวิกฤต ($F_0 = F_{0.05, 1, 8}$) เท่ากับ 5.3177 จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 4.5 พบว่าตัวแปร B C AB BC และ ABC มีค่า F_0 สูงกว่าค่าวิกฤต แสดงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ ระยะเวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่สารกระตุ้นสัมผัสกับถ่านชาร์และอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ และปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยมีผลต่อความสามารถในการดูดซับไคเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทน เมื่อ

นำผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากตารางที่ 4.5 นำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (4.1)

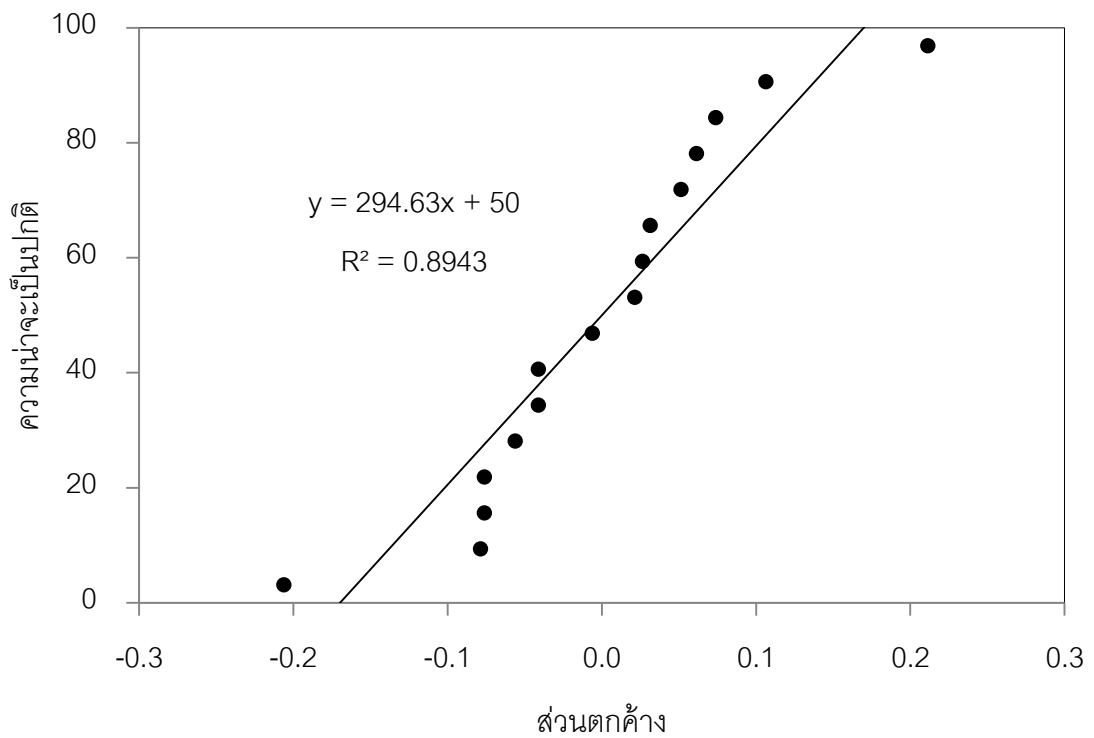
$$Q = 7.3525 + 4.4225x_B - 0.2588x_C - 0.5638x_Ax_B - 0.2363x_Bx_C - 0.1475x_Ax_Bx_C \quad (4.1)$$

โดย x_A, x_B, x_C คือค่าของตัวแปรที่เข้ารหัส

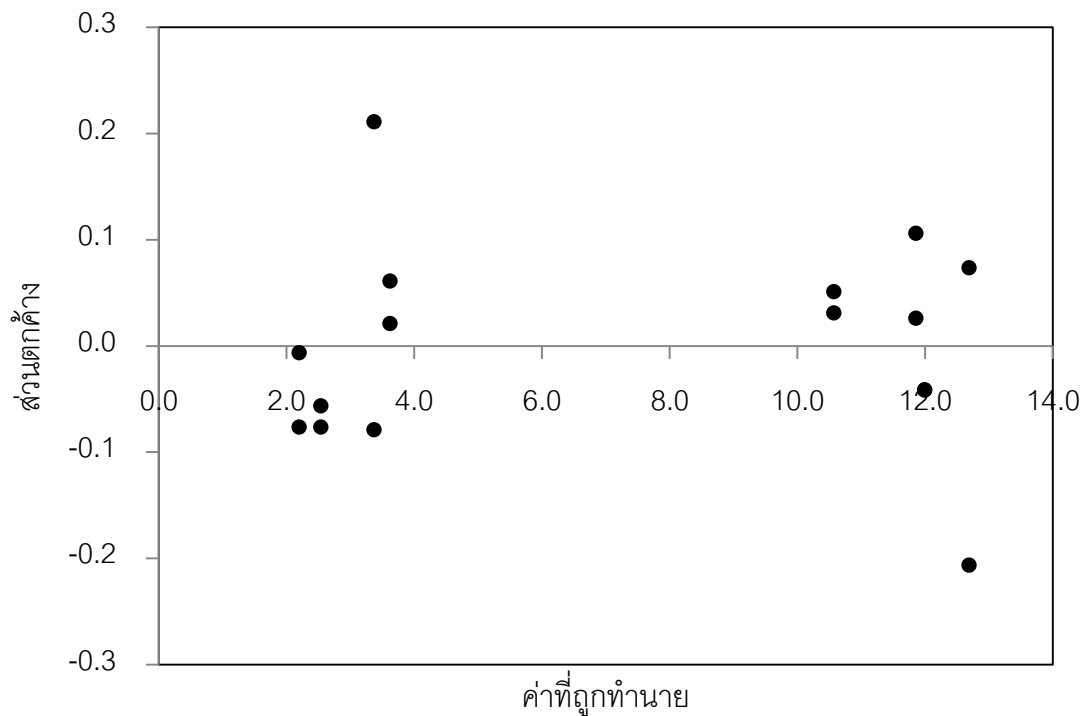
ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความสามารถในการดูดซับไดเบนโซโทไโอฟินจากนอร์มัล-ออกเทน

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F - Value	P - Value
A	0.0462	1	0.0462	4.1975	0.0746
B	312.9361	1	312.9361	28416.44	0.0000
C	1.0712	1	1.0712	97.2736	0.0000
AB	5.0850	1	5.0850	461.7503	0.0000
AC	0.0025	1	0.0025	0.2270	0.6465
BC	0.8930	1	0.8930	81.0919	0.0000
ABC	0.3481	1	0.3481	31.6095	0.0005
Error	0.0881	8	0.0110		
Total	320.4703	15			

จากสมการเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้นำไปสร้างกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง (Normal probability plot) ดังภาพที่ 4.12 และกราฟของส่วนตกค้าง (Residuals) กับค่าที่ถูกทำนาย (Predicted) value) ดังภาพที่ 4.13 เพื่อเป็นการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการ จากภาพที่ 4.12 พบว่าค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.8943 แสดงว่าค่าของส่วนตกค้างจากสมการมีการกระจายตัวที่เป็นแบบปกติ ซึ่งตามสมมุติฐานของการแจกแจงแบบปกติพฤติกรรมดังกล่าวจะแสดงว่าค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้างมีค่าเท่ากับศูนย์ และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของส่วนตกค้างในภาพที่ 4.13 พบว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างมีค่าคงที่และไม่มีรูปแบบที่แน่นอนจึงกล่าวได้



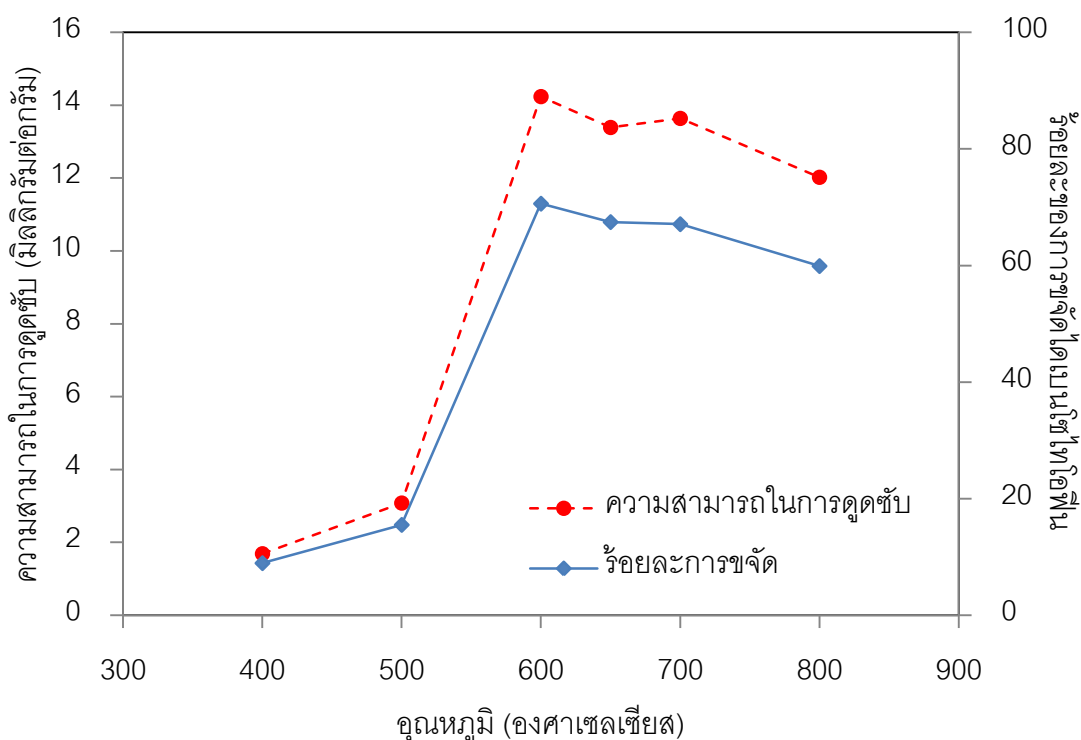
ภาพที่ 4.12 ความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตักค้างในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความสามารถในการดูดซับไดเบนโซโทไอเฟนจากนอร์มัล-ออกเทน



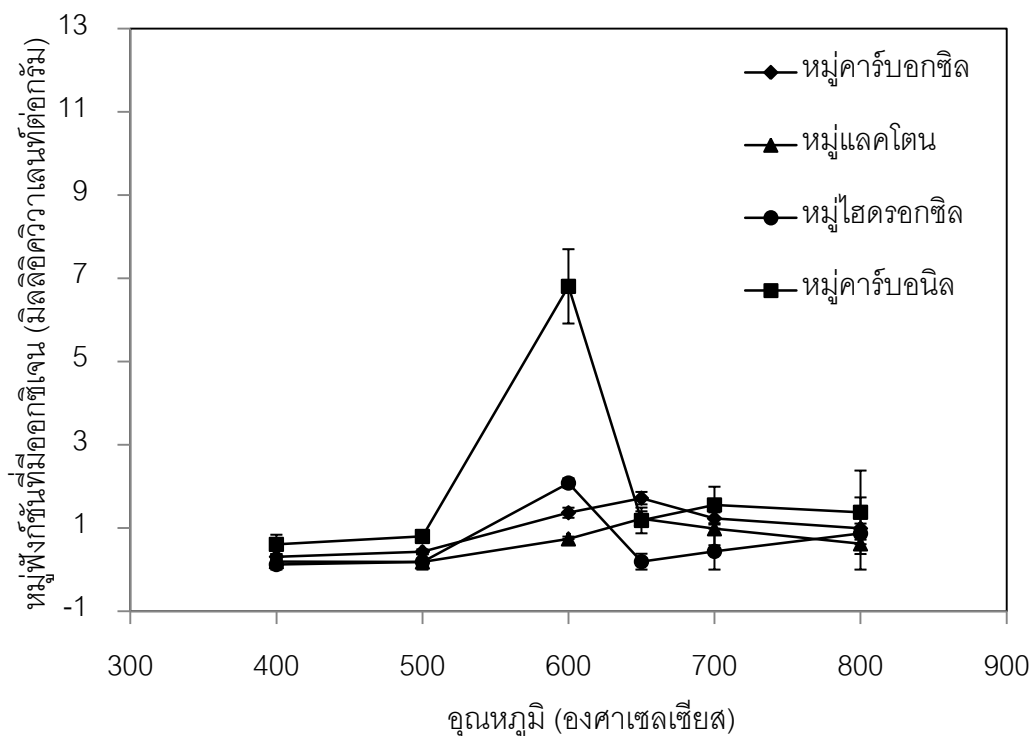
ภาพที่ 4.13 ส่วนตักค้างกับค่าที่ถูกทำนายของความสามารถในการดูดซับไดเบนโซโทไอเฟนจากนอร์มัล-ออกเทน

ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ในสมการที่ (4.1) สามารถใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างเหมาะสม แต่เมื่อพิจารณาผลบวกของคะแนนที่เบี่ยงเบน (Sum of square) ความแปรปรวน (Mean Square) หรือ ค่า F จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของสัดส่วนของปัจจัยที่มีผลมีค่าแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดโดยเฉพาะตัวแปร B หรือ อุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ และตัวแปร C หรือ ระยะเวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ ซึ่งมีค่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยอื่นๆ ที่มีผล ดังนั้นจึงทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ และระยะเวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์

ภาพที่ 4.14 แสดงผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับและร้อยละของการขาดไคโอเฟน พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส ความสามารถในการดูดซับไคโอเฟนลดลง และเมื่อพิจารณาปริมาณหมู่ออกซิเจนที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ดังภาพที่ 4.15 และ 4.16 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงแรกปริมาณหมู่ออกซิเจน



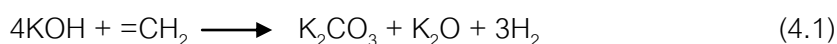
ภาพที่ 4.14 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านซาร์ที่อัตราส่วน 6 ต่อ 1 เวลา 24 ชั่วโมง ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 1 ชั่วโมง



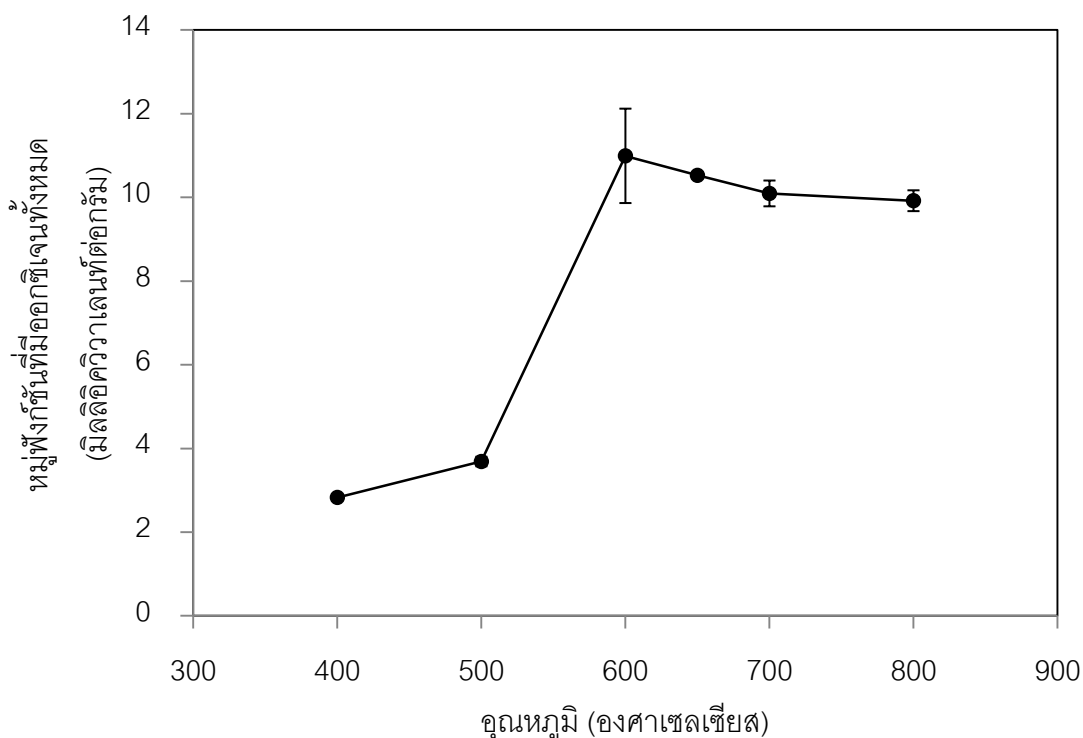
ภาพที่ 4.15 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ที่มีผลต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์ที่อัตราส่วน 6 ต่อ 1 เวลา 24 ชั่วโมง ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 1 ชั่วโมง

คาร์บอนิลมีปริมาณเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันแต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วงหลังปริมาณหมู่คาร์บอนิลมีปริมาณลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาของโพแทสเซียม-ไฮดรอกไซด์ไปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นที่อุณหภูมิต่าง ๆ (Ehrburger และคณะ 1986; Jibril และคณะ, 2008) ดังนี้

- เกิด K_2CO_3 ที่อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส



- เกิดปฏิกิริยาของ K_2CO_3 ในคาร์บอน เกิดเป็น CO_2 และเกิด C-O-K ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ตัวกลาง (Intermediate product) โดยพบได้ที่บริเวณที่ว่องไว (Active site) ในการเกิดแกซิฟิเคชัน (Gasification) ที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส

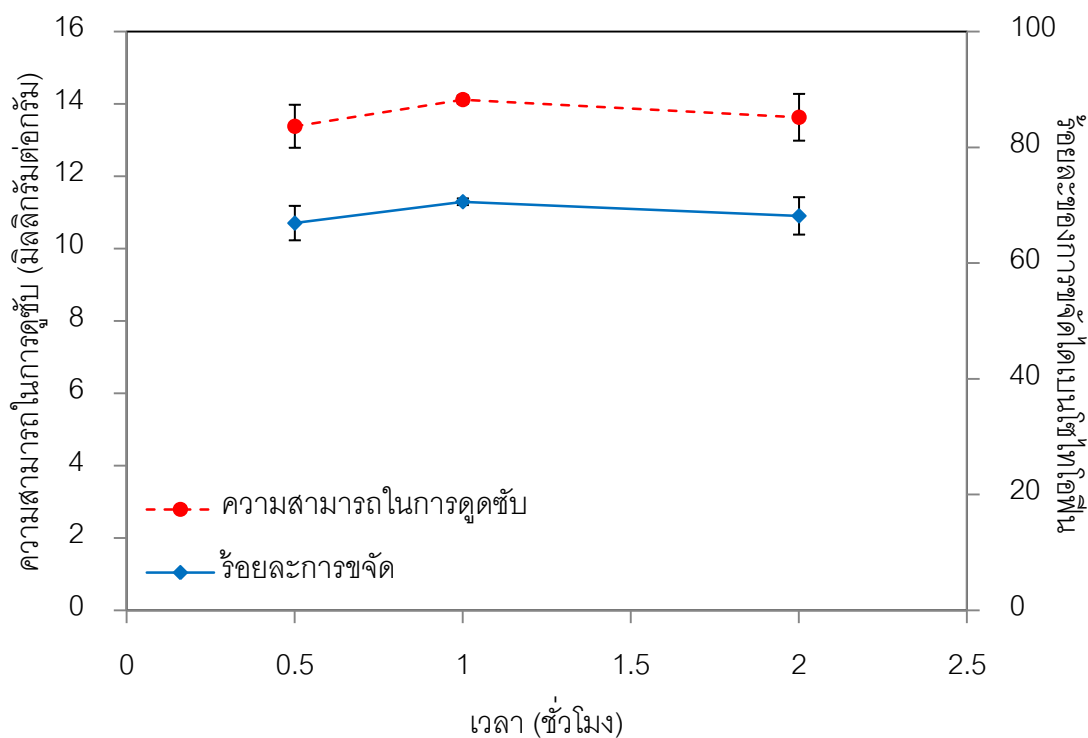


ภาพที่ 4.16 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ที่มีผลต่อปริมาณหมูฟังก๊าซที่มีออกซิเจนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์ที่อัตราส่วน 6 ต่อ 1 เวลา 24 ชั่วโมง ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 1 ชั่วโมง

- เกิด CO ที่อุณหภูมิประมาณ 650 องศาเซลเซียส



ซึ่งโพแทสเซียมมีผลต่อการเกิดหมูฟังก๊าซที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เมื่อมีการสลายตัวทางความร้อน (Oh และคณะ, 2003) และมีผลต่อความสามารถในการดูดซับไดเบนโซไทโอเฟนจากนอร์มัล-ออกเทน



ภาพที่ 4.17 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของ ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์ที่อัตราส่วน 6 ต่อ 1 เวลา 24 ชั่วโมง ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที

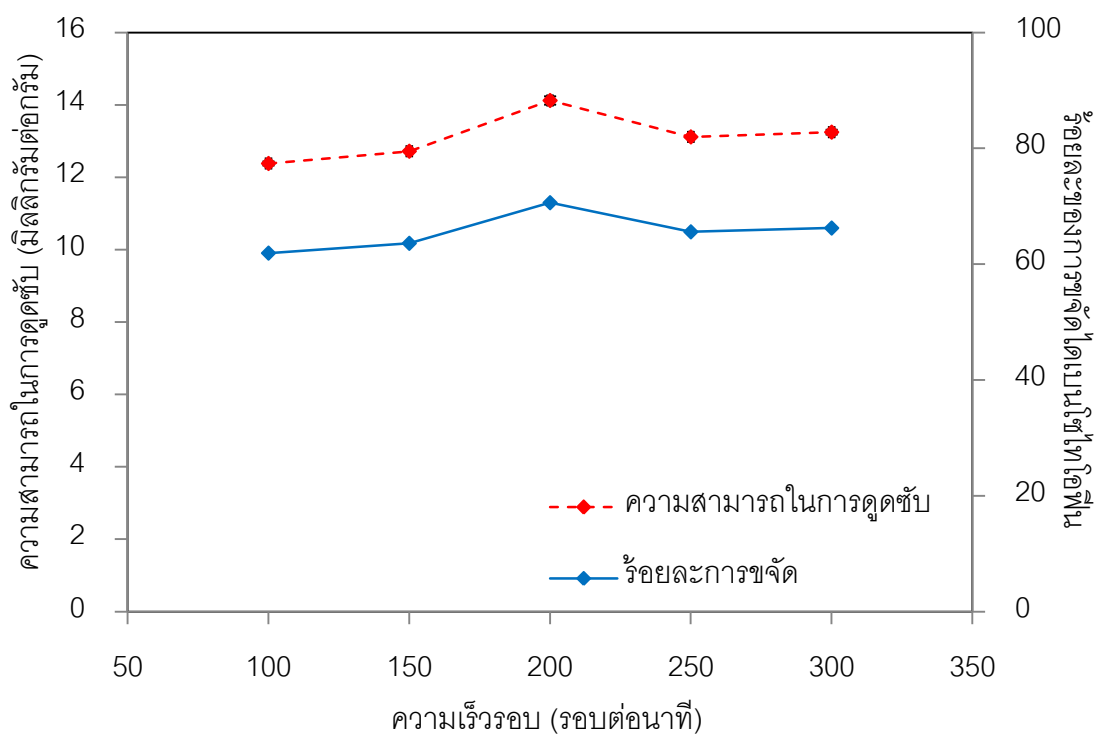
ภาพที่ 4.17 แสดงผลของระยะเวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ พบว่าเมื่อระยะเวลาของการคาร์บอนไนซ์เพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับไดเบนโซโทโลเฟนจากนอร์มัล-ออกเทนมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แสดงว่าระยะเวลาในการคาร์บอนไนซ์มีผลต่อความสามารถในการดูดซับไดเบนโซโทโลเฟนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

จากผลที่ได้แสดงว่าที่อุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์เท่ากับ 600 องศาเซลเซียส จะสามารถเตรียมถ่านกัมมันต์แบบสองขั้นตอนได้ดีที่สุดโดยใช้ระยะเวลาที่สารกระตุ้นสัมผัสกับถ่านชาร์เท่ากับ 24 ชั่วโมง ระยะเวลาในการคาร์บอนไนซ์เท่ากับ 1 ชั่วโมง

4.3 ภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไคเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทน

การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการขจัดไคเบนโซไทโอพีนออกจากนอร์มัล-ออกเทน จะทำการศึกษาผลของตัวแปร 2 ตัว คือ ความเร็วรอบในการเขย่าและอัตราส่วนระหว่างไคเบนโซไทโอพีนและถ่านกัมมันต์

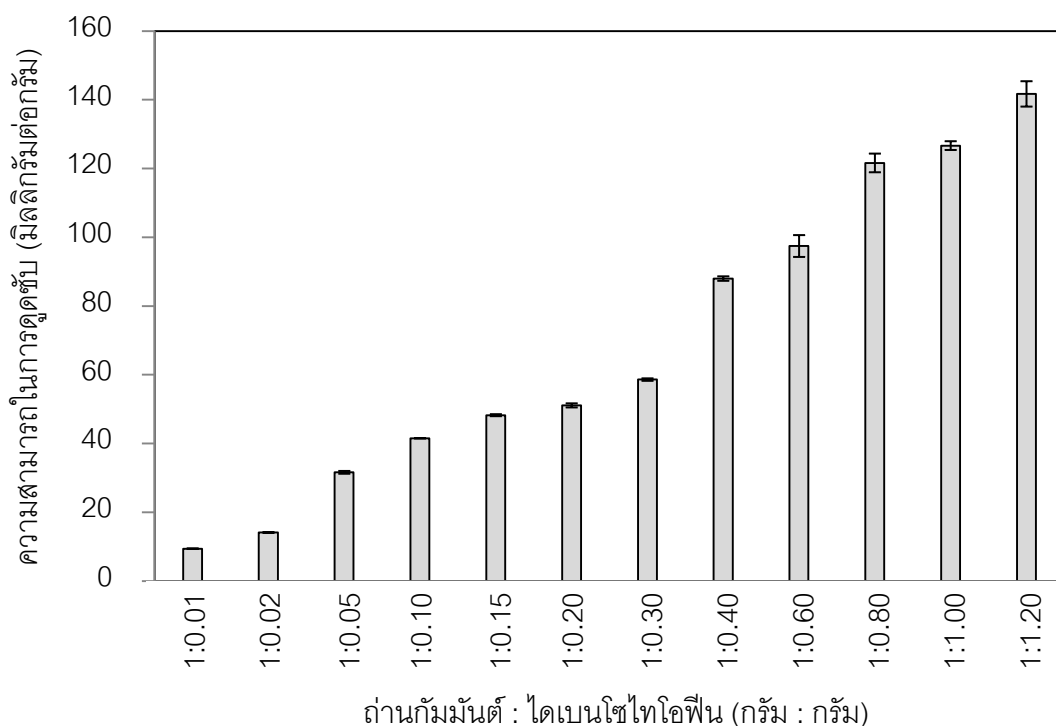
ภาพที่ 4.18 แสดงผลของความเร็วยรอบในการเขย่าต่อความสามารถในการดูดซับไคเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทน พบว่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีจะสามารถดูดซับไคเบนโซไทโอพีนได้ประมาณ 14 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสามารถดูดซับไคเบนโซไทโอพีนได้มากกว่าที่ความเร็วรอบ 100 และ 300 รอบต่อนาที ประมาณ 1 ถึง 2 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อความเร็วรอบในการเขย่ามากกว่า 200 รอบต่อนาที ทำให้ความสามารถในการดูดซับไคเบนโซไทโอพีนลดลงเนื่องจากเกิดแรงเฉือนระหว่างโมเลกุลทำให้โมเลกุลไม่สามารถเกาะกันได้ และเมื่อความเร็วรอบใน



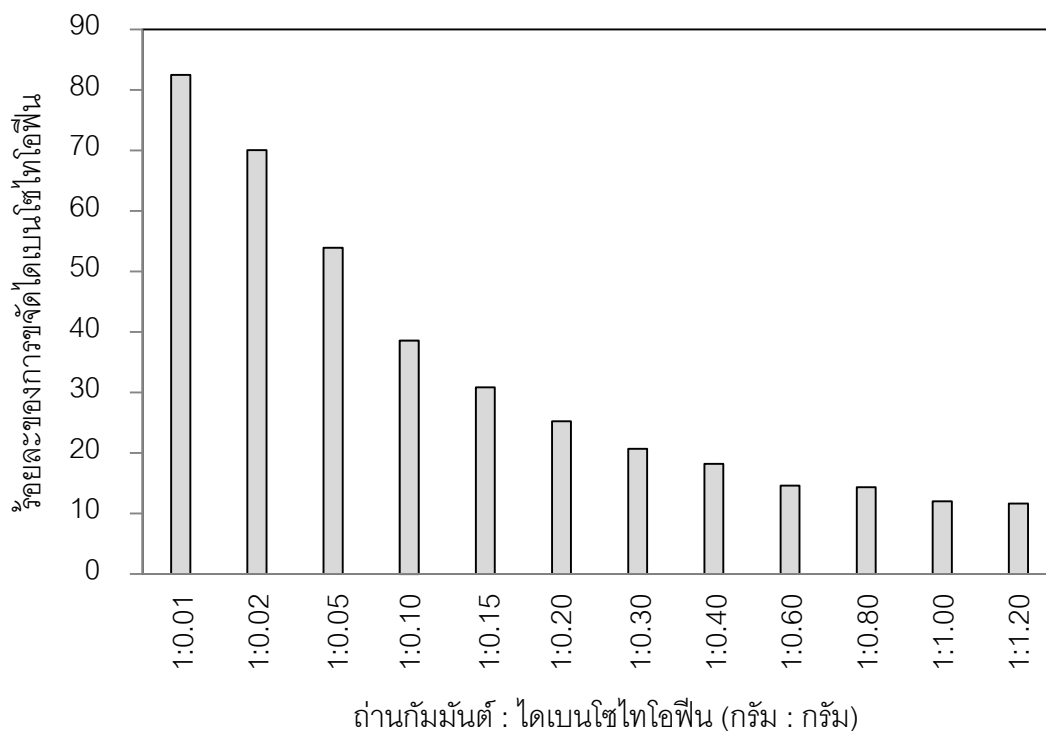
ภาพที่ 4.18 ผลของความเร็วยรอบในการเขย่าที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านซาร์ที่อัตราส่วน 6 ต่อ 1 เวลา 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 1 ชั่วโมง

การเขย่าต่ำกว่า 200 รอบต่อนาที ความสามารถในการดูดซับไคเบนโซไทโอพีนลดลงเนื่องจากโอกาสที่โมเลกุลจะสัมผัสกันได้น้อยลง

ภาพที่ 4.19 แสดงผลของอัตราส่วนระหว่างไคเบนโซไทโอพีนและถ่านกัมมันต์ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับไคเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทน พบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างไคเบนโซไทโอพีนและถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับไคเบนโซไทโอพีนเพิ่มขึ้นจาก 9.5 มิลลิกรัมต่อกรัม และคงที่ที่ 50 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการขจัดไคเบนโซไทโอพีนดังภาพที่ 4.20 พบว่าที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไคเบนโซไทโอพีนต่ำจะมีประสิทธิภาพในการขจัดไคเบนโซไทโอพีนประมาณร้อยละ 85 ในขณะที่อัตราส่วนสูงจะมีประสิทธิภาพลดต่ำลงจนถึงประมาณร้อยละ 25 เมื่ออัตราส่วนระหว่างไคเบนโซไทโอพีนและถ่านกัมมันต์ต่ำทำให้มีปริมาณถ่านกัมมันต์มากพอที่จะดูดซับ



ภาพที่ 4.19 ผลของอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และไคเบนโซไทโอพีนที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 6 ต่อ 1 เวลา 24 ชั่วโมง ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 1 ชั่วโมง

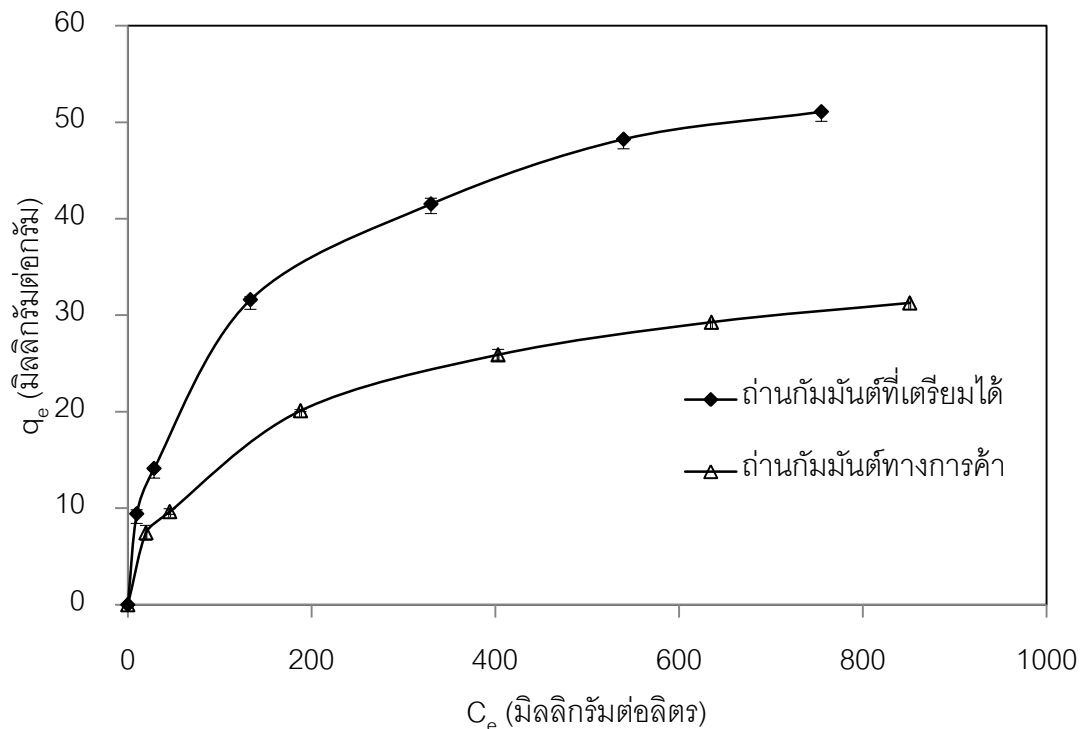


ภาพที่ 4.20 ร้อยละการขจัดไดเบนไซโทไอพีนจากนอร์มัล – ออกเทนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 6 ต่อ 1 เวลา 24 ชั่วโมง ความเร็วรอบ 200 รอบ ต่อนาที อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 1 ชั่วโมง

ไดเบนไซโทไอพีนแต่เมื่ออัตราส่วนระหว่างไดเบนไซโทไอพีนและถ่านกัมมันต์สูงขึ้นปริมาณถ่านกัมมันต์ที่จะใช้ในการดูดซับไดเบนไซโทไอพีนมีไม่เพียงพอ รวมทั้งมีการผลึกกันระหว่างโมเลกุล ทำให้โอกาสที่ถ่านกัมมันต์จะดูดซับไดเบนไซโทไอพีนได้ลดลงตามไปด้วย

4.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับไดเบนไซโทไอพีนด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 6 ระยะเวลาที่สารกระตุ้นสัมผัสกับถ่านชาร์ 24 ชั่วโมง ที่มีการกระตุ้นแบบสองขั้นตอนที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง และถ่านกัมมันต์ทางการค้าซึ่งมีสมบัติแสดงในภาคผนวก จ โดยในการดูดซับจะใช้เวลาในการดูดซับ 14 ชั่วโมง ปริมาณถ่านกัมมันต์ 5 กรัม

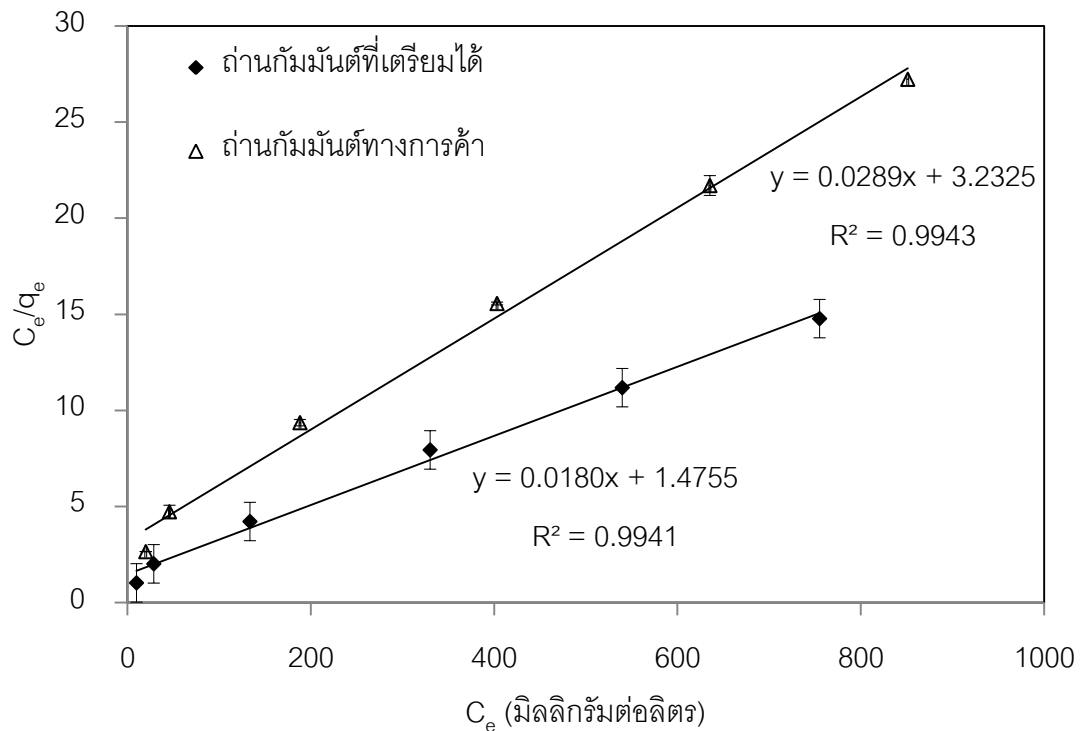


ภาพที่ 4.21 ความเข้มข้นของไคเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล - ออกเทนกับปริมาณไคเบนโซไทโอพีนที่ถูกดูดซับในถ่านกัมมันต์ที่ภาวะสมดุล

ต่อลิตรของนอร์มัล-ออกเทน ความเร็วรอบในการเขย่า 200 รอบต่อนาที โดยปริมาณไคเบนโซไทโอพีนปริมาณไคเบนโซไทโอพีนมีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 50 100 250 500 750 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร (พีพีเอ็ม) พบว่าปริมาณของไคเบนโซไทโอพีนในนอร์มัล-ออกเทนกับปริมาณของไคเบนโซไทโอพีนที่ถูกดูดซับในถ่านกัมมันต์ที่ภาวะสมดุลแสดงดังภาพที่ 4.21

ก. ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e และ $\frac{C_e}{q_e}$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\frac{1}{K_L q_m}$ ดังสมการที่ 2.2

จากภาพที่ 4.22 พบว่าการดูดซับไคเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทนด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9941 โดยปริมาณความเข้มข้นของไคเบนโซไทโอพีนที่ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับได้มากที่สุด (q_m) มีค่าเท่ากับ 55.6 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าคงที่ของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (K_L) มีค่า 0.012 ลิตรต่อมิลลิกรัม ส่วนถ่านกัมมันต์ทางการค้าจะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9943 โดยปริมาณความเข้มข้นของไคเบนโซไทโอพีนที่ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับได้มากที่สุด (q_m) มีค่าเท่ากับ 34.6 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าคงที่ของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (K_L) มีค่า 0.009 ลิตรต่อมิลลิกรัม

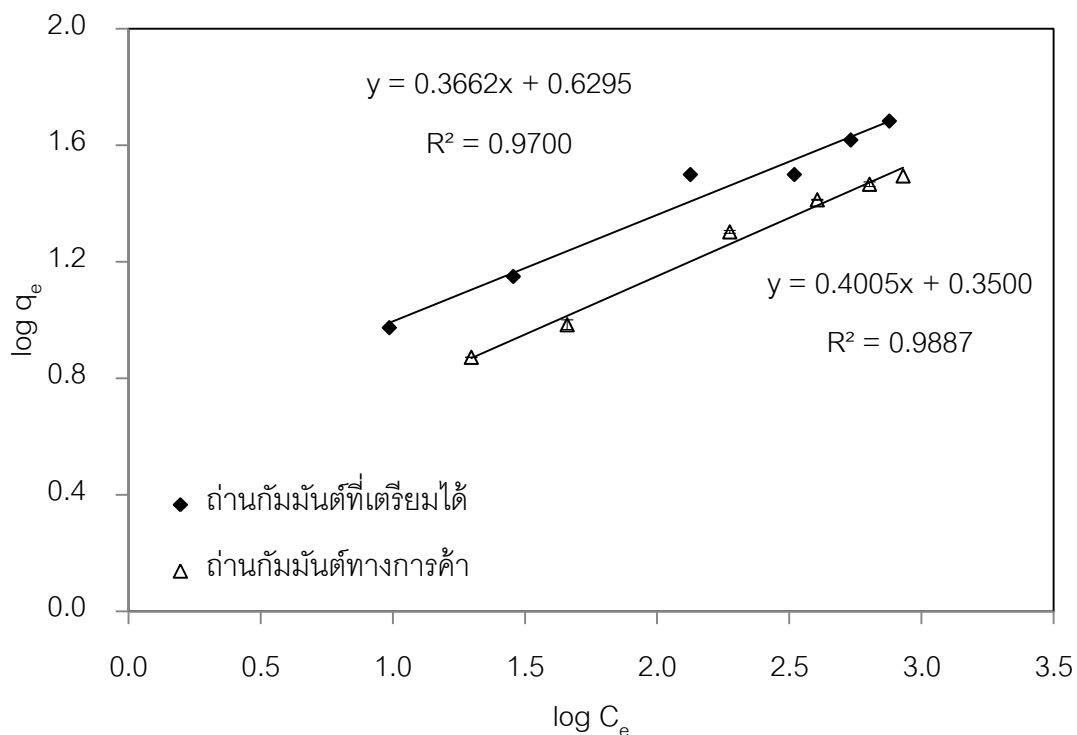


ภาพที่ 4.22 ไอโซเทอมของการดูดซับไคเบนโซไทโอเฟนจากนอร์มัล – ออกเทนด้วยถ่านกัมมันต์แบบแลงเมียร์

ข. ไอโซเทอมแบบฟรุนดิช เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log C_e$ และ $\log q_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K_F$ ดังสมการที่ 2.4

จากภาพที่ 4.23 พบว่าการดูดซับไคเบนโซไทโอเฟนจากนอร์มัล-ออกเทนด้วยถ่านกัมมันต์จะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9700 ค่า n ของการดูดซับไคเบนโซไทโอเฟนมีค่าเท่ากับ 2.73 และค่าคงที่ของการดูดซับแบบฟรุนดิชมีค่าเท่ากับ 4.26 ลิตรต่อมิลลิกรัม ส่วนถ่านกัมมันต์ทางการค้าจะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9887 ค่า n ของการดูดซับไคเบนโซไทโอเฟนมีค่าเท่ากับ 2.50 และค่าคงที่ของการดูดซับแบบฟรุนดิชมีค่าเท่ากับ 2.24 ลิตรต่อมิลลิกรัม

เมื่อทำการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆ ของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดิชของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับถ่านกัมมันต์ทางการค้าดังตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้และถ่านกัมมันต์ทางการค้าสามารถดูดซับไคเบนโซไทโอเฟนจากนอร์มัล-ออกเทนได้ในรูปแบบของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ เนื่องจากค่า R^2 ของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มีค่ามากกว่าไอโซเทอมแบบฟรุนดิช แสดงว่ารูปแบบของการดูดซับไคเบนโซไทโอเฟนจากนอร์มัล-ออกเทนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้และถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีการดูดซับแบบชั้นเดียวและเป็น



ภาพที่ 4.23 ไอโซเทอมของการดูดซับไคเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล - ออกเทนด้วยถ่านกัมมันต์แบบฟรุนดิช

การดูดซับแบบทางเคมี เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับไคเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทนพบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้สามารถดูดซับได้ถึง 55.6 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ทางการค้าดูดซับได้เพียง 34.6 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีความสามารถในการดูดซับไคเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทนได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า

ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์และสมการฟรุนดิชของการดูดซับไคเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล - ออกเทน

ชนิดถ่านกัมมันต์	สมการแลงเมียร์			สมการฟรุนดิช		
	q_m	K_L	R^2	n	K_F	R^2
ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้	55.6	0.012	0.9941	2.73	4.26	0.9700
ถ่านกัมมันต์ทางการค้า	34.6	0.009	0.9943	2.50	2.24	0.9887

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาชนิดของสารที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านชาร์และอัตราส่วนของสารกระตุ้นและถ่านชาร์ พบว่าเมื่อใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้นถ่านชาร์ที่อัตราส่วนของโพแทสเซียมและถ่านชาร์เท่ากับ 6 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก จะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีในการดูดซับไคเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทนได้ดี โดยถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับไคเบนโซไทโอพีนที่อัตราส่วนดังกล่าวเท่ากับ 14.12 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับคิดเป็นร้อยละ 71.44 ซึ่งสามารถดูดซับได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าถึงร้อยละ 27 โดยความสามารถในการดูดซับไม่ขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ แต่ขึ้นกับสมบัติทางเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์โดยเฉพาะหมู่คาร์บอนิลและหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนทั้งหมด สำหรับการศึกษาค่าวิจัยที่มีผลในการกระตุ้นถ่านชาร์ พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์คือ ระยะเวลาที่สารกระตุ้นสัมผัสกับถ่านชาร์ที่เหมาะสมคือ 24 ชั่วโมง วิธีการกระตุ้นที่เหมาะสมคือ วิธีการกระตุ้นแบบสองขั้นตอนจะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับไคเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทนดีกว่าวิธีการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียว โดยภาวะที่ใช้ในการกระตุ้นแบบสองขั้นตอนคือ อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง โดยภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไคเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทน คือ ที่ความเร็วรอบของการเขย่าเป็น 200 รอบต่อนาที อัตราส่วนของไคเบนโซไทโอพีนและถ่านกัมมันต์ คือ 10 มิลลิกรัมต่อกรัม และลักษณะการดูดซับไคเบนโซไทโอพีนจากนอร์มัล-ออกเทนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์

ข้อเสนอแนะ

1. หลังจากการคาร์บอนไนซ์ควรนำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาล้างด้วยน้ำกลั่นในปริมาณมากเพื่อล้างสารเคมีที่หลงเหลืออยู่ออกให้หมด
2. ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยไม่ต้องผ่านการไพโรไลซิสแต่นำไปกระตุ้นด้วยสารเคมีเพื่อลดขั้นตอนหรืออาจเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับให้ดียิ่งขึ้น
3. ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับไคเบนโซไทโอพีนด้วยถ่านกัมมันต์เนื่องจากถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้สามารถดูดซับไคเบนโซไทโอพีนได้ดี

4. ศึกษาการดูดซับไดเบนไซโทโอพีนจากนอร์มัล – ออกเทนโดยใช้ระบบต่อเนื่องเพื่อสามารถนำไปใช้ได้ในระบบการอุตสาหกรรม
5. ศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ในน้ำมันที่มีสารประกอบกำมะถันหลายชนิด
6. ศึกษาวิธีการในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับแล้วนำมาใช้ใหม่

รายการอ้างอิง

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological profile for sulfur dioxide, Georgia: ATSDR, .1998. (Mimeographed)
- American Society for Testing and Materials. ASTM D 4607-94 (2006), Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon.
- Bandosz, T.J. Activated Carbon Surfaces in Environmental Remediation. USA: Elsevier, 2006.
- Bandosz, T.J., and Block, K. Effect of pyrolysis temperature and time on catalytic performance of sewage sludge/industrial sludge-based composite adsorbents. Appl. Catal. B: Environ 67 (September 2006): 77-85.
- Bu, J., Loh, G., Gwie, C.G., Dewiyanti, S., Tasrif, M., and Borgna, A. Desulfurization of diesel fuels by selective adsorption on activated carbon: Competitive adsorption of polycyclic aromatic heterocycles and polycyclic aromatic hydrocarbon. Chem. Eng. J. 166 (January 2011): 207-217.
- Büchel, K. H., Moretto, H.H., and Woditsch, P. Industrial Inorganic Chemistry. 2nd-Edition. Germany: Wiley-VCH, 2000.
- Chen, X., Jeyaseelan, S., and Graham, N. Physical and chemical properties study of the activated carbon made from sewage sludge. Waste Manage. 22 (November 2002): 755-760.
- Dai, W., Zhou, Y., Wang, S., Su, W., Sun, Y., and Zhou, L. Desulfurization of transportation fuels targeting at removal of thiophene/benzothiophene. Fuel. Process. Technol. 89 (August 2008): 749-755.
- Demirbas, A. Agricultural based activated carbons for the removal of dyes from aqueous solutions: A review. J. Hazard. Mater. 167 (August 2009): 1-9.
- Ehrburger, P., Addoun, A., Addoun, F., and Donnet, J.B. Carbonization of coal in the presence of alkaline hydroxides and carbonates: Formation of activated carbon. Fuel 65 (October 1986): 1447-1449.

- Fallah, R.N., and Azizian, S. Removal of thiophenic compounds from liquid fuel by different modified activated carbon cloths. Fuel Process. Technol. 93 (January 2012): 45-52.
- Guo, J., and Lua, A.C. Surface functional groups on oil-palm-shell adsorbents prepared by H₃PO₄ and KOH activation and their effects on adsorptive capacity. Trans. ICheme. 81 (May 2003): 585-560.
- Hernandez, S.P., Fino, D., and Russo, N. High performance sorbents for diesel oil desulfurization. Chem. Eng. Sci. 65 (January 2010): 603–609.
- Ioannidou, O., and Zabaniotou, A. Agricultural residues as precursors for activated carbon production-A review. Renew. Sustain. Energy Rev. 11 (December 2007): 1966-2005.
- Japanese Industrial Standard. JIS K 1474-1991, Standard Test Method for Activated Carbon.
- Jibril, B., Houache, O., Al-Maamari, R., and Al-Rashidi, B. Effects of H₃PO₄ and KOH in carbonization of lignocellulosic material. J. Anal. Appl. Pyrolysis. 83 (November 2008): 151-156.
- Lillo-Ródenas, M. A., Cazorla-Amorós, D., and Linares-Solano, A. Understanding chemical reactions between carbon and NaOH and KOH An insight into the chemical activation mechanism. Carbon 41 (February 2003): 267-275.
- Liu, C., Tang, Z., Chen, Y., Su, S., and Jiang, W. Characterization of mesoporous activated carbon prepared by pyrolysis of sewage sludge with pyrolusite. Bioresource. Technol. 101 (February 2010): 1097-1101.
- Lu, S.X., Yu, G.X., Chen, H., and Zhu, Z.N. Diesel fuel desulfurization with hydrogen peroxide promoted by formic acid and catalyzed by activated carbon. Carbon 43 (September 2005): 2285-2294.
- Moreno-Castilla, C., Carrasco-Marin, F., López-Ramón, M.V., and Alvarez-Merino, M.A. Chemical and physical activation of olive-mill waste water to produce activated carbons. Carbon 39 (August 2001): 1415-1420.

- Oh, G.H., Yun, C.H., and Park, C.R. Role of KOH in the one-stage KOH activation of cellulosic biomass. Carbon Science Vol. 4 No. 4 (December 2003): 1-11.
- Satterfield, C.N. Heterogenous catalysis in industrial practice. New York: McGraw-Hill, 1991.
- Seredych, M., and Bandosz, T. J. Removal of dibenzothiophenes from model diesel fuel on sulfur rich activated carbons. Appl. Catal. B: Environ. 106 (July 2011): 133-141.
- Shafi, R., and Hutchings, G.J. Hydrodesulfurization of hindered dibenzothiophenes: an overview. Cat. Today 59 (June 2000): 423-442.
- Smith, K.M., Fowler, G.D., Pullket, S., and Graham, N.J.D. Sewage sludge-based adsorbents: A review of their production, properties and use in water treatment applications. Wat. Res. 43 (June 2009): 2569-2594.
- Song, C. An overview of new approaches to deep desulfurization for ultra-clean gasoline, diesel fuel and jet fuel. Cat. Today 86 (November 2006): 211-263.
- Turovskiy, L.S., and Mathai, P.K. Wastewater Sludge Processing. USA: Wiley & Sons, Inc., 2006.
- Yin, C.Y., Aroua, M.K., and Daud, W.M.A.W. Review of modifications of activated carbon for enhancing contaminant uptake from aqueous solutions. Sep. Purif. Technol. 52 (January 2007): 403-415.
- Yu, M., Li, Z., Ji, Q., Wang, S., Su, D., and Lin, Y.S. Effect of thermal oxidation of activated carbon surface on its adsorption towards dibenzothiophene. Chem. Eng. J. 148 (May 2009): 242-247.
- Zhou, A., Ma, X., and Song, C. Effect of oxidation modification of carbon surface on the adsorption of sulfur compounds in diesel fuel. Appl. Catal. B: Environ. 87 (April 2009): 190-199.
- Zhou, A., Ma, X., and Song, C. Liquid-phase adsorption of multi-ring thiophenic sulfur compounds on carbon materials with different surface properties. J. Phys. Chem. B. 110 (March 2006): 4699-4707.
- เดชา ชัยตรีวิเศษ. กระบวนการดูดซับ. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2552.

จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. การเร่งปฏิบัติการ พื้นฐานและการประยุกต์.
กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2547.

ปราโมทย์ ไชยเวช. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพมหานคร. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะ
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2548.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน. กำหนดลักษณะและ
คุณภาพของน้ำมันดีเซล ฉบับที่ 5. กระทรวงพลังงาน, 2554.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. ถ่านกัมมันต์. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
มอก. 900-2547, 2547.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM D4607-94(2006) มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

ก.1 วิธีเตรียมสารละลาย

1. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยตวงกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาตร 70 มิลลิลิตร เติมนลงในน้ำกลั่นที่มีปริมาตร 550 มิลลิลิตร
2. น้ำแข็งความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยชั่งน้ำแข็งปริมาณ 1 กรัม ละลายด้วยน้ำร้อนจนมีปริมาตรเป็น 10 กรัม โดยน้ำแข็งที่เตรียมได้จะใช้ในวันที่เตรียมเท่านั้น
3. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.100 ± 0.001 นอร์มัล เตรียมโดยชั่งโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ปริมาณ 24.820 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 75 มิลลิลิตร เติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ปริมาณ 0.1 กรัม แล้วปรับให้สารละลายมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตรด้วยขวดปรับปริมาตร
4. สารละลายไอโอดีนความเข้มข้น 0.100 ± 0.001 นอร์มัล เตรียมโดยชั่งไอโอดีน (I_2) ปริมาณ 12.700 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ปริมาณ 19.10 กรัม ผสมเข้าด้วยกัน แล้วละลายในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมงจนผลึกไอโอดีนละลายหมด แล้วเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร
5. สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตความเข้มข้น 0.100 นอร์มัล เตรียมโดยอบโพแทสเซียมไอโอเดตให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นในหม้อดูดความชื้น แล้วชั่งปริมาณ 3.5667 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นโดยปรับให้มีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

ก.2 วิธีเทียบมาตรฐานสารละลาย

1. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต
 - ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตปริมาณ 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ปริมาณ 2 กรัม เขย่าให้ละลาย แล้วเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาณ 5 มิลลิลิตร

- ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต โดยใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ จุดที่สารละลายใสไม่มีสี
- คำนวณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตจาก

$$N_1 = \frac{(P \times R)}{S} \quad (1)$$

โดย N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)

P คือ ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (มิลลิลิตร)

R คือ ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)

2. สารละลายไอโอดีน

- ปิเปตสารละลายไอโอดีนปริมาณ 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต โดยใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ จุดที่สารละลายใสไม่มีสี
- คำนวณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตจาก

$$N_2 = \frac{(S \times N_1)}{I} \quad (2)$$

โดย N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (นอร์มัล)

N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)

I คือ ปริมาตรของสารละลายไอโอดีน (มิลลิลิตร)

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)

ก.3. วิธีวิเคราะห์ค่าไอโอดีน

1. บดและคัดขนาดตัวอย่างให้มีขนาดน้อยกว่า 250 ไมโครเมตร
2. อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 ถึง 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง รอให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
3. ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างเท่ากับ M ให้มีความละเอียดของทศนิยม 4 ตำแหน่ง ในขวดชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีจุกปิด

*** หมายเหตุ ต้องชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 3 ค่าต่อตัวอย่าง เพื่อให้ได้ค่า C มีค่าประมาณ 0.01 0.02 และ 0.03 โดยการประมาณน้ำหนักตัวอย่างแสดงดังตารางที่ ก.1

4. เติมสารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปริมาณ 10 มิลลิลิตร แก้วขวดเพื่อให้ถ่านกัมมันต์ชุ่มด้วยสารละลายกรด แล้วนำไปต้มให้เดือดประมาณ 30 วินาที เพื่อกำจัดเถ้าหรือกำมะถันออกจากผิวของถ่านกัมมันต์
5. เติมสารละลายไอโอดีนที่เตรียมได้ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ปิดจุกแล้วเขย่าแรงๆ เป็นเวลา 30 วินาที
6. กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 2 โดยสารละลายที่ได้ปริมาณ 20 มิลลิลิตร นำมาล้างขวดและปิเปตที่ใช้
7. ดูดสารละลายที่กรองได้ 50 แล้วไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่เตรียมได้ โดยใช้น้ำแข็งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ สารละลายสีไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้เป็นมิลลิลิตร
8. คำนวณค่าการดูดซับจำเพาะ (X/M) และความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีน (C) ได้จาก

$$X/M = \frac{A - (DF \times B \times S)}{M} \quad (3)$$

โดย X/M คือ ปริมาณที่ไอโอดีนถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

A คือ $N_2 \times 12693.0$

B คือ $N_1 \times 126.93$

M คือ ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (กรัม)

DF คือ $\frac{I+H}{F}$, I คือ ปริมาณสารละลายไอโอดีน (มิลลิลิตร)

H คือ ปริมาณกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)

F คือ ปริมาณของสารที่นำมาไทเทรต (มิลลิลิตร)

$$C = \frac{N_1 \times S}{F} \quad (4)$$

โดย C คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลือ (นอร์มัล)

ตารางที่ ก.1 การประมาณน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีน

M				M			
IA	C = 0.01	C = 0.02	C = 0.03	IA	C = 0.01	C = 0.02	C = 0.03
300	3.766	3.300	2.835	1550	0.729	0.639	0.549
350	3.228	2.829	2.430	1600	0.706	0.619	0.531
400	2.824	2.475	2.126	1650	0.684	0.600	0.515
450	2.510	2.200	1.890	1700	0.664	0.582	0.500
500	2.259	1.980	1.701	1750	0.645	0.566	0.486
550	2.054	1.800	1.546	1800	0.628	0.550	0.472
600	1.883	1.650	1.417	1850	0.610	0.535	0.460
650	1.738	1.523	1.308	1900	0.594	0.521	0.447
700	1.614	1.414	1.215	1950	0.579	0.508	0.436
750	1.506	1.320	1.134	2000	0.565	0.495	0.425
800	1.412	1.237	1.063	2050	0.551	0.483	0.415
850	1.329	1.164	1.000	2100	0.538	0.471	0.405
900	1.255	1.100	0.945	2150	0.525	0.460	0.396
950	1.189	1.042	0.895	2200	0.513	0.450	0.386
1000	1.130	0.990	0.850	2250	0.502	0.440	0.378
1050	1.076	0.943	0.810	2300	0.491	0.430	0.370
1100	1.027	0.900	0.773	2350	0.481	0.421	0.362
1150	0.982	0.861	0.739	2400	0.471	0.412	0.354
1200	0.941	0.825	0.709	2450	0.461	0.404	0.347
1250	0.904	0.792	0.680	2500	0.452	0.396	0.340
1300	0.869	0.761	0.654	2550	0.443	0.388	0.333
1350	0.837	0.733	0.630	2600	0.434	0.381	0.327
1400	0.807	0.707	0.607	2650	0.426	0.374	0.321
1450	0.779	0.683	0.586	2700	0.418	0.367	0.315
1500	0.753	0.660	0.567	2750	0.411	0.350	0.309

9. นำค่า X/M ที่ได้ทั้งสามค่ามาสร้างกราฟระหว่าง $\log C$ (แกน x) และ $\log (X/M)$ (แกน y) จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง
10. จากความสัมพันธ์เส้นตรงที่ได้ ที่ตำแหน่ง $\log C = -1.699$ หรือ $C = 0.02$ จะทราบค่าบนแกน y นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าไอโอดีน (IA) ได้ดังนี้

$$IA = 10^y \quad (4)$$

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลลีนบลูของถ่านกัมมันต์

ความสามารถในการดูดซับเมทิลลีนบลูของถ่านกัมมันต์ตามวิธี JIS K 1474-1991 มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

ข.1. วิธีเตรียมสารละลาย

1. สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer solution)

- อบโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ให้แห้งที่อุณหภูมิ 105–110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตปริมาณ 9 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร สารละลายที่ได้นี้คือ สารละลาย A
- อบไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ให้แห้งที่อุณหภูมิ 110–120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตปริมาณ 23.88 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร สารละลายที่ได้นี้คือ สารละลาย B
- นำสารละลาย A ผสมกับสารละลาย B ในอัตราส่วน 2 ต่อ 3 โดยปริมาตร ผสมให้เข้ากัน จะได้สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7

2. สารละลายเมทิลลีนบลู

- อบเมทิลลีนบลูให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 ถึง 110 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งเมทิลลีนบลูปริมาณ 1.2060 กรัม (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5) ละลายด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ในข้อ 1 ให้มีปริมาตรรวมเป็น 4,000 มิลลิลิตร สารละลายที่ได้นี้มีความเข้มข้น 0.3 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตั้งสารละลายไว้อย่างน้อย 3 วันเพื่อให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกันก่อนนำไปใช้

3. การสร้างกราฟมาตรฐาน

- นำสารละลายเมทิลีนบลูที่เตรียมได้ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ปรับให้มีปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ที่เตรียมได้ สารละลายที่ได้นี้คือ สารละลาย M ซึ่งมีความเข้มข้น 0.03 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
- นำสารละลาย M มาเตรียมให้มีความเข้มข้นเป็น 0.00030 0.00045 0.00060 0.00075 และ 0.00090 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยเจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์
- วัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 663 นาโนเมตรบันทึกค่าการดูดกลืนแสงแล้วนำไปสร้างกราฟมาตรฐานระหว่าง แกน x คือ ความเข้มข้นในหน่วย 100 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร แกน y คือ ค่าการดูดกลืนแสง ได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงมีความชันเท่ากับ $\tan \theta$

ข.2. วิธีวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู

1. บดและคัดขนาดตัวอย่างให้มีขนาดน้อยกว่า 250 ไมโครเมตร
2. อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 ถึง 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง รอให้เย็นในหม้อดูดความชื้นเป็นเวลา 20 นาที
3. ชั่งตัวอย่าง และบันทึกน้ำหนัก ให้มีความละเอียดของทศนิยม 4 ตำแหน่ง ในขวดชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีจุกปิด
4. เติมสารละลายเมทิลีนบลูที่ได้ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ปิดจุกแล้วเขย่าแรงๆ 10 วินาที สังเกตดูสีของสารละลายเจือจางหรือไม่ ถ้าเจือจางให้เติมสารละลายเมทิลีนบลูไปอีกครึ่งละ 50 มิลลิลิตร
5. เมื่อสีของสารละลายไม่เจือจาง ให้เติมสารละลายเพิ่มอีก 50 มิลลิลิตร เพื่อให้ความเข้มข้นของสารละลายที่จุดสมดุลของการดูดซับเท่ากับ 0.3 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที นาน 30 นาที
6. เทสารละลายลงในหลอดเซนติฟิวจ์ นำไปเซนติฟิวจ์ด้วยความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
7. ดูดสารละลายส่วนบนมา 0.5 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร (ค่าคงที่ของการเจือจาง $C = 100/0.5 = 200$) ถ้าวัดการดูดกลืนแสงแล้วอยู่นอกช่วงของกราฟมาตรฐาน ให้เพิ่มปริมาตรหลังการเจือจาง เช่น เจือจางเป็น 200 มิลลิลิตร ($C = 400$) เป็นต้น

8. วัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร

ค่าการดูดกลืนแสง (Methylene blue adsorption, MB) (มิลลิกรัมต่อกรัม) คำนวณได้จาก

$$MB = \left(0.3000 \times \frac{V}{W}\right) - \frac{V \times A \times C}{100 \times W \times \tan \theta} \quad (1)$$

โดย **V** คือ ปริมาตรของสารละลายเมทิลีนบลูที่ใช้ตอนเริ่มต้น (มิลลิลิตร)

A คือ ค่าการดูดกลืนแสง

C คือ ค่าคงที่ของการเจือจาง

W คือ น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (กรัม)

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ตามวิธี Boehm titration ต้องใช้สารละลายทั้งหมด 4 ชนิด (Chen และคณะ, 2002) คือ

1. NaOH ความเข้มข้น 0.05 และ 0.25 นอร์มัล
2. Na₂CO₃ ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล
3. NaHCO₃ ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล
4. H₂SO₄ ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

โดยวิธีการเตรียมสารละลาย และวิธีวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

ค.1 วิธีเตรียมสารละลาย

ค.1.1 ตัวอย่างการเตรียมสารละลายที่เป็นของแข็ง

เตรียมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล (จำนวนกรัมสมมูลต่อลิตร) ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร โดยใช้ NaOH มวลโมเลกุล 40 กรัมต่อโมล

คำนวณหาเลขออกซิเดชันของอะตอมที่เปลี่ยน (n)

$$\text{จะได้ Na ใน NaOH มีเลขออกซิเดชัน} = (\text{Na} \times 1) + (-1 \times 1)$$

$$\text{Na} = 1$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } n = 1 \times 1 = 1$$

คำนวณหาน้ำหนักสมมูล

$$\text{จาก น้ำหนักสมมูล} = \frac{\text{น้ำหนักสูตร}}{n}$$

$$\text{จะได้ น้ำหนักสมมูล} = \frac{40}{1} = 40$$

คำนวณหาจำนวนกรัมสมมูล

$$\text{จาก จำนวนกรัมสมมูล} = \text{น้ำหนักสาร} \times \text{ปริมาตรที่ต้องการ}$$

$$\text{จะได้ จำนวนกรัมสมมูล} = 0.05 \times 1 = 0.05$$

คำนวณหาน้ำหนักสารที่ใช้

$$\text{จาก น้ำหนักสารที่ใช้} = \text{จำนวนกรัมสมมูล} \times \text{น้ำหนักสมมูล}$$

$$\text{จะได้ น้ำหนักสารที่ใช้} = 0.05 \times 40 = 2 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น ต้องนำ NaOH 2 กรัม ไปละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร

ค.1.2 ตัวอย่างการเตรียมสารละลายที่เป็นของเหลว

เตรียมสารละลาย H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล (จำนวนกรัมสมมูลต่อลิตร) ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร โดยใช้ H_2SO_4 ความเข้มข้นร้อยละ 96 ความหนาแน่น 1.84

คำนวณหาเลขออกซิเดชันของอะตอมที่เปลี่ยน (n)

$$\text{จะได้ } H \text{ ใน } H_2SO_4 \text{ มีเลขออกซิเดชัน} = (H \times 1) + (-2 \times 1)$$

$$H = 2$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } n = 1 \times 2 = 2$$

คำนวณหาน้ำหนักสมมูล

$$\text{จาก } \frac{\text{น้ำหนักสมมูล}}{\text{น้ำหนักสูตร}} = \frac{\text{น้ำหนักสูตร}}{n}$$

$$\text{จะได้ } \frac{\text{น้ำหนักสมมูล}}{\text{น้ำหนักสูตร}} = \frac{98}{2} = 49$$

คำนวณหาจำนวนกรัมสมมูล

$$\text{จาก } \frac{\text{จำนวนกรัมสมมูล}}{\text{น้ำหนักสูตร}} = \frac{\text{น้ำหนักสูตร}}{\text{ปริมาตรที่ต้องการ}}$$

$$\text{จะได้ } \frac{\text{จำนวนกรัมสมมูล}}{\text{น้ำหนักสูตร}} = \frac{0.1 \times 1}{1} = 0.1$$

คำนวณหาน้ำหนักสารที่ใช้

$$\text{จาก } \frac{\text{น้ำหนักสารที่ใช้}}{\text{น้ำหนักสมมูล}} = \frac{\text{จำนวนกรัมสมมูล} \times \text{น้ำหนักสมมูล}}{\text{น้ำหนักสูตร}}$$

$$\text{จะได้ } \frac{\text{น้ำหนักสารที่ใช้}}{\text{น้ำหนักสมมูล}} = \frac{0.1 \times 49}{1} = 4.9 \text{ กรัม}$$

$$\text{จาก } \frac{\text{ปริมาตรสารที่ใช้}}{\text{ความหนาแน่น} \times \text{ความเข้มข้น}} = \frac{\text{น้ำหนักสารที่ใช้}}{\text{น้ำหนักสูตร}}$$

$$\text{จะได้ } \frac{\text{ปริมาตรสารที่ใช้}}{1.84 \times 0.96} = \frac{4.9}{1.84 \times 0.96} = 2.8 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้น ต้องนำ H_2SO_4 2.8 มิลลิลิตร ไปละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร

ข.2 วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งถ่านกัมมันต์น้ำหนัก 0.2 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีจุกปิดทั้งหมด 4 ขวด

2. เติมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.05 และ 0.25 นอร์มัล สารละลาย Na_2CO_3 และ NaHCO_3 ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในแต่ละขวด
3. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่อัตราเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 วัน
4. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 แล้วดูดสารละลายที่ได้ปริมาตร 20 มิลลิลิตร บรรจุลงในขวดรูปชมพูนขนาด 250 มิลลิลิตร
5. ทำการไทเทรตสารละลายที่ได้ด้วย H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล บันทึกปริมาตรที่ใช้ โดยอินดิเคเตอร์ที่ใช้ในการไทเทรตสารละลายแต่ละชนิดมีดังนี้ NaOH ใช้โบรโมไทมอลบลู (Bromothymol blue) Na_2CO_3 ใช้ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) และเมทิลออเรนจ์ (Methyl orange) และ NaHCO_3 ใช้เมทิลออเรนจ์

ค.3 วิธีคำนวณปริมาณหมู่ฟังก์ชัน

1. ปริมาณหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) คำนวณจากปริมาณการใช้ H_2SO_4 ของ NaHCO_3 ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล
2. ปริมาณหมู่แลกโตน (Lactone group) คำนวณจากผลต่างของปริมาณการใช้ H_2SO_4 ของ Na_2CO_3 ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล และ NaHCO_3 ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล
3. ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) คำนวณจากผลต่างของปริมาณการใช้ H_2SO_4 ของ NaOH ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล และ Na_2CO_3 ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล
4. ปริมาณหมู่คาร์บอนิล (Carboxyl group) คำนวณจากผลต่างของปริมาณการใช้ H_2SO_4 ของ NaOH ความเข้มข้น นอร์มัล 0.25 และ 0.05 นอร์มัล

ตารางที่ ค.1 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

	(ก) 0.05N NaOH	(ข) 0.25N NaOH	(ค) 0.05N Na ₂ CO ₃	(ง) 0.05N NaHCO ₃
(1) น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)	0.2	0.2	0.2	0.2
(2) ปริมาตรสารละลาย (มิลลิลิตร)	20	20	20	20
(3) ปริมาตร 0.1N H ₂ SO ₄ (มิลลิลิตร)	5.5	45	6	9
(4) Blank	10	50	10	10
(5) = (4)-(3)	4.5	5	4	1
(6) = [(5) × 0.1]/20	0.0225	0.0250	0.0200	0.0050
(7) = [(6) × 50]/(1)	5.6250	6.2500	5.0000	1.2500

จากตารางเมื่อนำมาคำนวณปริมาณหมู่กรดแต่ละชนิดจะได้ดังนี้

ปริมาณหมู่คาร์บอกซิล เท่ากับ (ง) หรือเท่ากับ 1.25 มิลลิอิควิวาเลนต์ต่อกรัม

ปริมาณหมู่แลกโตน เท่ากับ (ค) – (ง) หรือเท่ากับ 5.000 – 1.2500 = 3.75 มิลลิอิควิวาเลนต์ต่อกรัม

ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิล เท่ากับ (ก) – (ค) หรือเท่ากับ 5.6250 – 5.000 = 0.6250 มิลลิอิควิวาเลนต์ต่อกรัม

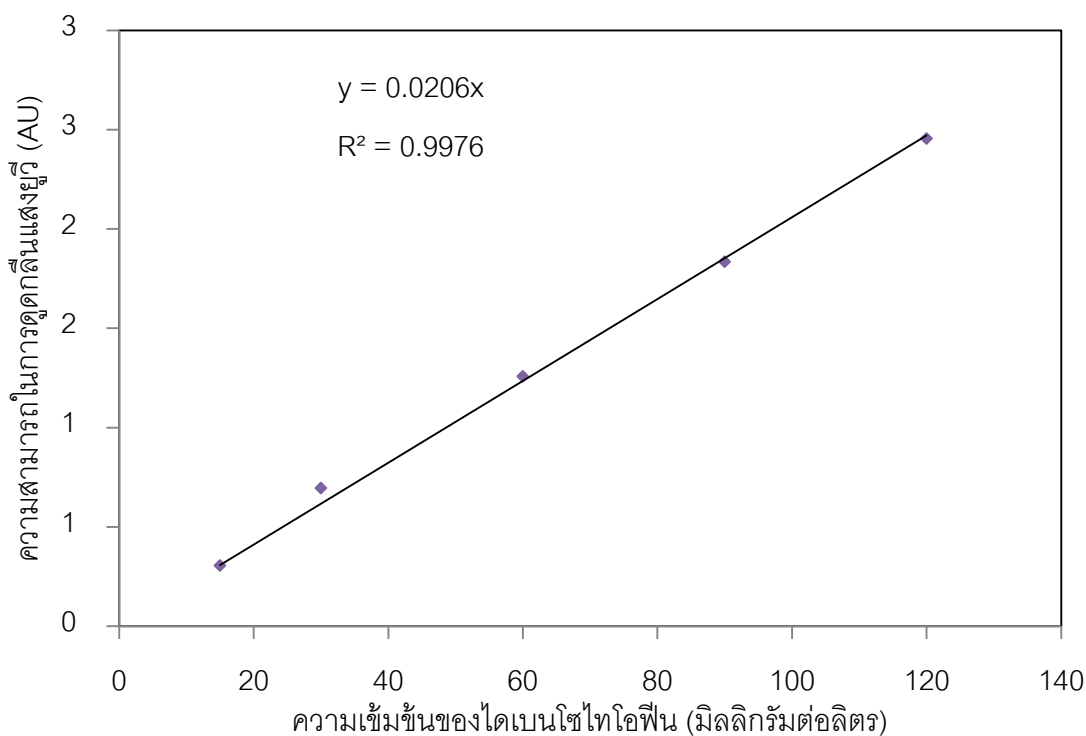
ปริมาณหมู่คาร์บอนิล เท่ากับ (ข) – (ก) หรือเท่ากับ 6.2500 – 5.6250 = 0.6250 มิลลิอิควิวาเลนต์ต่อกรัม

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงยูวี

เครื่องวัดการดูดกลืนแสงยูวีที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบกำมะถันในน้ำมันเชื้อเพลิงจำลอง คือ Jasco รุ่น V530 โดยในการวิเคราะห์จะทำการสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อใช้เปรียบเทียบปริมาณกำมะถันที่มีอยู่ในน้ำมันเชื้อเพลิงจำลองที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ตัวอย่างของกราฟมาตรฐานแสดงดังภาพที่ ง.1

การคำนวณความสามารถในการดูดซับไดเบนไซโทโอฟินเมื่อนำน้ำมันเชื้อเพลิงต้นแบบที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มาวัดด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงยูวีจะได้ค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงยูวี นำค่าที่ได้ไปคำนวณความเข้มข้นโดยคำนวณจากสมการที่ได้จากกราฟมาตรฐาน (ภาพที่ ง.1)



ภาพที่ ง.1 กราฟมาตรฐานของไดเบนไซโทโอฟินจากนอร์มัล-ออกเทน

ตัวอย่างในการคำนวณความสามารถในการดูดซับไดเบนไซโทไอเฟน

ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ 0.1 กรัม

ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงต้นแบบ 0.020 ลิตร

ความเข้มข้นเริ่มต้นของไดเบนไซโทไอเฟน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ค่าการดูดกลืนแสงยูวีของไดเบนไซโทไอเฟนจากน้ำมันเชื้อเพลิงต้นแบบเท่ากับ 0.7646

สมการจากกราฟมาตรฐาน คือ $y = 0.0206x$

ดังนั้นความเข้มข้นของไดเบนไซโทไอเฟนจะได้ $0.7646 = 0.0206x$

$$x = \frac{0.7646}{0.0206}$$

$$x = 37.1165 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

เพราะฉะนั้นความสามารถในการดูดซับไดเบนไซโทไอเฟนจะได้

$$\text{ความสามารถในการดูดซับไดเบนไซโทไอเฟน} = \frac{(100 - 37.1165) \times 0.02}{0.1}$$

$$= 12.58 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม}$$

$$\text{ร้อยละของการขจัดไดเบนไซโทไอเฟน} = \frac{(100 - 37.1165) \times 100}{100}$$

$$= 62.88$$

ภาคผนวก จ
สมบัติของถ่านกัมมันต์ทางการค้า

สมบัติต่าง ๆ ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ สมบัติต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ จ.1

ตารางที่ จ.1 สมบัติของถ่านกัมมันต์ทางการค้า

สมบัติ	ค่าที่ได้			
	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	น้อยกว่า 150		
องค์ประกอบโดยรวม (ร้อยละ)	ความชื้น 0.44	เถ้า 3.15	สารระเหย 1.11	คาร์บอนคงตัว 95.30
กำมะถัน (ร้อยละ)	0.20			
ค่าไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	2,027.34			
ค่าเมทิลลิเนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)	181.00			
หมู่ฟังก์ชันที่มี ออกซิเจนบนพื้นผิว (มิลลิอีควิวาเลนต์)	หมู่คาร์บอกซิล 0.1742	หมู่คาร์บอนิล 0.3008	หมู่แลคโตน 0.0995	หมู่ไฮดรอกซิล 0.5262
พื้นที่ผิว BET (ตารางเมตรต่อกรัม)	854.71			
ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	0.51			
ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)	23.75			

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวธิดาพรรณ นันทปรีชาชาญ เกิดวันที่ 19 สิงหาคม 2528 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญา/ตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552