พลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในเบดนิ่งด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่บรรจุด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และการวิเคราะห์ผลโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

นายสุรวิทย์ นาคสู่สุข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2561

DYNAMIC OF CARBON DIOXIDE ADSORPTION IN A FIXED BED OF COCONUT SHELL ACTIVATED CARBON IMPREGNATED WITH NaOH AND ITS ANALYSIS USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

Suravit Naksusuk

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

Suranaree University of Technology

Academic year 2018

พลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในเบดนิ่งด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ที่บรรจุด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และการวิเคราะห์ผลโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.อติชาต วงศ์กอบลาภ)
ประธานกรรมการ

(ศ. ดร.ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.นิคม กลมเกลี้ยง)
กรรมการ

(ผศ. ดร.รัตนวรรณ เกียรติโกมล)
กรรมการ

(ศ. ดร.สันติ แม้นศิริ)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สุรวิทย์ นาคสู่สุข : พลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในเบดนิ่งด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่บรรจุด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และการวิเคราะห์ผลโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (DYNAMIC OF CARBON DIOXIDE ADSORPTION IN A FIXED BED OF COCONUT SHELL ACTIVATED CARBON IMPREGNATED WITH NaOH AND ITS ANALYSIS USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร. ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, 106 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาและตรวจสอบพฤติกรรมการดูดซับ CO_2 จากแก๊สเผาไหม้สังเคราะห์ (CO_2+N_2) ในเบดนิ่งด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่บรรจุด้วย NaOH โดยการติดตามความเข้มข้นของ CO_2 สายออก ที่เวลาต่างๆ เพื่อนำไปสร้างกราฟเบรกทรูการดูดซับในเบดนิ่ง โดยมีตัวแปรในการศึกษาประกอบด้วย ปริมาณการบรรจุ NaOH ความเข้มข้นของ CO_2 ในสายป้อน ความเร็วแก๊ส อุณหภูมิการดูดซับ ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ และถ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างรูพรุนแตกต่างกัน โดยผลของตัวแปรดังกล่าวที่มีต่อความจุในการดูดซับ CO_2 วิเคราะห์ผลด้วยวิธีทางสถิติซึ่งประกอบด้วยการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของตัวแปร และการวิเคราะห์โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ประกอบด้วยการออกแบบการทดลองด้วยวิธี 2^k แฟกทอเรียลและ Box-Behnken และนำผลมาวิเคราะห์ถดถอย (Regression analysis) เพื่อหาสภาวะที่ให้ปริมาณการดูดซับ CO_2 สูงสุด จากผลการทดลองพบว่าเวลาเบรกทรูสูงสุดและปริมาณการดูดซับ CO_2 สูงสุด เท่ากับ 650 วินาที และ 26.8 mg CO_2/g carbon ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือเท่ากับ 180 mg NaOH/g carbon และพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์เท่ากับ 1052 m^2/g และพบว่าการบรรจุ NaOH ในถ่านกัมมันต์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ CO_2 ได้ถึงร้อยละ 39 ถึง 48 สำหรับแบบจำลองกราฟเบรกทรูพบว่าสมการแบบจำลองของคลินเคนเบิร์กสามารถอธิบายกราฟเบรกทรูได้ดีที่ทุกสภาวะการทดลอง ส่วนผลการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองให้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ปริมาณการดูดซับ CO_2 สูงสุดเท่ากับ 27.6 mg CO_2/g carbon เกิดที่สภาวะปริมาณการบรรจุ NaOH เท่ากับ 103 mg NaOH/g carbon ความเข้มข้นของ CO_2 สายป้อนเท่ากับ 18vol% ความเร็วแก๊สเท่ากับ 3.03 m/min อุณหภูมิการดูดซับ 17°C และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 1052 m^2/g สำหรับการเปรียบเทียบระหว่าง q_B สูงสุดที่ทำนายจากสมการสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นกับ q_B จากการทดลองภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกันพบว่ามีความคาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 8

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา สุรวิทย์ นาคสู่สุข

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ________

SURAVIT NAKSUSUK : DYNAMIC OF CARBON DIOIXDE ADSORPTION IN A FIXED BED OF COCONUT SHELL ACTIVATED CARBON IMPREGNATED WITH NaOH AND ITS ANALYSIS USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY. THESIS ADVISOR : PROF. CHAIYOT TANGSATHITKULCHAI, Ph.D., 106 PP.

NaOH IMPREGNATED/CARBON DIOXIDE/RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

This work aims to study and investigate the behavior of CO_2 adsorption for simulated flue gas (CO_2+N_2) in a fixed bed of NaOH impregnated activated carbon from coconut shell. The breakthrough data of the fixed bed adsorption was collected by following the exit concentration of CO_2 as a function of time. The variables studied include NaOH loading, inlet CO_2 concentration, feed gas velocity, adsorption temperature, amount of activated carbon and activated carbons having different pore texture. The sensitivity analysis of all the process variables, based on the Kendall's ranking correlation, was first perform in order to establish the primary experimental conditions. The sensitivity analysis results were there used with the 2^k factorial design and the Box-Behnken design to determine the total number of experimental runs. The evaluation of adsorption efficiency is based on the calculated breakthrough time (t_B) and adsorption capacity of CO_2 at the breakthrough time (q_B) and the equilibrium time (q_E). The response surface methodology (RSM) was finally applied to develop a general expression correlating q_B with all the system variables. Experimentally, the maximum q_B was found for the 5% NaOH impregnating solution or equivalent to 180 mg NaOH/g carbon of NaOH loading and the surface area of activated carbon of 1052 m^2/g giving

the highest t_B, and q_B of 650 sec and 26.8 mg CO_2/g carbon, respectively. When comparing the adsorption capacity under the same conditions, it was observed that the NaOH impregnated activated carbon gave 39-48% higher than that of the original activated carbon. The Klinkenberg model was found to satisfactorily describe the experimental breakthrough data under all adsorption conditions. Results from RSM analysis showed that the optimum condition giving the maximum q_B of 27.6 mg CO_2/g carbon occurred at the following conditions, 18%CO_2, gas velocity of 3.03 m/min adsorption temperature of 17.5°C, bed height of 14.1 cm (5 g carbon), NaOH loading of 103 mg NaOH/g carbon and activated carbon surface area of 1,052 m^2/g. The comparison between q_B from the developed correlation and q_B from experiment for the same adsorption condition was found to show an average error of 8%.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Chemical Engineering Student's Signature สุรพิทย์ นกกสู้สุข

Academic Year 2018 Advisor's Signature ______

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

ศาสตราจารย์ ดร.ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไข วิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.อติชาต วงศ์กอบลาภ ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิคม กลมเกลี้ยง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัตนวรรณ เกียรติโกมล กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์

อ. ดร.อรุณศรี นุชิตประสิทธิชัย, อ. ดร.สุพรรณี จันทร์ภิรมณ์, และคณาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำ การทำวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท ซี ไจแกนติคคาร์บอน จำกัด ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ถ่านกัมมันต์ และการให้ยืมเครื่องมือวิเคราะห์แก๊ส ในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนการศึกษาและ ทุนสนับสนุนงานวิจัย รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ ความช่วยเหลือในการอุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ในการทำวิจัยนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจน ส่งเสริมการศึกษา และให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา อีกทั้งขอขอบคุณนางสาวขนิษฐพร ทอง สืบสาย ที่ให้สนับสนุน และเป็นกำลังใจให้ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

สุรวิทย์ นาคสู่สุข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ไทย) ก
บทคัดย่อ (อังกฤษ) ข
กิตติกรรมประกาศ ง
สารบัญ จ
สารบัญตาราง ฌ
สารบัญรูป ฎ

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย 3

2 ทฤษฎีและปริทัศน์วรรณกรรม 4
2.1 ถ่านกัมมันต์ 4
2.1.1 โครงสร้างถ่านกัมมันต์ 4
2.1.2 การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ 5
2.1.2.1 สารตั้งต้นในการผลิตถ่านกัมมันต์ 5
2.1.2.2 คาร์บอไนเซชัน 6
2.1.2.3 การกระตุ้นทางกายภาพ 6
2.1.2.4 การกระตุ้นทางเคมี 7
2.1.3 ความพรุนและการกระจายขนาด 8
2.2 กระบวนการดูดซับสาร 8
2.2.1 สมดุลการดูดซับ 10
2.2.2 ไอโซเทิร์มการดูดซับ 11
2.2.3 สมการไอโซเทิร์มการดูดซับ 12

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.3.1 สมการไอโซเทิร์มแลงมัวร์ 13
2.2.3.2 สมการไอโซเทิร์ม BET 13
2.2.3.3 สมการ Dubinin-Radushkevich 14
2.2.3.4 สมการ Dubinin-Astakhov 15
2.2.4 การคำนวณพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน 15
2.3 พลศาสตร์การดูดซับแบบเบดนิ่ง 18
2.3.1 สมการเบรกทรู 21
2.3.1.1 แบบจำลองคลินเคนเบิร์ก 22
2.3.1.2 แบบจำลองโทมัส 24
2.4 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์เชิงสถิติ 25
2.4.1 การวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของตัวแปร 26
2.4.2 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียล 28
2.4.3 การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-behnken 29
2.4.4 การวิเคราะห์การถดถอย 32
2.4.5 วิธีวิเคราะห์ตัวแปรด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง 33
2.5 ปริทัศน์วรรณกรรม 37
3 ระเบียบวิธีวิจัย 42
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ 42
3.1.1 วัสดุ 42
3.1.2 อุปกรณ์ 42
3.2 ขั้นตอนการทดลองงานวิจัย 42
3.2.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์ที่บรรจุโซเดียมไฮดรอกไซด์ 42
3.2.2 การวัดสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ 43
3.2.3 การทดลองการดูดซับ CO_2 ในเบดนิ่งจากแก๊สผสม 43
3.2.4 การวางแผนและการออกแบบการทดลอง 45

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.4.1 การออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะเริ่มต้น 45

3.2.4.2 การออกแบบการทดลองความอ่อนไหวของตัวแปร 46

3.2.4.3 การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลและ Box-behnken 48

3.3 การวิเคราะห์พลศาสตร์การดูดซับ CO_2 54

3.3.1 การวิเคราะห์ผลจากกราฟเบรกทรู 54

3.3.2 การอธิบายกราฟเบรกทรูด้วยแบบจำลอง 55

3.3.2.1 แบบจำลองคลินเคนเบิร์ก 55

3.3.2.2 แบบจำลองโทมัส 55

3.3.3 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง 56

4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล 57

4.1 คุณสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ 57

4.2 กราฟเบรกทรู 60

4.3 เวลาเบรกทรูและความจุการดูดซับ 64

4.3.1 ผลกระทบจากปริมาณ NaOH ที่บรรจุในถ่านกัมมันต์ 65

4.3.2 ผลกระทบจากความเข้มข้น CO_2 ขาเข้า 68

4.3.3 ผลกระทบจากความเร็วแก๊สผสม 69

4.3.4 ผลกระทบจากอุณหภูมิการดูดซับ 69

4.3.5 ผลกระทบจากปริมาณถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ 70

4.3.6 ผลกระทบจากพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ 72

4.4 การทดสอบสมการกราฟเบรกทรู 75

4.5 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร 81

4.6 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง 82

4.6.1 การทดลองการดูดซับ CO_2 เพื่อยืนยันสภาวะการดูดซับที่ให้ $q_{B,max}$ 90

4.7 การคำนวณการขยายขนาดเครื่องดูดซับ 91

5 สรุปและข้อเสนอแนะ 93

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1 สรุปผลงานวิจัย.......... 93
5.2 ข้อเสนอแนะ.......... 94
รายการอ้างอิง.......... 95
ภาคผนวก.......... 97
ภาคผนวก ก.......... 97
ภาคผนวก ข.......... 104
ประวัติผู้เขียน.......... 106

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ตัวอย่างการใช้งานถ่านกัมมันต์ในกระบวนการ.......... 8

2.2 การเปรียบเทียบระหว่างการดูดซับกายภาพและการดูดซับทางเคมี.......... 9

2.3 ตัวอย่างการออกแบบการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้น X_i.......... 27

2.4 ตัวอย่างการจัดอันดับระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม.......... 28

2.5 แผนการทดลอง 2^3 แฟกทอเรียล.......... 29

2.6 รูปแบบย่อของแผนการทดลอง Box-Behnken กรณี 4 ปัจจัย.......... 30

2.7 แผนการทดลอง Box-Behnken กรณี 4 ปัจจัย.......... 30

2.8 ปริมาณการดูดซับ CO_2 จากกระบวนการดูดซับ CO_2 ด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ.......... 37

3.1 สภาวะการทดลองและตัวแปรในการทดลอง.......... 45

3.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH.......... 46

3.3 ผลของความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า.......... 46

3.4 ผลของความเร็วของแก๊สผสม.......... 46

3.5 ผลของอุณหภูมิการดูดซับ.......... 47

3.6 ผลของปริมาณของถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์.......... 47

3.7 ผลของพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์.......... 48

3.8 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล.......... 48

3.9 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken.......... 51

4.1 พื้นที่ผิว พื้นที่รูพรุนขนาดเล็ก ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ปริมาตรรูพรุนรวม และขนาดรูพรุนเฉลี่ย.......... 59

4.2 ค่าที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์พลศาสตร์การดูดซับของ CO_2 ในเครื่องดูดซับเบดนิ่งแสดงผลของปริมาณการบรรจุ NaOH ในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ AC2.......... 66

4.3 ค่าความจุ CO_2 สูงสุดและค่าความเข้มข้นวิกฤตของสารละลาย NaOH สำหรับถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิดที่บรรจุและไม่บรรจุ NaOH.......... 68

4.4 การเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับ CO_2 ของงานวิจัยอื่นๆ เทียบกับงานวิจัยนี้.......... 73

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.5 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร 82

4.6 ผลของค่า P value จากการวิเคราะห์ถดถอยด้วยพหุนามอันดับ 2 85

4.7 ผลการหาสภาวะการทดลองที่ทำให้ปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรูสูงสุด 87

4.8 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดองและการคำนวณของสภาวะที่ทำให้ปริมาณการดูดซับ CO_2 สูงสุดจากวิธีพื้นผิวตอบสนอง 90

ก.1 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับ CO_2 กกราฟเบรกทรูผลกระทบจากการบรรจุ NaOH ในถ่านกัมมันต์ 99

ก.2 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับ CO_2 กกราฟเบรกทรูผลกระทบจากความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า 99

ก.3 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับ CO_2 กกราฟเบรกทรูผลกระทบจากอุณหภูมิการดูดซับ 100

ก.4 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับ CO_2 กกราฟเบรกทรูผลกระทบจากความเร็วแก๊สผสม 100

ก.5 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับ CO_2 กกราฟเบรกทรูผลกระทบจากปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ 101

ก.6 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับ CO_2 กกราฟเบรกทรูผลกระทบจากพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ 102

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 โครงสร้างของแกรไฟท์หกเหลี่ยม โดยมีพันธะระนาบสามเหลี่ยม อยู่ภายในชั้นแกรฟีน 5
2.2 ลักษณะไอโซเทิร์มของการดูดซับแก๊สตามการจำแนกของIUPAC 12
2.3 รูปแบบและความคืบหน้าของช่วงการถ่ายโอนมวลภายในเบดนิ่ง จนกระทั่งถึงจุดเบรกทรูที่จุดออกจากเบด 20
2.4 คุณลักษณะของกราฟเบรกทรูในคอลัมน์เบดนิ่ง 21
2.5 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ 26
2.6 รูปแบบเรขาคณิตของแผนการทดลอง Box-Behnken 32
2.7 แสดงตัวอย่างพื้นที่ผิวตอบสนองของ 2 ปัจจัย 34
2.8 ลำดับการดำเนินงานของพื้นที่ผิวตอบสนอง 35
2.9 ขั้นตอนวิธีพื้นผิวตอบสนอง 36
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดูดซับ CO_2 43
3.2 การเติมสารละลาย NaOH ผสมกับถ่านกัมมันต์ 44
3.3 ถ่านกัมมันต์ที่บรรจุ NaOH หลังจากเข้าเตาอบ 48 hr 44
3.4 ตัวอย่างกราฟเบรกทรู 54
4.1 ไอโซเทิร์มการดูดซับและคายซับของไนโตรเจน ที่ 77 เคลวิน ของถ่านกัมมันต์ดิบ 3 ชนิดและถ่านกัมมันต์ที่บรรจุด่าง 58
4.2 ผลของความเข้มข้นสารละลาย NaOH ต่อค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวม 60
4.3 ตัวอย่างของกราฟเบรกทรูที่ได้จากเครื่องดูดซับเบดนิ่ง 60
4.4 ผลของความเข้มข้นสารละลาย NaOH ต่อความชันของกราฟเบรกทรู 61
4.5 ผลของความเข้มข้นของ CO_2 สายป้อนต่อความชันของกราฟเบรกทรู 62
4.6 ผลของความเร็วแก๊สผสมต่อความชันของกราฟเบรกทรู 63
4.7 ผลของอุณหภูมิการดูดซับต่อความชันของกราฟเบรกทรู 63
4.8 ผลของปริมาณบรรจุถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ต่อความชันของกราฟเบรกทรู 64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.9 ผลของพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ต่อความชันของกราฟเบรกทรู 65

4.10 ผลของความเข้มข้น NaOH ต่อเวลาเบรกทรูและ q_B และ q_E 66

4.11 ผลของช่วงการถ่ายโอนมวลต่อเวลาเบรกทรู 67

4.12 ผลของความเข้มข้นของ CO_2 สายป้อนต่อเวลาเบรกทรูและ q_B และ q_E 69

4.13 ผลของความเร็วแก๊สผสมต่อเวลาเบรกทรูและ q_B และ q_E 70

4.14 ผลของอุณหภูมิการดูดซับต่อเวลาเบรกทรูและ q_B และ q_E 71

4.15 ไอโซเทิร์มการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์ดิบ และถ่านกัมมันต์ที่บรรจุ NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 5wt% AC3 71

4.16 ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ต่อเวลาเบรกทรูและ q_B และ q_E 72

4.17 ผลของพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ต่อเวลาเบรกทรูและ q_B และ q_E 73

4.18 กราฟเบรกทรูของผลกระทบความเข้มข้นของสารละลาย NaOH 76

4.19 ผลของความเข้มข้น NaOH ต่อค่า k_p, K, และ D_e ในถ่านกัมมันต์ AC2 78

4.20 ผลของความเข้มข้นของ CO_2 สายป้อนต่อค่า k_p, K, และ D_e ในถ่านกัมมันต์ AC2 79

4.21 ผลของความเร็วแก๊สผสมต่อค่า k_p, K, และ D_e ในถ่านกัมมันต์ AC2 79

4.22 ผลของอุณหภูมิการดูดซับต่อค่า k_p, K, และ D_e ในถ่านกัมมันต์ AC2 80

4.23 ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ต่อค่า k_p, K, และ D_e ในถ่านกัมมันต์ AC2 80

4.24 ผลของพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ต่อค่า k_p, K, และ D_e 81

4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดและจำนวนการทดลอง 87

4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรูกับการบรรจุ NaOH และความเข้มข้นของ CO_2 สายป้อน 88

4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรูกับการบรรจุ NaOH และความเร็วแก๊ผสม 88

4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรูกับการบรรจุ NaOH และอุณหภูมิการดูดซับ 89

4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรูกับการบรรจุ NaOH และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ 89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.30 กราฟเบรกทรูจากการทดลองของสภาวะการทดลองที่ให้ค่าปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรูสูงสุด 90
ก.1 การกระจายขนาดของรูพรุนในถ่านกัมมันต์ AC2 98
ก.2 กราฟเบรกทรูของผลกระทบจากการบรรจุ NaOH ในถ่านกัมมันต์จากการดูดซับ CO_2 98
ก.3 กราฟเบรกทรูของผลกระทบจากความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้าจากการดูดซับ CO_2 100
ก.4 กราฟเบรกทรูของผลกระทบจากอุณหภูมิการดูดซับจากการดูดซับ CO_2 101
ก.5 กราฟเบรกทรูของผลกระทบจากความเร็วแก๊สผสมจากการดูดซับ CO_2 102
ก.6 กราฟเบรกทรูของผลกระทบจากปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์จากการดูดซับ CO_2 103
ก.7 กราฟเบรกทรูของผลกระทบจากพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากการดูดซับ CO_2 103

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

สภาวะโลกร้อน (Global warming) เป็นต้นเหตุที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติ เชื่อว่ามีสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากการสะสมของแก๊สเรือนกระจก (Greenhouse gases) ที่มีส่วนประกอบหลักคือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนใหญ่มีแหล่งกำเนิดมาจากการใช้พลังงานฟอสซิลจากภาคการผลิตและอุตสาหกรรมที่เพิ่มสูงขึ้น เช่น โรงงานอุตสาหกรรม และโรงงานไฟฟ้าถ่านหิน เป็นต้น ได้มีการเสนอแนวทางต่างๆ ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวตัวอย่างเช่น การรณรงค์การใช้พลังงานทางเลือกหรือพลังงานหมุนเวียนต่างๆ แต่เนื่องจากพลังงานฟอสซิลมีการใช้งานมาอย่างยาวนานและการใช้เทคโนโลยีของพลังงานทางเลือกยังมีต้นทุนที่สูงทำให้การใช้พลังงานทางเลือกยังมีสัดส่วนค่อนข้างต่ำ (Zecca and Chiari, 2010)

ส่วนใหญ่แล้วการกำจัดหรือควบคุมปริมาณแก๊สเรือนกระจก เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงงานอุตสาหกรรมจะใช้วิธีบำบัดแก๊สหลังการเผาไหม้เชื้อเพลิง (Post gas treatment) โดยเทคโนโลยีการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีหลากหลายวิธีตัวอย่างเช่น กระบวนการดูดซึมด้วยสารละลายด่าง (Chemical absorption) กระบวนการดูดซับสาร (Adsorption) และกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน (Membrane separation) เป็นต้น (Dennis Y.C. Leung et al., 2014) สำหรับกระบวนการดูดซึมด้วยสารละลายด่างเป็นกระบวนการที่สามารถจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การใช้สารละลายเอมีน และสารละลายไฮดรอกไซด์ เป็นต้น แต่ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ ปัญหาการกัดกร่อนของสารละลายต่ออุปกรณ์การใช้งาน และการนำสารละลายมาใช้ใหม่จะสิ้นเปลืองพลังงานมาก สำหรับกระบวนการดูดซับสารเป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดแก๊สโดยใช้สารดูดซับชนิดต่างๆ โดยเฉพาะถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นสารดูดซับหรือวัสดุดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายโดยสามารถเตรียมจากวัสดุชีวมวลหลากหลายชนิด เช่น ไม้ ถ่านหิน แกลบ และกะลามะพร้าว เป็นต้น เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีพื้นผิวค่อนข้างมากและมีความไม่ชอบน้ำ จึงสามารถดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนหรือคาร์บอนไดออกไซด์ได้ค่อนข้างดี และนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายในสภาวะการทำงานต่างๆ งานวิจัยหลายชิ้นรายงานเกี่ยวกับการกำจัด CO_2 ด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่บรรจุด้วยเอมีน (Lee, Ong et al., 2013) หรือ NaOH เพื่อใช้กำจัด CO_2 (Tan, Islam et al., 2014) ทั้งนี้การบรรจุสารละลายที่มีฤทธิ์เป็น

เบสในตัวดูดซับสามารถนำมาจับแก๊สที่มีฤทธิ์เป็นกรดได้ (CO_2 มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน) ดังนั้นการเติมสารละลายด่างดังกล่าวในรูพรุนของถ่านกัมมันต์จะช่วยเพิ่มความเฉพาะเจาะจงในการจับ CO_2 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้จะใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่ถูกบรรจุด้วย NaOH เพื่อนำมาศึกษาการดูดซับ CO_2 จากแก๊สเผาไหม้สังเคราะห์ในเครื่องดูดซับเบดนิ่ง โดยจะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า ความเร็วของแก๊สผสม อุณหภูมิการดูดซับ ปริมาณของถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ และชนิดของถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติความพรุนแตกต่างกัน ข้อมูลพลศาสตร์การดูดซับ CO_2 ในเบดนิ่งซึ่งแสดงในรูปของกราฟเบรกทรูที่ได้จากการเก็บข้อมูลการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาปริมาณการดูดซับ CO_2 ภายใต้สภาวะตัวแปรต่างๆ และใช้วิธีวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ปริมาณการดูดซับสูงสุดด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) สำหรับการออกแบบการทดลองดังกล่าวจะใช้วิธีการออกแบบการทดลอง 2 วิธีด้วยกันได้แก่ วิธีแฟกทอเรียล 2^k และวิธีของ Box-behnken (Ferreira, Bruns et al., 2007)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. วัตถุประสงค์หลัก

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการศึกษาและตรวจสอบพฤติกรรมการดูดซับ CO_2 ในเบดนิ่งของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวซึ่งบรรจุด้วย NaOH โดยมีตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ใช้แช่ถ่านกัมมันต์ ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า ความเร็วของแก๊สผสม อุณหภูมิการดูดซับ ปริมาณของถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ และชนิดของถ่านกัมมันต์ที่สมบัติความพรุนแตกต่างกัน

2. วัตถุประสงค์ย่อย

เพื่อศึกษาผลกระทบของการบรรจุ NaOH ในถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CO_2 โดยการเก็บข้อมูลการทดลองในรูปแบบของกราฟเบรกทรู เพื่อทดสอบแบบจำลองสมการเบรกทรูและ เพื่อหาสภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณการดูดซับ CO_2 มีค่าสูงสุดและหาสมการความสัมพันธ์สำหรับทำนายปริมาณการดูดซับ CO_2 ในเบดนิ่งด้วยถ่านกัมมันต์ที่บรรจุ NaOH ภายใต้สภาวะต่างๆ โดยใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. การเตรียมถ่านกัมมันต์ที่บรรจุด้วย NaOH และการวัดสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่บรรจุด้วย NaOH โดยแช่ถ่านกัมมันต์ในสารละลาย NaOH ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ และไล่น้ำออกโดยอบให้แห้งพร้อมทั้งวัดสมบัติความพรุนของตัวอย่างถ่านกัมมันต์

2. การทดลองการดูดซับ CO_2 ในเบดนิ่ง โดยการศึกษาการดูดซับแก๊สผสมระหว่าง CO_2 และ N_2 ในเครื่องดูดซับเบดนิ่ง โดยเก็บข้อมูลความเข้มข้นของ CO_2 ในสายออกที่เวลาต่างๆ เพื่อนำมาสร้างกราฟเบรกทรูภายใต้สภาวะดูดซับต่างๆ

3. การทดสอบแบบจำลองกราฟเบรกทรู ซึ่งการทำการทดสอบแบบจำลองกราฟเบรกทรูโดยใช้แบบจำลองคลินเคนเบิร์ก และแบบจำลองโทมัส เพื่อตรวจสอบความแม่นตรงของแบบจำลองในการอธิบายพลศาสตร์การดูดซับในเบดนิ่งและหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวคงที่ของแบบจำลองและสภาวะการดูดซับ

4. การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ โดยการวิเคราะห์เชิงสถิติประกอบด้วยการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของตัวแปร (Sensitivity analysis) และการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาจุดเหมาะสมของความสามารถในการดูดซับ CO_2 จากแก๊สผสม ซึ่งจะมีการออกแบบการทดลองด้วยวิธี 2^k แฟคทอเรียล และวิธี Box-behnken

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจผลกระทบของปริมาณการบรรจุ NaOH ในถ่านกัมมันต์ต่อการดูดซับ CO_2

2. สามารถหาแบบจำลองกราฟเบรกทรูที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน

3. ได้สมการสหสัมพันธ์ที่ใช้ทำนายปริมาณการดูดซับ CO_2 ด้วยถ่านกัมมันต์ที่บรรจุ NaOH ภายใต้สภาวะการดูดซับต่างๆ และได้สภาวะเหมาะสมที่สุดที่ให้ปริมาณการดูดซับ CO_2 สูงสุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ทฤษฎีและปริทัศน์วรรณกรรม

2.1 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์คือคาร์บอนอสัณฐานรูปแบบหนึ่งที่มีพื้นที่ผิวภายในและความพรุนสูง ถ่านกัมมันต์สามารถเตรียมได้โดยการเผาไหม้ การเผาไหม้บางส่วน และการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุคาร์บอน โดยวัสดุคาร์บอนดังกล่าวอยู่ในรูปแบบของผงหรือเม็ด สำหรับรูปแบบเม็ดนั้นมีคุณสมบัติคือพื้นที่ผิวภายในและปริมาณรูพรุนขนาดเล็กมาก และสำหรับรูปแบบผงมีขนาดรูพรุนใหญ่มากแต่มีพื้นที่ผิวภายในน้อยกว่ารูปแบบเม็ด โดยทั่วไปแล้วถ่านกัมมันต์ประกอบด้วย ชั้นของแกรไฟท์ที่ไม่ชอบน้ำและมีหมู่ฟังก์ชันไฮโดรฟิลิก ดังนั้นถ่านกัมมันต์สามารถใช้ในการดูดซับโมเลกุลที่หลากหลายได้ทั้งในแก๊สและของเหลว

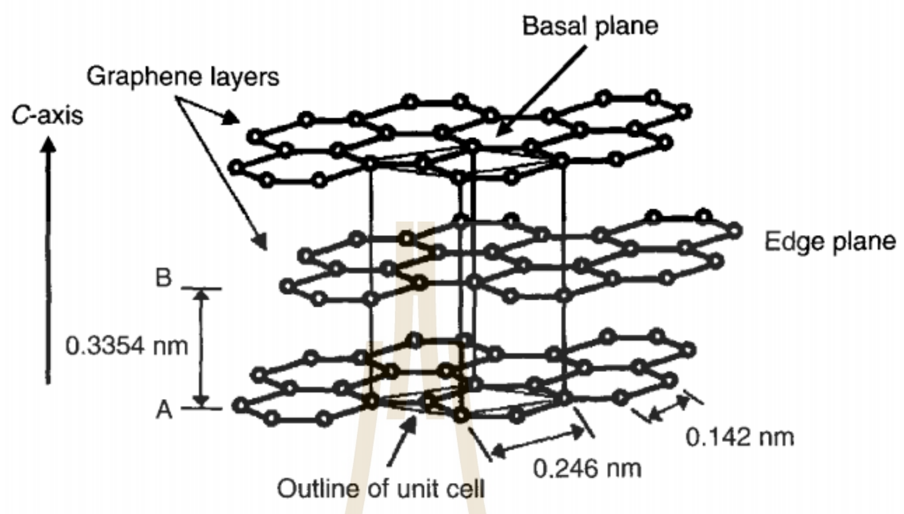
การเริ่มใช้ถ่านกัมมันต์ในอดีตถ่านกัมมันต์ถูกนำมาใช้เป็นตัวดูดซับเพื่อวัตถุประสงค์ทางการแพทย์และทำบริสุทธิ์โดยชาวอียิปต์ (Bansal et al., 1998) และมีชาวฮินดูใช้ถ่านในการกรองน้ำดื่มหลังจากนั้นในปี 1900-1901 ถ่านถูกนำมาใช้ในการทำบริสุทธิ์น้ำตาลแทนที่ถ่านจากกระดูก และในช่วงสงครามโลกมีการผลิตถ่านมีคุณภาพดีขึ้นเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับแก๊สพิษในหน้ากากกันแก๊สเป็นต้น

ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้จากวัสดุที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน เช่น ไม้ ถ่านหิน เปลือกเมล็ดของผลไม้ และชีวมวล (ทั้งที่บริสุทธิและเหลือทิ้ง) โดยนำมาผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มปริมาณของรูพรุนทำให้พื้นที่ผิวภายในเพิ่มขึ้น ถ่านกัมมันต์ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขว้างในกระบวนการแยกสาร และกระบวนการทำบริสุทธิ์

2.1.1 โครงสร้างถ่านกัมมันต์

โครงสร้างถ่านกัมมันต์มีลักษณะเป็นของแข็งรูพรุนที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน โดยปกติแล้วโครงสร้างถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous structure) และโครงสร้างไมโครคริสตัลไลต์กราไฟท์ (Graphite microcrystalline structure) โดยกลุ่มไมโครคริสตัลไลต์ที่เกิดจากการเรียงตัวของชั้นแกรฟีน (Graphene layer) ชั้นแกรฟีนอธิบายอีกอย่างคือชั้นกราไฟท์หกเหลี่ยม (Hexagonal graphite) ดังรูปที่ 2.1 วางตัวต่อกันของชั้นแกรฟีนภายในถ่านกัมมันต์วางตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดช่องว่างของรูพรุนต่างๆ โดยรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) (มากกว่า 50 nm) และรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) (2-50 nm) จะเป็นทางผ่านเพื่อให้สารที่ต้องการดูดซับเข้าไปถึงรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) (น้อยกว่า 2 nm) ซึ่งเป็นช่วงขนาดรูพรุน

ที่สำคัญต่อการดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูง



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแกรไฟท์หกเหลี่ยม โดยมีพันธะระนาบสามเหลี่ยม (Trigonal planar) อยู่ภายในชั้นแกรฟีน (Marsh & Rodriguez-Reinoso, 2006)

2.1.2 การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์

โดยทั่วไปกระบวนการที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มี 2 วิธีด้วยกันประกอบด้วย การกระตุ้นทางกายภาพ และการกระตุ้นทางเคมี โดยการกระตุ้นทางกายภาพมีวัตถุประสงค์ในการสร้าง หรือพัฒนารูพรุนภายในถ่านจากการคาร์บอไนเซชันด้วยวิธีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ด้วยแก๊สออกซิไดซ์ เช่น CO_2 หรือ ไอน้ำ ในช่วงอุณหภูมิ 850-1100 ^{o}C อีกวิธีในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์คือการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งการกระตุ้นทางเคมีจะเริ่มหลังจากการคาร์บอไนเซชัน โดยการนำถ่านแช่ในสารเคมี ตัวอย่างเช่น H_3PO_4 และ $ZnCl_2$ เป็นต้น ที่อุณหภูมิระหว่าง 500-900 ^{o}C กระบวนการคาร์บอไนเซชัน การกระตุ้นทางกายภาพ และการกระตุ้นทางเคมีจะอธิบายไว้ในหัวข้อต่อไป

2.1.2.1 สารตั้งต้นในการผลิตถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตจากวัสดุอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนสูง และมีสารอนินทรีย์ต่ำ ในกระบวนการเชิงพาณิชย์จะนำถ่านหินชนิดต่างๆ เช่น ถ่านหินลิกไนต์ และถ่านหินชนิดต่างๆทั้งหมด เป็นต้น หรือ ชีวมวลต่างๆ เช่น ไม้ กะลามะพร้าว และ เปลือกแข็งของผลไม้ เพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ (El-Hendawy et al., 2001)

วัสดุข้างต้นมีองค์ประกอบของคาร์บอนสูงและราคาถูก ถ่านหินมักนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากให้ผลผลิตถ่านกัมมันต์สูง ในส่วนวัสดุชีวมวลหรือไม้ เป็นวัสดุลิกโน

เซลลูโลส (Lignocellulose) ที่มีส่วนประกอบของอนินทรีย์ต่ำและสารอินทรีย์ระเหยสูง (Volatile organic compounds)

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยปกติจะผลิตในรูปแบบเม็ด ผง และอัดขึ้นรูป รูปแบบของถ่านกัมมันต์จะขึ้นกับการนำไปใช้งาน เช่น กระบวนการดูดซับแก๊สจะใช้ในรูปแบบเม็ด และแบบอัดขึ้นรูป และสำหรับรูปแบบผงมักจะใช้ในการดูดซับในวัฏภาคของเหลว

2.1.2.2 คาร์บอไนเซชัน (Carbonization)

กระบวนการคาร์บอไนเซชันคือกระบวนการกำจัดสารที่ไม่ใช่คาร์บอนและผลิตมวลคาร์บอนคงตัว และสร้างรูพรุนเบื้องต้นโดยกระบวนการสลายตัวทางความร้อนภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อย โดยกระบวนการผลิตมักจะใช้อุณหภูมิในช่วง 500-1000 °C ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวเรียกว่า ถ่านชาร์ (Char)

ระหว่างกระบวนการคาร์บอไนเซชั่นโมเลกุลขนาดเล็กจะถูกสลายด้วยความร้อนจากสารตั้งต้นเป็นการสร้างตาข่ายของแข็งที่เป็นส่วนประกอบของคาร์บอนทั้งสูงขึ้นหรือต่ำลง และตำแหน่งในการสลายตัวของสารระเหยเป็นตำแหน่งการสร้างรูพรุนเบื้องต้น หลังจากการให้ความร้อนตาข่ายคาร์บอนจะทำให้เกิดโครงสร้างหกเหลี่ยมของคาร์บอนมากขึ้นจนกระทั่งกลายเป็นผลึกแกรไฟท์เดี่ยว (Single crystal graphite)

ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการคาร์บอไนเซชันคือ อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิสุดท้าย เวลาที่ใช้ในการคงอุณหภูมิสุดท้ายไว้ และโครงสร้างทั่วไปของสารตั้งต้น โดยผลของอัตราการให้ความร้อนของกระบวนการไพโรไลซิสต่ำจะทำให้ค่าสารระเหยต่ำ และค่าคงที่คาร์บอนสูง เนื่องจากเป็นการเพิ่มการระเหยความชื้นและมีความเสถียรภาพ ดังนั้นถ่านชาร์ที่มีรูพรุนขนาดเล็กจะไม่ขึ้นกับองค์ประกอบของสารตั้งต้นและอัตราความร้อน โดยปกติรูพรุนขนาดเล็กจะถูกสร้างขึ้นที่อุณหภูมิ 500 °C แม้ว่าบางส่วนของรูพรุนจะอุดตันจากผลิตภัณฑ์ของกระบวนการไพโรไลซิสหรือน้ำมันดิน (tar) ซึ่งสามารถใช้ได้เมื่อมีการบำบัดด้วยอุณหภูมิสูง (Rhead & Wheeler, 1912)

2.1.2.3 การกระตุ้นทางกายภาพ

ถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการคาร์บอไนเซชันจะมีค่าคาร์บอนคงตัวสูงกว่าวัตถุดิบตั้งต้น แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับยังต่ำอยู่ เนื่องจากน้ำมันดิน (Tar) ยังคงตกค้างอยู่ในถ่านชาร์ (Rodriguez-Reinoso & Molina-Sabio, 1998) ดังนั้นจึงต้องนำถ่านชาร์ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความพรุนและพื้นที่ผิวภายในของถ่าน (Rodriguez-Reinoso & Molina-Sabio, 1998) ซึ่งกระบวนการกระตุ้นจะเป็นการออกซิเดชันด้วยแก๊ส เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน อากาศ ไอน้ำ หรือแก๊สเผาไหม้ เป็นต้น ที่อุณหภูมิระหว่าง 800-1000 °C ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบของสารตั้งต้น หรือเรียกว่าเป็นการเกิด ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) โดยจะ

เกิดปฏิกิริยาระหว่างแก๊สออกซิไดซ์กับคาร์บอนในถ่านชาร์เพื่อทำให้รูพรุนที่มีอยู่เดิมขยายขึ้น และเกิดการสร้างรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น ปฏิกิริยาการกระตุ้นระหว่างไอน้ำและคาร์บอน (Bansal et al., 1988) มีดังนี้

$$C + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2, \Delta H = 118.5 kJ/mol \tag{2.1}$$

$$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2, \Delta H = -42.3 kJ/mol \tag{2.2}$$

$$C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO, \Delta H = 159.0 kJ/mol \tag{2.3}$$

$$C + O_2 \rightleftharpoons CO_2 + H_2, \Delta H = 393.5 kJ/mol \tag{2.4}$$

$$2C + O_2 \rightleftharpoons 2CO, \Delta H = -221.0 kJ/mol \tag{2.5}$$

2.1.2.4 การกระตุ้นทางเคมี

การกระตุ้นทางเคมีเป็นการผสมสารเคมีกับวัตถุดิบจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-600 °C เมื่อผ่านกระบวนการดังกล่าวแล้วถ่านกัมมันต์จะถูกล้างโดยสารละลายกรดหรือเบสเพื่อกำจัดสารกระตุ้นที่แช่ในขั้นตอนแรก ขั้นตอนสุดท้ายนำถ่านกัมมันต์ไปอบเพื่อกำจัดความชื้นโดยการใช้สารละลายในการกระตุ้นเป็นการคายความร้อนหรือดูดความร้อนส่งผลให้วัตถุดิบเกิดการสึกกร่อน หรือทำลายพันธะต่างๆ ในขณะเดียวกันเป็นการสร้างโครงสร้างรูพรุนเพิ่มขึ้นมา (Bansal et al., 1988)

โดยปกติแล้วสารละลายที่ใช้ในการกระตุ้นทางเคมี ได้แก่ โลหะอัลคาไลน์ (เช่น $ZnCl_2$ และ $AlCl_3$) สารประเภทเบส (เช่น KOH K_2CO_3 NaOH Na_2CO_3 และ $MgCl_2$) และสารประเภทกรด (เช่น H_3PO_4 HNO_3 และ H_2SO_4) โดยคุณลักษณะของสารละลายกระตุ้นเหล่านี้คือเป็นตัวทำปฏิกิริยากำจัดน้ำ (Dehydration) เพื่อเป็นการขัดขวางการเกิดของน้ำมันดิน (Tar) และยังมีอิทธิผลต่อการย่อยสลายของไพโรไลต์ (Bansal et al., 1988) และสารเหล่านี้ยังทำการเพิ่มผลผลิตของถ่านกัมมันต์และลดการเกิดของกรดอะซิติก และ เมทานอล

คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นทางเคมีจะขึ้นกับสัดส่วนของการแช่สารละลาย (เช่น สัดส่วนน้ำหนักของ KOH/ไม้) อุณหภูมิของการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบในเตาเผา อุณหภูมิและเวลาที่คงไว้ในเตาเผา และส่วนประกอบของแก๊สที่ป้อนเข้าในการให้ความร้อน

2.1.3 ความพรุนและการกระจายขนาด

สหภาพสากลของเคมีบริสุทธิ์และการประยุกต์(International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC) ได้จัดหมวดหมู่ของขนาดรูพรุนต่างๆ โดยแบ่งเป็น 3 กลุ่มดังนี้

1. รูพรุนขนาดเล็ก: ความกว้างของรูพรุนจะน้อยกว่า 2 nm
2. รูพรุนขนาดกลาง: ความกว้างของรูพรุนจะอยู่ในช่วง 2 ถึง 50 nm
3. รูพรุนขนาดใหญ่: ความกว้างของรูพรุนจะมากกว่า 50 nm

รูปแบบของถ่านกัมมันต์จะอยู่ในรูปแบบผงและเม็ด โดยรูปแบบผงจะพบขนาดอนุภาคน้อยกว่า 100 μm ที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยระหว่าง 15 และ 25 μm ส่วนรูปแบบเม็ดจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าแบบผง (Bansal et al., 1988) ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์ในกระบวนการแยกสารแสดงใน ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการใช้งานถ่านกัมมันต์ในกระบวนการ(Marsh & Rodriguez-Reinoso, 2006).

กระบวนการ	การประยุกต์ใช้งาน
วัฏภาคแก๊ส	• การฟอกแก๊ส การกำจัดแก๊ส SO_2, H_2S, CS_2, อื่นๆ • การกรองแก๊สเสีย • การคืนสภาพตัวทำละลาย • การแยกแก๊สผสม • การควบคุมกลิ่น
วัฏภาคของเหลว	• การทำบริสุทธิ์น้ำดื่ม • กำจัดโลหะหนัก • การบำบัดน้ำเสีย • การกำจัดสีของน้ำตาล

2.2 กระบวนการดูดซับ

กระบวนการดูดซับสารจัดว่าเป็นกระบวนการแยกสารประเภทหนึ่งทางวิศวกรรมเคมีโดยกระบวนการดูดซับสารจะใช้ในการแยกของไหลสองชนิดขึ้นไปออกจากกันซึ่งของไหลจะถูกเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ซึ่งจะถูกสะสมไว้บนพื้นผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) ทำให้ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับบนผิวของแข็งมีค่าสูงกว่าในบริเวณที่ไกลออกไปในวัฏภาคของไหล การดูดซับนี้เกิดขึ้นได้จากแรงกระทำ (Interaction forces) ระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับและสารดูดซับ โดยอาจเป็นแรงดูดอย่างอ่อนที่เรียกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force) ซึ่งจัดเป็นการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) หรืออาจเกิดจากการสร้างพันธะเคมีที่มีความแข็งแรงกว่า ซึ่งจัดเป็นการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) ซึ่งความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีได้มีการเปรียบเทียบเพื่อแสดงให้เห็นได้ชัดดังตารางที่ 2.2 เนื่องจากการดูดซับสารเป็นปรากฏการณ์พื้นผิว (Surface phenomenon) ดังนั้นคุณลักษณะเบื้องต้นของสารดูดซับที่ดี ซึ่งหมายถึงมีความสามารถดูดซับสารต่อหน่วยน้ำหนักได้มาก โดยความสามารถดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักจะขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิการดูดซับ ชนิดของสารดูดซับ ปริมาณของสารดูดซับในระบบ เป็นต้น ตัวดูดซับจึงจำเป็นต้องมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งจะต้องเป็นวัสดุที่มีความพรุนและประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมากเพื่อให้มีพื้นที่ผิวภายในสูง อย่างไรก็ดีลักษณะของโครงสร้างรูพรุนที่เหมาะสม ได้แก่ สัดส่วนปริมาตรของรูพรุนขนาดต่างๆ ก็มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูดซับเช่นเดียวกัน ตัวอย่างสารดูดซับที่เหมาะสมได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ และสารดูดซับประเภทพอลิเมอร์ เป็นต้น (ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, 2011)

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบระหว่าง การดูดซับทางกายภาพ และ การดูดซับทางเคมี (Ruthven, 1984).

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
ความร้อนของการดูดซับ	ต่ำ	สูง
ลักษณะของเฟสการดูดซับ	ชั้นเดียว หรือ หลายชั้น	ชั้นเดียว
ช่วงของอุณหภูมิ	เฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ	อุณหภูมิในช่วงที่กว้าง
ความจำเพาะ	ไม่มีความจำเพาะ	มีความจำเพาะเจาะจง
อัตราการดูดซับที่ 273K	เร็ว	ช้า

2.2.1 สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibria)

สมดุลการดูดซับสารเป็นหนึ่งในข้อมูลที่มีความจำเป็นมากต่อระบบการดูดซับสารทั้งทางด้านการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสาร และการทำความเข้าใจปรากฏการณ์การดูดซับโดยรวม (ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, 2011) โดยข้อมูลเบื้องต้นจะบ่งบอกถึงปริมาณการดูดซับสมดุลภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันสำหรับการดูดซับแก๊ส หรือความเข้มข้นสำหรับการดูดซับของเหลว สำหรับข้อมูลของสมดุลการดูดซับสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$q = (P, T) \quad (2.6)$$

หรือ

$$q = (c, T) \quad (2.7)$$

เมื่อ q คือ ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนัก
T คือ อุณหภูมิของระบบ
P คือ ความดันย่อยในวัฏภาคแก๊ส
c คือ ความเข้มข้นในวัฏภาคของเหลว

เมื่อกำหนดชนิดของสารถูกดูดซับและสารดูดซับ และการดูดซับเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่จะได้ว่า

$$q = f(P) \quad (2.8)$$

หรือ

$$q = f(c) \quad (2.9)$$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะถูกเรียกว่า ไอโซเทิร์มการดูดซับ (Adsorption isotherm) หรือเรียกสั้นๆว่า ไอโซเทิร์ม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.2.2 ไอโซเทิร์มการดูดซับ (Adsorption isotherm)

สมดุลการดูดซับระหว่างสารถูกดูดซับและสารดูดซับมักจะถูกแสดงในรูปไอโซเทิร์มการดูดซับที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับของสารถูกดูดซับกับความดันย่อยกรณีเป็นแก๊ส และความเข้มข้นกรณีเป็นของเหลวที่อุณหภูมิคงที่ การแบ่งชนิดของไอโซเทิร์มการดูดซับทางกายภาพสำหรับ Type I ถึง Type V ถูกเสนอโดย Brunauer Deming and Teller (Brunauer et al., 1940) จากนั้น IUPAC ทำการจำแนกไอโซเทิร์มการดูดซับจากเดิมเป็น 6 ประเภทด้วยกัน โดยไอโซเทิร์มการดูดซับทางกายภาพสามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับลักษณะของการดูดซับและแรงดึงดูดระหว่างสารถูกดูดซับกับสารดูดซับโดย

- การคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และการกระจายขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ
- การประเมินคุณสมบัติทางเคมีพื้นผิวของตัวดูดซับและพื้นฐานของกระบวนการดูดซับ
- การประเมินปริมาณการดูดซับและประสิทธิภาพของตัวดูดซับ

รูปแบบของไอโซเทิร์มการดูดซับสำหรับการดูดซับทางกายภาพแสดงในรูปที่ 2.2
คำอธิบายสำหรับไอโซเทิร์มการดูดซับแต่ละประเภทมีดังต่อไปนี้

ไอโซเทิร์มประเภทที่ 1 แสดงถึงการดูดซับครอบคลุมพื้นผิวชั้นเดียว หรือเรียกได้ว่าเป็น Langmuir type ไอโซเทิร์มแสดงให้เห็นถึงการดูดซับในรูพรุนขนาดเล็กซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำกว่า 0.1 และมักจะเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันสัมพัทธ์ประมาณ 0.5 ตัวอย่างของไอโซเทิร์มชนิดนี้เกิดจากวัสดุดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวของรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมากดูดซับกับ N_2 แก๊สที่ 77 K

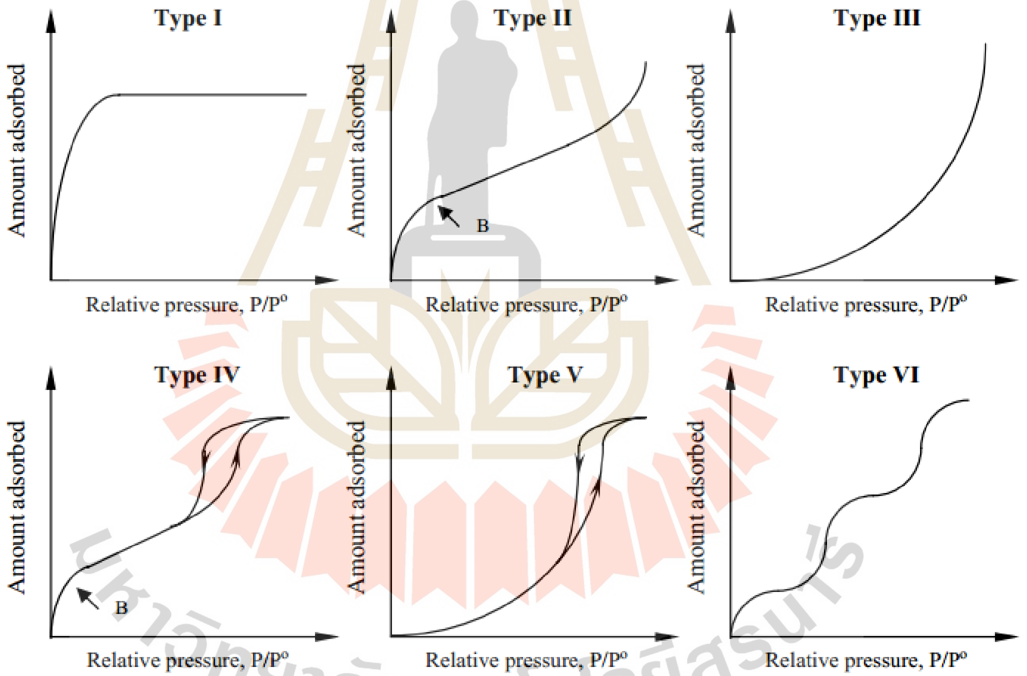
ไอโซเทิร์มประเภทที่ 2 กราฟเริ่มต้นมีแนวโน้มโค้งเข้าหาแกนของความดันสัมพัทธ์จากนั้นมีค่าเกือบเป็นเส้นตรงและสุดท้ายกราฟมีแนวโน้มโค้งออกจากแกนของความดันสัมพัทธ์ สังเกตุว่าที่จุดหัวเข่า (knee) หรือ ที่จุด B มักจะถูกอธิบายว่าถึงจุดอิ่มตัวของการดูดซับชั้นเดี่ยวหลังจากจุด B จะเป็นการดูดซับหลายชั้นและสุดท้ายคือการควบแน่นรูเล็ก (Capillary) ไอโซเทิร์มชนิดนี้เป็นกลไกของไอโซเทิร์มของ BET ตัวอย่างของไอโซเทิร์มชนิดนี้คือ การดูดซับ N_2 ที่ 77 K บนซิลิกาเจล

ไอโซเทิร์มประเภทที่ 3 มีแนวโน้มโค้งออกจากแกนของความดันสัมพัทธ์ ซึ่งไอโซเทิร์มชนิดนี้ชี้ให้เห็นถึงปฏิสัมพันธ์ที่อ่อนระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับซึ่งพบว่าการดูดซับต่ำที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ

ไอโซเทิร์มประเภทที่ 4 มีความสัมพันธ์กับ Type II ไอโซเทิร์มที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่มีแนวโน้มลดลงที่ความดันสัมพัทธ์สูงหรือเข้าใกล้ความดันอิ่มตัว ลูป Hysteresis เกี่ยวข้องกับรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) โดยการควบแน่นรูเล็ก (Capillary)

ไอโซเทิร์มประเภทที่ 5 มีการโค้งออกจากแกนความดันสัมพัทธ์และมีแนวโน้มที่จะลดระดับลงที่ความดันสัมพัทธ์สูง โดยประเภทไอโซเทิร์มประเภทนี้คล้ายกับ Type III ไอโซเทิร์มซึ่งการดูดซับไอน้ำบนถ่านกัมมันต์จากการยกตัวอย่างของ Type III ไอโซเทิร์มอาจจะถูกจัดเป็น Type V ไอโซเทิร์ม

ไอโซเทิร์มประเภทที่ 6 โดยไอโซเทิร์มประเภทนี้เป็นการดูดซับที่ละชั้นบนผิวอย่างสม่ำเสมอ โดยความคมของแต่ละชั้นจะขึ้นระบบและอุณหภูมิ โดยไอโซเทิร์มประเภทนี้ยังค่อนข้างที่จะพบได้ยาก



รูปที่ 2.2 ไอโซเทิร์ม 6 ชนิดของการดูดซับแก๊สบริสุทธิ์โดยจำแนกตาม BET และ IUPAC (Ngernyen, 2007)

2.2.3 สมการไอโซเทิร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm Equations)

ในการสร้างสมการไอโซเทิร์มเพื่ออธิบายข้อมูลไอโซเทิร์มมีตัวแปร 2 ตัวแปรสำคัญในเชิงปฏิบัติคือ (1) ความถูกต้องของสมการนั้น และ (2) ความง่ายที่สมการอาจจะรวมอยู่ใน

การคำนวณการดูดซับ การอภิปรายต่อไปนี้เป็นการตรวจสอบสมการไอโซเทิร์มหลายสมการที่ใช้กันทั่วไปสำหรับข้อมูลการดูดซับแก๊สชนิดเดียว

2.2.3.1 สมการไอโซเทิร์มแลงมัวร์ (Langmuir Isotherm Equation)

สมการแลงมัวร์เป็นสมการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็นการดูดซับทางกายภาพ หรือแม้กระทั่งการดูดซับทางเคมี สำหรับแก๊สและสารละลายของเหลว โดยสมการแลงค์มัวร์เริ่มพัฒนาขึ้นสำหรับการดูดซับชั้นเดียวของแก๊สบนพื้นผิวเรียบ (Langmuir, 1918) โดยสมมุติฐานสำหรับสมการมีดังนี้

1. การดูดซับของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับไว้ ณ ตำแหน่งที่ถูกตรึงไว้
2. ทุกจุดของจุดดูดซับมีค่าเท่ากันและรองรับโมเลกุลของสารดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุล
3. โมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่มีปฏิสัมพันธ์ด้านข้างเมื่อถูกดูดซับ

สมการแลงมัวร์มีแนวคิดมาจากวิธีทางจลพลศาสตร์ โดยสมมุติฐานจากการดูดซับพร้อมกับการคายซับและพิจารณาที่สมดุลการดูดซับเป็นสถานะแบบสมดุลพลศาสตร์ ดังนั้นอัตราการดูดซับและการคายซับเท่ากัน ในเวลาเดียวกันที่สมดุล ดังนั้นจะไม่มีการสะสมโมเลกุลบนพื้นผิว อย่างไรก็ตามสมการไอโซเทิร์มการดูดซับของแลงมัวร์จัดอยู่ในรูปเศษส่วนดังนี้

$$\theta = \frac{bP}{1+bP} \tag{2.10}$$

$$b = \frac{k_a}{k_d} = \frac{\alpha}{k_{d\infty}\sqrt{2\pi MRT}} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = b_\infty \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \tag{2.11}$$

เมื่อ b คือ ค่าคงที่แลงมัวร์หรือค่าคงที่ความสัมพันธ์ (Affinity constant) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าคงที่อัตราการดูดซับ (k_a) กับค่าคงที่อัตราการคายซับ (k_d) โดยค่าคงที่ความสัมพันธ์สามารถนำมาอธิบายถึงความสามารถของโมเลกุลแก๊สในการดึงดูดกับพื้นที่ผิว และ Q คือ ค่าความร้อนการดูดซับเฉลี่ย โดยปกติแล้วจะมีค่าเท่ากับค่าพลังงานกระตุ้นการระเหย (E_d)

2.2.3.2 สมการไอโซเทิร์ม BET

Brunauer Emmett และ Teller (Brunauer et al., 1938) พัฒนาและเสนอสมการความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลไอโซเทิร์มการดูดซับที่อธิบายพฤติกรรมของไอโซเทิร์ม

ประเภทที่ 2 โดยปกติแล้วสมการไอโซเทิร์มจะตรงตามหลักของสมการไอโซเทิร์มของแลงมัวร์แต่ยกเว้นสำหรับการดูดซับในหลายชั้น โดยการสมมุติฐานของสมการ BET มีดังนี้

1. พื้นที่ผิวของตัวดูดซับประกอบด้วยอาร์เรของจุดดูดซับที่เอนทาลปีคงที่ของการดูดซับในชั้นเดียว
2. การดูดซับของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับไว้ ณ ตำแหน่งที่ถูกตรึงไว้
3. ไม่มีปฏิสัมพันธ์ด้านข้างระหว่างโมเลกุล
4. การสร้างชั้นแบบหลายชั้นไม่จำกัด
5. เอนทาลปีของการดูดซับในชั้นที่สองและต่อมาจะเท่ากับเอนทาลปีของการทำให้เป็นของเหลว
6. การดูดซับและการคายซับอาจเกิดขึ้นเฉพาะที่อยู่บนไซต์หรือที่สัมผัสกับไซต์

เพื่อพิจารณาการดูดซับหลายชั้นกำหนดให้ s_0 s_1 s_2 ….. s_n เป็นชั้นการดูดซับสำหรับชั้นที่ 0 ชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ n ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ โดยสมมุติฐานของสมการ BET จะใช้วิธีสมดุลตามที่แลงค์มัวร์ได้เสนอไว้ ดังนั้นสมการไอโซเทิร์มของ BET สามารถหาได้และให้ตัวแปรที่เหมาะสมคือ C และ V_m แสดงดังนี้

$$\frac{V}{V_m}=\frac{CP/P^0}{\left(1-P/P^0\right)\left(1-P/P^0+CP/P^0\right)}=\frac{CP}{\left[P^0-P\right]\left[1+\left(C-1\right)P/P^0\right]} \tag{2.12}$$

2.2.3.3 สมการ Dubinin-Radushkevich (DR)

สมการ Dubinin-Radushkevich (DR) (Dubinin & Radushkevich, 1947) ได้รับการพัฒนาโดยการใช้ทฤษฎีศักย์พลังงานการดูดซับของ Polanyi (Do, 1998) สมการจะเป็นกึ่งสหสัมพันธ์และขึ้นกับสมมุติฐานการเปลี่ยนแปลงของพลังงานศักย์ระหว่างวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคดูดซับและคุณลักษณะพลังงานที่ให้กับของแข็ง ซึ่งสมการ DR สามารถเขียนและจัดรูปแบบใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{W}{W_0}=\exp\left[-\frac{1}{\left(\beta E_0\right)^2}\left(RT\ln\frac{P}{P^0}\right)^2\right] \tag{2.13}$$

และสมการที่ (2.13) สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบของปริมาณการดูดซับ (V) ได้ดังนี้

$$\frac{V}{V_0} = \exp\left[-\frac{1}{(\beta E_0)^2}\left(RT\ln\frac{P}{P^0}\right)^2\right] \qquad (2.14)$$

หรือ

$$\ln\frac{V}{V_0} = -\left[\frac{RT}{\beta E_0}\right]^2 \ln^2\frac{P^0}{P} \qquad (2.15)$$

เมื่อ E_0 คือ พลังงานปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ

2.2.3.4 สมการ Dubinin-Astakhov (DA)

ของแข็งคาร์บอนที่มีการเผาผลาญคาร์บอนต่ำจะอธิบายได้ดีสำหรับสมการของ DR แต่สำหรับของแข็งคาร์บอนที่มีการเผาผลาญคาร์บอนสูงความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิว (Surface heterogeneous) มีผลต่อการกระจายขนาดรูพรุนมากขึ้นซึ่งกรณีนี้สมการของ DR ไม่สามารถอธิบายถึงข้อมูลความสมดุลได้ดี ดังนั้น Dubinin-Astakhov (Dubinin & Astakhov, 1971) ได้เสนอสมการ DA เพื่ออธิบายความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวดังนี้

$$\theta = \frac{W}{W_0} = \exp\left[-\left(\frac{RT}{\beta E_0}\right)^m \ln^m\frac{P^0}{P}\right] \qquad (2.16)$$

Dubinin และ Astakhov ชี้ให้เห็นว่าควนใช้ตัวแปร m ระหว่าง 1 ถึง 3 ขึ้นกับตัวดูดซับ โดยทั่วไปแล้วมีการเสมอให้ใช้ตัวแปร m เท่ากับ 3 สำหรับ ตะแกงโมเลกุลคาร์บอน และพบว่าสามารถอธิบายข้อมูลไอโซเทิร์มการดูดซับได้ดี สำหรับถ่านกัมมันต์ค่าตัวแปร m เท่ากับ 1.2 ถึง 1.8 และสำหรับซีโอไลต์ที่มีการกระจายขนาดรูพรุนแคบจะใช้ค่า m ที่ 3 ถึง 6

2.2.4 การคำนวณพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน

การคำนวณค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับโดยสมการแลงมัวร์มีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้ สมการแลงมัวร์จากสมการที่ (2.18)

$$\theta = \frac{bP}{1+bP} \qquad (2.17)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

แทนค่า θ = V/V_m และจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปแบบสมการเชิงเส้น

$$\frac{P}{V} = \frac{P}{V_m} + \frac{1}{bV_m} \quad (2.18)$$

เมื่อ V คือ ปริมาณการดูดซับที่ความดันสมดุล P

b คือ ค่าคงที่ความสัมพันธ์

V_m คือ ปริมาณการดูดซับสำหรับปกคลุมพื้นที่ชั้นเดียวบนพื้นที่ของแข็ง

พล็อตกราฟระหว่าง P/V กับ P หรือ P/P^0V กับ P/P^0 เป็นกราฟเชิงเส้น พบว่าค่าปริมาณการดูดซับสำหรับปกคลุมพื้นที่ชั้นเดียวบนพื้นที่ของแข็ง (V_m) คือความชัน ดังนั้น พื้นที่ผิวจำเพาะสามารถคำนวณจาก V_m ตามสมการนี้

$$A = V_m N_A a_m \quad (2.19)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ (m^2/g)

N_A คือ เลขอโวกาโดมีค่าเท่ากับ 6.0221367×10^{23} (molecules/mole)

a_m คือ พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลตัวดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นที่ (m^2/molecule)

เช่นเดียวกับการคำนวณของสมการของแลงมัวร์โดยสมการของ BET สามารถจัดอยู่ในรูปเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\frac{P}{V\left(P^0 - P\right)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{\left(C-1\right)}{V_m C}\frac{P}{P^0} \quad (2.20)$$

สมการ BET สามารถใช้อธิบายข้อมูลไอโซเทิร์มได้ที่ความดันสัมพัทธ์ช่วง 0.0.5ถึง 0.3 ดังนั้นหาก ทำการพล็อต $P/[V(P^0-P)]$ และ P/P^0 จะได้ความชันและจุดตัดแกน y ดังนี้

$$Slope = S = \frac{C-1}{CV_m} \quad (2.21)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$c = I = \frac{1}{CV_m} \tag{2.22}$$

ดังนั้นสามารถคำนวณค่า V_m จากสมการที่ (2.42) และ (2.43) โดยปกติแล้วค่า C จะมาก (C>>1) เมื่อจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับศูนย์ หลังจากหาค่า V_m สามารถคำนวณหาค่าพื้นพี่ผิวจำเพาะได้โดยใช้ขั้นตอนเดียวกับสมการของแลงมัวร์

สมการ DR จากสมการที่ (2.36) สามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบของลอกกาลิทึม และจัดรูปให้อยู่ในรูปแบบเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\log V = \log V_0 - 2.303\left[\frac{RT}{\beta E_0}\right]^2 \log^2 \frac{P^0}{P} \tag{2.23}$$

เมื่อ R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

T คือ อุณหภูมิการดูดซับ

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง logV กัย $\log^2(P^0/P)$ การพล็อตกราฟลักษณะนี้มีชื่อเรียกว่า DR พล็อต ซึ่งเป็นกราฟเชิงเส้นที่มีจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log V_0$ ซึ่งจะถูกแปลงเป็นปริมาณของเหลาในรูพรุนและนำไปคำนวณหาค่าปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (V_{mic}) และความชันสามารถคำนวณหาค่าคงที่ E_0 ได้ ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กสามารถคำนวณได้จากสมการนี้

$$\frac{W_g}{W_{adsorbent}} = \frac{V_0 MW}{V_{STP}} \tag{2.24}$$

เมื่อ $W_g/W_{adsorbent}$ คือ ความจุของตัวดูดซับ

V_0 คือ สามารถคำนวณได้จากจุดตัดแกน y จาก DR พล็อต

MW คือ น้ำหนักของโมเลกุลแก๊สดูดซับ (g/mole)

V_{STP} คือ ปริมาตรที่เกิดขึ้นโดยแก๊สที่อุณหภูมิและความดันมาตฐานซึ่งมีค่าเท่ากับ 22400 cm^3/mole

ดังนั้นความจุสามารถใช้หาค่า V_{mic} ได้ดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$V_{mic} = \frac{W_g}{W_{adsorbent}} \frac{1}{\rho_{adsorbate}} \tag{2.25}$$

เมื่อ V_{mic} คือ ปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็กของตัวดูดซับ

$\rho_{adsorbate}$ คือ ความหนาแน่นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคของเหลวที่อุณหภูมิที่กำหนด

หลังจากการคำนวณปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กเสร็จสิ้นจะนำไปสู่การคำนวณพื้นที่รูพรุนขนาดเล็ก โดยคำนวณเช่นเดียวกับการคำนวณของสมการแลงค์มัวร์

2.3 กระบวนการดูดซับในเบดนิ่ง

กระบวนการดูดซับสารที่ใช้ในกระบวนการแยกทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้ระบบเบดนิ่ง เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน ต้นทุนในการสร้างไม่สูง และมีการสูญเสียตัวดูดซับน้อย เนื่องจากเป็นระบบเบดนิ่งจึงไม่มีการขัดสีกันของอนุภาค โดยระบบการทำงานของระบบการดูดซับเบดนิ่ง เริ่มจากการบรรจุตัวดูดซับไว้ในคอลัมน์ และป้อนแก๊สหรือของไหลที่ประกอบด้วยตัวถูกดูดซับที่ต้องการแยกผ่านชั้นตัวถูกดูดซับ หากต้องการที่จะคืนสภาพ (Regeneration) ให้สารดูดซับจะใช้อีกหนึ่งคอลัมน์เพื่อทำหน้าที่ในการคืนสภาพตัวดูดซับที่อิ่มตัวจากการใช้งานแล้ว

กระบวนการดูดซับในเบดนิ่งเกิดขึ้นภายใต้สภาวะพลศาสตร์ ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเปลี่ยนแปลงตามความยาวของเบดและเวลา โดยที่เวลา t_1 เป็นจุดเริ่มต้นที่ตัวถูกดูดซับถูกป้อนเข้าเจอกับเบดของตัวดูดซับพบว่าที่ใกล้ทางเข้ามีการดูดซับเกิดขึ้นค่อนข้างมากและเมื่อของไหลผ่านเข้าไปมีการดูดซับเล็กน้อยซึ่งแสดงถึงการลดลงของกราฟความเข้มข้นเป็นรูปตัว S ต่อมาที่เวลา t_2 พบว่าเบดอิ่มตัวตั้งแต่ที่ความยาวเบด 0 ถึง L_1 ซึ่งเป็นการดูดซับอย่างต่อเนื่องและช่วงที่มีการไล่ระดับของความเข้มข้น เช่นที่ t_2 และ t_3 มักจะถูกเรียกว่าช่วงการถ่ายโอนมวล (Mass transfer zone, MTZ) ส่วนที่ตัวดูดซับยังไม่ถูกใช้งานที่เวลา t_2 อยู่ที่ช่วงความยาวของเบดที่ L_2 ถึง L_B และที่เวลา t_3 อยู่ที่ช่วงความยาวของเบดที่ L_3 ถึง L_B เมื่อเวลาผ่านไปที่ t_3 รูปแบบความเข้มข้นเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและหลังรูปแบบความเข้มข้นคือช่วงการอิ่มตัวของตัวดูดซับ โดยขยายไปตามความยาวของเบด เมื่อความเข้มข้นถึงทางออกของเบด (L_B) จุดนี้ถูกเรียกว่า จุดเบรกทรู และเวลาดังกล่าวถูกเรียกว่า เวลาเบรกทรู (t_B) หลังจากนั้นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเท่ากับความเข้มข้นขาเข้า

จาก รูปที่ 2.4 แสดงกราฟเบรกทรูสำหรับการดูดซับสารเดี่ยวจากคอลัมน์การดูดซับเบดนิ่ง ซึ่งเป็นการพล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นขาออกกับเวลส ในทางปฏิบัติเวลาเบรกทรูจะถูกกำหนดจากชนิดของสารถูกดูดซับโดยยอมรับให้ค่าความเข้มข้นของสารถูกดูดซับออกมาได้มากที่สุดเท่ากับ

เท่าไหร่ ตัวอย่างเช่น การดูดซับที่ระดับความเข้มข้นที่ยอมรับได้เท่ากับ 5% ของความเข้มข้นขาเข้า ($C/C_0 = 0.05$) หลังจากนั้นการดูดซับเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งความเข้มข้นขาออกเท่ากับความเข้มข้นขาเข้า ($C/C_0 = 1$) ซึ่งเป็นจุดที่เบดอิ่มตัว รอการคืนสภาพในลำดับต่อไป ตัวแปรโดยทั่วไปที่มีผลกระทบต่อของพลศาสตร์การดูดซับในเบดนิ่งมีดังนี้

1. ชนิดของตัวดูดซับ
2. ขนาดอนุภาคของตัวดูดซับซึ่งกำหนดด้วยค่าความดันตกคร่อมสูงสุด
3. ความสูงของเบดตัวดูดซับ
4. ความเร็วของของไหล
5. อุณหภูมิของของไหลและตัวดูดซับ
6. ความเข้มข้นของสารป้อนเข้าของของไหล
7. ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในสายป้อนเข้า
8. ความดันของระบบสำหรับการดูดซับวัฏภาคแก๊ส

ข้อมูลกราฟเบรกทรูสำหรับการดูดซับภายใต้สภาวะการดูดซับต่างๆ มีความสำคัญมากในการออกแบบกระบวนการดูดซับในเบดนิ่ง

การคำนวณผลการทดลองจากกราฟเบรกทรูคือการหาค่าปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนัก ณ เวลาเบรกทรู ที่สมดุล และการคำนวณความกว้างของช่วงการถ่ายโอนมวล (MTZ) ซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้

การคำนวณผลการทดลองจากกราฟเบรกทรูคือการหาค่าปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนัก ณ เวลาเบรกทรู ที่สมดุล และการคำนวณความกว้างของช่วงการถ่ายโอนมวล (MTZ) ซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้

$$q_b = \frac{QC_0\overline{t_b}}{W_C} \tag{2.26}$$

$$q_E = \frac{QC_0\overline{t_E}}{W_C} \tag{2.27}$$

$$\overline{t_b} = \int_0^{t_b}(1-\frac{C}{C_0})dt \tag{2.28}$$

$$\overline{t_E} = \int_0^{t_E} (1 - \frac{C}{C_0}) dt \qquad (2.29)$$

เมื่อ q_b คือ ปริมาณการดูดซับที่เบรกทรู

q_E คือ ปริมาณการดูดซับที่สมดุล

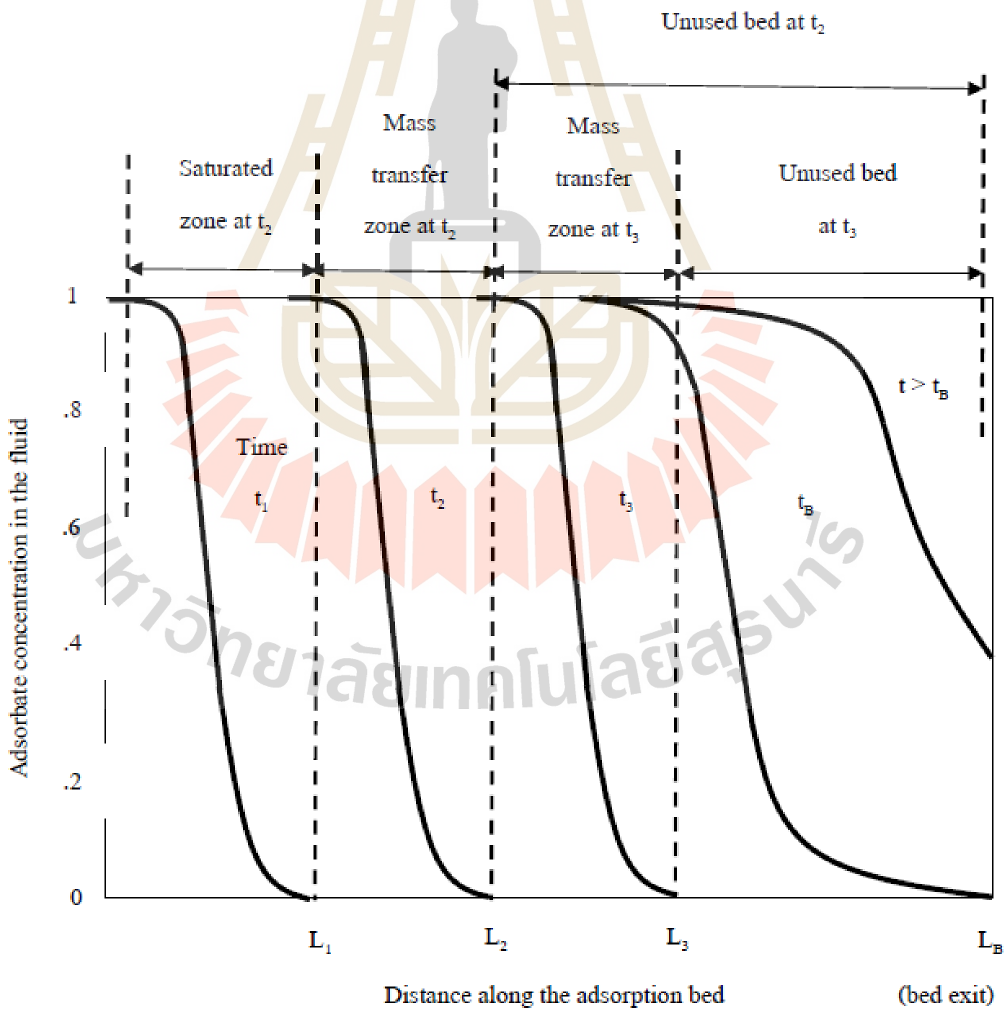
$\overline{t_b}$ คือ เวลาเฉลี่ยที่เบรกทรู

$\overline{t_E}$ คือ เวลาเฉลี่ยที่สมดุล

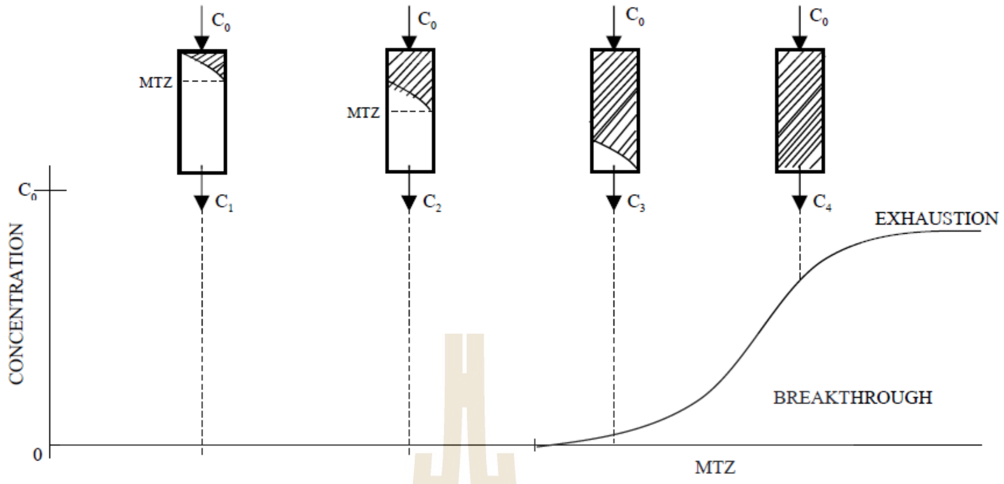
Q คือ อัตราการไหลของของไหล

W_C คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ

C_0 คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเริ่มต้น



รูปที่ 2.3 รูปแบบและความคืบหน้าของช่วงการถ่ายโอนมวลภายในเบดนิ่งจนกระทั่งถึงจุดเบรกทรู



รูปที่ 2.4 คุณลักษณะของกราฟเบรกทรูในคอลัมน์เบดนิ่ง

สำหรับความกว้างของช่วงการถ่ายโอนมวล (H. H. Ngo, et al., 2015) สามารถคำนวณจากสมการดังนี้

$$L_{MTZ} = \frac{L(t_s - t_b)}{t_s} \tag{2.30}$$

เมื่อ L คือ ความยาวของเบด

t_s คือ เวลาที่สมดุล

t_b คือ เวลาที่สมดุล

2.3.1 สมการเบรกทรู

ข้อมูลกราฟเบรกทรูเป็นข้อมูลที่สำคัญในการศึกษาพลศาสตร์และประสิทธิภาพการดูดซับของระบบเบดนิ่งจึงมีความพยายามในการเสนอสมการแบบจำลองเพื่อทำนายกราฟเบรกทรูแบบจำลองที่นิยมใช้ ได้แก่ แบบจำลองของคลินเคนเบิร์ก (Klinkenberg model) สำหรับไอโซเทิร์มเชิงเส้น (Linear isotherm) และแบบจำลองของโทมัส (Thomas model) ซึ่งพัฒนาสำหรับแลงค์มัวร์ไอโซเทิร์ม เป็นต้น แบบจำลองที่กล่าวมาจะใช้ข้อสมมุติฐานคือ อุณหภูมิในการดูดซับคงที่และไม่มีการผสมตามแนวแกน สำหรับการดูดซับที่ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่ำ และ ไอโซเทิร์มของสารประกอบเดี่ยว โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบการดูดซับได้โดยผ่านการทำสมดุลมวลของตัวถูกดูดซับบนเบดของตัวดูดซับ ซึ่งผลของ

สมการดังกล่าวคือ

$$-D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + u\frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{(1-\varepsilon_b)}{\varepsilon_b}\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = 0 \tag{2.31}$$

$$\bar{q} = \frac{3}{R_p{}^3}\int_0^{R_p} R^2 q\,dr \tag{2.32}$$

เมื่อ	D_z	คือ	สัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกน
	C	คือ	ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคของไหล
	u	คือ	ความเร็วของของไหลภายใน
	$\bar{q}$	คือ	ความเข้มข้นในวัฏภาคดูดซับ
	R_p	คือ	รัศมีของอนุภาค
	ε_b	คือ	ความพรุนของเบด
	z	คือ	ความยาวของเบด
	t	คือ	เวลา

สภาวะเริ่มต้นและขอบเขตของสภาวะสำหรับเบดที่ปราศจากตัวถูกดูดซับที่เวลาเท่ากับศูนย์และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (C_0) ที่ทางเข้าคอลัมน์ที่เวลาเท่ากับศูนย์เป็นดังสมการนี้

$$\begin{aligned} &t \le 0, q(R,0,z) = C(0,z) = 0 \\ &t \ge 0, C(t,0) = C_0 \end{aligned} \tag{2.33}$$

คำตอบของสมการเบรกทรูสามารถหาได้จากคำตอบของสมการที่ (2.52) โดยจะขึ้นกับสภาวะเริ่มต้นและขอบเขตของสภาวะและการอธิบายอัตราการดูดซับ ($d\bar{q}/dt$) ซึ่งโดยรวมแล้วแบบจำลองเบรกทรูมีความซับซ้อนซึ่งจะขึ้นกับธรรมชาติของไอโซเทิร์มการดูดซับ การเลือกสมการอัตรา และแบบจำลองการไหล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.3.1.1 แบบจำลองคลินเคนเบิร์ก

แบบจำลองคลินเคนเบิร์ก (Klinkenberg model) (K. Adriaan, 1948) ข้อสมมุติฐานของแบบจำลองนี้คือไอโซเทิร์มการดูดซับเป็นไอโซเทิร์มเชิงเส้นและอัตราการดูดซับภายในอนุภาคตัวดูดซับจะใช้แบบจำลองแรงขับเชิงเส้น (Linear Driving Fore Model, LDF) ซึ่งแสดงด้วยสมการที่ (2.34)

$$\frac{dq}{dt} = k_p(q^* - \bar{q}) = kK(C - C^*) \tag{2.34}$$

เมื่อ k_p คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของอนุภาค

q^* คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคของไหลที่สมดุล

C^* คือ ความเข้มข้นในวัฏภาคของไหล

K คือ ค่าคงที่ของเฮนรี่ของสมการไอโซเทิร์มเชิงเส้น

สมการเบรกทรูของแบบจำลองคลินเคนเบิร์กแบบประมาณเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2}[1 + erf(\sqrt{\tau} - \sqrt{\xi} + \frac{1}{8\sqrt{\tau}} + \frac{1}{8\sqrt{\xi}})] \tag{2.35}$$

(error < 0.6% สำหรับ ξ > 2.0)

$$\xi = \frac{k_p K z}{u}\left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b}\right) \tag{2.36}$$

$$\tau = k_p(t - (z/u)) \tag{2.37}$$

เมื่อ u คือ ความเร็วของแก๊สภายใน

C คือ ความเข้มข้นแก๊สที่เวลาใดๆ

C_0 คือ ความเข้มข้นแก๊สเริ่มต้น

ε_b คือ ความพรุนของเบด

z คือ ความยาวของเบด

2.3.1.2 แบบจำลองของโทมัส

แบบจำลองของโทมัส (Thomas model) (Henry C. Thomas, 1944) แบบจำลองของโทมัสสำหรับการคำนวณกราฟเบรกทรูถูกพัฒนามาจากทฤษฎีของการแลกเปลี่ยนไอออน โดยมีข้อสมมุติฐานคือ แบบจำลองปฏิกิริยาและไอโซเทิร์มแบบแลงค์มัวร์ และไม่มีผลของการผสมตามแนวแกน และแนวรัศมีในคอลัมน์เบดนิ่ง และอัตราการดูดซับแทนด้วยสมการอัตราการเกิดปฏิริยาอันดับสองเทียม โดยสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นดังนี้

$$\frac{dq}{dt} = k_1(q_0 - q)C - k_2(C_0 - C) \tag{2.38}$$

เมื่อ k_1 และ k_2 คือ ค่าคงที่ความเร็ว

C_0 คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ

q_0 คือ ความเข้มข้นที่วัฏภาคการดูดซับที่สมดุลกับความเข้มข้นขาเข้า

สมการข้างต้นจะใช้อธิบายจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาแบบย้อนกลับอันดับสองได้โดยสามารถจะประยุกต์ใช้กับสภาวะการดูดซับได้ทั้งดีและไม่ดี

สมมุติฐานให้เป็นการไหลแบบปลั๊ก ไม่สนใจการกระจายตัวตามแนวแกนและจากสมการที่ (2.31) และสมการที่ (2.38) เมื่อแก้สมการดังกล่าวจะได้สมการของโทมัสดังนี้

$$\frac{C}{C_0} = \frac{J(\beta\xi,\tau)}{J(\beta\xi,\tau) + [1 - J(\beta\xi,\tau)]\exp[(\beta-1)(\tau-\xi)]} \tag{2.39}$$

$$\beta = \frac{1}{1 + bC_0} \tag{2.40}$$

$$\tau = k_1 C_0 (t - \frac{z}{u}) \tag{2.41}$$

$$\xi = \frac{k_1 q_0 z}{u}(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b}) \tag{2.42}$$

สำหรับสภาวะที่ความยาวของเบดมากสามารถที่จะประมาณได้ดังนี้

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1+\exp[k_t(q_0 m_C - C_0 V_{eff})/Q]} \tag{2.43}$$

$$q_0 = \frac{q_m b C_0}{(1+bC_0)} \tag{2.44}$$

$$V_{eff} = Qt \tag{2.45}$$

เมื่อ k_t คือ ค่าคงที่ของโทมัส

q_0 คือ ปริมาณการดูดซับของตัวถูกดูดซับที่สมดุลกับความเข้มข้นขาเข้า

m_C คือ น้ำหนักของตัวดูดซับในคอลัมน์

Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร

2.4 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์เชิงสถิติ

การทดลองเป็นการดำเนินงานของผู้ทำวิจัยในหลายภาคส่วนด้วยกัน โดยปกติแล้วจะเป็นการค้นพบบางอย่างที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหรือระบบโดยเฉพาะ ซึ่งแท้จริงแล้วการทดลองคือการทดสอบนั้นเอง การทดลองที่ได้รับการออกแบบคือการทดสอบเป็นชุดการทดลองโดยมีวัตถุประสงค์ต้องการสร้างตัวแปรอิสระที่สามารถสังเกตุและระบุสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้นได้ (Douglas C. Montgomery, 2013)

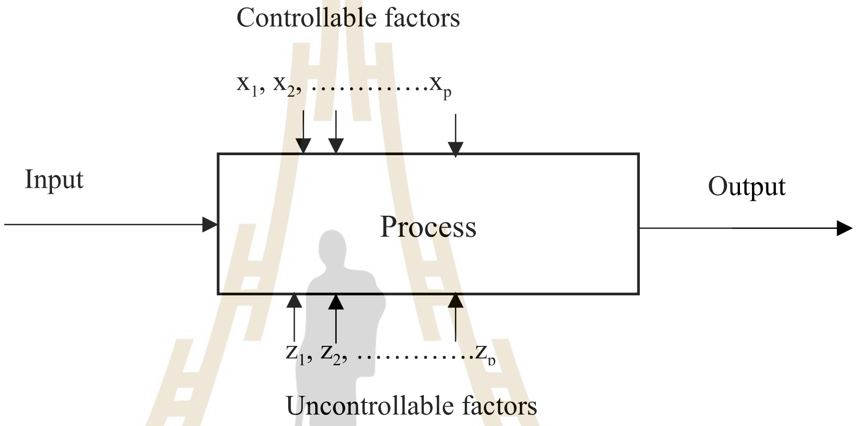
กระบวนการหรือระบบภายใต้สภาวะที่สนใจศึกษาแสดงดัง **รูปที่ 2.5** ซึ่งกระบวนการดังรูปเรามักจะให้เป็นเครื่องจักร วิธีการ ผู้คน และแหล่งทรัพยากรอื่นๆ ที่เปลี่ยนเป็นการนำเข้ากระบวนการ เช่น วัตถุดิบต่างๆ ในบางครั้งตัวแปรของกระบวนการก็สามารถที่จะควบคุมได้ (x_1 x_2…….. x_p) แต่ทว่าตัวแปรอื่นๆ ก็ควบคุมไม่ได้ (z_1 z_2…….. z_p) โดยจุดประสงค์ของการทดลองมีดังต่อไปนี้

1. กำหนัดตัวแปรที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อตัวแปรอิสระ y
2. กำหนดตำแหน่งค่า x เพื่อให้ค่า y มีค่าใกล้กับค่าที่เหมาะสมที่สุด
3. กำหนดตำแหน่งค่า x เพื่อให้ค่าความแปรปรวนของ y มีค่าน้อยที่สุด
4. กำหนดตำแหน่งค่า x เพื่อให้ค่าตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้มีผลน้อยที่สุด

วิธีการออกแบบการทดลองเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนากระบวนการและการแก้ไขปัญหาเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพ ซึ่งกระบวนการทำต่างๆ ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นจุดประสงค์หลักคือ การพัฒนา

กระบวนการเพื่อให้มีความแปรปรวนหรือผลกระทบจากภายนอกน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

วิธีการออกแบบการทดลองพบว่ามีการนำไปประยุกต์ใช้ในหลายๆ ด้าน ในความเป็นจริงนั้นเราอาจมองว่าการทดลองเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการทางวิทยาศาสตร์และเป็นหนึ่งในการเรียนรู้เกี่ยวกับวิธีการทำงานของระบบหรือกระบวนการต่างๆ โดยทั่วไปแล้วเราเรียนรู้ผ่านชุดของกิจกรรมที่เราคาดการณ์เกี่ยวกับกระบวนการดำเนินการทดลองเพื่อกำหนดข้อสันนิษฐานใหม่ซึ่งนำไปสู่การทดลองใหม่ๆ และอื่นๆ



รูปที่ 2.5 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ

การออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญอย่างมากในการทำงานวิจัย สำหรับการลดระยะเวลาในการทำการทดลอง และการหาสภาวะเหมาะสมสำหรับการใช้งาน การใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองในช่วงต้นของการทดลองจะส่งผลให้

1. ลดความแปรปรวนและสอดคล้องกับความต้องการของผู้ทำการทดลองหรือเป้าหมาย
2. ลดเวลาในการทดลอง

การใช้การออกแบบการทดลองนั้นส่งผลให้ง่ายต่อการพัฒนางานวิจัย ทำให้งานวิจัยมีประสิทธิภาพมากขึ้น และลดระยะเวลาในการทำการทดลองได้ด้วย

2.4.1 การวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของตัวแปร (Sensitivity analysis)

การวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของตัวแปรเป็นวิธีการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต้นที่มีผลต่อตัวแปรตาม โดยทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้นที่สนใจและให้ตัวแปรอื่นๆ คงที่ไว้ดังแสดง ณ ตารางที่ 2.3 ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถทำให้ทราบสภาวะที่ดีที่สุดเบื้องต้นได้เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบการทดลองได้ เช่น การออกแบบการทดลอง 2^k แฟกทอเรียล และการออกแบบการทดลอง Box-behnken ซึ่งเครื่องมือการชี้วัดของการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของตัวแปรมีอยู่หลาย

ค่า หนึ่งในนั้นคือ ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์อันดับ (Rank correlation coefficient) หรือ เครื่องมือให้การจัดอันดับของ Kendall โดยใช้สัญลักษณ์คือ (Kendall's tau, τ) โดยการจัดอันดับนี้จะใช้ประเมินความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม ซึ่งการจัดอันดับเป็นการทดสอบสมมติฐานที่ใช้ชี้วัดความเป็นระเบียบของข้อมูลหรือความสอดคล้องกันระหว่างตัวแปรต้นกับตัวแปรตาม โดยมีค่าความเห็นพ้องและไม่เห็นพ้องในการจัดอันดับซึ่งค่า Kendall's tau (τ) จะมีค่าอยู่ในช่วง (-1 ถึง 1) หากค่าเป็นบวกจะชี้ว่าตัวแปรต้นและตัวแปรตามมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่หากเป็นลบจะชี้ว่าตัวแปรต้นและตัวแปรตามมีแนวโน้มไปในทิศทางตรงข้ามกัน และหากมีค่าเป็นศูนย์ถือว่าตัวแปรต้นไม่ขึ้นกับตัวแปรตามดังกล่าว (Nuchitprasittichai และ Cremaschi, 2013)

วิธีการจัดอันดับดังกล่าวจะต้องทำการจัดอันดับตัวแปรต้นและตัวแปรตามก่อน ดังแสดง ณ ตารางที่ 2.4 จากนั้นทำการเปรียบเทียบตัวแปรต้นแถวแรกกับแถวถัดไป และเปรียบเทียบตัวแปรตามแถวแรกกับแถวถัดไป หากไปในทิศทางเดียวกันให้บันทึกเป็นค่า C หากตรงข้ามกันบันทึกในค่า D เปรียบเทียบจนแถวครบ จะสามารถคำนวณค่า Kendall's tau (τ) ได้ดังนี้

$$\tau = \frac{C-D}{(\frac{1}{2})n(n-1)} \tag{2.46}$$

เมื่อ C คือ จำนวนของกลุ่มที่เห็นพ้อง
D คือ จำนวนกลุ่มที่ไม่เห็นพ้อง
n คือ จำนวนการทดลอง

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการออกแบบการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้น X_1

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
5	5	2	8	6	3
7.5	5	2	8	6	3
10	5	2	8	6	3
12.5	5	2	8	6	3
15	5	2	8	6	3

จากตารางที่ 2.4 พบว่าค่า τ มีค่าเท่ากับ -0.33 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรต้นมีผลกระทบต่อตัวแปรตามในทิศทางตรงข้ามที่ค่อนข้างน้อย เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า -0.5

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างการจัดอันดับระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม

x	y	x จัดอันดับ	y จัดอันดับ	C	D
5	10	1	2	1	1
7	20	2	3	0	1
10	5	3	1	-	-
ผลรวม				1	2
τ				-0.33	

2.4.2 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียล (2^k Factorial design)

การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียลคือ การออกแบบการทดลองที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการออกแบบแผน หรือจำนวนการทดลองเนื่องจากสามารถศึกษาปัจจัยได้หลายปัจจัยพร้อมกัน โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ ศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย หรือเรียกว่า "อัตรกิริยา" (Interactions) เช่น กรณีที่ศึกษา 3 ปัจจัย คือ ปัจจัย A B และ C ผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ผลกระทบหลัก หรือผลกระทบจากปัจจัยเดี่ยว (Main Effects) คือ ผลกระทบกรณีที่สนใจพิจารณาเฉพาะปัจจัยเดียว ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัย A ผลกระทบของปัจจัย B และผลกระทบของปัจจัย C

2. ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Two-Factors or 2-ways Interactions) คือ ผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยพร้อมกันเป็นคู่ (ครั้งละ 2 ปัจจัย) ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัยร่วม (อันตรกิริยา) AB BC และ AC

3. ผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย (Three-Factors or 3-ways Interactions) คือ ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการพิจารณาปัจจัยสามปัจจัยพร้อมกัน ในที่นี้ได้แก่ ผลกระทบร่วม ABC

โดยทั่วไปผู้ทดลองจะให้ความสำคัญต่อการศึกษา ผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยเท่านั้น เนื่องจากผลกระทบร่วมตั้งแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไป โดยทั่วไปจะมีค่าน้อยมากจึงไม่นิยมนำมาพิจารณา จะเห็นว่าการทดลองแฟกทอเรียลสามารถศึกษาจำนวนปัจจัยได้ไม่จำกัด และยังสามารถศึกษาผลกระทบร่วมในกรณีที่สองปัจจัยใดๆ อาจจะไม่เป็นอิสระต่อกันด้วย แต่หากจำนวนตัวแปร k มากจะทำให้การทดลองยิ่งมากไปด้วยเช่นกัน (Douglas C. Montgomery, 2013)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วัตถุประสงค์หลักของการใช้การทดลองแฟกทอเรียลนั้นก็คือ การสำรวจศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย ซึ่งข้อดีของการทดลองแฟกทอเรียลคือ

1. ผู้ทดลองสามารถศึกษาผลกระทบปัจจัยหลัก และผลกระทบร่วมของปัจจัยหรืออันตรกิริยาระหว่างปัจจัยได้พร้อมกันในการทดลอง

2. กรณีที่ไม่พบผลกระทบร่วมผู้ทดลองสามารถยืนยันได้ว่าในการทดลองมีแต่ปัจจัยหลัก หรือผลกระทบหลักเท่านั้นที่มีผล เมื่อทดลองครั้งต่อไปจะสามารถลดจำนวนการทดลองลงโดยใช้วิธีการทดลองเปลี่ยนค่าปัจจัยครั้งละ 1 ปัจจัยได้

3. กรณีที่พบผลกระทบร่วมก็จะทำให้ผู้ทดลองสามารถทดาราบถึงรูปแบบและอิทธิพลของผลกระทบนั้นเพื่อจะได้แนวทางในการควบคุมให้ได้จุดที่เหมาะสม

การทดลองแบบแฟกทอเรียลที่ศึกษาเฉพาะผลกระทบหลักนั้นจำนวนวิธีปฏิบัติทั้งหมดที่เป็นไปได้ (จำนวนการทดลองโดยไม่ทำซ้ำ) มีค่าเท่ากับ a^k โดยที่ a เท่ากับจำนวนระดับของปัจจัยที่ศึกษาโดยมีระดับ 2 และ 3 (สูง ต่ำ และกลาง) k เท่ากับจำนวนปัจจัย ตารางที่ 2.6 แสดงแผนการทดลอง 2^3 แฟกทอเรียลซึ่งแสดงความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตได้ดัง รูปที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 แผนการทดลอง 2^3 แฟกทอเรียล

การทดลองที่	A	B	C
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1
4	-1	+1	+1
5	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1
7	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1

โดย +1 คือค่าสูงสุดของสภาวะนั่นและ -1 คือค่าต่ำสุดของสภาวะนั่น และ 0 คือค่ากลางของสภาวะนั่น

2.4.3 การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-behnken (Box-behnken design)

การทดลองนี้เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้มากสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ (3-level design) โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการสร้างสมการต้นแบบเมื่อปัจจัยเชิง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปริมาณ (Quantitative Factors) เช่น เวลา อุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้น เป็นต้น ลักษณะของการออกแบบวิธี Box-behnken จะใช้หลัก 2^2 การทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปผนวกกับจุดกึ่งกลาง (Central Points) รวมเข้าไป (Douglas C. Montgomery, 2013)

Box-behnken Designs มีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ 3^k แฟกทอเรียลแบบเต็มรูป โดยที่ k คือจำนวนของปัจจัย ตัวอย่างตารางสำหรับแผนการทดลองของ Box-behnken กรณีที่ปัจจัยเท่ากับ 4 ตารางที่ 2.7 เขียนในรูปแบบย่อจะจัดแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม (Blocks) แต่ละ กลุ่มประกอบด้วย 9 การทดลอง ±1 หมายถึง (- - + + และ - + - +) และตารางที่ 2.8 เป็นรูปแบบเต็มแผนการทดลอง

ตารางที่ 2.6 รูปแบบย่อ (Shorthand Notation) ของแผนการทดลอง Box-behnken (กรณี 4 ปัจจัย)

ปัจจัย			
A	B	C	D
±1	±1	0	0
0	0	±1	±1
0	0	0	0
±1	0	0	±1
0	±1	±1	0
0	0	0	0
±1	0	±1	0
0	±1	0	±1
0	0	0	0

ตารางที่ 2.7 แผนการทดลอง Box-behnken กรณี 4 ปัจจัย

การทดลองที่	**A**	**B**	**C**	**D**
1	-	-	0	0
2	-	+	0	0
3	+	-	0	0
4	+	+	0	0
5	0	0	-	-
6	0	0	-	+

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.7 แผนการทดลอง Box-behnken กรณี 4 ปัจจัย (ต่อ)

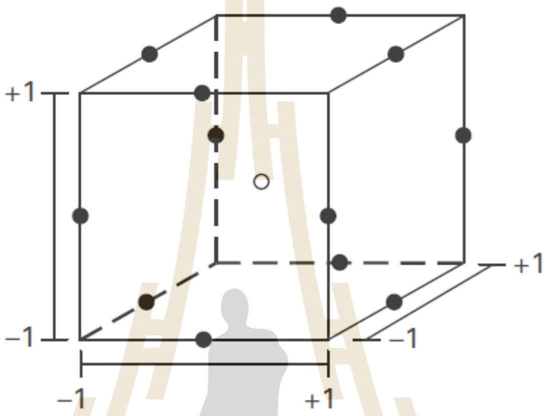
การทดลองที่	**A**	**B**	**C**	**D**
7	0	0	+	-
8	0	0	+	+
9	0	0	0	0
10	-	0	0	-
11	-	0	0	+
12	+	0	0	-
13	+	0	0	+
14	0	-	-	0
15	0	-	+	0
16	0	+	-	0
17	0	+	+	0
18	0	0	0	0
19	-	0	-	0
20	-	0	+	0
21	+	0	-	0
22	+	0	+	0
23	0	-	0	-
24	0	-	0	+
25	0	+	0	-
26	0	+	0	+
27	0	0	0	0

จะเห็นได้ว่าแผนการทดลอง Box-behnken ไม่ได้พิจารณาจุดมุม (Corner points) ซึ่งอาจจะต้องนำมาใช้พิจารณาในบางกรณี อย่างไรก็ตามผู้ทดลองบางส่วนอาจจะมองว่าแผนการทดลองนี้ไม่มีการพิจารณาจุดมุมเป็นข้อที่น่าสนใจ แต่บางกลุ่มอาจจะมองว่าเป็นข้อด้อย (Douglas C. Montgomery, 2013) รูปแบบการทดลอง Box-behnken นี้สามารถแสดงดัง รูปที่ 2.6

การออกแบบ Box-behnken มีลักษณะเกือบจะเป็นมุมฉาก จำนวนการทดลองแต่ละองค์ประกอบทำในจำนวนครั้งที่ไม่เท่ากัน โดยเฉพาะจุดกลาง ข้อดีคือมีค่าความละเอียด เท่ากับ 4 ซึ่งทำให้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น (Linear Effects) ผลกระทบในเชิงกำลังสอง (Quadratic Effects) และอันตรกิริยาหรือผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย (2-Factor Interaction) แต่มีข้อเสียคือ จำนวนครั้งที่ทดลอง (Number of Runs) มีค่ามากและไม่สามารถที่จะลดได้ไม่ว่าผู้ศึกษาจะสนใจผลกระทบเกินกว่าผลกระทบเชิงเส้นหรือไม่ (การออกแบบ Box-behnken สามารถประมาณผลกระทบในรูปโพลิโนเมียลกำลังสอง และผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยเสมอ) (Douglas C. Montgomery, 2013)



รูปที่ 2.6 รูปแบบเรขาคณิตของแผนการทดลอง Box-behnken (Douglas C. Montgomery, 2013)

2.4.4 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis)

การวิเคราะห์ที่ใช้สถิติในงานวิศวกรรมแบ่งออกเป็น 3 ระดับคือ การประมาณค่าและการพยากรณ์ (Estimation and Prediction) การเปรียบเทียบ (Comparison) และการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) ซึ่งเริ่มจากการสร้างสมการตัวแบบความสัมพันธ์ (Model Building) จากนั้นจะใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ประยุกต์เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของตัวแบบจากสมการ (Model Optimization) การวิเคราะห์การถดถอยเป็นเครื่องมือหนึ่งที่จะนำมาใช้ในระดับที่ 1 และ 3 ส่วนระดับที่ 2 นั่นจะใช้การทดสอบสมมติฐานหรือการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปัจจัย หรือตัวแปรอิสระ (Factors or Independent variables; X's) กับค่าตอบสนองหรือตัวแปรตาม (Response or Dependent variable; Y) ว่ามีความสัมพันธ์กันในลักษณะใด เพื่อประโยชน์ในทางวิศวกรรมจะนำไปใช้เพื่อการวางแผนกระบวนการผลิต ปรับปรุงกระบวนการผลิต และกำหนดค่าตัวปัจจัยเพื่อให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุด ซึ่งงานส่วนใหญ่อยู่ในส่วนของการออกแบบพารามิเตอร์ (Parameter design)

ถ้าจะเปรียบเทียบการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) กับการออกแบบการทดลอง (Experimental design) ทั้งสองวิธีสามารถวิเคราะห์ปัจจัย (ตัวแปรอิสระ) ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง (ตัวแปรตาม) ได้เช่นเดียวกัน เพียงแต่รูปแบบของผลลัพธ์การวิเคราะห์การถดถอยจะออกมาในรูปสมการการพยากรณ์ (Y = f(x)) เพื่อพยากรณ์ค่าในอนาคต ส่วนการออกแบบการทดลองผลลัพธ์ที่ได้จะทราบว่าปัจจัยหรือตัวแปรอิสระ (X's) ใดที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง (มีอิทธิพลต่อ) ค่าตอบสนองหรือลักษณะทางคุณภาพที่สนใจศึกษา จากนั้นผู้ศึกษาจะทำการกำหนดค่าที่เหมาะสมให้กับระบบ ข้อแตกต่างของวิธีการทั้งสองที่สำคัญแบ่งได้เป็นลักษณะใหญ่ๆ 2 ประการ คือ

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Collection) การวิเคราะห์การถดถอยนั้นสามารถใช้ข้อมูลจริง (ข้อมูลเดิม) ที่รวบรวมในระดับปฏิบัติการได้ (Plant Scale Data) โดยไม่ต้องแยกส่วนตัวแปรควบคุมได้ (Controllable variables) กับตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Noise variables or Uncontrollable variables) แต่สำหรับการออกแบบแผนการทดลองนั้นข้อมูลจะเป็นข้อมูลจากการทดลอง (Experimental data) ซึ่งถ้าเป็นระบบหรือกระบวนการที่ดำเนินการแล้วจะมีความยุ่งยากในการที่จะหยุดกระบวนการเพื่อทำการทดลอง และยังไม่สามารถทดลองตัวแปรกลุ่มที่สองคือ ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ด้วย ซึ่งทำให้ได้มากที่สุดคือ ตัดค่าของตัวแปรเหล่านั้นขณะทดลองจริง

2. ประเภทของข้อมูลจริง (Type of Data) ทั้งการวิเคราะห์การถดถอยและการออกแบบการทดลอง ตัวแปรตามหรือค่าตอบสนองเป็นข้อมูลต่อเนื่องหรือข้อมูงเชิงปริมาณ (Continuous variables หรือ Quantitative data) แต่สำหรับตัวแปรอิสระหรือตัวแปรปัจจัยนั้น ในการออกแบบการทดลองจะเป็นตัวแปรบ่งชี้ (Indicator variables) ส่วนการวิเคราะห์การถดถอยนั้นตัวแปรอิสระจะเป็นตัวแปรต่อเนื่อง หรือตัวแปรที่เป็นค่าวัด หรือตัวแปรบ่งชี้ก็ได้ แต่มีวิธีการแปลงจะเห็นว่าขอบเขตของการวิเคราะห์การถดถอยนั้นมักจะใช้ร่วมกับการออกแบบการทดลองเสมอ

2.4.5 วิธีการวิเคราะห์ตัวแปรด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

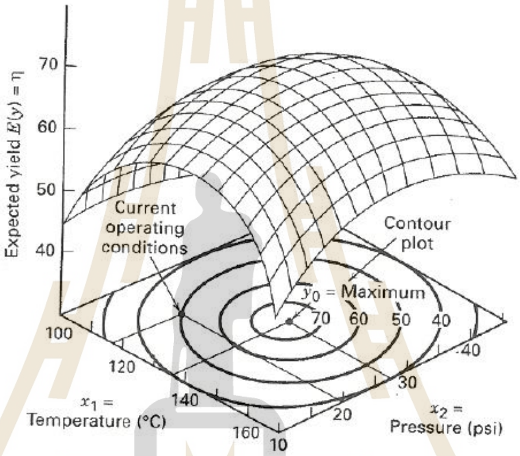
วิธีการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองใช้สำหรับการสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ปัญหาที่ผลตอบสนองเป็นฟังก์ชั่นของหลายปัจจัย โดยต้องการหาระดับของปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้ผลตอบสนองมีค่าเหมาะสมที่สุด เช่น ผลตอบสนอง y เป็นฟังก์ชั่นของปัจจัย x_1 และ x_2 จะสามารถเขียนสมการในรูปนี้

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \tag{2.47}$$

$f(x_1, x_2) = E(y)$ คือค่าคาดหวังของผลตอบสนอง (2.48)

เมื่อ ε คือ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการและมีผลกระทบต่อผลตอบสนอง

ดังนั้นพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) สำหรับระบบที่มีจำนวน 2 ปัจจัย สามารถแทนด้วย $\eta = f(x_1, x_2)$ แสดงดัง รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างพื้นผิวตอบสนองของ 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิ และความดัน โดยพล็อตระหว่าง η กับแต่ละระดับของปัจจัย x_1 และพล็อตเส้นระดับ (Contour) ของพื้นผิวตอบสนอง โดยเส้นระดับจะสอดคล้องกับระดับความสูงของพื้นผิวตอบสนอง



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างพื้นผิวตอบสนองของ 2 ปัจจัย (Douglas C. Montgomery, 2013)

เนื่องจากวิธีการนี้มักจะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองกับปัจจัยต่างๆ ดังนั้นขั้นตอนแรกในการหาพื้นผิวตอบสนองคือ การประมาณความสัมพันธ์โดยจะใช้สมการลำดับที่ 1 (First order model) ดังนี้

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \varepsilon \tag{2.49}$$

แต่ในกรณีที่พื้นผิวมีความโค้ง (Curvature) จะทำให้การประมาณโดยใช้รูปแบบของสมการลำดับที่ 2 (Second order model) ดังนี้

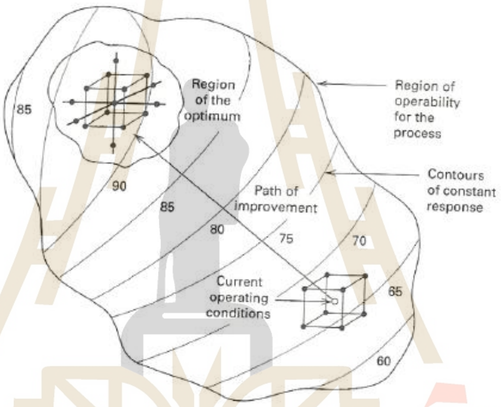
$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \tag{2.50}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อ β_0 คือ ค่าจุดตัดแกน y

β_i คือ ค่าความชันซึ่งเป็นค่าที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของ y เมื่อ x เปลี่ยนไป i

วิธีการหาพื้นผิวตอบสนองเป็นลำดับขั้นตอน (Sequential procedure) หมายถึง เมื่อสภาวะการทำงานจริงอยู่ไกลจากจุดเหมาะสมที่สุดในพื้นที่ผิวตอบสนอง ดังนั้นเพื่อความรวดเร็วในการเคลื่อนเข้าไปยังพื้นที่ที่เหมาะสมอย่างถูกต้องด้วยการใช้สมการที่มีลำดับที่สูงกว่าเข้ามาช่วยในการประมาณ และส่วนใหญ่จะใช้สมการลำดับที่ 2 ในการช่วยเนื่องจากมีความไม่ยุ่งยากมากนักแสดงดัง รูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลำดับการดำเนินงานของพื้นผิวตอบสนอง (Douglas C. Montgomery, 2013)

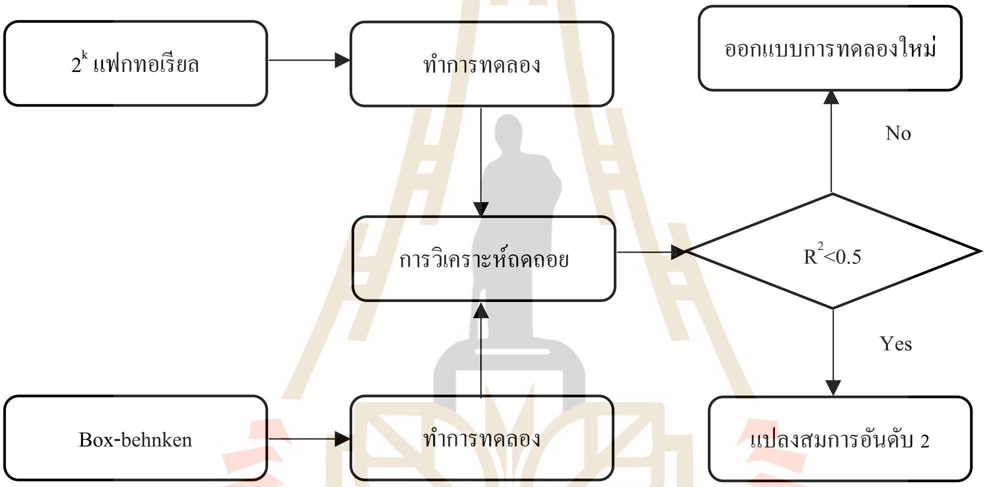
ผลการประมาณในบางปัจจัยไม่จำเป็นต้องใช้สมการลำดับที่ 2 เสมอไปจะใช้สมการลำดับที่ 2 ก็ต่อเมื่อสมการลำดับที่ 1 นั้นไม่สามารถหาผลตอบสนองได้ อย่างไรก็ดีวิธีการวิเคราะห์ตัวแปรพื้นผิวตอบสนองดังกล่าวสามารถเรียกว่าการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง (Evolutionary operation) ซึ่งได้มีการนำเสนอครั้งแรกโดย Box (1969) โดยเป็นการพัฒนากระบวนการผลิตจริงอย่างต่อเนื่องเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานจริง

วิธีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจะอาศัยการออกแบบการทดลองชนิด 2^k แฟกทอเรียลแบบจุดกึ่งกลาง (2^k Factorial design with center point) โดยจะมีการทำการทดลองปกติตามการออกแบบดังกล่าวโดยจะเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน

ผลกระทบของแต่ละปัจจัยและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยเหล่านั้นจะถูกนำมาวิเคราะห์ในขั้นตอนสุดท้ายโดยจะทำการทดสอบค่าผลกระทบหลักของปัจจัยและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยว่ามีนัยสำคัญหรือไม่ ผ่านการประมาณค่าความผิดพลาด โดยคำนวณจากข้อมูลในแต่

ละรอบด้วยวิธีกำหนดช่วงอย่างไรก็ตาม 2^k แฟกทอเรียล แบบจุดกึ่งกลางนั้นจะพบว่าจุดกึ่งกลางนั้นจะให้ผลดีที่สุด โดยการนำเสนอผลการทดสอบแต่ละจุดมาเทียบกับจุดกึ่งกลาง

หลังจากการคำนวณหลายรอบแล้วจนกระทั่งผลกระทบจากปัจจัยหรืออันตรกิริยาระหว่างปัจจัยนั้นมีผลตอบสนองตามที่ต้องการ ซึ่งจุดนั้นจะเป็นการเปลี่ยนระดับของปัจจัยเพื่อพัฒนาหาจุดที่เหมาะสมต่อไปเรื่อยๆ โดยผลนั้นจะนำมาเทียบกับข้อจำกัดความผิดพลาดพื้นฐาน (Standard error limit) หาผลกระทบหรืออันตรกิริยาระหว่างปัจจัยมีค่ามากกว่าหมายถึงปัจจัยนั้นมีผลกระทบต่อผลตอบสนองอย่างมากซึ่งมีขั้นตอนตามแผนภาพในรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นกระบวนการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองทั้งหมด



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนวิธีพื้นผิวตอบสนอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.5 ปริทัศน์วรรณกรรม

งานวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการดูดซับ CO_2 โดยส่วนใหญ่แล้วจะเน้นการดัดแปลงหรือปรับปรุงตัวดูดซับให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับ CO_2 มากขึ้นจากเดิม โดยในส่วนปริทัศน์วรรณกรรมนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักด้วยกันได้แก่ การศึกษากระบวนการดูดซับ CO_2 และการปรับปรุงตัวดูดซับเพื่อเพิ่มความเฉพาะเจาะจงในการดูดซับ CO_2 ในเบดนิ่ง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับโดยส่วนใหญ่จะนำเสนอในรูปแบบการศึกษาทั้งจลนพลศาสตร์และสมดุล รวมไปถึงการศึกษาพลศาสตร์การดูดซับ CO_2 ซึ่งมีงานวิจัยที่น่าสนใจโดยทำการสรุปข้อมูลเชิงปริมาณโดยระบุเป็นปริมาณการดูดซับ CO_2 ในรูปแบบของตารางที่ 2.8 ได้ดังนี้

ตารางที่ 2.8 ปริมาณการดูดซับ CO_2 จากกระบวนการดูดซับ CO_2 ด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ

สารดูดซับ	ประเภทการดูดซับ	ปริมาณการดูดซับ CO_2 (mg CO_2/g adsorbent)		อ้างอิง
		ตัวอย่างปกติ	ตัวอย่างดัดแปลง	
ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว	สมดุลการดูดซับ	80	-	S. Yusup และคณะ (2013)
อะลูมินากัมมันต์มีหมู่ฟังก์ชันของ Diethanolamine	การดูดซับในเบดนิ่ง	-	55.94	B. H. Hameed และ M. Auta (2014)
คาร์บอนรูพรุนขนาดกลางเติมด้วยไนโตรเจน	การดูดซับในเบดนิ่ง	-	169	B. H. Hameed และคณะ (2017)
คาร์บอนเติมด้วยไนโตรเจนเตรียมจากเรซิ่นยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์	การดูดซับในเบดนิ่ง	-	56	H. Bhunia และคณะ (2018)
ถ่านกัมมันต์ที่บรรจุด้วยเอมีน (monoethanolamine)	การดูดซับในเบดนิ่ง	18	49	S. H. Khalil และคณะ (2012)

ตารางที่ 2.8 ปริมาณการดูดซับ CO_2 จากกระบวนการดูดซับ CO_2 ด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ (ต่อ)

สารดูดซับ	ประเภทการดูดซับ	ปริมาณการดูดซับ CO_2 (mg CO_2/g adsorbent)		อ้างอิง
		ตัวอย่างปกติ	ตัวอย่างดัดแปลง	
ถ่านกัมมันต์ที่บรรจุด้วยเอมีน (2-amino-2-methyl-1-propanol)	การดูดซับในเบดนิ่ง	18	34	S. H. Khalil และคณะ (2012)
ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย KOH จากกะลาปาล์มแอฟริกา	สมดุลการดูดซับ	-	252	M. Jaroniec และคณะ (2013)
ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวดัดแปลงด้วย NaOH	การดูดซับในเบดนิ่ง	-	27.10	B. H. Hameed และคณะ (2014)
ถ่านกัมมันต์ที่บรรจุด้วย Cu ส่งเสริมโดย Zn	การดูดซับในเบดนิ่ง	-	90	T. S. Y. Choong และคณะ (2015)
ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มบรรจุด้วย Diethanolamine	การดูดซับในเบดนิ่ง	-	212	C. Phalakornkule และคณะ (2016)
ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดผลไม้มะกอกสีเหลืองกระตุ้นด้วย KOH	สมดุลการดูดซับ	-	292	C. Andrade และคณะ (2016)

จากตารางที่ 2.8 ทำให้พบว่าแต่ละงานวิจัยมีแนวคิดที่ในการปรับปรุงสารดูดซับไม่ว่าจะเป็นขั้นตอนในการเตรียมจนกระทั่งการดัดแปลงโดยนำสารชนิดต่างมาใช้งานในการดูดซับ CO_2 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าการปรับปรุงดัดแปลงสารดูดซับทำให้ปริมาณการดูดซับ CO_2 เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจะพบว่าถ่านกัมมันต์จากเมล็ดผลไม้มะกอกสีเหลืองกระตุ้นด้วย KOH ของ C. Andrade และคณะ (2016) ให้ปริมาณการดูดซับ CO_2 เท่ากับ 292 mg CO_2/g adsorbent ซึ่งเป็นปริมาณการดูดซับสูงสุดในตารางที่ 2.8 ข้อสังเกตุที่เห็นได้ชัดจากตารางที่ 2.8 การดูดซับที่สมดุลการดูดซับจะให้

ปริมาณการดูดซับสูงกว่าการดูดซับในเบดนิ่ง เนื่องจากเป็นการดูดซับที่ใช้เวลามากกว่าการดูดซับเบดนิ่งและในแต่ละงานวิจัยมีสภาวะการทดลองที่แตกต่างกันออกไปในการทำการทดลอง

นอกเหนือจากการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณการดูดซับแล้วมีงานวิจัยของ E. A. Kumar และคณะในปี 2014 ได้ศึกษาการดูดซับ CO_2 ด้วยถ่านกัมมันต์ โดยทำการศึกษาอัตราการดูดซับของแก๊สบนถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางตัวเลข โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หนึ่งมิติมาจากพื้นฐานทฤษฎีการเติมของรูพรุนขนาดเล็กของ Dubinin (Dubinin's Theory of Volume Filling of Micropores) และวิเคราะห์พร้อมกับการถ่ายโอนความร้อนไม่คงที่ และการวิเคราะห์ตัวแปรเพื่อนำมาศึกษาผลการทบของตัวแปรต่ออัตราการดูดซับโดยตัวแปรดังกล่าวประกอบด้วย รัศมีของเบด อุณหภูมิของของไหล อุณหภูมิของเบดเริ่มต้น และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนต่อจำนวนการดูดซับ จากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. แบบจำลองการดูดซับสำหรับถ่านกัมมันติอธิบายได้ดีโดยใช้ทฤษฎีการเติมของรูพรุนขนาดเล็กของ Dubinin
2. รัศมีของเบดต่ำแสดงให้เห็นถึงต้องการให้เวลาที่ใช้น้อยที่สุดเพื่อให้ถึงการดูดถึงจุดอิ่มตัวได้รวดเร็ว โดยใช้เส้นผ่าศูนย์กลางของเบดกับ 30 cm
3. สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูงทำให้เกิดการดูดซับอย่างรวดเร็วรวมทั้งปริมาณการดูดซับ CO_2 สูง แต่ที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเท่ากับ 100 $Wm^{-2}K^{-1}$ ขึ้นไปให้ค่าปริมาณการดูดซับเท่ากัน โดยเลือกที่ค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 150 $Wm^{-2}K^{-1}$
4. อุณหภูมิของของไหลต่ำทำให้เกิดการดูดซับที่รวดเร็ว โดยเลือกใช้ค่าเท่ากับ 10°C
5. เมื่ออุณหภูมิของเบดเริ่มต้นสูงทำให้ปริมาณการดูดซับ CO_2 เกิดขึ้นได้ดีที่สภาวะคงที่

W. Djeridi และคณะในปี 2016 ทำการศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติพื้นผิวและไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับ CO_2 โดยในการศึกษาครั้งนี้ใช้ถ่านกัมมันต์จากมะกอก และวัดค่าคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ การวัดไอโซเทิร์มการดูดซับ N_2 ใช้เครื่องเครื่อง scanning eletron microscopy (SEM) The powder X-ray diffraction (PXRD) และ Transmission electron microscopy (TEM) และเอนโทรปีการดูดซับสามารถหาได้จาก Microcalorimetry สำหรับการทดสอบการดูดซับ CO_2 ที่อุณหภูมิ 303 K ช่วงความดัน 0 ถึง 2.3 MPa เพื่อทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อพื้นผิว ค่าความนำไฟฟ้า และปริมาณการดูดซับของแก๊ส ซึ่งผลของค่าความนำไฟฟ้าจะมีความแข็งแรงที่พื้นที่รูพรุนขนาดเล็ก หรือกล่าวได้ว่าค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดรูพรุนเล็กลงซึ่งมีผลต่อการดูดซับ CO_2 เช่นเดียวกับการเพิ่มอุณหภูมิทำให้อิเล็กตรอนอิสระที่พื้นผิวเพิ่มขึ้นส่งผลต่อแรงกระทำกระหว่างโมเลกุลของแก๊ส

ในปี 2008 Mohamed K. Aroua และคณะ ศึกษาการดูดซับ CO_2 O_2 N_2 และ CH_4 บนตะกร้าโมเลกุลคาร์บอน (Carbon Molecular Basket, CMB) จากการบรรจุ Polyethyleneimine บนถ่านกัม

มันต์จากเปลือกปาล์ม โดยการศึกษาการดูดซับจากผลกระทบของจำนวนของ Polyethyleneimine ในถ่านกัมมันต์เป็นหน่วยเปอร์เซนโดยน้ำหนัก 0.06 0.11 0.13 0.26 0.27 และ 0.28 wt% จากผลการทดลองการดูดซับ CO_2 O_2 N_2 และ CH_4 พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของ Polyethyleneimine จาก 0 – 0.26 wt% ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นแต่เมื่อความเข้มข้นเท่ากับ 0.28 และ 0.29 wt% ทำให้ปริมาณการดูดซับลดลง ซึ่งปริมาณการดูดซับสูงสุดอยู่ที่ความเข้มข้นของ Polyethyleneimine ที่ 0.26 wt% PEI/AC และปริมาณการดูดซับสูงสุดเรียงตามแก๊สดังนี้ $CO_2 >> CH_4 > O_2 > N_2$ สำหรับการตัวอย่าง CMB ทุกตัวอย่าง

A. Erhan Aksoylu และ Burcu Selen Caglayan ในปี 2013 ได้ศึกษาการดูดซับ CO_2 จากการปรับปรุงทางเคมีของถ่านกัมมันต์ ประกอบด้วย ออกซิเดชั่นด้วย HNO_3 ออกซิเดชั่นด้วยอากาศ การบรรจุด้วยสารละลายด่าง และการบำบัดด้วยความร้อนภายใต้สภาวะแก๊สฮีเลี่ยม โดยได้ทำการศึกษาหมู่ฟังก์ชั่นของตัวอย่างด้วยเครื่อง Diffuse reflectance infrared Fourier transform spectrometer (DRIFTS.) และปริมาณการดูดซับ CO_2 ด้วยเครื่อง gravimetric analyses ที่อุณหภูมิระหว่าง 25-200 ^{o}C จากผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชั่นของตัวอย่างพบว่า มีการสร้าง หมู่กรดคาร์บอซิลิกในตัวอย่างถ่านกันมันต์ที่ออกซิเดชั่นด้วย HNO_3 และการเพิ่มขึ้นของ อโลมาติกและการจัดเรียงของอนุภาค Na โดยพบในถ่านกัมมันต์ที่ออกซิเดชั่นด้วย HNO_3 และบรรจุ Na_2CO_3 สำหรับการศึกษาปริมาณการดูดซับ CO_2 พบว่าตัวอย่างการเตรียมด้วยการออกซิเดชั่นด้วยอากาศและบรรจุ Na_2CO_3 พบว่าน้ำหนักดูดซับที่ 20 bars เท่ากับ 8 folds และที่ 1 bars เท่ากับ 15 folds และตัวอย่างการเตรียมด้วยการออกซิเดชั่นด้วย HNO_3 และบรรจุ Na_2CO_3 พบว่าน้ำหนักดูดซับที่ 20 bars เท่ากับ 7.7 folds และที่ 1 bars เท่ากับ 17 folds และสำหรับตัวอย่างที่ไม่ได้บรรจุ Na_2CO_3 อาจจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการบำบัดด้วยแก๊สฮีเลี่ยม โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเกิดจากการสลายตัวของกลุ่มออกซิเจน การบรรจุ Na_2CO_3 เป็นการสร้างอนุภาค Na บนพื้นผิวสำหรับการดูดซับ CO_2

เช่นเดียวกันในปี 2013 Young-Min Jo และคณะ ทำการรวบรวมการบำรุงและปรับปรุงถ่านกัมมันต์เพื่อเพิ่มความเฉพาะเจาะจงในการดูดซับ CO_2 โดยพวกเขาได้ทำการรวบรวมการใช้สารเคมี 3 ชนิดด้วยกันได้แก่ กรดไนตริก (HN) แคลเซียมไนเตต (CaN) และแคลเซียมเอทาโนเอต (CaEt) เพื่อทำการเพิ่มความเฉพาะเจาะจงในการดูดซับ CO_2 ด้วยถ่านกัมมันต์ สำหรับการบัดเบื้องต้นแบบแห้งแสดงให้เห็นว่าปริมาณการดูดซับ CO_2 ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวมากกว่าถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน และการบำบัดแบบเปียกสำหรับตัวอย่างถ่านกัมมันต์จากกะลาที่ดัดแปลงแสดงถึงการลดลงของประสิทธิภาพการดูดซับ CO_2 ลดลง สำหรับการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเครื่อง X-ray photoelectron spectroscopy ยืนยันว่าพบแคลเซียมและเอมีนในตัวอย่างถ่านกัมมันต์ (A-CaN) การทดลองการดูดซับ CO_2 แต่ละชนิดพบว่าตัวอย่าง C-CaEt ให้ปริมาณการดูดซับ CO_2 สูงสุด สำหรับค่าความชันและค่าความเป็นเส้นตรงของการคายซับแบบ isobaric ถูกนำมาประเมินหาค่า

สัดส่วนการดูดซับ CO_2 และความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวตัวดูดซับ ซึ่งการศึกษาครั้งนี้พบว่าการบรรจุเป็นการเพิ่มความเฉพาะเจาะจงในการดูดซับ CO_2 ได้มาก

Navadol Laosiripojana และคณะ ในปี 2014 ได้ศึกษาผลกระทบของความชื้น O_2 และ CO_2 สำหรับการดูดซับ H_2S ด้วยถ่านกัมมันต์ที่บรรจุด้วย KOH โดยถ่านกัมมันต์ดังกล่าวเตรียมจากถ่านกัมมันต์ที่คุณภาพต่ำถูกพัฒนาให้ดีขึ้นด้วยการกระตุ้นด้วยไอน้ำเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิว จากนั้นนำมาบรรจุด้วย KOH เพื่อเพิ่มความเฉพาะเจาะจงในการดูดซับ H_2S สำหรับการทดลองการดูดซับ H_2S ด้วยตัวอย่างดังกล่าวที่อุณหภูมิห้องภายใต้สภาวะที่เปลี่ยนไปตามที่กำหนดซึ่งจากการทดลองพบว่าปริมาณการดูดซับและเวลาเบรกทรูมีค่ามากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่บรรจุ KOH ที่สำคัญเมื่อเพิ่ม O_2 ในแก๊สผสมทำให้เพิ่มเวลาเบรกทรูของการดูดซับ H_2S ขณะที่การเพิ่มความชื้นทำให้ปริมาณการดูดซับ H_2S เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนซึ่งสรุปได้ว่าผลกระทบของการเพิ่มทั้ง O_2 และความชื้นมีแนวโน้มไปในทิศทางที่ดีขึ้นแต่ในทางกลับกันการเพิ่ม CO_2 เป็นการขัดขวางการดูดซับ H_2S เนื่องจาก CO_2 และ H_2S มีผลกระทบในการบรรจุ KOH เนื่องจากทั้งสองแก๊สเป็นกรดแก๊สดังนั้นการเพิ่ม KOH เป็นการเพิ่มความเฉพาะเจาะจงในการดูดซับทั้งสองแก๊สจึงทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับ H_2S ลดลงนั้นเอง แต่ทั้งนี้การศึกษาผลกระทบจาก O_2 ความชื้น และ CO_2 พร้อมกันเป็นการลดจุดด้อยของผลกระทบในเชิงลบได้ ซึ่งจุดสำคัญของงานนี้เป็นการเพิ่ม O_2 และความชื้นเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ

จากวรรณกรรมที่กล่าวมาทั้งหมดจะพบว่าถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพและมีความยืดหยุ่นในการใช้งานซึ่งในงานวิทยานิพนธ์ได้มีแนวคิดที่จะนำถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวมาใช้งานเนื่องจากกะลามะพร้าวเป็นชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ซึ่งมีราคาถูกและหาง่ายในประเทศไทย ต่อมาจะนำถ่านกัมมันต์ดังกล่าวมาเพิ่มความเฉพาะเจาะจงในการดูดซับ CO_2 ด้วย NaOH เนื่องจากวรรณกรรมที่กล่าวมาทั้งหมดส่วนมากแล้วจะใช้สารเคมีประเภทเอมีนเป็นส่วนมากซึ่งเมื่อเทียบราคาของเอมีนกับ NaOH พบว่าเอมีนมีราคาที่ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามวัตถุประสงค์หลักในการงานวิทยานิพนธ์ต้องการตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับ CO_2 จากแก๊สผสม โดยที่ตัวดูดซับสามารถผลิตได้ราคาไม่สูงมากเหมาะแก่การลงทุนในระดับอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
ระเบียบวิธีวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัยประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักได้แก่ การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการแช่ NaOH การทดลองการดูดซับ CO_2 และการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยแบบจำลองและวิธีทางสถิติ

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุ

1. ถ่านกัมมันต์ทางการค้าจากกะลามะพร้าวโดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1.25 mm จำนวน 3 ตัวอย่างที่มีพื้นที่ผิวภายในแตกต่างกัน โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ซี ไจแกนติก คาร์บอน จำกัด จังหวัดนครราชสีมา
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ AR เกรด ซื้อจากบริษัท Carlo Ebra Reagent ประเทศอิตาลี
3. แก๊สไนโตรเจน HP เกรด และ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ HP เกรด ซื้อจากบริษัท ลินเด้ ประเทศไทย

3.1.2 อุปกรณ์

1. คอลัมน์การดูดซับมีลักษณะเป็นท่อ 2 ชั้น โดยชั้นภายในเป็นท่อแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 cm ยาว 60 cm และท่อชั้นนอกทำจากอะคิลิคการควบคุมอุณหภูมิการดูดซับทำโดยหมุนเวียนน้ำจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิให้ไหลผ่านช่องว่างระหว่างท่อในและท่อตัวนอก รูปที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
2. เครื่องวิเคราะห์แก๊สยี่ห้อ Geotech รุ่น BIOGAS 5000 ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ซีไจแกนติก คาร์บอน จำกัด
3. เครื่องวัดพื้นผิว ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP 2010

3.2 ขั้นตอนการทดลองงานวิจัย

3.2.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์ที่บรรจุด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

บรรจุถ่านกัมมันต์จำนวน 50 g ลงในบีกเกอร์ขนาด 500 mL จากนั้นนำสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นในช่วง 3-15% w/w ปริมาตร 180 mL ผสมกับถ่านกัมมันต์ ดังรูปที่ 3.2 ผนึกบีกเกอร์ด้วยแผ่นพาราฟิน แล้วนำบีกเกอร์ไปเขย่าในเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วรอบ 180

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บีกเกอร์ด้วยแผ่นพาราฟิน แล้วนำบีกเกอร์ไปเขย่าในเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วรอบ 180 rpm เป็นเวลา 90 min หลังจากนั้นนำบีกเกอร์เข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 48 hr เพื่อระเหยน้ำออกจะได้ถ่านกัมมันต์ที่บรรจุ NaOH ที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังรูปที่ 3.3

3.2.2 การวัดสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์

สมบัติโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์หาได้จากการวัดไอโซเทิร์มการดูดซับของ N_2 ที่อุณหภูมิ 77 K ด้วยเครื่อง Accelerated Surface Area Analyzer โดยเริ่มแรกต้องทำการให้ความร้อนกับตัวอย่างเพื่อไล่สิ่งเจือปนออกจากตัวอย่างที่อุณหภูมิ 300 °C ภายใต้สภาวะสุญญากาศ (<50 μm Hg) เป็นเวลา 12 hr หลังจากนั้นเปลี่ยนหลอดใส่ตัวอย่างไปอีกข้างเพื่อทำการทดลองการดูดซับ N_2 ที่ 77 K ไอโซเทิร์มที่ได้จะสามารถหาค่าพื้นที่ผิวภายในของตัวอย่างได้ด้วยการคำนวณจากสมการที่ 2.41 สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) ปริมาตรรูพรุนสามารถคำนวณจากปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพันธ์เท่ากับ 0.98 แล้วแปลงตัวเลขนี้เป็นปริมาตรของไนโตรเจนในวัฏภาคของเหลว และปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กสามารถคำนวณจากสมการที่ 2.46 เมื่อคำนวณปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กได้จะนำไปสู่การคำนวณพื้นที่ผิวรูพรุนขนาดเล็ก

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดูดซับ CO_2

3.2.3 การทดลองการดูดซับ CO_2 ในเบดนิ่งจากแก๊สผสม

การทดลองจะเริ่มจากการหาสภาวะพื้นฐานของการทดลองก่อน และเริ่มทำการทดลองตามสภาวะในตารางที่ 3.2-3.9 โดยขั้นตอนในการเริ่มทำการทดลองมีดังนี้

1. ติดตั้งคอลัมน์และท่อแก๊สต่างๆดังรูปที่ 3.1 จากนั้นเปิดแก๊สไนโตรเจนผ่านเข้าคอลัมน์ในอัตราคงที่ (150ml/min) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อไล่แก๊สที่อาจตกค้างอยู่ในคอลัมน์ออก

2. ปรับอัตราการไหลของแก๊ส N_2 และ CO_2 ให้เป็นไปตามสภาวะที่กำหนดไว้ข้างต้นคือ ใช้ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า ทำการวัดองค์ประกอบของแก๊สผสมด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สเพื่อยืนยันความเข้มข้นจริงของแก๊สผสมที่ป้อนเข้าคอลัมน์ดูดซับ

รูปที่ 3.2 การเติมสารละลาย NaOH ผสมกับถ่านกัมมันต์

รูปที่ 3.3 ถ่านกัมมันต์ที่บรรจุ NaOH หลังจากเข้าเตาอบ 48 hr

3. ชั่งถ่านกัมมันต์ตามแต่ละสภาวะการทดลอง โดยถ่านกัมมันต์ตัวอย่างจะอยู่ที่เตาอบ (110 °C) ตลอดเวลาจนกว่าจะบรรจุลงคอลัมน์

4. เทถ่านลงคอลัมน์จากด้านบนของคอลัมน์และเคาะเบาๆ ที่ตัวคอลัมน์ประมาณ 5 ครั้ง เพื่อให้อนุภาคถ่านจัดเรียงตัวให้อยู่ในสภาวะเสถียร

5. ต่อท่อแก๊สรวมเข้าที่ด้านล่างของคอลัมน์พร้อมกับจับเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลา พร้อมกับวัดความเข้มข้นขาออกของแก๊ส CO_2 ทุกๆ 30 s จนกระทั่งความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 คงที่ 5 จุดขึ้นไปจึงหยุดการทดลองนั้น

6. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 1-5 จนครบตามจำนวนการทดลองกำหนดไว้

3.2.4 การวางแผนและการออกแบบการทดลอง

แผนการทำการทดลองและการออกแบบการทดลอง จะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักได้แก่ การออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะเริ่มต้น การออกแบบการทดลองความอ่อนไหวของตัวแปร (Sensitivity experiments) และการออกแบบการทดลองด้วยแฟคทอเรียล (2^k factorial) และ Box-behnken

3.2.4.1 การออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะเริ่มต้น

สำหรับการทดลองเพื่อหาสภาวะเริ่มต้น โดยตัวแปรการทดลองมีทั้งหมด 6 ตัวแปร ประกอบด้วย ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า ความเร็วของแก๊สผสม อุณหภูมิการดูดซับ จำนวนถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์สำหรับสภาวะการทดลองที่ศึกษาเป็นไปตามดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สภาวะการทดลอง ตัวแปรในการทดลอง และตัวแปรคงที่ในการทดลอง

ตัวแปรการทดลอง	ค่าของตัวแปร
ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (%wt)	0-15
ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า (%vol)	6-18
ความเร็วของแก๊สผสม (m/min)	1.58-3.03
อุณหภูมิการดูดซับ (^{o}C)	17.5-52.5
ปริมาณของถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ (g)	5-15
พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (m^2/g)	766-1052
ความพรุนของเบด (-)	0.54
ความหนาแน่นของอนุภาค (g/cm^3)	2.02

3.2.4.2 การออกแบบการทดลองความอ่อนไหวของตัวแปร

จากตารางที่ 2.4 เป็นตัวอย่างการออกแบบการทดลองความอ่อนไหวของตัวแปร ดังนั้นจากสภาวะการทดลองตารางที่ 3.1 สามารถแสดงเป็นการทดลองความอ่อนไหวได้ดังตารางที่ 3.2 - 3.7 ดังนี้

ตารางที่ 3.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH

ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (%wt)	ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า (%vol)	ความเร็วแก๊สผสม (m/min)	อุณหภูมิการดูดซับ ($^{\circ}C$)	ปริมาณของถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ (g)	พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (m^2/g)
0	12	1.98	35	10	978
2					
3					
5					
7.5					
10					
15					

ตารางที่ 3.3 ผลของความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า

ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า (%vol)	ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (%wt)	ความเร็วแก๊สผสม (m/min)	อุณหภูมิการดูดซับ ($^{\circ}C$)	ปริมาณของถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ (g)	พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (m^2/g)
6	10	1.98	35	10	978
9					
12					
15					
18					

ตารางที่ 3.4 ผลของความเร็วแก๊สผสม

ความเร็วแก๊สผสม (m/min)	ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (%wt)	ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า (%vol)	อุณหภูมิการดูดซับ (°C)	ปริมาณของถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ (g)	พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (m^2/g)
1.58	10	12	35	10	978
1.98					
3.03					

ตารางที่ 3.5 ผลของอุณหภูมิการดูดซับ

อุณหภูมิการดูดซับ (°C)	ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (%wt)	ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า (%vol)	ความเร็วแก๊สผสม (m/min)	ปริมาณของถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ (g)	พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (m^2/g)
17.5	10	12	1.98	10	978
26.8					
35					
43.8					
52.5					

ตารางที่ 3.6 ผลของปริมาณของถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์

ปริมาณของถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ (g)	ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (%wt)	ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า (%vol)	ความเร็วแก๊สผสม (m/min)	อุณหภูมิการดูดซับ (°C)	พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (m^2/g)
5	10	12	1.98	35	978
7.5					
10					
12.5					
15					

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.7 ผลของพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (m^2/g)	ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (%wt)	ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า (%vol)	ความเร็วแก๊สผสม (m/min)	อุณหภูมิการดูดซับ (°C)	ปริมาณของถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ (g)
766	10	12	1.98	35	10
978					
1052					

3.2.4.3 การออกแบบการทดลองด้วยแฟกทอเรียล และ Box-behnken

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเป็นการออกแบบเพื่อหาค่าตัวแปรตามที่สภาวะสูงสุดและต่ำสุด และสำหรับการออกแบบการทดลอง Box-behnken เป็นการออกแบบเพื่อหาค่าตัวแปรตามที่สภาวะกึ่งกลาง โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล หรือ 2^k แฟคทอเรียลแบบเต็มรูป มีจำนวนการทดลองเท่ากับ 64 การทดลอง สำหรับ 6 ตัวแปร ดังตารางที่ 3.8 และการออกแบบการทดลอง Box-behnken มีจำนวนการทดลองเท่ากับ 61 การทดลอง ดังตารางที่ 3.9 โดยรวมทั้งสองการทดลองเท่ากับ 125 การทดลอง

ตารางที่ 3.8 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล

การทดลอง	ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (%wt)	ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า (%vol)	ความเร็วแก๊สผสม (m/min)	อุณหภูมิการดูดซับ (°C)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ (g)	พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (m^2/g)
1	15	18	3.03	52.5	15	1052
2	0	18	3.03	52.5	15	1052
3	15	6	3.03	52.5	15	1052
4	0	6	3.03	52.5	15	1052
5	15	18	1.58	52.5	15	1052
6	0	18	1.58	52.5	15	1052
7	15	6	1.58	52.5	15	1052

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.8 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (ต่อ)

การทดลอง	ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (%wt)	ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า (%vol)	ความเร็วแก๊สผสม (m/min)	อุณหภูมิการดูดซับ (°C)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ (g)	พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (m^2/g)
8	0	6	1.58	52.5	15	1052
9	15	18	3.03	17.5	15	1052
10	0	18	3.03	17.5	15	1052
11	15	6	3.03	17.5	15	1052
12	0	6	3.03	17.5	15	1052
13	15	18	1.58	17.5	15	1052
14	0	18	1.58	17.5	15	1052
15	15	6	1.58	17.5	15	1052
16	0	6	1.58	17.5	15	1052
17	15	18	3.03	52.5	5	1052
18	0	18	3.03	52.5	5	1052
19	15	6	3.03	52.5	5	1052
20	0	6	3.03	52.5	5	1052
21	15	18	1.58	52.5	5	1052
22	0	18	1.58	52.5	5	1052
23	15	6	1.58	52.5	5	1052
24	0	6	1.58	52.5	5	1052
25	15	18	3.03	17.5	5	1052
26	0	18	3.03	17.5	5	1052
27	15	6	3.03	17.5	5	1052
28	0	6	3.03	17.5	5	1052
29	15	18	1.58	17.5	5	1052
30	0	18	1.58	17.5	5	1052
31	15	6	1.58	17.5	5	1052

ตารางที่ 3.8 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (ต่อ)

การทดลอง	ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (%wt)	ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า (%vol)	ความเร็วแก๊สผสม (m/min)	อุณหภูมิการดูดซับ (°C)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ (g)	พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (m^2/g)
32	0	6	1.58	17.5	5	1052
33	15	18	3.03	52.5	15	766
34	0	18	3.03	52.5	15	766
35	15	6	3.03	52.5	15	766
36	0	6	3.03	52.5	15	766
37	15	18	1.58	52.5	15	766
38	0	18	1.58	52.5	15	766
39	15	6	1.58	52.5	15	766
40	0	6	1.58	52.5	15	766
41	15	18	3.03	17.5	15	766
42	0	18	3.03	17.5	15	766
43	15	6	3.03	17.5	15	766
44	0	6	3.03	17.5	15	766
45	15	18	1.58	17.5	15	766
46	0	18	1.58	17.5	15	766
47	15	6	1.58	17.5	15	766
48	0	6	1.58	17.5	15	766
49	15	18	3.03	52.5	5	766
50	0	18	3.03	52.5	5	766
51	15	6	3.03	52.5	5	766
52	0	6	3.03	52.5	5	766
53	15	18	1.58	52.5	5	766
54	0	18	1.58	52.5	5	766
55	15	6	1.58	52.5	5	766

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.8 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (ต่อ)

การทดลอง	ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (%wt)	ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า (%vol)	ความเร็วแก๊สผสม (m/min)	อุณหภูมิการดูดซับ ($^{\circ}C$)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ (g)	พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (m^2/g)
56	0	6	1.58	52.5	5	766
57	15	18	3.03	17.5	5	766
58	0	18	3.03	17.5	5	766
59	15	6	3.03	17.5	5	766
60	0	6	3.03	17.5	5	766
61	15	18	1.58	17.5	5	766
62	0	18	1.58	17.5	5	766
63	15	6	1.58	17.5	5	766
64	0	6	1.58	17.5	5	766

ตารางที่ 3.9 การออกแบบการทดลอง Box-behnken

การทดลอง	ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (%wt)	ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า (%vol)	ความเร็วแก๊สผสม (m/min)	อุณหภูมิการดูดซับ ($^{\circ}C$)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ (g)	พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (m^2/g)
1	0	6	1.98	35	10	978
2	0	18	1.98	35	10	978
3	0	12	1.58	35	10	978
4	0	12	3.03	35	10	978
5	0	12	1.98	17.5	10	978
6	0	12	1.98	52.5	10	978
7	0	12	1.98	35	5	978
8	0	12	1.98	35	15	978

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.9 การออกแบบการทดลอง Box-behnken (ต่อ)

การทดลอง	ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (%wt)	ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า (%vol)	ความเร็วแก๊สผสม (m/min)	อุณหภูมิการดูดซับ ($^{\circ}C$)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ (g)	พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (m^2/g)
9	0	12	1.98	35	10	766
10	0	12	1.98	35	10	1052
11	10	6	1.98	35	10	978
12	10	6	1.98	35	10	978
13	10	6	1.98	17.5	10	978
14	10	6	1.98	52.5	10	978
15	10	6	1.98	35	5	978
16	10	6	1.98	35	15	978
17	10	6	1.98	35	10	766
18	10	6	1.98	35	10	1052
19	10	12	1.58	17.5	10	978
20	10	12	1.58	52.5	10	978
21	10	12	1.58	35	5	978
22	10	12	1.58	35	15	978
23	10	12	1.58	35	10	766
24	10	12	1.58	35	10	1052
25	10	12	1.98	17.5	5	978
26	10	12	1.98	17.5	15	978
27	10	12	1.98	17.5	10	766
28	10	12	1.98	17.5	10	1052
29	10	12	1.98	35	5	766
30	10	12	1.98	35	5	1052
31	10	12	1.98	35	10	978
32	10	12	1.98	35	15	766

ตารางที่ 3.9 การออกแบบการทดลอง Box-behnken (ต่อ)

การทดลอง	ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (%wt)	ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า (%vol)	ความเร็วแก๊สผสม (m/min)	อุณหภูมิการดูดซับ (°C)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ (g)	พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (m^2/g)
33	10	12	1.98	35	15	1052
34	10	12	1.98	52.5	15	978
35	10	12	1.98	52.5	5	978
36	10	12	1.98	52.5	10	1052
37	10	12	1.98	52.5	10	755
38	10	12	3.03	52.5	10	978
39	10	12	3.03	17.5	10	978
40	10	12	3.03	35	15	978
41	10	12	3.03	35	5	978
42	10	12	3.03	35	10	1052
43	10	12	3.03	35	10	755
44	10	18	3.03	35	10	978
45	10	18	1.58	35	10	978
46	10	18	1.98	52.5	10	978
47	10	18	1.98	17.5	10	978
48	10	18	1.98	35	15	978
49	10	18	1.98	35	5	978
50	10	18	1.98	35	10	1052
51	10	18	1.98	35	10	755
52	15	18	1.98	35	10	978
53	15	6	1.98	35	10	978
54	15	12	3.03	35	10	978
55	15	12	1.58	35	10	978
56	15	12	1.98	52.5	10	978

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

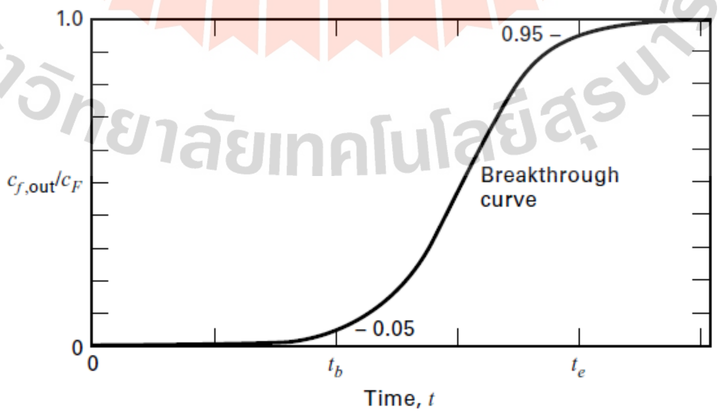
ตารางที่ 3.9 การออกแบบการทดลอง Box-behnken (ต่อ)

การทดลอง	ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (%wt)	ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า (%vol)	ความเร็วแก๊สผสม (m/min)	อุณหภูมิการดูดซับ (°C)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ (g)	พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (m^2/g)
57	15	12	1.98	17.5	10	978
58	15	12	1.98	35	15	978
59	15	12	1.98	35	5	978
60	15	12	1.98	35	10	1052
61	15	12	1.98	35	10	755

3.3 การวิเคราะห์ผลศาสตร์การดูดซับ CO_2 (กราฟเบรกทรู)

3.3.1 การวิเคราะห์ผลจากกราฟเบรกทรู

ข้อมูลเบรกทรูที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาสร้างกราฟเบรกทรูซึ่งเป็นกราฟที่พล็อตระหว่าง C/C_0 เทียบกับเวลา (ตัวอย่างในรูปที่ 3.4) ช่วยให้สามารถคำนวณตัวแปรต่างๆ เพื่อประเมินประสิทธิภาพการดูดซับ ได้แก่ เวลาเบรกทรู (t_B) ซึ่งเป็นเวลาที่ให้ค่า $C/C_0 = 0.05$ ปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรู (q_B) และปริมาณการดูดซับที่เวลาสมดุล (q_E) โดยใช้สมการที่ 2.47 และ 2.48 ตามลำดับ และการความยาวช่วงการถ่ายโอนมวล (L_{MTZ}) โดยใช้สมการที่ 2.51



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างกราฟเบรกทรู

3.3.2 การอธิบายกราฟเบรกทรูด้วยแบบจำลอง

3.3.2.1 แบบจำลองคลินเคนเบิร์ก (Klinkenberg model)

แบบจำลองคลินเคนเบิร์ก (สมการที่ 2.56) ซึ่งพัฒนามาจากสมมุติฐานของการดูดซับแบบไอโซเทิร์มเส้นตรงถูกนำมาทดสอบกับข้อมูลกราฟเบรกทรูจากการทดลอง โดยวิธีวิเคราะห์เชิงถดถอย (Regression analysis) เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของสมการแบบจำลอง (k_p และ K) ที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เฉลี่ยในรูพรุนจากสมการดังนี้ (Wakao and Funazkri, 1978)

$$\frac{1}{k_p K} = \frac{R_p}{3k_C} + \frac{R_p^2}{15D_e} \qquad (3.1)$$

เมื่อ k_p คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในอนุภาค

K คือ ค่าคงที่เฮนรีของไอโซเทิร์มเส้นตรง

k_C คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลภายนอก

D_e คือ สัมประสิทธิ์การแพร่เฉลี่ยภายในรูพรุน

R_p คือ รัศมีของอนุภาค

$$N_{sh} = \frac{k_C D_p}{D_i} = 2 + 1.1\left(\frac{D_p G}{\mu}\right)^{0.6}\left(\frac{\mu}{\rho D_i}\right)^{1/3} \qquad (3.2)$$

เมื่อ D_p คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค

D_i คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบ i

G คือ ความเร็วมวล

μ คือ ความหนืด

ρ คือ ความหนาแน่น

3.3.2.2 แบบจำลองโทมัส (Thomas model)

แบบจำลองโทมัส (สมการที่ 2.64) ซึ่งพัฒนามาจากสมมุติฐานของการดูดซับแบบไอโซเทิร์มแลงค์มัวร์ถูกนำมาทดสอบกับข้อมูลกราฟเบรกทรูจากการทดลอง โดยวิธีวิเคราะห์เชิงถดถอย (Regression analysis) เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของสมการแบบจำลอง (k_t) ที่เหมาะสมที่สุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3.3 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)

วิธีการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองเริ่มจากการเก็บข้อมูลการทดลองด้วยการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลและการออกแบบการทดลอง Box-behnken จากนั้นวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์เชิงถดถอยอันดับแรก (1st order regression analysis) หากค่า R^2 มีค่าค่อนข้างต่ำ จะต้องเปลี่ยนเป็นการวิเคราะห์เชิงถดถอยอันดับสอง (2nd order regression analysis) จะได้สมการในการอธิบายผลกระทบระหว่างตัวแปรต้นกับตัวแปรตาม ต่อมาทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าปริมาณการดูดซับมีค่าสูงสุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลจะแบ่งออกแบบเป็น 7 ส่วน ได้แก่ สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ กราฟเบรกทรู เวลาเบรกทรูและความจุการดูดซับ การทดสอบสมการกราฟเบรกทรู ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร ผลการวิเคราะห์โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง และการคำนวณการขยายขนาดเครื่องดูดซับ

4.1 สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์

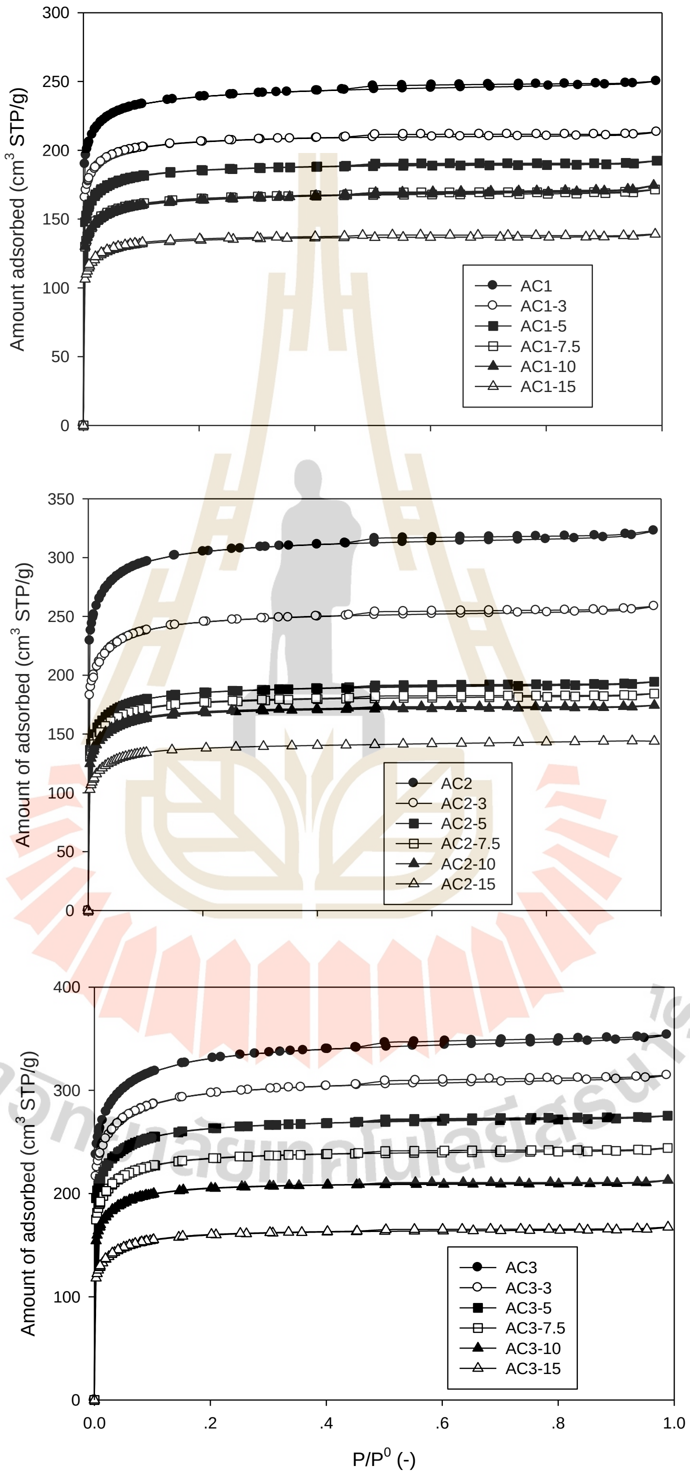
รูปที่ 4.1 แสดงไอโซเทิร์มการดูดซับของไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K โดยไอโซเทิร์มทั้งหมดแสดงลักษณะไอโซเทิร์มแบบที่ 1 (Type I Isotherm) ตามจำแนกประเภทของ IUPAC (K. S. W. Sing และคณะ, 1985) โดยลักษณะของไอโซเทิร์มจะแสดงการเพิ่มขึ้นของปริมาณการดูดซับและเข้าสู่ค่าคงที่ในช่วงความดันต่ำ ซึ่งไอโซเทิร์มชนิดที่ 1 ชี้ให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก (รูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า 2 nm) กลไกการดูดซับเป็นแบบการเติมรูพรุน (Pore filling) ซึ่งรูพรุนมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเพียง 2-3 โมเลกุลเท่านั้น

ผลของการเพิ่มปริมาณ NaOH ในถ่านกัมมันต์โดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ในขั้นตอนการแช่ถ่านกัมมันต์พบว่า ปริมาณการดูดซับ N_2 มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มของความเข้มข้นสารละลาย NaOH ในช่วง 3-15% โดยน้ำหนัก ซึ่งบ่งชี้ว่าโมเลกุลของ NaOH ได้แทรกตัวในรูพรุน และเกาะอยู่บนพื้นผิวภายใน ทำให้พื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับ N_2 มีค่าลดลง

ตารางที่ 4.1 แสดงผลของความเข้มข้น NaOH ที่มีต่อสมบัติความพรุนตัวอย่างของถ่านกัมมันต์ พบว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สอดคล้องกับผลของไอโซเทิร์มในรูปที่ 4.1 ดังที่กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้รูปที่ 4.2 ชี้ว่าถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวภายในและปริมาตรรูพรุนสูงกว่า เช่น ถ่านกัมมันต์ AC3 ซึ่งสามารถรองรับการแทรกตัวของ NaOH ได้มากกว่า แสดงอัตราการลดลงของสมบัติความพรุนที่ช้ากว่า และมีแนวโน้มว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย NaOH จนถึงค่าหนึ่ง ซึ่งทำให้เกิดการอุดตันของช่องว่างรูพรุน จะส่งผลให้สมบัติความพรุนมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว

สำหรับผลของขนาดรูพรุนเฉลี่ยพบว่ามีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ขนาดรูพรุนโดยรวม มีค่าอยู่ในช่วง 19.9 ถึง 20.8 Å โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 20.3 Å

โดยแสดงผลของการกระจายขนาดรูพรุนในภาคผนวก ข. ซึ่งพบว่าส่วนมากแล้วรูพรุนอยู่ในช่วงของน้อยกว่า 2 nm หรือมีรูพรุนขนาดเล็กในถ่านกัมมันต์เป็นจำนวนมาก



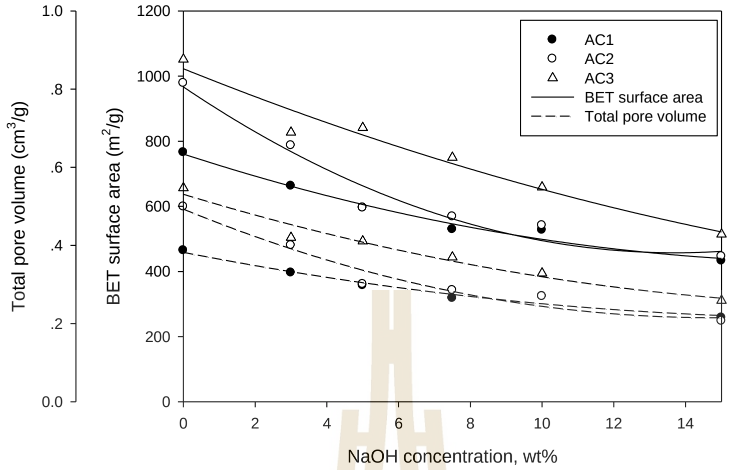
รูปที่ 4.1 ไอโซเทิร์มการดูดซับและคายซับด้วย N_2 ของถ่านกัมมันต์ดิบ 3 ชนิด

ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิว พื้นที่รูพรุนขนาดเล็ก ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ปริมาตรรูพรุนรวม และขนาดรูพรุนเฉลี่ย

ตัวอย่าง	BET พื้นที่ผิว[ก] (m^2/g)	พื้นที่รูพรุนขนาดเล็ก[ข] (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก[ข] (cm^3/g)	ปริมาตรรูพรุนรวม (cm^3/g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย[ค] (Angstrom)
AC1	766	649	0.318	0.387	20.2
AC1-3	663	575	0.279	0.330	19.9
AC1-5	596	512	0.249	0.297	20.0
AC1-7.5	529	450	0.219	0.265	20.0
AC1-10	527	447	0.218	0.270	20.5
AC1-15	433	376	0.183	0.215	19.9
AC2	978	793	0.389	0.499	20.4
AC2-3	787	636	0.312	0.400	20.3
AC2-5	595	480	0.235	0.301	20.2
AC2-7.5	568	460	0.225	0.285	20.1
AC2-10	541	441	0.215	0.270	19.9
AC2-15	446	366	0.178	0.206	22.1
AC3	1052	788	0.393	0.547	20.8
AC3-3	841	670	0.330	0.420	20.3
AC3-5	827	646	0.319	0.411	20.3
AC3-7.5	750	605	0.297	0.370	20.1
AC3-10	659	539	0.264	0.329	20.0
AC3-15	514	404	0.198	0.259	20.1

[ก] สมการ BET isotherm, [ข] t-plot, [ค] 4V/A

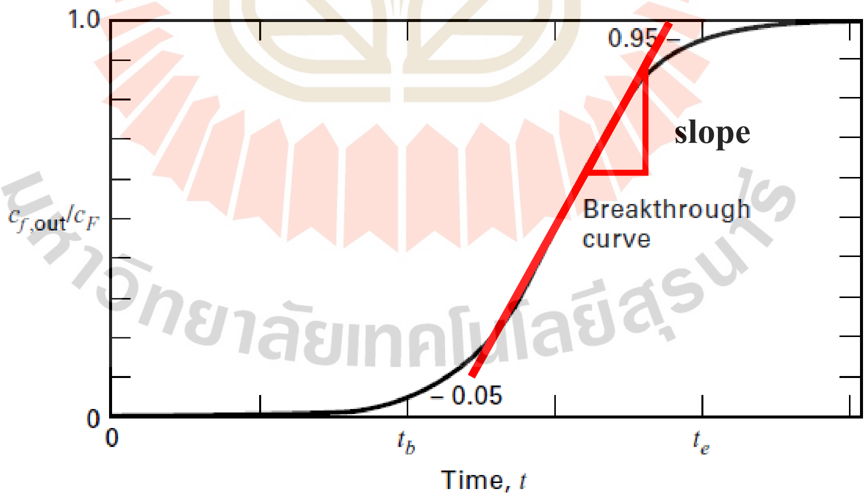
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นสารละลาย NaOH ต่อค่าพื้นที่ผิวรวมและปริมาตรรูพรุนรวม

4.2 กราฟเบรกทรู

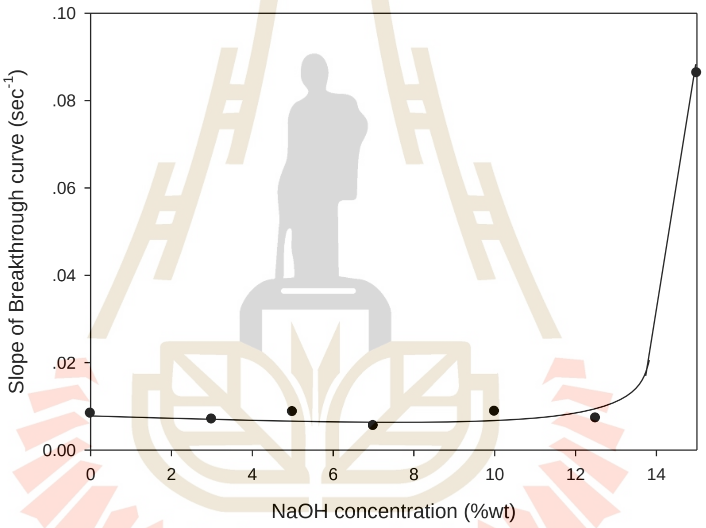
การวิเคราะห์และประเมินพลศาสตร์การดูดซับ CO_2 จากแก๊สสังเคราะห์โดยถ่านกัมมันต์ในเบดนิ่ง ทำได้โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นขาออกเทียบกับเวลาได้เวลาเบรกทรู ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปตัวเอสในภาษาอังกฤษ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างของกราฟเบรกทรูที่ได้จากเครื่องดูดซับเบดนิ่ง

ลักษณะของกราฟเบรกทรูขึ้นกับตำแหน่งบนแกน x (แกนเวลา) ซึ่งจะกำหนดเวลาเบรกทรู (t_B) และความชันของกราฟช่วงที่เป็นเส้นตรง เวลาเบรกทรูเป็นตัวแปรที่สะท้อนถึงความจุของการ

ดูดซับ ถ้าเวลาเบรกทรูมีค่ามาก กราฟเบรกทรูจะเคลื่อนไปทางขวาของแกนเวลา ซึ่งชี้ว่าเวลาสัมผัสระหว่างแก๊สและตัวดูดซับมีค่ามาก ทำให้สามารถดูดซับสารไว้ได้มาก หรือชี้ว่าตัวดูดซับมีตำแหน่งของการดูดซับบนพื้นผิวอยู่เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้สามารถดูดซับสารต่อหน่วยน้ำหนักได้มากเช่นกัน สำหรับค่าความชันของกราฟเบรกทรูบ่งชี้ถึงความยากง่ายหรือความต้านทานในการแพร่ผ่านของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ จากวัฏภาคแก๊สไปยังบริเวณพื้นผิวภายนอก (External or interphase mass transfer ต่อด้วยการแพร่ภายในช่องว่างรูพรุนของอนุภาคดูดซับ (Internal or intraparticle mass transfer) ถ้ากราฟเบรกทรูที่ได้ให้ค่าควาชันสูงและเวลาเบรกทรูมีค่ามาก การดูดซับจะเกิดได้เร็ว และให้ค่าความจุของการดูดซับสูงด้วย สำหรับข้อมูลกราฟเบรกทรูเพิ่มเติมทั้งหมดรวบรวมไว้ในภาคผนวก ข

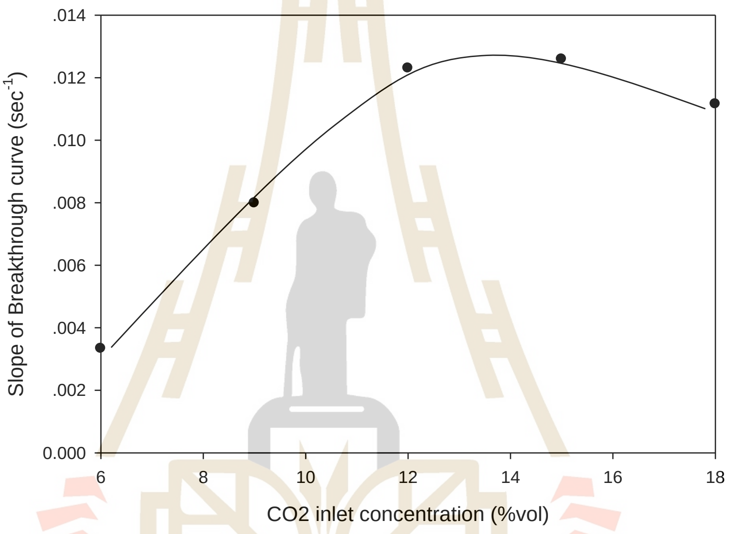


รูปที่ 4.4 ผลของความเข้มข้นสารละลาย NaOH ต่อความชันของกราฟเบรกทรู (อุณหภูมิ 35°C ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min ความเข้มข้น CO_2 12%vol พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ 978 m^2/g และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ 10 g)

จากรูปที่ 4.4 ผลของความเข้มข้นสารละลาย NaOH ต่อความชันของกราฟเบรกทรู พบว่าเมื่อความเข้มข้นสารละลาย NaOH เพิ่มขึ้นความชันของกราฟมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วง 0-13%wt อธิบายได้ว่าการแทรกตัวของโมเลกุล NaOH ภายในรูพรุนไม่ส่งผลต่อการแพร่ของ CO_2 ไปยังตำแหน่งดูดซับ แต่ผลของความเข้มข้นสารละลาย NaOH ที่ 15%wt มีความชันสูงสุด ซึ่งยังไม่มีคำอธิบายที่ชัดเจนถึงการเพิ่มของความชันนี้

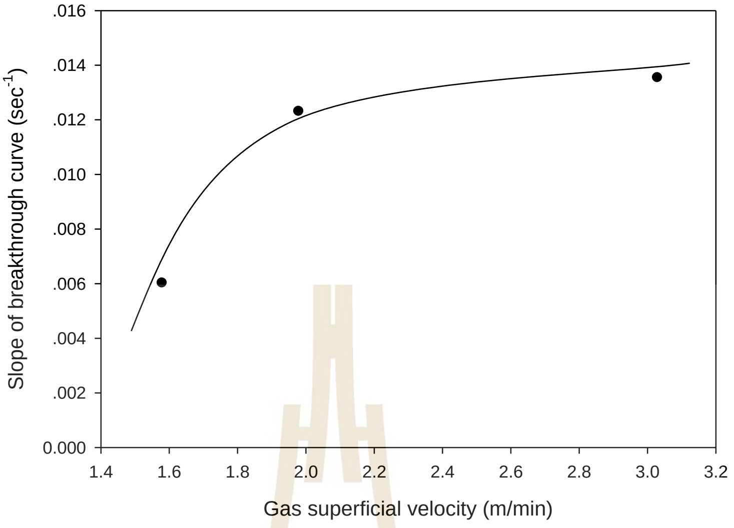
รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้าต่อความชันของกราฟเบรกทรู แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้าทำให้ความชันของกราฟเบรกทรูเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้น CO_2 ขาเข้าเป็นการเพิ่มแรงขับ สำหรับการแพร่ของโมเลกุล CO_2 ภายในรูพรุนช่วยให้การแพร่เกิดได้รวดเร็วขึ้น

รูปที่ 4.6 ชี้ว่าการเพิ่มอัตราการไหลหรือความเร็วแก๊สทำให้ความชันของกราฟเบรกทรูมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มความเร็วแก๊สทำให้วัฏภาคแก๊สภายนอกเกิดความปั่นป่วนมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานการพามวลภายนอกลดลงจึงช่วยให้การแพร่ภายในอนุภาคเกิดได้เร็วขึ้น

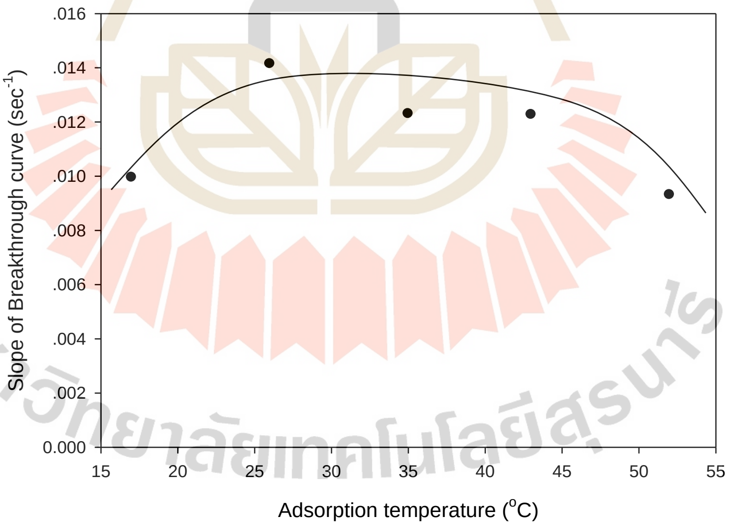


รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า ต่อความชันของกราฟเบรกทรู (ความเข้มข้นของ NaOH 10%w อุณหภูมิ 35°C ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ 978 m^2/g และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ 10 g)

ผลของอุณหภูมิการดูดซับต่อความชันของกราฟเบรกทรู แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าค่าความชันของกราฟเบรกทรูมีแนวโน้มเพิ่มตามอุณหภูมิในช่วง 17.5°C ถึงประมาณ 40°C ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่โมเลกุลของ CO_2 สามารถแพร่ในรูพรุนได้เร็วขึ้น จากพลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้น แต่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 40°C ความชันมีค่าลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการลดลงของอัตราการดูดซับของ CO_2 บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิการดูดซับเพิ่มทำให้การดูดซับเป็นขั้นตอนที่ควบคุมกระบวนการดูดซับโดยรวมส่งผลให้อัตราการแพร่ของ CO_2 ลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 4.6 ผลของความเร็วแก๊สผสมต่อความชันของกราฟเบรกทรู (ความเข้มข้นของ NaOH 10%w อุณหภูมิ 35°C ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า 12%vol พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ 978 m^2/g และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ 10 g)

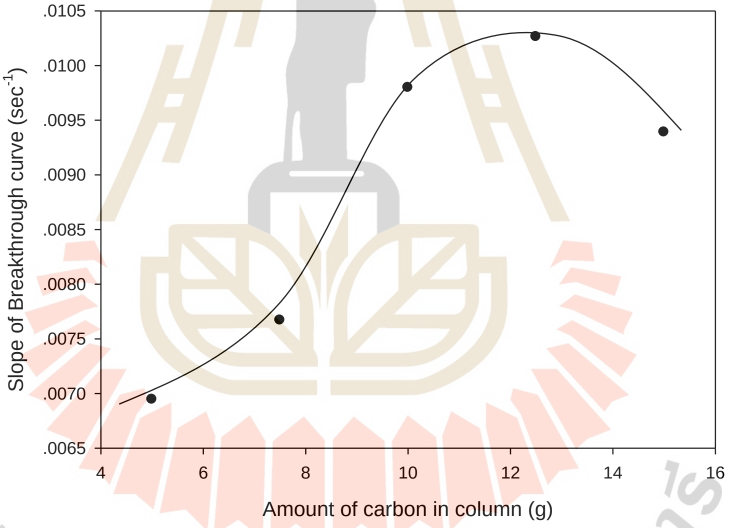


รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิการดูดซับต่อความชันของกราฟเบรกทรู (ความเข้มข้นของ NaOH 10%w ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า 12%vol พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ 978 m^2/g และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ 10 g)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำหรับผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ดูดซับต่อค่าความชันของกราฟเบรกทรู แสดงในรูปที่ 4.8 จากผลการศึกษาพบว่าความชันมีค่าเพิ่มตาม ปริมาณของถ่านกัมมันต์จนมีค่าสูงสุด ที่ความจุของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 12g จากนั้นมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของถ่านกัมมันต์ โดยปกติแล้วปริมาณของตัวดูดซับหรือความสูงของตัวดูดซับไม่ควรมีผลโดยตรงต่อความต้านทานในการแพร่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ยกเว้นรูปแบบการไหลภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคมีการเปลี่ยนไป เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของการจัดตัวของอนุภาค (Particle packing) เมื่อเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับ

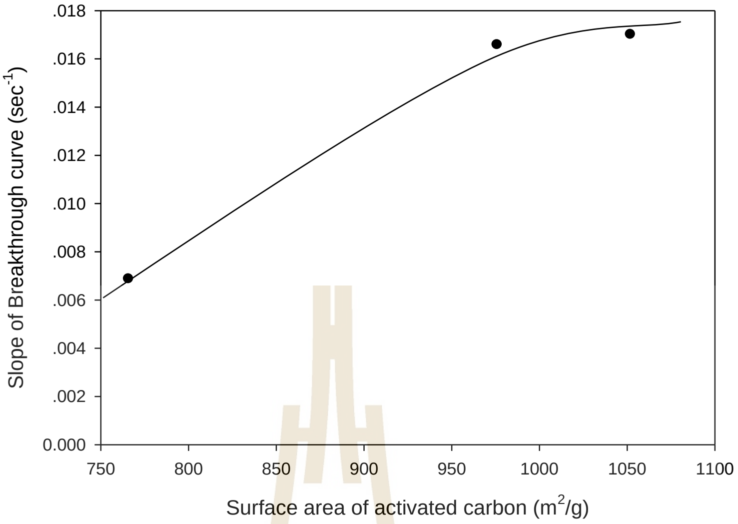
รูปที่ 4.9 ชี้ว่าค่าความชันของกราฟเบรกทรูเพิ่มตามพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าความต้านทานการแพร่ของตัวถูกดูดซับจะขึ้นกับการแพร่ภายในรูพรุนของตัวถูกดูดซับ ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมากอาจช่วยลดความต้านทานการแพร่ทำให้อัตราการแพร่ของ CO_2 ไปยังตำแหน่งดูดซับเกิดได้เร็วขึ้น



รูปที่ 4.8 ผลของปริมาณการบรรจุถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ต่อความชันของกราฟเบรกทรู (ความเข้มข้นของ NaOH 10%w ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า 12%vol พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ 978 m^2/g และอุณหภูมิ 35°C)

4.3 เวลาเบรกทรูและความจุการดูดซับ

หัวข้อนี้รายงานอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อพลศาสตร์การดูดซับ CO_2 ในรูปของเวลาเบรกทรู (t_B) ความจุของ CO_2 ที่เวลาเบรกทรู (q_B) และความจุของ CO_2 ที่เวลาสมดุล (q_E)



รูปที่ 4.9 ผลของพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ต่อความชันของกราฟเบรกทรู (ความเข้มข้นของ NaOH 10%w ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า 12%vol ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ 10 g และอุณหภูมิ 35°C)

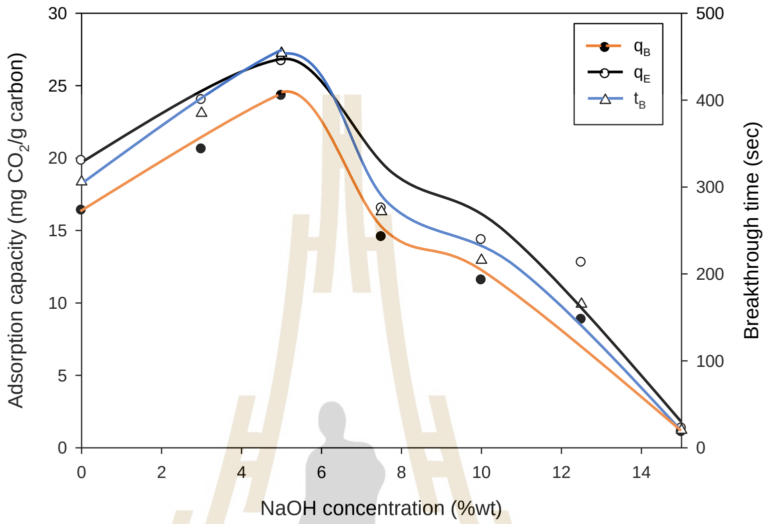
4.3.1 ผลกระทบจากปริมาณ NaOH ที่บรรจุในถ่านกัมมันต์

จากรูปที่ 4.10 พบว่าเวลาเบรกทรู (t_B) รวมถึงความจุที่เวลาเบรกทรู (q_B) และความจุที่เวลาสมดุล (q_E) มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของความเข้มข้น NaOH จนถึงค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นวิกฤตประมาณ 5wt%NaOH จากนั้นจะมีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นมีค่ามากขึ้น แนมโน้มนี้สามารถอธิบายได้ว่าในช่วงความเข้มข้นน้อยกว่า 5wt% การเพิ่มความเข้มข้นของ NaOH ทำให้ปริมาณของ NaOH แทรกตัวและสะสมอยู่บนพื้นผิวภายในถ่านกัมมันต์ได้มากขึ้น ส่งผลให้มีตำแหน่งดูดซับที่เพิ่มขึ้นช่วยให้ความจุของการดูดซับ CO_2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ดีเมื่อความเข้มข้นของ NaOH เพิ่มถึงจุดวิกฤต ขนาดรูพรุนเฉลี่ยภายในจะแคบลงทำให้อัตราเร็วในการแพร่ของ CO_2 ไปยังตำแหน่งดูดซับมีค่าลดลงด้วย ด้วยเหตุนี้ทั้งเวลาเบรกทรูและความจุของการดูดซับ CO_2 จึงมีแนมโน้มลดลง

ตารางที่ 4.2 แสดงตัวอย่างข้อมูลพลศาสตร์การดูดซับ CO_2 โดยถ่านกัมมันต์ AC2 ที่เติม NaOH โดยใช้สารละลายความเข้มข้นตั้งแต่ 0-15wt% นอกจากแสดงค่า t_B, q_B และ q_E แล้วยังแสดงค่าร้อยละความอิ่มตัวของเบดที่เวลาเบรกทรู หรือคือประสิทธิภาพการดูดซับของเบด และความกว้างของโซนถ่ายโอนมวล (L_{MTZ}) ที่เวลาเบรกทรู ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อร้อยละความอิ่มตัวของเบดมีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลของ t_B, q_B และ q_E

จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่าง t_B และ L_{MTZ} สำหรับถ่านกัม

มันต์ AC1, AC2 และ AC3 ซึ่งพบว่า t_B แปรผกผันกับ L_{MTZ} นั่นคือถ้า L_{MTZ} มีค่ามากแนวความเข้มข้นของ CO_2 ภายในเบดจะเดินทางมาถึงตำแหน่งทางออกของคอลัมน์ดูดซับได้เร็วขึ้น ดังนั้นเวลาเบรกทรูจึงมีค่าลดลง



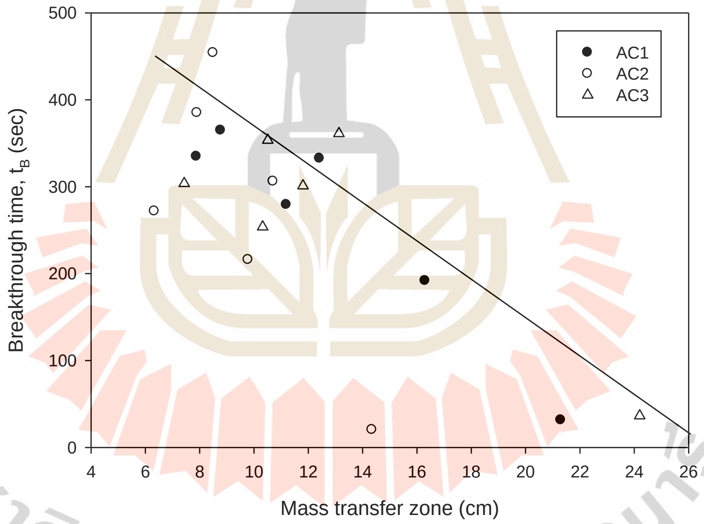
รูปที่ 4.10 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อเวลาเบรกทรู q_B และ q_E (อุณหภูมิ 35°C ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min ความเข้มข้น CO_2 12%vol พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ 978 m^2/g (AC2) และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ 10 g)

ตารางที่ 4.2 ค่าที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์ผลศาสตร์การดูดซับของ CO_2 ในเครื่องดูดซับเบดนิ่ง แสดงผลของปริมาณการบรรจุ NaOH ในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ AC2 (อุณหภูมิ 35°C ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min ความเข้มข้น CO_2 12%vol และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ 10 g ความสูงของเบด 28.2 cm)

ตัวอย่างถ่านกัมมันต์	เวลาเบรกทรู t_B (sec)	ปริมาณดูดซับ CO_2 ที่ t_B, q_B (mg/g)	ปริมาณดูดซับ CO_2 ที่สมดุล, q_E (mg/g)	ร้อยละของความอิ่มตัว ที่เวลาเบรกทรู	L_{MTZ} ที่เวลาเบรกทรู (cm)
AC2	494	17.5	19.8	82.7	10.7
AC2-3	535	20.6	24.0	85.8	7.90
AC2-5	650	24.5	26.7	91.0	8.50
AC2-7.5	350	14.6	16.5	88.0	6.33

ตารางที่ 4.2 ค่าที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์พลศาสตร์การดูดซับของ CO_2 ในเครื่องดูดซับเบดนิ่ง แสดงผลของปริมาณการบรรจุ NaOH ในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ AC2 (ต่อ) (อุณหภูมิ 35°C ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min ความเข้มข้น CO_2 12%vol และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ 10 g ความสูงของเบด 28.2 cm)

ตัวอย่างถ่านกัมมันต์	เวลาเบรกทรู t_B (sec)	ปริมาณดูดซับ CO_2 ที่ t_B, q_B (mg/g)	ปริมาณดูดซับ CO_2 ที่สมดุล , q_E (mg/g)	ร้อยละของความอิ่มตัว ที่เวลาเบรกทรู	L_{MTZ} ที่เวลาเบรกทรู (cm)
AC2-10	331	11.6	14.3	80.6	9.79
AC2-12.5	307	8.84	12.8	69.2	13.0
AC2-15	41.3	1.09	1.34	81.3	14.3



รูปที่ 4.11 ผลของช่วงการถ่ายโอนมวลต่อเวลาเบรกทรู (อุณหภูมิ 35°C ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min ความเข้มข้น CO_2 12%vol และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ 10 g)

จากตารางที่ 4.3 แสดงค่าความจุ CO_2 สูงสุดและค่าความเข้มข้นวิกฤตของสารละลาย NaOH สำหรับถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิดที่บรรจุและไม่บรรจุ NaOH พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิดที่โครงสร้างรูพรุนแตกต่างกันมีจุดวิกฤตจุดเดียวกันที่ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 5wt% หรือปริมาณการแทรกตัวของ NaOH เท่ากับ 180 mg NaOH/g AC ซึ่งถ่านกัมมันต์ AC3 ให้ความจุการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 26.8 mg CO_2/g AC แต่เมื่อสังเกตุค่าร้อยละการเพิ่มของ

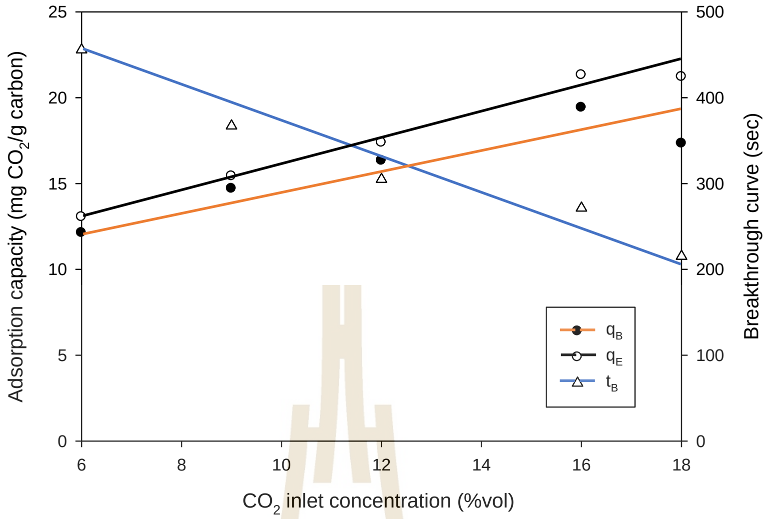
ปริมาณการดูดซับ CO_2 เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ดิบพบว่าถ่านกัมมันต์ AC1 ซึ่งให้ค่าร้อยละการเพิ่มของปริมาณการดูดซับ CO_2 สูงถึงร้อยละ 48.2 โดยค่าร้อยละดังกล่าวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการดูดซับเมื่อเพิ่มปริมาณการแทรกตัวของ NaOH ที่จุดวิกฤต

ตารางที่ 4.3 ค่าความจุ CO_2 สูงสุดและค่าความเข้มข้นวิกฤตของสารละลาย NaOH สำหรับถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิดที่บรรจุและไม่บรรจุ NaOH (อุณหภูมิ 35°C ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min ความเข้มข้น CO_2 12%vol และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ 10 g)

ถ่านกัมมันต์	ความเข้มข้นวิกฤตของสารละลาย NaOH (wt%)	ปริมาณการแทรกตัวของ NaOH ที่ความเข้มข้นวิกฤต (mg NaOH/g AC)	ปริมาณการดูดซับ CO_2 สูงสุดที่ความเข้มข้นวิกฤต (mg CO_2/g AC)	ร้อยละการเพิ่มของปริมาณการดูดซับ CO_2 เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ดิบ
AC1	0	0	16.4	48.2
AC1-5	5	180	24.3	
AC2	0	0	17.5	40
AC2-5	5	180	24.5	
AC3	0	0	19.3	38.9
AC3-5	5	180	26.8	

4.3.2 ผลกระทบจากความเข้มข้น CO_2 ขาเข้า

รูปที่ 4.12 ชี้ว่าเวลาเบรกทรูมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มความเข้มข้นของ CO_2 ในสายป้อน ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ว่าเมื่ออัตราการป้อน CO_2 เข้าสู่คอลัมน์ดูดซับมีค่าต่ำ ตำแหน่งดูดซับบนพื้นผิวภายในถูกใช้ไปอย่างช้าๆ ส่งผลให้แนวคลื่นความเข้มข้น (Concentration front) ของตัวถูกดูดซับ เดินทางภายในเบดด้วยความเร็วที่ต่ำด้วยทำให้เวลาเบรกทรูมีค่ามากขึ้นนั่นเองผลของระดับความเข้มข้นของ CO_2 ในสายป้อนต่อค่า q_B และ q_E แสดงดังรูปที่ 4.12 การเพิ่มความเข้มข้นของ CO_2 ทำให้ค่า q_B และ q_E เพิ่มขึ้นจนถึงระดับ 16 vol% และลดลงเล็กน้อยในช่วง 16-18 vol% การเพิ่มค่าความจุการดูดซับอาจเป็นผลมาจากการเพิ่มแรงขับเมื่อความเข้มข้นของ CO_2 เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการแพร่ภายในรูพรุนไปยังตำแหน่งดูดซับเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับจึงดีขึ้น



รูปที่ 4.12 ผลของความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้าต่อเวลาเบรกทรู q_B และ q_E (ความเข้มข้นของ NaOH 10%w อุณหภูมิ 35°C ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ 978 m^2/g (AC2) และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ 10 g)

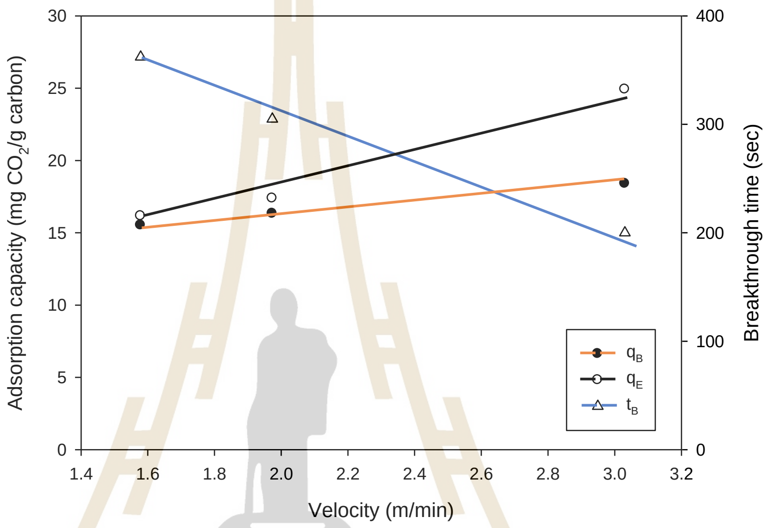
4.3.3 ผลกระทบจากความเร็วแก๊สผสม

รูปที่ 4.13 ชี้ว่าการเพิ่มอัตราไหลหรือความเร็วแก๊สทำให้เวลาเบรกทรูมีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มความเร็วแก๊สทำให้เวลาสัมผัสระหว่างแก๊สและอนุภาคดูดซับมีค่าลดลง แต่เมื่อเพิ่มความเร็วแก๊ส ค่า q_B และ q_E กลับมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามอัตราไหลหรือความเร็วของแก๊ส เหตุผลที่เป็นไปได้คือการเพิ่มความเร็วทำให้ระดับความปั่นป่วนในของไหล (Degree of turbulence) เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานการแพร่จากวัฏภาคแก๊สไปยังพื้นผิวภายนอกของอนุภาคมีแนวโน้มลดลง ช่วยให้อัตราการแพร่ของ CO_2 เกิดได้เร็วขึ้น

4.3.4 ผลกระทบจากอุณหภูมิการดูดซับ

รูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นชัดเจนว่า t_B q_B และ q_E มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการดูดซับ จากผลที่ได้ อาจสรุปได้ว่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่บรรจุด้วย NaOH เป็นการดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากการดูดซับทางกายภาพเป็นกระบวนการคายความร้อนการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความจุของการดูดซับลดลง ในลักษณะเดียวกับที่พบในระบบปฏิกิริยาเคมีแบบคายความร้อนที่ทำให้ร้อยละผลผลิตลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของปฏิกิริยา อย่างไรก็ดีการเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับยังส่งผลโดยตรงต่อความเร็วแก๊สที่ไหลผ่านกลุ่มของอนุภาคดูดซับ นั่นคือการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความเร็วแก๊สเพิ่มขึ้นซึ่งจะไปลดเวลาการดูดซับลง ทำให้อัตราการดูดซับลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิได้ เช่นเดียวกัน เพื่อพิสูจน์สมมุติฐานในข้อนี้จึงได้ทำการทดลอง

เปรียบเทียบผลการดูดซับในเบดนิ่งที่ 2 สภาวะ โดยสภาวะแรกศึกษาการดูดซับที่อุณหภูมิ 26.8°C ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min ความสูงเบด 28.6 cm ซึ่งให้เวลาสัมผัส 8.87 sec และสภาวะที่ 2 อุณหภูมิ 43.8°C ความเร็วแก๊ส 2.07 m/min แต่ปรับความสูงเป็น 30.7 cm เพื่อให้ได้เวลาสัมผัสเท่ากัน เท่ากับ 8.87 sec ผลการคำนวณพบว่าทั้งสองสภาวะให้ค่าความจุดูดซับไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจึงสรุปได้ว่า อุณหภูมิการดูดซับส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วแก๊ส ซึ่งมีผลต่อเวลาสัมผัส



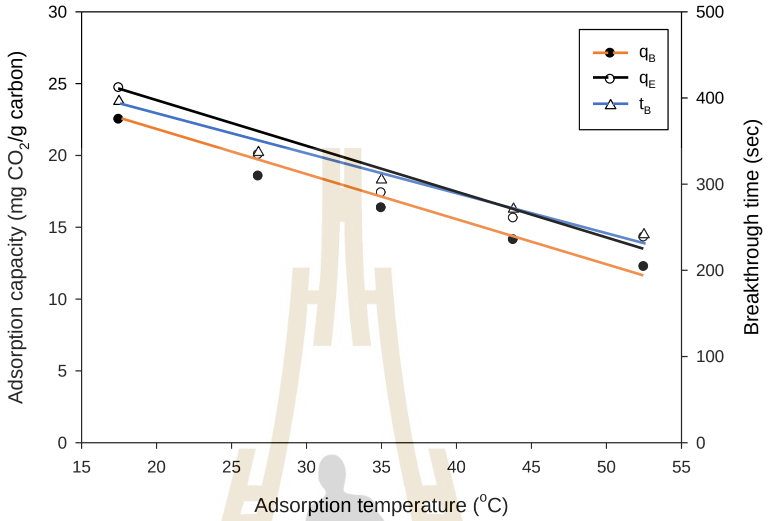
รูปที่ 4.13 ผลของความเร็วแก๊สผสมต่อเวลาเบรกทรู q_B และ q_E (ความเข้มข้นของ NaOH 10%w อุณหภูมิ 35°C ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า 12%vol พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ 978 m^2/g (AC2) และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ 10 g)

ในส่วนของการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อความจุของการดูดซับ โดยวัดผลของรูปแบบการไหลซึ่งเกิดขึ้นในเครื่องดูดซับเบดนิ่ง จำเป็นต้องศึกษาการดูดซับที่สภาวะสมดุล ดังนั้นจึงทำการทดลองเพิ่มโดยนำถ่านกัมมันต์ AC3 ที่บรรจุ NaOH (AC3-5) และถ่านกัมมันต์ AC3 ไปวัดไอโซเทิร์มการดูดซับ CO_2 ที่อุณหภูมิ 0 และ 20 โดยใช้เครื่องวัดพื้นที่ผิว (ASAP2020) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งชี้ให้เห็นได้ชัดว่าการดูดซับ CO_2 ที่สมดุลเป็นการดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับจาก 0°C ไป 20°C ทำให้ปริมาณการดูดซับ CO_2 ลดลงอย่างเห็นได้ชัดไม่ว่าจะเป็นตัวอย่างถ่านกัมมันต์ดิบหรือถ่านกัมมันต์ที่บรรจุ NaOH

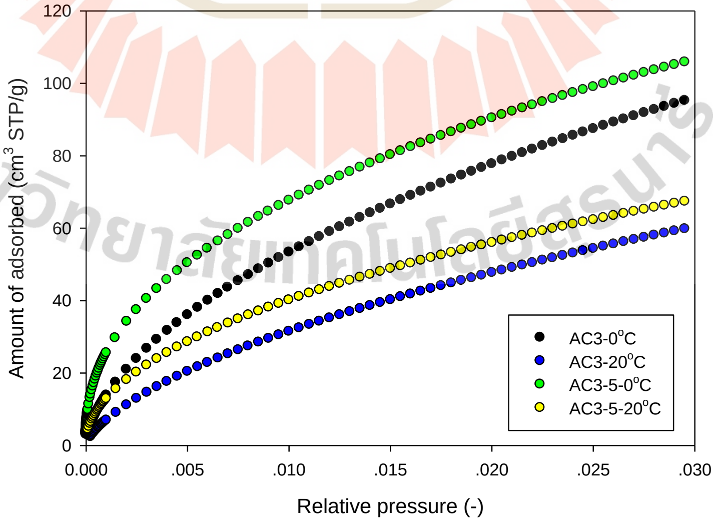
4.3.5 ผลกระทบจากปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์

การเพิ่มปริมาณหรือความสูงของถ่านกัมมันต์ในหอดูดซับเบดนิ่งทำให้เวลาเบรกทรูเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.16) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มความสูงของเบดจะช่วยให้แก๊สใช้เวลา

เดินทางในคอลัมน์ได้นานขึ้นเป็นการเพิ่มเวลาสัมผัสระหว่างแก๊สผสมและอนุภาคดูดซับทำให้เวลาเบรกทรูมีค่ามากขึ้น

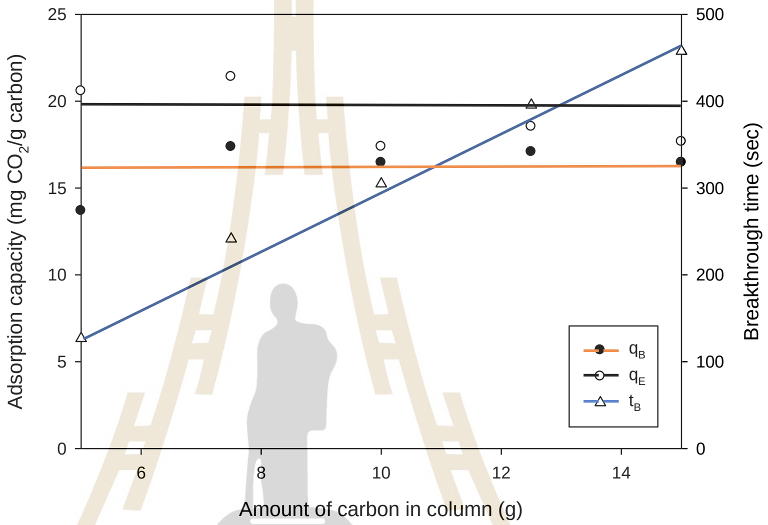


รูปที่ 4.14 ผลของอุณหภูมิการดูดซับต่อเวลาเบรกทรู q_B และ q_E (ความเข้มข้นของ NaOH 10%w ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า 12%vol พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ 978 m^2/g (AC2) และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ 10 g)



รูปที่ 4.15 อิทธิพลของอุณหภูมิการดูดซับที่มีผลต่อไอโซเทิร์มการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์ดิบและถ่านกัมมันต์ที่บรรจุ NaOH มีความเข้มข้นเท่ากับ 5wt% AC3

รูปที่ 4.16 ชี้ว่าปริมาณของถ่านกัมมันต์มีผลค่อนข้างน้อยต่อค่าความจุของการดูดซับ (q_B และ q_E) เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับปริมาณของการดูดซับจะเพิ่มตามด้วย ทำให้ความจุของการดูดซับ (q_B และ q_E) ในหน่วย น้ำหนัก CO_2/น้ำหนักถ่านกัมมันต์ มีค่าค่อนข้างคงที่ ผลนี้จะถูกต้องเมื่อการเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงตัวของอนุภาคดูดซับ (Packing effect) ซึ่งจะกระทบต่อสัดส่วนช่องว่างของเบด



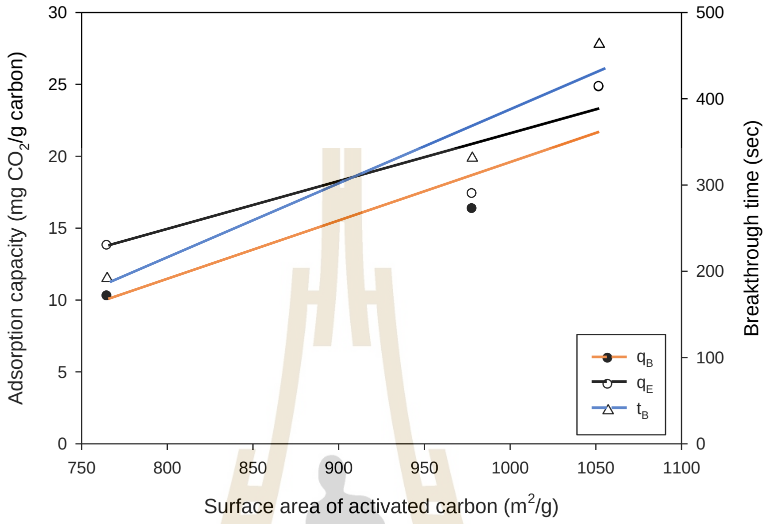
รูปที่ 4.16 ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ต่อเวลาเบรกทรู q_B และ q_E (ความเข้มข้นของ NaOH 10%w ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า 12vol% พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ 978 m^2/g (AC2) และอุณหภูมิ 35°C)

4.3.6 ผลกระทบจากพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

รูปที่ 4.17 แสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่มากกว่าจะให้ค่า t_B q_B และ q_E ที่มากกว่า เนื่องจากมีพื้นที่ผิวภายในที่มากกว่าจึงสามารถรองรับการแทรกตัวของ NaOH ภายในรูพรุนได้มากกว่าการสะสมอยู่บริเวณพื้นผิวภายนอก ซึ่งอาจเป็นอุปสรรคต่อการแพร่ของ CO_2 เข้ามาภายในรูพรุน สมมุติฐานนี้จะเป็นจริงเมื่อใช้ระดับความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงในการทดลองนี้ใช้ความเข้มข้นสารละลาย NaOH เท่ากับ 10% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับ CO_2 ของงานวิจัยอื่นๆ เทียบกับงานวิจัยนี้ พบว่าโดยรวมการดัดแปลงถ่านกัมมันต์ทำให้ปริมาณการดูดซับ CO_2 เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดโดยแต่ละงานวิจัยนั้นใช้สภาวะการทดลองที่แตกต่างกันไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับ CO_2 ในเบดนิ่งนั้นขึ้นกับสภาวะการทดลองหลากหลายปัจจัยด้วยกัน โดยส่วนใหญ่การบรรจุ Diethanol

amine จะให้ค่าปริมาณการดูดซับสูงกว่าการบรรจุ NaOH และถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มบรรจุ Diethanol amine ให้ปริมาณการดูดซับสูงสุดในตาราง



รูปที่ 4.17 ผลของพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ต่อเวลาเบรกทรู q_B และ q_E (ความเข้มข้นของ NaOH 10%w ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า 12%vol และอุณหภูมิ 35°C)

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับ CO_2 ของงานวิจัยอื่นๆ เทียบกับงานวิจัยนี้

ตัวอย่าง	เส้นผ่าศูนย์กลาง (cm)	พื้นที่ผิว (m^2/g)	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น CO_2 (%vol)	ความเร็วแก๊ส (m/s)	ปริมาณการดูดซับ CO_2 (mg/g)		อ้างอิง
						ดิบ	ดัดแปลง	
ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวบรรจุ NaOH	1.0	1052	35	13	0.033	19.3	26.8	งานนี้

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับ CO_2 ของงานวิจัยอื่นๆ เทียบกับงานวิจัยนี้ (ต่อ)

ตัวอย่าง	เส้นผ่าศูนย์กลาง (cm)	พื้นที่ผิว (m^2/g)	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น CO_2 (%vol)	ความเร็วแก๊ส (m/s)	ปริมาณการดูดซับ CO_2 (mg/g)		อ้างอิง
						ดิบ	ดัดแปลง	
ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่มีหมู่ฟังก์ชันของ Diethanol amine	1.1	-	30	10	0.05	33.6	53.6	M. Auta, et al., 2015
ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มบรรจุ Diethanol amine	2.0	800	40	40	10.6	75	92.8	A. Kongnoo, et al., 2016
เม็ดอลูมินากระตุ้นที่มีหมู่ฟังก์ชันของ Diethanol amine	1.1	205	35	10	0.02	-	55	M. Auta, et al., 2014
ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มบรรจุด้วยเอมีนชนิดต่างๆ	2.0	822	40	30	3.2	37.1	64	C.S. Lee, et al., 2013

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

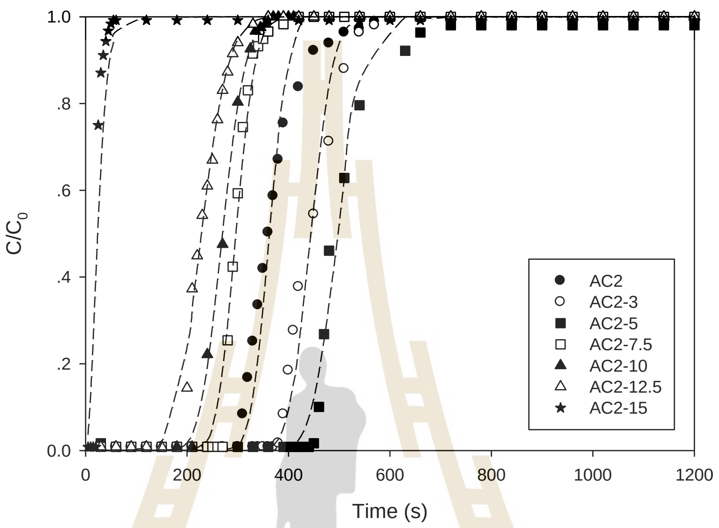
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับ CO_2 ของงานวิจัยอื่นๆ เทียบกับงานวิจัยนี้ (ต่อ)

ตัวอย่าง	เส้นผ่าศูนย์กลาง (cm)	พื้นที่ผิว (m^2/g)	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น CO_2 (%vol)	ความเร็วแก๊ส (m/s)	ปริมาณการดูดซับ CO_2 (mg/g)		อ้างอิง
						ดิบ	ดัดแปลง	
บรรจุเอมีในไทเทเนียมออกไซด์	0.6	930	75	10	0.02	20.0	91.5	L. Ma et al., 2013
อลูมินากระตุ้นดัดแปลงด้วย NaOH	1.1	207	35	15	0.02	19.6	51.9	M. Auta, et al., 2013
ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวบรรจุ NaOH	1.1	787	35	20	1.8	17.5	27.3	Tan, Islam et al., 2014

4.4 การทดสอบสมการกราฟเบรกทรู

หัวข้อนี้รายงานการทดสอบแบบจำลองกราฟเบรกทรูกับข้อมูลการทดลอง โดยใช้วิธีวิเคราะห์เชิงถดถอย (Regression analysis) เพื่อหาค่าคงที่ของแบบจำลองที่ให้ผลการคำนวณสอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด ในงานวิจัยนี้เลือกที่จะใช้แบบจำลองแบบประมาณของคลินเคนเบิร์ก (Klinkenberg model) เนื่องจากตัวคงที่ในสมการ ได้แก่ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในอนุภาค (k_p) และ ค่าคงที่เฮนรีของไอโซเทิร์มเส้นตรง (K) มีความหมายสอดคล้องกับปรากฏการณ์การดูดซับ โดย k_p เป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับอัตราเร็วการแพร่ของตัวถูกดูดซับภายในรูพรุนของอนุภาคดูดซับ ในขณะที่ K เป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ นอกจากนี้เรายังสามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่เฉลี่ยในรูพรุน (D_e) เพิ่มเติมจากค่า k_p ได้อีกด้วย ตามสมการที่ 3.1 สำหรับแบบจำลองของโทมัส (Thomas model) มีตัวคงที่เพียงตัวเดียว ได้แก่ ค่าคงที่ของโทมัส (k_t) ซึ่งทำให้ขาดความยืนหยุ่นในการทำสหสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจากการ

ทดลองและค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลอง ดังนั้นเนื้อหาในหัวข้อนี้จะเกี่ยวข้องกับอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ทั้ง 6 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณการแทรกตัวของ NaOH ในถ่านกัมมันต์ ความเข้มข้นของ CO_2 สายป้อน ความเร็วแก๊ส อุณหภูมิการดูดซับ ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ดูดซับ และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ที่มีผลต่อค่า k_p และ K



รูปที่ 4.18 กราฟเบรกทรูของผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (อุณหภูมิ 35°C ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min ความเข้มข้น CO_2 12%vol พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ 978 m^2/g (AC2) และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ 10 g)

รูปที่ 4.18 แสดงผลเปรียบเทียบกราฟเบรกทรูจากการทดลองและที่คำนวณได้จากแบบจำลอง คลินเคนเบิร์กแสดงอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH จะเห็นว่าแบบจำลองของคลินเคนเบิร์ก สามารถอธิบายกราฟเบรกทรูจากการทดลองได้ดีมาก สำหรับสภาวะอัตราส่วนความเข้มข้น C/C0 ที่น้อยกว่า 0.80 ที่ความเข้มข้น C/C0 สูงกว่า 0.80 สมการจากแบบจำลองทำนายค่าได้สูงกว่าค่าจากการทดลอง

ต่อไปจะอภิปรายผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อค่า k_p K และ D_e ตามลำดับ

1. จากรูปที่ 4.19 ชี้ว่าค่า k_p ลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อเพิ่มปริมาณการบรรจุ NaOH ในถ่านกัมมันต์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเกิดจากการลดลงของขนาดรูพรุนเฉลี่ย เมื่อเพิ่มปริมาณการแทรกตัวของ NaOH ในรูพรุนทำให้อัตราการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับมีค่าลดลง

2. รูปที่ 4.20 ชี้ว่า k_p มีค่าเพิ่มตามการเพิ่มของระดับความเข้มข้น CO_2 และมีอัตราการเพิ่มที่ช้าลงที่ความเข้มข้นมากกว่า 12 vol% แนวโน้มนี้อธิบายได้ว่าเป็นผลมาจากการเพิ่มของแรงขับ

ความเข้มข้นทำให้อัตราการแพร่ของ CO_2 ภายในรูพรุนมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นสูงจนถึงระดับหนึ่ง อัตราการแพร่จะค่อนข้างคงที่ ซึ่งอาจเกิดจากการกีดกั้นกันเอง (Hindrance effect) ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับภายใต้ความเข้มข้นของโมเลกุลที่สูง

3. ผลของความเร็วแก๊สต่อค่า k_p แสดงในรูปที่ 4.21 พบว่าค่า k_p มีค่าเพิ่มตามการเพิ่มความเร็วแก๊สอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจอธิบายว่า การเพิ่มความเร็วที่สูงพออาจทำให้ฟิล์มแก๊สรอบอนุภาคบางลง ส่งผลให้ความเข้มข้นของ CO_2 ที่พื้นผิวภายนอกอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับความเข้มข้นในวัฏภาคแก๊ส ซึ่งเป็นการเพิ่มแรงขับของความเข้มข้น (Concentration driving force) ทำให้อัตราการแพร่เพิ่มขึ้น

4. รูปที่ 4.22 ชี้ว่า k_p มีค่าเพิ่มตามการเพิ่มของอุณหภูมิดูดซับในช่วง 17.5-26.8°C จากนั้นมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงอุณหภูมิ 26.8-52.5°C การเพิ่มของ k_p น่าจะเป็นผลมาจากการเพิ่มของอัตราการแพร่ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มพลังงานจลน์ของโมเลกุล เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ส่วนการลดลงของ k_p ในช่วงอุณหภูมิสูงอาจเกิดจากการลดลงของอัตราการดูดซับ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มทำให้ขั้นตอนการดูดซับเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับโดยรวม เป็นสาเหตุให้อัตราการแพร่ช้าตามไปด้วย

5. รูปที่ 4.23 ชี้ว่า k_p มีค่าเพิ่มตามการเพิ่มของปริมาณตัวดูดซับเกือบ 3 เท่า ในช่วงน้ำหนัก 5-15 g ของถ่านกัมมันต์โดยทางทฤษฎีแล้ว ปริมาณตัวดูดซับไม่ควรมีผลต่อค่า k_p ถ้ารูปแบบการไหลในช่องว่างเบดไม่ขึ้นกับปริมาณของตัวดูดซับ ดังนั้นในกรณีนี้จึงยังไม่สามารถอธิบายเหตุผลของปริมาณตัวดูดซับต่อค่า k_p ได้

6. รูปที่ 4.24 แสดงว่า k_p มีค่าเพิ่มตามพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการลดลงของความต้านทานการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ ในถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนจำเพาะมากกว่า

ในส่วนของผลกระทบของตัวแปรต่อค่า K สามารถสรุปผลจากกราฟได้ดังนี้

1. จากผลแสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่าค่า K มีค่าเพิ่มตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของ NaOH จนถึงระดับ 5wt% จากนั้นมีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เนื่องจาก K เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ผลที่ได้น่าจะเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของจำนวนตำแหน่งการดูดซับ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นทำให้การดูดซับเพิ่มสูงขึ้น แต่ที่ความเข้มข้นของ NaOH สูง อาจเกิดปัญหาการอุดตันของช่องว่างภายในรูพรุน ทำให้โมเลกุลไม่สามารถแพร่ไปยังตำแหน่งดูดซับที่เหลือได้ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลจึงมีแนวโน้มลดลงตามไปด้วย

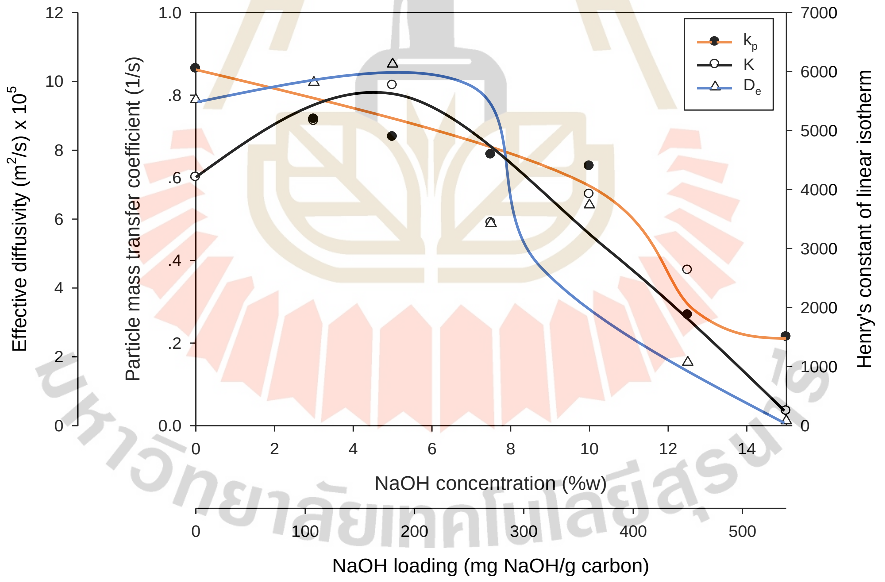
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2. การเพิ่มความเข้มข้นของ CO_2 ในสายป้อนทำให้ K มีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.20 โดยปกติแล้วปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับไม่ควรขึ้นกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ แต่น่าจะขึ้นกับจำนวนของตำแหน่งดูดซับบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มากกว่า

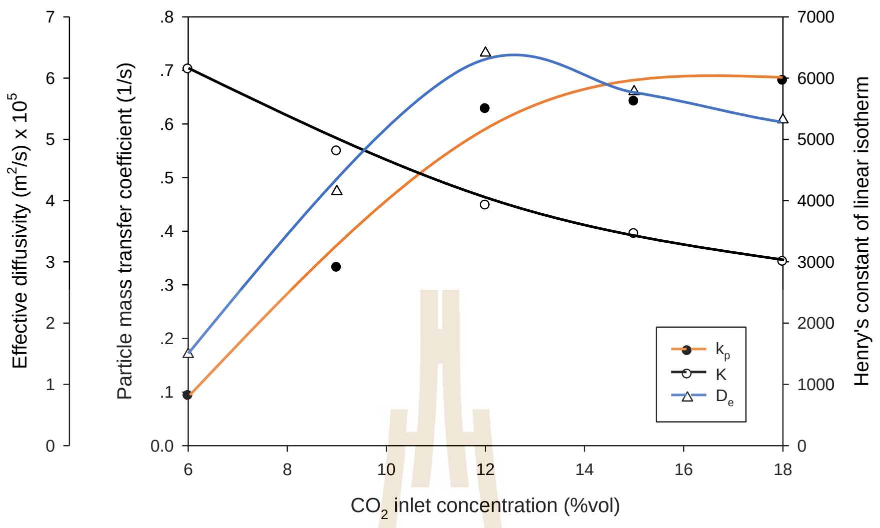
3. การเพิ่มความเร็วของแก๊สทำให้ค่า K เพิ่มขึ้นตามรูปที่ 4.21 ผลที่ได้นี้อาจเกี่ยวข้องกับผลของ k_p ในแง่ที่ว่าการเพิ่มความเร็วแก๊สทำให้ฟลักซ์การแพร่ของ CO_2 ในรูพรุนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โมเลกุลของ CO_2 เดินทางไปยังตำแหน่งดูดซับได้เร็วขึ้นจึงอาจเพิ่มความเป็นไปได้ในการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่าง CO_2 และพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ทำให้ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นได้

4. รูปที่ 4.22 ชี้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 17.5-26.8°C ทำให้ค่า K มีแนวโน้มลดลง ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการดูดซับ CO_2 โดยถ่านกัมมันต์ที่บรรจุด้วย NaOH จะแสดงการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งเป็นกระบวนการคายความร้อนจึงทำให้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

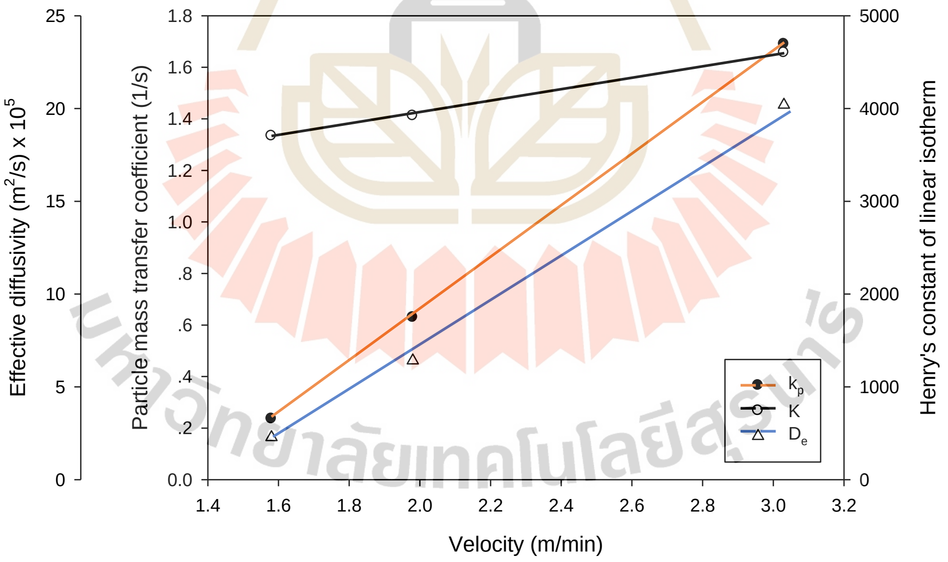
5. ค่า K เพิ่มตามปริมาณถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ดูดซับตามผลที่แสดงในรูปที่ 4.23 เช่นเดียวกับผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อค่า k_p อุณหภูมิของการดูดซับไม่ควรมีผลต่อค่า K



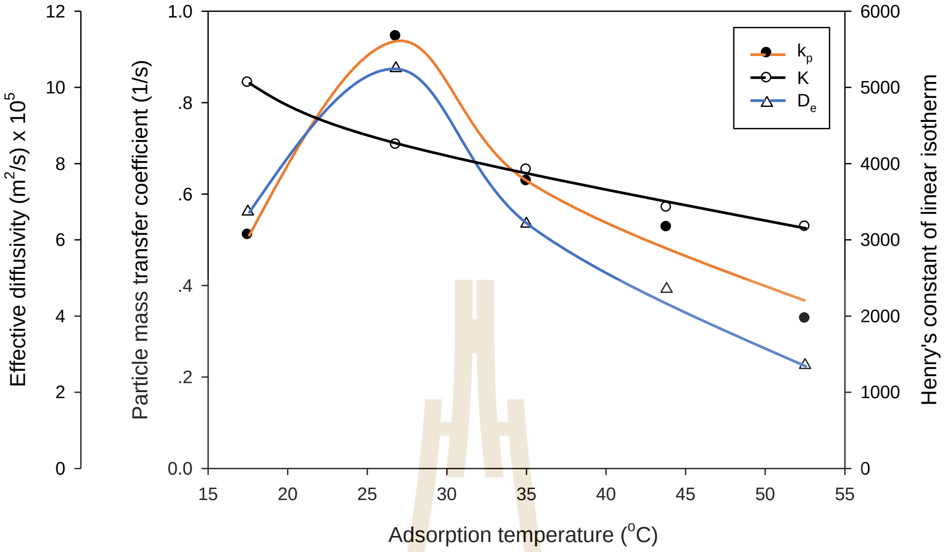
รูปที่ 4.19 ผลของปริมาณ NaOH ในถ่านกัมมันต์ที่มีต่อค่า k_p, K, และ D_e ในถ่านกัมมันต์ AC2 (ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า 12%vol และอุณหภูมิ 35°C)



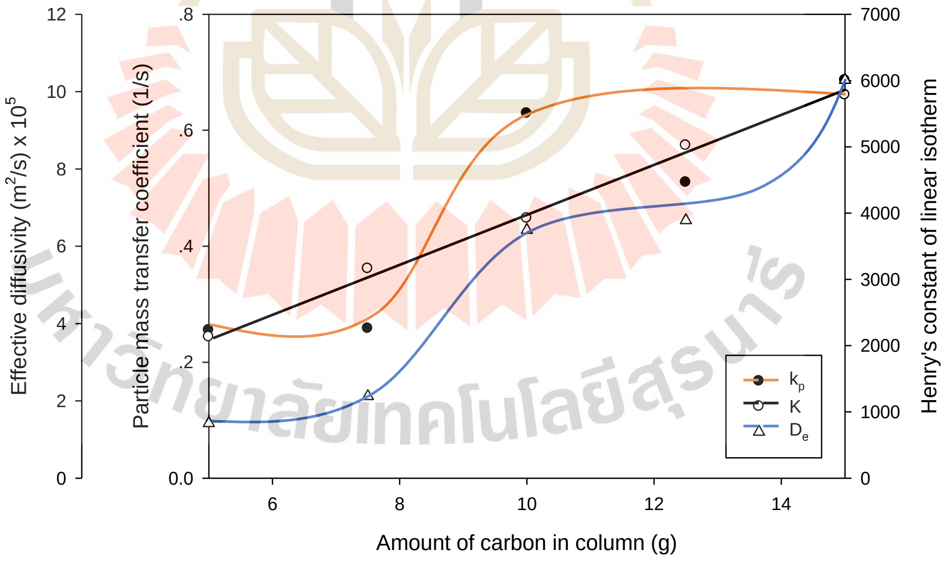
รูปที่ 4.20 ผลของความเข้มข้น CO_2 ในสายป้อนต่อค่า k_p, K, และ D_e ในถ่านกัมมันต์ AC2 (ความเข้มข้นของ NaOH 10%w อุณหภูมิ 35°C ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ 10 g)



รูปที่ 4.21 ผลของความเร็วแก๊สต่อค่า k_p, K, และ D_e ในถ่านกัมมันต์ AC2 (ความเข้มข้นของ NaOH 10%w อุณหภูมิ 35°C ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า 12%vol และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ 10 g)

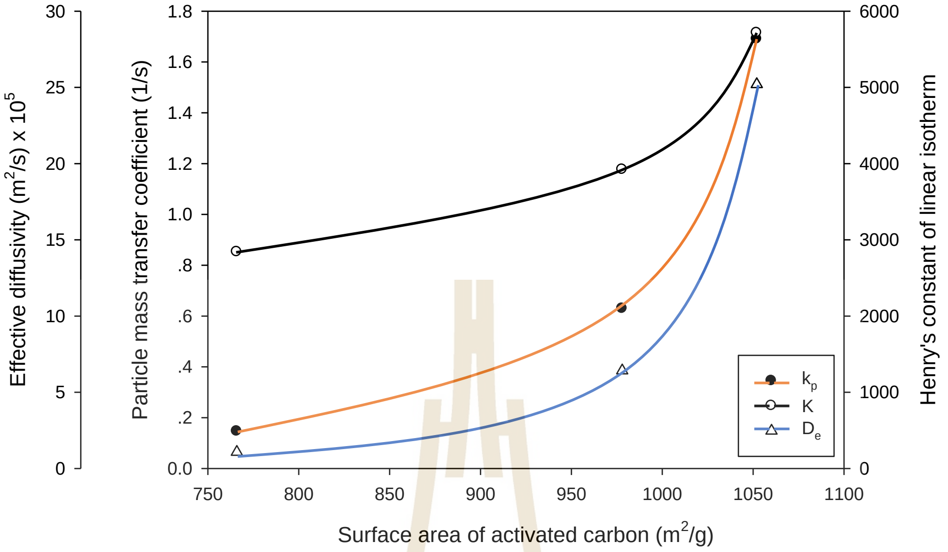


รูปที่ 4.22 ผลของอุณหภูมิการดูดซับต่อค่า k_p, K, และ D_e ในถ่านกัมมันต์ AC2 (ความเข้มข้นของ NaOH 10%w ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า 12%vol และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ 10 g)



รูปที่ 4.23 ผลปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ต่อค่า k_p, K, และ D_e ในถ่านกัมมันต์ AC2 (ความเข้มข้นของ NaOH 10%w ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า 12%vol และอุณหภูมิ 35°C)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.24 ผลของพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ต่อค่า k_p, K, และ D_e (ความเข้มข้นของ NaOH 10%w ความเร็วแก๊ส 1.98 m/min ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า 12%vol และอุณหภูมิ 35°C)

6. ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงจะให้ค่า K สูงตามด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเติม NaOH ในปริมาณเท่ากัน ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรรูพรุนมากกว่าจะสามารถรองรับโมเลกุลของ NaOH ให้กระจายตัวบนพื้นผิวได้มากกว่า ทำให้รูพรุนมีขนาดเฉลี่ยที่มากกว่า ดังนั้นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจึงสามารถ เดินทางไปยังตำแหน่งดูดซับได้รวดเร็วกว่า เป็นการเพิ่มโอกาสในการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับได้มากกว่า

สำหรับผลของตัวแปรต่างๆ ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เฉลี่ยในรูพรุน (D_e) แสดงในรูปที่ 4.19 4.20 4.21 4.22 4.23 และ 4.24 ตัวแปรทั้ง 6 ตัวแปรมีผลต่อค่า D_e ในลักษณะเดียวกับผลของ k_p ที่ได้อธิบายมาแล้ว

4.5 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร

หัวข้อนี้อภิปรายการวิเคราะห์ผลความอ่อนไหวของตัวแปรด้วยวิธีการจัดอันดับ (Ranking) ซึ่งสามารถอธิบายผลกระทบของตัวแปรต้นที่มีต่อผลตัวแปรตาม จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.5 พบว่าผลการบรรจุ NaOH ในถ่านกัมมันต์ให้ค่า Kendall's correlation (τ) เท่ากับ -0.72 แสดงว่าการเพิ่มปริมาณการบรรจุ NaOH จะทำให้ปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรู (q_B) ลดลงในช่วงความ

เข้มข้น NaOH เท่ากับ 7.5-15wt% ซึ่งจากผลของกราฟเบรกทรูการเพิ่มการบรรจุ NaOH ในถ่านกัมมันต์โดยใช้สารละลาย NaOH ในช่วงแคบๆ 0-5wt% ทำให้ q_B เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ค่า τ ชี้ถึงความอ่อนไหวของตัวแปรการบรรจุ NaOH ต่อ q_B ว่ามีความอ่อนไหวค่อนข้างสูงในทิศทางตรงกันข้าม

สำหรับผลของความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า พบว่าค่า τ เท่ากับ 0.80 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้าจะทำให้ q_B เพิ่มขึ้นด้วยซึ่งสอดคล้องกับผลของ q_B ที่คำนวณได้จากกราฟเบรกทรู

จากการจัดอันดับผลของความเร็วแก๊สพบว่า ค่า τ เท่ากับ 1 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วแก๊สผสมในช่วง 1.58-3.03 m/min จะทำให้ปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรู q_B เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลของกราฟเบรกทรูเช่นกัน

ผลของอุณหภูมิการดูดซับพบว่าค่า τ เท่ากับ -1 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับจะทำให้ปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรู q_B ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของกราฟเบรกทรู

ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์มีค่า τ เท่ากับ 0.20 หรือเข้าใกล้ 0 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์มีผลค่อนข้างน้อยต่อปริมาณการดูดซับ CO_2 ที่เวลาเบรกทรู q_B

พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มีค่า τ เท่ากับ 1 ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะทำให้ปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรูเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร

สภาวะการทดลอง	τ	ผลกระทบ
การบรรจุ NaOH	-0.72	มีผลไปในทิศทางตรงกันข้าม
ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า	0.80	มีผลไปในทิศทางเดียวกัน
ความเร็วแก๊สผสม	1	มีผลไปในทิศทางเดียวกัน
อุณหภูมิการดูดซับ	-1	มีผลไปในทิศทางตรงกันข้าม
ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์	0.2	ไม่มีผลต่อตัวแปรตาม
พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์	1	มีผลไปในทิศทางเดียวกัน

4.6 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)

การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองเป็นการวิเคราะห์ที่เริ่มจากการออกแบบการทดลอง 2^k แฟกทอเรียลและการออกแบบการทดลอง Box-Behnken ดังตารางที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ โดยตัวแปรตามคือปริมาณการดูดซับ CO_2 ที่เวลาเบรกทรู (q_B) จากนั้นทำการวิเคราะห์เชิงถดถอย (Regression

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

analysis) ด้วยสมการพหุนาม (Polynomial equation) อันดับที่ 1 ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ออกมาเป็นสมการดังต่อไปนี้

$$q_B = 14.8 - 2.23X_1 + 2.36X_2 + 0.32X_3 - 5.36X_4 + 0.073X_5 + 1.01X_6 \quad (4.1)$$

เมื่อ X_1 คือ ปริมาณการบรรจุ NaOH ในช่วง -1 ถึง 1 โดยนิยามว่า $X_1 = \dfrac{X_{NaOH,i} - X_{NaOH,mid}}{X_{NaOH,mid}}$

X_2 คือ ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า ในช่วง -1 ถึง 1 โดยนิยามว่า $X_2 = \dfrac{X_{CO_2,i} - X_{CO_2,mid}}{X_{CO_2,\min}}$

X_3 คือ ความเร็วแก๊สผสม ในช่วง -1 ถึง 1 โดยนิยามว่า $X_3 = \dfrac{X_{V,i} - X_{V,avg}}{X_{V,\max} - X_{V,avg}}$

X_4 คือ อุณหภูมิการดูดซับ ในช่วง -1 ถึง 1 โดยนิยามว่า $X_4 = \dfrac{X_{Temp.,i} - X_{Temp.,mid}}{X_{Temp.,\min}}$

X_5 คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ ในช่วง -1 ถึง 1 โดยนิยามว่า $X_5 = \dfrac{X_{BH,i} - X_{BH,mid}}{X_{BH,\min}}$

X_6 คือ พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ ในช่วง -1 ถึง 1 โดยนิยามว่า $X_6 = \dfrac{X_{SA,i} - X_{SA,avg}}{X_{SA,\max} - X_{SA,avg}}$

จากการวิเคราะห์สมการพหุนามอันดับ 1 พบว่าค่า R^2 เท่ากับ 0.791 และค่า adj R^2 เท่ากับ 0.781 ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากการวิเคราะห์พหุนามอันดับ 1 เป็นการวิเคราะห์เชิงเส้น ซึ่งการวิเคราะห์นี้สามารถอธิบายได้ว่าผลการทดลองมีจุดโค้งซึ่งทำให้ค่า R^2 และ adj R^2 ออกมาค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจะต้องทำการวิเคราะห์เชิงถดถอยด้วยสมการพหุนามอันดับ 2 เพื่อให้สามารถอธิบายจุดโค้งสำหรับผลทดลองได้ ซึ่งผลการวิเคราะห์ถดถอยด้วยสมการพหุนามอันดับ 2 ได้สมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} q_B = {} & 16.8 - 2.23X_1 + 2.36X_2 + 0.32X_3 - 5.36X_4 + 0.073X_5 + 1.01X_6 - 1.75X_1^2 - 1.11X_2^2 \\ & - 0.524X_3^2 + 0.725X_4^2 - 0.051X_5^2 - 0.349X_6^2 - 0.688X_1X_2 + 0.091X_1X_3 + 0.965X_1X_4 + 0.294X_1X_5 \\ & + 1.13X_1X_6 + 1.06X_2X_3 - 0.94X_2X_4 - 0.079X_2X_5 + 0.136X_2X_6 - 0.205X_3X_4 + 0.31X_3X_5 \\ & + 0.133X_3X_6 - 0.189X_4X_5 - 0.404X_4X_6 - 0.192X_5X_6 \end{aligned} \quad (4.2)$$

เมื่อ X_1 คือ ปริมาณการบรรจุ NaOH ในช่วง -1 ถึง 1

X_2 คือ ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า ในช่วง -1 ถึง 1

X_3 คือ ความเร็วแก๊สผสม ในช่วง -1 ถึง 1

X_4 คือ อุณหภูมิการดูดซับ ในช่วง -1 ถึง 1

X_5 คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ ในช่วง -1 ถึง 1

X_6 คือ พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ ในช่วง -1 ถึง 1

จากการวิเคราะห์สมการพหุนามอันดับสองพบว่าค่า R^2 เท่ากับ 0.919 และค่า adj R^2 เท่ากับ 0.896 เพิ่มขึ้นจากเดิมค่อนข้างมากและมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งชี้ว่าสมการพหุนามอันดับ 2 สามารถใช้อธิบายผลการทดลองได้ดี แต่การใช้สมการที่มีตัวแปรค่อนข้างมากทำให้มีความยุ่งยากในการใช้งาน ดังนั้นผลจากการวิเคราะห์สามารถลดทอนตัวแปรลงได้จากการพิจารณาค่า P value (ตารางที่ 4.6) ซึ่งสามารถอธิบายว่าตัวแปรใดที่มีความสำคัญโดยหากตัวแปรที่ให้ค่า P value มากกว่า 0.05 ตัวแปรนั้นจะไม่มีความสำคัญต่อตัวแปรตามหรือ q_B นั่นเอง จากการวิเคราะห์ผลในตารางที่ 4.6 พบว่าสามารถตัดตัวแปรที่มีค่า P value มากกว่า 0.05 ออกจากสมการ 4.2 ได้เนื่องจากมีผลต่อ q_B น้อยกว่าตัวแปรอื่นๆ
ดังนั้นสมการถอดถอยอันดับ 2 ที่ตัดตัวแปรที่ไม่สำคัญทิ้งจะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$\begin{aligned} q_B &= 16.8 - 2.23X_1 + 2.36X_2 - 5.36X_4 + 1.01X_6 - 1.80X_1^2 - 1.17X_2^2 \\ &\quad - 0.688X_1X_2 + 0.965X_1X_4 + 1.13X_1X_6 + 1.06X_2X_3 - 0.94X_2X_4 \end{aligned} \tag{4.3}$$

เมื่อ	X_1	คือ	ปริมาณการบรรจุ NaOH ในช่วง -1 ถึง 1
	X_2	คือ	ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า ในช่วง -1 ถึง 1
	X_3	คือ	ความเร็วแก๊สผสม ในช่วง -1 ถึง 1
	X_4	คือ	อุณหภูมิการดูดซับ ในช่วง -1 ถึง 1
	X_5	คือ	ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ ในช่วง -1 ถึง 1
	X_6	คือ	พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ ในช่วง -1 ถึง 1

จากสมการข้างต้นพบว่าตัวแปร X_5 (ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์) ไม่มีผลต่อตัวแปร q_B ซึ่งยืนยันผลจากการวิเคราะห์กราฟเบรกทรูและการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร โดยสมการที่ 4.3 ให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.905 และค่า adj R^2 เท่ากับ 0.896 เมื่อเทียบกับสมการที่ 4.2 พบว่าค่า R^2 ของสมการ 4.3 ลดลงเล็กน้อยและค่า adj R^2 มีค่าเท่ากัน ดังนั้นเราสามารถใช้สมการที่ 4.3 แทนสมการ 4.2 ได้ สำหรับการใช้งานสมการ 4.3 นั้นจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรลดรูปซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง -1 และ 1 ให้เป็นตัวแปรที่อยู่ในช่วงของสภาวะการทดลองตามตารางที่ 3.1 ดังนั้นทำการจัดรูปสมการ 4.3 ใหม่ได้สมการสุดท้ายดังนี้

ตารางที่ 4.6 ผลของค่า P value จากการวิเคราะห์ถดถอยด้วยพหุนามอันดับ 2

ตัวแปร	P value
ตัวแปรคงที่	0.000
X_1	0.000
X_2	0.000
X_3	0.124
X_4	0.000
X_5	0.723
X_6	0.000
X_1^2	0.000
X_2^2	0.013
X_3^2	0.236
X_4^2	0.103
X_5^2	0.909
X_6^2	0.430
X_1X_2	0.003
X_1X_3	0.693
X_1X_4	0.000
X_1X_5	0.204
X_1X_6	0.000
X_2X_3	0.000
X_2X_4	0.000
X_2X_5	0.731
X_2X_6	0.553
X_3X_4	0.374
X_3X_5	0.180
X_3X_6	0.564
X_4X_5	0.412
X_4X_6	0.081
X_5X_6	0.404

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$q_B = 22.84 - 0.024X_1 + 1.04X_2 - 2.92X_3 - 0.254X_4 - 8.51\times10^{-4}X_5 - 2.47\times10^{-5}X_1^2 - 0.033X_2^2 - 4.25\times10^{-4}X_1X_2 + 2.04\times10^{-4}X_1X_4 + 2.93\times10^{-5}X_1X_5 + 0.244X_2X_3 - 8.95\times10^{-3}X_2X_4 \quad (4.4)$$

เมื่อ X_1 คือ ปริมาณการบรรจุ NaOH ในช่วง 0 ถึง 540 mg NaOH/g carbon

X_2 คือ ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า ในช่วง 6 ถึง 18 %vol

X_3 คือ ความเร็วแก๊สผสม ในช่วง 1.58 ถึง 3.03 m/min

X_4 คือ อุณหภูมิการดูดซับ ในช่วง 17.5 ถึง 52.5 °C

X_5 คือ พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ ในช่วง 766 ถึง 1052 m^2/g

เมื่อเปรียบเทียบค่า q_B ระหว่างผลการทดลองและจากการคำนวณ โดยสมการ 4.4 ได้ร้อยละความผิดพลาดแสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่าค่าความผิดพลาดส่วนใหญ่อยู่ในช่วงร้อยละ 0-20 และสามารถคำนวณค่าความผิดพลาดเฉลี่ยได้จากสมการต่อไปนี้

$$\%Avg.error = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{X_{exp} - X_{cal}}{X_{exp}}\right)\times 100}{N} \quad (4.5)$$

เมื่อ X_{exp} คือ ค่าจากการทดลอง

X_{cal} คือ ค่าจากการคำนวณ

N คือ จำนวนการทดลอง

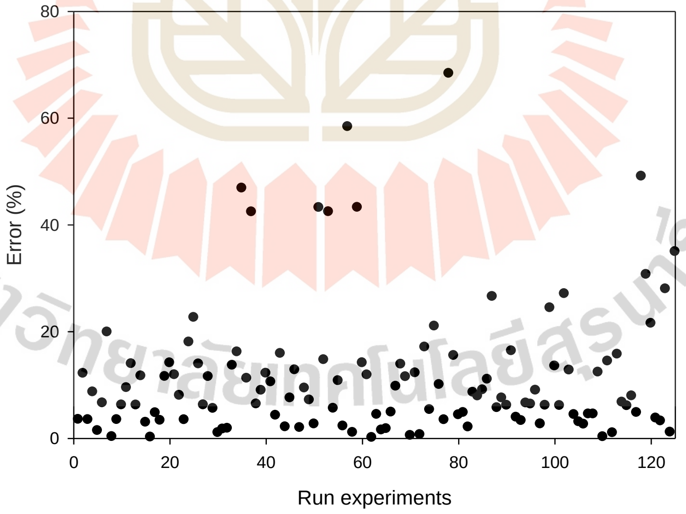
จากการคำนวณพบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 11.38 ซึ่งยอมรับได้และจากค่า R^2 และ adj R^2 ค่อนข้างเข้าใกล้ 1 มาก ดังนั้นสมการที่ 4.4 สามารถใช้อธิบายผลการทดลองภายใต้สภาวะการทดลองทั้ง 6 สภาวะได้ค่อนข้างดี

การหาสภาวะที่ให้ปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรูสูงสุด ($q_{B,max}$) จากสมการที่ 4.4 แสดงดังตารางที่ 4.7 ซึ่งพบว่า q_B สูงสุดเท่ากับ 27.37 mg/g ใช้สภาวะการทดลอง การบรรจุ NaOH เท่ากับ 102.6 mg NaOH/g carbon (ความเข้มข้น NaOH 2.85wt%) ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้าเท่ากับ 18 %vol ความเร็วแก๊สผสมเท่ากับ 3.03 m/min อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 17.5 °C ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์เท่ากับ 5 g (เนื่องจากสมการไม่ปรากฏค่าปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ ดังนั้นสามารถเลือกใช้ค่าเท่าไหร่ก็ได้ จึงเลือกใช้ค่าที่น้อยที่สุดเพื่อประหยัดในการใช้วัสดุดูดซับ) และพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์เท่ากับ 1052 m^2/g

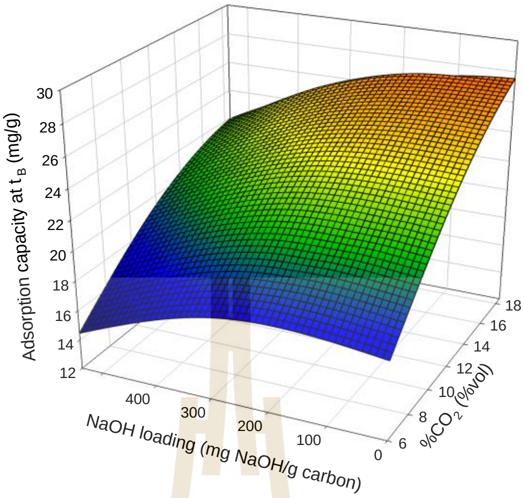
ตารางที่ 4.7 ผลการหาสภาวะการทดลองที่ทำให้ปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรูสูงสุด ($q_{B,max}$)

ปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรูสูงสุด $q_{B,max}$ (mg/g)	ปริมาณการบรรจุ NaOH (mg/g)	ความเข้มข้นของ CO_2 (%vol)	ความเร็วแก๊สผสม (m/min)	อุณหภูมิการดูดซับ (°C)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ (g)	พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (m^2/g)
27.37	102.6	18	3.03	17.5	5	1052

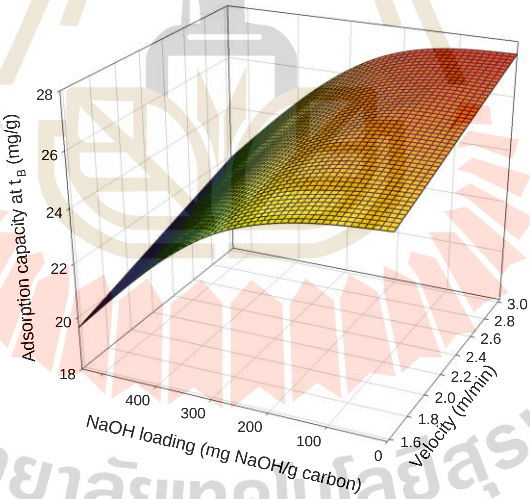
จากรูปที่ 4.26 ถึง 4.29 เป็นการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรู (q_B) เพื่อแสดงให้เห็นในรูปแบบของกราฟ 3 แกน ทำให้เห็นพื้นผิวของกราฟและแสดงจุดสูงสุดที่ทำให้ปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรูมีค่ามากสุดโดยการเปลี่ยนแปลงค่า 2 ตัวแปรและให้ 3 ตัวแปรนั้นคงค่าไว้ที่จุดสูงสุดตามตารางที่ 4.7 โดยสังเกตุว่าความโค้งจะอยู่ที่ผลการบรรจุ NaOH ของทุกๆกราฟ ซึ่งบ่งบอกว่าตัวแปรของการบรรจุ NaOH ในถ่านกัมมันต์ส่งผลให้เกิดจุดสูงสุดของปริมาณการดูดซับ CO_2



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดและจำนวนการทดลอง

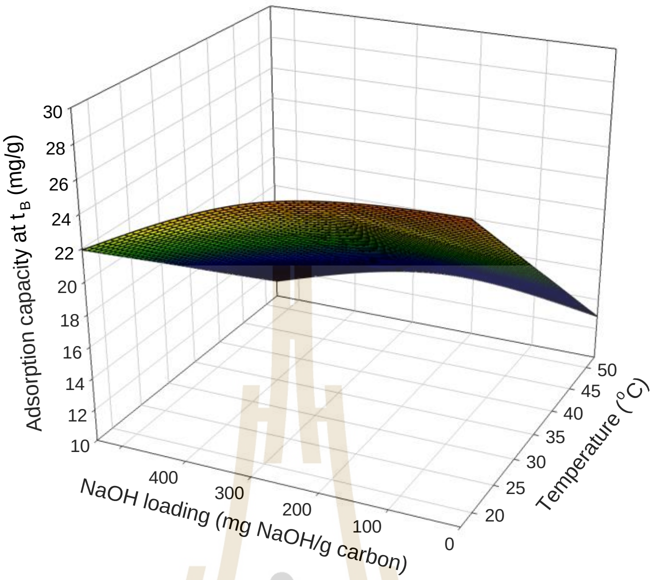


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรูกับการบรรจุ NaOH และ ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า

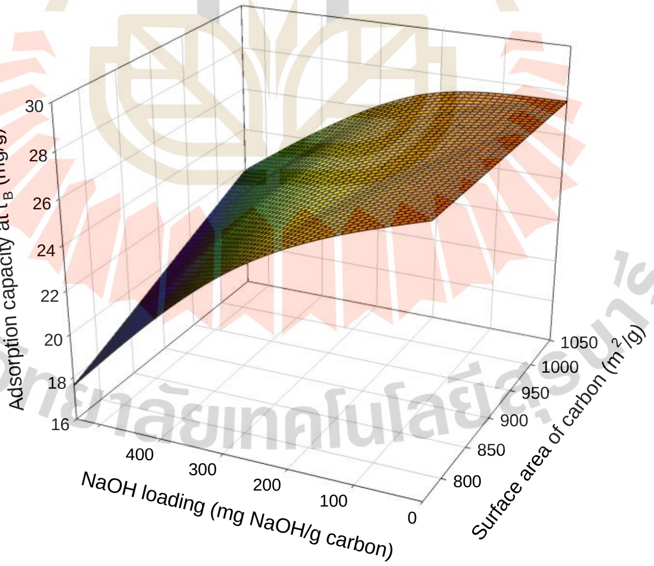


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรูกับการบรรจุ NaOH และ ความเร็วแก๊สผสม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



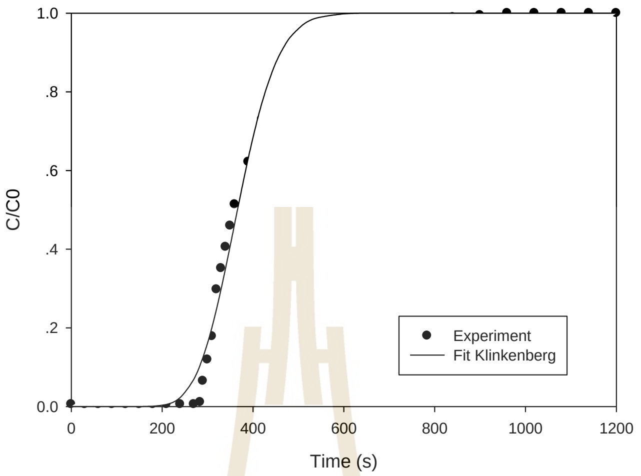
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรูกับการบรรจุ NaOH และ อุณหภูมิการดูดซับ



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรูกับการบรรจุ NaOH และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.6.1 การทดลองการดูดซับ CO_2 เพื่อยืนยันสภาวะการดูดซับที่ให้ $q_{B,max}$



รูปที่ 4.30 กราฟเบรกทรูจากการทดลองของสภาวะการทดลองที่ให้ค่าปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรูสูงสุด

เมื่อนำสภาวะที่ให้การดูดซับที่เวลาเบรกทรูสูงสุด ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนองตามตารางที่ 4.7 ไปทำการทดลองเก็บข้อมูลกราฟเบรกทรูได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.30 พบว่าได้ผลของ q_B ดังแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งค่าจากการทดลอง (25.3 mg/g) ให้ผลต่ำกว่าค่าจากการคำนวณประมาณ 8.12% ซึ่งช่วยยืนยันผลการหา $q_{B,max}$ ด้วยวิธี RSM

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและการคำนวณของสภาวะที่ทำให้ปริมาณการดูดซับ CO_2 สูงสุดจากวิธีพื้นผิวตอบสนอง

ปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรู q_B (mg/g) จากการทดลอง	ปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรู q_B (mg/g) จากการคำนวณ	ความคาดเคลื่อน (%)
25.30	27.37	8.12

สำหรับสมการสหสัมพันธ์ของเวลาเบรกทรู (t_B) สามารถใช้วิธีการวิเคราะห์เช่นเดียวกับการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองของตัวแปร q_B โดยได้สมการดังต่อไปนี้

$$t_B = 317 - 41X_1 - 123X_2 - 82.6X_3 - 98.3X_4 + 153X_5$$
$$+20.3X_6 - 34.8X_1^2 + 43.7X_2^2 - 23.3X_3^2 + 14.4X_1X_3$$
$$+17.7X_1X_4 - 13.3X_1X_5 + 18.8X_1X_6 + 51.4X_2X_3 \quad (4.6)$$
$$+37.9X_2X_4 - 61.4X_2X_5 + 23.4X_3X_4 - 37.1X_3X_5$$
$$-50.2X_4X_5$$

เมื่อ X_1 คือ ปริมาณการบรรจุ NaOH ในช่วง -1 ถึง 1

X_2 คือ ความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า ในช่วง -1 ถึง 1

X_3 คือ ความเร็วแก๊สผสม ในช่วง -1 ถึง 1

X_4 คือ อุณหภูมิการดูดซับ ในช่วง -1 ถึง 1

X_5 คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ ในช่วง -1 ถึง 1

X_6 คือ พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ ในช่วง -1 ถึง 1

จากการวิเคราะห์พบว่าสมการ 4.6 ให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.96 ดังนั้นสามารถวสรุปได้ว่าสมการ 4.6 สามารถใช้ทำนายค่าเวลาเบรกทรูได้ดี

4.7 ตัวอย่างการคำนวณการขยายขนาดเครื่องดูดซับเบดนิ่ง

หัวข้อนี้แสดงตัวอย่างการคำนวณขนาดของเครื่องดูดซับเบดนิ่งขนาดใหญ่และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้ โดยใช้สมการการออกแบบที่พัฒนามาจากงานวิจัยนี้ข้อมูลและสภาวะการทำงานของเครื่องดูดซับที่ต้องการขยายขนาดมีดังนี้

ใช้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว = 1052 m^2/g (AC3) โดยบรรจุ NaOH ที่ความเข้มข้น NaOH = 5wt% หรือ 180 mg/g

อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Q) = 1000 m^3/hr = 0.2778 m^3/min

ความเข้มข้นของ CO_2 สายป้อนเข้า = 13vol%

อัตราส่วนความเข้มข้นที่เวลาเบรกทรู C/C_0 = 0.05

อุณหภูมิการดูดซับ = 35°C

ความพรุนของเบด (ε_b) = 0.54

ความหนาแน่นของอนุภาค = 2.02 g/cm^3 = 2020 kg/m^3

ความเร็วแก๊สภายนอก (u_0) = 1.58 m/min

เวลาเบรกทรู (t_B) = 7 days = 604800 sec

ค่า k_p และ K หาได้จากผลการศึกษาซึ่งจากสภาวะข้างต้นพบว่าค่า $k_p = 0.7340\ s^{-1}$ และ K = 3925

ค่าความเร็วภายใน (u) = $u_0/\ \varepsilon_b$ = 2.02 m/min = 0.034 m/s

สามารถคำนวณหาความยาวเบด (L_B) จากสมการคลินเคนเบิร์ก สมการ 2.35

ซึ่งพบว่าได้ค่า L_B = 617 cm = 6.17 m

เส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์คำนวณจากค่า Q ตามสมการข้างล่างนี้

$$D_C = (\frac{4Q}{\pi u_0})^{1/2} \tag{4.7}$$

ได้เส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์ = 3.66 m = 366 cm

และน้ำหนักถ่านกัมมันต์ (W_C) จากสมการ

$$W_C = \frac{\pi D_C^2}{4} L_B (1-\varepsilon_B)\rho_p \tag{4.8}$$

ได้ค่าน้ำหนักถ่านกัมมันต์ = 60318 kg = 60 tons

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในเบดนิ่งด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่บรรจุด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และการวิเคราะห์ผลโดยวิธีพื้นผิวตอบสนองสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จากการวัดสมดุลการดูดซับแก๊ส N_2 ของถ่านกัมมันต์ดิบและถ่านกัมมันต์ที่เติม NaOH พบว่าไอโซเทิร์มของไนโตรเจนเป็นไอโซเทิร์มประเภทที่ 1 (Type I Isotherm) และค่าสมบัติความพรุน ซึ่งคำนวณจากข้อมูลไอโซเทิร์มพบว่าพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนรวม มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทรกตัวของ NaOH ในถ่านกัมมันต์

2. การประเมินพลศาสตร์การดูดซับ CO_2 ในเบดนิ่งในรูปกราฟเบรกทรูในแต่ละสภาวะการทดลองพบว่า เวลาเบรกทรู ปริมาณการดูดซับ CO_2 ที่เวลาเบรกทรูในหน่วย mg CO_2ต่อ g carbon และปริมาณการดูดซับ CO_2 ที่เวลาสมดุลมีค่าสูงสุดที่ปริมาณการแทรกตัวของ NaOH เท่ากับ 180 mg NaOH/g carbon และจากการเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับสูงสุดที่ความเข้มข้นวิกฤตของถ่านกัมมันต์และถ่านกัมมันต์ดิบพบว่าการบรรจุ NaOH สามารถเพิ่มปริมาณการดูดซับ CO_2 ได้ถึงร้อยละ 39 ถึง 48 สำหรับผลของความเข้มข้น CO_2 ในสายป้อนชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้น CO_2 สายป้อน ทำให้ปริมาณการดูดซับ CO_2 เพิ่มขึ้น แต่เวลาเบรกทรูลดลง ซึ่งแสดงผลเช่นเดียวกับความเร็วแก๊สผสม สำหรับอุณหภูมิการดูดซับพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับทำให้ปริมาณการดูดซับ CO_2 และเวลาเบรกทรูลดลง และสรุปได้ว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ สำหรับการเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ทำให้ปริมาณการดูดซับ CO_2 และเวลาเบรกทรูเพิ่มขึ้นตาม และสำหรับปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์พบว่าไม่มีผลกระทบต่อปริมาณการดูดซับ CO_2 แต่การเพิ่มของปริมาณถ่านกัมมันต์เป็นการเพิ่มเวลาเบรกทรูเท่านั้น

3. สำหรับการทดสอบสมการกราฟเบรกทรู พบว่าสมการกราฟเบรกทรูของคลินเคนเบิร์กสามารถอธิบายข้อมูลเบรกทรูได้ดีถึงค่า C/C_0 = 0.80 ที่ทุกสภาวะการทดลอง

4. การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรด้วยค่า Kendall's correlation พบว่าผลของปริมาณการแทรกตัวของ NaOH ในถ่านกัมมันต์มีค่าเท่ากับ -0.72 ซึ่งชี้ว่าการเพิ่ม NaOH เป็นผลทำให้ปริมาณการดูดซับลดลงผลการทดลองชี้ว่าปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้นแคบๆ ของสารละลาย NaOH ระหว่าง 0-5 wt% สำหรับค่า Kendall's correlation ของปริมาณถ่านกัมมันต์

ในคอลัมน์ชี้ให้เห็นว่าตัวแปรดังกล่าวไม่มีผลต่อปริมาณการดูดซับ CO_2 อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับผลของความเข้มข้น CO_2 สายป้อนมีทิศทางไปในทางเดียวกับปริมาณการดูดซับ CO_2 นั่นคือการเพิ่มความเข้มข้นของ CO_2 สายป้อนเป็นการเพิ่มปริมาณการดูดซับ CO_2 เช่นกัน ซึ่งคล้ายกับผลของความเร็วแก๊สและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และสำหรับอุณหภูมิการดูดซับพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปริมาณการดูดซับ CO_2 ลดลงหรือพูดได้ว่าอุณหภูมิการดูดซับแปรผกผันกับปริมาณการดูดซับ CO_2

5. การวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองสามารถสร้างสมการสหสัมพันธ์ที่รวมทั้ง 5 ตัวแปร (ยกเว้นปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์) ไว้ในสมการได้และพบว่า สภาวะที่ทำให้ปริมาณการดูดซับ CO_2 สูงสุดมีค่าเท่ากับ 27.37 mg CO_2/g ที่สภาวะการบรรจุ NaOH 102.6 mg NaOH/g carbon ความเข้มข้นของ CO_2 สายป้อน 18vol% ความเร็วแก๊ส 3.03 m/min อุณหภูมิการดูดซับ 17.5°C ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ 5 g (14.2 cm) และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ 1052 m^2/g

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการดูดซับ CO_2 โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่บรรจุด้วยด่างชนิดอื่นๆ เช่น เอมีน หรือ KOH เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ

2. ข้อจำกัดของสมการสหสัมพันธ์ที่นำเสนอ ประกอบด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจะต้องเป็นถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำเท่านั้น และเทคนิคในการแช่ถ่านกัมมันต์ในด่างควรเป็นเช่นเดียวกับงานวิจัยนี้

3. การศึกษาผลกระทบของตัวแปรอื่นๆ เพิ่มเติม เช่น ขนาดของอนุภาคถ่านกัมมันต์ เวลาในการแช่ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

Auta, M. and B. H. Hameed (2014). Adsorption of carbon dioxide by diethanolamine activated alumina beads in fixed bed. Chemical Engineering Journal 253: 350-355.

Ferreira, S. L. C., et al. (2007). Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. Analytica Chimica Acta 597(2): 179-186.

Guo, J. and A. C. Lua (2002). Textural and Chemical Characterizations of Adsorbent Prepared from Palm Shell by Potassium Hydroxide Impregnation at Different Stages. Journal of Colloid and Interface Science 254(2): 227-333.

Hosseini, S., et al. (2015). Adsorption of carbon dioxide using activated carbon impregnated with Cu promoted by zinc. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 52(Supplement C): 109-117.

Khalil, S. H., et al. (2012). Study on the improvement of the capacity of amine-impregnated commercial activated carbon beds for CO_2 adsorbing. Chemical Engineering Journal 183(Supplement C): 15-20.

Lee, C. S., et al. (2013). Impregnation of palm shell-based activated carbon with sterically hindered amines for CO_2 adsorption. Chemical Engineering Journal 219(Supplement C): 558-564.

Ngernyen, Y. (2007). Wood-based activated carbon: preparation, surface modification and adsorption study. Chemical Engineering. Nakhon Ratchasima, Suranaree University of Technology. Doctor of Philosophy.

Nuchitprasittichai, A. and S. Cremaschi (2013). Sensitivity of amine-based CO_2 capture cost: The influences of CO_2 concentration in flue gas and utility cost fluctuations. International Journal of Greenhouse Gas Control 13: 34-43.

Tan, Y.L., et al. (2014). Adsorption of carbon dioxide by sodium hydroxide-modified granular coconut shell activated carbon in a fixed bed. Energy 77(Supplement C): 926-931.

Zecca, A. and L. Chiari (2010). Fossil-fuel constraints on global warming. Energy Policy 38(1): 1-3.

K. Adriaan (1948). Numerical evaluation of equations describing transient heat and mass transfer in packed solids. Ind. Eng. Chem. 40(10): 1992-1994.

Henry C. Thomas. (1944). Heterogeneous Ion Exchange in a Flowing System. J. Am. Chem. Soc. 66(10): 1664-1666.

Dennis Y.C. Leung et al. (2014). An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 39: 426-443.

K. S. W. Sing et al. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid system with special reference to the determination of surface area and porosity. Pure&Appl. Chem. 57(4): 603-619.

Douglas C. Montgomery (2013). Design and Analysis of Experiments. Singapore: John Wiley&Sons Inc.

J. D. Seader and Ernest J. Henley (1998). Separation Process Principles. New York: John Wiley&Sons Inc.

ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย (2011). กระบวนการดูดซับสาร

M. S. Shafeeyan, et al. (2011). Ammonia modification of activated carbon to enhance carbon dioxide adsorption: Effect of pre-oxidation. Applied Surface Science. 257: 3936-3942.

Y. C. Chiang and R. S. Juang (2017). Surface modification of carbonaceous materials for carbon dioxide adsorption: A review. Journal of Taiwan Institute of Chemical Engineers. 71: 214-234.

B. Metz, O. Davidson, et al. (2005). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Special report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press.

Science Daily. (2018). Carbon dioxide emission from power plants rated worldwide [On-line]. Available: www.sciencedaily.com/releases/2007/11/071114163448.htm.

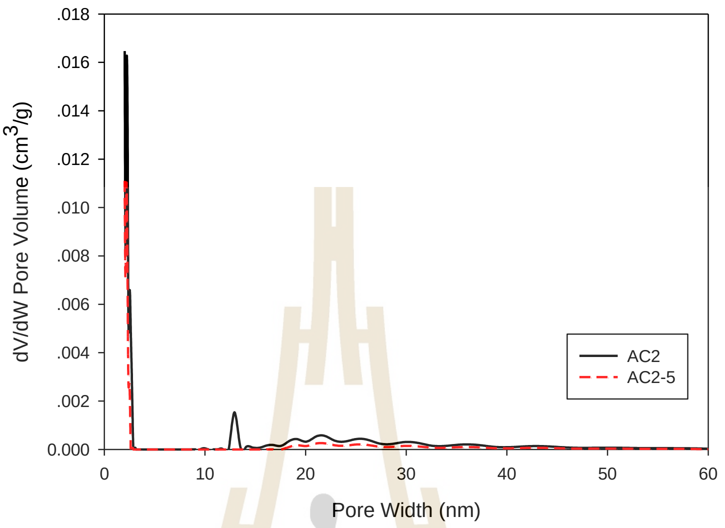
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

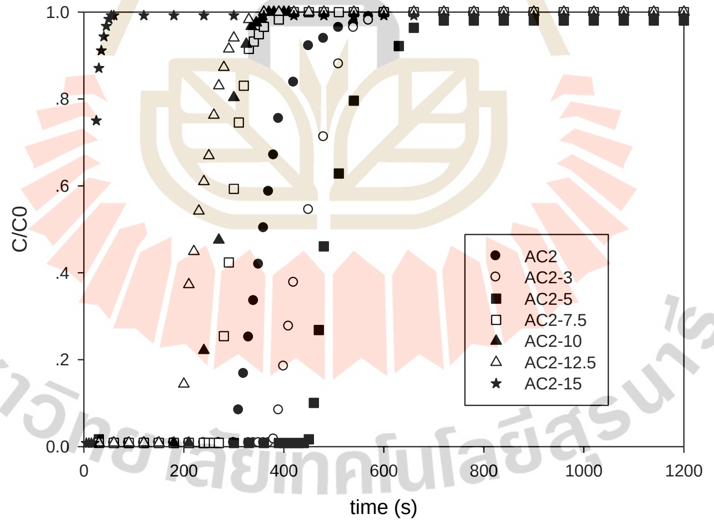
ข้อมูลการทดลองเพิ่มเติม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข้อมูลการทดลองเพิ่มเติม



รูปที่ ก.1 การกระจายขนาดของรูพรุนในถ่านกัมมันต์ AC2



รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง C/C0 กับ เวลา กราฟเบรกทรูของผลกระทบจากการบรรจุ NaOH ในถ่านกัมมันต์จากการดูดซับ CO_2

ตารางที่ ก.1 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับ CO_2 จากกราฟเบรกทรูของผลกระทบจากการบรรจุ NaOH ในถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	เวลาเบรกทรู, t_B (sec)	ปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรู, q_B (mg/g)	ปริมาณการดูดซับที่เวลาสมดุล, q_E (mg/g)	ความยาวของช่วงการถ่ายโอนมวล, L_{MTZ} (cm)
AC2	306	16.4	19.8	10.7
AC2-3	385	20.6	24.0	7.90
AC2-5	454	24.3	26.7	8.50
AC2-7.5	272	14.6	16.5	.6.33
AC2-10	216	11.6	14.3	9.79
AC2-12.5	165	8.84	12.8	12.3
AC2-15	20.3	1.09	1.34	14.3

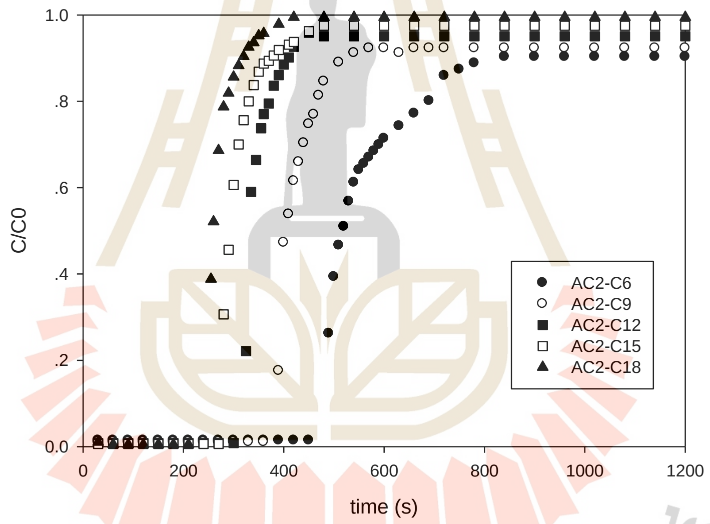
ตารางที่ ก.2 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับ CO_2 จากกราฟเบรกทรูของผลกระทบจากความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้า

CO_2 (%vol)	เวลาเบรกทรู, t_B (sec)	ปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรู, q_B (mg/g)	ปริมาณการดูดซับที่เวลาสมดุล, q_E (mg/g)	ความยาวของช่วงการถ่ายโอนมวล, L_{MTZ} (cm)
6	456	12.1	13.1	18.3
9	367	14.7	15.4	19.5
12	305	16.3	17.4	8.73
15	271	19.4	21.3	10.6
18	215	17.3	21.2	10.8

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.3 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับ CO_2 จากกราฟเบรกทรูของผลกระทบจากอุณหภูมิการดูดซับ

อุณหภูมิการดูดซับ (°C)	เวลาเบรกทรู, t_B (sec)	ปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรู, q_B (mg/g)	ปริมาณการดูดซับที่เวลาสมดุล, q_E (mg/g)	ความยาวของช่วงการถ่ายโอนมวล, L_{MTZ} (cm)
17.5	396	22.5	24.7	7.38
26.8	337	18.5	20.0	8.74
35	305	16.3	17.4	8.73
43.8	271	14.1	15.6	10.0
52.5	241	12.2	14.3	11.9



รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง C/C0 กับ เวลา กราฟเบรกทรูของผลกระทบจากความเข้มข้นของ CO_2 ขาเข้าจากการดูดซับ CO_2

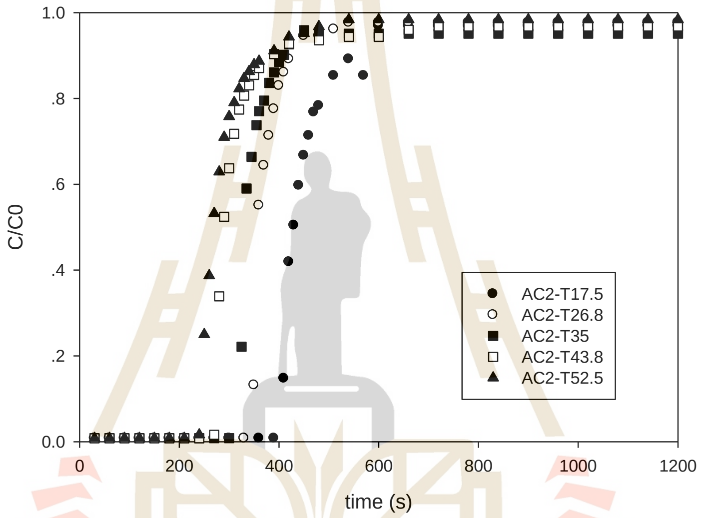
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.4 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับ CO_2 จากกราฟเบรกทรูของผลกระทบจากความเร็วแก๊สผสม

ความเร็วแก๊สผสม (m/min)	เวลาเบรกทรู, t_B (sec)	ปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรู, q_B (mg/g)	ปริมาณการดูดซับที่เวลาสมดุล, q_E (mg/g)	ความยาวของช่วงการถ่ายโอนมวล, L_{MTZ} (cm)
1.58	362	15.5	16.2	8.16

ตารางที่ ก.4 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับ CO_2 จากกราฟเบรกทรูของผลกระทบจากความเร็วแก๊สผสม (ต่อ)

ความเร็วแก๊สผสม (m/min)	เวลาเบรกทรู, t_B (sec)	ปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรู, q_B (mg/g)	ปริมาณการดูดซับที่เวลาสมดุล, q_E (mg/g)	ความยาวของช่วงการถ่ายโอนมวล, L_{MTZ} (cm)
1.98	305	16.3	17.4	8.73
3.03	200	18.4	24.9	8.00



รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง C/C0 กับ เวลา กราฟเบรกทรูของผลกระทบจากอุณหภูมิการดูดซับจากการดูดซับ CO_2

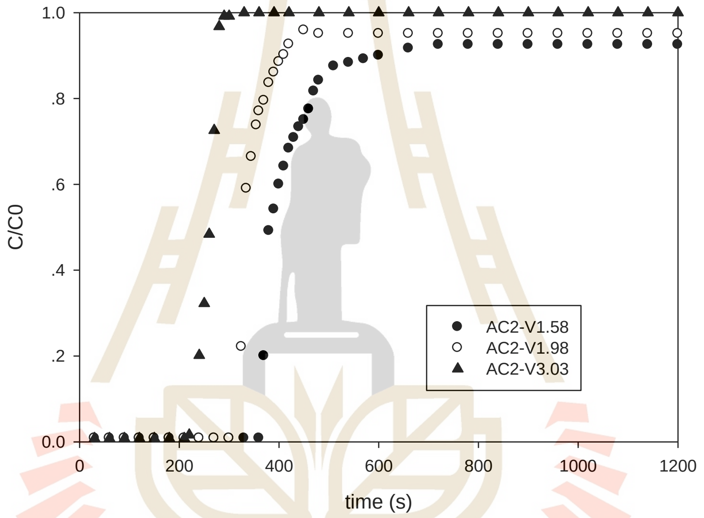
ตารางที่ ก.5 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับ CO_2 จากกราฟเบรกทรูของผลกระทบจากปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์

ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ (g)	เวลาเบรกทรู, t_B (sec)	ปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรู, q_B (mg/g)	ปริมาณการดูดซับที่เวลาสมดุล, q_E (mg/g)	ความยาวของช่วงการถ่ายโอนมวล, L_{MTZ} (cm)
5	127	13.7	20.6	7.96
7.5	241	17.4	21.4	12.9
10	305	16.5	17.4	10.4

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.5 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับ CO_2 จากกราฟเบรกทรูของผลกระทบจากปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ (ต่อ)

ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ (g)	เวลาเบรกทรู, t_B (sec)	ปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรู, q_B (mg/g)	ปริมาณการดูดซับที่เวลาสมดุล, q_E (mg/g)	ความยาวของช่วงการถ่ายโอนมวล, L_{MTZ} (cm)
12.5	396	17.1	18.5	12.4
15	458	16.5	17.7	13.7

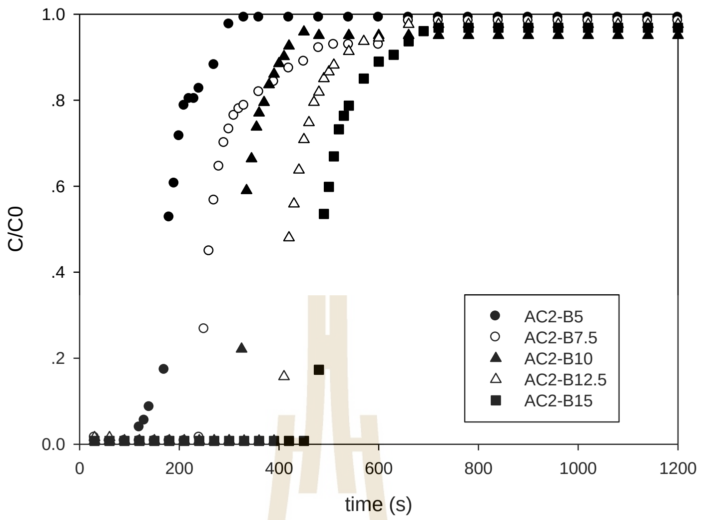


รูปที่ ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง C/C0 กับ เวลา กราฟเบรกทรูของผลกระทบจากความเร็วแก๊สผสมจากการดูดซับ CO_2

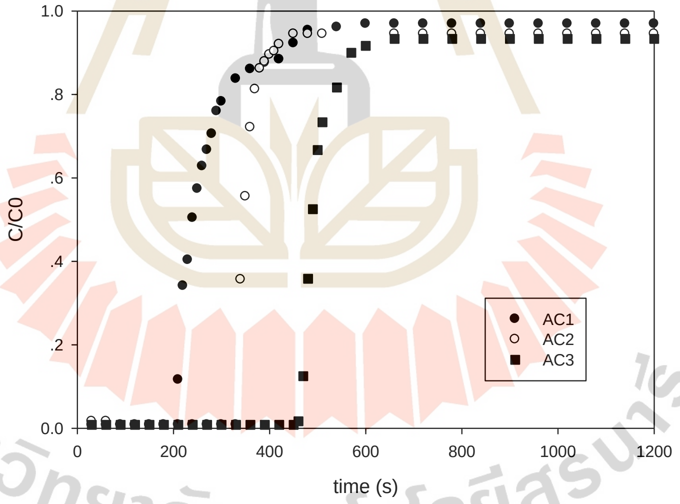
ตารางที่ ก.6 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับ CO_2 จากกราฟเบรกทรูของผลกระทบจากพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (m^2/g)	เวลาเบรกทรู, t_B (sec)	ปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทรู, q_B (mg/g)	ปริมาณการดูดซับที่เวลาสมดุล, q_E (mg/g)	ความยาวของช่วงการถ่ายโอนมวล, L_{MTZ} (cm)
766	192	10.3	13.8	21.4
978	331	16.3	17.4	21.5
1052	463	24.8	24.8	21.7

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ก.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง C/C0 กับ เวลา กราฟเบรกทรูของผลกระทบจากปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์จากการดูดซับ CO_2



รูปที่ ก.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง C/C0 กับ เวลา กราฟเบรกทรูของผลกระทบจากพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากการดูดซับ CO_2

ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Suravit Naksusuk, Chaiyot Tangsathitkulchai (2018). Carbon dioxide capture in a fixed bed of coconut shell activated carbon impregnated with sodium hydroxide: effects of carbon pore texture and alkali loading. Summitted to Engineering journal.

Suravit Naksusuk, Chaiyot Tangsathitkulchai, and Aroonsri Nuchitprasittichai (2019). Study of carbon dioxide capture by adsorption in a fixed bed of NaOH impregnated coconut-shell activated carbon using a response surface methodology. Pure and Applied Chemistry International Conference 2019, 7-8 February 2019, Bangkok International trade & exhibition centre (BITEC), Bangkok, Thailand.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายสุรวิทย์ นาคสู่สุข เกิดเมื่อวันที่ 2 เมษายน พ.ศ. 2537 เริ่มต้นศึกษาชั้นประถมที่โรงเรียนจันทร์ทองเอี่ยม จังหวัดนนทบุรี ชั้นประถมศึกษาปีที่ 4-6 ที่โรงเรียนเทศบาลบ้านโนนทัน จังหวัดขอนแก่น ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-3 ที่โรงเรียนเทพศิรินทร์ ขอนแก่น ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4-6 โรงเรียนเทพศิรินทร์ ขอนแก่น และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2559 โดยหลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนการศึกษาจากภายนอก ซึ่งเห็นว่าเป็นโอกาสในการพัฒนาตนเอง ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จากการทำวิจัยนี้ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้และความเข้าใจทางด้านกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในเบดนิ่งด้วยถ่านกัมมันต์เป็นอย่างดี และมีผลงานตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 1 ฉบับ และส่งผลงานในวารสารระดับนานาชาติ 1 ฉบับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี