

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับ

4.1.1 ลักษณะของถ่านกะลามะพร้าว

เนื่องจากกะลามะพร้าวมีความแข็ง และเหนียวมาก จึงเผาเพื่อความสะดวกในการลดและควบคุมขนาดของวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ ดังนั้นสภาวะการเผาให้เป็นถ่าน จึงมีความสำคัญต่อคุณภาพของถ่านกัมมันต์

ในขั้นตอนการเผาให้เป็นถ่าน อุณหภูมิและช่วงเวลาในการเผา มีผลต่อลักษณะเบื้องต้นของถ่านกะลามะพร้าว ดังแสดงในตาราง

สภาวะการทำให้เป็นถ่าน	ลักษณะทั่วไป
200 °C 2 ชั่วโมง	มีลักษณะคล้ายกับกะลา ก่อนเผา โดยมีสีน้ำตาลเข้มมากขึ้น
300 °C 1 ชั่วโมง	มีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ เมื่อตัดดูพื้นผิวตัดขวาง พบว่ากะลามีสีดำเฉพาะผิวภายนอกของกะลาทั้งสองด้าน
300 °C 2 ชั่วโมง	เมื่อตัดดูพื้นผิวตัดขวาง พบว่ากะลามีสีดำบริเวณผิวภายนอกของกะลาทั้งสองด้านเพิ่มมากขึ้น
300 °C 3 ชั่วโมง	เมื่อตัดดูพื้นผิวตัดขวาง พบว่ากะลาเปลี่ยนเป็นสีดำทั้งหมด แต่ยังคงมีความแข็งอยู่มาก
350 °C 3 ชั่วโมง	เมื่อตัดดูพื้นผิวตัดขวาง พบว่ากะลาเปลี่ยนเป็นสีดำทั้งหมด และเปราะมากขึ้น
400 °C 1 ชั่วโมง	กะลาเปลี่ยนเป็นเถ้าทั้งหมด

ที่การเผากะลามะพร้าวที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส กะลามะพร้าวยังคงสภาพอยู่ทั้งนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิในการ เผาให้เป็นถ่านยังไม่สูงเพียงพอที่จะทำให้สารประกอบอินทรีย์ในวัตถุดิบสลายตัว และหลุดออกจากโครงสร้างได้ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 300 องศาเซลเซียส กะลามะพร้าวเริ่มกลายสภาพเป็นถ่าน จากพื้นผิวภายนอกเข้าสู่ภายใน ทั้งนี้เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ในวัตถุดิบสลายและแพร่ออกมาภายนอกได้ ดังนั้นเมื่อเวลาในการเผาให้เป็นถ่านเพิ่มสูงขึ้น สารประกอบอินทรีย์ในวัตถุดิบ สลายและแพร่ออกมาภายนอกได้มากขึ้น แต่ถ่านที่ผลิตได้ยังคงมีความแข็งอยู่มาก และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 350 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จึงเป็นการเร่งอัตราการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์ให้มากขึ้น ถ่านที่ผลิตได้จึงมีความเปราะมากขึ้น และ

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 400 องศาเซลเซียส วัตถุประสงค์จะกลายเป็นแก๊สทั้งหมด อาจเกิดขึ้นเนื่องจาก น้ำมันที่มีอยู่ในวัตถุประสงค์สลายตัว ให้แก๊สออกซิเจน และทำปฏิกิริยากับวัตถุประสงค์จึงทำให้เกิดเป็นแก๊ส ดังนั้น จึงเลือกใช้สภาวะ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เนื่องจากสามารถเผาให้เป็น ถ่าน และสะดวกในการลดขนาดของวัตถุประสงค์ในการผลิต

4.1.2 ผลกระทบของปริมาณซิงก์คลอไรด์

ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้สารเคมีช่วยในขั้นตอนการกระตุ้นให้ถ่านกะลามะพร้าว มีพื้นที่ผิวเพิ่มสูงขึ้นเพื่อให้เพิ่มความสามารถในการดูดซับ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ สารละลายซิงก์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น ซึ่งซิงก์คลอไรด์มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว เป็นสารดูดน้ำ ละลายน้ำจะได้ดีเมื่อ มี ความเข้มข้นสูงจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน $[ZnCl_3]^-$ หรือ $[ZnCl_4]^{2-}$ สารละลายเข้มข้นซิงก์คลอไรด์มีความเป็นกรดสูงซึ่งสามารถละลายแป้ง, เซลลูโลสและสารอินทรีย์ ต่างๆ ได้ ลักษณะสมบัติทางกายภาพของซิงก์คลอไรด์แสดงดังตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1: ลักษณะสมบัติของซิงก์คลอไรด์

สมบัติทางกายภาพ	
มวลโมเลกุล	136.28
จำนวนโมเลกุลของน้ำที่เกิดไฮเดรต	4,3,2.5,1.5,1,0
สี	ขาว
ความหนาแน่น	2.91
จุดหลอมเหลว(องศาเซลเซียส)	275
จุดเดือด(องศาเซลเซียส)	756
ความร้อนในการหลอมเหลว(แคลอรีต่อกรัม)	5540

จากผลการทดลองพบว่า ถ่านกะลาก่อนนำมาผ่านขั้นตอนการกระตุ้นจะมีพื้นที่ BET 1.4 ตารางเมตรต่อกรัม และมีค่าไอโอดีน 66 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังตาราง 4.2

และเมื่อผ่านขั้นตอนการกระตุ้นโดยใช้ซิงก์คลอไรด์ต่อถ่านกะลา โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 ถ่านที่ผลิตได้มีพื้นที่ผิว BET เป็น 590.07 ตารางเมตรต่อกรัมซึ่งประมาณ 400 เท่าของ ถ่านกะลา และค่าไอโอดีนสูงขึ้นเป็น 553 มิลลิกรัมต่อกรัมหรือประมาณ 6 เท่าของถ่านกะลา ซึ่งเป็น ผลจากจากมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นในขั้นตอนการกระตุ้น โดยปฏิกิริยาดังกล่าวน่าจะเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับ

ตารางที่ 4.2: ค่าไอโอดีนและพื้นที่ผิว BET ของตัวดูดซับซึ่งกระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์ปริมาณต่างๆ

ตัวดูดซับ	ปริมาณซิงก์คลอไรด์ต่อถ่านกะลา	ค่าไอโอดีน(mg/g)	BET(m ² /g)
ถ่านกะลา	-	66	1.41
CS10D	1:1	553	590.07
CS15D	1.5:1	563	700.08
CS20D	2:1	603	732.43
CS25D	2.5:1	608	869.40

คาร์บอนอะตอม โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนที่มีลักษณะโครงสร้างคล้ายแกรไฟต์หรือ คาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous) เมื่อพิจารณาถึงค่าไอโอดีนของถ่านที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ในอัตราส่วนต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากรูพรุนของถ่านที่ผลิตได้มีสัดส่วนของรูพรุนขนาดเล็กในปริมาณมาก ดังนั้นค่าไอโอดีนของถ่านที่ผลิตได้จึงมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และเมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ผิว BET พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซิงค์คลอไรด์ ทั้งนี้เนื่องจากขนาดโมเลกุลของไนโตรเจนมีขนาดเล็กประมาณ 3 อังสตรอมซึ่งเล็กกว่าโมเลกุลของไอโอดีนที่มีขนาดประมาณ 10 อังสตรอม ไนโตรเจนจึงสามารถถูกดูดซับในรูพรุนขนาดเล็กได้มากกว่าการดูดซับไอโอดีนที่มีขนาดโมเลกุลขนาดใหญ่กว่า

จากตาราง 4.2 เป็นผลของการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านโดยการผสมถ่านกะลา มะพร้าวกับสารละลายซิงค์คลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งสารละลาย ซิงค์คลอไรด์มีความสามารถในการแตกตัวให้ไฮโดรเจนประจุบวก ถึงแม้จะสามารถแตกตัวได้น้อยกว่าสารละลายกรดชนิดอื่น แต่ยังคงสภาพของสารละลายเป็นช่วงเวลานานกว่า อีกทั้ง มีลักษณะเป็นสารดูดความชื้นได้ดี และมีความกัดกร่อนสูง ซึ่งสามารถสลายโครงสร้างขององค์ประกอบในถ่านกะลามะพร้าวได้

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ได้ถูกนำมาศึกษาเปรียบเทียบ โดยเป็นถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจาก กะลามะพร้าวเพื่อใช้สำหรับการดูดซับในสถานะแก๊ส ซึ่งมีชื่อทางการค้าเป็น YAO 4/8 ถ่านกัมมันต์ เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสีย มีชื่อทางการค้าเป็น YAO 12/30 และคาร์บอนโมเลกุลอาชีพ ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่ใช้สำหรับการแยกแก๊สผสมด้วยอัตราการดูดซับ โดยมีค่าไอโอดีนและพื้นที่ผิว BET ดังตาราง 4.3

ตารางที่ 4.3: ค่าไอโอดีนและพื้นที่ผิว BET ของตัวดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรม

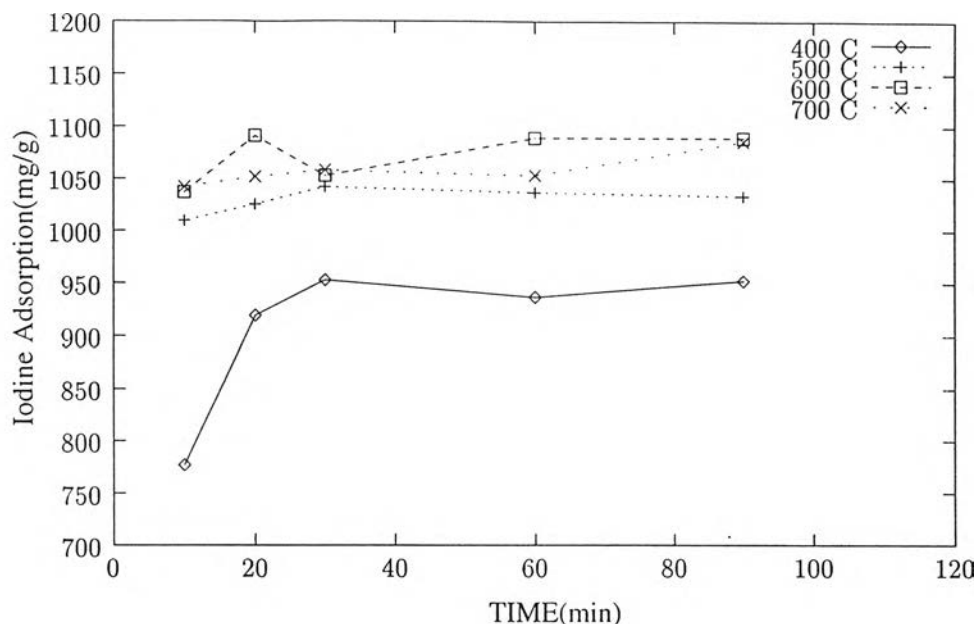
ตัวดูดซับ	ค่าไอโอดีน(mg/g)	BET(m^2/g)
YAO 4/8	1310	1193.31
YAO 12/30	1305	1229.27
คาร์บอนโมเลกุลอาชีพ	58	-

เมื่อพิจารณาถึงค่าไอโอดีนและพื้นที่ผิว BET ของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม (YAO4/8, YAO12/30) พบว่ามีค่าสูงกว่าถ่านที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยนี้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวิธีการผลิตที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาปริมาณการดูดซับไอโอดีน พบว่าปริมาณการดูดซับของถ่านกะลาซึ่งมีพื้นที่ผิวและรูพรุนเพียงเล็กน้อย กับคาร์บอนโมเลกุลอาชีพ มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของไอโอดีน มีขนาด 10 อังสตรอม [6] และรูพรุนของคาร์บอนโมเลกุลอาชีพมีขนาดที่เล็กกว่าโมเลกุลของไอโอดีน จึงมีการดูดซับไอโอดีนเฉพาะบริเวณพื้นผิวภายนอกของอนุภาคถ่านเท่านั้น

4.1.3 ผลกระทบของวิธีการเพิ่มอุณหภูมิ

การศึกษาผลของปริมาณน้ำในสารละลายในขั้นตอนการผลิตตัวดูดซับ เนื่องจากสารละลายที่ใช้มี ปริมาณมาก หากนำไปผ่านขั้นตอนการกระตุ้น จะทำให้สารละลายเดือดอย่างรุนแรง เพื่อป้องกัน การเดือดอย่างรุนแรงสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้อง และเปลี่ยนอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 50 องศาเซลเซียสทุกๆ 15 นาที ซึ่งส่งผลให้ระยะเวลาที่ถ่านอยู่ในเตาเผาเพิ่มมากขึ้น 1 ชั่วโมง 30 นาที จึงได้ศึกษาเปรียบเทียบผลของเวลาที่เพิ่มขึ้นควบคู่กับผลของปริมาณน้ำในสารละลาย ซึ่งค่า



รูปที่ 4.1: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง iodine adsorption กับระยะเวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว

ไอโอดีนและพื้นที่ผิว BET ของตัวดูดซับที่ผลิตขึ้น ดังตาราง 4.4

ตารางที่ 4.4: ค่าไอโอดีนและพื้นที่ผิว BET ของถ่านซึ่งผลิตด้วยวิธีการเพิ่มอุณหภูมิแตกต่างกัน

ตัวดูดซับ	วิธีเพิ่มอุณหภูมิ	ค่าไอโอดีน(mg/g)	BET(m^2/g)
CS10D	อบไอน้ำ ไม่ลดอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	553	590.07
CS10DS	อบไอน้ำ ลดอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	823	913.67
CS10S	ไม่อบไอน้ำ ลดอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	898	710.50

สำหรับการผลิตตัวดูดซับที่ไม่ผ่านการอบไอน้ำก่อนนำมาผ่านขั้นตอนการกระตุ้น และตัวดูดซับที่ผ่านการอบไอน้ำ โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ต่างกัน ซึ่งส่งผลให้ระยะเวลาที่ตัวดูดซับอยู่ในเตาเผาเพื่อเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาถึงค่าไอโอดีน และค่าพื้นที่ผิว BET พบว่าตัวดูดซับที่มีระยะเวลาในอยู่ในเตาเผาที่นานกว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่า ซึ่งส่งผลให้ค่าไอโอดีน และค่าพื้นที่ผิว BET มีค่า สูงขึ้น และพิจารณาควบคู่กับ การศึกษาผลกระทบบของเวลาในการกระตุ้นของ ผาสุกและคณะ [9] ดังรูป 4.1

เนื่องจากระยะเวลาในขั้นตอนการกระตุ้นจะมีผลกระทบมากในช่วง 10 - 30 นาทีแรก ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของค่าไอโอดีน เมื่อลดอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ จึงอาจเป็นผลจากระยะเวลา การเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ในช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิ

สำหรับตัวดูดซับซึ่งลดอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ผ่านการอบไอน้ำก่อนนำไปผ่านขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิว มีค่าการดูดซับไอโอดีนต่ำกว่าตัวดูดซับที่ไม่ผ่านการอบไอน้ำ ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก ในขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิว มีปริมาณน้ำอยู่ในระบบน้อยกว่า ส่งผลให้มีกรดที่เกิดจากการรวมตัวของซิงค์คลอไรด์กับน้ำ อยู่ในระบบในระยะเวลาสั้นกว่า จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้น้อยกว่า ดังนั้น

เมื่อในระบบมีปริมาณน้ำอยู่มาก จึงส่งผลให้มีกรดอยู่ระบบเป็นระยะเวลาที่นานกว่า จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่า และส่งผลให้ ตัวดูดซับมีค่าไอโอดีนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองผลิตตัวดูดซับที่ไม่ผ่านการอบไล่ไอน้ำ แต่ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ผิว BET ที่มีค่าลดลงเมื่อระบบมีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจาก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจมีมากจนกระทั่งเป็นการทำลายรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งเป็นรูพรุนที่ไม่สามารถดูดซับไอโอดีนได้ ให้เป็นรูพรุนที่ขนาดใหญ่ขึ้น จึงส่งผลให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิว BET ลดลง และอาจส่งผลให้มีพื้นที่ในการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นด้วย

4.1.4 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่าน

การศึกษาลักษณะพื้นผิวภายนอก ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของถ่านแต่ละชนิด มีลักษณะดังรูป 4.2 และ 4.3

จากลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่านผลิตขึ้นในงานวิจัย ดังรูป 4.2 พบว่าเมื่อผ่านขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวถ่านที่ผลิตได้จะมีลักษณะพื้นผิวภายนอกแตกต่างไปจากถ่านกะลา มะพร้าวทั้งนี้อาจเนื่องจากถ่านกะลาเกิดปฏิกิริยาเคมีในขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวจึงทำให้พื้นผิวมีลักษณะแตกต่างไปจากถ่านกะลา

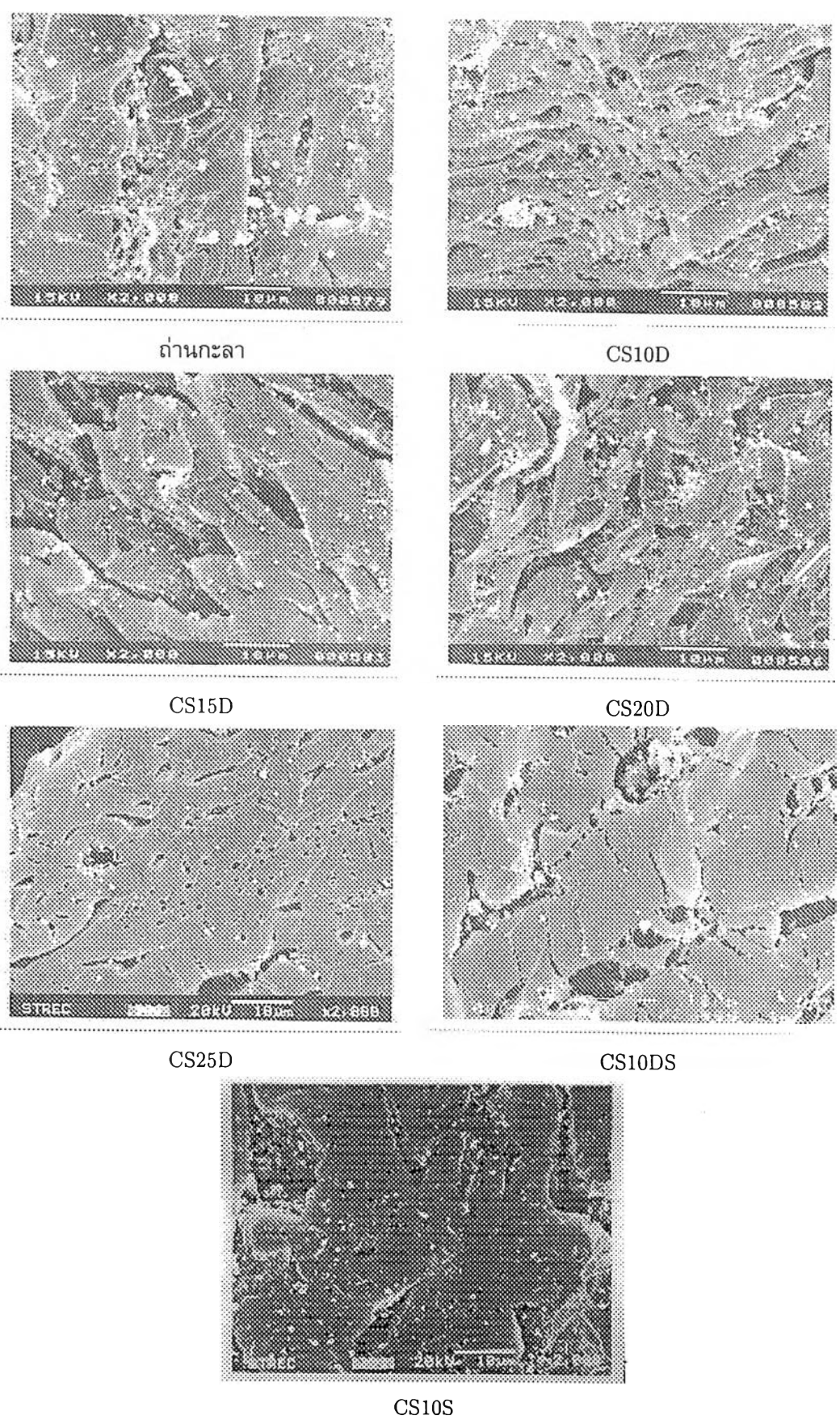
ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ดังรูป 4.3 ถ่านกัมมันต์ YAO 4/8 และ YAO 12/30 ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวเช่นเดียวกับถ่านที่ผลิตขึ้นในงานวิจัย โดยที่ถ่านกัมมันต์ YAO 12/30 ซึ่งเป็นตัวดูดซับ ที่ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียมีรูพรุนขนาดใหญ่กว่า YAO 4/8 ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่ใช้กับระบบการทำ อากาศให้บริสุทธิ์ ทั้งนี้อาจเนื่องต้องการผลิตถ่านกัมมันต์ให้สามารถดูดซับสารละลายในน้ำได้ อย่างรวดเร็ว และจากลักษณะพื้นผิวภายนอกของคาร์บอนโมเลกุลอาชีพ ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่มีแต่รูพรุนขนาดเล็ก ไม่พบรูพรุนที่มีใหญ่จึงส่งผลให้สามารถดูดซับไอโอดีนได้เพียงเล็กน้อยตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

4.2 การดูดซับ

4.2.1 การประมาณข้อมูลการดูดซับจากเส้นโค้งผ่านทะเล

ที่สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แก๊สออกซิเจนความเข้มข้นร้อยละ 15.29 โดยปริมาตร ไหลผ่านหอดูดซับด้วยความเร็วประมาณ 0.05 เมตรต่อวินาที ความเข้มข้นของแก๊ส ออกซิเจนซึ่งไหลผ่านหอดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งคงที่ดังรูป 4.4 ปริมาณการดูดซับ สามารถคำนวณได้จากอัตราการสะสมของตัวถูกดูดซับ ซึ่งเป็นผลต่างของ ปริมาณตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ไหลเข้าสู่หอดูดซับ กับปริมาณตัวดูดซับทั้งหมดที่ไหลออกจากหอดูดซับ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะสัมพันธ์กับความเข้มข้นหรือความดันย่อยของตัวดูดซับในวัฏภาคแก๊ส สำหรับความหนาแน่นของตัวดูดซับที่บรรจุแล้ว (bulk density, ρ_b) ดังนั้น ความหนาแน่นของตัวดูดซับ (particle density, ρ_p) สามารถคำนวณได้โดยความสัมพันธ์ดังสมการ 4.1 ซึ่งลักษณะของหอดูดซับของถ่านแต่ละชนิด สรุปลงได้ดังตาราง 4.5

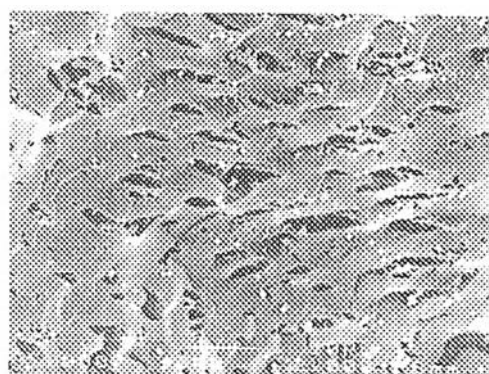
$$\rho_p = \frac{\rho_b}{1 - \varepsilon} \quad (4.1)$$



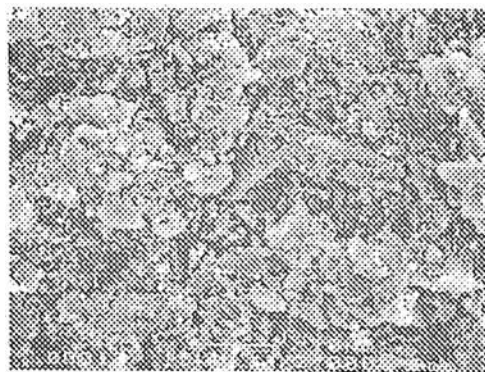
รูปที่ 4.2: ลักษณะพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับที่ผลิตขึ้นในงานวิจัย



YAO 4/8

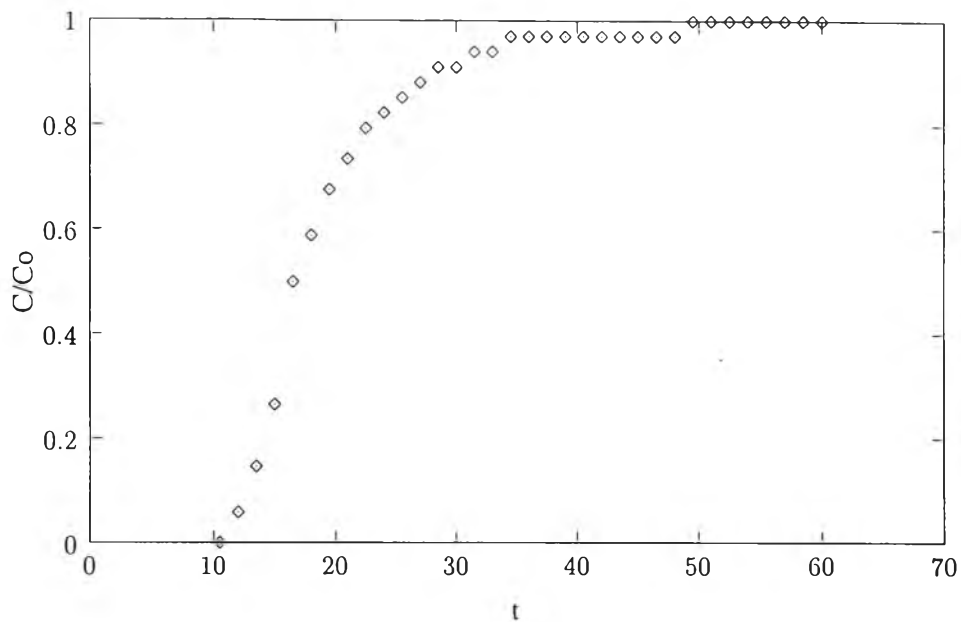


YAO 12/30



คาร์บอนไมโครกราฟ

รูปที่ 4.3: ลักษณะพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับใช้ในอุตสาหกรรม



รูปที่ 4.4: เส้นโค้งไหลผ่านทะเลหอดูดซับถ่านซึ่งกระตุ้นด้วย CS10D

4.2.2 การประมาณข้อมูลการดูดซับจากวิธีเชิงปริมาตร

ณ สภาวะที่ทำการศึกษ ปริมาณการดูดซับ สามารถคำนวณจากปริมาณแก๊สที่หายไปจากระบบ โดยการคูณมวลสารรอบ ชุดอุปกรณ์ ซึ่งสามารถพิจารณาจากปริมาตรชุดอุปกรณ์ซึ่งหักลบ ปริมาตรของตัวดูดซับออก และ อุณหภูมิภายในชุดอุปกรณ์ ซึ่งมวลและปริมาตรของชุดอุปกรณ์หลังบรรจตัวดูดซับสรุปได้ดังตาราง 4.6

4.2.3 แบบจำลองของแลงเมียร์

จากข้อมูลการดูดซับด้วยวิธีการไหลผ่านทะเลและวิธีเชิงปริมาตรมีลักษณะใกล้เคียงเส้นตรง อาจสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ของแลงเมียร์ โดยอาศัยความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างส่วนกลับของ ปริมาณการดูดซับ และความดันย่อยของตัวถูกดูดซับดังรูป 4.5 ซึ่งสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_s} + \frac{1}{K_L q_s} \frac{1}{P} \quad (4.2)$$

ปริมาณการดูดซับสูงสุด และค่าคงที่ของแลงเมียร์ สามารถคำนวณจากจุดตัดแกนตั้ง และความชันของกราฟ ตามลำดับ สำหรับการดูดซับแก๊สออกซิเจน และแก๊สไนโตรเจน ปริมาณ การดูดซับสูงสุดต่อมวลของตัวดูดซับ และค่าคงที่ของแลงเมียร์แสดงได้ดังตาราง 4.7

สำหรับการวัดสมมูลการดูดซับด้วยวิธีการไหลผ่านทะเล ปริมาณการดูดซับสูงสุดตามแบบจำลองของแลงเมียร์ดังตาราง 4.7 มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งที่ตัวดูดซับแต่ละชนิดมีพื้นที่ BET แตกต่างกันไปมาก ซึ่งอาจเนื่องจาก อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองสูงเกินไป จึงทำให้สามารถดูดซับในปริมาณที่น้อย

ตารางที่ 4.5: ลักษณะของหอดูดซับที่บรรจุตัวดูดซับซึ่งมีความยาว 0.11 เมตร

ตัวดูดซับ	น้ำหนัก ตัวดูดซับ (กรัม)	ความหนาแน่น ของตัวดูดซับ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ความพรุนของส่วน ที่บรรจุตัวดูดซับ (ϵ)
ถ่านกะลา	1.1681	839.13	0.5418
CS10D	1.0893	686.59	0.5447
CS15D	1.1057	678.09	0.5321
CS20D	1.2210	734.44	0.5229
CS25D	0.9541	582.87	0.5303
CS10DS	1.0062	513.40	0.4376
CS10S	0.9551	593.25	0.5380
YAO 4/8	0.8901	382.02	0.3314
YAO 12/30	0.8687	443.30	0.4377
คาร์บอนโมเลกุลลาซีฟ	0.9482	587.64	0.5370

มาก ซึ่งเสมือนกับไม่สามารถดูดซับได้ ดังนั้นปริมาณการดูดซับสูงสุดจึงไม่อาจสะท้อนถึงการใช้ประโยชน์ บนพื้นที่ผิวตัวดูดซับได้

สำหรับการวัดสมมูลการดูดซับด้วยวิธีเชิงปริมาตร ปริมาณการดูดซับสูงสุดของแก๊สออกซิเจนตามแบบจำลองของแลงเมียร์ดังตาราง 4.8 ปริมาณการดูดซับสูงสุดด้วยตัวดูดซับซึ่งผ่านการเพิ่มพื้นที่ผิวโดยใช้สาละลายซิงก์คลอไรด์อัตราส่วนต่างๆ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกะลามะพร้าว และมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณซิงก์คลอไรด์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากพื้นที่ผิวที่เพิ่มสูงขึ้น สำหรับการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ให้ผลในลักษณะเดียวกันกับแก๊สออกซิเจน คือ ปริมาณการดูดซับสูงสุด มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับถ่านกะลา และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นพื้นที่ผิวของถ่านที่เพิ่มสูงขึ้น

สำหรับตัวดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งนำมาศึกษาเปรียบเทียบ ปริมาณการดูดซับสูงสุดของแก๊สออกซิเจนด้วย YAO 4/8 และ YAO 12/30 มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากพื้นที่ผิวที่มีค่าใกล้เคียงกัน และการดูดซับแก๊สออกซิเจนด้วยคาร์บอนโมเลกุลลาซีฟ มีค่าสูงกว่า ปริมาณการดูดซับสูงสุดของ YAO 4/8 และ YAO 12/30 ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจาก กระบวนการผลิตคาร์บอนโมเลกุลลาซีฟ ที่ต้องการให้เกิดออกไซด์ บนพื้นผิวของถ่าน [1] จึงเป็นผลให้พื้นที่ผิวของคาร์บอนโมเลกุลลาซีฟมีลักษณะเป็นขั้วในปริมาณมาก และส่งผลให้สามารถดูดซับแก๊สออกซิเจนได้มากกว่าถ่านชนิดอื่นๆ และสำหรับการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ให้ผลในลักษณะเดียวกันกับแก๊สออกซิเจน

ค่าคงที่สมมูลตามแบบจำลองของแลงเมียร์ สำหรับการดูดซับแก๊สออกซิเจน ด้วยถ่านที่ผลิตขึ้นในงานวิจัย และถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม มีความแตกต่างกันน้อยมาก ทั้งนี้อาจเนื่องจากแนวคิดของแบบจำลอง ซึ่งคิดว่าการดูดซับเสมือนเป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้น ค่าคงที่สมมูลการดูดซับจึงเสมือนเป็นค่าคงที่ของปฏิกิริยาเคมี ดังนั้น ค่าคงที่สมมูลการดูดซับ จึงเป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับตัวดูดซับกับสารถูกดูดซับ ณ สภาวะอุณหภูมิที่กำหนด

ตารางที่ 4.6: มวลตัวดูดซับและปริมาตรที่เหลือของชุดอุปกรณ์หลังบรรจุตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาตรที่เหลือหลังบรรจุตัวดูดซับ (มิลลิลิตร)
ถ่านกะลา	25.0510	185.1852
CS10D	20.0948	190.2034
CS15D	12.4633	206.6923
CS20D	14.0995	196.0784
CS25D	14.3319	193.4210
CS10DS	25.8613	189.3220
CS10S	16.5829	197.6675
YAO 4/8	28.0380	188.6792
YAO 12/30	22.7583	196.0784
คาร์บอนโมเลกุลอาชีพ	27.0321	181.8182

4.2.4 ผลของวิธีการวัดสมดุลการดูดซับ

การดูดซับด้วยวิธีการไหลผ่านทะเล ด้วยถ่านกะลามะพร้าวให้ค่าปริมาณการดูดซับของแก๊สออกซิเจนมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณการดูดซับด้วยถ่านซึ่งผลิตจากกะลามะพร้าว โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยซิงก์คลอไรด์ในอัตราส่วนต่างๆ ปริมาณการดูดซับแก๊สออกซิเจน มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณซิงก์คลอไรด์ ดังรูป 4.6 สำหรับการดูดซับแก๊สออกซิเจนด้วยถ่านซึ่งกระตุ้นด้วยวิธีการเพิ่มอุณหภูมิแบบต่างๆ ปริมาณการดูดซับของถ่านซึ่งผ่านการอบไล่ไอน้ำโดยใช้อัตราเพิ่มอุณหภูมิปรกติ มีค่าปริมาณการดูดซับน้อยที่สุด ถ่านซึ่งผ่านการอบไล่ไอน้ำและลดอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ มีปริมาณการดูดซับมากที่สุด ดังรูป 4.7 ซึ่งสอดคล้องตามพื้นที่ผิวที่เพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งเมื่อพิจารณาปริมาณการดูดซับด้วยถ่าน และสำหรับการดูดซับด้วยกัมมันต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ปริมาณการดูดซับของ YAO 4/8 และ YAO 12/30 มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดมีพื้นที่ผิวใกล้เคียงกัน และดังรูป 4.8 และการดูดซับด้วยคาร์บอนโมเลกุลอาชีพ มีปริมาณการดูดซับต่ำกว่าการดูดซับด้วย YAO 4/8 และ YAO 12/30 และสำหรับการดูดซับแก๊สไนโตรเจนให้ผลเช่นเดียวกันกับแก๊สออกซิเจน

สำหรับการดูดซับแก๊สออกซิเจนด้วยวิธีเชิงปริมาตร ด้วยตัวดูดซับซึ่งกระตุ้นซิงก์คลอไรด์ในอัตราส่วนต่างๆ ปริมาณการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณซิงก์คลอไรด์ ซึ่งก่อให้เกิดพื้นที่ผิวที่เพิ่มมากขึ้น ดังรูป 4.9 ปริมาณการดูดซับด้วยตัวดูดซับซึ่งเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์โดยวิธีการเพิ่มอุณหภูมิแบบต่างๆ มีแตกต่างกันซึ่งสอดคล้องกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ดังรูป 4.10 และปริมาณการดูดซับด้วยตัวดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรม คาร์บอนโมเลกุลอาชีพ สามารถดูดซับแก๊สได้มากกว่า ถ่านกัมมันต์ YAO 4/8 และ YAO 12/30 ดังรูป 4.11 ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากพื้นที่ผิวที่มีความเป็นขั้วสูง จึงส่งผลความสามารถดูดซับสูงกว่าถ่านชนิดอื่นที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งการดูดซับแก๊สไนโตรเจนยังคงให้ผลเช่นเดียวกับการดูดซับแก๊สออกซิเจน

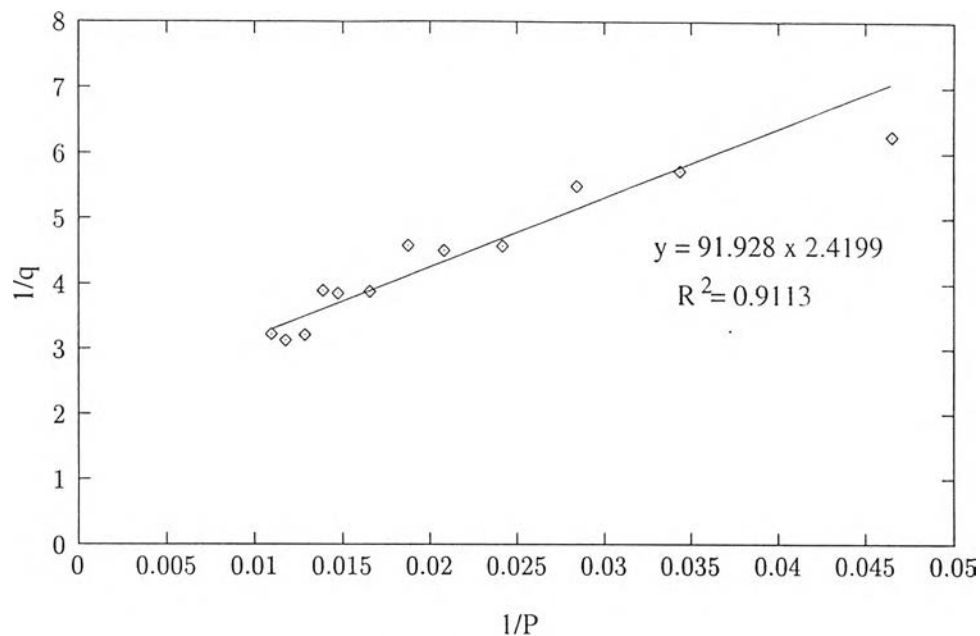
การวัดปริมาณการดูดซับของแก๊สออกซิเจน ด้วยวิธีการไหลผ่านทะเล และวิธีเชิงปริมาตร โดยการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าว ปริมาณการดูดซับด้วยวิธีการไหลผ่านทะเลให้ค่าสูงกว่าวิธีเชิงปริมาตร และการดูดซับด้วยถ่านซึ่งเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยซิงก์คลอไรด์ ปริมาณการดูดซับด้วยวิธีการไหล

ตารางที่ 4.7: ค่าคงที่ในแบบจำลองของแลงเมียร์จากวิธีการไหลผ่านท่อโดยการดูดซับออกซิเจนและไนโตรเจนด้วยถ่านชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ตัวดูดซับ	แก๊ส	K_L	q_s	R^2
ถ่านกะลา	ออกซิเจน	0.0226	0.3902	0.9326
	ไนโตรเจน	0.0174	0.4161	0.9033
CS10D	ออกซิเจน	0.0263	0.4036	0.9113
	ไนโตรเจน	0.0193	0.3791	0.9117
CS15D	ออกซิเจน	0.0295	0.3745	0.9152
	ไนโตรเจน	0.0311	0.3620	0.9232
CS20D	ออกซิเจน	0.0150	0.4498	0.9396
	ไนโตรเจน	0.0177	0.4232	0.9259
CS25D	ออกซิเจน	0.0198	0.5345	0.9125
	ไนโตรเจน	0.0192	0.5373	0.9477
CS10DS	ออกซิเจน	0.0269	0.4521	0.9331
	ไนโตรเจน	0.0185	0.5312	0.9156
CS10S	ออกซิเจน	0.0232	0.4813	0.9342
	ไนโตรเจน	0.0226	0.4917	0.9065
YAO 4/8	ออกซิเจน	0.0379	0.5517	0.9457
	ไนโตรเจน	0.0408	0.5706	0.9503
YAO 12/40	ออกซิเจน	0.0385	0.5166	0.9358
	ไนโตรเจน	0.0280	0.5983	0.9441
คาร์บอนโมเลกุลอาชีพ	ออกซิเจน	0.0389	0.4659	0.9795
	ไนโตรเจน	0.0242	0.5399	0.9161

ตารางที่ 4.8: ค่าคงที่ในแบบจำลองของแลงเมียร์โดยการดูดซับด้วยวิธีเชิงปริมาตร

ตัวดูดซับ	แก๊ส	อุณหภูมิ	K_L	q_s	R^2
ถ่านกะลา	ออกซิเจน	27	0.00282	0.1284	0.9006
		50	0.00062	0.1660	0.9992
	ไนโตรเจน	27	0.00394	0.0981	0.9620
		50	0.00027	0.3366	0.9997
CS10D	ออกซิเจน	27	0.00525	0.2506	0.9755
	ไนโตรเจน	27	0.00378	0.3473	0.9982
CS15D	ออกซิเจน	27	0.00265	0.5068	0.9968
	ไนโตรเจน	27	0.00309	0.4444	0.9951
CS20D	ออกซิเจน	27	0.00246	0.5932	0.9196
	ไนโตรเจน	27	0.00264	0.5672	0.9887
CS25D	ออกซิเจน	27	0.00222	0.6560	0.9993
	ไนโตรเจน	27	0.00302	0.5274	0.9820
CS10DS	ออกซิเจน	27	0.00250	0.5825	0.9977
	ไนโตรเจน	27	0.00264	0.5879	0.9980
CS10S	ออกซิเจน	27	0.00335	0.4165	0.9987
	ไนโตรเจน	27	0.00222	0.6087	0.9995
YAO 4/8	ออกซิเจน	27	0.00408	0.8009	0.9960
		50	0.00056	0.7943	0.9914
	ไนโตรเจน	27	0.00346	0.9006	0.9509
		50	0.00056	1.0745	0.9875
YAO 12/40	ออกซิเจน	27	0.00404	0.8732	0.9984
		50	0.00142	0.8275	0.9952
	ไนโตรเจน	27	0.00460	0.8523	0.9961
		50	0.00099	1.2650	0.9992
คาร์บอนโมเลกุลลาซีพ	ออกซิเจน	27	0.00163	2.0924	0.9986
		50	0.00063	2.0181	0.9987
	ไนโตรเจน	27	0.00208	1.8105	0.9959
		50	0.00082	1.6795	0.9950



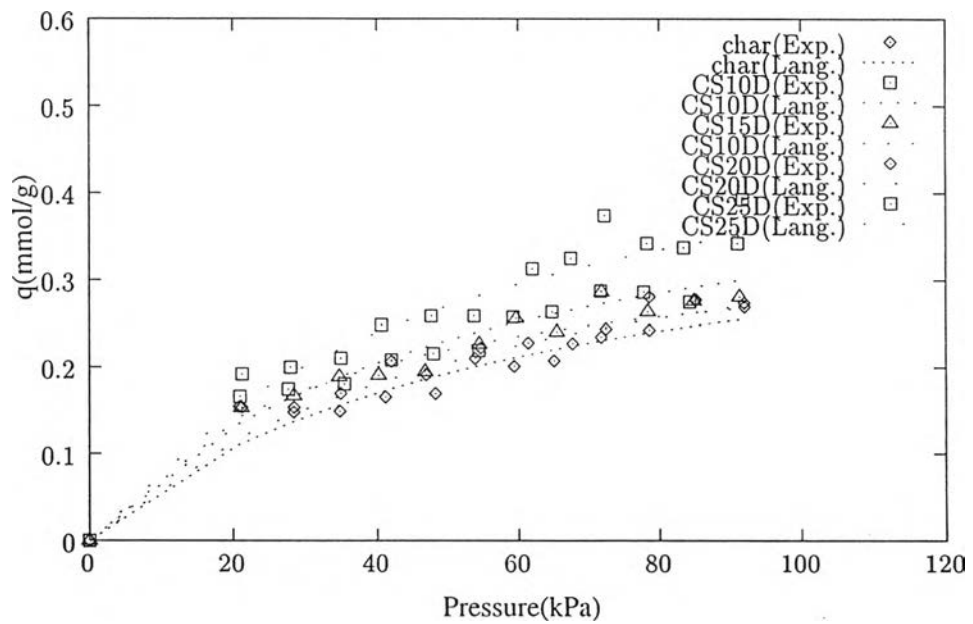
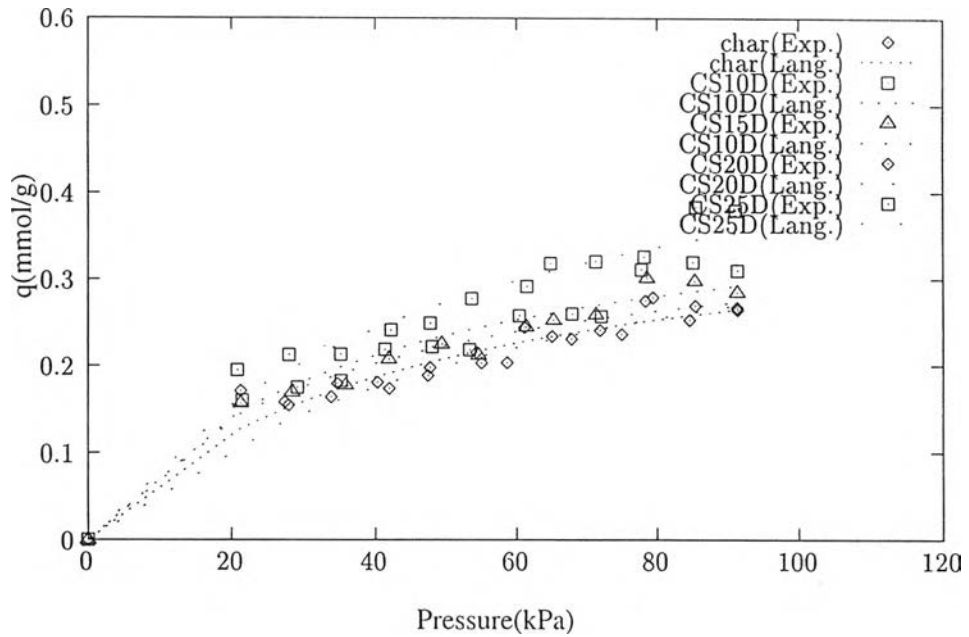
รูปที่ 4.5: ความสัมพันธ์เชิงเส้นของแบบจำลองของแลงเมียร์

ผ่านทะลุยังคงให้ค่าสูงกว่า และสำหรับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ปริมาณการดูดซับด้วยวิธีการไหลผ่านทะลุยังคงให้ค่าสูงกว่าวิธีเชิงปริมาตร สำหรับการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ให้ผลเช่นเดียวกันกับการดูดซับแก๊สออกซิเจน กล่าวคือ ปริมาณการดูดซับด้วยวิธีการไหลผ่านทะลุให้ค่าปริมาณการดูดซับสูงกว่าวิธีเชิงปริมาตร โดยการดูดซับด้วยถ่านที่ใช้ในการศึกษา

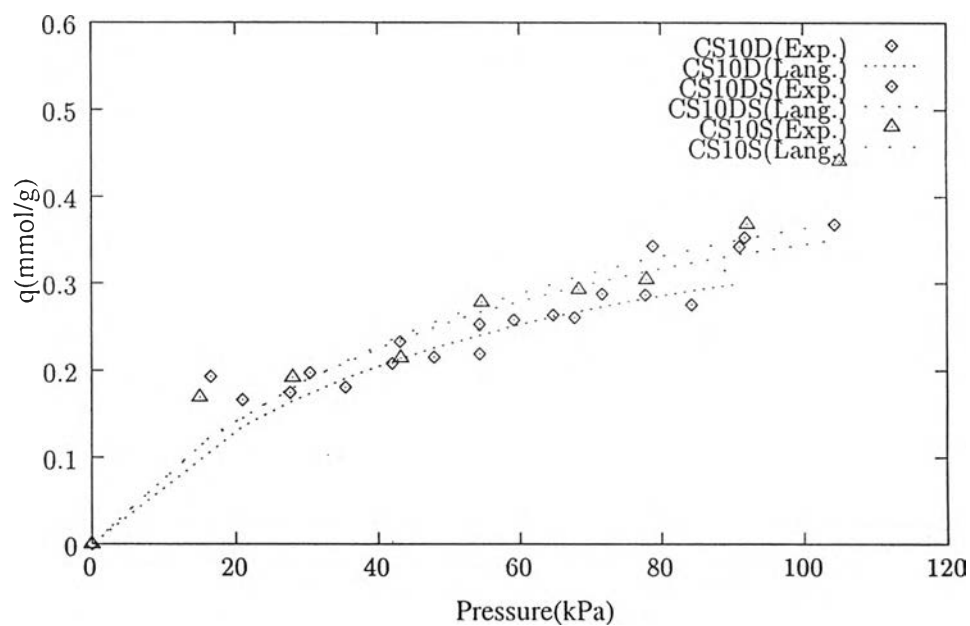
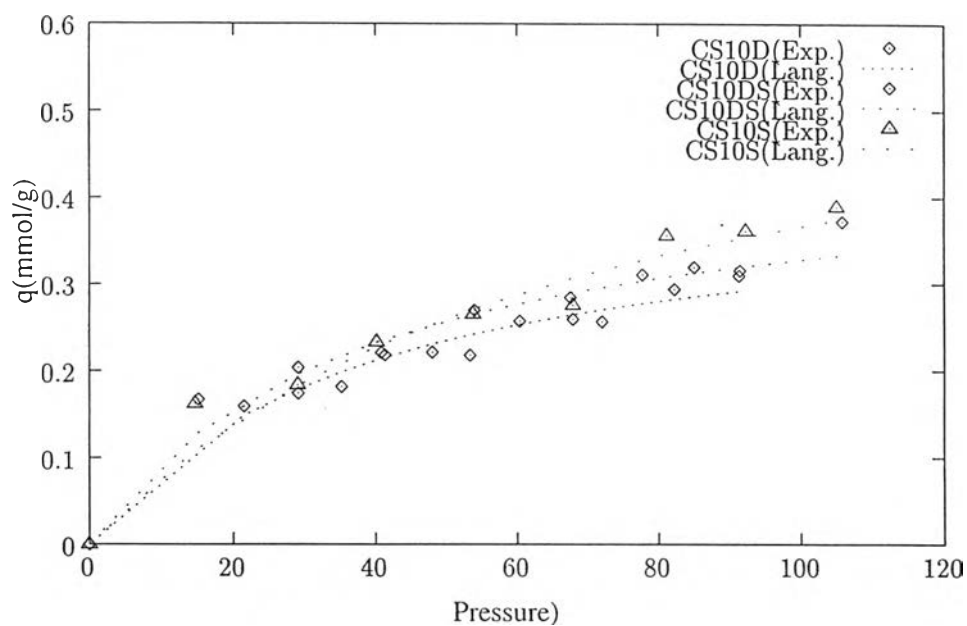
โดยหลักการแล้ว สมดุลการดูดซับไม่ขึ้นกับวิธีการวัด จึงพิจารณาเปรียบเทียบผลการดูดซับกับ เอกสารอ้างอิง ดังรูป 4.12

จากรูป 4.12 ผลการดูดซับแก๊สออกซิเจนด้วยคาร์บอนโมเลกุลลาซีฟด้วย วิธีเชิงปริมาตร อุณหภูมิเดียวกันให้ผลสอดคล้องกับเอกสารอ้างอิง [10,11] ทั้งนี้อาจพิจารณาการดูดซับแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจน ดังรูป 4.13[2]

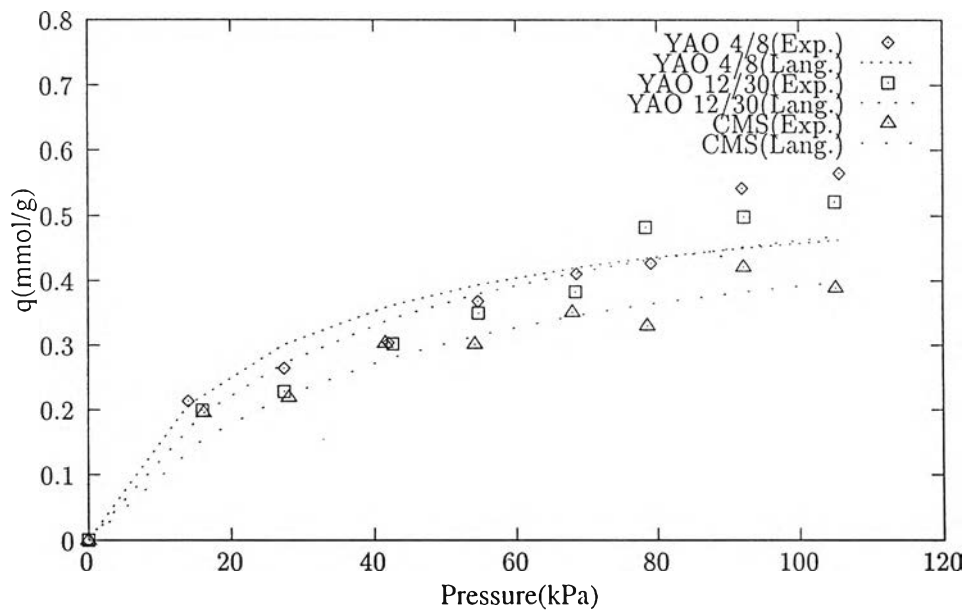
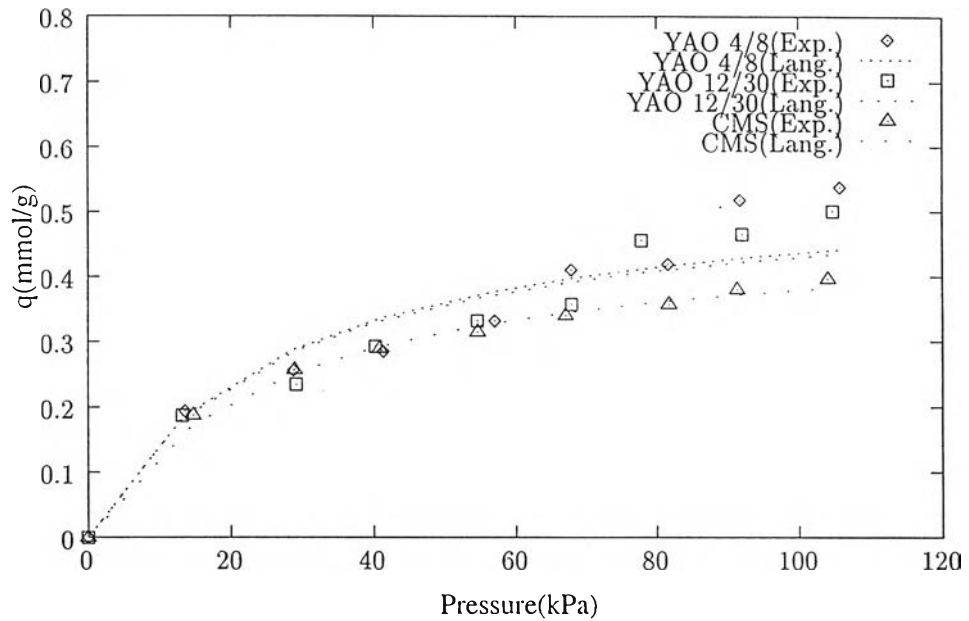
และจากตาราง ข.10 เมื่อพิจารณาเวลาเฉลี่ยของแก๊สออกซิเจนที่อยู่ในหลอดดูดซับ ซึ่ง ใช้เวลาเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบจากรูป 4.13 จึงอาจดูดซับได้เพียงเล็กน้อย และเมื่อคำนวณปริมาณการดูดซับซึ่งพิจารณาได้จากเวลาเฉลี่ยที่ แก๊สออกซิเจนอยู่ในหลอดดูดซับ จึง ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับมากกว่าการดูดซับด้วยวิธีเชิงปริมาตร และในลักษณะเดียวกัน การดูดซับแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจนด้วยถ่านชนิดต่างๆที่ใช้ ในการศึกษาทดลองซึ่งมีขนาดรูพรุน ใหญ่กว่าคาร์บอนโมเลกุลลาซีฟ ยังคงมีเวลาเฉลี่ยที่แก๊สอยู่ในหลอดดูดซับใกล้เคียงกับการดูดซับแก๊ส ด้วยคาร์บอนโมเลกุลลาซีฟ ทั้งนี้อาจเนื่องจากการดูดซับด้วยวิธีการไหลผ่านทะลุ จำเป็นต้องอาศัย แก๊สพาหะเพื่อนำพาตัวถูกดูดซับเข้าสู่หลอดดูดซับ ดังนั้น การดูดซับแก๊สซึ่งต้องเคลื่อนที่วฏภาคของ ไหลไปสู่พื้นผิวของตัวดูดซับ จึงเป็นการแพร่ผ่านวฏภาคของแก๊สพาหะ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจึง เคลื่อนที่เข้าสู่พื้นผิวของตัวดูดซับได้ยากกว่าการวัดปริมาณการดูดซับด้วยวิธีเชิงปริมาตร ซึ่งมีเพียง ตัวถูกดูดซับอยู่ในวฏภาคแก๊ส



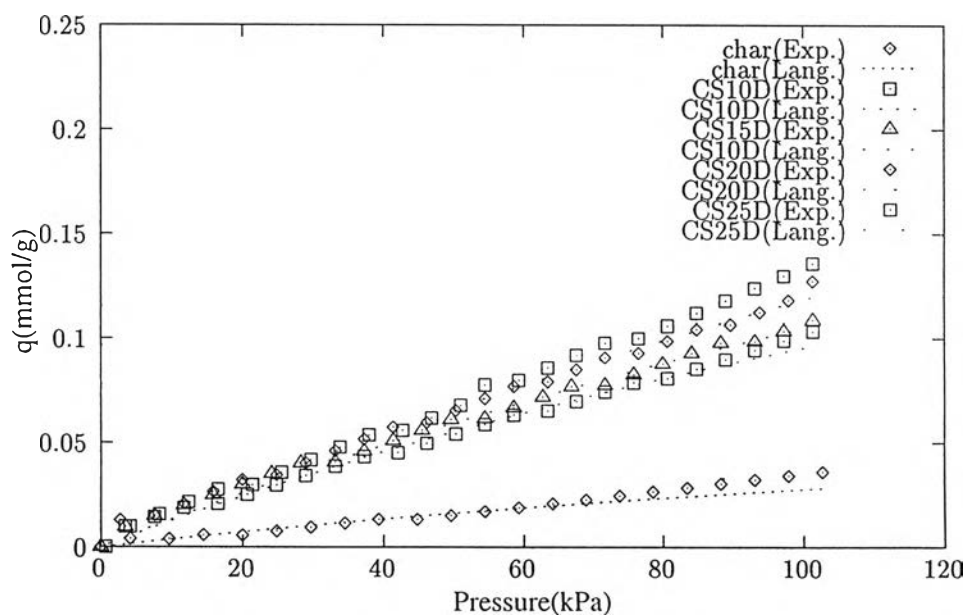
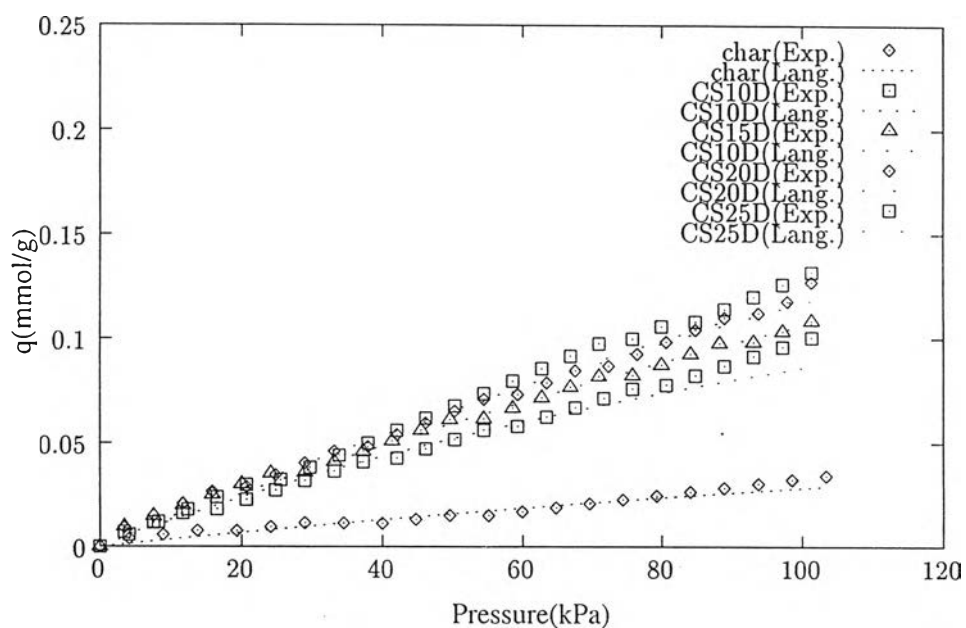
รูปที่ 4.6: สมดุลการดูดซับด้วยถ่านซึ่งกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ในอัตราส่วนต่างๆโดยวิธีการไหลผ่าน
 ทะลุ ณ อุณหภูมิ 50 °C (บน) แก๊สออกซิเจน (ล่าง) แก๊สไนโตรเจน



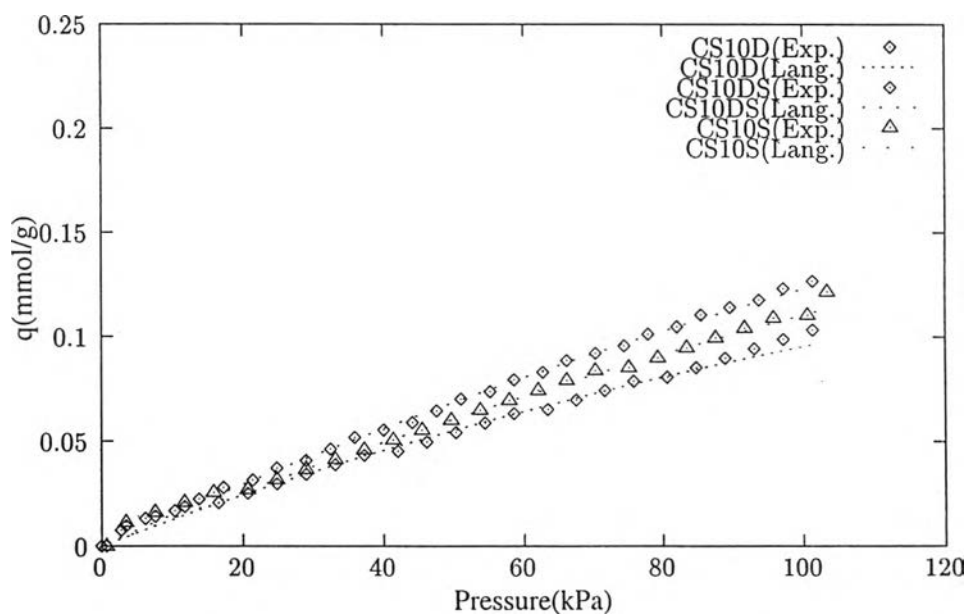
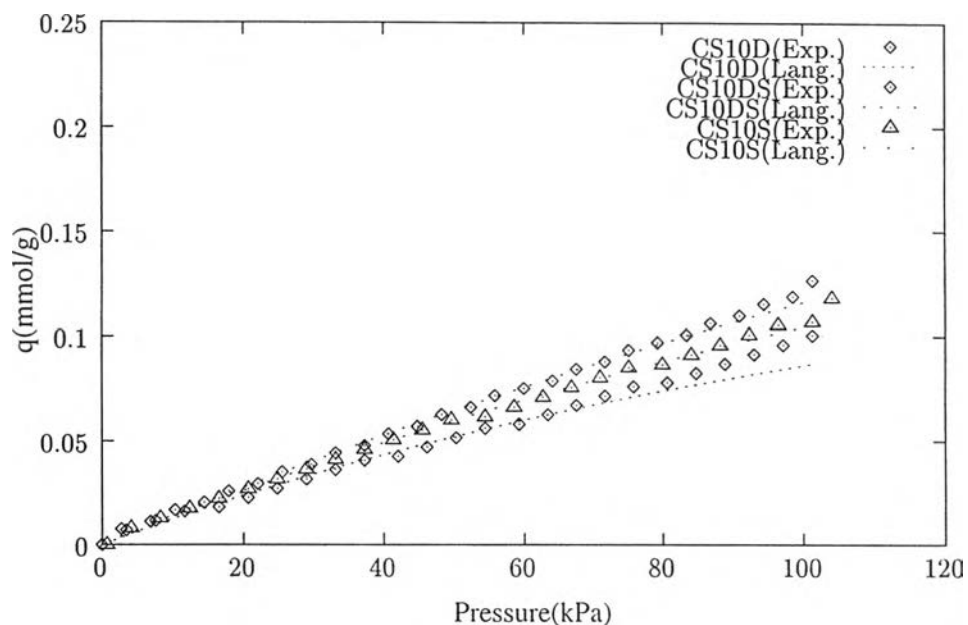
รูปที่ 4.7: สมดุลการดูดซับด้วยถ่านซึ่งกระตุ้นด้วยวิธีการเพิ่มอุณหภูมิต่างๆโดยวิธีการไหลผ่านทะเล
ณ อุณหภูมิ 50 °C (บน) แก๊สออกซิเจน (ล่าง) แก๊สไนโตรเจน



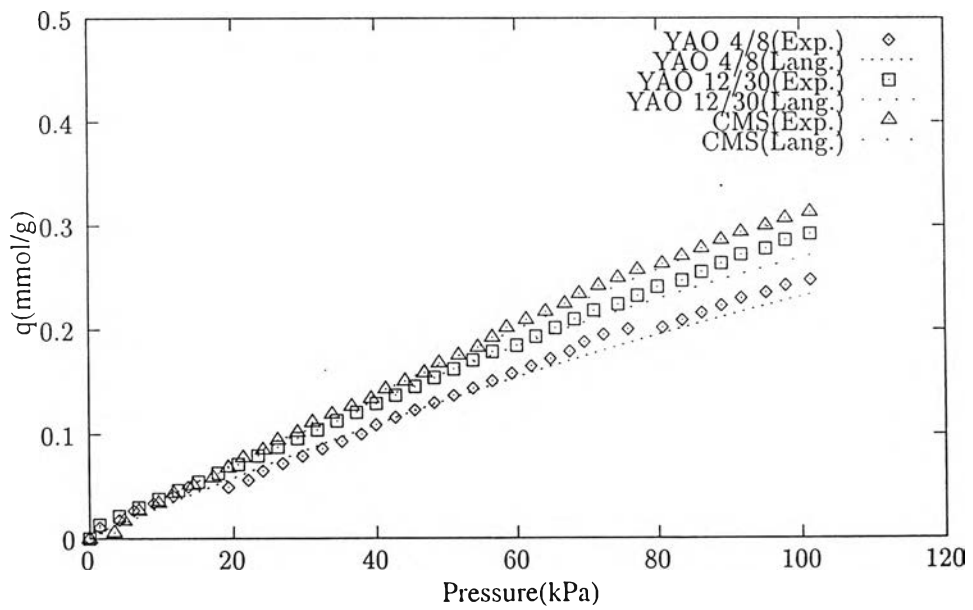
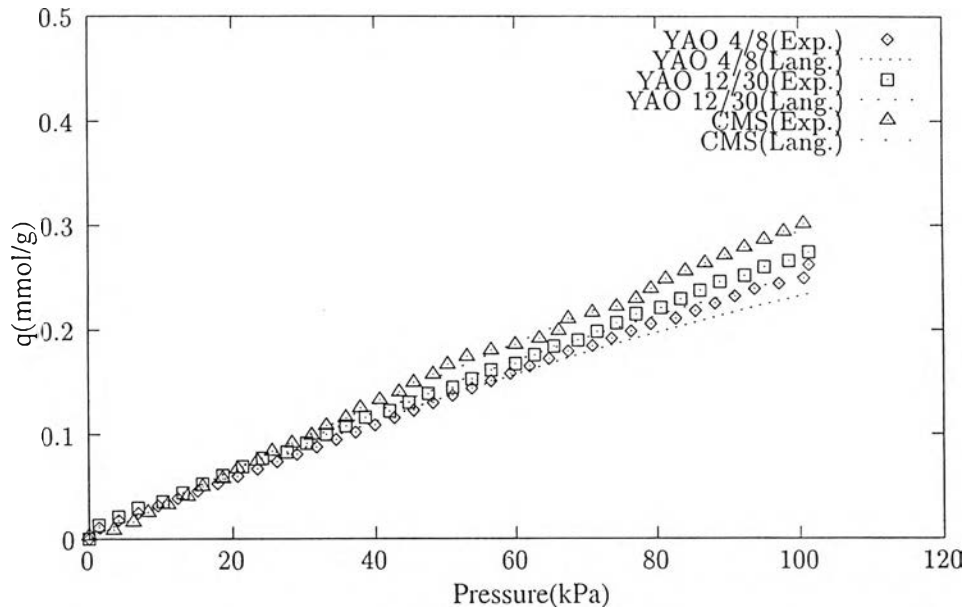
รูปที่ 4.8: สมดุลการดูดซับผ่านกัมมันต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมโดยวิธีการไหลผ่านทะเล ณ อุณหภูมิ 50 °C(บน) แก๊สออกซิเจน (ล่าง) แก๊สไนโตรเจน



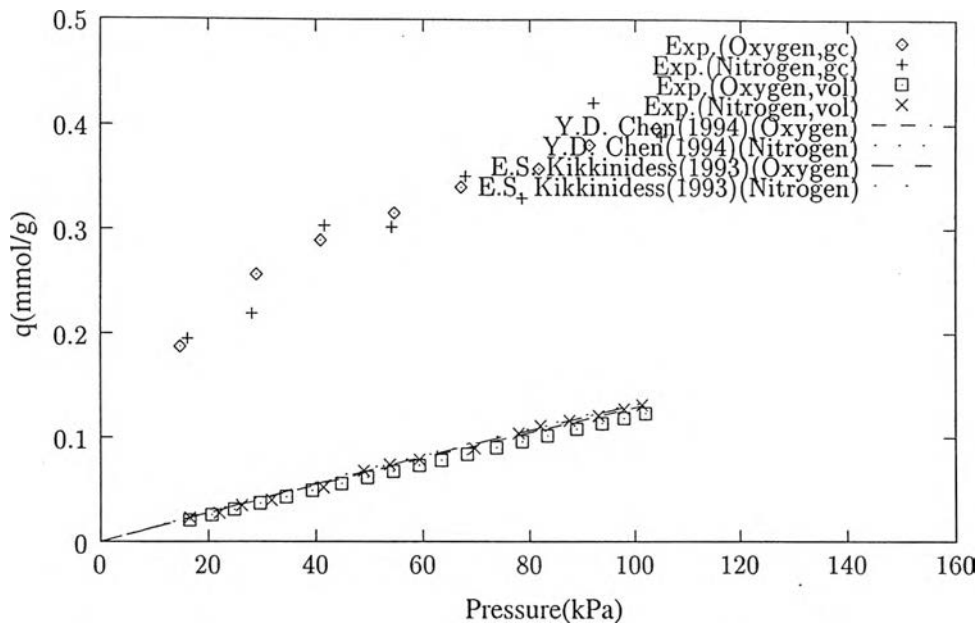
รูปที่ 4.9: สมดุลการดูดซับด้วยถ่านซึ่งกระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์ในอัตราส่วนต่างๆโดยวิธีเชิงปริมาตร ณ อุณหภูมิ 27 °C (บน) แก๊สออกซิเจน (ล่าง) แก๊สไนโตรเจน



รูปที่ 4.10: สมดุลการดูดซับด้วยถ่านซึ่งกระตุ้นด้วยวิธีการเพิ่มอุณหภูมิต่างๆโดยวิธีเชิงปริมาตร ณ อุณหภูมิ 27 °C(บน) แก๊สออกซิเจน (ล่าง) แก๊สไนโตรเจน



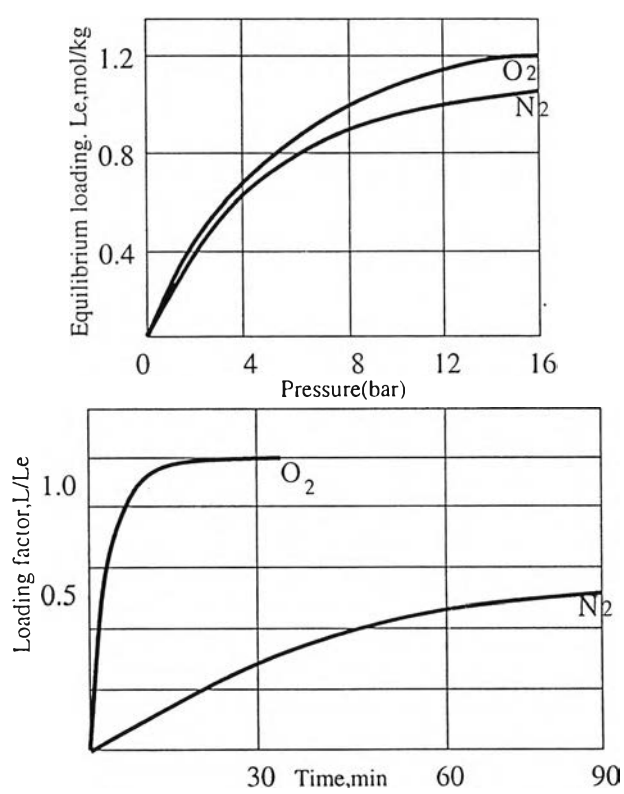
รูปที่ 4.11: สมดุลการดูดซับด้วยตัวดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรมโดยวิธีเชิงปริมาตร ณ อุณหภูมิ 27 °C(บน) แก๊สออกซิเจน (ล่าง) แก๊สไนโตรเจน



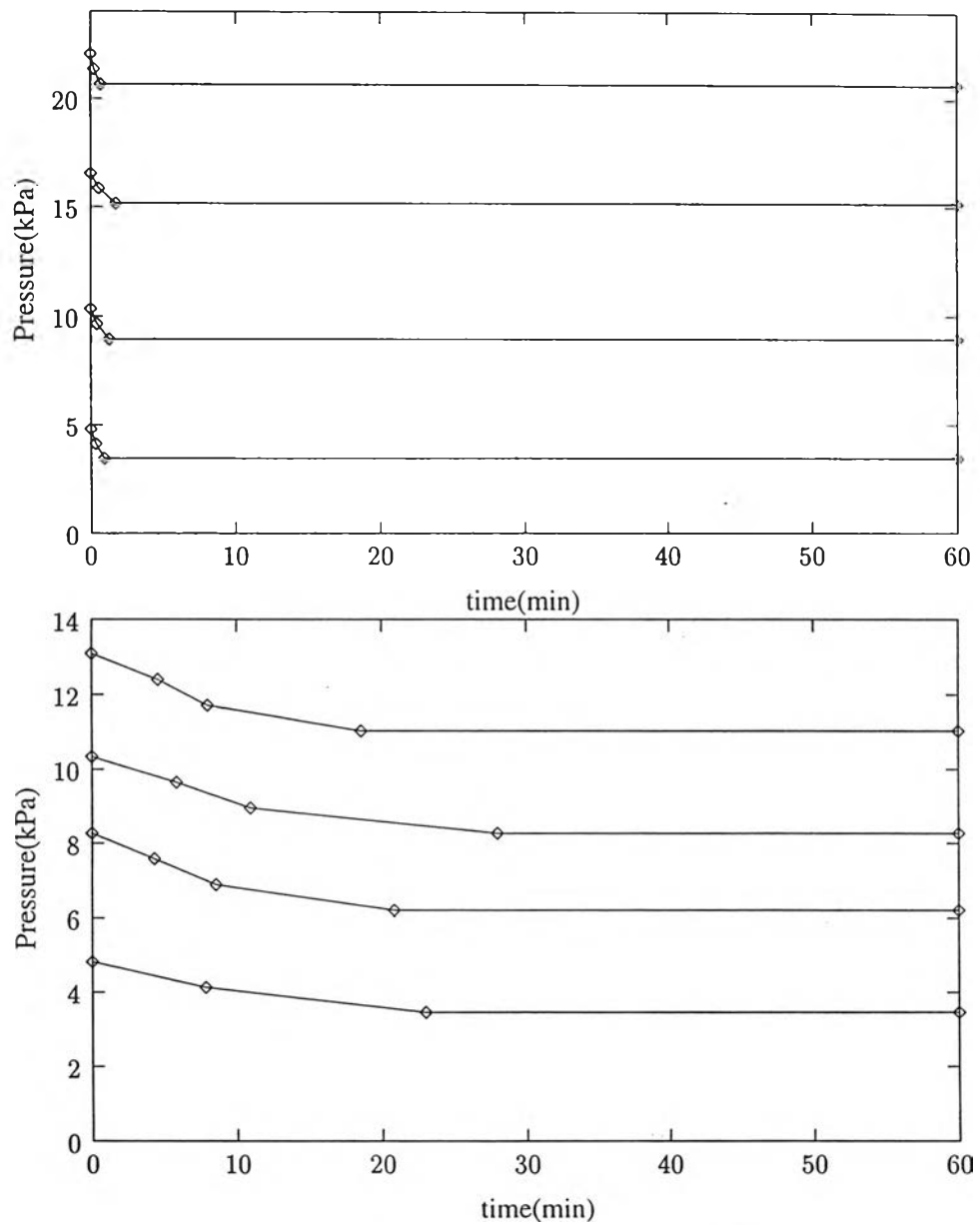
รูปที่ 4.12: การเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจนด้วยคาร์บอนโมเลกุลลาซีฟ กับข้อมูลจากเอกสารอ้างอิง

4.2.5 อัตราการดูดซับ

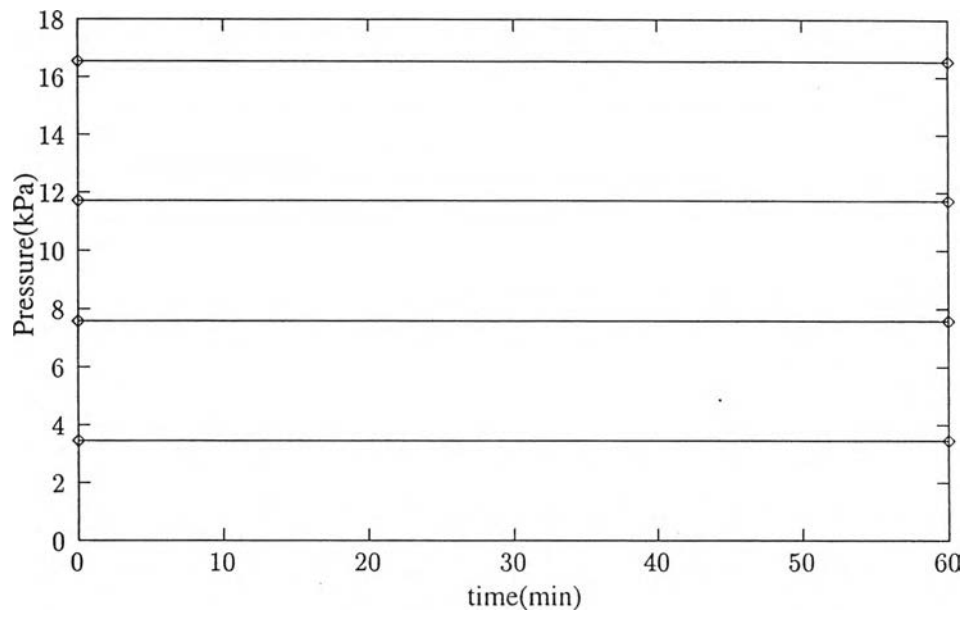
อัตราการดูดซับดูดซับของแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจนด้วยคาร์บอนโมเลกุลลาซีฟซึ่ง มีความแตกต่างกันอย่างมาก ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของความดันตามเวลาภายในชุดอุปกรณ์การวัดสมดุลการดูดซับด้วยวิธีเชิงปริมาตร ดังรูป 4.14 สำหรับการดูดซับแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจนด้วยตัวดูดซับที่ผลิตจากถ่านกะลาและกระตุ้นด้วย ซิงค์คลอไรด์ในอัตราส่วน 1:1 การเปลี่ยนแปลงความดันภายในชุดอุปกรณ์การวัดสมดุลการดูดซับ ด้วยวิธีเชิงปริมาตร ดังรูป 4.15 และการเปลี่ยนแปลงความดันในชุดอุปกรณ์ของตัวดูดซับตัวอื่นๆ มีลักษณะเดียวกันกับรูป 4.15 กล่าวคือไม่พบการเปลี่ยนแปลงของความดันตามเวลา ซึ่งอาจเนื่องจากการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้รวดเร็วของทั้งแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจน



รูปที่ 4.13: การดูดซับแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจนด้วยคาร์บอนโมเลกุลาสีฟ



รูปที่ 4.14: การเปลี่ยนแปลงความดันในชุดอุปกรณ์การวัดสมดุลการดูดซับด้วยวิธีเชิงปริมาตรด้วยคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ (1)ออกซิเจน (2)ไนโตรเจน



รูปที่ 4.15: การเปลี่ยนแปลงความดันในชุดอุปกรณ์การวัดสมดุลการดูดซับด้วยวิธีเชิงปริมาตรด้วยถ่านกะลากระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์ในอัตราส่วน 1:1 ของออกซิเจนและไนโตรเจน