บทที่ 4

ผลและอภิปรายผลการวิจัย

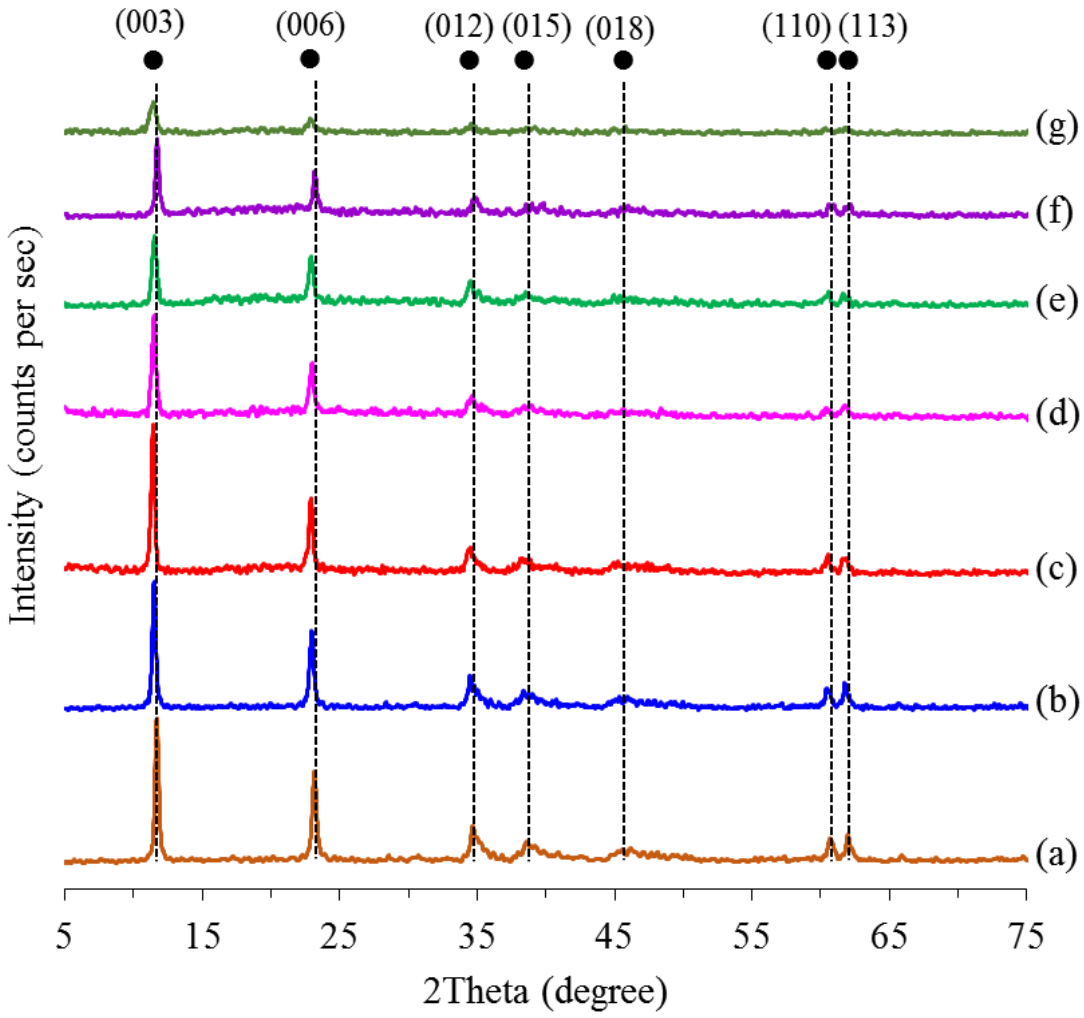
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ (Sorbent characterization)

4.1.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD)

จากการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง ไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล และตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยร้อยละ 5 โดยมวล ที่ปริมาณร้อยละโดยมวลของเตตระเอทิลีนเพนตะมีนต่างๆ แสดงใน**รูปที่** 4.1

เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (**รูปที่** 4.1a) พบว่า พีคของไฮโดรทาลไซต์ (Hydrotalcite) ปรากฏที่องศาการเลี้ยวเบนหรือ 2 Theta เท่ากับ 11.64 23.22 34.48 39.28 46.38 60.88 และ 62.08 องศา ตามลำดับ โดยมีระนาบผลึกเป็น (003) (006) (012) (015) (018) (110) และ (113) ตามลำดับ

เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (**รูปที่** 4.1b) พบว่า พีคของไฮโดรทาลไซต์ (Hydrotalcite) ปรากฏที่องศาการเลี้ยวเบนหรือ 2 Theta เท่ากับ 11.44 23.02 33.44 38.36 46.18 60.40 และ 61.72 องศา ตามลำดับ โดยมีระนาบผลึกเป็น (003) (006) (012) (015) (018) (110) และ (113) ตามลำดับ ซึ่งมีการเลื่อนของตำแหน่งพีคไปในทิศทางองศาการเลี้ยวเบนที่น้อยลงในทุกๆ พีคที่ปรากฏเมื่อพิจารณาเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (**รูปที่** 4.1a) แสดงว่า เกิดการแทนที่ของแอนไอออนคาร์บอเนตด้วยโดเดซิลซัลเฟตระหว่างชั้นของบลูไซต์ในไฮโดรทาลไซต์



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวดูดซับ โดยที่ (a) ไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (b) ไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (c) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (d) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (e) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 50 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (f) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (g) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 10 โดยมวล

เมื่อทำการเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล ที่ปริมาณร้อยละของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน เท่ากับ 30 40 และ 50 โดยมวล (**รูปที่** 4.1c-4.1e) พบว่า ความสูงของพีคไฮโดรทาลไซต์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนตัวดูดซับ เนื่องจากปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้เกิดการบดบังไฮโดรทาลไซต์มากขึ้น และไม่มีการเลื่อนของตำแหน่งพีคในทุกๆ พีคที่ปรากฏ แสดงว่า ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกเนื่องจากการเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

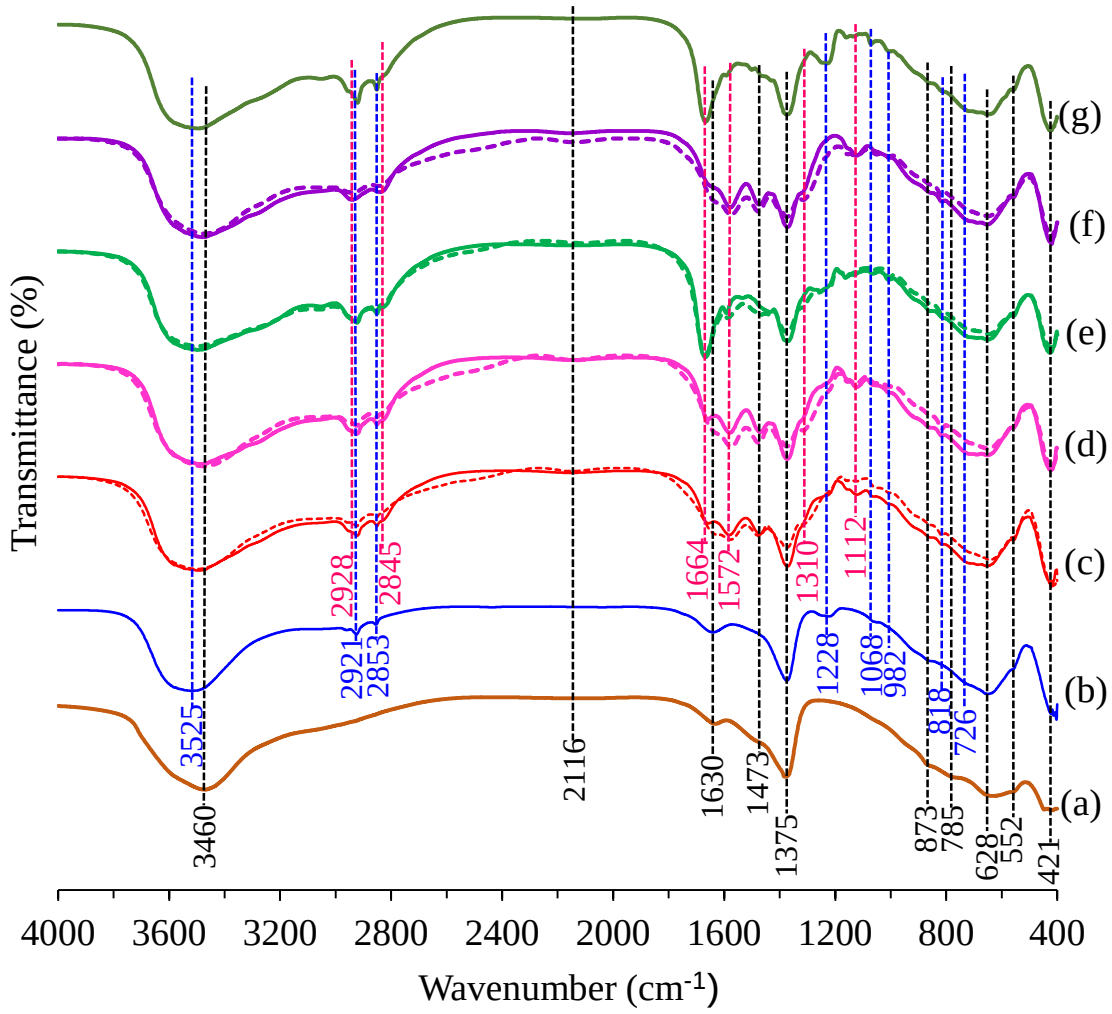
เมื่อพิจารณาที่เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (**รูปที่** 4.1f) เทียบกับไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (**รูปที่** 4.1a) พบว่า ความสูงของพีคไฮโดรทาลไซต์ลดลงเมื่อเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง เนื่องจากเตตระเอทิลีนเพนตะมีนเข้าไปบดบังพื้นผิวของไฮโดรทาลไซต์ และไม่มีการเลื่อนของตำแหน่งพีคไฮโดรทาลไซต์ในทุกๆ พีคที่ปรากฏ แสดงว่า การเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง ไม่ก่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกของไฮโดรทาลไซต์ และเมื่อเพิ่มปริมาณของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตจากร้อยละ 5 เป็น 10 โดยมวล ในตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต พบว่า การเพิ่มปริมาณของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตทำให้ความสูงของพีคไฮโดรทาลไซต์ลดลง เนื่องจากปริมาณโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้เกิดการบดบังไฮโดรทาลไซต์มากขึ้น และไม่มีการเลื่อนของตำแหน่งพีคในทุกๆ พีคที่ปรากฏ แสดงว่า ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกเนื่องจากการเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

การเพิ่มปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนตัวดูดซับ จากร้อยละ 30 โดยมวล (**รูปที่** 4.1b) ไปเป็น ร้อยละ 40 และ 50 โดยมวล ตามลำดับ (**รูปที่** 4.1c-4.1d) พบว่า ความสูงของพีคทั้งแอลฟาอะลูมิเนียมออกไซด์และเพอริเคลสของแมกนีเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ลดต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ซึ่งกล่าวได้ว่าการเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงในไฮโดรทาลไซต์ และการเพิ่มปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนตัวดูดซับมีส่วนทำให้เกิดการบดบังอนุภาคผลึกของทั้งสององค์ประกอบมากยิ่งขึ้น จากตำแหน่งพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าไม่มีการเลื่อนของตำแหน่งพีคในทุกๆ พีคที่ปรากฏ เมื่อเทียบกับไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (**รูปที่** 4.1b) แสดงว่า ไม่เกิดการแทนที่เพิ่มเติมของแอนไอออนคาร์บอเนตด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีนระหว่างชั้นภายในโครงสร้างไฮโดรทาลไซต์

4.1.2 **เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคป** (Fourier transform infrared spectroscope, FTIR)

รูปแบบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวดูดซับไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงและเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล ที่ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับ ร้อยละ 30 40 และ 50 โดยมวล แสดงใน**รูปที่** 4.2

เมื่อพิจารณาการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวดูดซับไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง ดังแสดงใน**รูปที่** 4.2a (เส้นทึบ) พบว่า พบพีคการดูดกลืนที่ 3460 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหด (O-H stretching vibration) ของโมเลกุลน้ำที่ผิวและระหว่างชั้นบลูไซต์ของไฮโดรทาลไซต์ การดูดกลืนที่ 1630 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบงอ (HOH bending vibration) ของโมเลกุลน้ำระหว่างชั้น[39] การดูดกลืนที่ 1476 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของคาร์บอเนตแอนไอออน[40] การดูดกลืนที่ 1383 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบสมดุลต่ำกว่า (Lowering of the symmetry) ของคาร์บอเนตแอนไอออน จากระนาบ D_{3h} ไประนาบ C_{2v} และการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบงอของคาร์บอเนตแอนไอออน ที่ 870 เซนติเมตร$^{-1}$ การดูดกลืนเนื่องจากการสั่นของ Al–O or Mg–Al–O ในชั้นบลูไซต์ไลค์ที่ 785 เซนติเมตร$^{-1}$[41] นอกจากนี้การดูดกลืนที่ 628 552 และ 421 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบงอของคาร์บอเนต การสั่นแบบยืดหดและแบบงอของ M–O M–O–M และ O–M–O และการสั่นของ Mg–OH Al–OH และ Zn–OH จากโครงสร้างออกตะฮีดรอลของไฮโดรทาลไซต์ ตามลำดับ ซึ่งการดูดกลืนที่สองพีคสุดท้ายเป็นเอกลักษณ์ของชั้นบลูไซต์ไลค์



รูปที่ 4.2 รูปแบบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดด้วยเทคนิคเอฟทีไออาร์ของ (a) ไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (b) ไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (c) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (d) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (e) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 50 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (f) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (g) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 10 โดยมวล (เส้นทึบ หมายถึง ตัวดูดซับก่อนใช้ในการดูดซับ และ เส้นประ หมายถึง ตัวดูดซับหลังผ่านการดูดซับแล้ว)

เมื่อพิจารณาการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวดูดซับไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล ดังแสดงใน**รูปที่ 4.2b** (เส้นทึบ) พบว่า พบพบพีคการดูดกลืนที่ 3525 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหด (O-H stretching vibration) ของโมเลกุลน้ำที่ผิวของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต พีคการดูดกลืนที่ 2928 และ 2853 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ –CH_3 แบบสมมาตรและไม่สมมาตร (Asymmetric and symmetric stretching) ของส่วนหาง (tail) ไฮโดรคาร์บอนของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ตามลำดับ[42-45] การดูดกลืนที่ 2921 และ 2845 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ –CH_2– แบบสมมาตรและไม่สมมาตรของส่วนหางไฮโดรคาร์บอนของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ตามลำดับ การดูดกลืนที่ 1473 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบงอของ –CH_2– (Bending vibration) ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต และ ที่ 1375 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบผิดรูปของ –CH_3 (Deformation vibration) ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต การดูดกลืนที่ 1228 และ 1068 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ –OSO_3^- แบบไม่สมมาตรและสมมาตร (Asymmetric and symmetric stretching bands) ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ตามลำดับ การดูดกลืนที่ 982 818 และ 726 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ C–S–O และ S–O แบบสมมาตร การสั่นแบบยืดหดของ O–S–O แบบไม่สมมาตรและ S–O แบบสมมาตร และการสั่นแบบโยก (Rocking) ของ –CH_2– ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล ที่ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับ ร้อยละ 30 40 และ 50 โดยมวล ดังแสดงใน**รูปที่ 4.2c-4.2e** (เส้นทึบ) ตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง และ ตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 10 โดยมวล ที่ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับ ร้อยละ 40 โดยมวล แสดงใน**รูปที่ 4.2f และ 4.2g** (เส้นทึบ) พบว่า พบพีคการดูดกลืนของเตตระเอทิลีนเพนตะมีนปรากฏขึ้น[46] คือ การดูดกลืนที่ 3345 และ 3270 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ N–H แบบไม่สมมาตรและสมมาตรของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ตามลำดับ การดูดกลืนที่ 2928 และ 2845 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ C–H แบบไม่สมมาตรและ N–CH_2 ของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ตามลำดับ การดูดกลืนที่ 1664 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ ring skeleton ของการเกิดเป็นวงระหว่างเตตระเอทิลีนเพนตะมีน การดูดกลืนที่ 1572

เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบงอเข้า (Scissoring) ของ N–H ที่ตำแหน่ง NH_2 ของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน การดูดกลืนที่ 1310 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบเบนจากระนาบ (Wagging) ของ C–H ที่ตำแหน่ง CH_2 ของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน และการดูดกลืนที่ 1112 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ C–N ที่ตำแหน่ง R–N–R ของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน

เมื่อพิจารณาตัวดูดซับหลังการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล ที่ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับ ร้อยละ 30 40 และ 50 โดยมวล และตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง ที่ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับ ร้อยละ 40 โดยมวล แสดงใน**รูปที่ 4.2c-4.2f** (เส้นประ) พบว่า ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของพีคการดูดกลืนของโมเลกุลน้ำที่ผิวและระหว่างชั้นบลูไซต์ของไฮโดรทาลไซต์ที่ 3460 เซนติเมตร$^{-1}$ และพีคการสั่นแบบยืดหดของ C–O ของไบคาร์บอเนต (Bicarbonate แสดงว่า ไม่มีน้ำโมเลกุลทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดเป็นไบคาร์บอเนต แต่พบการเพิ่มความสูงของพีคการดูดกลืนในช่วง 1200-1600 เซนติเมตร$^{-1}$ เมื่อเทียบกับตัวดูดซับก่อนการดูดซับ เนื่องจากมีคาร์บาเมตเกิดขึ้น ดังแสดงใน**ตารางที่ 4.1** พีคการสั่นแบบยืดหดของ CO_2^- แบบสมมาตร การสั่นแบบยืดหดผิดรูปของ NH_3^+ แบบสมมาตร และการสั่นแบบยืดหดของ CO_2^- แบบไม่สมมาตรของคาร์บาเมตตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของคาร์บาเมตและไบคาร์บอเนตบนตัวดูดซับ

Wavenumber (cm-1)	Assignment	Reference
1310	symmetric CO_2^- stretching	[47-49]
1473	symmetric NH_3^+ deformation	[48-50]
1572	asymmetric CO_2^- stretching	[43,50]
1664	NH_3^+ deformation	[48]
	symmetric C–O stretching of bicarbonate	[51]

4.1.3 เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHN analyzer)

จากการวิเคราะห์หาร้อยละองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน เพื่อตรวจสอบปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับด้วยเทคนิค CHN analysis พบว่า ตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้เริ่มต้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ตัวดูดซับที่เตรียมมีปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับตามจริง ดังแสดงใน**ตารางที่** 4.2

4.1.4 เทคนิคบีอีที (The Brunauer-Emmet-Teller, BET)

ตารางที่ 4.2 แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะบีอีที ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ก่อนการเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์นั้น ไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (HT) มีพื้นที่ผิวจำเพาะบีอีที ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน เท่ากับ 30.8 ตารางเมตรต่อกรัม 0.142 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 111.2 อังสตรอม ตามลำดับ และเมื่อเติมโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะบีอีที ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนของไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (5%SDS/HT) เท่ากับ 67.9 ตารางเมตรต่อกรัม 0.189 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 94.4 อังสตรอม ตามลำดับ

เมื่อเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง ที่ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนร้อยละ 30 40 และ 50 โดยมวล พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะบีอีที ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน ลดลงเป็น 9.1 ตารางเมตรต่อกรัม 0.012 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 80.6 อังสตรอม ตามลำดับ สำหรับตัวดูดซับ TEPA ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง 12.5 ตารางเมตรต่อกรัม 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 64.6 อังสตรอม ตามลำดับ สำหรับตัวดูดซับ TEPA ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง และ 1.4 ตารางเมตรต่อกรัม 0.003 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 40.9 อังสตรอม ตามลำดับ สำหรับตัวดูดซับ TEPA ร้อยละ 50 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง จะเห็นได้ว่า การเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์และการเพิ่มปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะบีอีที ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนมีค่าลดลง และ

ตารางที่ 4.2 ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ	ปริมาณ TEPA[a] (ร้อยละโดยมวล)	S_{BET}[b] (ตารางเมตรต่อกรัม)	V_p[b] (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	D_p[b] (อังสตรอม)
ไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (HT)	-	30.8	0.142	111.2
ไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (5%SDS/HT)	-	67.9	0.189	94.4
TEPA ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (30%TEPA/HT)	28.2	9.1	0.012	80.6
TEPA ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (30%TEPA-5%SDS/HT)	28.4	26.6	0.060	70.8
TEPA ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (40%TEPA/HT)	38.8	12.5	0.022	64.6
TEPA ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (40%TEPA-5%SDS/HT)	39.1	40.7	0.117	87.6
TEPA ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 10 โดยมวล (40%TEPA-10%SDS/HT)	38.9	0.6	n.d.[c]	n.d.[c]
TEPA ร้อยละ 50 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (50%TEPA/HT)	49.6	1.4	0.003	40.9
TEPA ร้อยละ 50 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (50%TEPA-5%SDS/HT)	49.7	5.7	0.006	66.9

[a] ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHN analyzer

[b] S_{BET} V_p และ D_p คือ พื้นที่ผิวจำเพาะบีอีที ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน ตามลำดับ

[c] ไม่สามารถตรวจวัดได้

เมื่อพิจารณาที่ตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล ที่ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับ ร้อยละ 30 40 และ 50 โดยมวล พบว่า ตัวดูดซับดังกล่าวมีพื้นที่ผิวจำเพาะบีอีที ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนมากกว่าตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง ที่ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนที่เท่ากัน การเพิ่มปริมาณโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตเป็นร้อยละ 10 โดยมวล สำหรับตัวดูดซับ TEPA ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 10 โดยมวล (40%TEPA-10%SDS/HT) พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะบีอีที ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนลดลงเมื่อเทียบกับตัวดูดซับ TEPA ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (40%TEPA-5%SDS/HT)

4.2 การออกแบบการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล (2^4 factorial design)

การออกแบบการทดลอง จะใช้ 2^4 แฟคทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรและอันตรกิริยาของตัวแปรที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่เตรียม **ตารางที่ 4.3** แสดงเมทริกซ์ของสี่ปัจจัยในรูปค่าที่เข้ารหัสและผลตอบสนองที่ผ่านการออกแบบการทดลองด้วย 2^4 แฟคทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ (Full 2^4 factorial design) โดยมีการเพิ่มจุดกลางเข้าไปสามจุด เพื่อตรวจสอบความมีส่วนโค้งของโมเดลที่ออกแบบ ข้อมูลจะผ่านการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สำหรับผลกระทบมาตรฐาน (Standardized effect) ของปัจจัยและอันตรกิริยาของตัวแปร รวมถึงค่าเอฟ (*F*-value) และค่าพี (*P*-value) ของผลกระทบในโมเดลการออกแบบที่ได้ ซึ่งค่าค่าจริงและค่าเข้ารหัสของตัวแปรสำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียลจะแสดงใน **ตารางที่ 4.4**

ตารางที่ 4.3 ตัวแปรการทดลองที่ถูกเข้ารหัสสำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล โดยทดลอง 16 การทดลองและเพิ่ม 4 จุดกึ่งกลาง

ลำดับมาตรฐาน	ลำดับทดลอง	A ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ (ร้อยละโดยมวล)	B ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับ (ร้อยละโดยมวล)	C อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	D ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละโดยปริมาตร)	ค่าความสามารถในการดูดซับ (มิลลิโมลต่อกรัม)
1	25	-1	-1	-1	-1	2.085
2	28	1	-1	-1	-1	0.905
3	1	-1	+1	-1	-1	1.041
4	24	1	+1	-1	-1	5.674
5	11	-1	-1	+1	-1	2.723
6	6	1	-1	+1	-1	1.475
7	27	-1	+1	+1	-1	2.008
8	13	+1	+1	+1	-1	2.109
9	10	-1	-1	-1	+1	4.150
10	26	+1	-1	-1	+1	2.964
11	19	-1	1	-1	+1	3.067
12	15	1	1	-1	+1	3.977
13	21	-1	-1	1	+1	5.053
14	2	1	-1	1	+1	3.613
15	9	-1	1	1	+1	4.026
16	3	1	1	1	+1	5.672
17	23	0	0	0	0	3.815
18	16	0	0	0	0	3.846
19	4	0	0	0	0	3.919
20	14	0	0	0	0	3.924

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าจริงและค่าเข้ารหัสของตัวแปรสำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล

ตัวแปร	ค่าเข้ารหัส (Coded values)			หน่วย
	ค่าสูง (+1)	ค่ากลาง (0)	ค่าต่ำ (-1)	
A: ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ	30	40	50	ร้อยละโดยมวล
B: ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับ	0	5	10	ร้อยละโดยมวล
C: อุณหภูมิการดูดซับ	60	80	100	องศาเซลเซียส
D: ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์	10	20	30	ร้อยละโดยปริมาตร

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พิจารณาจากการทดสอบค่าเอฟของฟิชเชอร์ (Fisher's F-test) และค่าความน่าจะเป็นของตัวแปรหลักทั้งสี่ ซึ่งได้แก่ (1) ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ หรือตัวแปร A (2) อุณหภูมิ หรือตัวแปร B (3) อัตราส่วน W/F หรือตัวแปร C และ (4) ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ หรือตัวแปร D และอันตรกิริยาของตัวแปร โดยสรุปไว้ใน**ตารางที่ 4.5** จากค่า R^2 ที่บ่งบอกถึงค่าที่เปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย มีค่าเท่ากับ 0.9997 และค่า Adj. R^2 (มีค่าเท่ากับ 0.9985) มีค่าใกล้เคียงกันกับค่า R^2 ซึ่งบ่งบอกว่าไม่มีปัจจัยหรืออันตรกิริยาที่ไม่มีความสำคัญรวมอยู่ในโมเดล มีการกระจายของข้อมูลระหว่างค่ากลาง (Mean) ร้อยละ 1.64 เมื่อพิจารณาดูจากค่า C.V. % และค่า Adeq. Precision มีค่ามากกว่า 4 แสดงว่าโมเดลมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะทำนายค่าความสามารถในการดูดซับ ซึ่งเป็นค่าผลตอบสนอง

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของเทอมที่มีความสำคัญสำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล

Source[a]	Sum of Squares	DF	Mean Square	*F*-value	*P*-value[b]	Percent Contribution
Model	35.06	15	2.34	798.52	< 0.0001	
A	0.31	1	0.31	106.70	0.0019	0.85
B	1.33	1	1.33	453.08	0.0002	3.61
C	0.50	1	0.50	169.42	0.0010	1.35
D	13.15	1	13.15	4491.25	< 0.0001	35.81
AB	9.53	1	9.53	3254.34	< 0.0001	25.95
AC	1.06	1	1.06	362.23	0.0003	2.89
AD	0.35	1	0.35	120.52	0.0016	0.96
BC	0.46	1	0.46	155.82	0.0011	1.24
BD	0.45	1	0.45	153.74	0.0011	1.23
CD	1.96	1	1.96	668.40	0.0001	5.33
ABC	0.75	1	0.75	257.57	0.0005	2.05
ABD	0.25	1	0.25	83.73	0.0028	0.67
ACD	1.61	1	1.61	551.53	0.0002	4.40
BCD	1.51	1	1.51	514.50	0.0002	4.10
ABCD	1.86	1	1.86	634.96	0.0001	5.06
Curvature	1.64	1	1.64	561.74	0.0002	4.48
Pure Error	0.009	3	0.003			0.02
Total	36.71	19				
R^2	0.9997	C.V. %		1.64		
Adj. R^2	0.9985	Adeq. Precision		95.609		

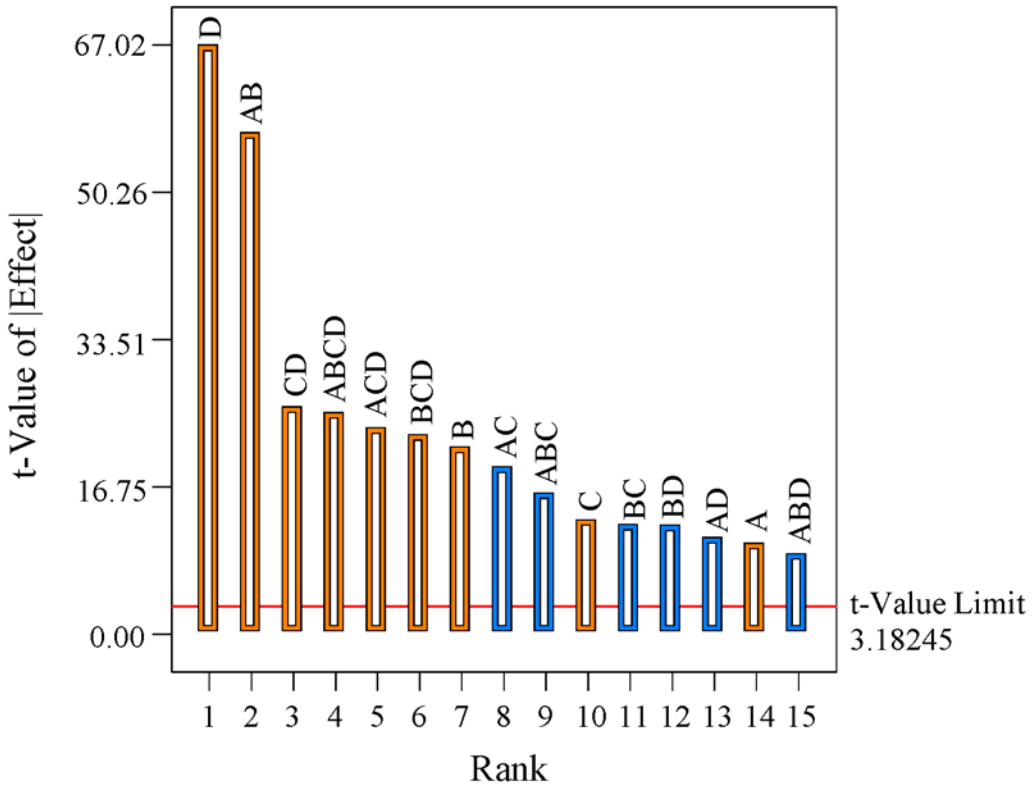
[a] The A, B, C and D factors refer to TEPA loading, SDS loading, adsorption temperature and CO_2 concentration, respectively.

[b] *P*-value is based on the 95 percent confidence interval.

ความสำคัญของแต่ละปัจจัยและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์แสดงในเทอมของร้อยละความผันแปร (Percent Contribution) ของแต่ละปัจจัย (แสดงใน**ตารางที่** 4.5) โดยเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ D (ร้อยละ 35.81) อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับและปริมาณ SDS ในตัวดูดซับหรือผลกระทบ AB (ร้อยละ 25.95) อันตรกิริยาของอุณหภูมิการดูดซับและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ CD (ร้อยละ 5.33) อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับ อุณหภูมิการดูดซับและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ ABCD (ร้อยละ 5.06) อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ อุณหภูมิการดูดซับและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ ACD (ร้อยละ 4.40) อันตรกิริยาของปริมาณ SDS ในตัวดูดซับ อุณหภูมิการดูดซับและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ BCD (ร้อยละ 4.10) ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับหรือผลกระทบ B (ร้อยละ 3.61) อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับและอุณหภูมิการดูดซับหรือผลกระทบ AC (ร้อยละ 2.89) อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับและอุณหภูมิการดูดซับหรือผลกระทบ ABC (ร้อยละ 2.05) อุณหภูมิการดูดซับหรือผลกระทบ C (ร้อยละ 1.35) อันตรกิริยาของปริมาณ SDS ในตัวดูดซับและอุณหภูมิการดูดซับหรือผลกระทบ BC (ร้อยละ 1.24) อันตรกิริยาของปริมาณ SDS ในตัวดูดซับและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ BD (ร้อยละ 1.24) อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ AD (ร้อยละ 0.96) ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับหรือผลกระทบ A (ร้อยละ 0.85) และอันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ ABD (ร้อยละ 0.67) ตามลำดับ ซึ่งค่าที่อยู่ในวงเล็บ คือ ค่าร้อยละความผันแปร และค่าร้อยละความผันแปรของความมีส่วนโค้งหรือ Curvature เท่ากับ 4.48 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ค่า *P*-value ของ Curvature พบว่า มีความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งทำให้ทราบว่า สมการเส้นตรงไม่เพียงพอต่อการทำนายผลตอบสนองอย่างค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

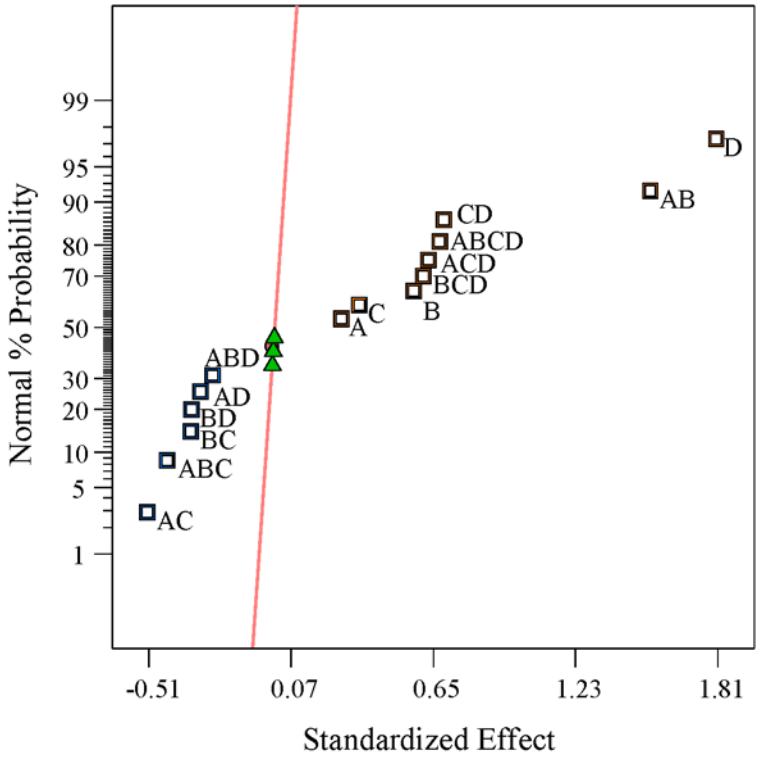
การประเมินระดับความสำคัญของตัวแปรหลักและอันตรกิริยาของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองจะแสดงด้วยแผนภูมิพาเรโต **รูปที่** 4.3 แสดงแผนภูมิพาเรโตที่พล็อตระหว่างตัวแปรหลักและอันตรกิริยาของตัวแปรกับค่า t-value ของผลกระทบสัมบูรณ์ ซึ่งค่า t-value ได้มาจากการหารผลกระทบเชิงตัวเลข (Numerical effect) ด้วยค่าความผิดพลาดมาตรฐาน (Standard error) ที่เกี่ยวข้อง และความสูงของแต่ละแถบในแนวตั้ง ใน**รูปที่** 4.3 เป็นค่าของ t-value โดย

ผลกระทบหรือตัวแปรหลักและอันตรกิริยาของตัวแปรที่มีค่า t-value สูงกว่าค่าจำกัด t-value (t-value limit) ที่ค่า 3.18245 แสดงว่าผลกระทบนั้นมีส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ความสูงของแถบยังบ่งบอกถึงระดับความสำคัญของตัวแปรหลักและอันตรกิริยาของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบสนอง ซึ่งเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ดังแสดงใน**รูปที่** 4.3 เรียงจากซ้ายไปขวา ตามลำดับ โดยแถบสีส้มและแถบสีฟ้าแสดงถึงผลกระทบในเชิงบวกและผลกระทบในเชิงลบ ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 แผนภูมิพาเรโต (Pareto chart) สำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ซึ่งตัวแปรเข้ารหัสแสดงในตารางที่ 4.4

พล็อตความน่าจะเป็นปกติของผลกระทบเพื่อประเมินความสำคัญของแต่ละตัวแปรและอันตรกิริยาของตัวแปร แสดงใน**รูปที่** 4.4 จากรูปจะเห็นได้ว่าไม่มีตัวแปรใดที่อยู่ในแนวเส้นตรงซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลกระทบทุกตัวมีแนวโน้มความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลกระทบที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญจะเบนออกนอกแนวเส้นตรงและผลกระทบใดมีแนวโน้มที่จะเบนออกนอกเส้นมาก ยิ่งส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบสนองมากเช่นกัน ดังนั้นตัวแปรและอันตรกิริยาของตัวแปรที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ D AB CD ABCD ACD BCD B AC ABC C BC BD AD A และ ABD ซึ่งรายละเอียดตัวแปรและอันตรกิริยาของตัวแปรแสดงใน**ตารางที่** 4.4

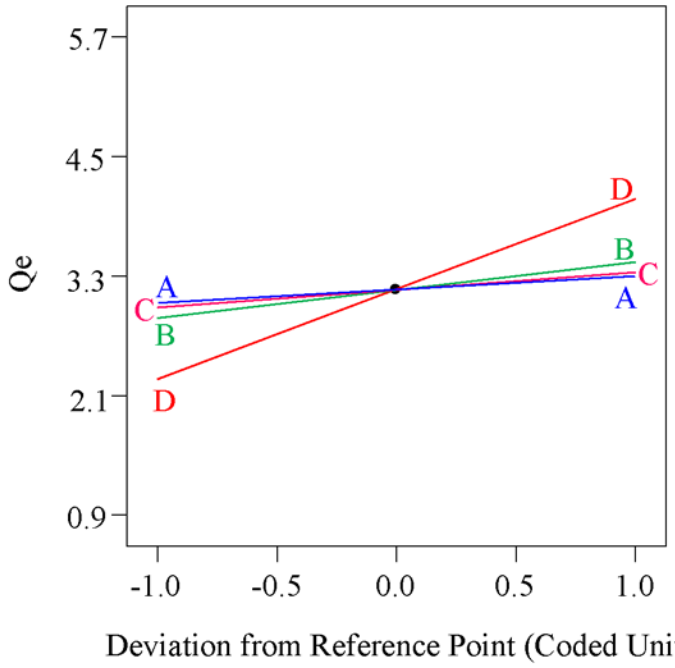


รูปที่ 4.4 พล็อตความน่าจะเป็นปกติ (Normal probability plot) ของตัวแปร 4 ตัวแปร (ตัวแปร A–D) และอันตรกิริยาของตัวแปร สำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ซึ่งตัวแปรเข้ารหัสแสดงในตารางที่ 4.4

ตัวแปรและอันตรกิริยาของตัวแปรที่เบนออกจากเส้นตรงที่มีค่าความน่าจะเป็นปกติ น้อยกว่า ร้อยละ 50 ได้แก่ AC ABC BC BD AD และ ABD ส่งผลต่อผลตอบสนอง (หรือค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์) ในเชิงลบ (Negative effects) ในขณะที่ตัวแปรและอันตรกิริยาของตัวแปรที่เบนออกจากเส้นตรงที่มีค่าความน่าจะเป็นปกติ มากกว่า ร้อยละ 50 ได้แก่ D AB CD ABCD ACD BCD B C และ A ส่งผลต่อผลตอบสนองในเชิงบวก (Positive effects) โดยข้อมูลดังกล่าวสนับสนุนผลการทดลองและผลทางทฤษฎี ดังแสดงในแผนภูมิพาเรโตและการวิเคราะห์ความแปรปรวน (แสดงใน**รูปที่** 4.3 และ**ตารางที่** 4.5)

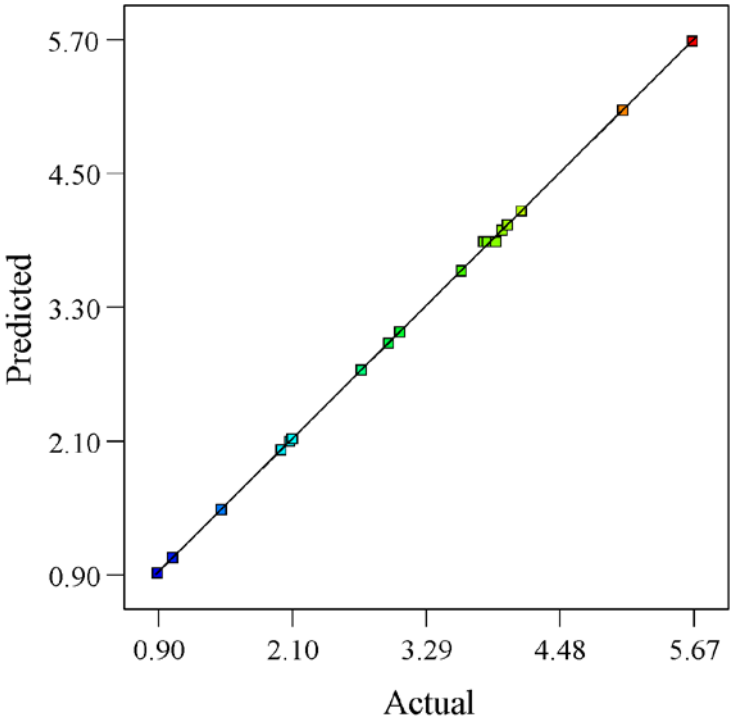
รูปที่ 4.5 แสดงพล็อตเพอร์เทอร์เบชั่นของตัวแปรหลัก 4 ตัวแปร สำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ซึ่งเป็นการรวมพล็อตหนึ่งตัวแปร (One factor plots) เข้าด้วยกัน พบว่า (1) สำหรับปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับหรือตัวแปร A ที่ร้อยละ 30 โดยมวล มีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ 3.02 มิลลิโมลต่อกรัม โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 3.30 มิลลิโมลต่อกรัม ที่ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับร้อยละ 50 โดยมวล (2) สำหรับปริมาณ SDS ในตัวดูดซับหรือตัวแปร B ที่ร้อยละ 0 โดยมวล มีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ 2.87 มิลลิโมลต่อกรัม โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 3.45 มิลลิโมลต่อกรัม ที่ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับร้อยละ 60 โดยมวล (3) สำหรับอุณหภูมิการดูดซับหรือตัวแปร C ที่ 60 องศาเซลเซียส มีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ 2.98 มิลลิโมลต่อกรัม โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 3.34 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิการดูดซับ 100 องศาเซลเซียส และ (4) สำหรับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์หรือตัวแปร D ที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตร มีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ 2.25 มิลลิโมลต่อกรัม โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4.06 มิลลิโมลต่อกรัม ที่ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับร้อยละ 30 โดยปริมาตร

จากการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเพิ่มระดับปัจจัยจากระดับต่ำ (Low level) ไปเป็นระดับสูง (High level) พบว่า ความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับต่ำเทียบเคียงกับระดับสูงของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ มีความแตกต่างกัน (0.28 มิลลิโมลต่อกรัม) น้อยกว่ากรณีของอุณหภูมิการดูดซับ (0.36 มิลลิโมลต่อกรัม) ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับ (0.58 มิลลิโมลต่อกรัม) และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (1.81 มิลลิโมลต่อกรัม) ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างนี้บ่งบอกถึงความสำคัญที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ยิ่งมีความแตกต่างมากก็จะมีผลกระทบมาก ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงในระดับที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวตอบสนอง



รูปที่ 4.5 พล็อตเพอร์เทอร์เบชั่น (Perturbation plot) ของตัวแปรหลัก 4 ตัวแปร สำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ซึ่งตัวแปรเข้ารหัสแสดงในตารางที่ 4.4

ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์นั้น ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลของแผนภูมิพาเรโต (**รูปที่** 4.3) พล็อตความน่าจะเป็นปกติของสี่ปัจจัย (**รูปที่** 4.4) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนใน**ตารางที่** 4.5 และ**รูปที่** 4.6 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการทำนาย พบว่า จุดทุกจุดอยู่ในแนวเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า โมเดลที่ได้มีความสมบูรณ์ไม่ได้ละทิ้งผลกระทบที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบสนองและการวิเคราะห์นี้ประสบผลสำเร็จเป็นที่ยอมรับได้



รูปที่ 4.6 พล็อตระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการทำนาย

4.3 **การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง** (FCCC-RSM analysis)

เนื่องจากความมีส่วนโค้งในโมเดลที่พบจากการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ดังนั้นในส่วนถัดมาจะทำการการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองเพื่อให้โมเดลมีความถูกต้องมากขึ้นและสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่เตรียม โดยกำหนดเงื่อนไขการดำเนินการที่เหมาะสมในการดูดซับภายใต้อิทธิพลของผลกระทบหลักทั้งสาม ซึ่งได้แก่ (1) ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับหรือตัวแปร A (2) ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับหรือตัวแปร B และ (3) อุณหภูมิการดูดซับหรือตัวแปร C โดยทำการจำกัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์หรือตัวแปร D เนื่องจากเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบสูงสุดต่อค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และส่งผลกระทบมากกว่าถึง 11-42 เท่าเมื่อเทียบกับตัวแปรหลักอื่นๆ ซึ่งส่งผลให้เกิดการบดบังผลกระทบของตัวแปรหลักทั้งสามและอันตรกิริยาของตัวแปรเหล่านี้ เมทริกซ์ของการทดลองแสดงใน**ตารางที่** 4.6 ส่วนค่าจริงและค่าเข้ารหัสของตัวแปรสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง แสดงใน**ตารางที่** 4.7

ตารางที่ 4.6 ตัวแปรการทดลองที่ถูกเข้ารหัสสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง FCCCD-RSM โดยทดลอง 14 การทดลองและเพิ่ม 4 จุดกึ่งกลาง

ลำดับมาตรฐาน	ลำดับทดลอง	A ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ (ร้อยละโดยมวล)	B ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับ (ร้อยละโดยมวล)	C อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าความสามารถในการดูดซับ (มิลลิโมลต่อกรัม)
1	17	-1	-1	-1	4.150
2	18	1	-1	-1	2.964
3	14	-1	1	-1	3.067
4	12	1	1	-1	3.977
5	8	-1	-1	1	5.053
6	7	1	-1	1	3.613
7	9	-1	1	1	4.026
8	13	1	1	1	5.672
9	5	-1	0	0	4.585
10	10	1	0	0	4.465
11	4	0	-1	0	4.295
12	6	0	1	0	5.175
13	3	0	0	-1	5.390
14	15	0	0	1	5.808
15	16	0	0	0	5.951
16	2	0	0	0	5.999
17	11	0	0	0	5.956
18	1	0	0	0	5.964

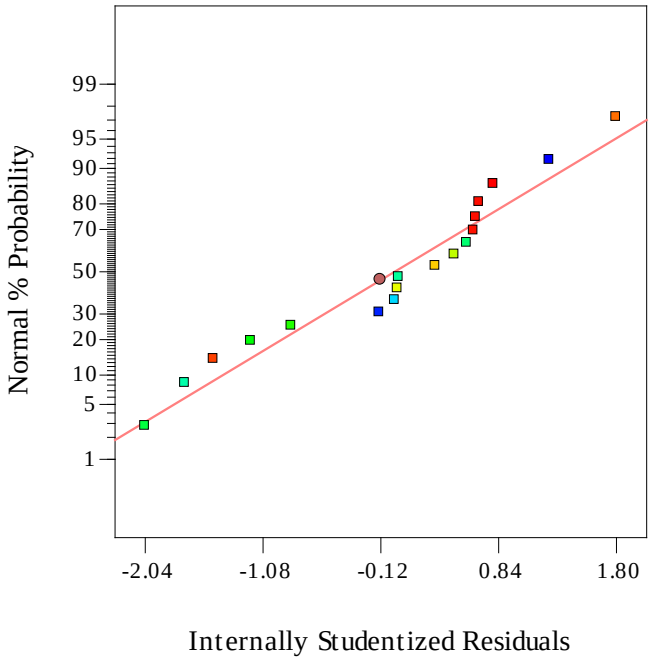
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าจริงและค่าเข้ารหัสของตัวแปรสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง

ตัวแปร	**ค่าเข้ารหัส** (Coded values)			หน่วย
	ค่าต่ำ (-1)	**ค่ากลาง** (0)	**ค่าสูง** (+1)	
A: ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ	30	40	60	ร้อยละโดยมวล
B: ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับ	0	5	10	ร้อยละโดยมวล
C: อุณหภูมิ	60	80	100	องศาเซลเซียส

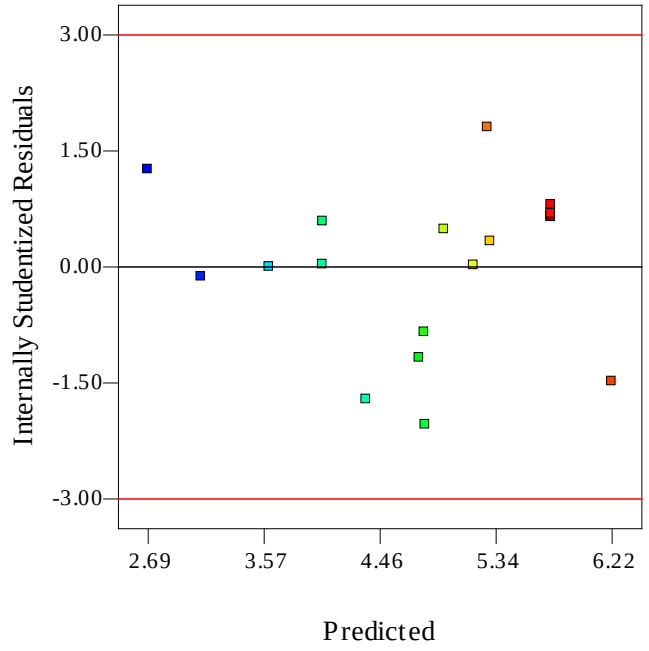
สมการพื้นผิวตอบสนองของค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในเทอมของปัจจัยเข้ารหัส (Coded factors) แสดงในสมการ (1)

$$Qe = +5.76 -0.019A +0.18B +0.46C +0.65AB -0.98A^2 -0.77B^2 \quad (1)$$

เมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้ (Adjusted r^2) ของโมเดลอยู่ที่ 0.9354 และ 0.9001 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเดลพื้นผิวตอบสนองมีความถูกต้องสูง ค่าความแม่นยำเพียงพอ (Adequate precision) เท่ากับ 17.589 ซึ่งค่านี้เมื่อมีค่ามากกว่า 4 แสดงว่า โมเดลที่ได้มีเทอมผลกระทบที่เพียงพอต่อการทำนายผลตอบสนอง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ (ก) พล็อตความน่าจะเป็นปกติกับส่วนตกค้าง แสดงใน**รูปที่** 4.7 พบว่า การกระจายของจุดข้อมูลอยู่ในแนวเส้นตรง และ (ข) พล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ได้จากการทำนาย แสดงใน**รูปที่** 4.8 พบว่า ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจนของการกระจายตัวของจุดข้อมูล ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า โมเดลหรือสมการพื้นผิวตอบสนองที่ได้มีการกระจายตัวแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete randomized distribution) และมีความเที่ยงตรงเพียงพอที่จะทำนายผลตอบสนอง

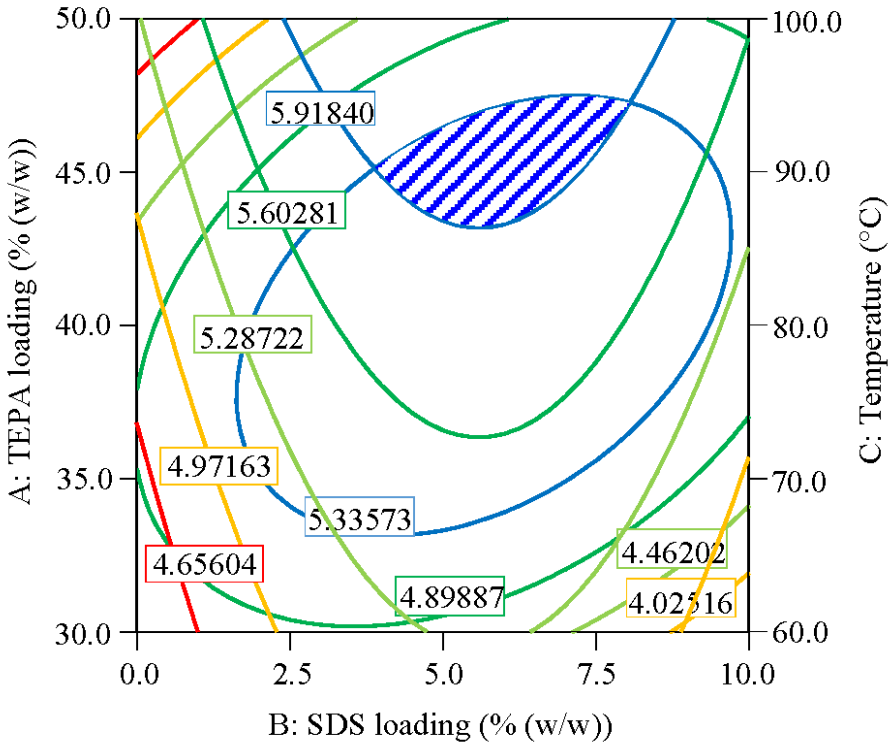


รูปที่ 4.7 พล็อตความน่าจะเป็นปกติกับส่วนตกค้างสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง



รูปที่ 4.8 พล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ได้จากการทำนายสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง

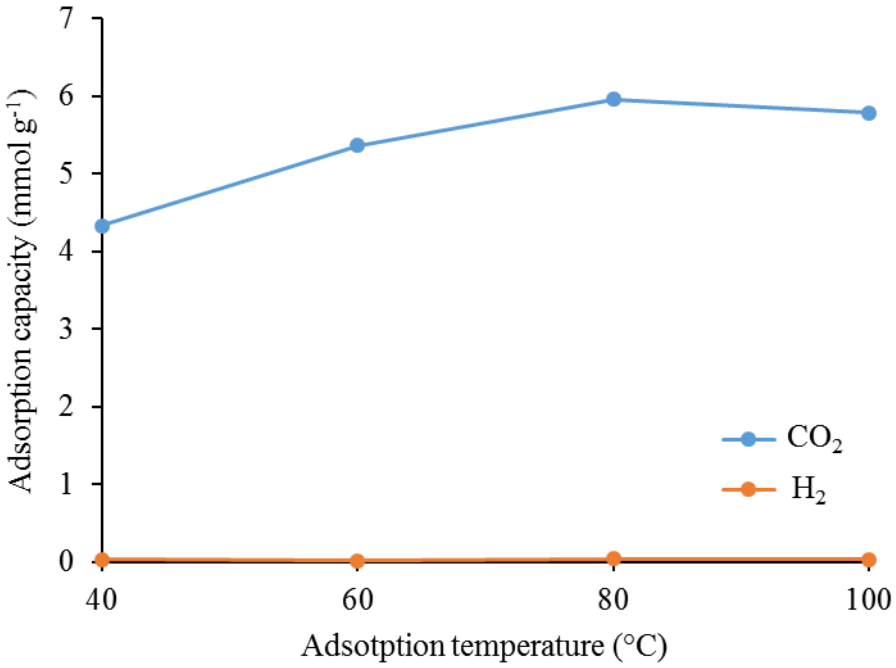
พล็อตโครงร่าง (Contour plot) ของผลกระทบหลักทั้งสามสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง แสดงใน**รูปที่** 4.9 ซึ่งบ่งบอกถึงแนวโน้มของค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และให้ได้มาซึ่งช่วงของแต่ละปัจจัยหลักที่ทำให้ได้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีที่สุด ส่วนที่แรงเงาสีน้ำเงินแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้และสภาวะที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้ค่าความสามารถในการดูดซับที่สูงที่สุดอยู่ในช่วงของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับร้อยละ 43-47 โดยมวล ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับร้อยละ 4-8 โดยมวล และอุณหภูมิการดูดซับ 86-94 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 30 โดยมวล ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้อยู่ในช่วง 5.6-6.0 มิลลิโมลต่อกรัม



รูปที่ 4.9 พล็อตโครงร่างของผลกระทบหลักทั้งสามสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง

4.4 การทดสอบการเลือกดักจับของตัวดูดซับในแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน (Selectivity test of the sorbent in mixed gas of CO_2 and H_2)

จากการทดสอบการเลือกดูดซับของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 5 โดยมวล เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการเลือกดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ดังแสดงใน**รูปที่** 4.10

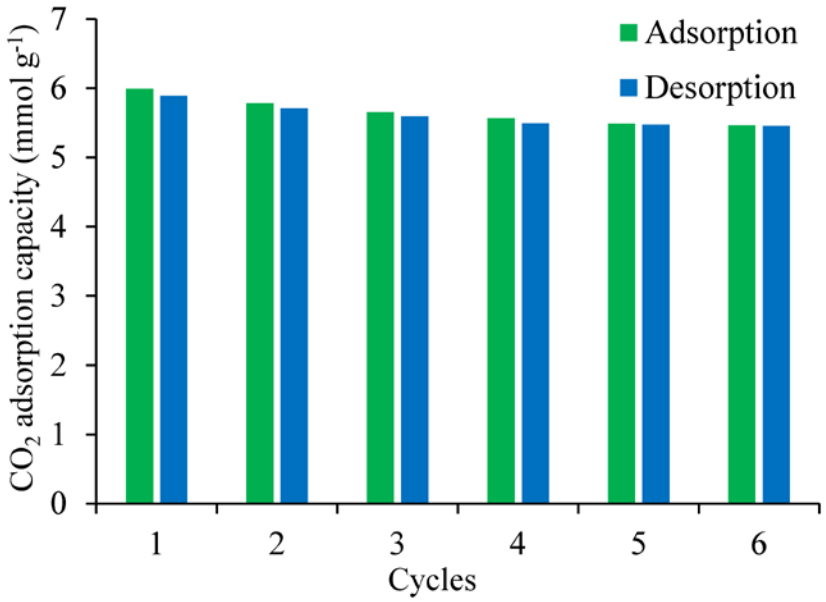


รูปที่ 4.10 การเลือกดูดซับของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 5 โดยมวล ในแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 40-100 องศาเซลเซียสและความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 30 โดยปริมาตร

จาก**รูปที่** 4.10 พบว่า ตัวดูดซับให้ค่าความสามารถในการดูดซับในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาใกล้เคียงกับกรณีทดสอบในแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์และฮีเลียม ซึ่งสอดคล้องกับผลการดูดซับของไฮโดรเจนซึ่งพบว่าตัวดูดซับนี้ไม่ดูดซับไฮโดรเจนในทุกช่วงอุณหภูมิ จึงกล่าวได้ว่าตัวดูดซับนี้สามารถใช้ในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สผสมทั้งในอากาศและกระแสไฮโดรเจนเข้มข้นที่มีการปนเปื้อนของคาร์บอนไดออกไซด์

4.5 การทดสอบความคงทนของตัวดูดซับ (Stability test of the sorbent)

จากการทดสอบการดูดและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์แบบเป็นวัฏจักรของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 5 โดยมวล เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการดูดซับและคายซับ และความคงทนของตัวดูดซับที่เตรียม ดังแสดงใน**รูปที่** 4.11 พบว่า การดูดซับและคายซับในช่วงสองวัฏจักรแรก มีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเล็กน้อย (จาก 5.99 มิลลิโมลต่อกรัม เป็น 5.78 มิลลิโมลต่อกรัม สำหรับการดูดซับและจาก 5.89 มิลลิโมลต่อกรัม เป็น 5.71 มิลลิโมลต่อกรัม สำหรับการคายซับ) ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มคงที่ตั้งแต่วัฏจักรที่สามเป็นต้นไป ซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 5.65 มิลลิโมลต่อกรัม สำหรับการดูดซับ และ 5.59 มิลลิโมลต่อกรัม สำหรับการคายซับ



รูปที่ 4.11 วัฏจักรการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 5 โดยมวล ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 30 โดยปริมาตร