บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ และศึกษาลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ รวมทั้งตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการสลายฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเชิงแสง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส ยี่ห้อ HACH รุ่น sension 378
2. เครื่องชั่งละเอียด
3. เครื่องกวนแม่เหล็ก
4. ตู้อบ (Oven)
5. เตาเผา (Furnace)
6. โถดูดความชื้น (desicator)
7. นาฬิกาจับเวลา
8. หลอดไฟ UV กำลังไฟฟ้า 9 วัตต์ Philip รุ่น PL-S
9. เครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer: XRD) JEOL รุ่น JSM-5800 LV
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) Jeol รุ่น JSM 6400
11. เครื่อง UV-VIS spectrophotometer Jasco รุ่น V-530
12. เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ

3.2 สารเคมีที่ใช้

1. ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทางการค้า Degussa P-25 (ประเทศสิงคโปร์)
2. แอซีทิลอะซีโตน (LR Grade, S D Fine-Chem Limited) (ประเทศอินเดีย)
3. ไอโซโพรพานอล (AR Grade, Lab supplies) (ประเทศนิวซีแลนซ์)
4. กรดไนตริก (AR Grade, QRec, Qatar) (ประเทศนิวซีแลนด์) และมีความบริสุทธิ์ 65%

5. ฟีนอล (Analytical reagent Grade, Fisher Scientific) (ประเทศนิวซีแลนด์) และมีความบริสุทธิ์ 99.5%

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมน้ำเสียตัวอย่าง

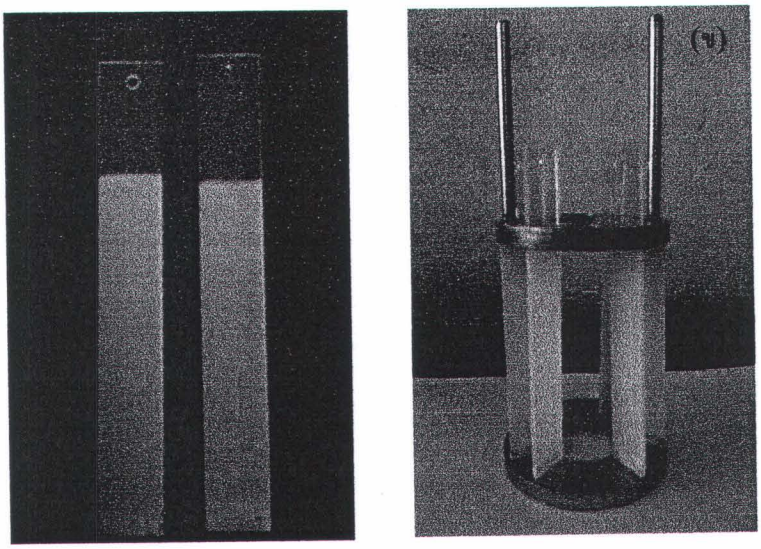
น้ำเสียตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้จากการเตรียมสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม แล้วนำไปทำการทดลอง

3.3.2 การเตรียมผิวแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต

ก่อนทำการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ นำแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตมาล้างผิวด้วยสารละลายกรดไนตริกเจือจาง โดยเตรียมสารละลายกรดไนตริกผสมน้ำในอัตราส่วนกรดไนตริก 6 ส่วนต่อน้ำ 1 ส่วน จุ่มแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตลงในสารละลายกรดไนตริกเจือจางเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นล้างออกด้วยเอทานอลและน้ำกลั่น ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.3.3 การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกนำมาเคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตโดยวิธีการจุ่มเคลือบ (dip-coating) แสดงดังรูป 3.1ก แผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต (20×130×2 มิลลิเมตร) ที่ผ่านการเตรียมผิวแล้วถูกนำมาเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ สารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์เตรียมได้โดยการเติมสารละลายไอโซโพรพานอลผสมน้ำในอัตราส่วนไอโซโพรพานอล 7 ส่วนต่อน้ำ 3 ส่วน ลงในไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งที่ผ่านการเผา (calcination) และไม่ผ่านการเผา ทำการกวนเป็นเวลา 15 นาที แล้วจึงเติมแอซีทิลอะซีโตนลงไปในสารละลายด้วยอัตราส่วนโดยโมลของแอซีทิลอะซีโตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ในช่วง 1.0-4.0 ทำการกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนได้สารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นนำแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตจุ่มลงในสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนพอลิเมทิลเมทาคริเลตจากนั้น



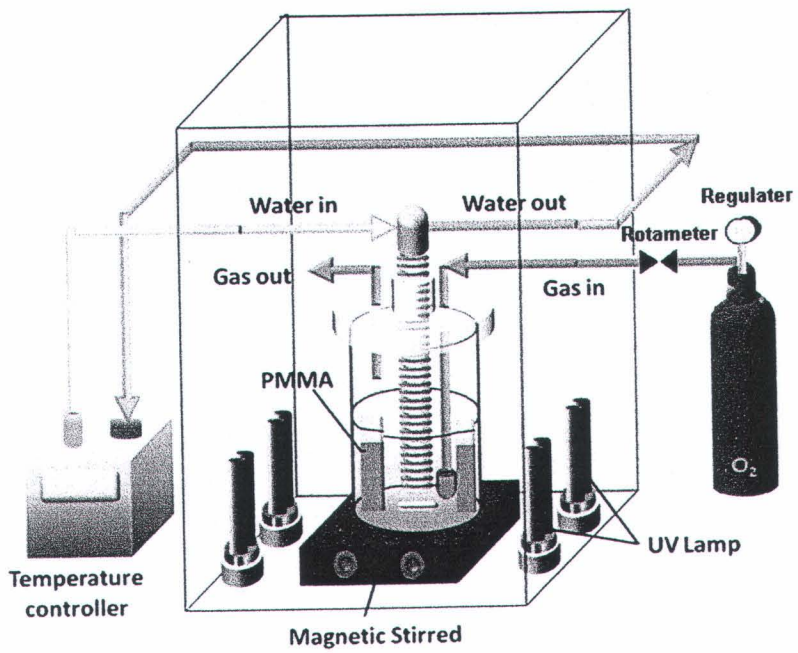
รูปที่ 3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต (ก) แผ่นพอลิเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ และ (ข) การวางแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์

ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตภายหลังเคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สำหรับผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถวัดสัณฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิการเผาต่าง ๆ ได้จากเครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จากนั้นนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ มาเคลือบแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตตามวิธีที่กล่าวไว้เบื้องต้น จากนั้นวางแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ผ่านการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในที่วางแผ่นให้มีลักษณะคล้ายกับครีบ (baffle) ในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปที่ 3.1ข)

3.3.4 การทดลองออกซิเดชันเชิงแสงของฟีนอลเร่งปฏิกิริยาด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต

เครื่องปฏิกรณ์สำหรับการทดลองออกซิเดชันเชิงแสงของฟีนอลเร่งปฏิกิริยาด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตดังแสดงในรูปที่ 3.2 ประกอบด้วยถังออกซิเจน กล่องฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตซึ่งควบคุมการไหลของแก๊สออกซิเจนที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ 30 $\pm$ 1 องศาเซลเซียส ถูกควบคุมโดยใช้การไหลของน้ำเข้า-ออก ภายในกล่องมีเครื่องปฏิกรณ์ทำจากแก้วปริมาตร 1 ลิตรล้อมรอบด้วยหลอดอัลตราไวโอเล็ต

ขนาด 9 วัตต์ จำนวน 15 หลอด ในการทดลองนำแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์วางรอบตะแกรงวงกลมคล้ายกับครีบในเครื่องปฏิกรณ์แล้วนำไปแช่ในสารละลายฟีนอลในน้ำปราศจากไอออนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 ส่วนในล้านส่วน (พีพีเอ็ม) เก็บสารละลายครั้งละ 10 มิลลิลิตร ทุกชั่วโมงเป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลคงเหลืออยู่ด้วยเครื่อง UV-VIS spectrometer โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษามีดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับการขจัดฟีนอลด้วยกระบวนการออกซิเดชันเชิงแสงเร่งปฏิกิริยาด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการขจัดฟีนอลด้วยกระบวนการออกซิเดชันเชิงแสงเร่งปฏิกิริยาด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต

ตัวแปร	ช่วงที่ใช้ในการศึกษา
จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์	2-8 แผ่น
ค่าความเป็นกรด-เบส	3-9
ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล	10-100 พีพีเอ็ม
กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต	45-135 วัตต์
ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	0-1 โมลาร์
อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน	0-800 มิลลิลิตรต่อนาที
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	30-70 องศาเซลเซียส

3.3.5 ทดสอบลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์

3.3.5.1 เครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer: XRD)

เครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็น รุ่น D8 Discover ของ Bruker เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารตัวอย่างถูกบันทึกด้วยเครื่อง Rugaku RINT 2000 diffractometer โดยใช้ตัวกรองนิกเกิล แหล่งกำเนิดแสง CuKα (ความยาวคลื่นเท่ากับ 1.542 อังสตรอม) ที่ 40 กิโลโวลต์และ 30 มิลลิโวลต์ สารตัวอย่างถูกดันเข้าไปอยู่ในหลอดแก้วแล้วพักไว้ที่กระจกแก้ว หลังจากนั้นจะวัดที่ 2θ เท่ากับ 15 ถึง 70 องศา โดยใช้วิธีการแบบต่อเนื่องในอัตรา 5 องศาต่อนาที ผลการวิเคราะห์แสดงพีกซึ่งบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง รวมทั้ง 2θ ค่า d และค่าเข้มแสง และสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้ โดยไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเป็นผลึก 2 สัณฐานด้วยกัน คือ สัณฐานอนาเทสแสดงพีกที่ 101 (2θ ~ 25.3 องศา) และสัณฐานรูไทล์ที่ 110 (2θ ~ 27.35 องศา)

3.3.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็น รุ่น JSM-5800 LV ยี่ห้อ JEOL กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน (morphology) ตัวอย่างจะถูกเคลือบด้วยทองเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าก่อนนำไปวัดที่อัตราการเร่งศักย์ไฟฟ้าที่ 15 กิโลโวลต์

3.3.5.3 เครื่อง UV-VIS spectrophotometer

เครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็น รุ่น V-530 ยี่ห้อ Jasco ใช้ในระบุความสามารถในการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โดยการวิเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่น 190-800 นาโนเมตร และใช้ในการวัดปริมาณของฟีนอลโดยใช้หมวดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อหาปริมาณฟีนอลคงเหลือ โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- นำสารตัวอย่างวิเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่น 190-800 นาโนเมตร เพื่อหาความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) ของฟีนอล จะได้ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 269 นาโนเมตร ดังแสดงในภาคผนวก ก
- ทำ Calibration curve โดยวัดที่ค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 269 นาโนเมตร จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของฟีนอล แสดงในภาคผนวก ข
- นำสารตัวอย่างไปทำการวัดที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 269 นาโนเมตร จะได้ค่าการดูดกลืนแสง
- คำนวณหาปริมาณฟีนอลคงเหลือจากสมการความสัมพันธ์ แสดงตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ข

3.4 การวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลสองระดับ (Montgomery, 2001)

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้กันมากในการทดลองที่เกี่ยวกับหลายปัจจัย โดยศึกษาถึงผลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมต่อการตอบสนองซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (2^k) มีประโยชน์มากในการคัดเลือกปัจจัยสำคัญและความสัมพันธ์ของปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลสองระดับเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์ ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษา 4 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล ระดับของปัจจัยแต่ละตัวจะแทนด้วยระดับ "ต่ำ (-1)" และ "สูง (+1)" ช่วงในการศึกษาปัจจัยแสดงดังตารางที่ 3.2 แบบจำลองการคำนวณการออกแบบ 2^4 ประกอบด้วย 4 ปัจจัยหลัก 6 อันตรกิริยาของสองปัจจัย 4 อันตรกิริยาของสามปัจจัย และ 1 อันตรกิริยาของสี่ปัจจัย ดังนั้นแบบจำลองการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^4 ที่สมบูรณ์ประกอบด้วย $2^4 - 1$ โดยทั่วไปการคำนวณการออกแบบ 2^4 หาได้จาก 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนประมาณผลของปัจจัยต่าง ๆ และคำนวณผลรวมของกำลังสองของแต่ละปัจจัย โดยคอนแทรสต์ (contrast) ที่เกี่ยวข้องกับแต่ละปัจจัยในการคำนวณขั้นแรกนั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเครื่องหมายบวกและลบ ดังแสดงในตารางภาคผนวก ค

ตารางที่ 3.2 สภาวะของการออกแบบ 2^4 ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลด้วยการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ปัจจัย	ชื่อ	ระดับต่ำ (-1)	ระดับสูง (+1)
A	จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบ TiO_2	2 แผ่น	8 แผ่น
B	ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล	50 พีพีเอ็ม	100 พีพีเอ็ม
C	กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต	45 วัตต์	135 วัตต์
D	ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	0 โมลาร์	0.626 โมลาร์

โดยทั่วไปคอนแทรสต์ของปัจจัย "ABCD" หาได้จากการอธิบายทางด้านขวามือของสมการ 3.1

$$\text{คอนแทรสต์}_{ABCD} = (a\pm1)(b\pm1)(c\pm1)(d\pm1) \qquad (3.1)$$

คอนแทรสต์ที่ใช้ในการประมาณผลและผลรวมของกำลังสอง คำนวณตามสมการ 3.2 และสมการ 3.3 ตามลำดับ โดย n คือจำนวนครั้งในการทำซ้ำ

$$\text{การประมาณผล}_{ABCD} = \frac{2\ (\text{คอนแทรสต์}_{ABCD})}{n2^4} \qquad (3.2)$$

$$\text{ผลรวมของกำลังสอง}_{ABCD} = \frac{2\ (\text{คอนแทรสต์}_{ABCD})^2}{n2^4} \qquad (3.3)$$

ขั้นตอนที่สองเป็นการทดลอง 16 ครั้งได้จากออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^4 ประกอบด้วยปัจจัยหลักและอันตรกิริยา

ขั้นตอนที่สามเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เพื่อประมาณค่าปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่สำคัญ ตารางที่ 3.3 แสดงรูปแบบทั่วไปของการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2^4 ด้วยการทำซ้ำจำนวน n ครั้ง และใช้ F_0 ในการประมาณค่าถ้าตัวแปรนั้นเป็นปัจจัยที่สำคัญ

ขั้นตอนที่สี่เป็นการปรับแต่งการออกแบบโดยการกำจัดปัจจัยที่ไม่สำคัญ เมื่อได้ปัจจัยสำคัญแล้วจะประมาณค่าสัมประสิทธิ์คำนวณตามสมการ 3.4 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S) ของการทดลองหาได้จากรากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ดังสมการ 3.5 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error, se) สำหรับการประมาณค่าปัจจัยและประมาณค่าสัมประสิทธิ์คำนวณตามสมการ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ตารางที่ 3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการออกแบบ 2^4

แบบจำลอง	ผลรวมกำลังสอง	ร้อยละการกระจายตัว	ตัวแปรอิสระ	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง	F_0
ปัจจัยหลัก					
A	SS_A	$= (SS_A/SS_T)\times100$	1	$MS_A = SS_A/1$	$= MS_A/ MS_E$
B	SS_B	$= (SS_B/SS_T)\times100$	1	$MS_B = SS_B/1$	$= MS_B/ MS_E$
C	SS_C	$= (SS_C/SS_T)\times100$	1	$MS_C = SS_C/1$	$= MS_C/ MS_E$
D	SS_D	$= (SS_D/SS_T)\times100$	1	$MS_D = SS_D/1$	$= MS_D/ MS_E$
อันตรกิริยาของสองปัจจัย					
AB	SS_{AB}	$= (SS_{AB}/SS_T)\times100$	1	$MS_{AB} = SS_{AB}/1$	$= MS_{AB}/ MS_E$
AC	SS_{AC}	$= (SS_{AC}/SS_T)\times100$	1	$MS_{AC} = SS_{AC}/1$	$= MS_{AC}/ MS_E$
AD	SS_{AD}	$= (SS_{AD}/SS_T)\times100$	1	$MS_{AD} = SS_{AD}/1$	$= MS_{AD}/ MS_E$
BC	SS_{BC}	$= (SS_{BC}/SS_T)\times100$	1	$MS_{BC} = SS_{BC}/1$	$= MS_{BC}/ MS_E$
BD	SS_{BD}	$= (SS_{BD}/SS_T)\times100$	1	$MS_{BD} = SS_{BD}/1$	$= MS_{BD}/ MS_E$
CD	SS_{CD}	$= (SS_{CD}/SS_T)\times100$	1	$MS_{CD} = SS_{CD}/1$	$= MS_{CD}/ MS_E$
อันตรกิริยาของสามปัจจัย					
ABC	SS_{ABC}	$= (SS_{ABC}/SS_T)\times100$	1	$MS_{ABC} = SS_{ABC}/1$	$= MS_{ABC}/ MS_E$
ABD	SS_{ABD}	$= (SS_{ABD}/SS_T)\times100$	1	$MS_{ABD} = SS_{ABD}/1$	$= MS_{ABD}/ MS_E$
ACD	SS_{ACD}	$= (SS_{ACD}/SS_T)\times100$	1	$MS_{ACD} = SS_{ACD}/1$	$= MS_{ACD}/MS_E$
BCD	SS_{BCD}	$= (SS_{BCD}/SS_T)\times100$	1	$MS_{BCD} = SS_{BCD}/1$	$= MS_{BCD}/MS_E$
อันตรกิริยาของสี่ปัจจัย					
ABCD	SS_{ABCD}	$= (SS_{ABCD}/SS_T)\times100$	1	$MS_{ABCD} = SS_{ABCD}/1$	$=MS_{ABCD}/MS_E$
ค่าความคลาดเคลื่อน	SS_E	$= (SS_E/SS_T)\times100$	$2^4(n-1)$	$MS_E = SS_E/2^4(n-1)$	
ผลรวม	SS_T		$n2^4-1$		

เมื่อ SS_T คือ ผลรวมกำลังสองของแต่ละปัจจัย

SS_E คือ ผลรวมกำลังสองที่เกิดจากความคลาดเคลื่อน

$$SS_E = SS_T - SS_{subtotals}$$

โดย $$SS_{subtotals} = SS_A + SS_B + \ldots + SS_{ABCD}$$

$$\text{การประมาณค่าสัมประสิทธิ์}_{ABCD} = \frac{\text{การประมาณค่าปัจจัย}_{ABCD}}{2} \quad (3.4)$$

$$S = \sqrt{MS_E} \quad (3.5)$$

$$\text{se (การประมาณค่าปัจจัย)} = \frac{2S}{\sqrt{n2^4}} \quad (3.6)$$

$$\text{se (การประมาณค่าสัมประสิทธิ์)} = \frac{S}{\sqrt{n2^2}} \quad (3.7)$$

เมื่อ S คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

MS_E คือ ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง

se คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่าปัจจัยเป็นสองเท่าของค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ในการจำลองการถดถอยของการออกแบบ 2^4 ขั้นตอนที่ห้าเป็นการวิเคราะห์ส่วนตกค้างเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

3.4.1 ผลตกค้าง (Residuals) และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model adequacy checking) (Montgomery, 2001)

ก่อนสรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ความถูกต้องของแบบจำลองต้องทำการตรวจสอบ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบเบื้องต้น คือ การวิเคราะห์ผลตกค้าง (residual analysis) ผลตกค้าง (residuals, e) ของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลสี่ปัจจัย แสดงดังสมการ 3.8

$$e = Y - \hat{Y} \quad (3.8)$$

เมื่อ Y คือ ค่าจริง

$\hat{Y}$ คือ ค่าทำนาย

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำได้ง่ายโดยการวิเคราะห์ผลตกค้างด้วยกราฟความสัมพันธ์ดังนี้

3.4.1.1 ความสัมพันธ์ของ Normal probability กับผลตกค้าง

ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal probability และผลตกค้างเป็นขั้นตอนที่เป็นประโยชน์อย่างมากเพราะในการวิเคราะห์ความแปรปรวนมักมีผลกับผลตกค้าง ถ้าการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนเป็นปกติ จะได้ชุดข้อมูลเป็นเส้นตรง เส้นตรงที่ปรากฏจะให้ความสำคัญกับค่ากลางมากกว่าค่าสูงสุด

3.4.1.2 ความสัมพันธ์ของผลตกค้างกับค่าทำนาย

ถ้าแบบจำลองถูกต้อง ส่วนตกค้างไม่ควรมีความสัมพันธ์เป็นโครงสร้าง (Structureless) ซึ่งในส่วนสำคัญควรไม่สัมพันธ์กับตัวแปรอื่น ๆ รวมทั้งค่าตอบสนองที่ทำนายได้ การตรวจสอบอย่างง่ายโดยการสร้างกราฟระหว่างส่วนตกค้าง (e) เปรียบเทียบกับค่าทำนาย $\hat{Y}$ โดยกราฟนี้จะไม่แสดงให้เห็นรูปแบบหรือโครงสร้างที่ชัดเจน

3.4.2 **สมการถดถอย** (Montgomery, 2001)

ในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลสองระดับเป็นการออกแบบที่ง่ายให้ผลที่ชัดเจนในการทดลองในเทอมของสมการถดถอย (regression model) เพราะการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลสองระดับเป็นเพียงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลของแต่ละปัจจัยหรือสามารถใช้แบบจำลองค่าเฉลี่ย แต่สมการถดถอยมีความเป็นธรรมชาติมากและใช้งานง่ายสำหรับการทำนายค่าใด ๆ สมการถดถอยแสดงดังสมการ 3.9

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + ... + \beta_k X_k \qquad (i = 1, 2, ..., m) \qquad (3.9)$$

เมื่อ $\hat{Y}_1$ คือ ค่าทำนายใด ๆ (i คือ จำนวนของค่าตอบสนองของตัวแปร)

X_k คือ สัญลักษณ์แทนปัจจัยใด ๆ (k คือ จำนวนปัจจัยหลัก)

β_0 คือ ค่าตอบสนองเฉลี่ยของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (จุดตัดแกน y)

β_k คือ ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ (สัมประสิทธิ์ถดถอย)