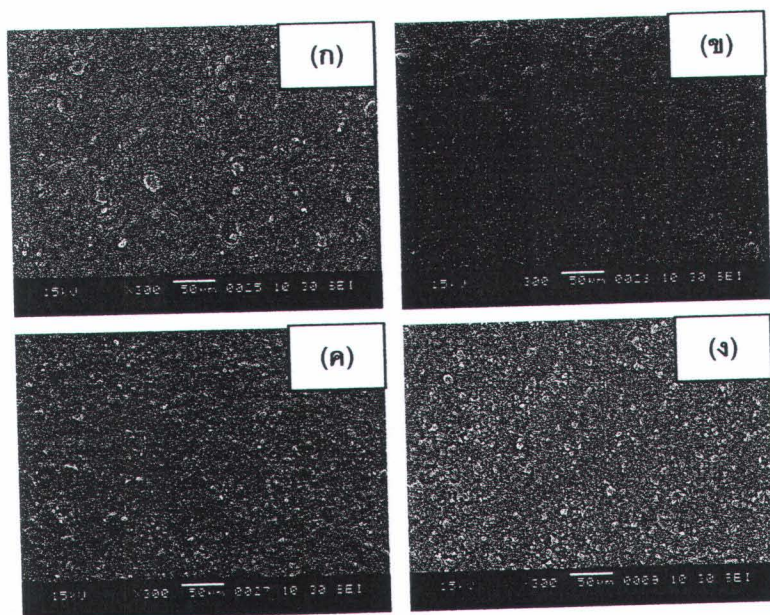


บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของแอซีทิลอะซีโตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์และจำนวนรอบในการเคลือบต่อลักษณะและประสิทธิภาพในการจัดฟีนอล

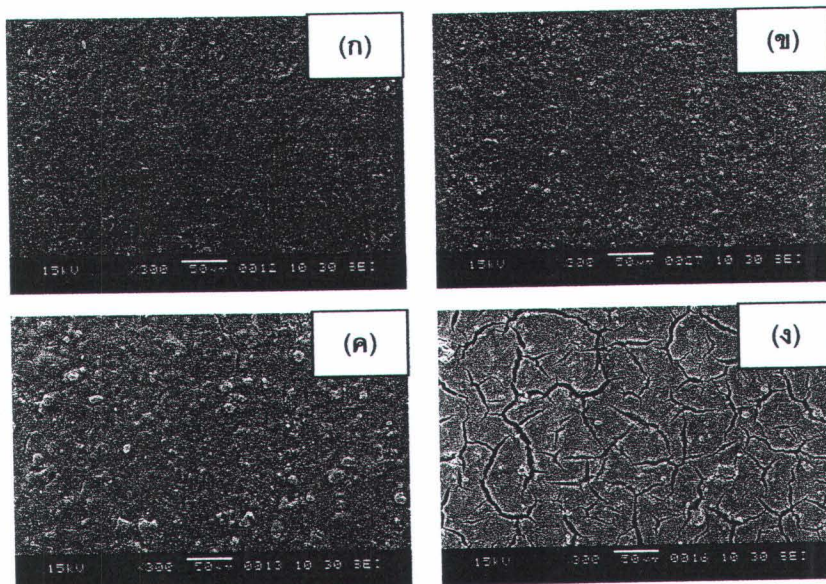
รูปที่ 4.1 แสดงภาพพื้นผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนพอลิเมทิลเมทาคริเลต พบว่าการยึดเกาะของไทเทเนียมไดออกไซด์บนพอลิเมทิลเมทาคริเลตขึ้นกับอัตราส่วนโดยโมลของแอซีทิลอะซีโตน (acetyl acetone, ACA) ต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ (ACA/TiO_2) โดยการเพิ่ม ACA/TiO_2 จาก 1.0 (รูปที่ 4.1ก) และ 2.0 (รูปที่ 4.1ข) ไปเป็น 3.0 (รูปที่ 4.1ค) และ 4.0 (รูปที่ 4.1ง) ทำให้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้มีความเรียบและเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นเนื่องจากแอซีทิลอะซีโตนช่วยเพิ่มความมีขั้วและการเกาะติดบนผิวของพอลิเมอร์ (Yang และ Han, 2008)



รูปที่ 4.1 ภาพพื้นผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนโดยโมลของแอซีทิลอะซีโตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) $\text{ACA/TiO}_2 = 1.0$ (ข) $\text{ACA/TiO}_2 = 2.0$ (ค) $\text{ACA/TiO}_2 = 3.0$ และ (ง) $\text{ACA/TiO}_2 = 4.0$ (จำนวนรอบในการเคลือบสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ = 3 รอบ)

รูปที่ 4.2 แสดงผลของจำนวนรอบในการจุ่มเคลือบสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตต่อปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต เมื่อกำหนดให้ ACA/TiO_2 คงที่ที่ 3.0 พบว่าจำนวนรอบในการเคลือบ 1 (รูปที่ 4.2ก) และ 3 รอบ (รูปที่ 4.2ข) ส่งผลให้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้มีความเรียบและเป็นเนื้อเดียวกัน แต่เมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการเคลือบเป็น 5 (รูปที่ 4.2ค) และ 10 รอบ (รูปที่ 4.2ง) ส่งผลให้ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีรอยแตกเกิดขึ้นบนผิวของฟิล์ม ทั้งนี้อาจเกิดจากการระเหยของตัวทำละลายและแอซีทิลอะซีโตนซึ่งมีมากกว่าการจุ่มเคลือบ 1 และ 3 รอบ ขณะที่ทำการอบแผ่น (Jang และ Han, 2008)

ตารางที่ 4.1 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของแอซีทิลอะซีโตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์และจำนวนรอบในการจุ่มเคลือบสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าเมื่อกำหนดจำนวนรอบของการเคลือบสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 3 รอบ การเพิ่มอัตราส่วนของแอซีทิลอะซีโตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลเพิ่มขึ้น อัตราส่วนโดยโมลของแอซีทิลอะซีโตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 3.0 ให้ประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอล 62.5% ทั้งนี้เนื่องมาจากแอซีทิลอะซีโตนช่วยเพิ่มความมีตัวของฟิล์ม



รูปที่ 4.2 ภาพพื้นผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่จำนวนรอบในการเคลือบ (ก) 1 รอบ (ข) 3 รอบ (ค) 5 รอบ และ (ง) 10 รอบ ($ACA/TiO_2 = 3.0$)

ตารางที่ 4.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของแอซีทิลอะซีโตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์และจำนวนรอบในการเคลือบต่อประสิทธิภาพการจัดฟีนอล

อัตราส่วนโดยโมล- ของแอซีทิลอะซีโตน ต่อไทเทเนียมได ออกไซด์	จำนวนรอบใน การเคลือบ ไทเทเนียม ไดออกไซด์	ปริมาณไทเทเนียมได ออกไซด์บนแผ่นพอลิ เมทิลเมทาคริเลต* (กรัม)	การจัด ฟีนอลที่ 5 ชั่วโมง (%)
1.0	3	0.18	41.6
2.0	3	0.36	43.2
3.0	3	0.57	62.5
4.0	3	0.76	60.0
5.0	3	0.39	49.8
3.0	1	0.33	59.5
3.0	5	0.64	68.5
3.0	10	0.96	54.4

* ปริมาณรวมไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตจำนวน 8 แผ่น ภาวะที่ใช้ในการทดลอง : ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล = 50 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรด-เบส = 5.5 กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส

บางไทเทเนียมไดออกไซด์ไปยังผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลตทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกาะติดบนผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลตมากขึ้น (Hu และ Yuan, 2006) จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนของแอซีทิลอะซีโตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 5.0 กลับลดประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล เนื่องจากปริมาณตัวทำละลายแอซีทิลอะซีโตนมีมากเกินไป

สำหรับผลของจำนวนรอบในการเคลือบสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ ACA/TiO_2 เท่ากับ 3.0 พบว่าจำนวนรอบในการจุ่มเคลือบมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวรองรับมากขึ้นเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น และพบว่าจำนวนรอบในการจุ่มเคลือบเท่ากับ 5 รอบ มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลได้มากที่สุดถึง 68.5% อย่างไรก็ตามการเพิ่มจำนวนรอบในการจุ่มเคลือบมากเกินไปส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลลดลง ซึ่งเกิดจากการบดบังแสงกันเอง

ของไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิวของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Fujishima และคณะ,1999, Liu และคณะ, 2006)

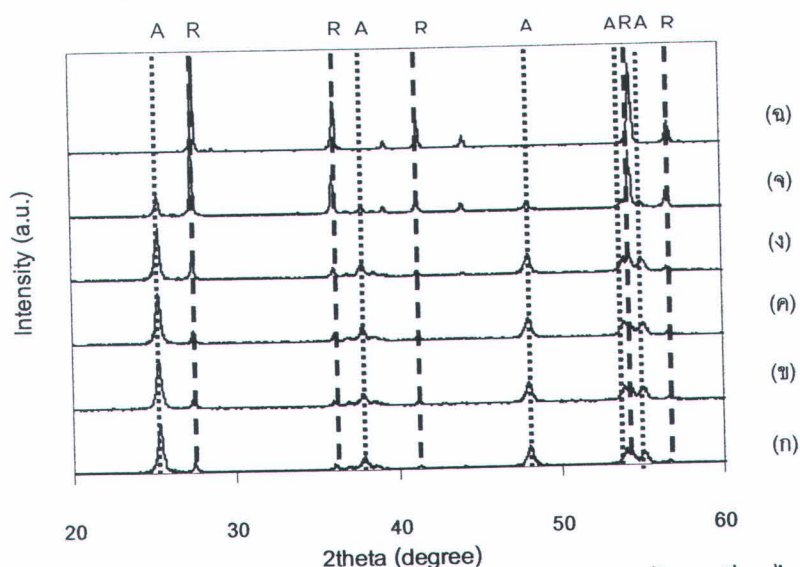
เมื่อวิเคราะห์หาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอยู่จริงบนผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลต ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนซึ่งใช้ Energy-Dispersive X-ray Spectrometer ดังตารางที่ 4.2 พบว่าผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่จริง ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ จำนวนรอบในการรุ่มเคลือบสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 3 5 และ 10 รอบเท่ากับ 47.7 54.8 54.0 และ 52.9% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิว ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการเคลือบจาก 1 รอบ ไปเป็น 3 รอบ แต่ เมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการเคลือบเป็น 5 และ 10 รอบ ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลตลดลง ทั้งนี้อาจเกิดจากความสามารถที่จำกัดในการยิงอิเล็กตรอนลงบนผิวของ พอลิเมทิลเมทาคริเลตในช่วงความหนาค่าหนึ่ง จึงทำให้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่วิเคราะห์ ได้มีปริมาณลดลง

ตารางที่ 4.2 ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอยู่จริงบนผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลต

จำนวนรอบในการเคลือบ	Ti	
	wt%	at. %
1	47.7	22.9
3	54.8	28.6
5	54.0	27.8
10	52.9	27.0

4.2 ผลของอุณหภูมิในการเผาไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพในการจัดฟีนอล

ประสิทธิภาพในการจัดฟีนอลของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยรูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ก่อนและหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิในช่วง 400-800 องศาเซลเซียส พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ก่อนการเผาและหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400-800 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างผลึกแบบผสมระหว่างสัณฐานแบบอนาเทสและรูไทล์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน พบตำแหน่งพีกอนาเทส 2θ ที่ 25.2 37.9 47.8 53.8 และ 55.0 องศา และตำแหน่งพีกูไทล์ 2θ ที่ 27.4 36.1 41.2 และ 54.3 องศา (Smith, 1960) ตารางที่ 4.3 แสดงผลของอุณหภูมิการเผาต่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของสัณฐานแบบอนาเทส/รูไทล์และระดับการสลายฟีนอลที่ 5 ชั่วโมง พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P-25 ประกอบด้วยสัณฐานแบบอนาเทส/รูไทล์เท่ากับ 70/30 โดยน้ำหนัก จากงานวิจัยของ Magglie และคณะ (2001) รายงานว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีสัณฐานผสมระหว่างอนาเทส (70-75%) และรูไทล์ (30-25%) มีความว่องไวสูงกว่าการมีสัณฐานเพียงอย่างเดียวซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัย เมื่อเผาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงถึง 700 องศาเซลเซียสทำให้สัณฐานแบบอนาเทสเปลี่ยนไปเป็นรูไทล์ (Xie และ Yuan, 2003) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความว่องไวต่ำกว่าแบบอนาเทส (Fujishima และคณะ, 1999) โดยระดับการสลายฟีนอลของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง 23.4% ภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิในการเผาต่อรูปแบบ XRD ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์: (ก) ไม่เผา (ข) 400 องศาเซลเซียส (ค) 500 องศาเซลเซียส (ง) 600 องศาเซลเซียส (จ) 700 องศาเซลเซียส และ (ฉ) 800 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสัณฐานแบบอนาเทสต่อรูไทล์ที่อุณหภูมิการเผาไทเทเนียมไดออกไซด์แตกต่างกัน

อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสัณฐาน แบบอนาเทส/รูไทล์	การจัดฟีนอลที่ 5 ชั่วโมง (%)
ไม่เผา	70/30	68.5
400	77/22	50.7
500	68/32	62.5
600	67/33	36.2
700	51/49	23.4

* ภาวะที่ใช้ในการทดลอง : จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ = 8 แผ่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล = 50 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรด-เบส = 5.5 กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส

4.3 จลนพลศาสตร์ของการกำจัดฟีนอลด้วยออกซิเดชันเชิงแสงเร่งปฏิกิริยาด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการกำจัดฟีนอลด้วยออกซิเดชันเชิงแสงเร่งปฏิกิริยาด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนพอลิเมทิลเมทาคริเลต ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลที่ใช้ในการศึกษาเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายในช่วง 5 ถึง 7 เก็บน้ำตัวอย่างออกมาวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลคงเหลือทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากงานวิจัยของ Naeem และ Ouyang (2009) พบว่าสมการจลนพลศาสตร์ของแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood) เป็นสมการที่เหมาะสมในการอธิบายเกี่ยวกับปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแสดงดังสมการ 4.1

$$r = - \frac{dC}{dt} = \frac{k_r KC_s}{(1 + KC_s)}$$

(4.1)

- เมื่อ
- r

คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา (พีพีเอ็มต่อนาที)
- C_s

คือ ความเข้มข้นตั้งต้นของฟีนอล (พีพีเอ็ม)
- t

คือ เวลาของปฏิกิริยา (นาที)

k_r คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (นาที่⁻¹)

K คือ ค่าคงที่ของการดูดซับของฟินอล

ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าน้อยมาก พจน์ของ KC_0 สามารถตัดทิ้งได้ และกำหนดให้ $k_r K$ คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาปรากฏ (k_{app}) ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo first order reaction) แสดงดังสมการ 4.2 เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและ $-\ln(C_t/C_0)$ ความชันของกราฟที่ได้ คือ ค่า k_{app}

$$-\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = k_{app}t \quad (4.2)$$

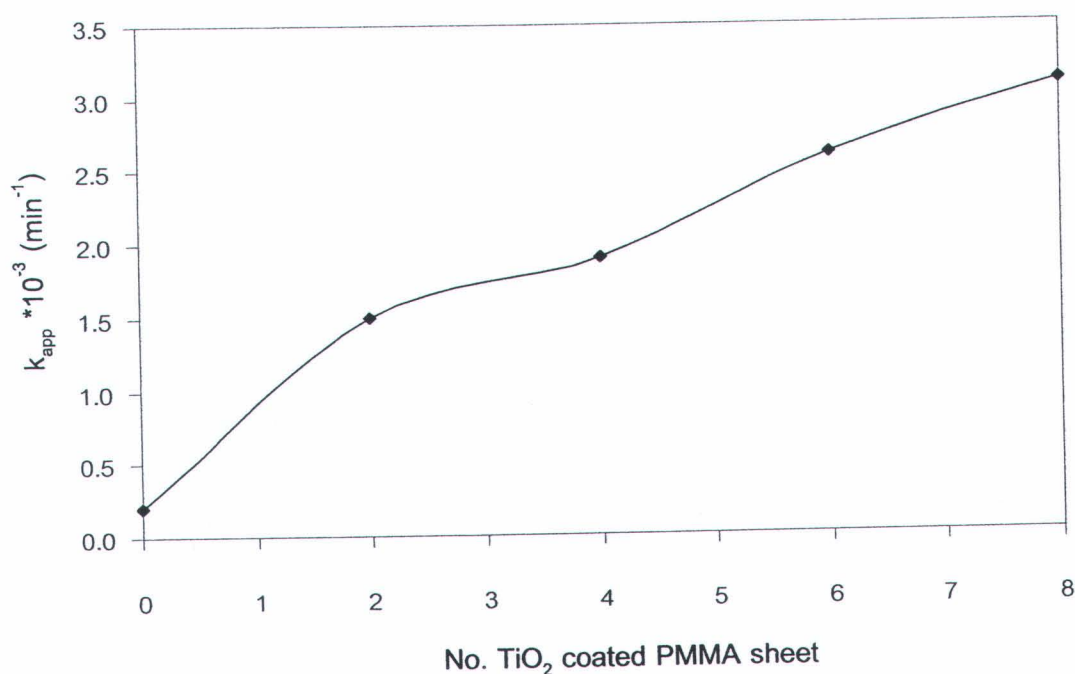
เมื่อ k_{app} คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาปรากฏของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (นาที่⁻¹)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอล (พีพีเอ็ม)

C_t คือ ความเข้มข้นของฟินอล ณ เวลานั้น (พีพีเอ็ม)

4.3.1 ผลของจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ต่ออัตราการสลายตัวของฟินอล

จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์สะท้อนถึงปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในระบบ โดยในส่วนนี้ศึกษาผลของจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ต่ออัตราการสลายตัวของฟินอล ภาวะที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำได้โดยการเพิ่มจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ รูปที่ 4.4 แสดงค่าคงที่ปฏิกิริยา (k_{app}) เมื่อใช้จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์แตกต่างกัน พบว่าอัตราการสลายฟินอลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้นจาก 2 แผ่น (ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.14 กรัม) เป็น 8 แผ่น (ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.57 กรัม) โดยค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อใช้แผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์จำนวน 8 แผ่นเท่ากับ 3.1×10^{-3} นาที่⁻¹ เนื่องจากการเพิ่มแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นการเพิ่มจำนวน active sites ในการ



รูปที่ 4.4 ผลของจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อค่าคงที่ปรากฏอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการขจัดฟีนอล (ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล = 50 พีพีเอ็ม ค่า pH เริ่มต้น = 5.5 กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์ ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส)

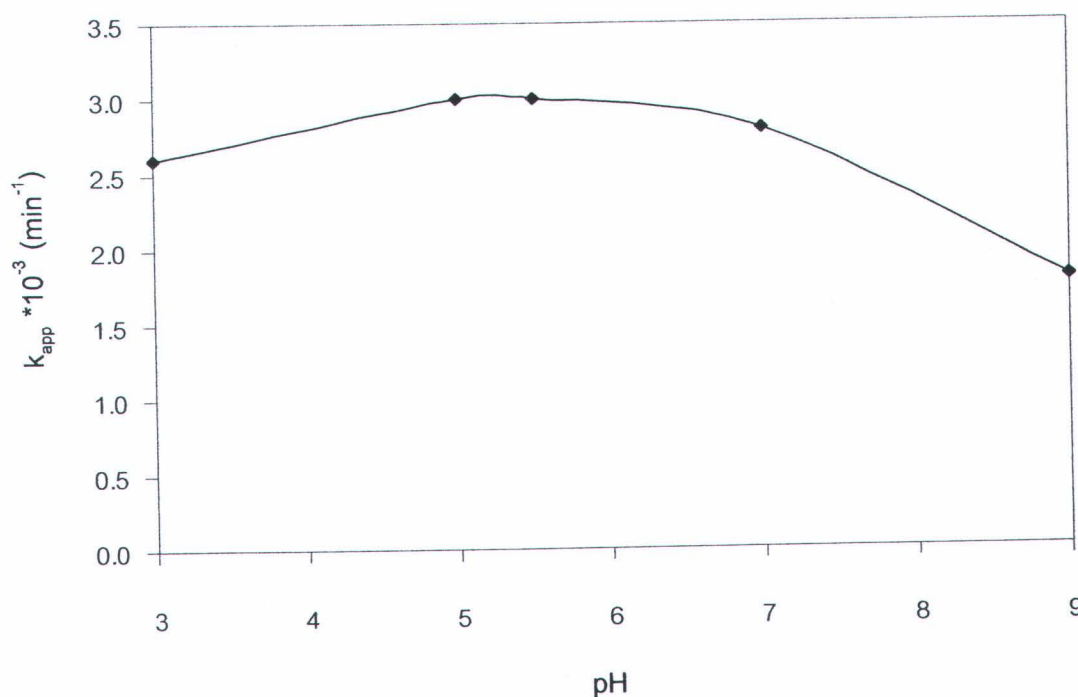
เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าความหนาแน่นของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อพื้นที่การฉายแสงมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลสูงขึ้น (Noorgahan และคณะ, 2003) นอกจากนี้การเพิ่มจำนวนไทเทเนียมไดออกไซด์ยังเป็นการลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับหลุมเพื่อทำปฏิกิริยาดูดซับตัวรองรับบนพื้นผิวได้เร็วขึ้น (Jung และคณะ, 1999, Lathasree และคณะ, 2004, Jung และคณะ, 2004)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น มาใช้ในการศึกษาผลของปัจจัยอื่น ๆ ต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงขจัดฟีนอลต่อไป

4.3.2 ผลของค่าความเป็นกรด-เบสต่ออัตราการสลายตัวของพินอล

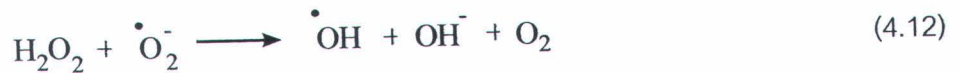
ผลของค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเป็นตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ไม่เพียงแต่ปรับสมบัติของน้ำเสียแต่เป็นการเปลี่ยนแปลงประจุของไทเทเนียมไดออกไซด์ ประจุของโมเลกุลพินอล การดูดซับพินอลไปยังผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์และความเข้มข้นของอนุมูลไฮดรอกซิล ภาวะที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของพินอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยค่าความเป็นกรด-เบสที่ใช้ในการศึกษาในช่วง 3-9 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นสารที่ใช้ในการทำการปรับค่าความเป็นกรด-เบส ค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_{app}) ที่ความเป็นกรด-เบสต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสสูงขึ้นช่วยเพิ่มอัตราการสลายพินอลสูงสุดในช่วงค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 ซึ่งมีค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 3×10^{-3} นาที⁻¹ ที่ความเป็นกรดถึงกลาง เนื่องจากที่ภาวะความเป็นกรด-เบสในช่วงนี้พินอลเริ่มต้นอยู่ในรูปที่ไม่มีไอออน มีความสามารถในการละลายน้ำน้อยที่สุดจึงถูกดูดซับไปบนตัวเร่งปฏิกิริยาได้มากที่สุด ทำให้อัตราการสลายตัวของพินอลเพิ่มขึ้น (Chiou และคณะ, 2008) จากนั้นเมื่อสารละลายมีความเป็นเบสมาก ($pH = 9$) ทำให้อัตราการสลายตัวของพินอลลดลงเนื่องจากพบว่าในภาวะที่สารละลายเป็นเบสสามารถละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่บนผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลตไฮดรอกไซด์ไอออนจากเบสที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในสารละลายไม่ได้ถูกออกซิไดซ์ให้กลายเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดพินอลลดลง (Konstantinou และ Albanis, 2003)

โดยทั่วไปประสิทธิภาพของการเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับของสารมลพิษบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และความเข้มข้นของอนุมูลไฮดรอกซิลในระบบ ค่าความเป็นกรด-เบสไม่เพียงแต่ส่งผลต่อสมบัติของผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ยังมีผลต่อการเกิดขึ้นของอนุมูลไฮดรอกซิล ในกรณีที่ไม่มีสารละลายของไทเทเนียมไดออกไซด์ออกมาปนอยู่ในสารละลาย การเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิดปฏิกิริยาภายใต้ภาวะเบสนั้นเกิดมาจากการมีไฮดรอกไซด์ไอออนมากในสารละลาย ส่งผลให้อนุมูลไฮดรอกซิลมากขึ้น ส่วนภายใต้ภาวะที่สารละลายมีความเป็นกรดนั้น จะเกิดอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลขึ้น (perhydroxyl radical, $HO_2^{\cdot}$) การทำปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์กับโปรตอน สามารถรวมตัวกันได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนอนุมูลไฮดรอกซิลให้แก่ระบบ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์เพิ่มขึ้นแสดงดังสมการที่ 4.3-4.13 (Yang และคณะ, 1999) ไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสงแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนในแถบการนำกับหลุมในแถบวาเลนซ์แสดงดังสมการ 4.3 หลุมในแถบ



รูปที่ 4.5 ผลของค่าความเป็นกรด-เบสต่อค่าคงที่ปรากฏอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการ
 จัดฟีนอล (ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล = 50 พีพีเอ็ม จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเม
 ทาครีเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ = 8 แผ่น กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์
 ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส)

วาเลนซ์ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 4.4 หลุมในแถบ
 วาเลนซ์ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 4.5
 อิเล็กตรอนในแถบการนำทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์แสดงดังสมการ
 4.6 อนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยาโปรตอนเกิดเป็นอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 4.7
 อนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลจับตัวกันเองเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับออกซิเจนแสดงดังสมการ
 4.8 อนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลเกิดเป็นเปอร์ไฮดรอกไซด์ไอออน
 แสดงดังสมการ 4.9 เปอร์ไฮดรอกไซด์ไอออนทำปฏิกิริยากับโปรตอนเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์
 ออกไซด์แสดงดังสมการ 4.10 อิเล็กตรอนในแถบการนำทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิด
 เป็นอนุมูลไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 4.11 อนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์
 ออกไซด์เกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 4.12 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง
 แดกตัวเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 4.13



ค่า pH of zero point charge (pH_{zpc}) ของตัวเร่งปฏิกิริยาถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญที่สามารถบ่งชี้ลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์ หาได้จากสมการ 4.14

$$\text{pH}_{\text{zpc}} = 1/2 (\text{pK}_{\text{a1}}^{\text{s}} + \text{pK}_{\text{a2}}^{\text{s}}) \quad (4.14)$$

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P-25 มีค่าคงที่ความว่องไวของพื้นผิว $\text{pK}_{\text{a1}}^{\text{s}}$ (ค่าคงที่การแตกตัวของกรดครั้งที่หนึ่ง) เท่ากับ 4.5, $\text{pK}_{\text{a2}}^{\text{s}}$ (ค่าคงที่การแตกตัวของกรดครั้งที่สอง) เท่ากับ 8 และ pH_{zpc} เท่ากับ 6.25 (Komann และคณะ, 1991) ดังนั้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสมากกว่า pH_{zpc} จะมีประจุเป็นลบของไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูป TiO^- และ Ti-OH ในขณะที่ TiOH_2^+ จะเกิดขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสน้อยกว่าค่า pH_{zpc} (Doong และคณะ, 2001, Wang และคณะ, 1999) ดังนั้นที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเท่ากับ 5

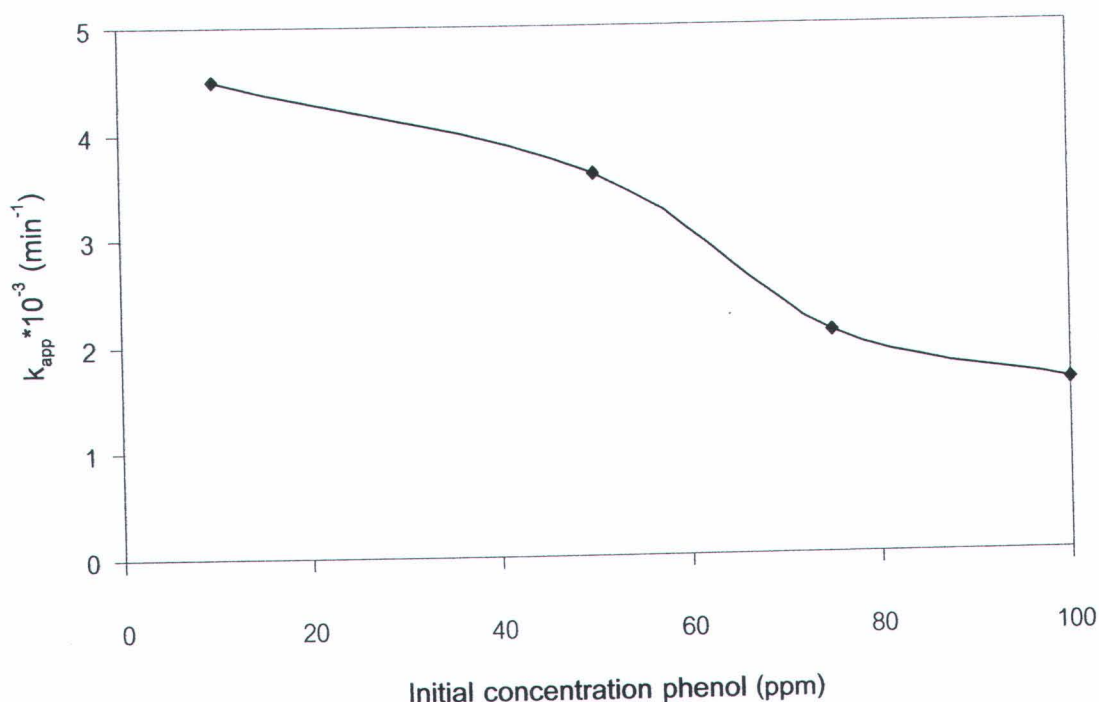
ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีประจุเป็นบวก ขณะที่ฟีนอลแตกตัวแล้วจะมีประจุเป็นลบ สามารถถูกดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี ประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้บริเวณใกล้ผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ มีค่าความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลมากที่สุดส่งผลให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงเกิดได้ดี (Chiou และคณะ, 2008)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น และค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 มาใช้ในการศึกษาผลของปัจจัยอื่น ๆ ต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงกำจัดฟีนอลต่อไป

4.3.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลต่ออัตราการสลายตัวของฟีนอล

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงของฟีนอลแสดงดังรูปที่ 4.6 โดยภาวะที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเท่ากับ 5 โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลที่ศึกษาอยู่ในช่วง 10-100 พีพีเอ็ม พบว่าอัตราการสลายฟีนอลลดลงเมื่อความเข้มข้นของฟีนอลเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการสลายตัวขึ้นอยู่กับอนุมูลไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและความเป็นไปได้ของอนุมูลไฮดรอกซิลในการทำปฏิกิริยากับฟีนอล ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของฟีนอลในสารละลายมีค่าสูง ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลงเพราะฟีนอลจะเข้ามาดูดซับที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณมาก ทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลงและแสงไม่สามารถเข้าถึงผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งการอิ่มตัวที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา (Arana และคณะ, 2004)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 และความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม มาใช้ในการศึกษาผลของปัจจัยอื่น ๆ ต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงกำจัดฟีนอลต่อไป



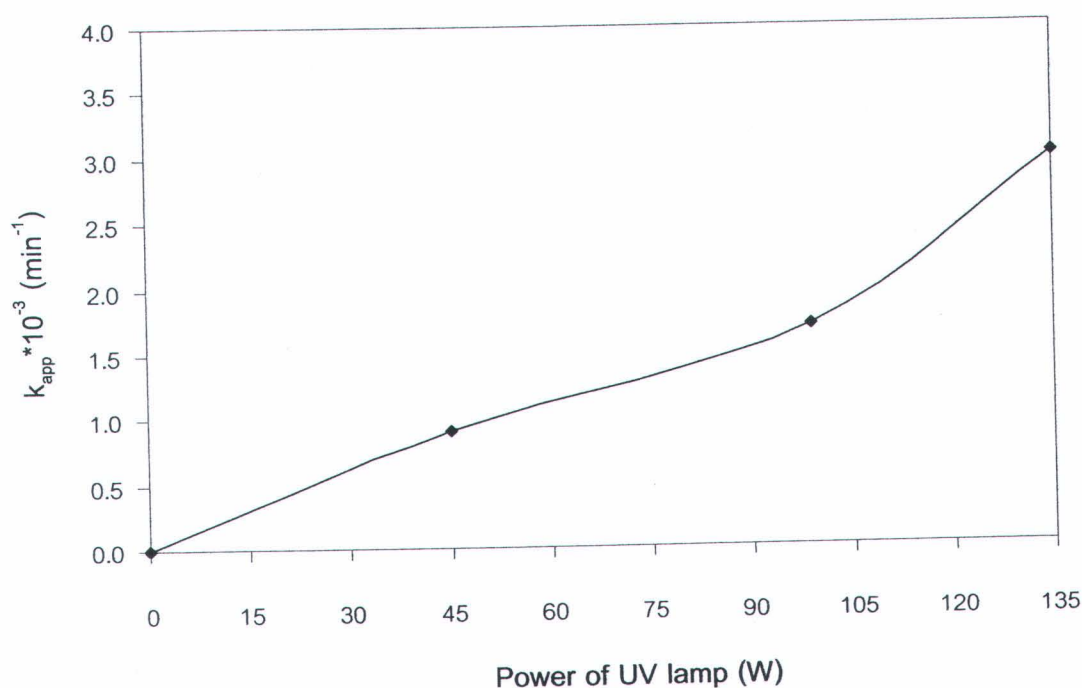
รูปที่ 4.6 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการขจัดฟีนอล (จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ = 8 แผ่น ค่า pH เริ่มต้น = 5 กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส)

4.3.4 ผลของกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตต่ออัตราการสลายตัวของฟีนอล

กำลังหลอดอัลตราไวโอเล็ตสะท้อนถึงปริมาณความเข้มแสงอัลตราไวโอเล็ต รูปที่ 4.7 แสดงผลของกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตต่ออัตราการสลายตัวของฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง ภาวะที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเท่ากับ 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล 50 พีพีเอ็ม โดยกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง 45-135 วัตต์ พบว่าค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการขจัดฟีนอลมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต โดยกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตที่ 45 99 และ 135 วัตต์ มีค่าคงที่ปรากฏเท่ากับ 0.9×10^{-3} 1.7×10^{-3} และ 3×10^{-3} นาที⁻¹ ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตช่วยเพิ่มอนุมูลไฮดรอกซิลเหมือนกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ลดการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับหลุม จึงทำให้อัตราการสลายพินอลเพิ่มขึ้นกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตมากขึ้น (Chiou และคณะ, 2008)

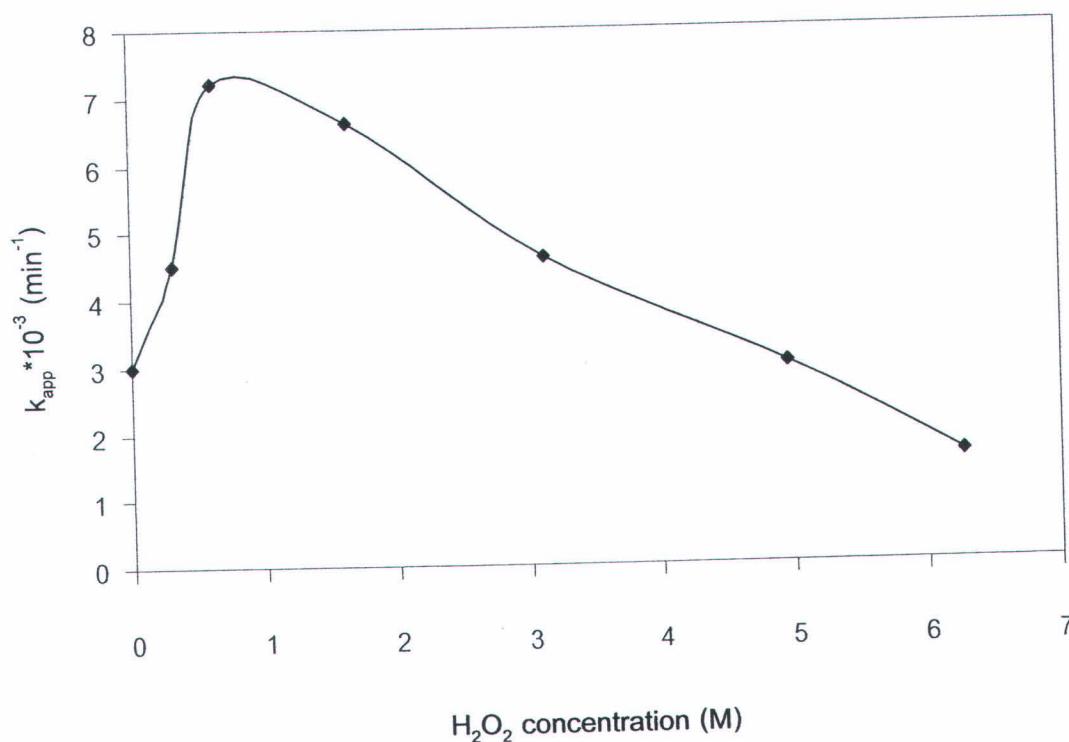
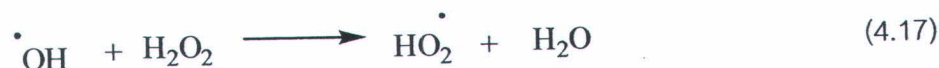
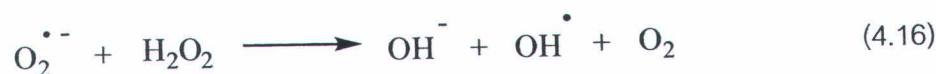
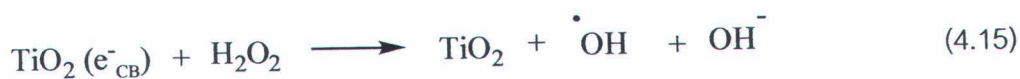
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของพินอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม และกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 135 วัตต์ มาใช้ในการศึกษาผลของปัจจัยอื่น ๆ ต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงขจัดพินอลต่อไป



รูปที่ 4.7 ผลของกำลังของหลอดยูวีต่อค่าคงที่ปรากฏอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการขจัดพินอล (จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ = 8 แผ่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของพินอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม ค่า pH เริ่มต้น = 5 ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส)

4.3.5 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ออัตราการสลายตัวของฟินอล

ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลต่อการกำจัดฟินอลด้วยออกซิเดชันเชิงแสง เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เติมลงไปในการสลายเพื่อช่วยเพิ่มการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลในปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยแสง (photoassisted reaction) ภาวะที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเท่ากับ 5 โดยความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ศึกษาอยู่ในช่วง 0-6.26 โมลาร์ ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการสลายตัวของฟินอลด้วยออกซิเดชันเชิงแสง แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าค่าคงที่ปรากฏของปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการสลายฟินอลเพิ่มขึ้นจาก 3×10^{-3} ถึง 7.2×10^{-3} เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 0 ถึง 0.62 โมลาร์ เนื่องจากการปรับปรุงความว่องไวของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นถึง 0.62 โมลาร์ ทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุมูลไฮดรอกซิลที่ใช้ในการออกซิไดซ์บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้อัตราการสลายฟินอลเพิ่มขึ้น โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์รวมตัวกับอิเล็กตรอนในแถบการนำเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 4.15 ซึ่งเป็นการลดการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับหลุม อนุมูลเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 4.16 ทำให้ปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลในระบบสูงขึ้น ดังนั้นจึงช่วยเพิ่มอัตราการสลายฟินอลได้มากขึ้น (Reddy และ Kotaiah, 2006, Sauer และคณะ, 2002) อย่างไรก็ตามการใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงเกินกว่า 0.62 โมลาร์ ทำให้ค่าคงที่ปรากฏมีค่าลดลงแสดงดังสมการ 4.17-4.20 เนื่องจากการอนุมูลไฮดรอกซิลทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดเป็นอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 4.17 อนุมูลไฮดรอกซิลทำปฏิกิริยากับอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลเกิดเป็นออกซิเจนกับโมเลกุลของน้ำแสดงดังสมการ 4.18 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับหลุมในแถบวาเลนซ์เกิดเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์กับออกซิเจนแสดงดังสมการ 4.19 อนุมูลไฮดรอกซิลเกิดการจับตัวกันเองเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แสดงดังสมการ 4.20 ส่งผลให้อัตราการสลายฟินอลลดลง (Sun และคณะ, 2007, Edwards และคณะ, 1982)



รูปที่ 4.8 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าคงที่ปรากฏอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการขจัดฟีนอล (จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ = 8 แผ่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล = 50 พีพีเอ็ม ค่า pH เริ่มต้น = 5 กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส)

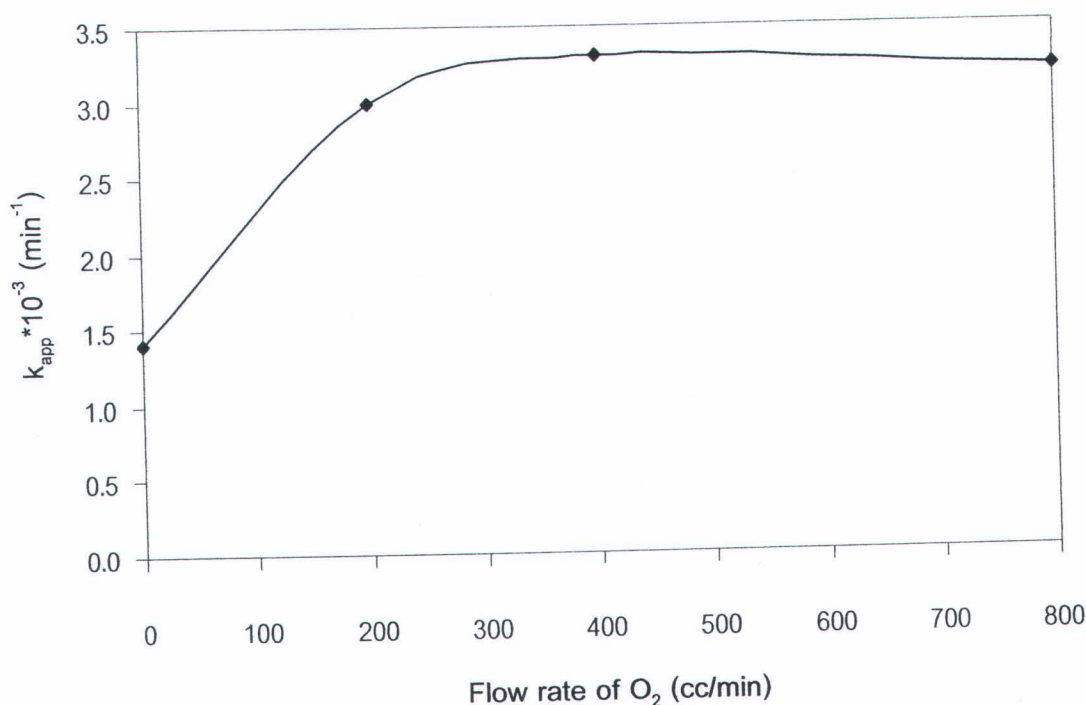
4.3.6 ผลของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่ออัตราการสลายตัวของฟีนอล

ผลของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการสลายตัวของฟีนอล ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง แสดงดังรูปที่ 4.9 โดยภาวะที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ จำนวนแผ่น พอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของ สารละลายเท่ากับ 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม โดยออกซิเจนที่ใช้ในการศึกษา มีอัตราการไหลอยู่ในช่วง 0-800 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการสลายฟีนอลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.4×10^{-3} ถึง 3.3×10^{-3} นาที⁻¹ เมื่ออัตราการไหลของออกซิเจนเพิ่มขึ้นจาก 0 ไปยัง 400 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากการป้อนออกซิเจนเข้าไปในระบบเป็นการเพิ่มปริมาณโมเลกุลออกซิเจนซึ่งคาดว่าจะช่วยลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับ หลุม โดยสามารถอธิบายได้จากสมการ 4.21 (Ollis และคณะ, 1991, Murov และคณะ, 1993)



ซึ่งโมเลกุลของออกซิเจนทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนในแถบการนำแล้วเปลี่ยนรูปเป็นอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อไปกับไฮดรอนไฮโดรเจนเกิดเป็นอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิล ผลสุดท้ายจะเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ทำให้อัตราการสลายฟีนอลเพิ่มขึ้น (Reutergardh และคณะ, 1997) นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ต้องการออกซิเจนในการกระตุ้นในการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลและนำไปสู่การจับตัวกับอิเล็กตรอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลสูงขึ้น (Chun และคณะ, 2000) แต่เมื่ออัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 800 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการสลายตัวของฟีนอลมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่มากเกินไปจะยับยั้งการทำงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้อัตราการสลายตัวของฟีนอลลดลง (Wei และ Wan, 1991)

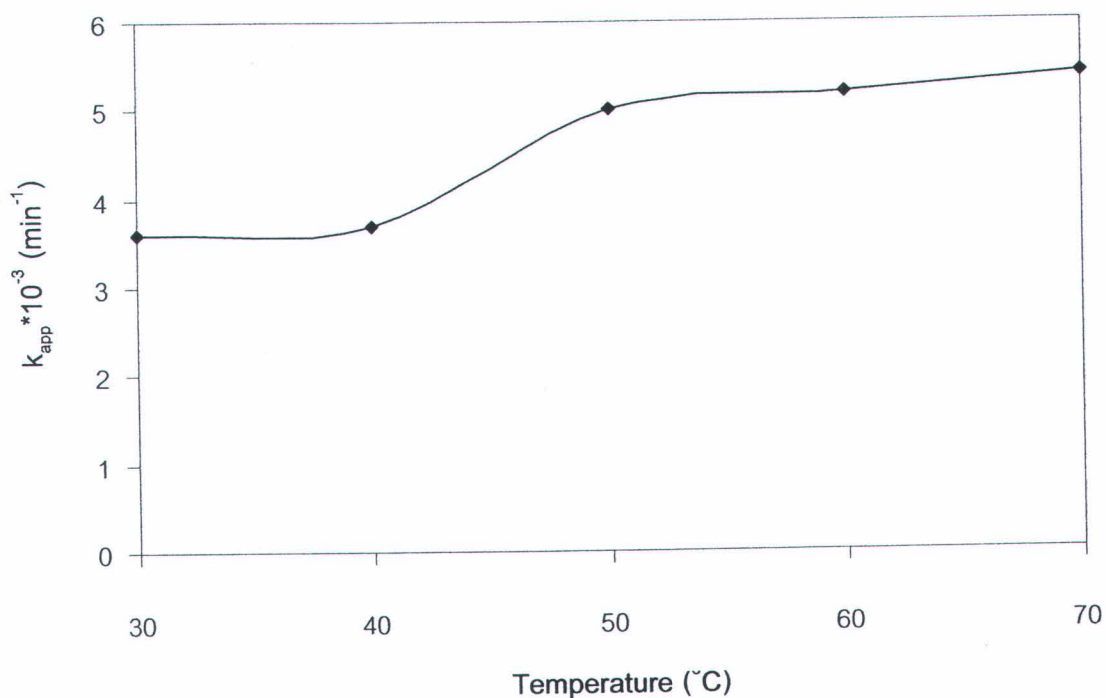
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 135 วัตต์ และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที มาใช้ในการศึกษาผลของปัจจัยอื่น ๆ ต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงกำจัดฟีนอลต่อไป



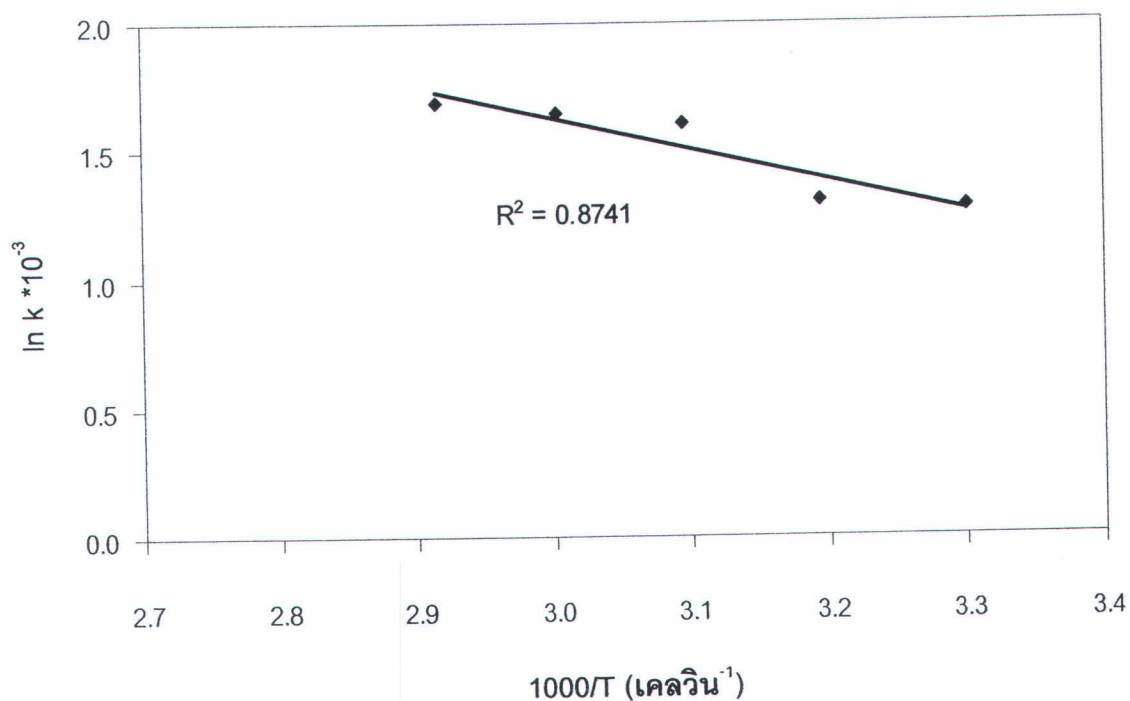
รูปที่ 4.9 ผลของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการขจัดฟีนอล (จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ = 8 แผ่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล = 50 พีพีเอ็ม ค่า pH เริ่มต้น = 5 กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส)

4.3.6 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่ออัตราการสลายตัวของฟีนอล

ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการสลายตัวของฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง แสดงดังรูปที่ 4.10 โดยภาวะที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเท่ากับ 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง 30-70 องศาเซลเซียส พบว่าค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการสลายฟีนอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เมื่อคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการของ Arrhenius Equation (สมการ 4.22) แสดงดังรูป 4.11 พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของระบบเท่ากับ 0.01 กิโลจูลต่อโมล แสดงว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยในช่วง (20-80 องศาเซลเซียส) โดยทั่วไปปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิห้องและไม่ต้องการให้ความร้อนจากภายนอก (Hermann, 1999) ถึงแม้ว่าปฏิกิริยานี้จะมีค่าพลังงานกระตุ้นต่ำซึ่งมีผลน้อยมากต่อการกระตุ้น



รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการขจัดฟีนอล (จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ = 8 แผ่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม ค่า pH เริ่มต้น = 5 กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.11 ผลการคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาตามสมการ Arrhenius Equation

อิเล็กตรอนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีแถบช่องว่างที่กว้าง แต่พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเป็นตัวควบคุมการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลซึ่งใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง (Matthew, 1987) ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงอาจเกิดมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังออกซิเจน (Hoffmann, 1995) หรือในอีกแง่หนึ่ง คือ เกิดจากการคายซับอย่างรวดเร็วระหว่างตัวรองรับ (substrate) และตัวกลาง (intermediate) จากไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ดีที่อุณหภูมิสูง ทำให้มีพื้นที่ว่างในการทำปฏิกิริยามากขึ้นเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงได้ดีขึ้น (Hermann, 1995)

$$\ln k = - \frac{E_a}{RT} \ln A \quad (4.22)$$

หลังจากที่ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการสลายตัวของพีนอล ได้ภาวะที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของพีนอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 135 วัตต์ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 50 พีพีเอ็ม อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้ค่าคงที่ของอัตราการสลายตัวของพีนอลเท่ากับ $7.2 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ซึ่งสามารถกำจัดพีนอลได้ 91.4%

4.4 การวิเคราะห์ทางสถิติด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับต่อประสิทธิภาพในการกำจัดพีนอล

ในการศึกษาหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ต่อระดับการสลายตัวของพีนอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตจะเลือกตัวแปรที่มีผลมากต่ออัตราการสลายตัวของพีนอล โดยอาศัยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับและนำตัวแปรมาผูกความสัมพันธ์ในทอมของสมการถดถอย จากหัวข้อที่ 4.3 ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของพีนอล กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับนำมาใช้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดพีนอล ปัจจัยหลัก 4 ปัจจัยประกอบด้วยจำนวนแผ่นพอลิ

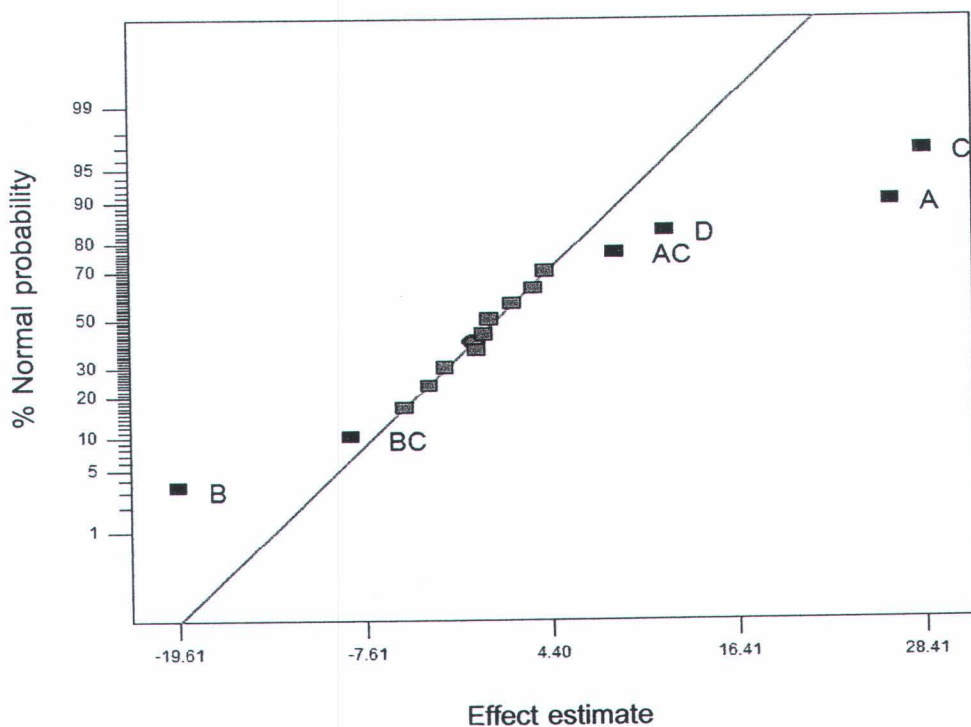
เมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (A) ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล (B) กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต (C) และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (D) ผลของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลที่ 5 ชั่วโมง ประกอบด้วย 2⁴ แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอล

การทดลอง	การออกแบบปัจจัย				ประสิทธิภาพการขจัดฟีนอล (%)
	จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบ TiO ₂ (แผ่น)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล (พีพีเอ็ม)	กำลังของหลอดยูวี (วัตต์)	ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (โมลาร์)	
1	2	50	45	0	9.71
2	8	50	45	0	24.15
3	2	100	45	0	4.21
4	8	100	45	0	16.2
5	2	50	135	0	35.85
6	8	50	135	0	69.03
7	2	100	135	0	10.2
8	8	100	135	0	39.38
9	2	50	45	0.62	14.2
10	8	50	45	0.62	45.42
11	2	100	45	0.62	7.86
12	8	100	45	0.62	20.81
13	2	50	135	0.62	44.87
14	8	50	135	0.62	91.44
15	2	100	135	0.62	24.17
16	8	100	135	0.62	54.94

การวิเคราะห์ข้อมูลเริ่มต้นด้วยความสัมพันธ์ระหว่าง Normal probability กับค่าประมาณปัจจัย ตารางแสดงการคำนวณคอนแทรกสต์จากระดับสูงสุด (+) และระดับต่ำสุด (-) ของแต่ละปัจจัยในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับแสดงในภาคผนวก ค จากคอนแทรกสต์ที่ได้นำไปหาค่าประมาณปัจจัยแฟกทอเรียลจำนวน 15 ปัจจัยและผลรวมกำลังสอง

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normal probability กับค่าประมาณปัจจัย โดยจุดข้อมูลของปัจจัยใดที่อยู่บนเส้นตรงถือว่าไม่นัยสำคัญ แต่จุดข้อมูลของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อระบบจะอยู่นอกเส้นตรง จากผลการคำนวณพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการจัดฟีนอลคือ ปัจจัยหลัก ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (A) ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล (B) กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต (C) และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (D) และอันตรกิริยาของสองปัจจัย ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต (AC) และความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลร่วมกับกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต (BC)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal probability กับค่าประมาณปัจจัยต่อประสิทธิภาพในการจัดฟีนอล

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล พบว่าคอลัมน์ที่แสดงร้อยละการกระจายตัว (Percent contribution) ทำนายความสำคัญของปัจจัยสำคัญที่ได้จากรูปที่ 4.5 หากด้วยผลรวมทั้งหมดกำลังสอง การทดสอบ F ใช้ประมาณค่าเมื่อปัจจัยนั้นมีผลเป็นนัยสำคัญ ($F_0 > F_{\alpha, v_1, v_2}$ เมื่อ α คือ 95% หรือ 0.05 v_1 คือระดับการสุ่มแบบจำลอง และ v_2 คือระดับการสุ่มปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญหรือความคลาดเคลื่อน) ค่า F ของแต่ละแบบจำลองและปัจจัยได้จากตารางร้อยละการกระจายตัวของ F (Appendix Table IV in Montgomery, 2001) ยกตัวอย่างค่า F ของการจัดฟีนอล (%) ($F_{0.05, 6, 9}$) เท่ากับ 3.37 น้อยกว่า F_0 (43.02) ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองการจัดฟีนอล (%) มีนัยสำคัญ วิธีนี้ใช้ตรวจสอบความจริงแบบจำลองทั้งหมดและปัจจัยที่เลือกที่มีนัยสำคัญแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงผลที่ได้จากการคำนวณการประมาณผลและการประมาณสัมประสิทธิ์กับความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน จะเห็นได้ว่าการเพิ่มจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลในแง่บวกต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล เนื่องจากการเพิ่ม

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับจำนวน 4 ปัจจัย

แบบจำลอง	ผลรวมกำลังสอง	ร้อยละการกระจายตัว	ตัวแปรอิสระ	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง	F_0	F_{α, v_1, v_2} (จากตาราง)
ระดับการจัดฟีนอล (%)						$F_{0.05, 6, 9}$
แบบจำลอง	8684.48	96.63	6	1447.41	43.02	3.37
						$F_{0.05, 1, 9}$
A	2764.13	30.75	1	2764.13	82.15	5.12
B	1538.60	17.12	1	1538.60	45.73	5.12
C	3229.65	35.93	1	3229.65	95.98	5.12
D	563.83	6.27	1	563.83	16.76	5.12
AC	298.43	3.32	1	298.43	8.87	5.12
BC	289.85	3.22	1	289.85	8.61	5.12
ความคลาดเคลื่อน	302.84	3.36	9	33.65		
ผลรวม	8987.32		15			

ตารางที่ 4.6 การคำนวณค่าประมาณปัจจัย ค่าประมาณสัมประสิทธิ์และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอล

ชื่อปัจจัย	ค่าประมาณ $\pm$ ความคลาด ปัจจัย เคลื่อน	ค่าประมาณ $\pm$ ความคลาด สัมประสิทธิ์ เคลื่อน
ระดับการจัดฟีนอล (%)		32.03 $\pm$ 1.45
ปัจจัยหลัก		
จำนวนแผ่น PMMA/TiO ₂ (A)	26.29 $\pm$ 2.90	13.14 $\pm$ 1.45
ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล (B)	-19.61 $\pm$ 2.90	-9.81 $\pm$ 1.45
กำลังของหลอดยูวี (C)	28.42 $\pm$ 2.90	14.21 $\pm$ 1.45
ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (D)	11.87 $\pm$ 2.90	5.94 $\pm$ 1.45
อันตรกิริยาของสองปัจจัย		
จำนวนแผ่น PMMA/TiO ₂ ร่วมกับกำลังของหลอดยูวี (AC)	8.64 $\pm$ 2.90	4.32 $\pm$ 1.45
ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลร่วมกับกำลังของหลอดยูวี (BC)	-8.51 $\pm$ 2.90	-4.26 $\pm$ 1.45

จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นการเพิ่มจำนวน active sites ในการเกิดปฏิกิริยา หรืออาจกล่าวได้ว่าความหนาแน่นของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อพื้นที่การฉายแสงมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลสูงขึ้น (Noorgahan และคณะ, 2003) นอกจากนี้การเพิ่มจำนวนไทเทเนียมไดออกไซด์ยังเป็นการลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับหลุมเพื่อทำปฏิกิริยาคัดจับตัวรองรับบนพื้นผิวได้เร็วขึ้น (Jung และคณะ, 1999, Lathasree และคณะ, 2004, Yung และคณะ, 2004)

การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลมีผลในแง่ลบต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลเนื่องจากประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลขึ้นอยู่กับอนุมูลไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและความเป็นไปได้ของอนุมูลไฮดรอกซิลในการทำปฏิกิริยากับฟีนอล เมื่อความเข้มข้นของฟีนอลในสารละลายมีค่าสูง ทำให้ประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลงเพราะฟีนอลจะเข้ามาดูดซับที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณมาก ทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลงและแสงไม่สามารถเข้าถึงผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งการอิ่มตัวที่

ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา (Arana และคณะ, 2004)

กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตมีผลในแง่บวกต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอล เนื่องจากการเพิ่มกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต ลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับหลุม จึงทำให้ประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลเพิ่มขึ้นที่กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตมากขึ้น (Chiou และคณะ, 2008)

การเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลในแง่บวกต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอล เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุมูลไฮดรอกซิลที่ใช้ในการออกซิไดซ์บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในแถบการนำซึ่งเป็นการลดการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับหลุม ทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลในระบบสูงขึ้น ดังนั้นจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอล (Edwars และคณะ, 1982)

4.4.1 สมการถดถอย (Regression model)

จากการวิเคราะห์ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของปัจจัยสำคัญ 4 ตัวต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลตามตารางที่ 4.6 สามารถนำมาใช้เป็นสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอย ในงานวิจัยนี้เพื่อใช้ทำนายประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลดังแสดงในสมการ 4.23 และ 4.24

$$\hat{Y} = 32.03 + 13.14A - 9.81B + 14.21C + 5.94D + 4.32AC - 4.26BC \quad (4.23)$$

$$\hat{Y} = -5.95 + 1.50a - 0.05b + 0.44c + 118.73d + 0.03ac - (3.78 \times 10^{-3})bc \quad (4.24)$$

เมื่อ $\hat{Y}$ แทนประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอล

A B C และ D แทนสัญลักษณ์ทางสถิติ ((-1) หรือ (+1)) ของตัวแปร ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ

a b c และ d แทนค่าจริงที่ใช้ในการทดลองของตัวแปร ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ

สมการถดถอยสามารถใช้ในการทำนายผลการทดลองในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับได้

4.4.2 ผลตกค้างและการตรวจสอบความถูกต้อง

การตรวจสอบสมการถดถอยที่ใช้ทำนายระดับการจัดฟันอลที่ได้จากการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ ดังสมการที่ 4.23 พบว่าเมื่อให้ปัจจัยทุกตัวอยู่ในระดับต่ำ (-1) ค่าทำนายต่อประสิทธิภาพในการจัดฟันอลคำนวณตามสมการ 4.25

$$\begin{aligned}\hat{Y} &= 32.03 + 13.14(-1) - 9.81(-1) + 14.21(-1) + 5.94(-1) + 4.32(-1 \times -1) - 4.26(-1 \times -1) \quad (4.25) \\ &= 8.61\end{aligned}$$

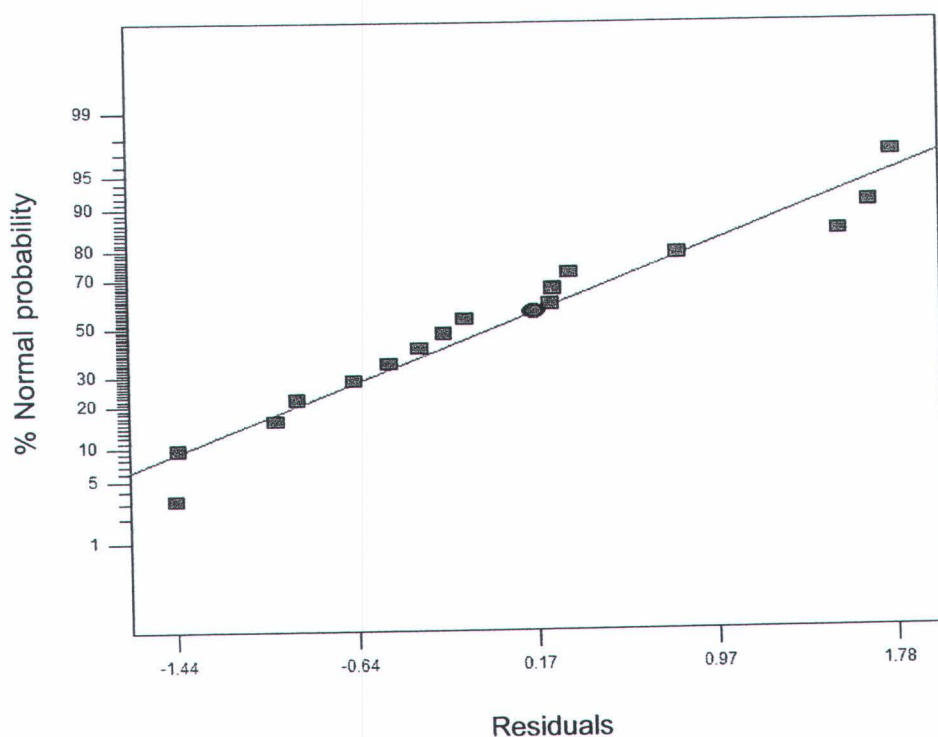
แต่ค่าจริง (Y) เท่ากับ 9.71 ดังนั้นผลตกค้าง (residual, e) เท่ากับ 1.10 นอกจากนี้ค่าจริงค่าทำนายและผลตกค้างทั้ง 16 การทดลองแสดงดังตารางที่ 4.7

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normal probability กับผลตกค้างต่อประสิทธิภาพในการจัดฟันอล จุดข้อมูลของแต่ละการทดลองที่ได้จากการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลจะอยู่ใกล้เส้นตรง ดังนั้นผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยหลัก คือ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (A) ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟันอล (B) กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต (C) ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (D) อันตรกิริยาของสองปัจจัย คือ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต (AC) และความเข้มข้นเริ่มต้นของฟันอลร่วมกับกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต (BC) มีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพในการจัดฟันอลจากผลของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

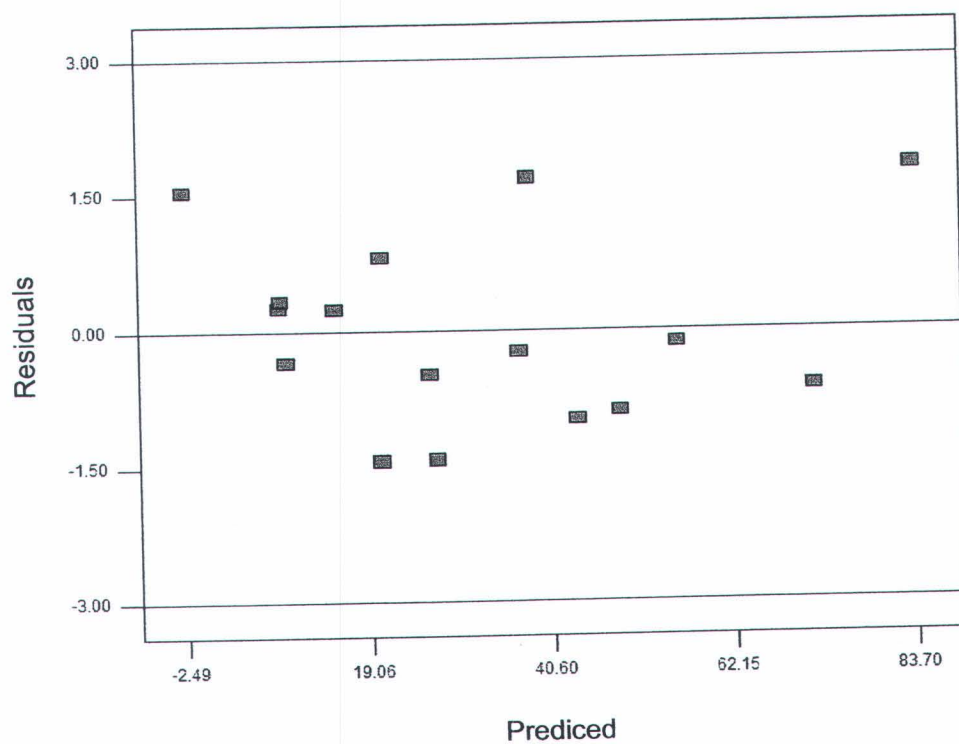
อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการจัดฟันอลสามารถตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการพล็อตผลตกค้างกับค่าทำนายฟันอลที่ถูกจัด (%) ความสัมพันธ์ระหว่างผลตกค้างกับฟันอลที่ถูกจัด (%) แสดงในรูป 4.14 ซึ่งกราฟที่ได้มีการกระจายข้อมูลที่ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่มีโครงสร้าง

ตารางที่ 4.7 ค่าจริง ค่าทำนายและผลตกค้างต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอล

ครั้งที่	เครื่องหมาย	ระดับการขจัดฟีนอล (%)		
		ค่าจริง	ค่าทำนาย	ผลตกค้าง
1	(1)	9.71	8.61	1.10
2	a	24.15	26.26	-2.11
3	b	4.21	-2.49	6.70
4	ab	16.20	15.16	1.04
5	c	35.85	36.90	-1.05
6	ac	69.03	71.82	-2.79
7	bc	10.20	8.77	1.43
8	abc	39.38	43.70	-4.38
9	d	14.20	20.48	-6.28
10	ad	45.42	38.13	7.29
11	bd	7.86	9.38	-1.52
12	abd	20.81	27.03	-6.22
13	cd	44.87	48.77	-3.90
14	acd	91.44	83.70	7.74
15	bcd	24.17	20.65	3.52
16	abcd	54.94	55.57	-0.63



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal probability กับผลตกค้างต่อประสิทธิภาพในการจัดฟันอล



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างผลตกค้างกับค่าทำนายต่อประสิทธิภาพในการจัดฟันอล



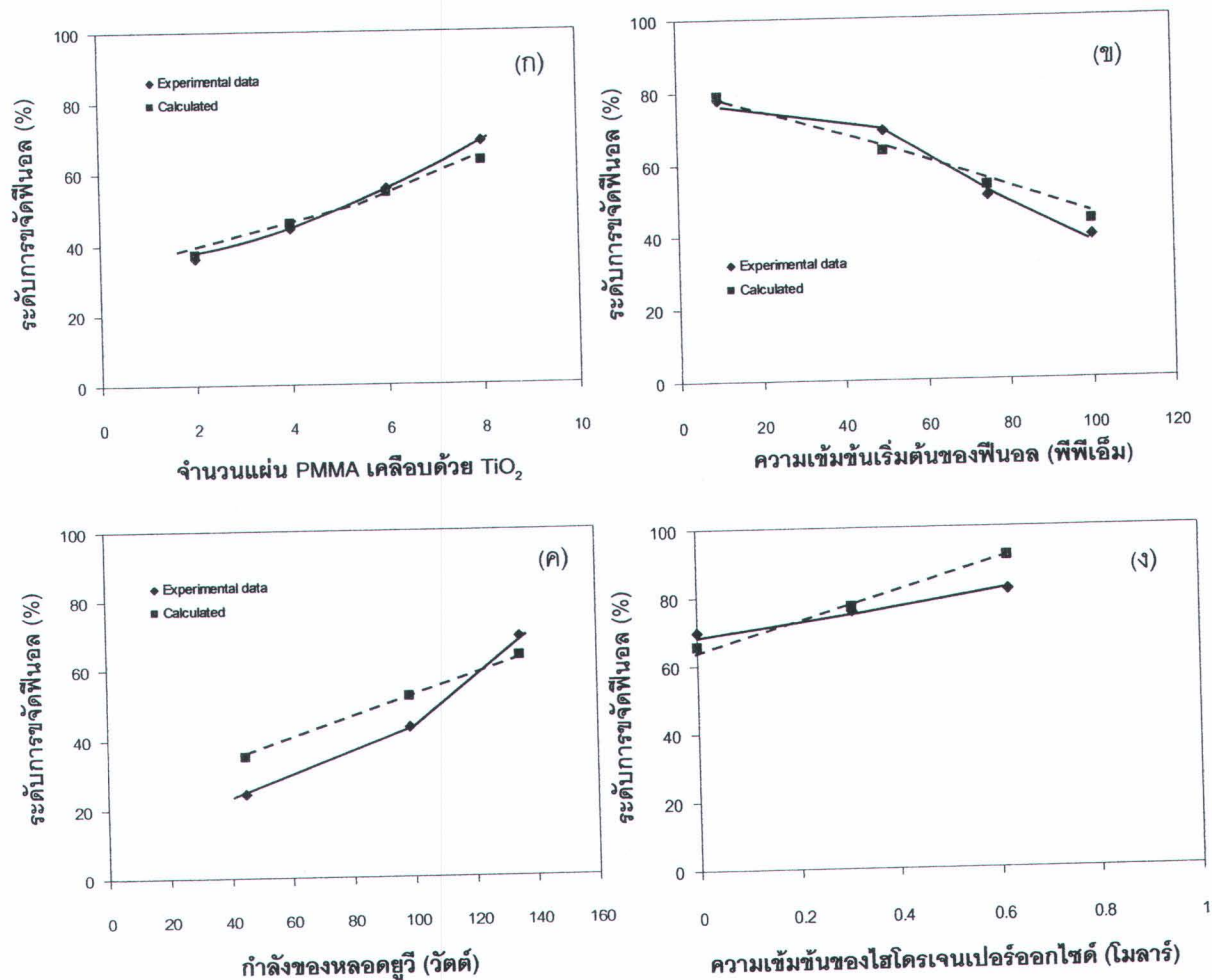
4.5 ผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อระดับการจัดฟีนอล

รูปที่ 4.15ก แสดงผลของจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ต่อระดับการจัดฟีนอล (%) ที่ได้จากการทดลอง จะเห็นได้ว่าระดับการจัดฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากการเพิ่มจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นการเพิ่มจำนวน active sites ในการเกิดปฏิกิริยา หรืออาจกล่าวได้ว่าความหนาแน่นของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อพื้นที่การฉายแสงมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลสูงขึ้น (Noorgahan และคณะ, 2003) นอกจากนี้การเพิ่มจำนวนไทเทเนียมไดออกไซด์ยังเป็นการลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับหลุมเพื่อทำปฏิกิริยาคูดซับตัวรองรับบนพื้นผิวได้เร็วขึ้น (Jung และคณะ, 1999, Lathasree และคณะ, 2004, Yung และคณะ, 2004) ส่วนผลที่ได้จากการคำนวณตามสมการถดถอย จะเห็นได้ว่าระดับการจัดฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 4.15ข แสดงผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลต่อระดับการจัดฟีนอล (%) ที่ได้จากการทดลอง จะเห็นได้ว่าระดับการจัดฟีนอลลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล เนื่องจากประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลขึ้นอยู่กับอนุมูลไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และความเป็นไปได้ของอนุมูลไฮดรอกซิลในการทำปฏิกิริยากับฟีนอล เมื่อความเข้มข้นของฟีนอลในสารละลายมีค่าสูง ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง เพราะฟีนอลจะเข้ามาดูดซับที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณมาก ทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลงและแสงไม่สามารถเข้าถึงผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งการอิ่มตัวของผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยาลง (Arana และคณะ, 2004) ส่วนผลที่ได้จากการคำนวณตามสมการถดถอย จะเห็นได้ว่าระดับการจัดฟีนอลลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 4.15ค แสดงผลของกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตต่อระดับการจัดฟีนอล (%) ที่ได้จากการทดลอง จะเห็นได้ว่าระดับการจัดฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตเนื่องจากการเพิ่มกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต ลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับหลุม จึงทำให้อัตราการสลายฟีนอลเพิ่มขึ้นที่กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตมากขึ้น (Chiou และคณะ, 2008) ส่วนผลที่ได้จากการคำนวณตามสมการถดถอย จะเห็นได้ว่าระดับการจัดฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง

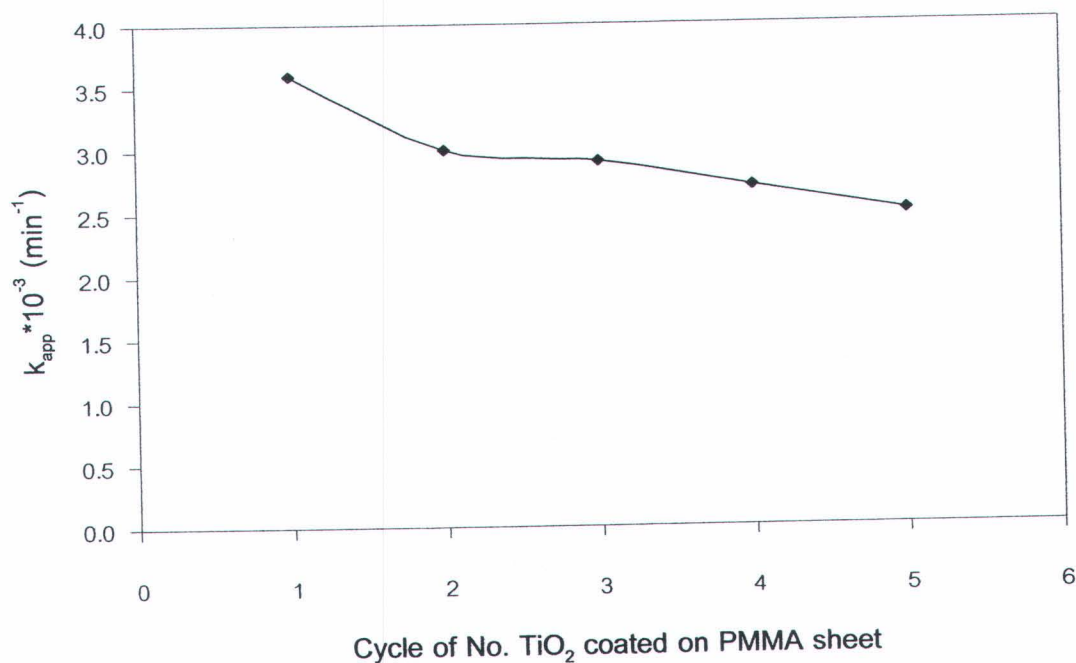
รูปที่ 4.15 แสดงผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อระดับการจัดฟีนอล (%) ที่ได้จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 0 ถึง 0.62 โมลาร์ เนื่องจากการปรับปรุงความว่องไวของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นถึง 0.62 โมลาร์ ทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคไฮดรอกซิลที่ใช้ในการออกซิไดซ์และเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในแถบการนำซึ่งเป็นลดการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับหลุม ทำให้ปริมาณอนุภาคไฮดรอกซิลในระบบสูงขึ้น ดังนั้นจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดฟีนอลได้มากขึ้น (Edwards และคณะ, 1982) ส่วนผลที่ได้จากการคำนวณตามสมการถดถอย จะเห็นได้ว่าระดับการจัดฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.15 ผลจากการคำนวณจากสมการถดถอยกับข้อมูลจากการทดลอง

4.6 การทดสอบจำนวนรอบการใช้งานของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และจำนวนรอบของกระบวนการออกซิเดชันเชิงแสงในการลดปริมาณฟีนอล

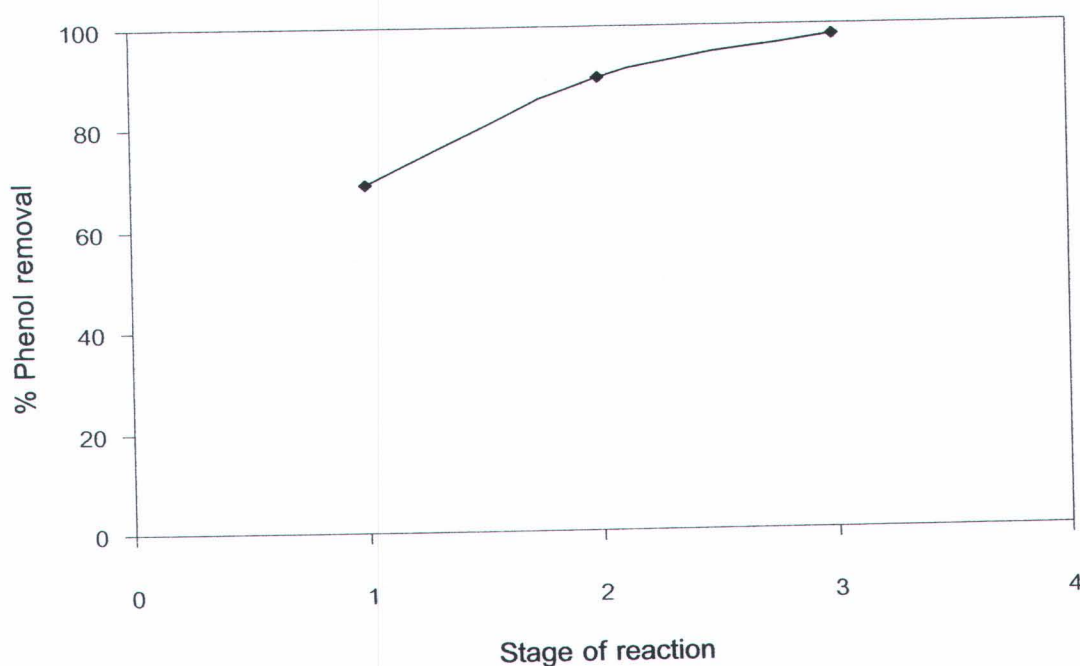
การทดสอบจำนวนรอบการใช้งานของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นการยืนยันความสามารถในการนำแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์กลับมาใช้ใหม่ โดยภาวะที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ที่ $30 \pm 1^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเท่ากับ 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลที่ใช้ในการศึกษาเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม แสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตในการขจัดฟีนอลลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อใช้งานหลายครั้งโดยเมื่อผ่านไป 5 รอบ ค่าคงที่ปรากฏลดลงเพียง $1.1 \times 10^{-3} \text{ นาที}^{-1}$ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 4.16 จำนวนรอบในการใช้งานของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการขจัดฟีนอล (จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ = 8 แผ่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล = 50 พีพีเอ็ม ค่า pH เริ่มต้น = 5 กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส)

มีสมบัติทางกายภาพดังนี้ คือ มีความเสถียรสูง มีความสามารถในการละลายต่ำ ทนต่อการกัดกร่อน และเมื่อผ่านการใช้งานแล้วสามารถนำกลับมาใช้ในปฏิกิริยาใหม่ได้อีก (Hu และคณะ, 2005)

เมื่อนำสารละลายฟีนอลที่ผ่านการออกซิเดชันเชิงแสงในรอบแรกมาเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาอีกครั้ง โดยควบคุมให้ภาวะที่ใช้ในการทดลองเหมือนเดิมแต่เปลี่ยนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ทุกรอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าในการนำสารละลายฟีนอลที่ได้จากการทำปฏิกิริยาในรอบแรกมาทำปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้งโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใหม่ สามารถขจัดฟีนอลได้สูงสุด 98% เมื่อให้จำนวนรอบในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 3 รอบ แสดงว่าสารละลายที่มีฟีนอลน้อยลงจะมีประสิทธิภาพในการถูกออกซิไดส์ได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.17 จำนวนรอบของกระบวนการออกซิเดชันเชิงแสงในการลดปริมาณฟีนอล (จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ = 8 แผ่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล = 50 พีพีเอ็ม ค่า pH เริ่มต้น = 5 กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส)