

### ผลการทดลอง การวิเคราะห์ และวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการขจัดกำมะถันในถ่านหินโดยอาศัยปฏิกิริยาออกซิเจน และใช้ตัวออกซิไดซ์ตามแบบกระบวนการเมเยอร์ส งานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาตัวแปรต่างๆที่สำคัญที่มีผลต่อปฏิกิริยา โดยพิจารณาความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้เป็นตัวออกซิไดซ์ คือ สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์และสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต อุณหภูมิ และขนาดของถ่านหินเป็นส่วนแรก ส่วนที่สองเป็นการศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาเคมีของไพไรต์ ขั้นตอนที่เป็นตัวควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา และสมการอัตราเร็วปฏิกิริยา

#### 4.1 การศึกษาตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันในถ่านหินโดยใช้สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์และสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต

ในงานวิจัยนี้ใช้ถ่านหินเหมืองแม่เมาะทำปฏิกิริยากับสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ และสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ คือ ความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์และสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต อุณหภูมิ ขนาดของถ่านหิน และวิเคราะห์สมบัติของถ่านหินก่อนและหลังปฏิกิริยา สมบัติถ่านหินก่อนทำปฏิกิริยาแสดงในตารางที่ 4.1

##### 4.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์และสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต

สมบัติถ่านหินแม่เมาะก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน ที่แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์และสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต 0.5 , 0.8, และ

ตารางที่ 4.1 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น)

รายการที่ทำการวิเคราะห์	สมบัติถ่านหินแม่เมาะ (%)
การวิเคราะห์แบบประมาณ	
สารระเหย	34.97
คาร์บอนคงตัว	29.29
เถ้า	10.80
ความชื้น	24.94
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	
คาร์บอน	47.23
ไฮโดรเจน	4.14
กำมะถัน	3.19
ไนโตรเจน	—
ออกซิเจน	34.64
เถ้า	10.80
รูปแบบกำมะถัน (ไม่รวมความชื้น)	
กำมะถันไฟไรต์	1.20
กำมะถันซัลเฟต	1.65
กำมะถันอินทรีย์	0.34
ค่าความร้อน (cal/gm)	4392.57

1.0 โมลต่อลิตร ขนาดถ่านหิน 500-700 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 90 °ซ ระยะเวลา 4 ชม. อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที แสดงดังตารางที่ 4.2 และ 4.5 ตามลำดับ

ผลของความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์ที่มีต่อการลดปริมาณกำมะถันไฟไรต์และกำมะถันรวม เมื่อความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 0.5, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตร ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร อุณหภูมิ 90 °ซ แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งผลจากตารางและรูป พบว่าร้อยละการลดของกำมะถันไฟไรต์ กำมะถันรวม กำมะถันซัลเฟตและเถ้าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์เพิ่มมากขึ้น โดยร้อยละการลดของกำมะถันไฟไรต์เป็น 46.21, 54.89 และ 60.80 ตามลำดับ ร้อยละการลดกำมะถันซัลเฟตเป็น 92.73, 93.33 และ 94.05 ตามลำดับ ร้อยละการลดของกำมะถันรวมเป็น 31.68, 35.94 และ 37.19 ตามลำดับ ส่วนร้อยละการลดของเถ้าเป็น 34.54, 35.18 และ 37.12 ตามลำดับ

รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงผลความเข้มข้นสารละลายเฟอริกซัลเฟตต่อการลดปริมาณกำมะถันไฟไรต์และกำมะถันรวม เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกซัลเฟต 0.5, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตร ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร อุณหภูมิ 90 °ซ โดยแสดงให้เห็นว่า ร้อยละการลดของกำมะถันไฟไรต์ กำมะถันรวม กำมะถันซัลเฟตและเถ้า เพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นสารละลายเฟอริกซัลเฟตเพิ่มมากขึ้น โดยร้อยละการลดของกำมะถันไฟไรต์เป็น 50.39, 55.39 และ 61.60 ตามลำดับ ร้อยละการลดของกำมะถันรวมเป็น 30.72, 36.16 และ 36.84 ตามลำดับ ร้อยละการลดของกำมะถันซัลเฟตเป็น 91.51, 92.17 และ 93.29 ตามลำดับ ส่วนร้อยละการลดเถ้าเป็น 33.92, 34.90 และ 36.15 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบผลความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์ กับสารละลายเฟอริกซัลเฟต พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการขจัดกำมะถันในถ่านหินจะใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5

การเพิ่มความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์และเฟอริกซัลเฟตสามารถลดปริมาณกำมะถันรวม กำมะถันไฟไรต์ และเถ้าได้มากขึ้น ดังนั้นการใช้ค่าความเข้มข้นสารละลาย 1.0 โมลต่อลิตรจึงเหมาะสมกว่าค่าความเข้มข้นอื่น ๆ ในการขจัดกำมะถันในถ่านหิน

เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ทำให้ในสารละลายมีปริมาณเฟอริก(III)  
ไอออนมากขึ้น ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ไฟโรต์ในถ่านหินให้เป็นซัลเฟตได้มากขึ้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2

สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่มีความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 0.5, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตร (ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มิลลิลิตร อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 90 °ซ และเวลา 4 ชั่วโมง)

ความเข้มข้น FeCl <sub>3</sub> (โมล/ลิตร)	ถ้ำ (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			ร้อยละการลดกำมะถัน			ร้อยละการลด ของถ้ำ
		ซัลเฟต	ไฟไรต์	รวม	ซัลเฟต	ไฟไรต์	รวม	
เริ่มต้น	10.80	1.65	1.20	3.19	-	-	-	-
0.5	7.07	0.12	0.71	2.20	92.73	46.21	31.68	34.54
0.8	7.02	0.11	0.60	2.05	93.33	54.89	35.94	35.18
1.0	6.86	0.10	0.49	2.01	94.05	60.80	37.19	37.12

ตารางที่ 4.3

สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่มีอุณหภูมิ 50, 70, 90 และ 120 °ซ (ความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 1.0 โมลต่อลิตร ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มิลลิลิตร อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที และเวลา 4 ชั่วโมง)

อุณหภูมิ (°ซ)	ถ้ำ (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			ร้อยละการลดกำมะถัน			ร้อยละการลด ของถ้ำ
		ซัลเฟต	ไฟไรต์	รวม	ซัลเฟต	ไฟไรต์	รวม	
เริ่มต้น	10.80	1.65	1.20	3.19	-	-	-	-
50	8.28	0.15	0.63	2.20	90.91	47.50	31.03	23.48
70	7.93	0.12	0.50	2.15	92.81	57.63	32.60	28.69
90	6.86	0.10	0.49	2.01	94.05	60.80	37.19	37.12
120	6.44	0.05	0.36	1.93	97.01	70.25	40.06	44.15

ตารางที่ 4.4 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่มีขนาดถ่านหิน 150, 250 และ 500-750 ไมโครเมตร (ความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 1.0 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 90 °ซ ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มิลลิลิตร อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที และเวลา 4 ชั่วโมง)

ขนาดถ่านหิน ( $\mu\text{m.}$ )	ถ้ำ (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			ร้อยละการลดกำมะถัน			ร้อยละการลด ของถ้ำ
		ซัลเฟต	ไพไรต์	รวม	ซัลเฟต	ไพไรต์	รวม	
เริ่มต้น	10.80	1.65	1.20	3.19	-	-	-	-
150	6.67	0.06	0.38	1.94	96.36	68.85	39.18	39.25
250	6.74	0.08	0.42	1.98	95.18	66.13	38.13	38.78
500-750	6.86	0.10	0.49	2.01	94.05	60.80	37.19	37.12

ตารางที่ 4.5 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่มีความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกซัลเฟต 0.5, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตร (ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มิลลิลิตร อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 90 °ซ และเวลา 4 ชั่วโมง)

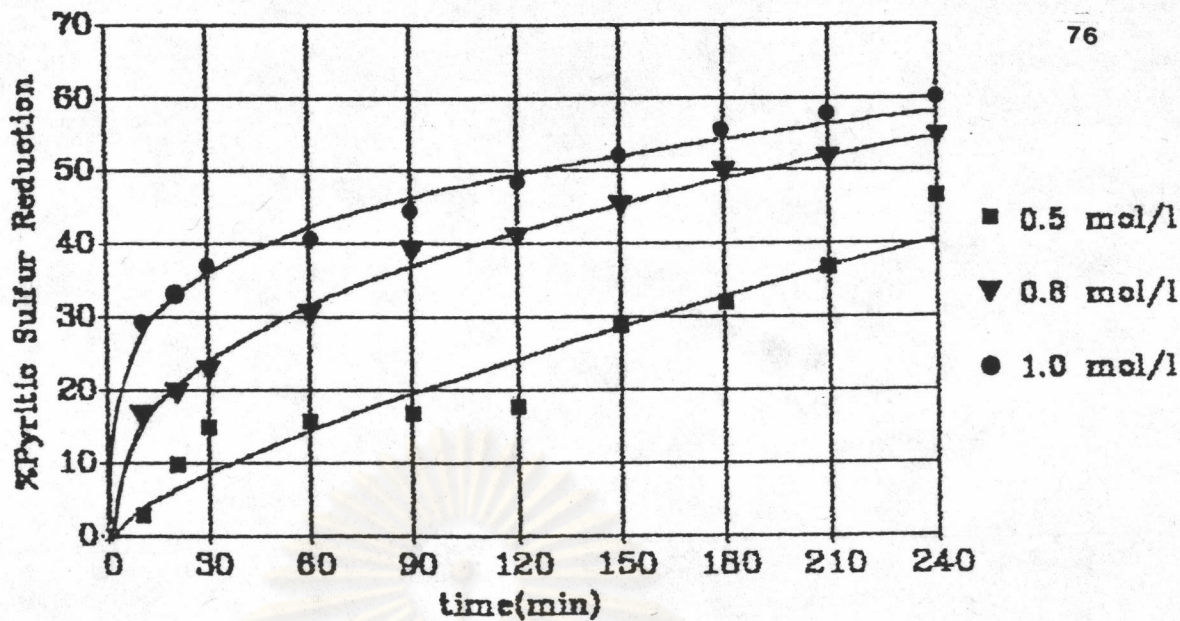
ความเข้มข้น $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (โมล/ลิตร)	ถ้ำ (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			ร้อยละการลดกำมะถัน			ร้อยละการลด ของถ้ำ
		ซัลเฟต	ไพไรต์	รวม	ซัลเฟต	ไพไรต์	รวม	
เริ่มต้น	10.80	1.65	1.20	3.19	-	-	-	-
0.5	7.19	0.14	0.64	2.21	91.51	50.39	30.72	33.92
0.8	7.17	0.10	0.58	2.03	92.17	55.39	36.16	34.90
1.0	6.96	0.11	0.47	2.04	93.29	61.60	36.84	36.15

ตารางที่ 4.6 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่มีอุณหภูมิ 50, 70, 90 และ 120 °ซ (ความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มิลลิลิตร อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที และเวลา 4 ชั่วโมง)

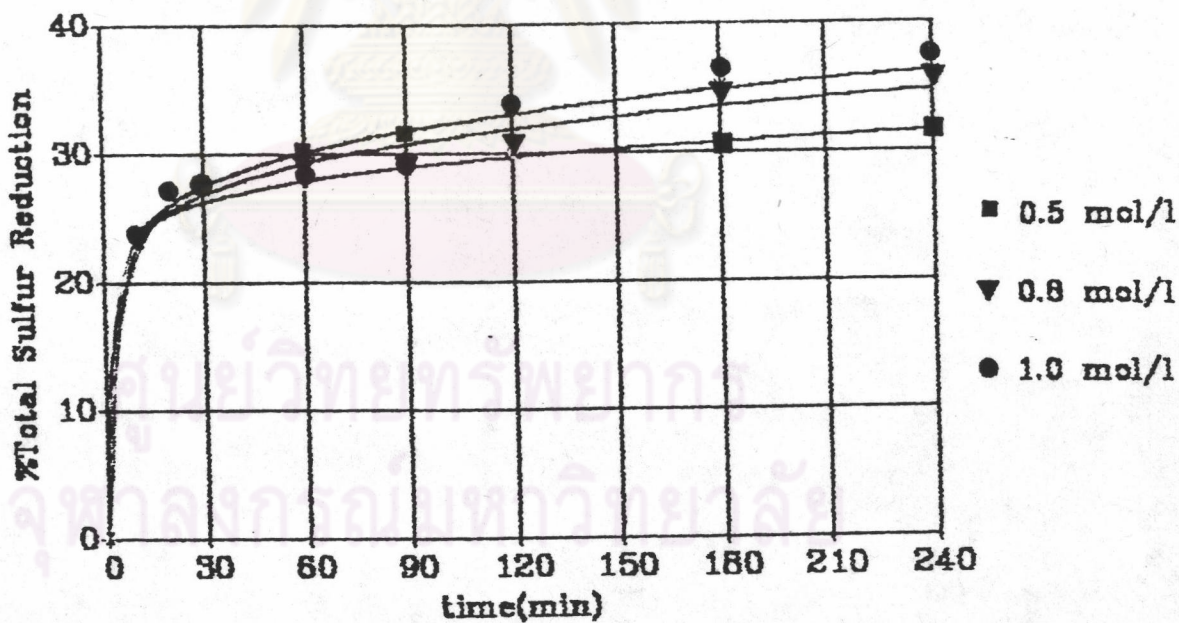
อุณหภูมิ (°ซ)	เถ้า (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			ร้อยละการลดกำมะถัน			ร้อยละการลด ของเถ้า
		ซัลเฟต	ไพไรต์	รวม	ซัลเฟต	ไพไรต์	รวม	
เริ่มต้น	10.80	1.65	1.20	3.19	-	-	-	-
50	8.37	0.16	0.65	2.22	90.48	47.15	30.63	22.72
70	7.44	0.14	0.51	2.20	91.72	58.20	31.68	31.43
90	6.96	0.11	0.47	2.04	93.29	61.60	36.84	36.15
120	6.41	0.06	0.35	1.92	96.41	71.77	41.10	42.10

ตารางที่ 4.7 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่มีขนาดถ่านหิน 150, 250 และ 500-750 ไมโครเมตร (ความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 90 °ซ ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มิลลิลิตร อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที และเวลา 4 ชั่วโมง)

ขนาดถ่านหิน (µm.)	เถ้า (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			ร้อยละการลดกำมะถัน			ร้อยละการลด ของเถ้า
		ซัลเฟต	ไพไรต์	รวม	ซัลเฟต	ไพไรต์	รวม	
เริ่มต้น	10.80	1.65	1.20	3.19	-	-	-	-
150	6.68	0.08	0.36	1.95	95.21	69.75	39.82	38.99
250	6.65	0.10	0.43	2.00	93.94	66.41	37.69	37.27
500-750	6.96	0.11	0.47	2.04	93.29	61.60	36.84	36.15

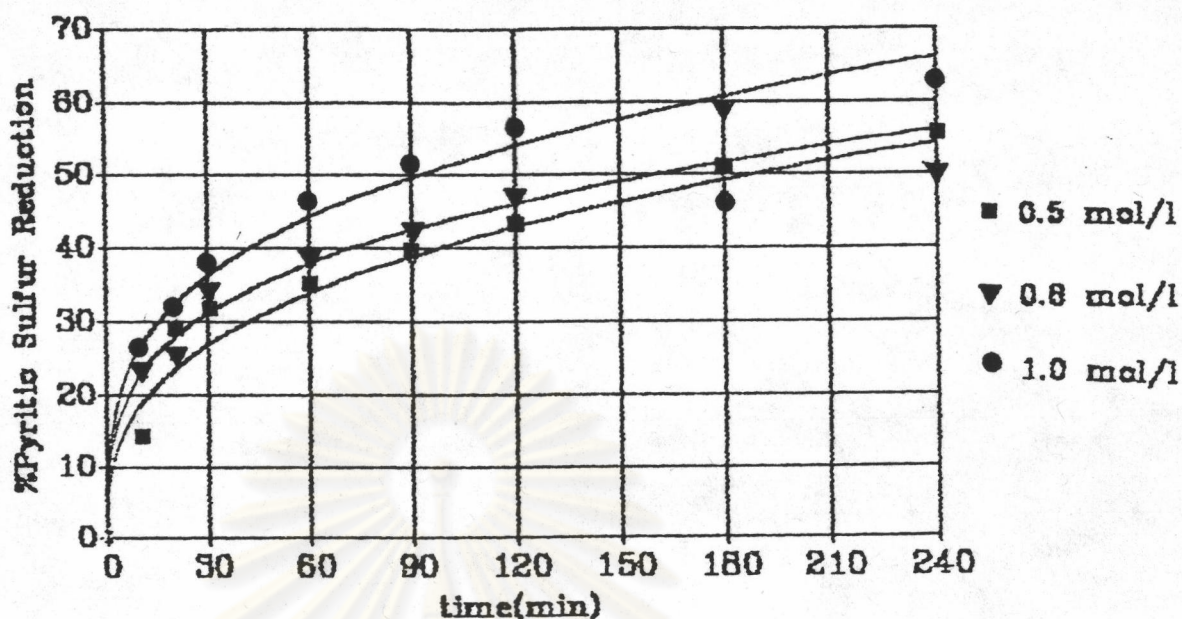


รูปที่ 4.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ที่มีต่อการลดกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 90 °C ระยะเวลา 4 ชม.)

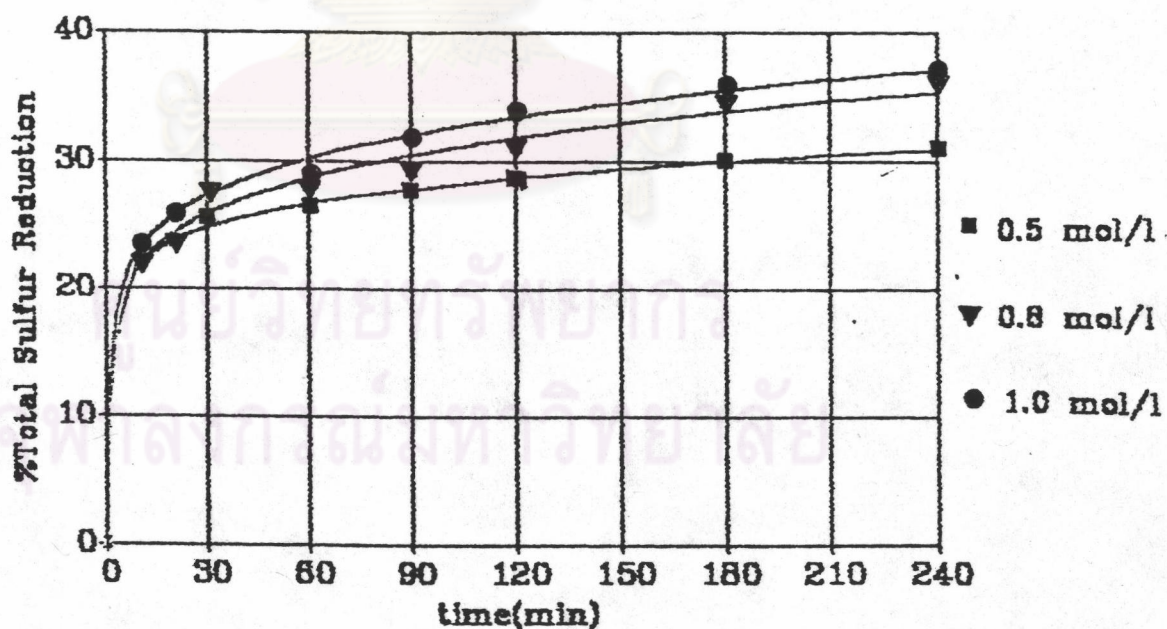


รูปที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในถ่านหินแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 90 °C ระยะเวลา 4 ชม.)

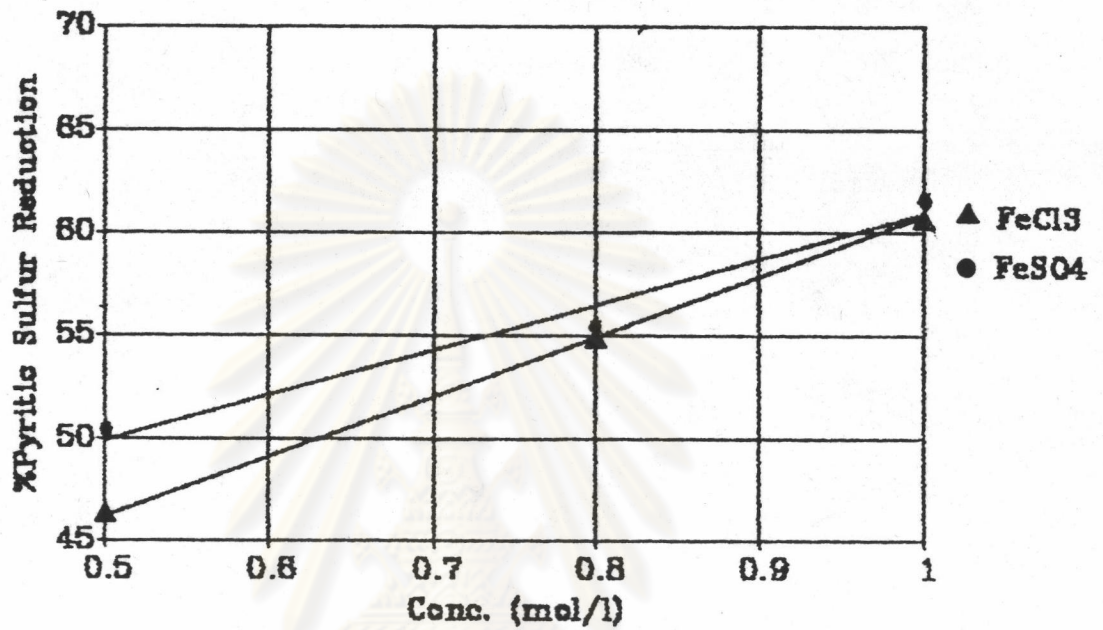




รูปที่ 4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่มีต่อการลดกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 90 °C ระยะเวลา 4 ชม.)



รูปที่ 4.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในถ่านหินแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 90 °C ระยะเวลา 4 ชม.)



รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์และสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่มีต่อการลดกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 90 °C ระยะเวลา 4 ชม.)

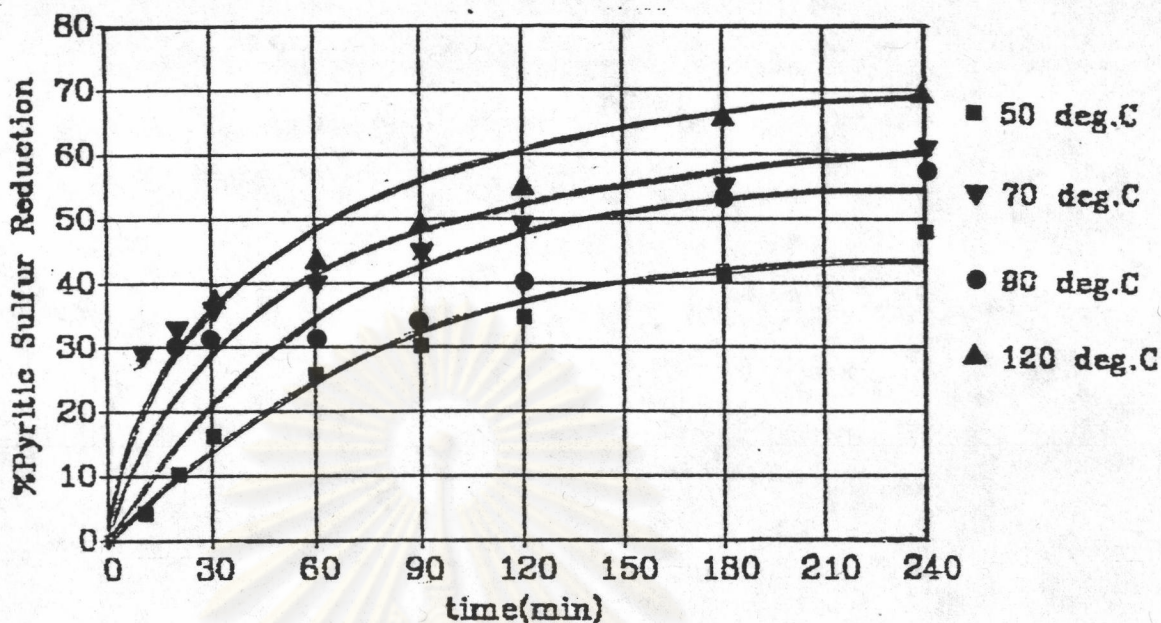
ศูนย์วทศทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.1.2 ผลของอุณหภูมิ

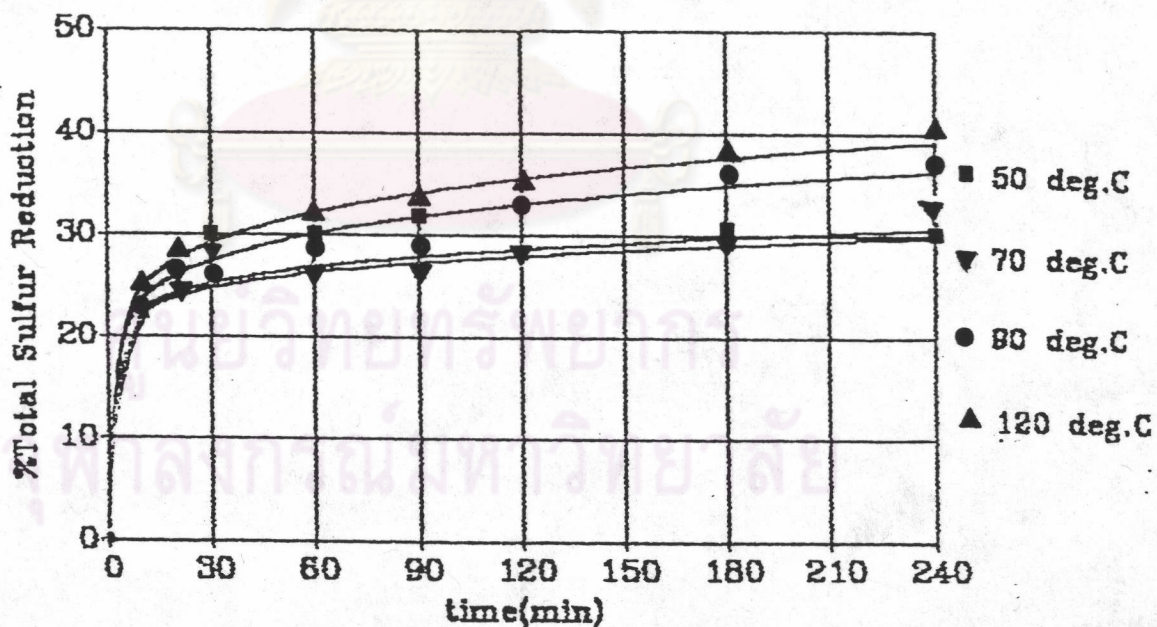
สมบัติถ่านหินแม่เมาะก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน ที่แปรค่าอุณหภูมิ 50, 70, 90 และ 120 °C ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์ และสารละลายเฟอริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มิลลิลิตร อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที ระยะเวลา 4 ชม. ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และ 4.6 ตามลำดับ

รูปที่ 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 และ 4.10 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดปริมาณกำมะถันไฟโรต์และกำมะถันรวม โดยใช้สารละลายเฟอริกคลอไรด์และสารละลายเฟอริกซัลเฟต ซึ่งผลพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ร้อยละการลดกำมะถันไฟโรต์ กำมะถันรวม กำมะถันซัลเฟตและเถ้าเพิ่มมากขึ้น โดยร้อยละการลดกำมะถันไฟโรต์ที่อุณหภูมิ 50, 70, 90 และ 120 °C เป็น 47.50, 57.63, 60.80 และ 70.25 ตามลำดับ ร้อยละการลดกำมะถันรวมเป็น 31.03, 32.60, 37.19 และ 40.06 ตามลำดับ ร้อยละการลดกำมะถันซัลเฟตเป็น 90.91, 92.81, 94.05 และ 97.01 ตามลำดับ ส่วนร้อยละการลดของเถ้าเป็น 23.48, 28.69, 37.12 และ 44.15 ตามลำดับ เมื่อใช้สารละลายเฟอริกคลอไรด์ และเมื่อใช้สารละลายเฟอริกซัลเฟต ร้อยละการลดกำมะถันไฟโรต์เป็น 47.15, 58.20, 61.60 และ 71.77 ตามลำดับ ร้อยละการลดกำมะถันรวมเป็น 30.63, 31.68, 36.84 และ 41.10 ตามลำดับ ร้อยละการลดกำมะถันซัลเฟตเป็น 90.48, 91.72, 93.29 และ 96.41 ตามลำดับ ส่วนร้อยละการลดของเถ้าเป็น 22.72, 31.43, 36.15 และ 42.10 ตามลำดับ

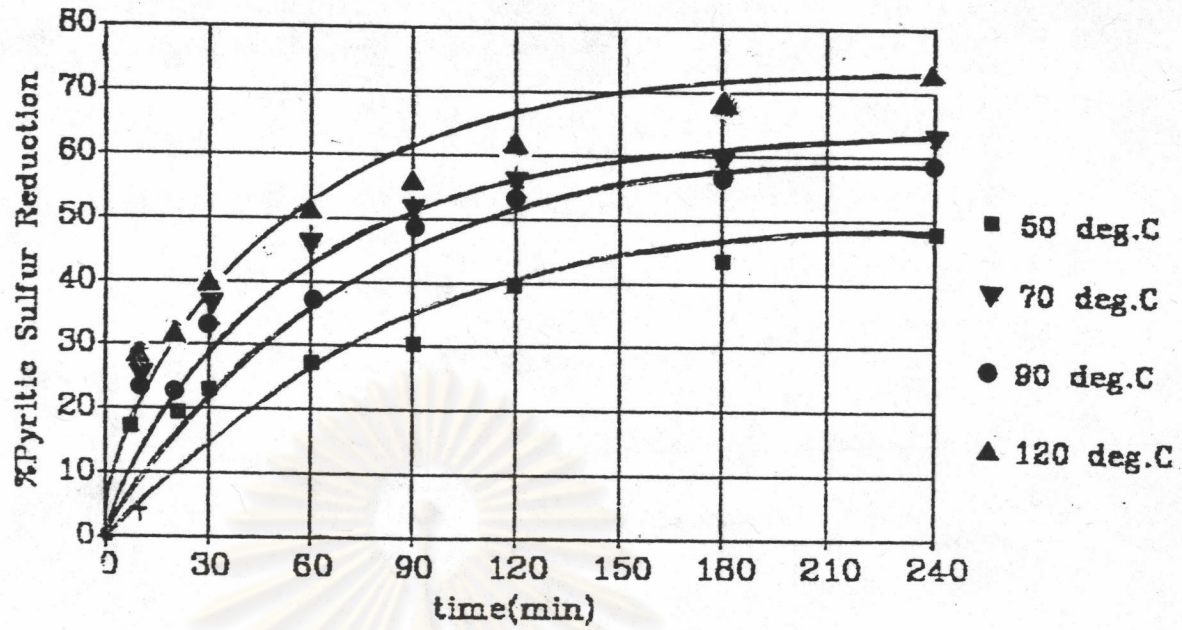
จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขจัดกำมะถันคาร์บอนเป็น 120 °C เนื่องจากสามารถขจัดกำมะถันไฟโรต์ได้ถึงร้อยละ 70.25 เมื่อใช้สารละลายเฟอริกคลอไรด์ และขจัดได้ร้อยละ 71.77 เมื่อใช้สารละลายเฟอริกซัลเฟต การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น เนื่องจากสารละลายเฟอริกคลอไรด์และสารละลายเฟอริกซัลเฟตแตกตัวให้เฟอริก(II)ไอออน ทำให้แพร่เข้าไปทำปฏิกิริยากับกำมะถันในอนุภาคถ่านหินได้ดีขึ้น จึงสามารถลดปริมาณกำมะถันได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



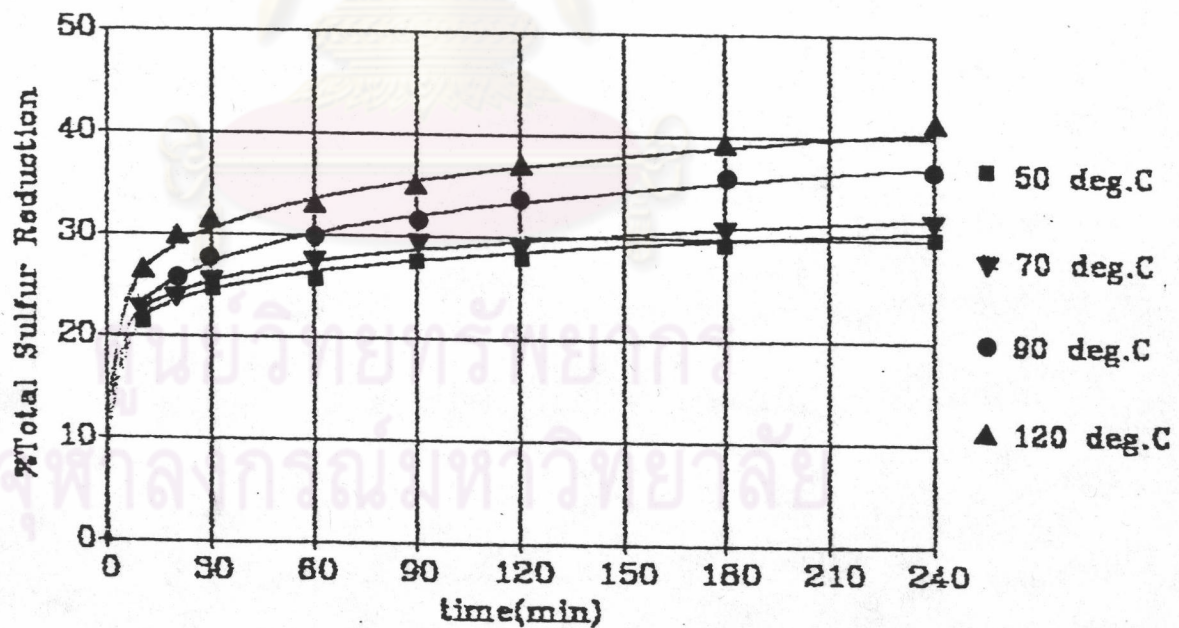
รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ 1.0 โมลต่อลิตร ระยะเวลา 4 ชม.)



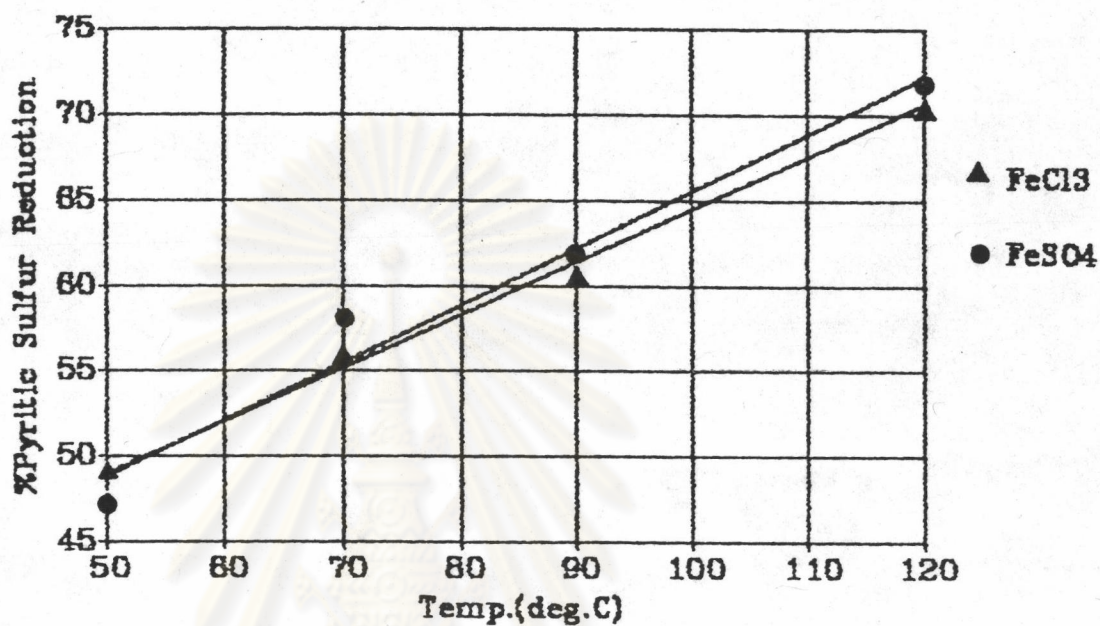
รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในถ่านหินแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ 1.0 โมลต่อลิตร ระยะเวลา 4 ชม.)



รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร ระยะเวลา 4 ชม.)



รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในถ่านหินแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร ระยะเวลา 4 ชม.)



รูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. อัตราการกวน 500 รอบ/นาที ความเข้มข้นสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์และสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต 1.0 โมล/ลิตร ระยะเวลา 4 ชม.)

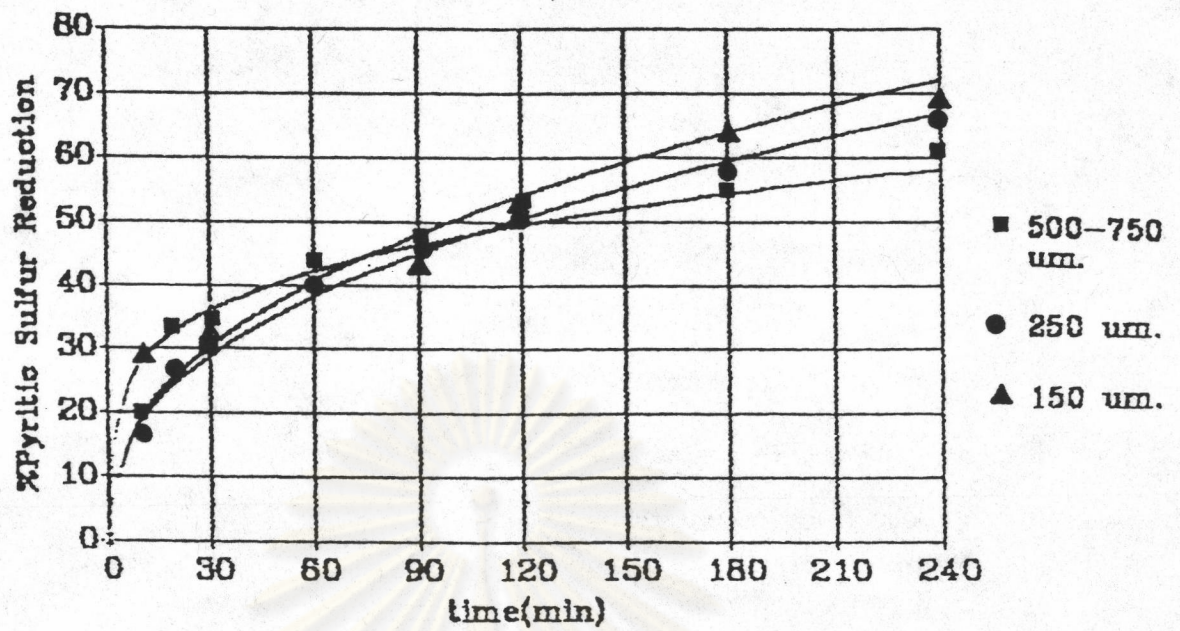
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.1.3 ผลของขนาดถ่านหิน

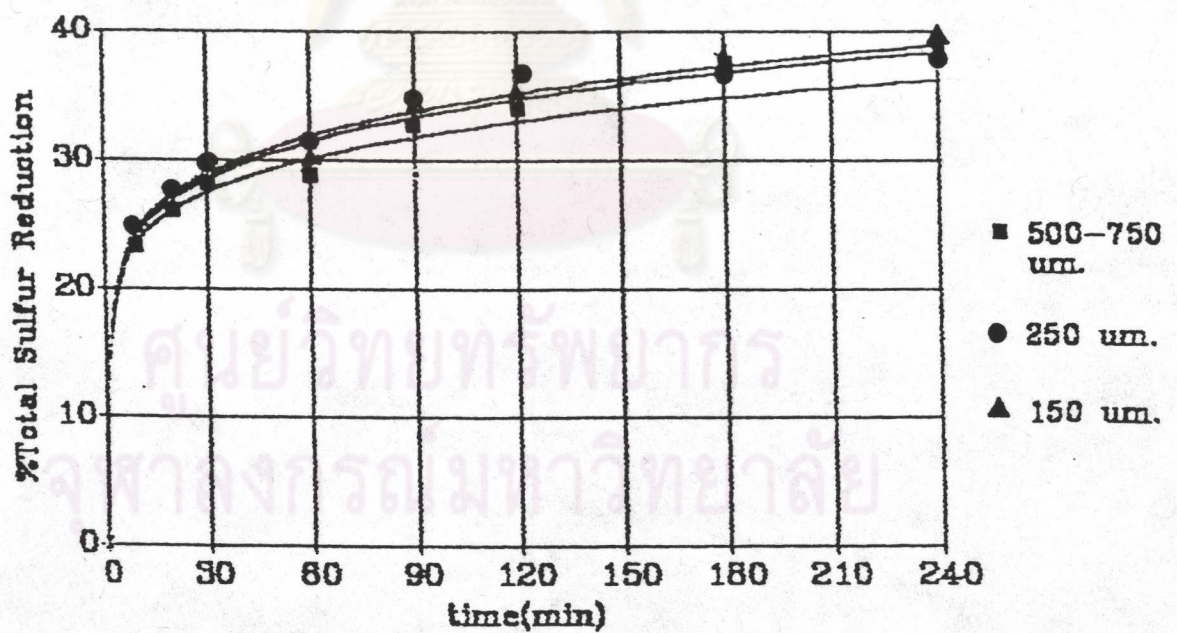
สมบัติถ่านหินแม่เมาะก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่แปรขนาดถ่านหิน 150, 250 และ 500-750 ไมโครเมตร ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์และสารละลายเฟอริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 90 °ซ อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที ระยะเวลา 4 ชม. แสดงดังตารางที่ 4.4 และ 4.7 ตามลำดับ

รูปที่ 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 และ 4.15 แสดงผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์และกำมะถันรวม โดยใช้สารละลายเฟอริกคลอไรด์และสารละลายเฟอริกซัลเฟต พบว่าเมื่อขนาดถ่านหินลดลง ร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์กำมะถันรวม กำมะถันซัลเฟต และเถ้าจะเพิ่มมากขึ้น โดยจากการใช้สารละลายเฟอริกคลอไรด์เป็นตัวออกซิไดซ์ พบว่า ร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์เมื่อใช้ขนาดถ่านหิน 150, 250, และ 500-750 ไมโครเมตรเป็น 68.85, 66.13, และ 60.80 ตามลำดับ ร้อยละการลดกำมะถันรวมเป็น 39.18, 38.13 และ 37.19 ตามลำดับ ร้อยละการลดกำมะถันซัลเฟตเป็น 96.36, 95.18 และ 94.05 ตามลำดับ ส่วนร้อยละการลดของเถ้าเป็น 39.25, 38.78 และ 37.12 ตามลำดับ เมื่อใช้สารละลายเฟอริกซัลเฟต พบว่า ร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์เป็น 69.75, 66.41, และ 61.60 ตามลำดับ ร้อยละการลดกำมะถันรวมเป็น 39.82, 37.69 และ 36.84 ตามลำดับ ร้อยละการลดกำมะถันซัลเฟตเป็น 95.21, 93.94 และ 93.29 ตามลำดับ ส่วนร้อยละการลดของเถ้าเป็น 38.99, 37.27 และ 36.15 ตามลำดับ

จากผลการทดลอง ความสามารถในการขจัดกำมะถันในถ่านหินลดลงเมื่อขนาดถ่านหินเพิ่มขึ้น หรือกล่าวได้ว่าถ่านหินที่มีขนาดเล็กให้ผลในการลดปริมาณกำมะถันและเถ้าได้ดีกว่าถ่านหินที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยในการทดลองนี้ขนาดถ่านหินที่ทำให้การขจัดกำมะถันดีที่สุดคือขนาด 150 ไมโครเมตร ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอนุภาคถ่านหินขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า และการที่ผิวถ่านหินเป็นรูพรุน ทำให้สารละลายเฟอริกซึมผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าถ่านหินขนาดใหญ่ แกนกลางของถ่านหินขนาดเล็กย่อมถูกทำปฏิกิริยาได้มากกว่าถ่านหินขนาดใหญ่

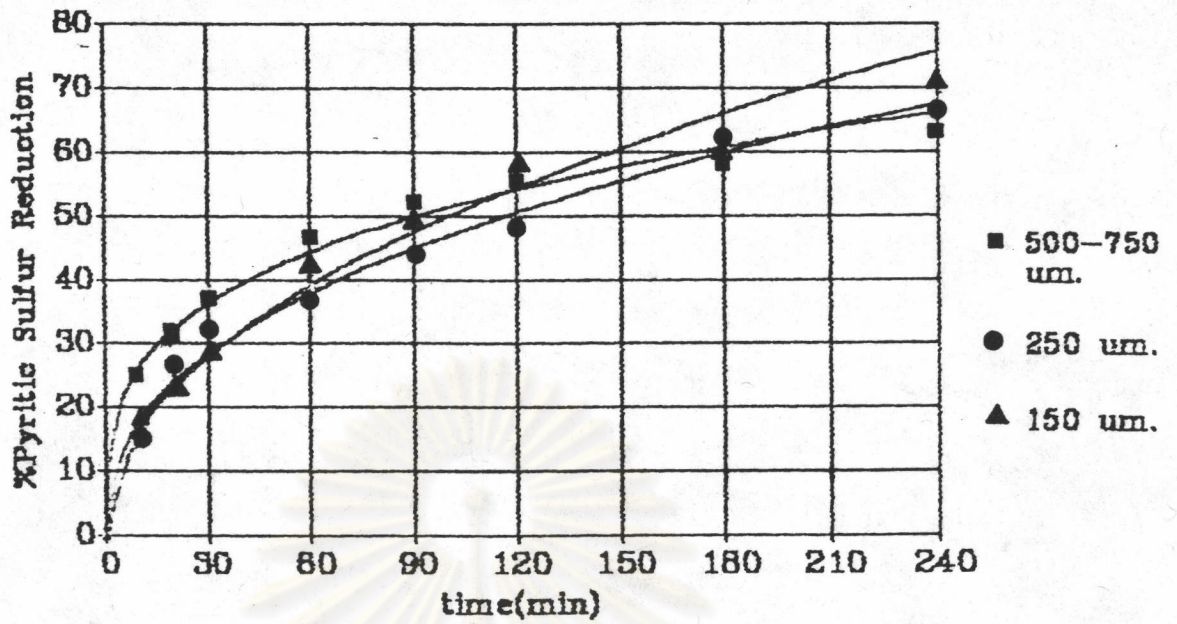


รูปที่ 4.11 ผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อการลดกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินแม่เมาะ (อุณหภูมิ 90 °C ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้นสารละลาย เพอร์ริกคลอไรด์ 1.0 โมลต่อลิตร ระยะเวลา 4 ชม.)

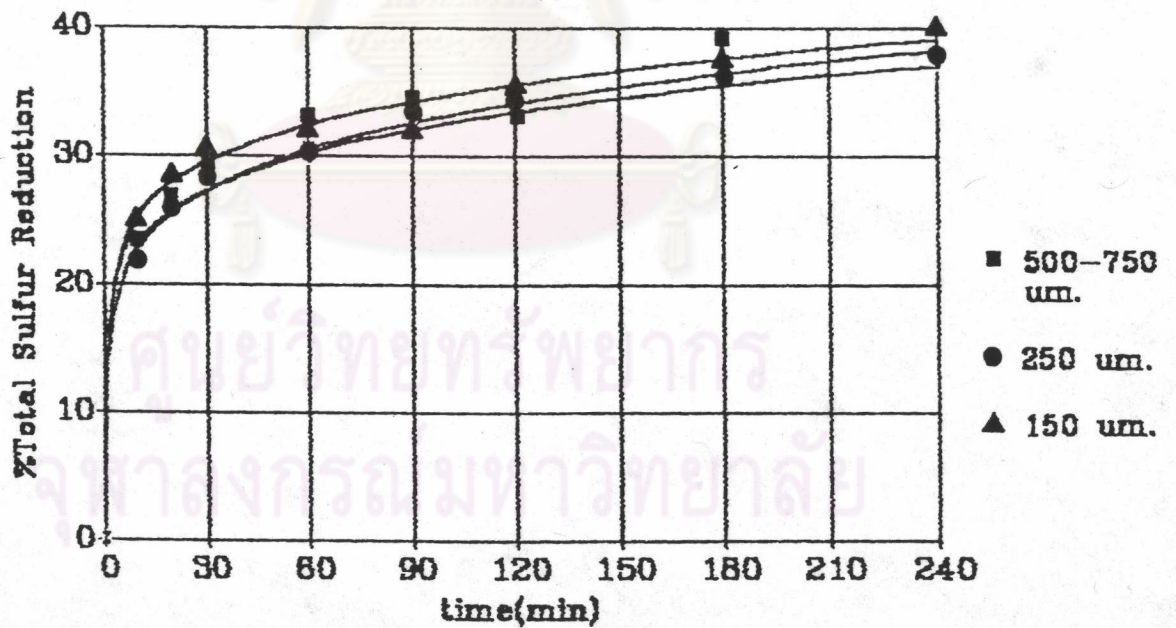


รูปที่ 4.12 ผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในถ่านหินแม่เมาะ ( อุณหภูมิ 90 °C ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้นสารละลาย เพอร์ริกคลอไรด์ 1.0 โมลต่อลิตร ระยะเวลา 4 ชม.)

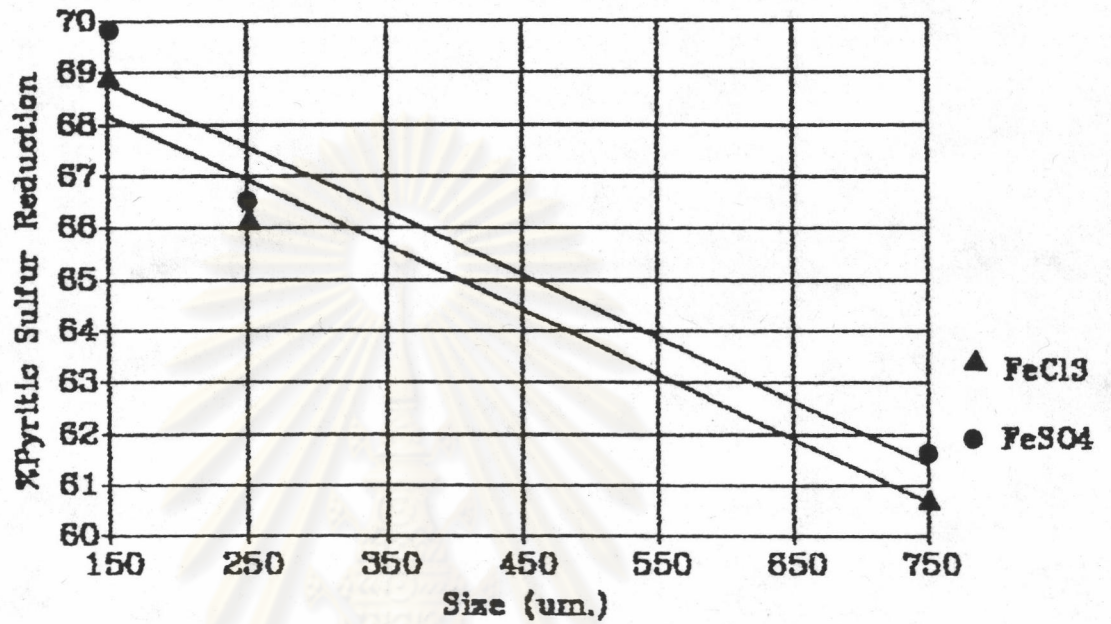




รูปที่ 4.13 ผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อการลดกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินแม่เมาะ (อุณหภูมิ 90 °ซ ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้นสารละลาย เพอร์ริกัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร ระยะเวลา 4 ชม.)



รูปที่ 4.14 ผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในถ่านหินแม่เมาะ (อุณหภูมิ 90 °ซ ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้นสารละลาย เพอร์ริกัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร ระยะเวลา 4 ชม.)



รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อการลดกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินแม่เมาะ (อุณหภูมิ 90 °C ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. อัตราการกวน 500 รอบ ต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์และสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต 1.0 โมล/ลิตร ระยะเวลา 4 ชม.)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



#### 4.1.4 ผลของระยะเวลา

สมบัติถ่านหินแม่เมาะก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน ที่แปรค่า ระยะเวลา 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180 และ 240 นาที ความเข้มข้นสารละลาย เฟอร์ริกคลอไรด์และสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร อุณหภูมิ 90 °ซ ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มิลลิลิตร อัตรา การกวน 500 รอบต่อนาที แสดงไว้ดังตารางที่ 4.8

ผลของระยะเวลาต่อการลดปริมาณกำมะถันไฟไรต์ กำมะถันรวม กำมะถัน ซัลเฟตและเถ้า พบว่า เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นร้อยละการลดปริมาณกำมะถันไฟไรต์ กำมะถัน รวม กำมะถันซัลเฟต และเถ้าจะเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเวลาผ่านไป 240 นาที ในการใช้สาร ละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ร้อยละการลดของกำมะถันไฟไรต์เป็น 60.80 ร้อยการลดของ กำมะถันรวมเป็น 37.19 ร้อยละการลดของกำมะถันซัลเฟตเป็น 94.45 และร้อยละ การลดของเถ้าเป็น 37.12 เมื่อเทียบกับเวลาดั้งต้น สำหรับสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต พบว่า ร้อยละการลดกำมะถันไฟไรต์เป็น 61.60 ร้อยละการลดกำมะถันรวมเป็น 36.84 ร้อยละการลดกำมะถันซัลเฟตเป็น 93.29 และร้อยละการลดเถ้าเป็น 36.15 เมื่อเทียบกับ เวลาดั้งต้น

จากผลการทดลอง ความสามารถในการขจัดกำมะถันและเถ้าจะเกิดได้ดี ในช่วงแรกและเกิดช้าลงในช่วงหลัง ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงแรกยังมีปริมาณกำมะถันมากอยู่และ ชั้นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยายังมีอยู่น้อยจึงเกิดปฏิกิริยาได้ดี ต่อมาในช่วงหลังปริมาณกำมะถัน เหลือน้อยลง (แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาเล็กลง) และเกิดชั้นผลิตภัณฑ์หนาขึ้น ทำให้การ เกิดปฏิกิริยาช้าลง

ตารางที่ 4.8 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่มีขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกคลอไรด์และสารละลายเฟอริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 90 °ซ ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มิลลิลิตร อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที ระยะเวลา 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180 และ 240 นาที

เวลา (นาที)	สารละลายเฟอริกคลอไรด์				สารละลายเฟอริกซัลเฟต			
	ร้อยละการลดกำมะถัน			ร้อยละการลด ของเถ้า	ร้อยละการลดกำมะถัน			ร้อยละการลด ของเถ้า
	ซัลเฟต	ไฟไรต์	รวม		ซัลเฟต	ไฟไรต์	รวม	
0	-	-	-	-	-	-	-	-
10	86.31	28.80	23.75	1.10	75.00	25.60	23.22	1.38
20	87.50	32.8	27.18	6.14	82.32	31.20	25.70	4.86
30	89.88	36.00	27.81	12.28	86.59	37.60	27.55	7.52
60	90.47	40.00	28.75	23.65	89.02	46.40	29.41	13.39
90	90.47	44.80	28.75	30.25	90.85	51.20	31.89	21.84
120	91.67	48.80	33.75	35.38	92.07	56.00	33.75	26.70
180	92.26	55.20	36.25	36.66	92.68	59.20	35.91	31.65
240	94.05	60.80	37.19	37.12	93.29	62.4	36.84	36.15

สมบัติถ่านหินแม่เมาะก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน ที่แปรชนิดของสารละลาย โดยใช้สารละลายเฟอริกคลอไรด์และสารละลายเฟอริกซัลเฟต ความเข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 120 °ซ ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มิลลิลิตร อัตราการวน 500 รอบต่อนาที และเวลา 4 ชม. แสดงไว้ในตารางที่ 4.9

รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบผลของสารละลายเฟอริกคลอไรด์และสารละลายเฟอริกซัลเฟตที่มีต่อร้อยละการลดของกำมะถันไฟไรต์ ผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการขจัดกำมะถันจะใกล้เคียงกันเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ตารางที่ 4.9

สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่มีความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกคลอไรด์ และสารละลายเฟอริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 120 °ซ ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มิลลิลิตร อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที และเวลา 4 ชั่วโมง)

ชนิดของ สารละลาย	ถ้ำ (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			ร้อยละการลดกำมะถัน			ร้อยละการลด ของถ้ำ
		ซัลเฟต	ไฟไรต์	รวม	ซัลเฟต	ไฟไรต์	รวม	
เริ่มต้น	10.80	1.65	1.20	3.19	-	-	-	-
FeCl <sub>3</sub>	6.44	0.05	0.36	1.93	97.01	70.25	40.06	44.15
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	6.41	0.06	0.35	1.92	96.41	71.77	41.10	42.10

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.2 จลนพลศาสตร์ของกำมะถันไพไรต์ : โมเดลปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง

(Kinetic of pyritic sulphur : Continuous reaction model)

จากการศึกษาการขจัดกำมะถันในถ่านหิน ด้วยสารละลายเฟอริกคลอไรด์และสารละลายเฟอริกซัลเฟตในหัวข้อที่แล้ว จะเห็นได้ว่าสามารถนำข้อมูลของกำมะถันไพไรต์ที่ระยะเวลาต่าง ๆ มาศึกษาปฏิกิริยาเคมีระหว่างไพไรต์กับสารละลายเฟอริกคลอไรด์และสารละลายเฟอริกซัลเฟตได้ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยหาอันดับปฏิกิริยา ค่าคงที่ปฏิกิริยาและค่าพลังงานกระตุ้นเป็นส่วนแรก ส่วนที่สองเป็นการหาขั้นตอนที่ควบคุมอัตราเร็วการทำปฏิกิริยากับไพไรต์ในถ่านหิน

##### 4.2.1 การศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีของไพไรต์

##### 4.2.1.1 การหาอันดับปฏิกิริยาเคมีของไพไรต์

เฟอริก(III)ไอออนเป็นตัวออกซิไดซ์กำมะถันไพไรต์ในกระบวนการขจัดกำมะถัน สามารถหาอันดับและค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาได้โดยใช้ข้อมูลระหว่างระยะเวลา กับปริมาณกำมะถันไพไรต์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความเข้มข้นไพไรต์ ( $C_p$ ) และสัดส่วนการเปลี่ยน ( $X$ ) ดังตารางที่ 4.10 และ 4.11

ขั้นตอนการหาอันดับของปฏิกิริยา (reaction order) หาได้จากข้อมูลการทดลอง โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยา ( $r_p$ ) กับความเข้มข้นของไพไรต์ ( $C_p$ ) ตามสมการที่ 4.1

$$-r_p = (-dC_p/dt) = k_p C_p^n \quad (4.1)$$

ถ้าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

$$(-dC_p/dt) = k_1 C_p \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} & \text{Cp} & t \\ -d\text{Cp}/\text{Cp} & = k_1 dt \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} & \text{Cp}_0 & 0 \\ \ln(\text{Cp}_0) - \ln(\text{Cp}) & = k_1 t \end{aligned}$$

$$\ln(\text{Cp}) = \ln(\text{Cp}_0) - k_1 t \quad (4.4)$$

ถ้าเขียนกราฟของ  $\ln(\text{Cp})$  กับ  $t$  จะได้กราฟเส้นตรงมีความชันเท่ากับ  $-k_1$

ถ้าเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง

$$(-d\text{Cp}/dt) = k_2 \text{Cp}^2 \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} & \text{Cp} & t \\ -d\text{Cp}/\text{Cp}^2 & = k_2 dt \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} & \text{Cp}_0 & 0 \\ (1/\text{Cp}) - (1/\text{Cp}_0) & = k_2 t \end{aligned}$$

$$(1/\text{Cp}) = k_2 t + (1/\text{Cp}_0) \quad (4.7)$$

ถ้าเขียนกราฟระหว่าง  $1/\text{Cp}$  กับ  $t$  จะได้กราฟเส้นตรงความชันเท่ากับ  $k_2$

การทดสอบว่าจะ เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งหรือสองนั้น ทำได้โดยการเขียนกราฟระหว่าง  $\ln(\text{Cp})$  กับเวลา สำหรับอันดับหนึ่ง และ  $1/\text{Cp}$  กับ เวลา สำหรับอันดับสอง แล้วตรวจสอบดูว่าอันดับใดจะให้ค่าถูกต้องกว่ากัน โดยดูได้จากการเป็นเส้นตรงของกราฟและพิจารณาค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์สหพันธ์ (R-Square) จากการทดลองเมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟระหว่าง  $\ln(\text{Cp})$  กับเวลา และ  $1/\text{Cp}$  กับเวลา พบว่า ปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันไฟไรต์เป็นปฏิกิริยาอันดับสอง เนื่องจากเขียนกราฟระหว่าง  $\ln(\text{Cp})$  กับเวลา และ  $1/\text{Cp}$  กับเวลาได้เส้นตรง แต่เมื่อพิจารณาค่า  $r^2$  ก็จะเห็นว่า กราฟระหว่าง  $1/\text{Cp}$  กับเวลาให้ค่า  $r^2$  สูงกว่าหรือใกล้เคียง 1 มากกว่า กราฟแสดงดังรูปที่ 4.16, 4.17, 4.18 และ 4.19

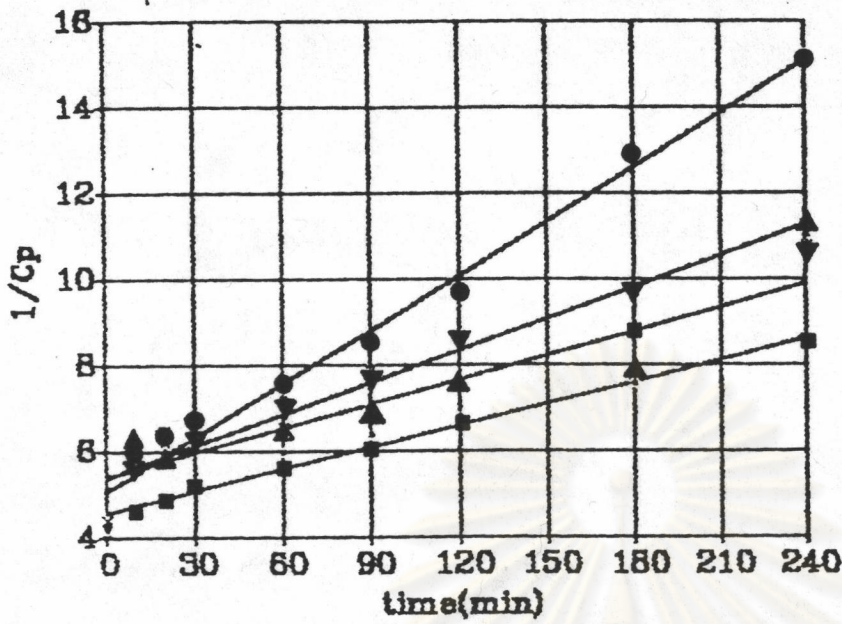


ตารางที่ 4.10 ค่าร้อยละกำมะถันไฟไรต์(แบบไม่รวมความชื้นและเถ้า) ความเข้มข้นของไฟไรต์(Cp)ของถ่านหินแม่เมาะ ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 1.0 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 50,70,90 และ 120 °ซ ตามระยะเวลา 10,20,30,60,90,120,180 และ 240 นาที

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ 50 °ซ			อุณหภูมิ 70 °ซ			อุณหภูมิ 90 °ซ			อุณหภูมิ 120 °ซ		
	กำมะถันไฟไรต์(%)	Cp	X	กำมะถันไฟไรต์(%)	Cp	X	กำมะถันไฟไรต์(%)	Cp	X	กำมะถันไฟไรต์(%)	Cp	X
0	1.346	0.231	-	1.328	0.228	-	1.403	0.241	-	1.368	0.235	-
10	1.282	0.220	0.047	0.956	0.164	0.280	0.998	0.171	0.289	0.977	0.168	0.286
20	1.198	0.206	0.109	0.909	0.156	0.315	0.936	0.161	0.333	0.916	0.157	0.330
30	1.117	0.192	0.170	0.889	0.153	0.330	0.885	0.152	0.369	0.869	0.149	0.365
60	0.987	0.170	0.266	0.894	0.154	0.327	0.818	0.141	0.417	0.776	0.133	0.432
90	0.921	0.158	0.316	0.851	0.146	0.359	0.747	0.128	0.468	0.684	0.118	0.500
120	0.864	0.149	0.358	0.773	0.133	0.418	0.689	0.118	0.509	0.603	0.104	0.559
180	0.775	0.133	0.424	0.750	0.129	0.435	0.602	0.103	0.571	0.453	0.078	0.669
240	0.687	0.118	0.490	0.543	0.093	0.591	0.526	0.096	0.625	0.385	0.066	0.719

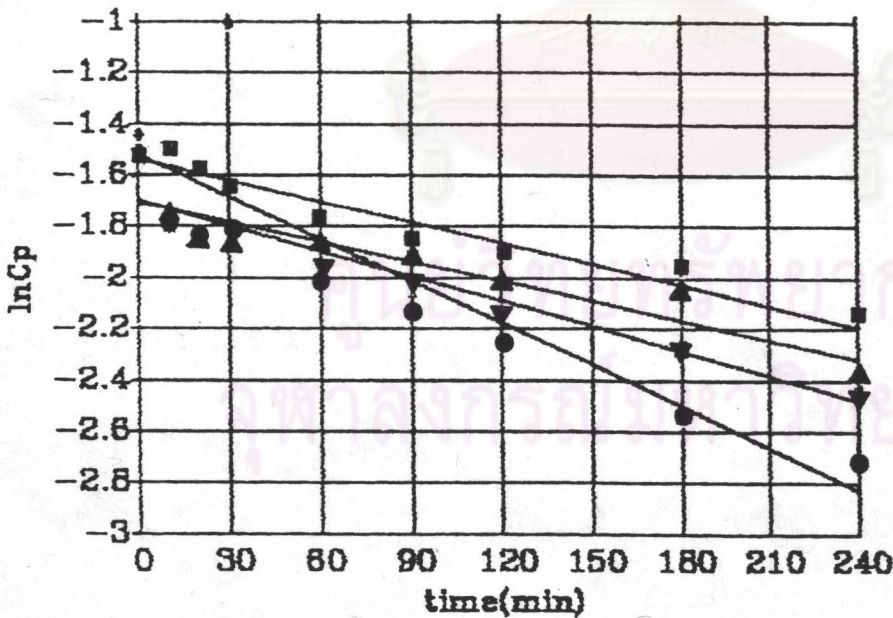
ตารางที่ 4.11 ค่าร้อยละกำมะถันไฟไรต์(แบบไม่รวมความชื้นและเถ้า) ความเข้มข้นของไฟไรต์(Cp)ของถ่านหินแม่เมาะ ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 50,70,90 และ 120 °ซ ตามระยะเวลา 10,20,30,60,90,120,180 และ 240 นาที

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ 50 °ซ			อุณหภูมิ 70 °ซ			อุณหภูมิ 90 °ซ			อุณหภูมิ 120 °ซ		
	กำมะถันไฟไรต์(%)	Cp	X	กำมะถันไฟไรต์(%)	Cp	X	กำมะถันไฟไรต์(%)	Cp	X	กำมะถันไฟไรต์(%)	Cp	X
0	1.379	0.237	-	1.368	0.235	-	1.403	0.241	-	1.394	0.240	-
10	1.322	0.227	0.042	1.309	0.225	0.044	1.042	0.179	0.257	1.010	0.174	0.275
20	1.102	0.189	0.201	1.056	0.181	0.229	0.960	0.165	0.316	0.950	0.163	0.319
30	1.055	0.181	0.236	0.911	0.157	0.334	0.867	0.149	0.382	0.834	0.143	0.402
60	0.996	0.171	0.278	0.851	0.146	0.378	0.740	0.127	0.473	0.675	0.116	0.516
90	0.949	0.163	0.312	0.693	0.119	0.493	0.667	0.115	0.525	0.614	0.106	0.559
120	0.822	0.141	0.404	0.623	0.107	0.545	0.598	0.103	0.574	0.531	0.091	0.619
180	0.765	0.131	0.445	0.576	0.099	0.579	0.551	0.095	0.607	0.431	0.074	0.691
240	0.709	0.122	0.486	0.551	0.095	0.597	0.505	0.087	0.640	0.374	0.064	0.732



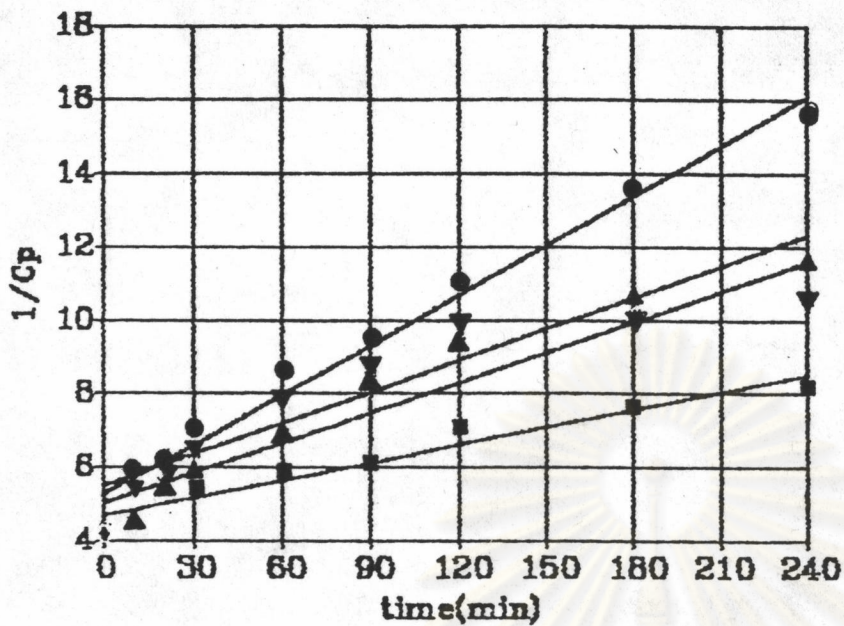
Second Order Reaction		
50 °C	R-Square	0.9798
■	Std. Err. of Prediction	0.0214
	Correlation Coefficient	0.9898
70 °C	R-Square	0.8366
▲	Std. Err. of Prediction	0.0736
	Correlation Coefficient	0.9147
90 °C	R-Square	0.9420
▼	Std. Err. of Prediction	0.0541
	Correlation Coefficient	0.9706
120 °C	R-Square	0.9837
●	Std. Err. of Prediction	0.0476
	Correlation Coefficient	0.9918

รูปที่ 4.16 กราฟระหว่าง  $1/C_p$  กับเวลาของถ่านหินแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 1.0 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 50,70,90 และ 120 °C ระยะเวลา 4 ชม.)



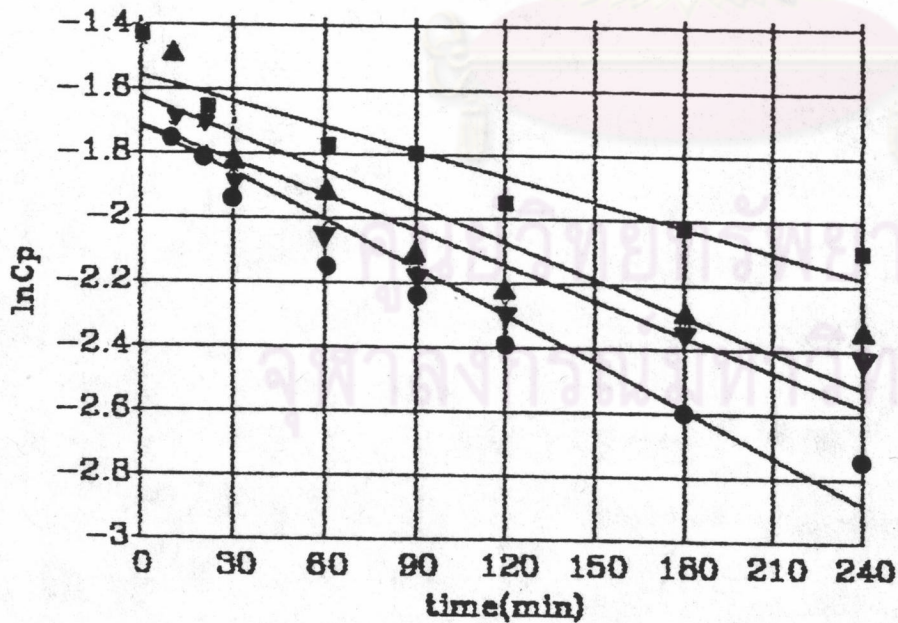
First Order Reaction		
50 °C	R-Square	0.9492
■	Std. Err. of Prediction	0.0559
	Correlation Coefficient	0.9742
70 °C	R-Square	0.7901
▲	Std. Err. of Prediction	0.1164
	Correlation Coefficient	0.8889
90 °C	R-Square	0.8448
▼	Std. Err. of Prediction	0.1238
	Correlation Coefficient	0.9191
120 °C	R-Square	0.7263
●	Std. Err. of Prediction	0.2971
	Correlation Coefficient	0.8522

รูปที่ 4.17 กราฟระหว่าง  $\ln C_p$  กับเวลาของถ่านหินแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 1.0 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 50,70,90 และ 120 °C ระยะเวลา 4 ชม.)



Second Order Reaction		
50 °C	R-Square	0.9347
■	Std. Err. of Prediction	0.0375
	Correlation Coefficient	0.9668
70 °C	R-Square	0.8982
▲	Std. Err. of Prediction	0.0614
	Correlation Coefficient	0.9477
90 °C	R-Square	0.9130
▼	Std. Err. of Prediction	0.0776
	Correlation Coefficient	0.9555
120 °C	R-Square	0.9811
●	Std. Err. of Prediction	0.0554
	Correlation Coefficient	0.9905

รูปที่ 4.18 กราฟระหว่าง  $1/C_p$  กับเวลาของถ่านหินแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 50,70,90 และ 120 °C ระยะเวลา 4 ชม.)



First Order Reaction		
50 °C	R-Square	0.8761
■	Std. Err. of Prediction	0.0863
	Correlation Coefficient	0.9360
70 °C	R-Square	0.8269
▲	Std. Err. of Prediction	0.1516
	Correlation Coefficient	0.9093
90 °C	R-Square	0.9185
▼	Std. Err. of Prediction	0.1511
	Correlation Coefficient	0.9047
120 °C	R-Square	0.9004
●	Std. Err. of Prediction	0.1441
	Correlation Coefficient	0.9489

รูปที่ 4.19 กราฟระหว่าง  $\ln C_p$  กับเวลาของถ่านหินแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 50,70,90 และ 120 °C ระยะเวลา 4 ชม.)

4.2.1.2 การหาค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเคมี (rate constant)  
และค่าพลังงานกระตุ้น (activated energy)

จากหัวข้อ 4.2.1.1 แสดงว่าปฏิกิริยาระหว่างไฟไรต์กับสารละลายเฟอริกคลอไรด์และสารละลายเฟอริกซัลเฟตเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง จากสมการที่ 4.7

$$(1/C_p) = k_2 t - (1/C_{p_0})$$

สามารถเปลี่ยนในรูปสัดส่วนการเปลี่ยนได้

$$X = 1 - (C_p/C_{p_0})$$

ดังนั้น

$$k_2 t C_{p_0} = [1/(1-X)] - 1 \quad (4.8)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $[1/(1-X)] - 1$  กับเวลาจะได้กราฟเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $k_2 C_{p_0}$  ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่า  $k_2$  ได้สำหรับอุณหภูมิต่างๆ ผลการเขียนกราฟจากข้อมูลการทดลองระหว่าง  $[1/(1-x)-1]$  กับ เวลา แสดงไว้ดังรูปที่ 4.20 และ 4.22 และผลจากการหาค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา  $k_2$  ที่อุณหภูมิต่างๆที่ทำการทดลอง แสดงไว้ดังตารางที่ 4.12

เมื่อนำค่า  $k_2$  ที่อุณหภูมิต่างๆในการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟระหว่าง  $\ln(k_2)$  กับ  $1/T$  ตามสมการ Arrhenius คือ

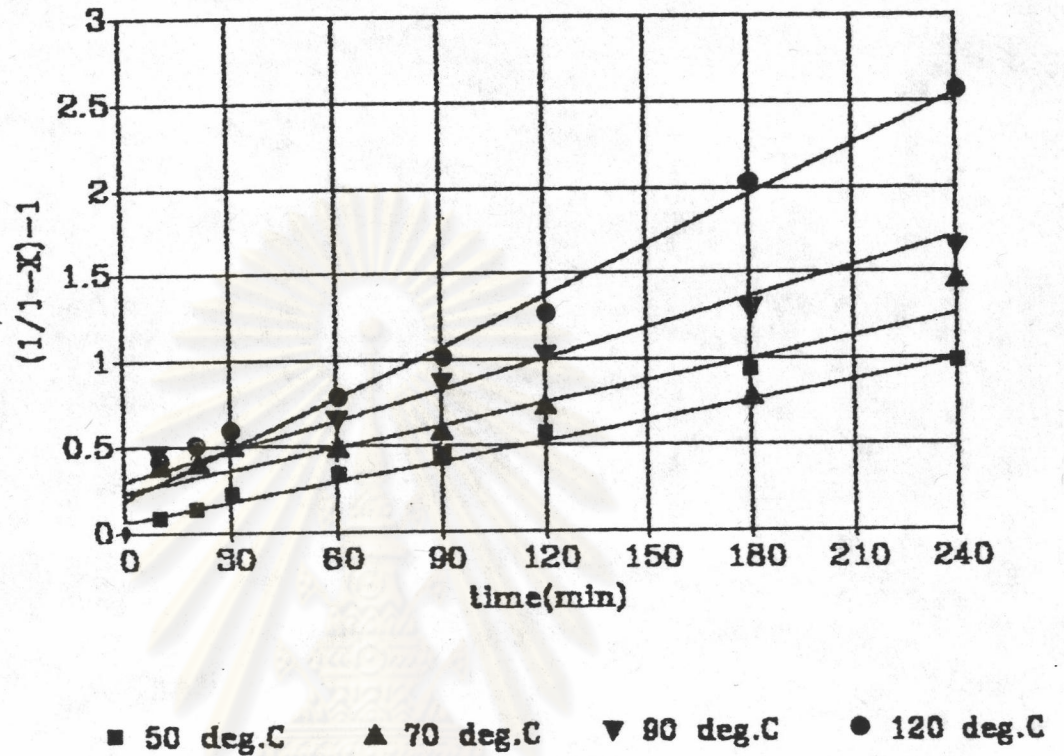
$$k_2 = k_{2(\infty)} e^{(-E/RT)} \quad (4.9)$$

จะได้กราฟเส้นตรงมีความชันเท่ากับ  $-E/R$  ซึ่งจะนำมา  
คำนวณค่าพลังงานกระตุ้นได้

รูปที่ 4.21 และ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ของกราฟระหว่าง  
 $\ln(k_2)$  กับ  $1/T$  ในปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันไพไรต์ด้วยสารละลายเฟอริกคลอไรด์และ  
สารละลายเฟอริกซัลเฟตตามลำดับ ตารางที่ 4.12 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา  
การขจัดกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินด้วยสารละลายเฟอริกคลอไรด์ และสารละลายเฟอริกซัลเฟต  
เป็น  $14.30 \times 10^6$  และ  $14.50 \times 10^6$  ตามลำดับ นอกจากนี้ตารางที่ 4.12 ยังแสดงความ  
สัมพันธ์ของค่าคงที่ปฏิกิริยากับอุณหภูมิตามรูปแบบสมการของ Arrhenius ด้วย

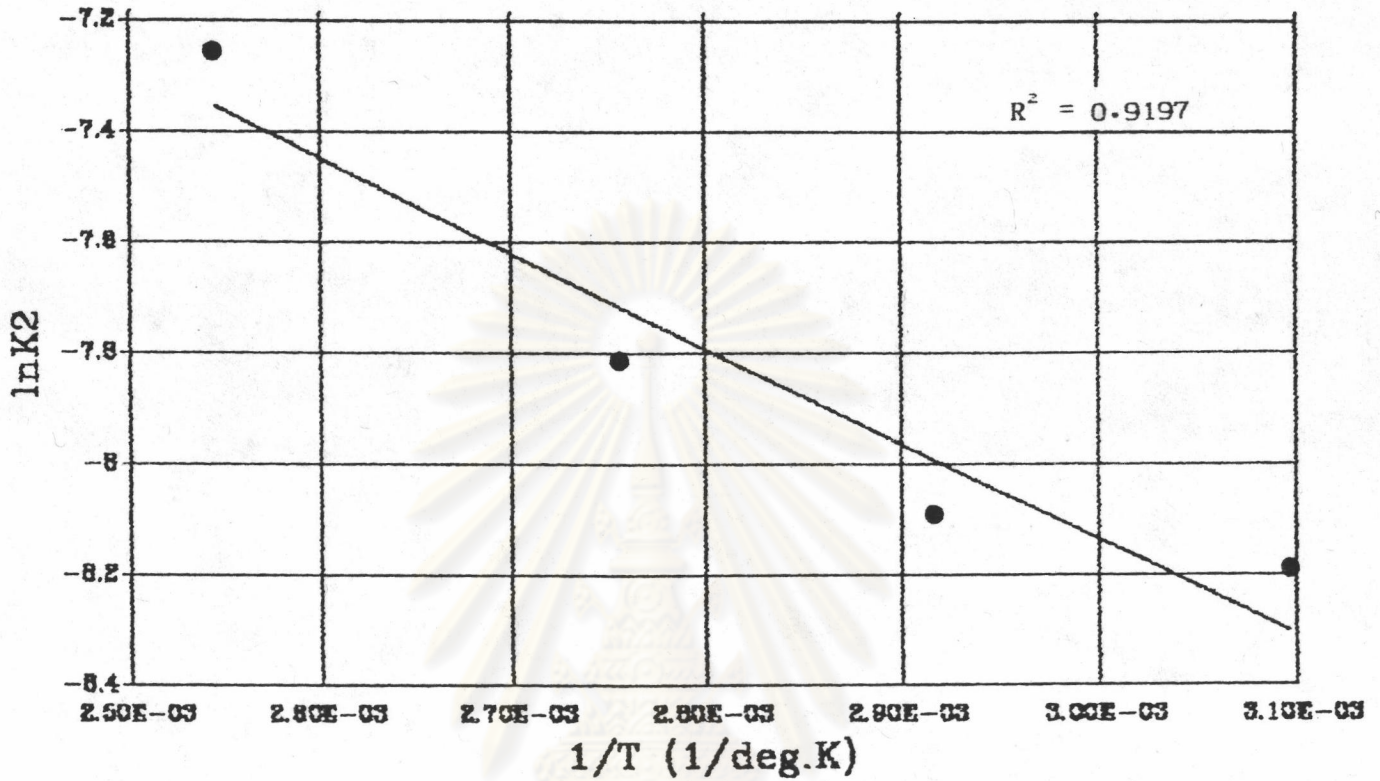


ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-20 กราฟแบบอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองระหว่าง  $(1/1-X)^{-1}$  กับเวลาของปฏิกิริยาการจลน์ไฟไรต์  
 ในถ่านหินแม่เมาะ ด้วยสารละลายเฟอริกคลอไรด์เข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 50, 70, 90  
 และ 120 °C (ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที)

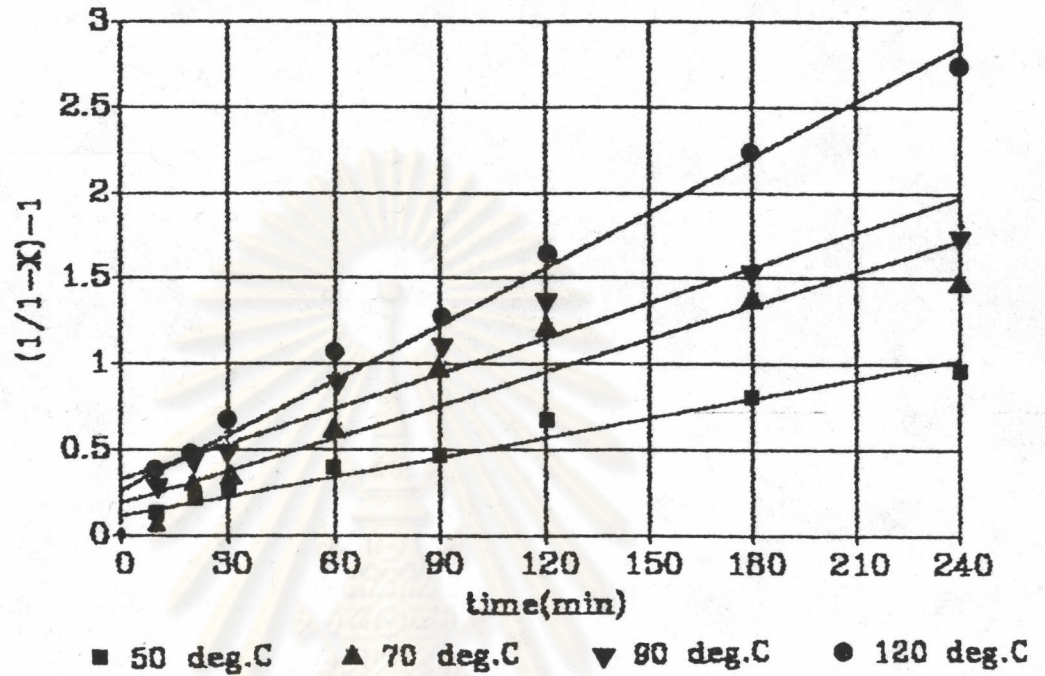
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.21 กราฟแบบ Arrhenius Plot ระหว่าง  $\ln k_2$  กับ  $1/T$  ของปฏิกิริยาการจลน์ไฟโรต์ใน  
ถ่านหินแม่เมาะด้วยสารละลายเพอร์คลอไรด์เข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 50, 70, 90  
และ 120 °C (ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที)

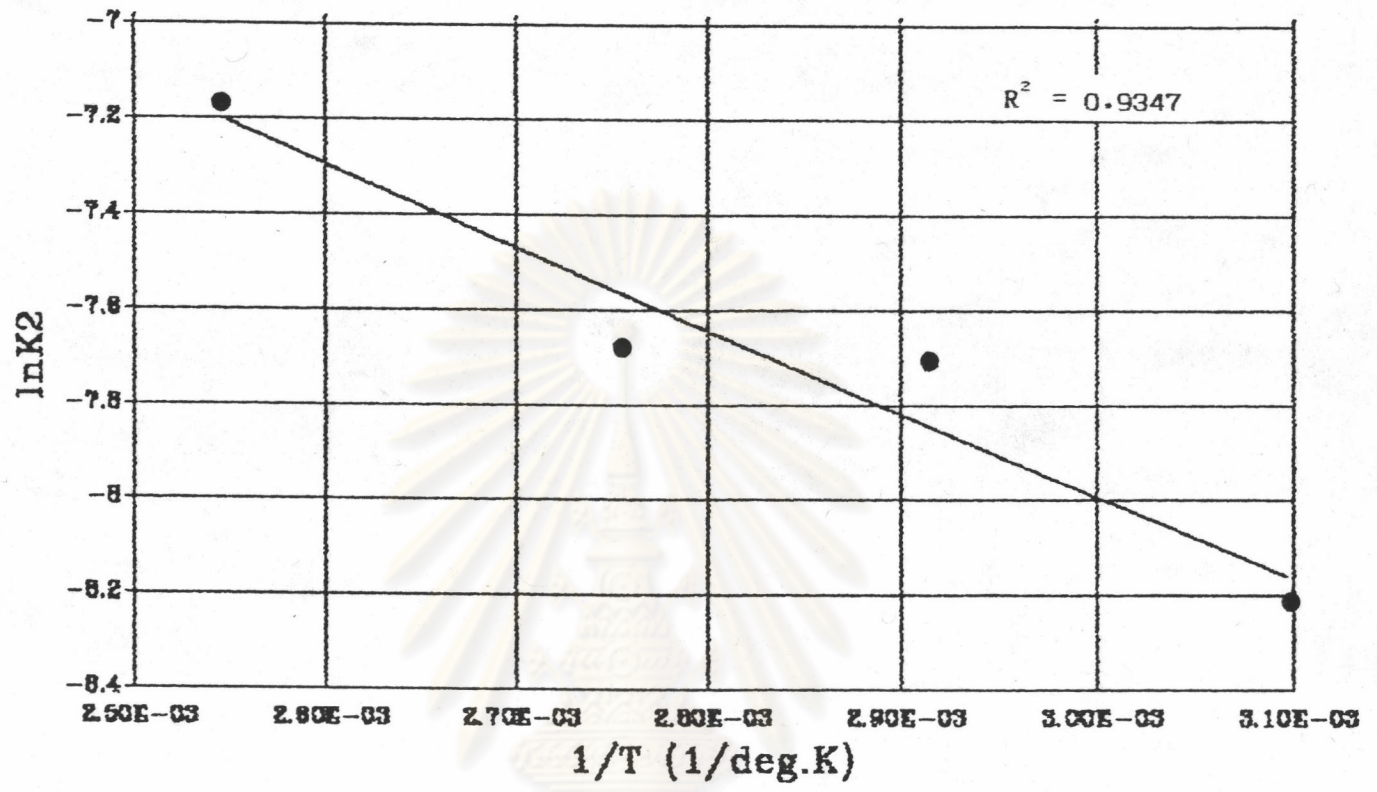
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.22 กราฟแบบอัตราเร็วปฏิกิริยอันดับสองระหว่าง  $(1/1-X)-1$  กับเวลาของปฏิกิริยาการจจัดไฟไรต์ ในถ่านหินแม่เมาะ ด้วยสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 50, 70, 90 และ 120 °C (ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.23 กราฟแบบ Arrhenius Plot ระหว่าง  $\ln k_2$  กับ  $1/T$  ของปฏิกิริยาการขจัดไนโรซีน  
 ถ่านหินแม่เมาะด้วยสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตเข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 50, 70, 90  
 และ 120 °C (ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา ( $k_2$ ) ของถ่านหินแม่เมาะ

สารละลายที่ใช้	ขนาดถ่านหิน (ไมโครเมตร)	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$k_2 C_{p_0}$ (นาที) $^{-1}$	$C_{p_0}$ กิโลโมล/ $\text{m}^3$	$k_2$ $\text{m}^3/\text{กิโลโมล-วินาที}$
สารละลายเฟอริก คลอไรด์ 1.0 โมล ต่อลิตร	500-750	50	0.00383	0.231	$2.766 \times 10^{-4}$
		70	0.00417	0.228	$3.046 \times 10^{-4}$
		90	0.00583	0.241	$4.034 \times 10^{-4}$
		120	0.00993	0.235	$7.043 \times 10^{-4}$
สารละลายเฟอริก ซัลเฟต 1.0 โมล ต่อลิตร	500-750	50	0.00387	0.237	$2.722 \times 10^{-4}$
		70	0.00633	0.235	$4.492 \times 10^{-4}$
		90	0.00667	0.241	$4.613 \times 10^{-4}$
		120	0.01105	0.240	$7.674 \times 10^{-4}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยากับอุณหภูมิของถ่านหินแม่เมาะตาม Arrhenius law ( $k_2 = k_{2(0)} e^{-E/RT}$ )

สารละลายที่ใช้	$k_{2(0)}$	$-E/R$	$k_2 = k_{2(0)} e^{-E/RT}$
สารละลายเฟอริก คลอไรด์ 1.0 ต่อลิตร	$5.1 \times 10^{-2}$	-1717.59	$k_2 = 5.1 \times 10^{-2} \exp(14.3 \times 10^5 / RT)$
สารละลายเฟอริก ซัลเฟต 1.0 โมล ต่อลิตร	$6.3 \times 10^{-2}$	-1743.51	$k_2 = 6.3 \times 10^{-2} \exp(14.5 \times 10^5 / RT)$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2 จลนพลศาสตร์ของกำมะถันไพไรต์: โมเดลแกนกลางไม่เกิดปฏิกิริยาหดตัว  
(Kinetic of pyritic sulphur : Unreacted shrinking core model)

ในการอธิบายลำดับขั้นตอนการเข้าทำปฏิกิริยาของเฟอริก(III)ไอออนจากสารละลายเฟอริกคลอไรด์และเฟอริกซัลเฟต อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ unreacted shrinking core model โดยสมมติว่าอนุภาคของถ่านหินมีขนาดคงที่ในระหว่างเกิดปฏิกิริยา ซึ่งขั้นตอนในการเกิดปฏิกิริยาประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือขั้นตอนการแพร่ของเฟอริก(III)ไอออนผ่านชั้นฟิล์ม (Diffusion through film layer) ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์เข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา (Diffusion through ash layer) และขั้นตอนการทำปฏิกิริยาของเฟอริก(III)ไอออนกับไพไรต์ที่แกนกลาง

เมื่อพิจารณาขั้นตอนทั้งสามตามสมการ (2.11), (2.19) และ (2.25) แล้วนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการเปลี่ยนของไพไรต์ของแต่ละขั้นตอนกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 และ 4.29 พบว่า ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์เข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาให้ผลสอดคล้องตามสมการได้ดีกว่าขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและขั้นตอนการทำปฏิกิริยาของเฟอริก(III)ไอออนกับไพไรต์ที่แกนกลาง โดยพิจารณาจากค่า  $r^2$  ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด ดังนั้นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยากับไพไรต์ในถ่านหิน คือ ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์เข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา ซึ่งแสดงว่าเป็นขั้นตอนที่ช้าที่สุด อัตราเร็วของปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับขั้นตอนนี้ แต่ปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันไพไรต์ด้วยสารละลายเฟอริกคลอไรด์และสารละลายเฟอริกซัลเฟต ไม่ได้เกิดจากขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์เข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาเพียงขั้นเดียว ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นทั้งสามขั้นตอน

จากกราฟเส้นตรง ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการเปลี่ยนของไพไรต์ของขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์ของเฟอริก(III)ไอออนเข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา คือ  $1-3(1-x)^{2/3} + 2(1-x)$  กับเวลา ดังรูปที่ 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 และ 4.29 ความชันของเส้นตรง คือ  $1/$  ซึ่งนำไปหาค่าการแพร่ประสิทธิผล (effective diffusivity,  $D_e$ ) ของแต่ละอนุภาคที่ทำการศึกษา คือ 50, 70, 90 และ

120 °ซ โดยอาศัยสมการ

$$t/\tau = 1 - 3(1-x)^{2/3} + 2(1-x) \quad (4.9)$$

$$= \frac{R^2}{6bDeC_{AL}} \quad (4.10)$$

โดยที่  $b = 26.9$  กิโลโมล/ม<sup>3</sup>

$R = 3.125 \times 10^{-4}$  เมตร

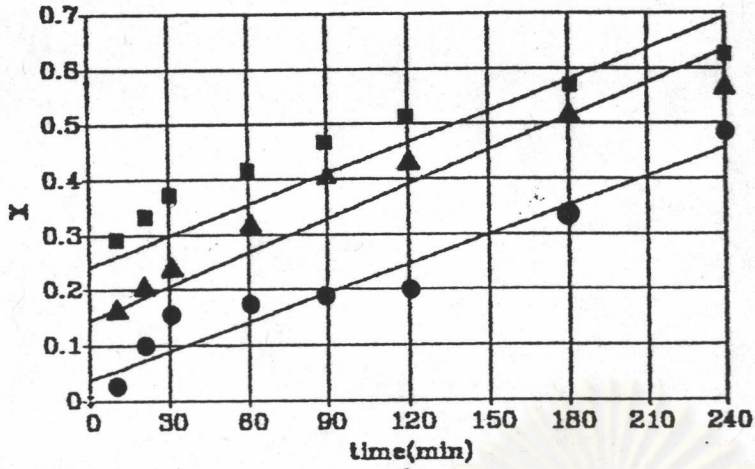
$b = 1.071$

ค่าการแพร่ประสิทธิผล (De) ของถ่านหินแม่เมาะแต่ละอุณหภูมิที่ทำการทดลอง คือ 50, 70, 90 และ 120 °ซ แสดงในตารางที่ 4.14 ซึ่งเมื่อนำค่า De ที่ได้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln (De)$  กับ  $1/T$  ตามสมการ Arrhenius

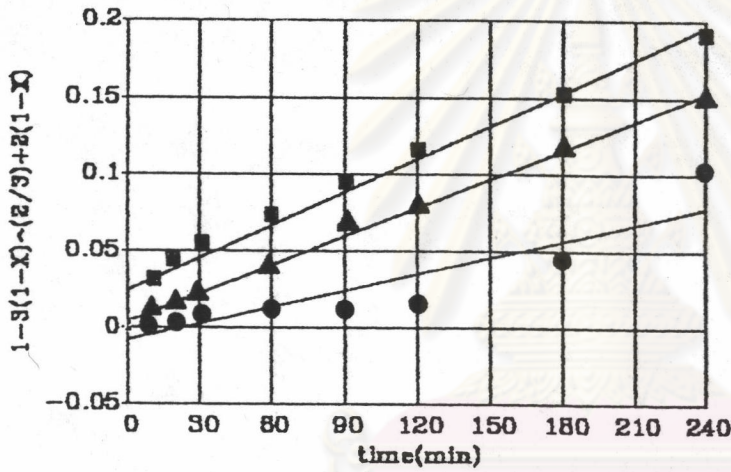
$$De = De_0 e^{(-E/RT)} \quad (4.11)$$

จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $-E/R$  แสดงในตารางที่ 4.15 ซึ่งค่านี้นำไปหาค่าพลังงานกระตุ้น

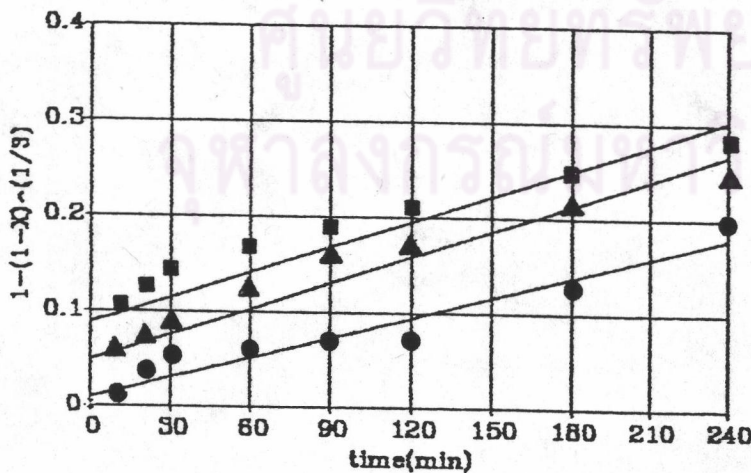
รูปที่ 4.30 และ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln De$  กับ  $1/T$  ในปฏิกิริยาการซัดกัมมะถันไฟโรต์ในถ่านหินแม่เมาะด้วยสารละลายเฟอริกคลอไรด์และสารละลายเฟอริกซัลเฟต ตามลำดับ



Diffusion through film control		
0.5 mol/l	R-Square	0.9346
●	Std. Err. of Prediction	0.0409
	Correlation Coefficient	0.9667
0.8 mol/l	R-Square	0.8604
▲	Std. Err. of Prediction	0.0728
	Correlation Coefficient	0.9276
1.0 mol/l	R-Square	0.7058
■	Std. Err. of Prediction	0.1074
	Correlation Coefficient	0.8401

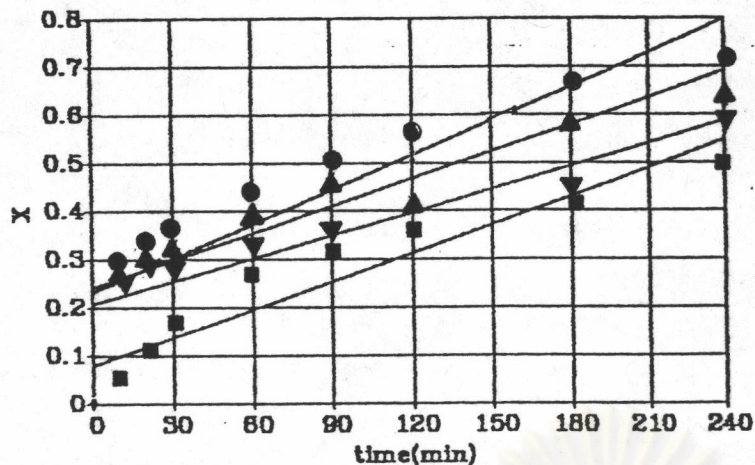


Diffusion through product layer control		
0.5 mol/l	R-Square	0.8314
●	Std. Err. of Prediction	0.0144
	Correlation Coefficient	0.9118
0.8 mol/l	R-Square	0.9947
▲	Std. Err. of Prediction	0.0040
	Correlation Coefficient	0.9973
1.0 mol/l	R-Square	0.9713
■	Std. Err. of Prediction	0.0103
	Correlation Coefficient	0.9858

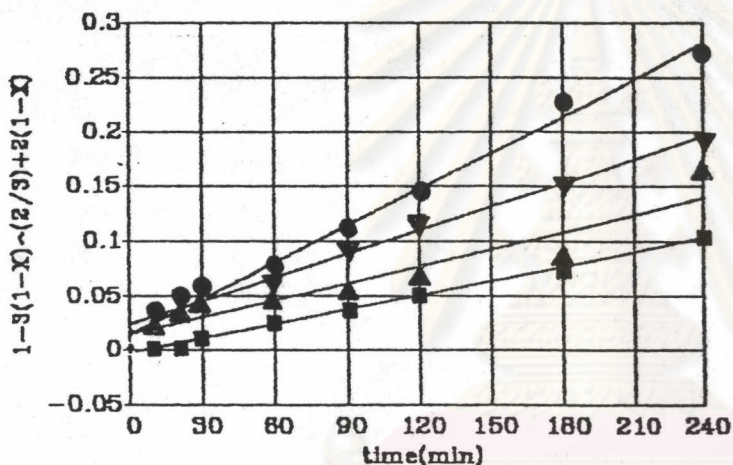


Chemical reaction control		
0.5 mol/l	R-Square	0.9337
●	Std. Err. of Prediction	0.0168
	Correlation Coefficient	0.9663
0.8 mol/l	R-Square	0.9125
▲	Std. Err. of Prediction	0.0243
	Correlation Coefficient	0.9552
1.0 mol/l	R-Square	0.8022
■	Std. Err. of Prediction	0.0393
	Correlation Coefficient	0.8957

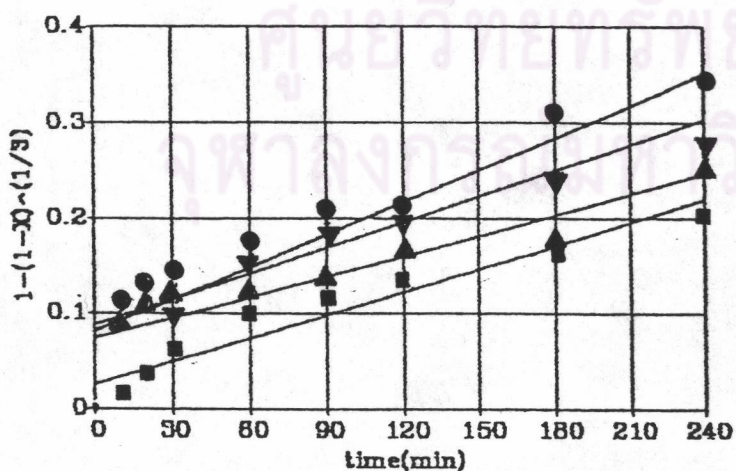
รูปที่ 4-24 กราฟแสดงการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาไฮโดรอกซิดของถ่านหินแม่เมาะ ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 0.5, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 90 °C ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร



Diffusion through film control		
50 °C	R-Square	0.8972
■	Std. Err. of Prediction	0.0586
	Correlation Coefficient	0.9472
70 °C	R-Square	0.6875
▲	Std. Err. of Prediction	0.0942
	Correlation Coefficient	0.8291
90 °C	R-Square	0.7058
▼	Std. Err. of Prediction	0.1074
	Correlation Coefficient	0.8401
120 °C	R-Square	0.8009
●	Std. Err. of Prediction	0.1042
	Correlation Coefficient	0.8949



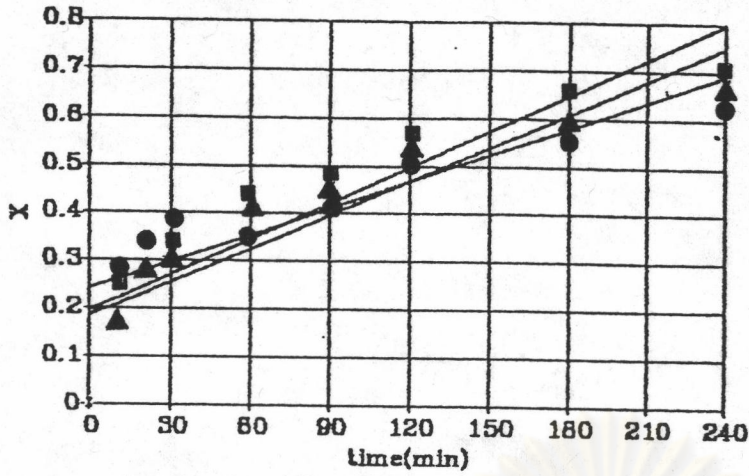
Diffusion through product layer control		
50 °C	R-Square	0.9973
■	Std. Err. of Prediction	0.0020
	Correlation Coefficient	0.9987
70 °C	R-Square	0.8672
▲	Std. Err. of Prediction	0.0180
	Correlation Coefficient	0.9312
90 °C	R-Square	0.9718
▼	Std. Err. of Prediction	0.0108
	Correlation Coefficient	0.9858
120 °C	R-Square	0.9921
●	Std. Err. of Prediction	0.0088
	Correlation Coefficient	0.9961



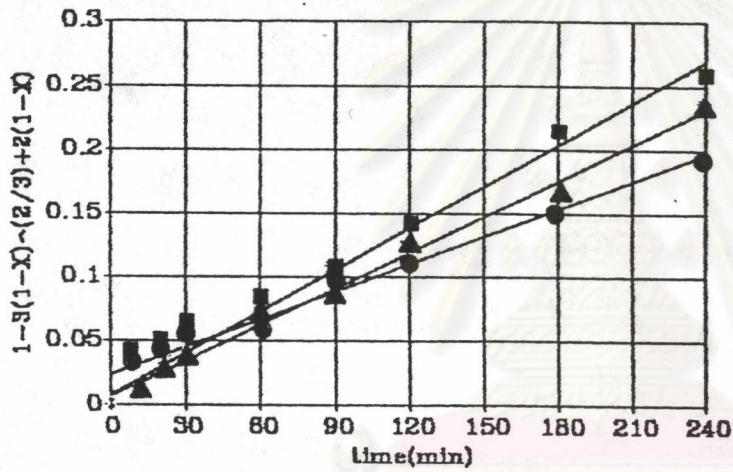
Chemical reaction control		
50 °C	R-Square	0.9312
■	Std. Err. of Prediction	0.0195
	Correlation Coefficient	0.9650
70 °C	R-Square	0.7610
▲	Std. Err. of Prediction	0.0356
	Correlation Coefficient	0.8704
90 °C	R-Square	0.8022
▼	Std. Err. of Prediction	0.0393
	Correlation Coefficient	0.8956
120 °C	R-Square	0.8713
●	Std. Err. of Prediction	0.0407
	Correlation Coefficient	0.9335

รูปที่ 4.25 กราฟแสดงการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาไฟไรต์ของถ่านหินแม่เมาะ ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 1.0 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 50,70,90 และ 120 °C ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร

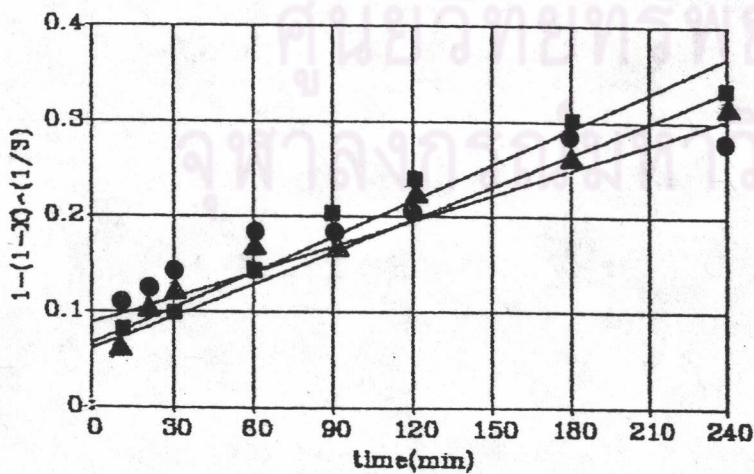




Diffusion through film control		
500-750 um.	R-Square	0.7058
●	Std. Err. of Prediction	0.1074
	Correlation Coefficient	0.8401
250 um.	R-Square	0.8313
▲	Std. Err. of Prediction	0.0940
	Correlation Coefficient	0.9118
150 um.	R-Square	0.8257
■	Std. Err. of Prediction	0.1020
	Correlation Coefficient	0.9087

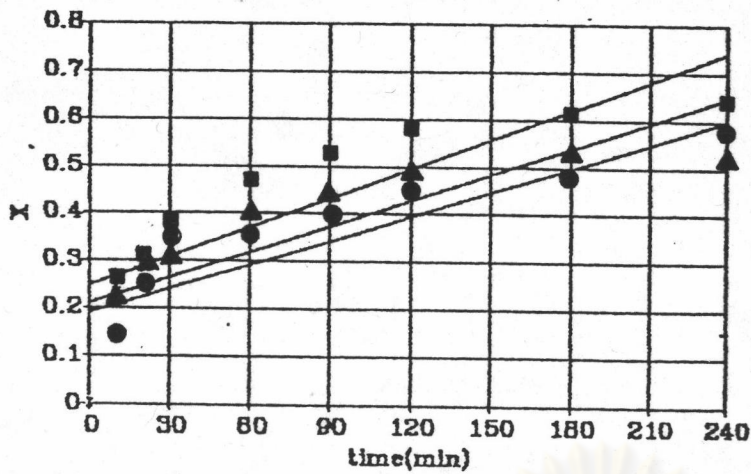


Diffusion through product layer control		
500-750 um.	R-Square	0.9718
●	Std. Err. of Prediction	0.0108
	Correlation Coefficient	0.9858
250 um.	R-Square	0.9928
▲	Std. Err. of Prediction	0.0071
	Correlation Coefficient	0.9964
150 um.	R-Square	0.9924
■	Std. Err. of Prediction	0.0085
	Correlation Coefficient	0.9962

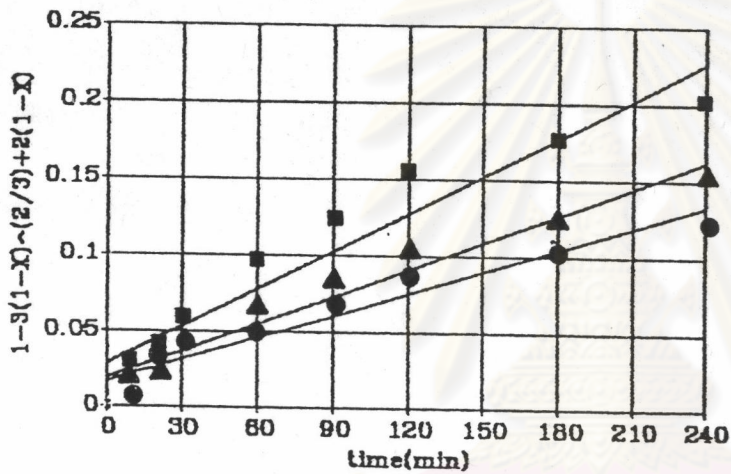


Chemical reaction control		
500-750 um.	R-Square	0.8022
●	Std. Err. of Prediction	0.0393
	Correlation Coefficient	0.8956
250 um.	R-Square	0.9101
▲	Std. Err. of Prediction	0.0316
	Correlation Coefficient	0.9540
150 um.	R-Square	0.9061
■	Std. Err. of Prediction	0.0357
	Correlation Coefficient	0.9520

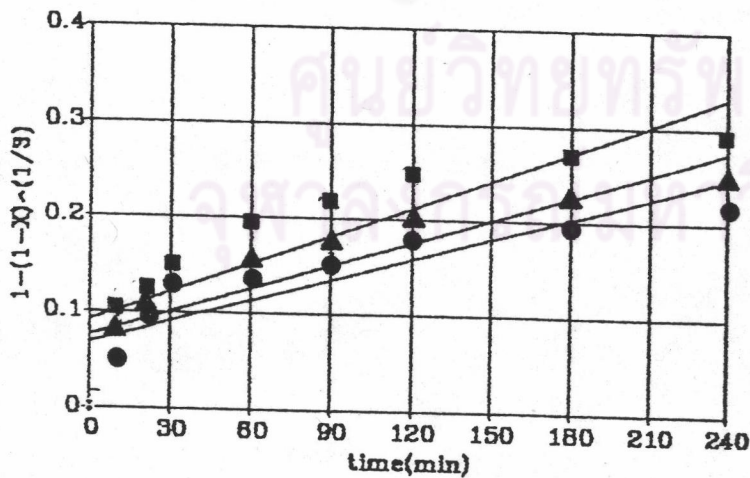
รูปที่ 4-26 กราฟแสดงการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาไฟไรต์ของถ่านหินแม่เมาะ ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 1.0 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 90 °C ขนาดถ่านหิน 150, 250 และ 500-750 ไมโครเมตร



Diffusion through film control		
0.5 mol/l	R-Square	0.6948
●	Std. Err. of Prediction	0.0999
	Correlation Coefficient	0.8335
0.8 mol/l	R-Square	0.7189
▲	Std. Err. of Prediction	0.1007
	Correlation Coefficient	0.8479
1.0 mol/l	R-Square	0.6934
■	Std. Err. of Prediction	0.1213
	Correlation Coefficient	0.8327

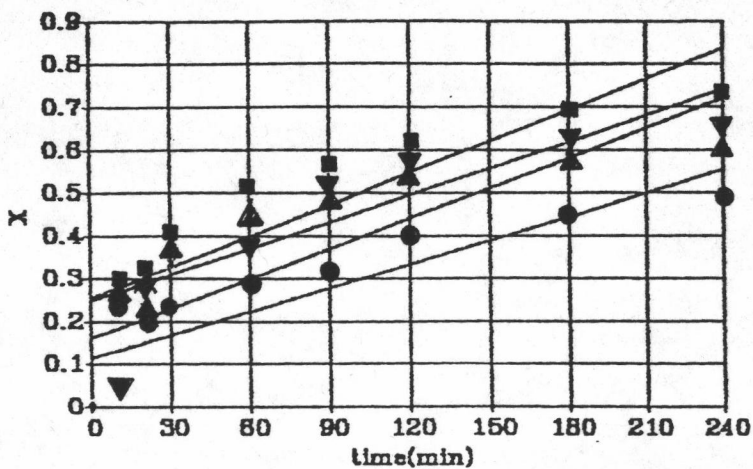


Diffusion through product layer control		
0.5 mol/l	R-Square	0.9284
●	Std. Err. of Prediction	0.0119
	Correlation Coefficient	0.9636
0.8 mol/l	R-Square	0.9519
▲	Std. Err. of Prediction	0.0119
	Correlation Coefficient	0.9757
1.0 mol/l	R-Square	0.9241
■	Std. Err. of Prediction	0.0210
	Correlation Coefficient	0.9613

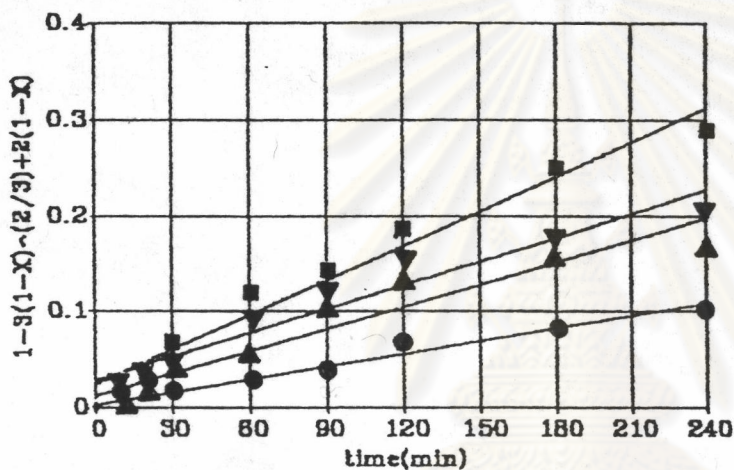


Chemical reaction control		
0.5 mol/l	R-Square	0.7582
●	Std. Err. of Prediction	0.0372
	Correlation Coefficient	0.8707
0.8 mol/l	R-Square	0.7939
▲	Std. Err. of Prediction	0.0373
	Correlation Coefficient	0.8910
1.0 mol/l	R-Square	0.7795
■	Std. Err. of Prediction	0.0470
	Correlation Coefficient	0.8829

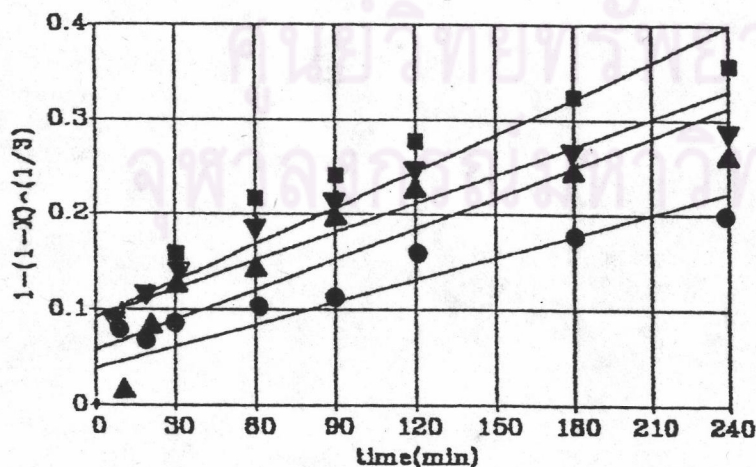
รูปที่ 4-27 กราฟแสดงการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาไนโตรเจนของถ่านหินแม่เมาะ ความเข้มข้นสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต 0.5, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 90 °C ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร



Diffusion through film control		
50 °C	R-Square	0.8169
●	Std. Err. of Prediction	0.0772
	Correlation Coefficient	0.9038
70 °C	R-Square	0.7430
▲	Std. Err. of Prediction	0.1217
	Correlation Coefficient	0.8620
90 °C	R-Square	0.6934
▼	Std. Err. of Prediction	0.1213
	Correlation Coefficient	0.8327
120 °C	R-Square	0.7518
■	Std. Err. of Prediction	0.1241
	Correlation Coefficient	0.8671

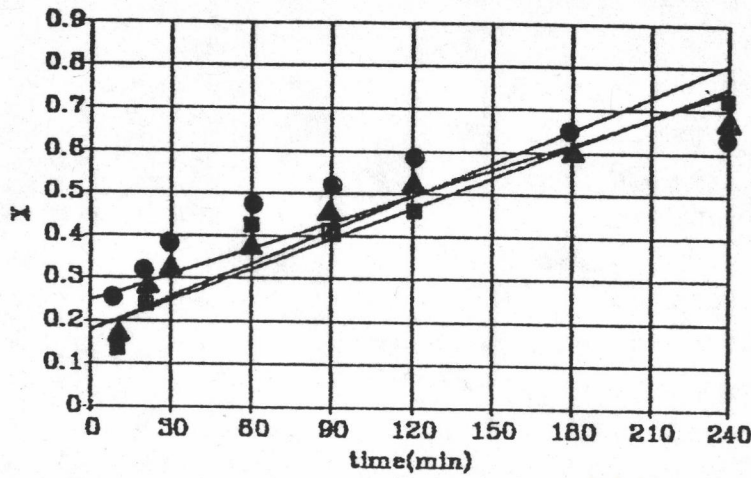


Diffusion through product layer control		
50 °C	R-Square	0.9749
●	Std. Err. of Prediction	0.0063
	Correlation Coefficient	0.9874
70 °C	R-Square	0.9152
▲	Std. Err. of Prediction	0.0208
	Correlation Coefficient	0.9567
90 °C	R-Square	0.9241
▼	Std. Err. of Prediction	0.0210
	Correlation Coefficient	0.9613
120 °C	R-Square	0.9719
■	Std. Err. of Prediction	0.0181
	Correlation Coefficient	0.9958

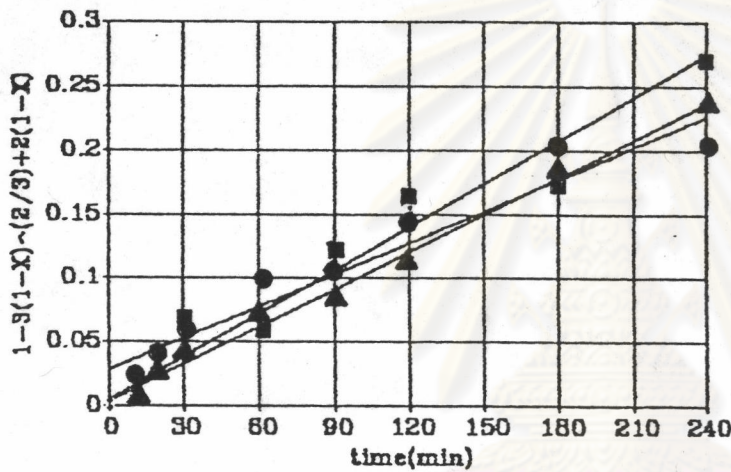


Chemical reaction control		
50 °C	R-Square	0.8632
●	Std. Err. of Prediction	0.0272
	Correlation Coefficient	0.9291
70 °C	R-Square	0.8018
▲	Std. Err. of Prediction	0.0469
	Correlation Coefficient	0.8954
90 °C	R-Square	0.7795
▼	Std. Err. of Prediction	0.0470
	Correlation Coefficient	0.8829
120 °C	R-Square	0.9551
■	Std. Err. of Prediction	0.0465
	Correlation Coefficient	0.9247

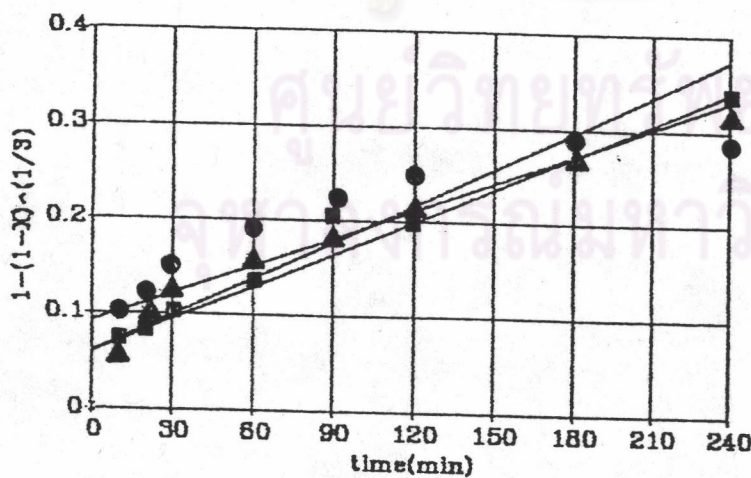
รูปที่ 4-28 การแสดงผลการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาไนโรตของถ่านหินแม่เมาะ ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 50,70,90 และ 120 °C ขนาดถ่านหิน 500-750 ไมโครเมตร



Diffusion through film control		
500-750 um.	R-Square	0.6934
●	Std. Err. of Prediction	0.1213
	Correlation Coefficient	0.8327
250 um.	R-Square	0.8473
▲	Std. Err. of Prediction	0.0905
	Correlation Coefficient	0.9205
150 um.	R-Square	0.8368
■	Std. Err. of Prediction	0.1029
	Correlation Coefficient	0.9148

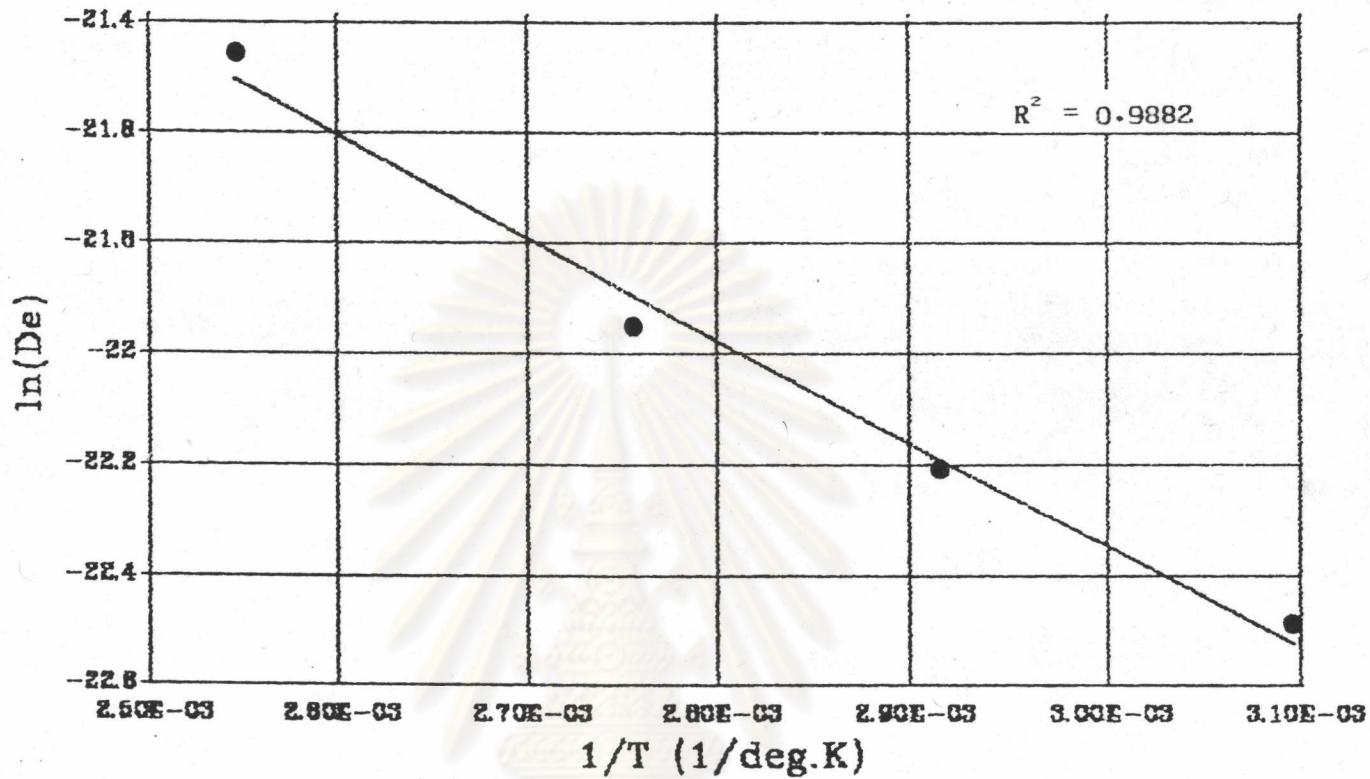


Diffusion through product layer control		
500-750 um.	R-Square	0.9241
●	Std. Err. of Prediction	0.0210
	Correlation Coefficient	0.9613
250 um.	R-Square	0.9948
▲	Std. Err. of Prediction	0.0062
	Correlation Coefficient	0.9974
150 um.	R-Square	0.9878
■	Std. Err. of Prediction	0.0111
	Correlation Coefficient	0.9939



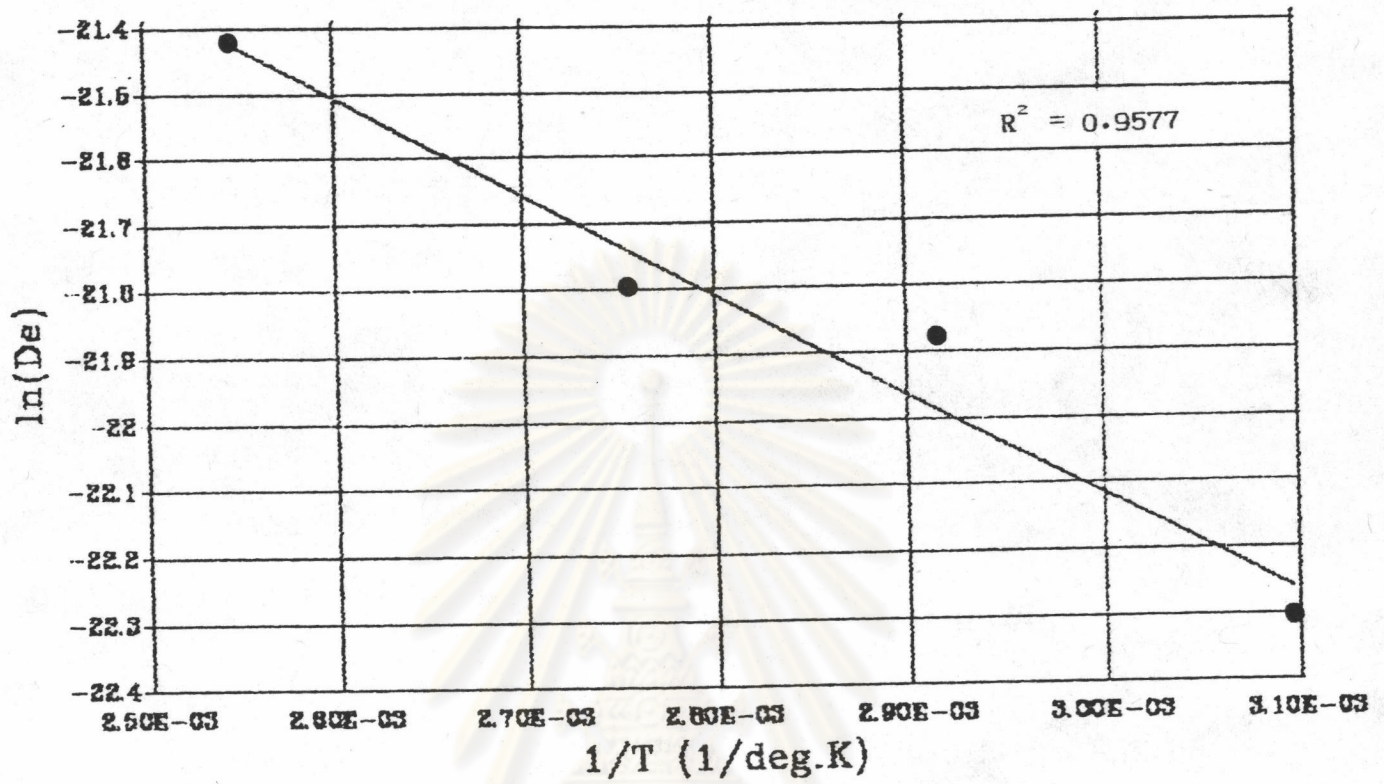
Chemical reaction control		
500-750 um.	R-Square	0.7795
●	Std. Err. of Prediction	0.0470
	Correlation Coefficient	0.8829
250 um.	R-Square	0.9202
▲	Std. Err. of Prediction	0.0305
	Correlation Coefficient	0.9593
150 um.	R-Square	0.9105
■	Std. Err. of Prediction	0.0363
	Correlation Coefficient	0.9542

รูปที่ 4.29 กราฟแสดงการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาไฟโรตของถ่านหินแม่เมาะ ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 90 °C ขนาดถ่านหิน 150, 250 และ 500-750 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.30 กราฟระหว่าง  $\ln(D_e)$  กับ  $1/T$  ตามแบบ Arrhenius Plot ของปฏิกิริยาการซัดไนไรต์ใน ถ่านหินแม่เมาะ ด้วยสารละลายเฟอริกคลอไรด์ ที่อุณหภูมิ 50, 70, 90 และ 120 °C โดยอาศัย unreacted shrinking core model

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.31 กราฟระหว่าง  $\ln(D_e)$  กับ  $1/T$  ตามแบบ Arrhenius Plot ของปฏิกิริยาการจัดไฟไรต์ใน ถ่านหินแม่เมาะ ด้วยสารละลายเฟอริกซัลเฟต ที่อุณหภูมิ 50, 70, 90 และ 120 °C โดยอาศัย unreacted shrinking core model

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.14 ค่าการแพร่ประสิทธิผล(De) ของถ่านหิน

สารละลายที่ใช้	ขนาดถ่านหิน (ไมโครเมตร)	อุณหภูมิ (°C)	$1/ \times 10^4$ (วินาที) <sup>-1</sup>	$\times 10^3$ (วินาที)	Dex10 <sup>10</sup> (ม <sup>2</sup> /วินาที)
สารละลายเฟอริก คลอไรด์ 1.0 โมล ต่อลิตร	500-750	50	4.167	2.400	1.703
		70	5.556	1.800	2.271
		90	7.167	1.395	2.930
		120	11.670	0.857	4.769
สารละลายเฟอริก ซัลเฟต 1.0 โมล ต่อลิตร	500-750	50	5.000	2.000	2.044
		70	7.667	1.304	3.134
		90	8.333	1.200	3.407
		120	12.220	0.818	4.996

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของค่าการแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิของถ่านหินแม่เมาะตาม Arrhenius law ( $De = De_0 e^{-E/RT}$ )

สารละลายที่ใช้	$De_0$	$-E/R$	$De = De_0 e^{-E/RT}$
สารละลายเฟอริก คลอไรด์ 1.0 ต่อลิตร	$5.0 \times 10^{-8}$	-1851.86	$De = 5.1 \times 10^{-8} \exp(-15.40 \times 10^6 / RT)$
สารละลายเฟอริก ซัลเฟต 1.0 โมล ต่อลิตร	$2.4 \times 10^{-8}$	-1530.54	$De = 2.4 \times 10^{-8} \exp(-12.45 \times 10^6 / RT)$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย