

ผลการทดลอง การวิเคราะห์และวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการขจัดกำมะถันจากถ่านหินโดยอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชัน แบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาสภาวะของปฏิกิริยาโดยพิจารณาความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต อุณหภูมิ ขนาดของถ่านหิน และถ่านหินที่มีองค์ประกอบต่างกัน ส่วนที่สองเป็นการศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาเคมีของไพไรต์และขั้นตอนที่เป็นตัวควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต

การศึกษาองค์ประกอบกำมะถันในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ ตารางที่ 4.1 แสดงถึงผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) เพื่อหาปริมาณธาตุในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ จากผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวอย่างถ่านหินจากเหมืองแม่เมาะทั้งสี่ตัวอย่างมีปริมาณกำมะถันรวมสูง คือ ร้อยละ 6-12 งานวิจัยนี้จึงเลือกตัวอย่างถ่านหินทั้งสามจากเหมืองแม่เมาะมาศึกษาการขจัดกำมะถัน เนื่องจากค่ากำมะถันที่สูงจะทำให้เห็นข้อแตกต่างก่อนและหลังปฏิกิริยาได้ชัดเจน

4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันจากถ่านหินโดยใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต

ในการทดลองนี้ใช้ถ่านหินเหมืองแม่เมาะทำปฏิกิริยากับสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ คือ ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต อุณหภูมิ ขนาดของถ่านหิน องค์ประกอบของถ่านหินที่ต่างกัน และวิเคราะห์สมบัติของถ่านหินก่อนและหลังปฏิกิริยา

4.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต

ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติของถ่านหินเหมืองแม่เมาะก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันโดยแปรค่าความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10 และ 20 % น้ำหนักต่อปริมาตร ถ่านหินที่ใช้มีขนาด 150-250 ไมครอน จำนวน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 120°, 140° และ 150° ซ ระยะเวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบ/นาที ถ่านหินเริ่มต้นมีความชื้นร้อยละ 13.52

รูปที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 แสดงผลของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตต่อการลดปริมาณกำมะถันรวมและกำมะถันไพไรต์ เมื่อค่าความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 10% ที่อุณหภูมิ 120, 140, และ 150° ซ ตามลำดับ กำมะถันรวมลดลงจากร้อยละ 9.76 เป็น 6.55 6.35 และ 6.22 ซึ่งคิดเป็นร้อยละการลดกำมะถันรวม 32.89, 34.94 และ 36.27 ตามลำดับ ส่วนกำมะถันไพไรต์ลดลงจากร้อยละ 1.95 เป็น 1.34, 1.04 และ

0.53 คิดเป็นร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์ 31.28, 46.67 และ 72.82 ตามลำดับ

รูปที่ 4.5, 4.6, 4.7 และ 4.8 แสดงผลของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตต่อการลดปริมาณกำมะถันรวมและกำมะถันไพไรต์ เมื่อค่าความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 20% ที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 150 °ซ ตามลำดับ พบว่ากำมะถันรวมลดลงจากร้อยละ 9.76 เป็น 5.40, 4.89 และ 4.70 คิดเป็นร้อยละการลดกำมะถันรวม 44.67, 49.90 และ 51.84 ตามลำดับ กำมะถันไพไรต์ลดลงจากร้อยละ 1.95 เป็น 1.17, 0.66 และ 0.30 ซึ่งคิดเป็นร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์ 40.00 66.15 และ 84.62 ตามลำดับ

เมื่อใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 10% ที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 150 °ซ แก่ลดลงจากเดิมร้อยละ 31.87 เป็น 24.65 21.83 และ 20.84 ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละการลดเก่า 22.65 31.50 และ 34.61 ตามลำดับ แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 20% ลดเก่าลงได้จากร้อยละ 31.87 เป็น 24.24 21.45 และ 20.29 ซึ่งคิดเป็นร้อยละการลด 23.94 32.70 และ 36.34 ตามลำดับ

รูปที่ 4.9, 4.10, 4.11 ก, 4.11 ข, 4.12 ก และ 4.12 ข แสดงการเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10 และ 20% ที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 150 °ซ ที่มีต่อการลดปริมาณกำมะถันรวมและกำมะถันไพไรต์ ถ้าใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10% ช่วงอุณหภูมิ 120-150 °ซ จะได้ร้อยละการลดกำมะถันรวม 32.89-36.27 ร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์ 31.28-72.82 เมื่อใช้ความเข้มข้นสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ช่วงอุณหภูมิ 120-150 °ซ ได้ร้อยละการลดกำมะถันรวม 32.89-51.84 ส่วนร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์ 40.00-84.62

การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตจาก 10% เป็น 20% สามารถลดปริมาณกำมะถันรวมและกำมะถันไพไรต์ได้มากขึ้น ๑ ให้ผลการลดปริมาณเก่าๆใกล้เคียงกัน ดังนั้นการใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 20% เป็นค่าที่เหมาะสมกว่าในการขจัดกำมะถันจากถ่านหิน เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเพิ่มขึ้น ทำให้ในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต มีปริมาณคอปเปอร์ (II) อีออนมากขึ้น คอปเปอร์ (II) อีออนนี้ทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ จะไปออกซิไดซ์กำมะถันไพไรต์ในถ่านหินให้เปลี่ยนไปเป็นกรดซัลฟูริกได้มากขึ้น (13) ทำให้ปริมาณกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินลดลง



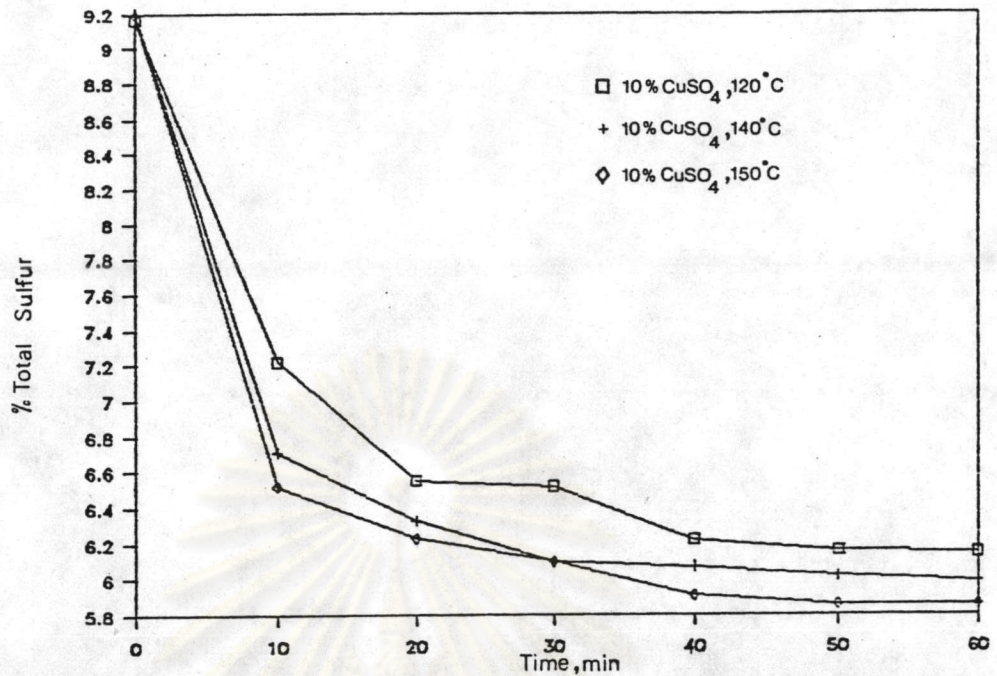
ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติของถ่านหินตัวอย่างต่าง ๆ (แบบไม่รวมความชื้น)

รายการที่ทำการวิเคราะห์ (%)	แม่เมาะ 1	แม่เมาะ 2	แม่เมาะ 3	แม่เมาะ 4
การวิเคราะห์แบบประมาณ				
สารระเหย	38.26	36.76	32.42	33.76
คาร์บอนคงตัว	17.05	20.19	8.25	20.04
เถ้า	31.87	30.85	47.64	35.35
ความชื้น	12.82	12.20	11.69	10.85
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ				
คาร์บอน	32.36	30.47	22.56	-
ไฮโดรเจน	2.82	2.74	2.44	-
กำมะถัน	9.76	6.97	12.21	5.44
ไนโตรเจน	0.48	0.70	0.34	-
เถ้า	31.87	30.85	47.64	35.35
ออกซิเจน	22.71	28.27	14.81	-
รูปแบบของกำมะถัน (แบบไม่รวมความชื้น)				
กำมะถันไฟไรต์	1.95	1.05	6.53	1.54
กำมะถันซัลเฟต	5.24	3.89	4.91	3.80
กำมะถันอินทรีย์	2.57	2.03	0.77	0.10
ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม) (แบบไม่รวมความชื้น)	-	-	3256	3432

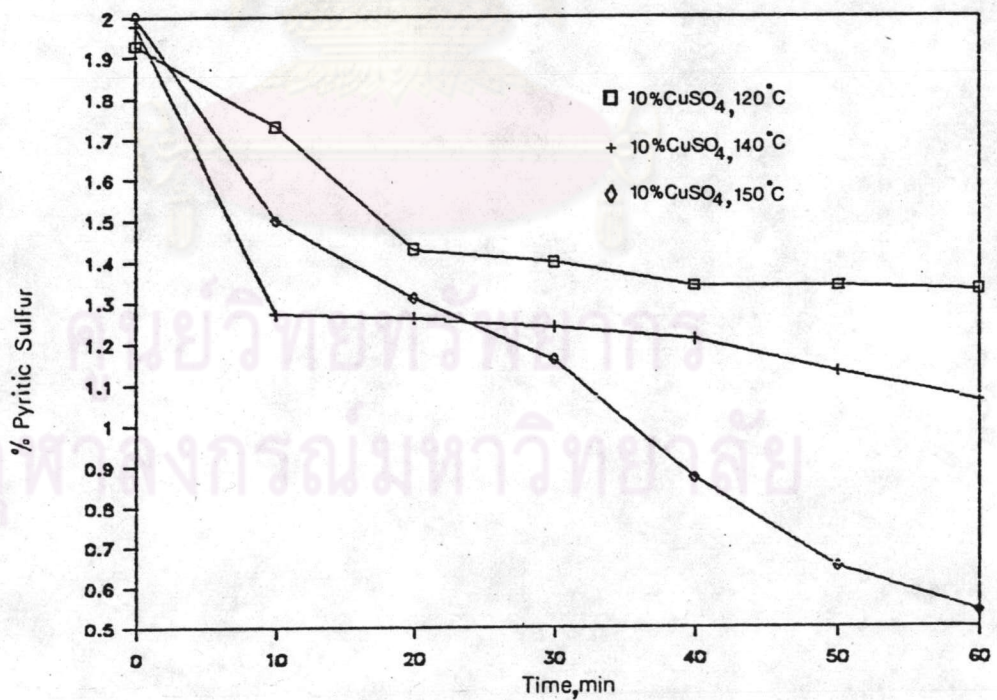
ตารางที่ 4.2 สมบัติของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ ตัวอย่างที่ 1 (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่มีความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10 และ 20% น้ำหนักต่อปริมาตร (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. อุณหภูมิ 120, 140 และ 150 °C เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที

อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น CuSO ₄ %	ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม)	เถ้า (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			ร้อยละการลดกำมะถัน			ร้อยละ การลด เถ้า	ร้อยละ การเพิ่มค่า ความร้อน
				ซัลเฟต	ไฟไรต์	รวม	ซัลเฟต	ไฟไรต์	รวม		
เริ่มต้น	-	-	31.87	5.24	1.95	9.76	-	-	-	-	-
120	10	3970	24.65	0.35	1.34	6.55	93.32	31.28	32.89	22.65	-
	20	4080	24.24	0.14	1.17	5.40	97.33	40.00	44.67	23.94	-
140	10	4151	21.83	0.15	1.04	6.35	96.95	46.67	34.94	31.50	-
	20	4204	21.45	0.14	0.66	4.89	97.33	66.15	49.90	32.70	-
150	10	3910	20.84	0.10	0.53	6.22	98.09	72.82	36.27	34.61	-
	20	3936	20.29	0.14	0.30	4.70	97.33	84.62	51.84	36.34	-

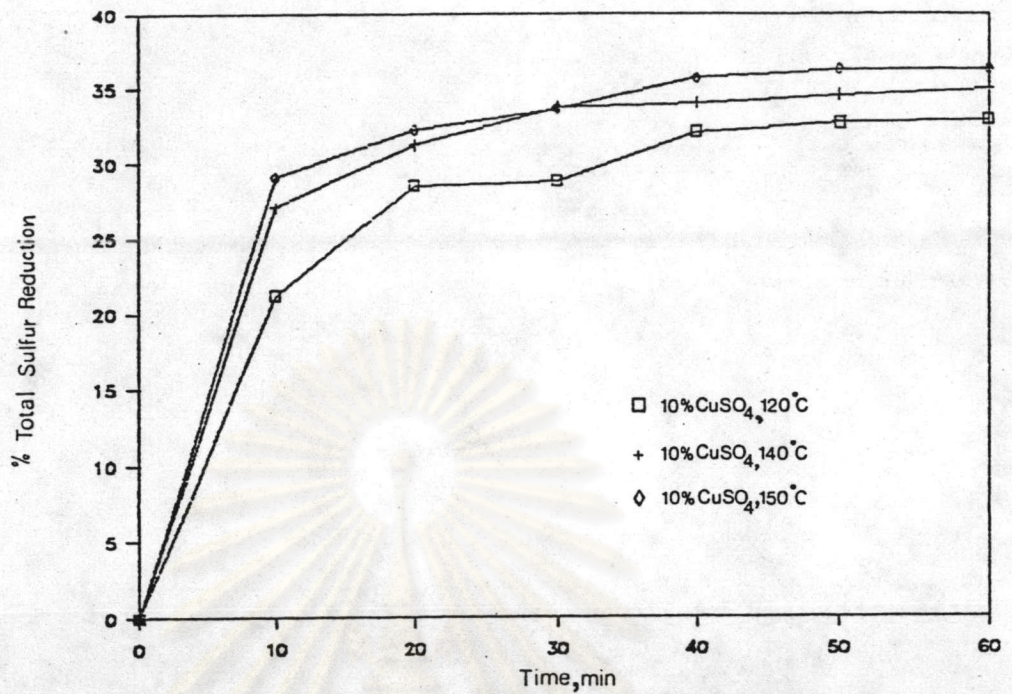
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



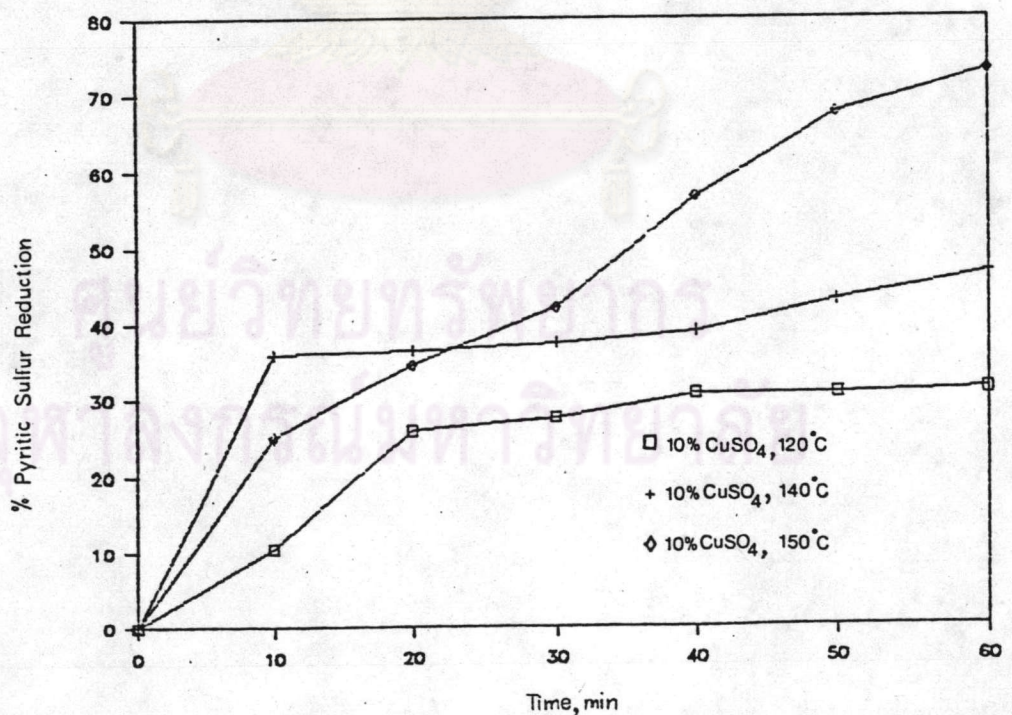
รูปที่ 4.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อค่าความเข้มข้นกำมะถันรวมในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



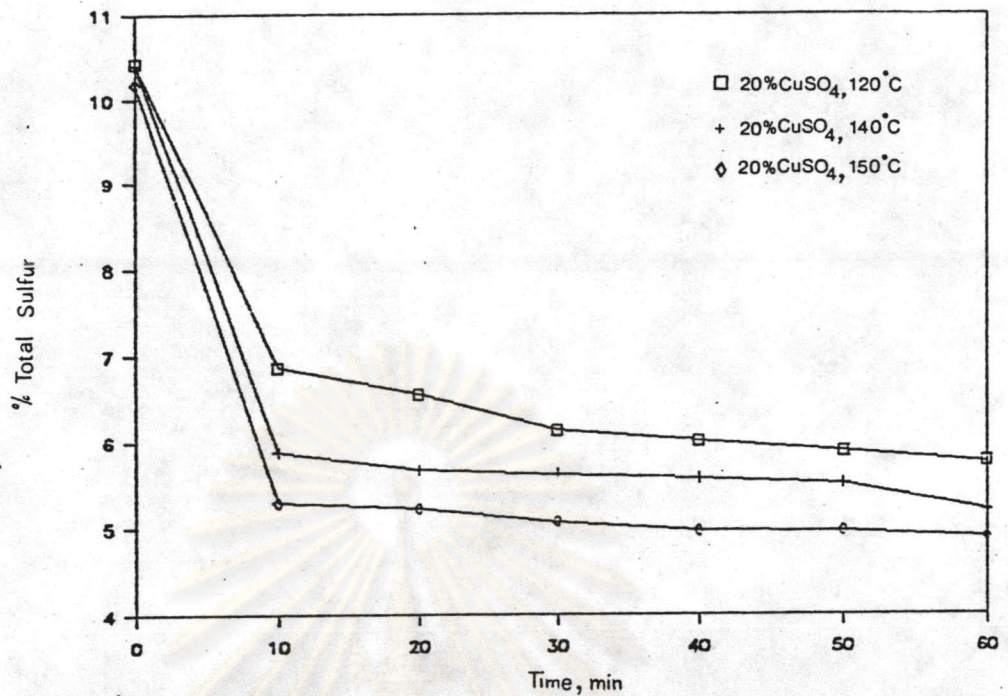
รูปที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อค่าความเข้มข้นไพไรต์ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



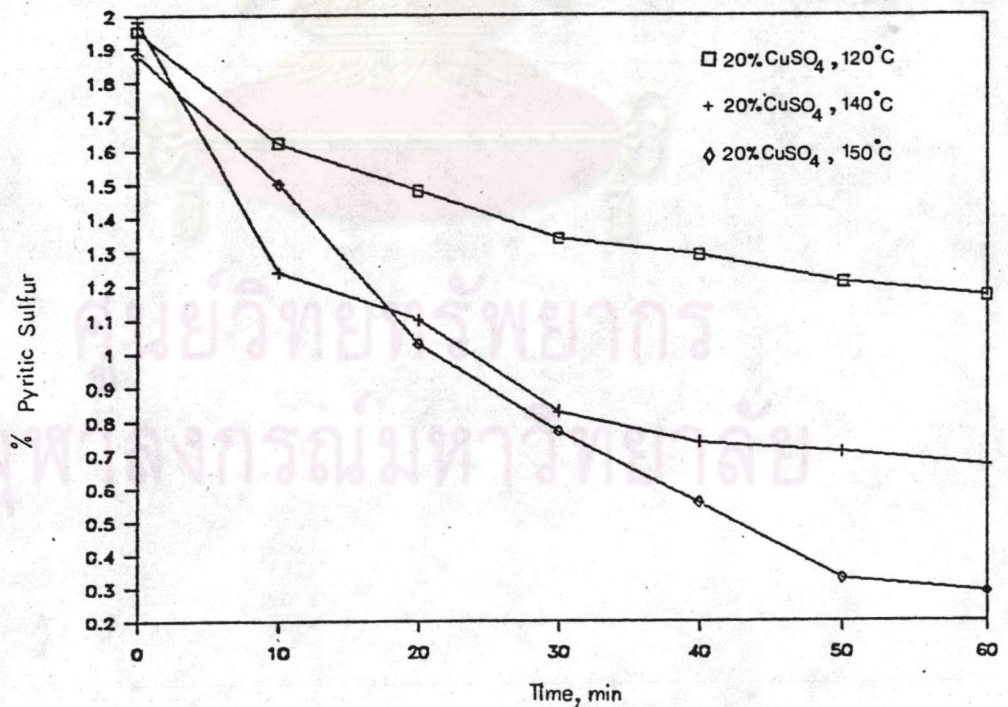
รูปที่ 4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



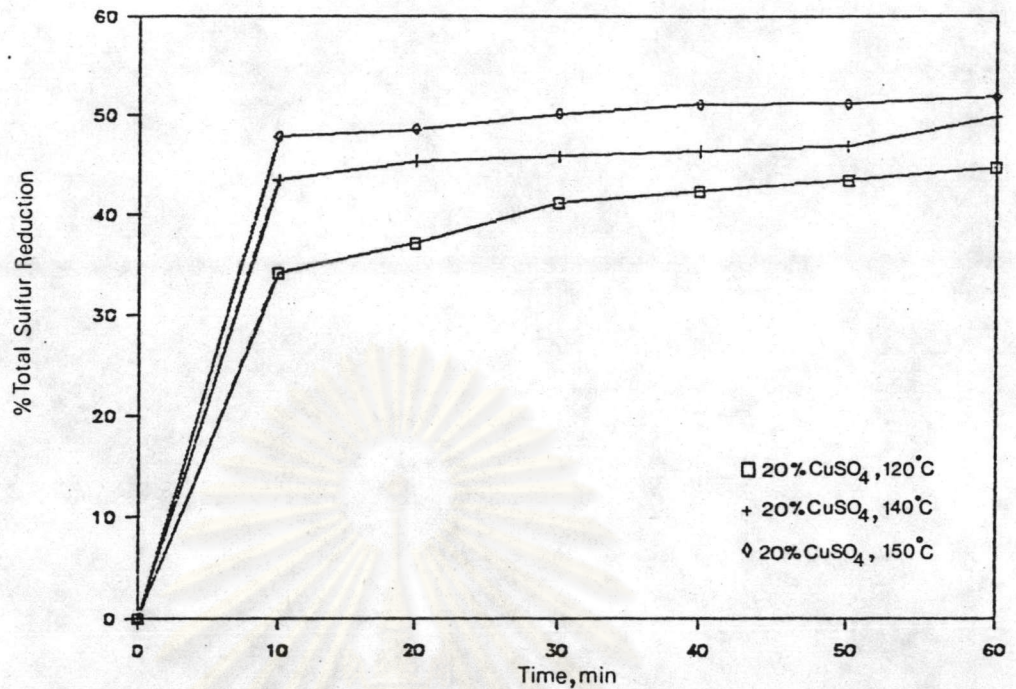
รูปที่ 4.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อการลดกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



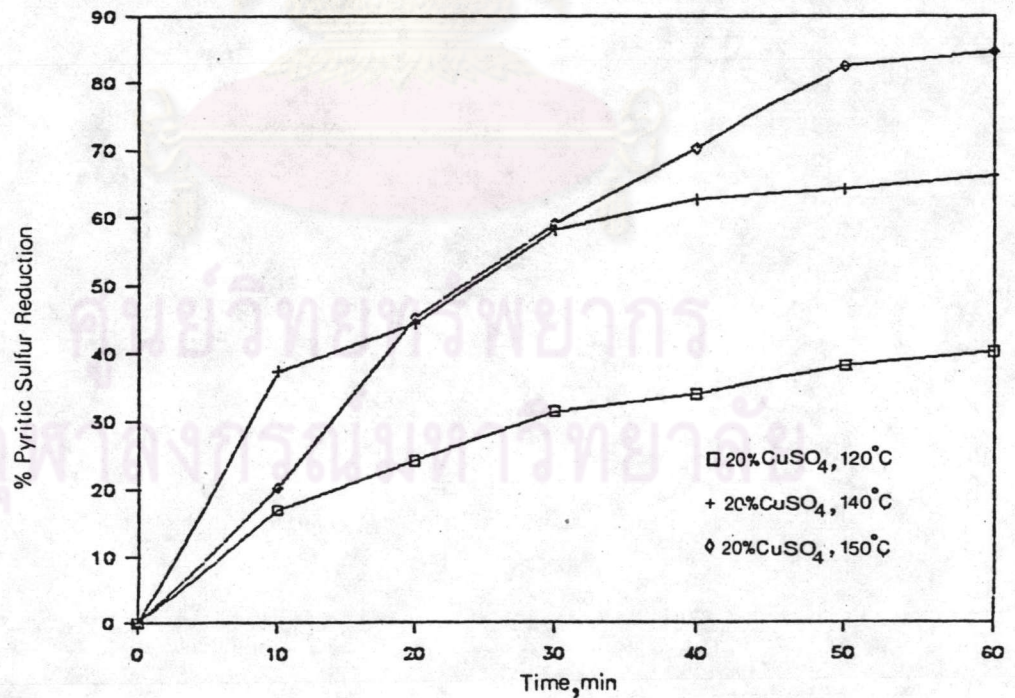
รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อค่าเมกันรวมในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



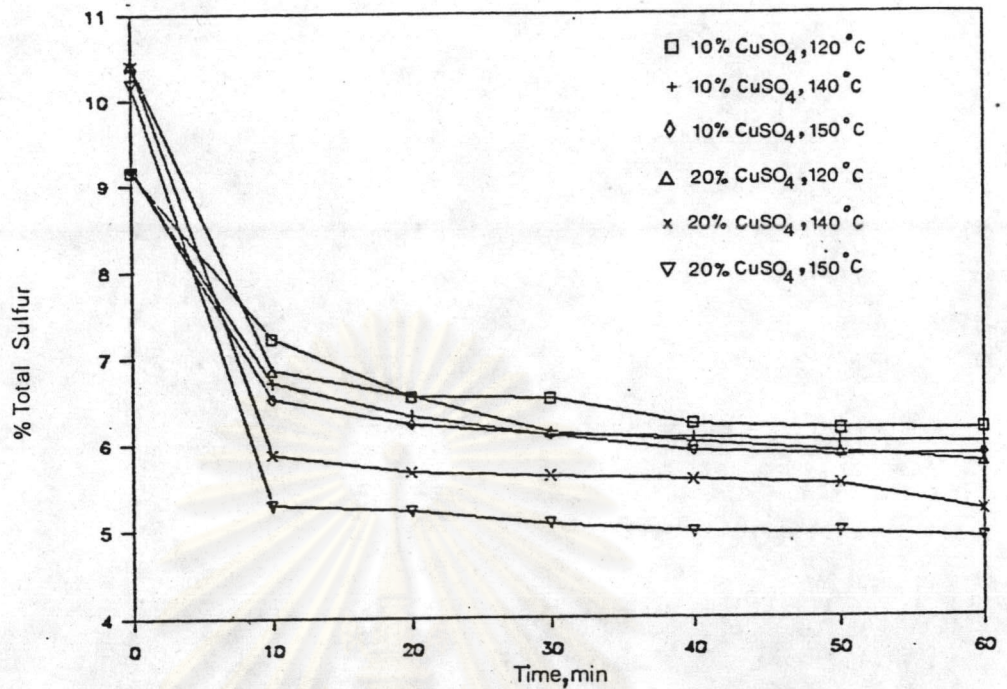
รูปที่ 4.6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อค่าเมกันไพไรต์ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



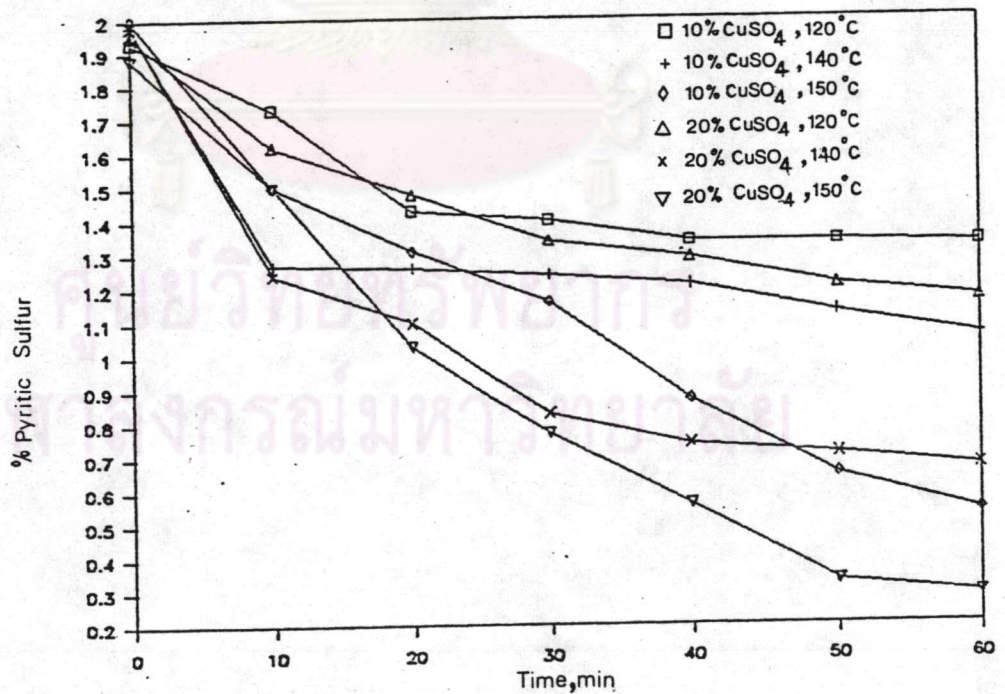
รูปที่ 4.7 ผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในถ่านหินเหมือนแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



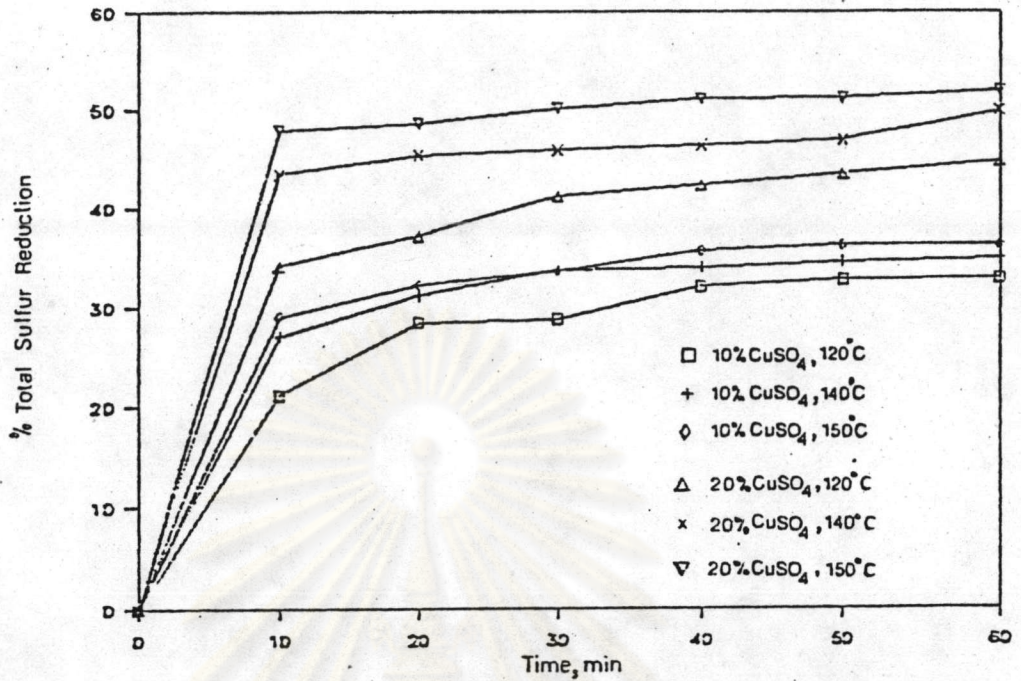
รูปที่ 4.8 ผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อการลดกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินเหมือนแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



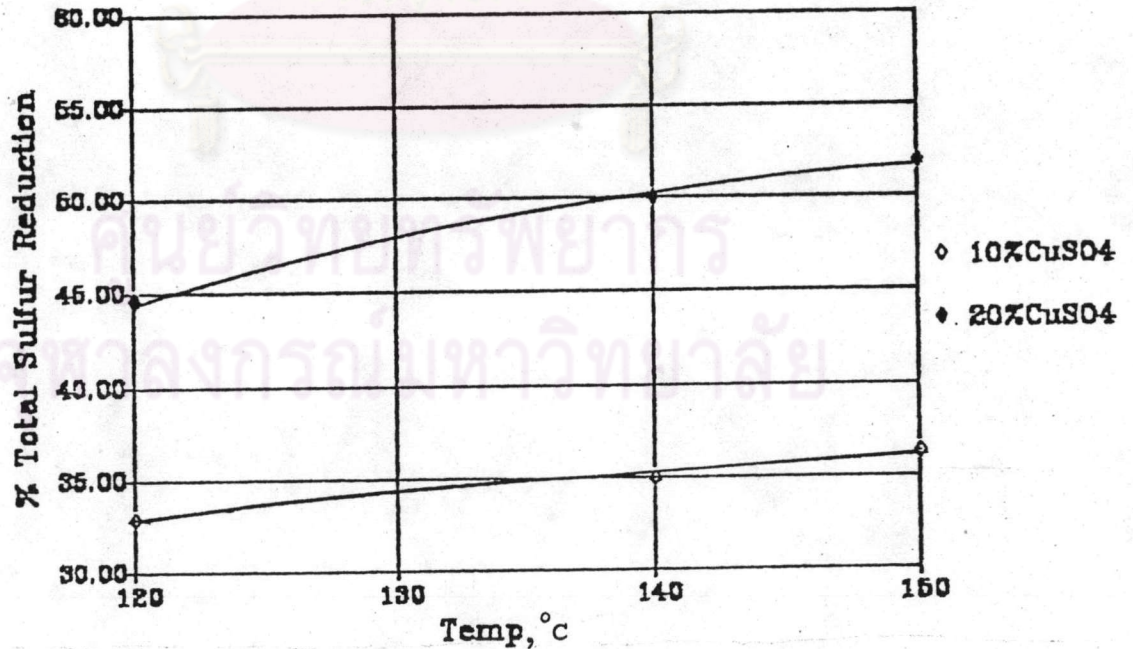
รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10 และ 20% ที่มีต่อค่ามอดูลารามานถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °ซ อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



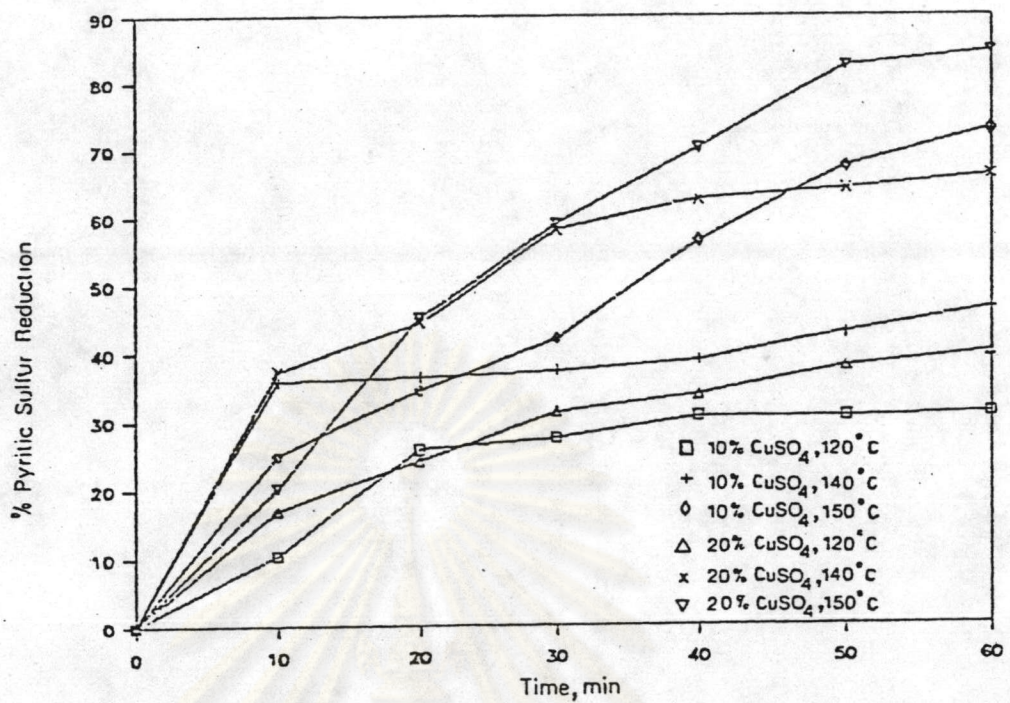
รูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10 และ 20% ที่มีต่อค่ามอดูลารามานถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °ซ อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



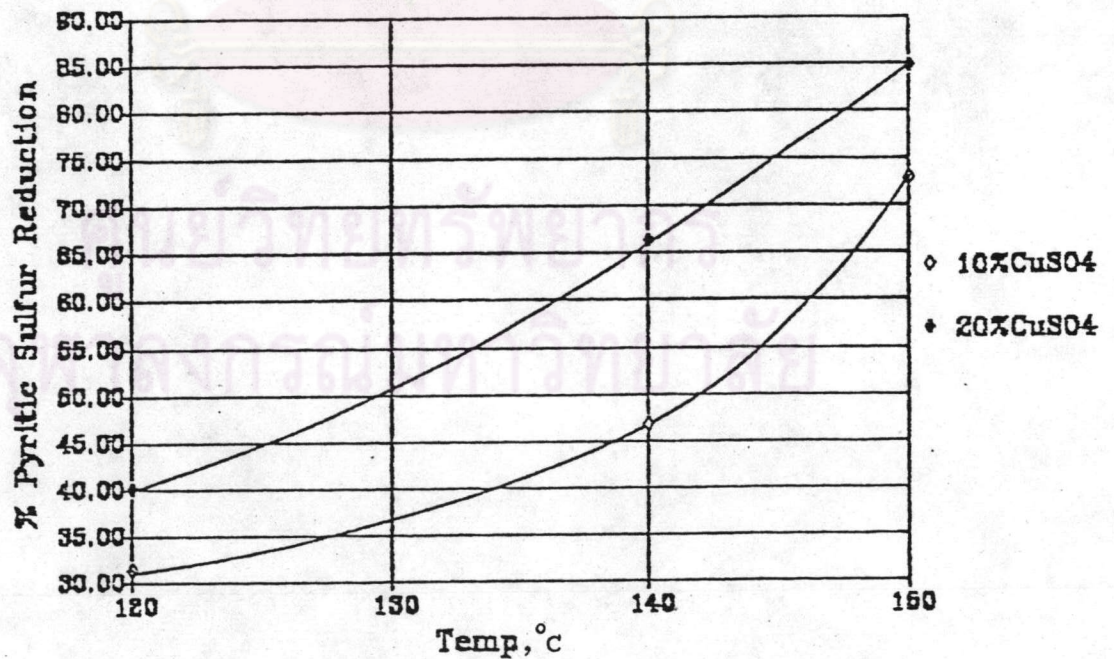
รูปที่ 4.11ก แสดงการเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10 และ 20% ที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในกำหนหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดกำหนหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณกำหนหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °ซ อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



รูปที่ 4.11ข แสดงการเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10 และ 20% ที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในกำหนหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดกำหนหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณกำหนหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °ซ อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



รูปที่ 4.12ก แสดงการเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10 และ 20% ที่มีต่อการลดกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °C อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



รูปที่ 4.12ข แสดงการเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10 และ 20% ที่มีต่อการลดกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °C อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)

4.1.2 ผลของอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ ตัวอย่างที่ 3 ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน ๑% ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ศึกษาโดยการแปรค่าอุณหภูมิเป็น 120, 140 และ 150 °C ขนาดถ่านหินที่ 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัม ต่อสารละลาย 500 มล. เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที

รูปที่ 4.13, 4.14, 4.15 ก, 4.15 ข, 4.16 ก และ 4.16 ข แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดปริมาณกำมะถันรวมและกำมะถันไพไรต์ การลดกำมะถันรวมเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 120, 140 และ 150 °C พบว่ากำมะถันรวมลดลงจาก 12.21 เป็น 8.84, 8.06 และ 7.72 ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละการลดกำมะถันรวม 27.60, 33.99 และ 36.77 ส่วนกำมะถันไพไรต์ลดลงจาก 6.53 เป็น 3.91, 3.76 และ 1.99 คิดเป็นร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์ได้ 40.12, 42.42 และ 69.52 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดปริมาณกำมะถันถ่านหิน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 120 140 และ 150 °C ได้ค่าร้อยละการลดกำมะถันเป็น 15.01 20.32 และ 24.90 ตามลำดับ

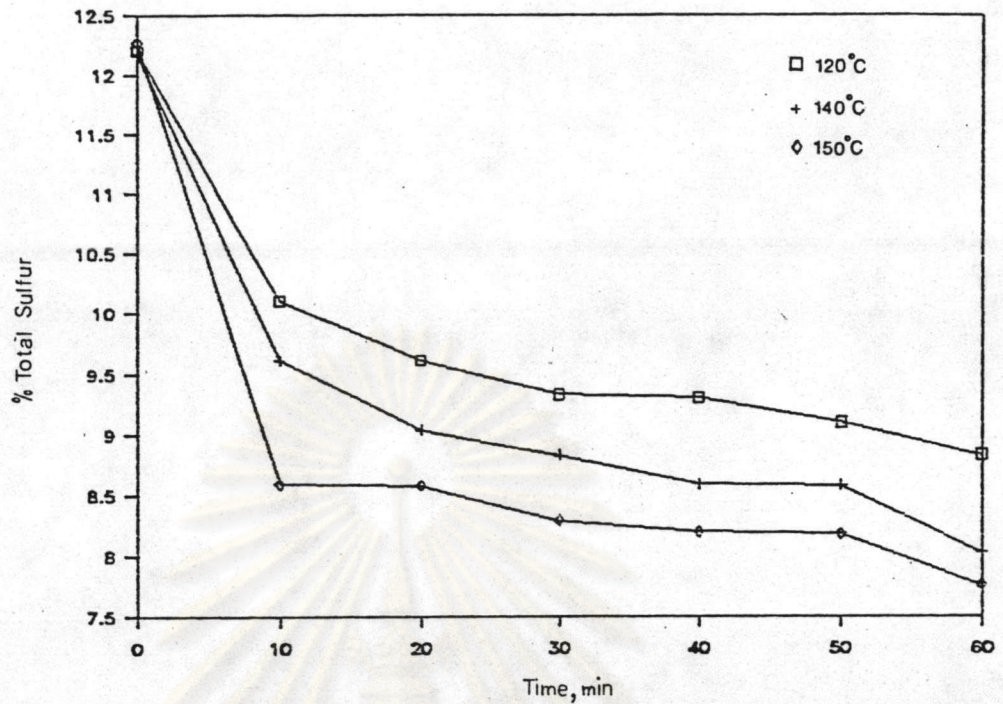
รูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 แสดงผลการเพิ่มอุณหภูมิที่มีต่อการขจัดกำมะถันรวมและกำมะถันไพไรต์เช่นกัน ๑% ตัวอย่างถ่านหินแม่เมาะ 1 ความเข้มข้นสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% เมื่อเพิ่มค่าอุณหภูมิเป็น 120, 140 และ 150 °C ได้ค่าร้อยละการลดกำมะถันรวมเป็น 44.67, 49.90 และ 51.84 ตามลำดับ ค่าร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์เป็น 40.00, 66.15 และ 84.62 ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิมีผลต่อการลดปริมาณกำมะถันกำมะถันไพไรต์ และกำมะถัน ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการลดปริมาณกำมะถันรวม กำมะถันไพไรต์ และกำมะถันค่าสูงขึ้น ในการทดลองเมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขจัดกำมะถันควรเป็น 150 °C เนื่องจากสามารถลดกำมะถันไพไรต์ได้สูงถึงร้อยละ 69.52 ในตัวอย่างถ่านหินแม่เมาะ 3 และร้อยละ 84.62 สำหรับตัวอย่างถ่านหินแม่เมาะ 1 การเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น เนื่องจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตจะแตกตัวให้คอปเปอร์ (II) อีออนได้ดีขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ระบบมีผลทำให้ความดันเพิ่มขึ้นพร้อมทั้งเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับคอปเปอร์ (II) อีออน ในการที่จะแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยากับกำมะถันในอนุภาคถ่านหินได้ดีขึ้น ทำให้ลดปริมาณกำมะถันได้มากขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

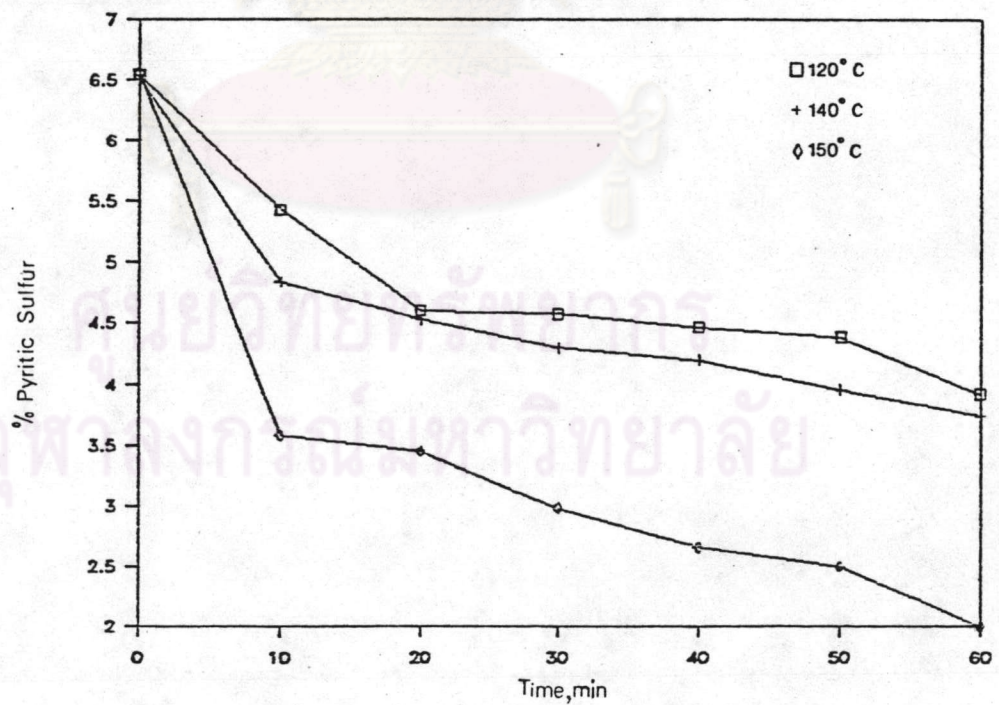
ตารางที่ 4.3 สมบัติของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ ตัวอย่างที่ 3 (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่มีความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% น้ำหนักต่อปริมาตร (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)

อุณหภูมิ (๗)	ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม)	เถ้า (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			ร้อยละการลดกำมะถัน			ร้อยละ การลด เถ้า	ร้อยละ การเพิ่มค่า ความร้อน
			ซัลเฟต	ไพไรต์	รวม	ซัลเฟต	ไพไรต์	รวม		
เริ่มต้น	3256	47.64	4.91	6.53	12.21	-	-	-	-	-
120	3604	40.49	0.30	3.91	8.84	93.89	40.12	27.60	15.01	10.71
140	3698	37.96	0.14	3.76	8.06	97.15	42.42	33.99	20.32	13.57
150	3846	35.78	0.09	1.99	7.72	98.57	69.52	36.77	24.90	18.12

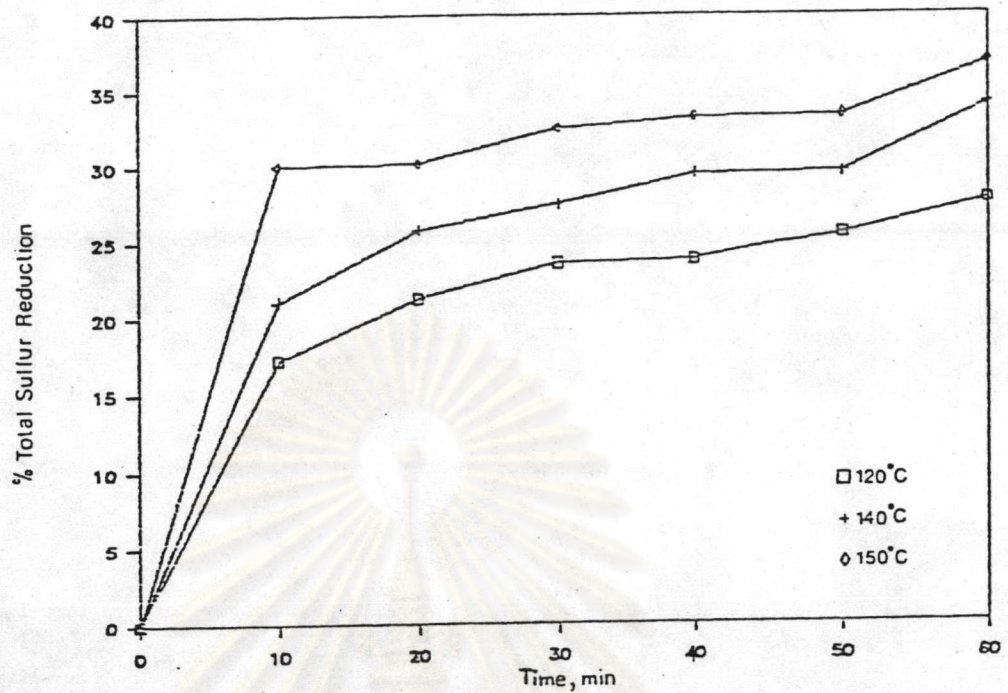
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



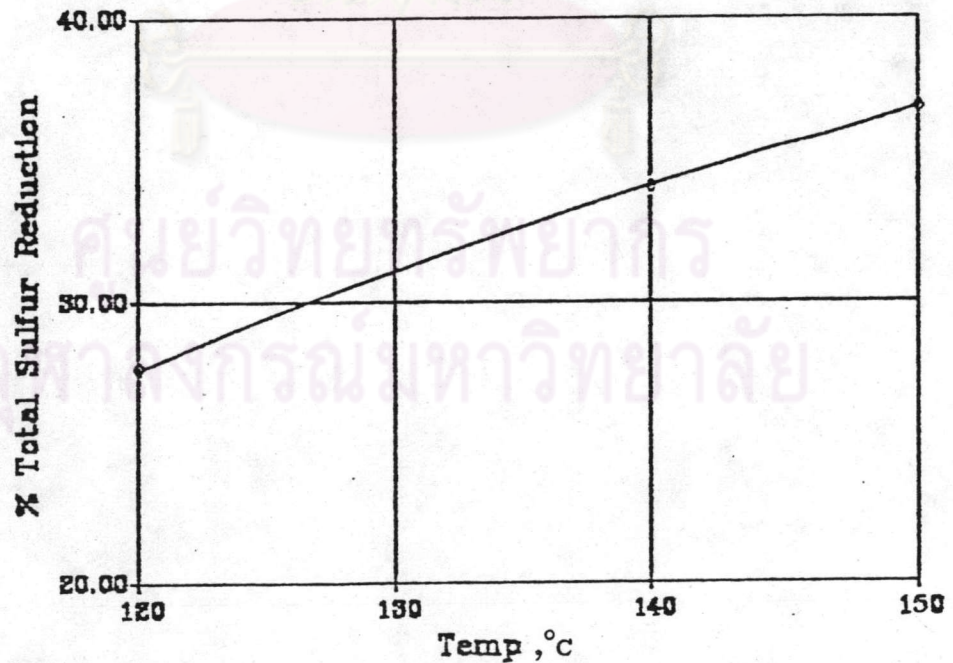
รูปที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกำมะถันรวมในกำหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดกำหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณกำหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลาย 20% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



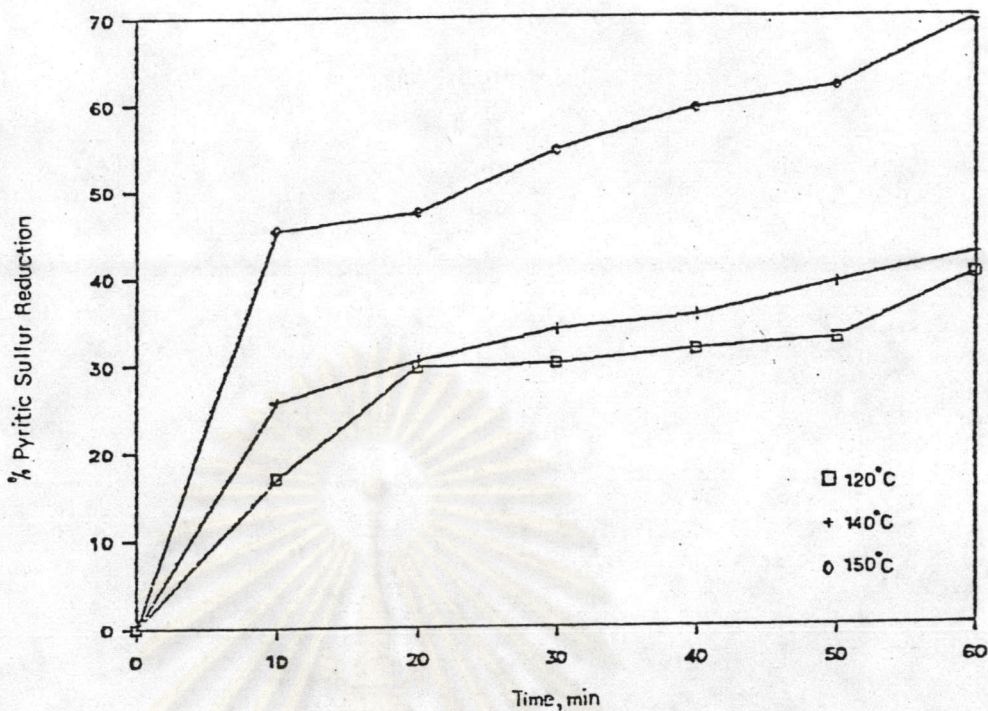
รูปที่ 4.14 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกำมะถันไพไรต์ในกำหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดกำหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณกำหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



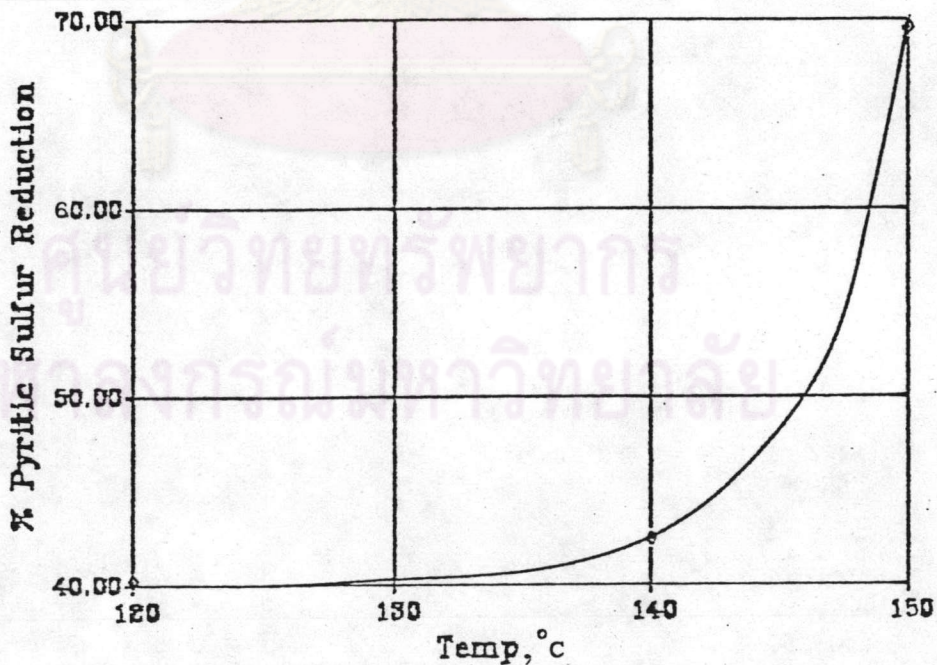
รูปที่ 4.15ก ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในกำนหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดกำนหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณกำนหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



รูปที่ 4.15ข ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในกำนหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดกำนหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณกำนหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



รูปที่ 4.16ก ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดกำมะถันไพไรต์ในกำนหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดกำนหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณกำนหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



รูปที่ 4.16ข ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดกำมะถันไพไรต์ในกำนหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดกำนหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณกำนหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



4.1.3 ผลของขนาดก้อนหิน

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการลดปริมาณกำมะถันต่าง ๆ ในก้อนหินเหมืองแม่เมาะ ตัวอย่างที่ 2 ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน ขนาดก้อนหินที่ใช้คือ 150 - 250, 250-500 และ 500-600 ไมครอน ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ปริมาณก้อนหิน 100 กรัม ต่อสารละลาย 500 มล. ที่อุณหภูมิ 150^oซ เวลา 1 ชม. อัตราการกวาน 1400 รอบต่อนาที

รูปที่ 4.17, 4.18, 4.19 ก, 4.19 ข, 4.20 ก และ 4.20 ข แสดงผลของขนาดก้อนหินที่มีต่อการลดปริมาณกำมะถันรวมและกำมะถันไพไรต์ ก้อนหินขนาด 150-250 ไมครอน สามารถลดกำมะถันรวมจากเดิมร้อยละ 6.97 เป็น 3.22 และกำมะถันไพไรต์จากเดิมร้อยละ 1.05 เป็น 0.06 ก้อนหินขนาด 250-500 ไมครอน ลดปริมาณกำมะถันรวมลงจากเดิมร้อยละ 6.97 เป็น 3.40 และกำมะถันไพไรต์ลดลงจากเดิมร้อยละ 1.05 เป็น 0.16 ส่วนก้อนหินที่มีขนาดใหญ่ขึ้นคือ 500-600 ไมครอน ความสามารถในการลดกำมะถันลดลง คือ ลดปริมาณกำมะถันรวมจากเดิมร้อยละ 6.97 เป็น 3.53 และลดกำมะถันไพไรต์จากเดิมร้อยละ 1.05 เป็น 0.18

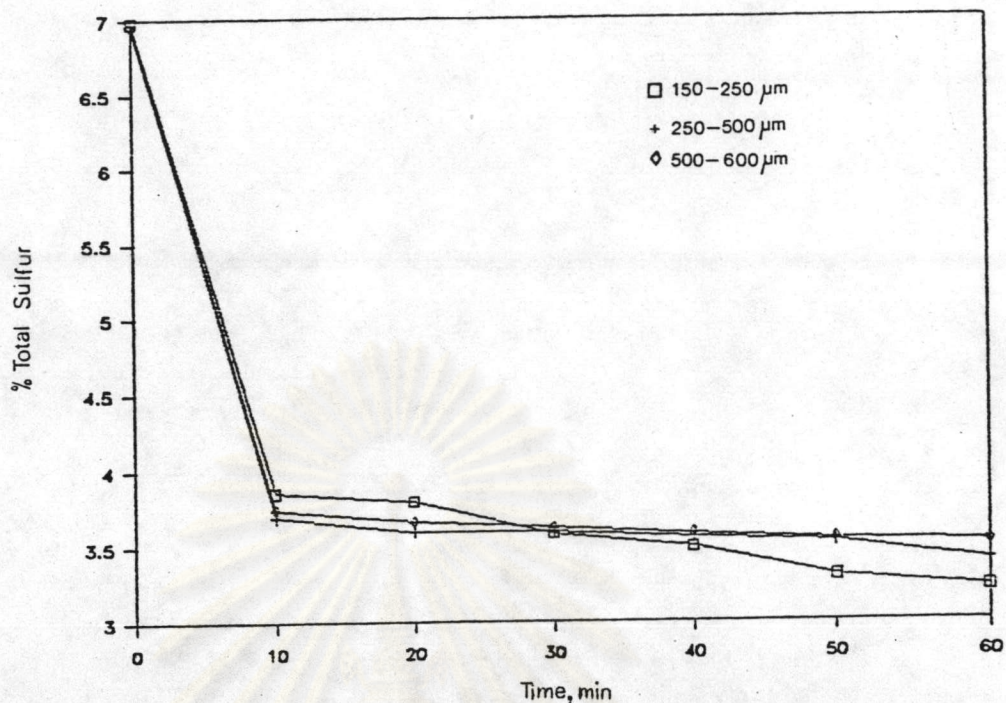
ผลจากการทดลองพบว่าสามารถลดกำมะถันไพไรต์ได้ถึงร้อยละ 94.28 เมื่อใช้ก้อนหินที่มีขนาดเล็ก 150-250 ไมครอน ส่วนเมื่อเพิ่มขนาดก้อนหินเป็น 250-500 และ 500-600 ไมครอน ความสามารถในการลดกำมะถันไพไรต์ลดลงประมาณร้อยละ 10 คือ 84.76 และ 82.86 ตามลำดับ ในที่นี้กล่าวได้ว่า ก้อนหินขนาดเล็กให้ผลในการลดกำมะถันไพไรต์ดีกว่าก้อนหินที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากอนุภาคก้อนหินขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า และการที่ผิวก้อนหินเป็นรูพรุน ทำให้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตซึมผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากับกำมะถันได้ดีกว่าก้อนหินที่มีขนาดใหญ่ ในการทดลองนี้ขนาดก้อนหินที่เหมาะสมในการขจัดกำมะถันคือ 150-250 ไมครอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

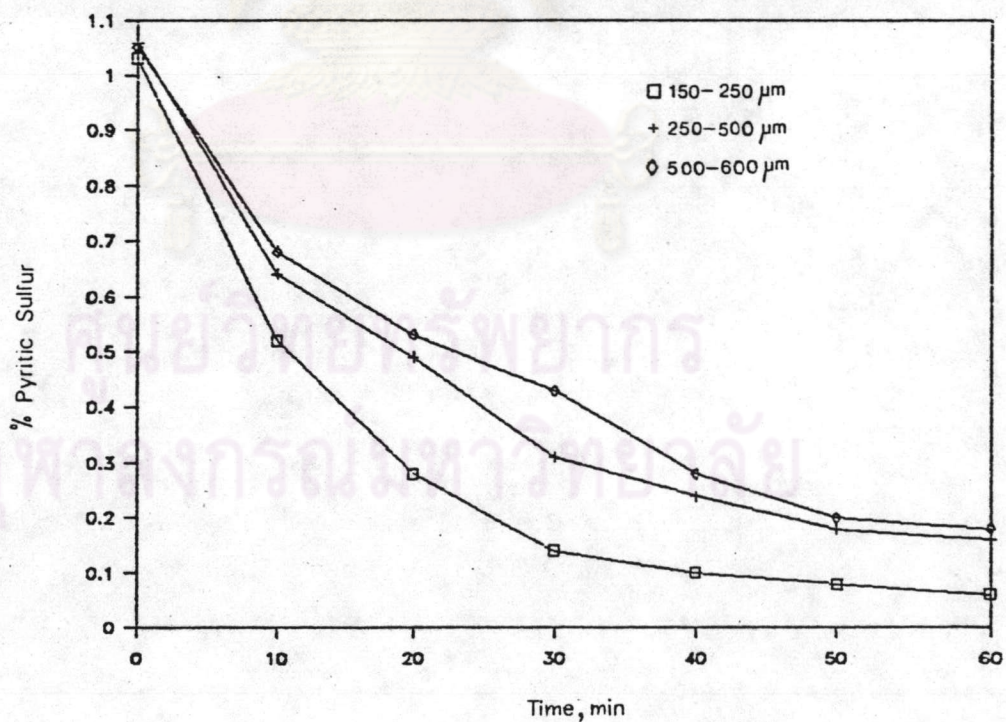
ตารางที่ 4.4 สมบัติของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ ตัวอย่างที่ 2 (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการจัดกำมะถันใช้ขนาดถ่านหินต่าง ๆ กัน (ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% น้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ที่อุณหภูมิ 150 °ซ เวลา 1 ชม. อัตราการกววน 1400 รอบต่อนาที)

ขนาดถ่านหิน (ไมโครเมตร)	ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม)	เถ้า (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			ร้อยละการลดกำมะถัน			ร้อยละ การลด เถ้า	ร้อยละ การเพิ่มค่า ความร้อน
			ซัลเฟต	ไฟไรต์	รวม	ซัลเฟต	ไฟไรต์	รวม		
เริ่มต้น	-	30.85	3.89	1.05	6.97	-	-	-	-	-
150-250	3810	21.20	0.22	0.06	3.22	94.34	94.28	53.80	31.28	-
250-500	3898	24.57	0.34	0.16	3.40	91.26	84.76	51.22	20.36	-
500-600	4128	27.56	0.35	0.18	3.53	91.00	82.86	49.35	10.66	-

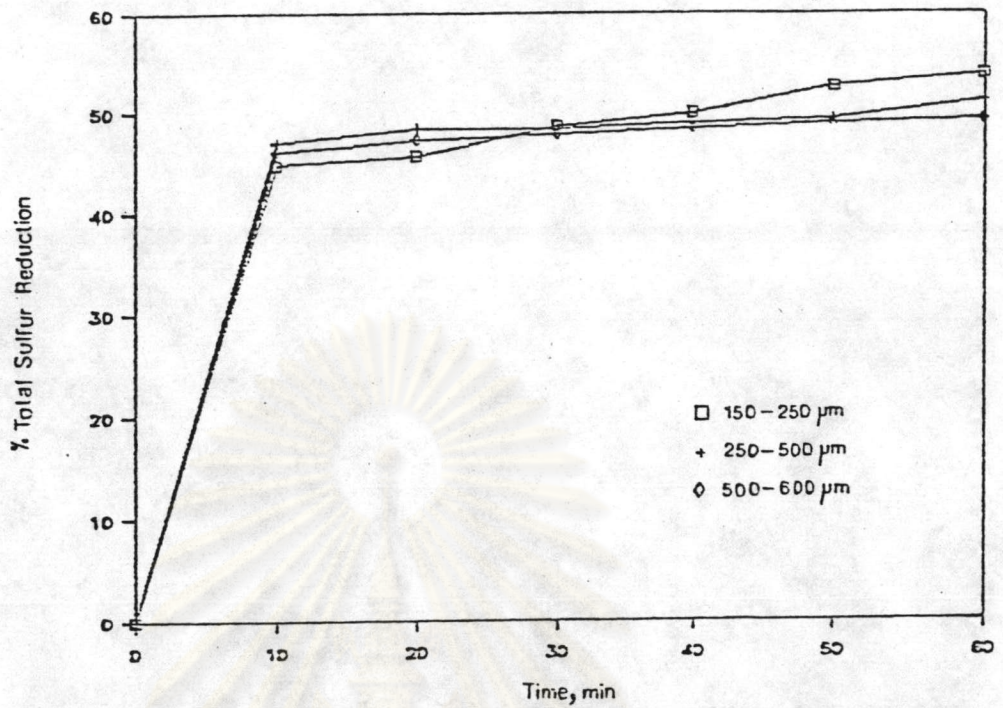
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



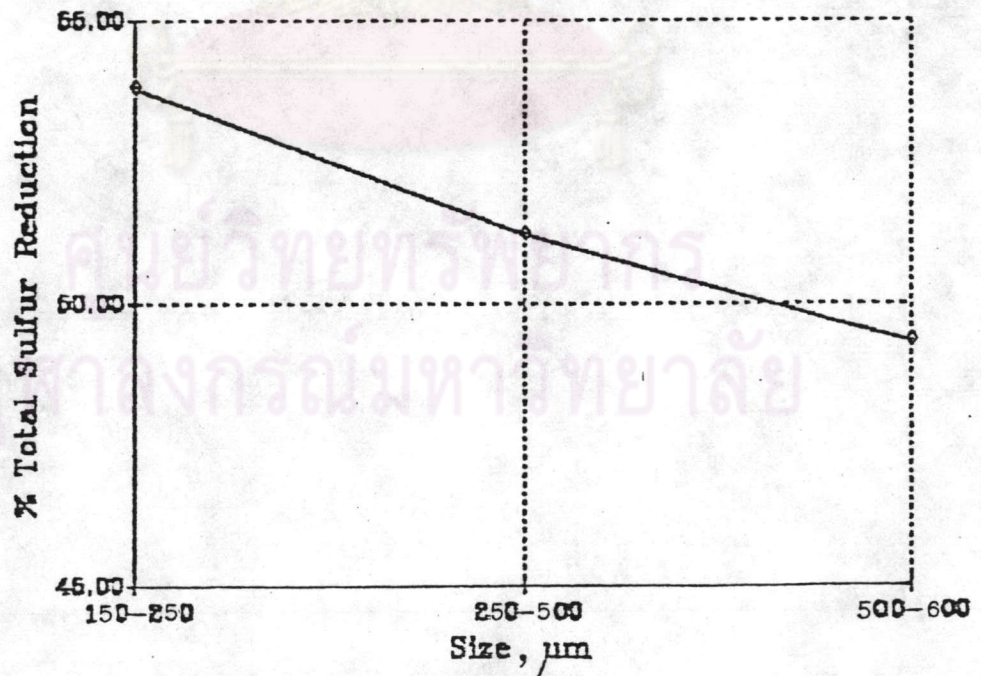
รูปที่ 4.17 ผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อกำมะถันรวมงานถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% อุณหภูมิ 150^oซ เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



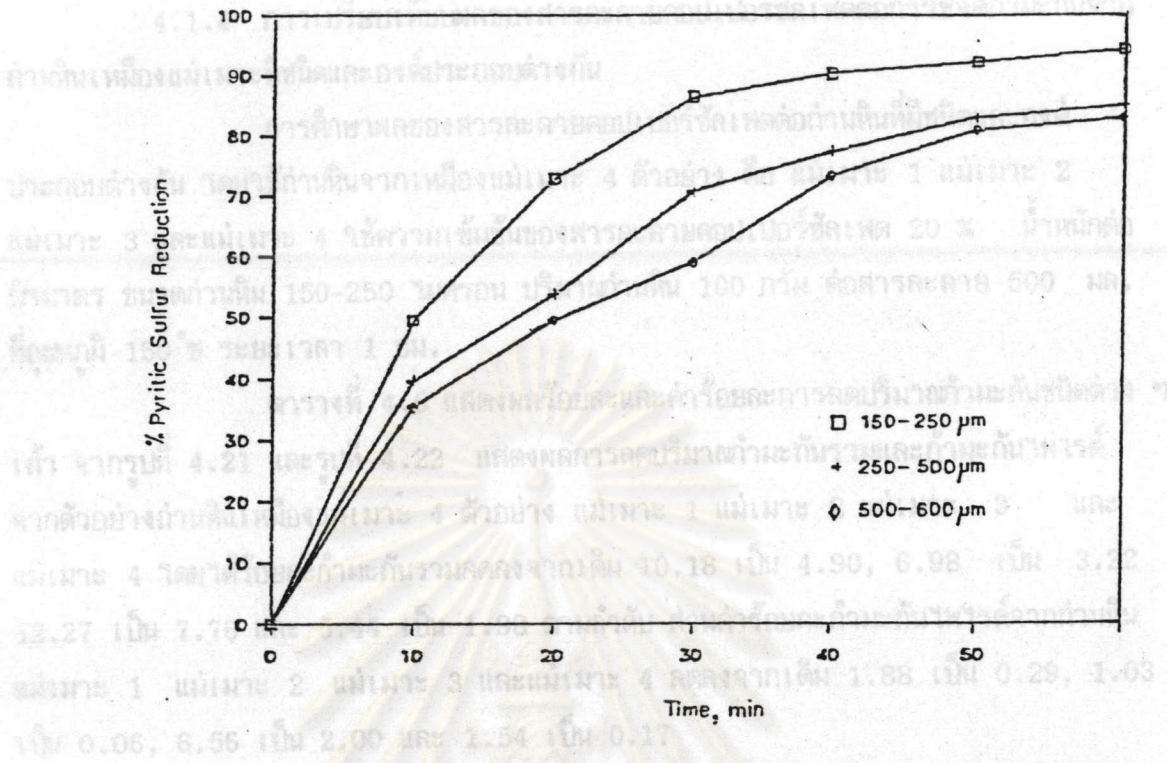
รูปที่ 4.18 ผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อกำมะถันไพไรต์งานถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% อุณหภูมิ 150^oซ เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



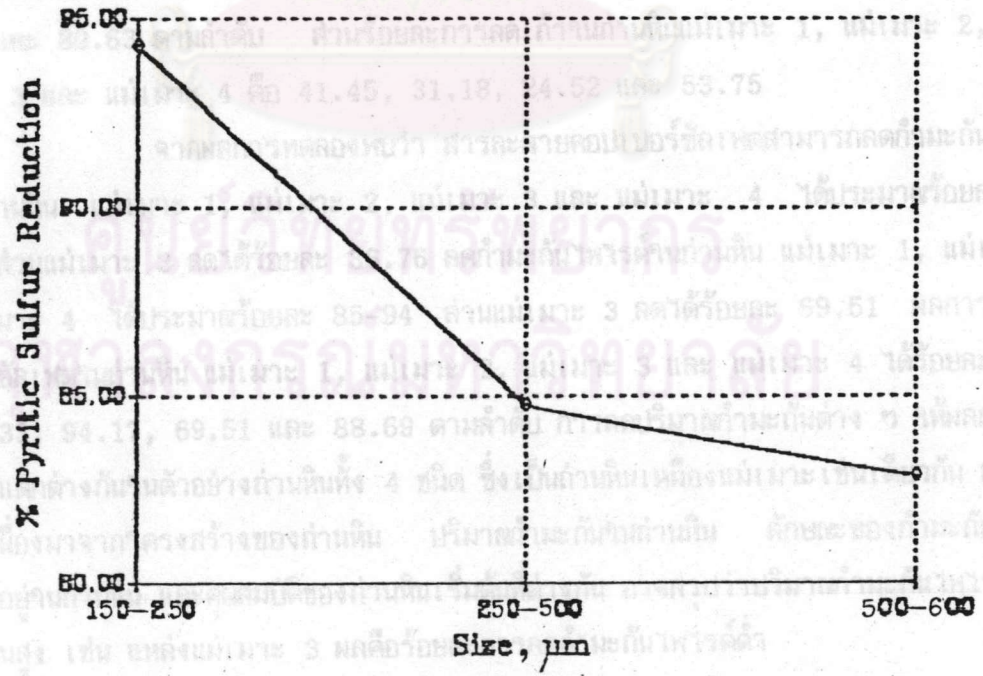
รูปที่ 4.19ก ผลของขนาดก้อนหินที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในก้อนหินเหมืองแม่เมาะ (ปริมาณก้อนหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% อุณหภูมิ 150^oซ เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



รูปที่ 4.19ข ผลของขนาดก้อนหินที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในก้อนหินเหมืองแม่เมาะ (ปริมาณก้อนหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% อุณหภูมิ 150^oซ เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



รูปที่ 4.20ก ผลของขนาดก้อนหินที่มีต่อการลดกำมะถันไพไรต์ในก้อนหินเหมืองแม่เมาะ (ปริมาณก้อนหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 150^oซ เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



รูปที่ 4.20ข ผลของขนาดก้อนหินที่มีต่อการลดกำมะถันไพไรต์ในก้อนหินเหมืองแม่เมาะ (ปริมาณก้อนหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 150^oซ เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)

4.1.4 การเปรียบเทียบผลของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตต่อการกำจัดก้ำมะกันจาก ถ่านหินเหมืองแม่เมาะที่ชนิดและองค์ประกอบต่างกัน

การศึกษาผลของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตต่อถ่านหินที่มีชนิดและองค์ประกอบต่างกัน โดยนำถ่านหินจากเหมืองแม่เมาะ 4 ตัวอย่าง คือ แม่เมาะ 1 แม่เมาะ 2 แม่เมาะ 3 และแม่เมาะ 4 ใช้ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20 % น้ำหนักต่อปริมาตร ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัม ต่อสารละลาย 500 มล. ที่อุณหภูมิ 150°ซ ระยะเวลา 1 ชม.

ตารางที่ 4.5 แสดงผลร้อยละและค่าร้อยละการลดปริมาณก้ำมะกันชนิดต่าง ๆ
ถ้า จากรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 แสดงผลการลดปริมาณก้ำมะกันรวมและก้ำมะกันไพไรต์
จากตัวอย่างถ่านหินเหมืองแม่เมาะ 4 ตัวอย่าง แม่เมาะ 1 แม่เมาะ 2 แม่เมาะ 3 และ
แม่เมาะ 4 โดยได้ร้อยละก้ำมะกันรวมลดลงจากเดิม 10.18 เป็น 4.90, 6.98 เป็น 3.22
12.27 เป็น 7.76 และ 5.44 เป็น 1.98 ตามลำดับ ส่วนค่าร้อยละก้ำมะกันไพไรต์จากถ่านหิน
แม่เมาะ 1 แม่เมาะ 2 แม่เมาะ 3 และแม่เมาะ 4 ลดลงจากเดิม 1.88 เป็น 0.29, 1.03
เป็น 0.06, 6.56 เป็น 2.00 และ 1.54 เป็น 0.17

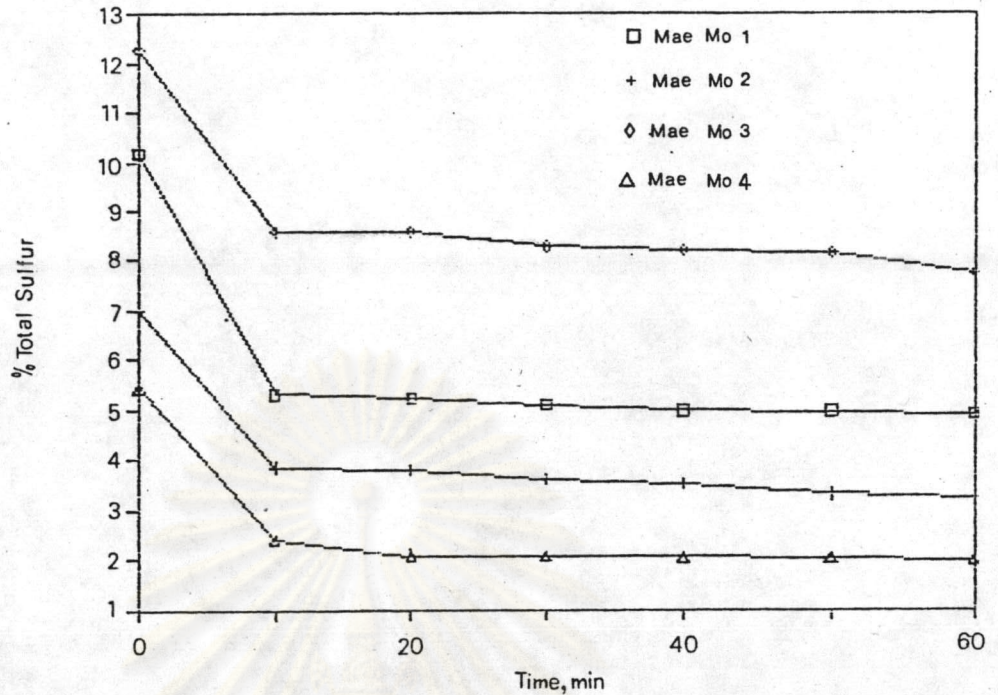
รูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24 แสดงผลร้อยละการลดก้ำมะกันรวมและก้ำมะกัน
ไพไรต์ โดยได้ร้อยละการลดก้ำมะกันรวมในถ่านหินแม่เมาะ 1, แม่เมาะ 2, แม่เมาะ 3 และ
แม่เมาะ 4 คือ 51.87, 53.87, 36.76 และ 63.60 ตามลำดับ ผลร้อยละการลดก้ำมะกัน
ไพไรต์ในถ่านหิน แม่เมาะ 1, แม่เมาะ 2, แม่เมาะ 3 และแม่เมาะ 4 คือ 84.57, 94.17,
69.51 และ 89.63 ตามลำดับ ส่วนร้อยละการลดก้ำมะกันแม่เมาะ 1, แม่เมาะ 2,
แม่เมาะ 3 และ แม่เมาะ 4 คือ 41.45, 31.18, 24.52 และ 53.75

จากผลการทดลองพบว่า สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตสามารถลดก้ำมะกัน
รวมในถ่านหิน แม่เมาะ 1, แม่เมาะ 2, แม่เมาะ 3 และ แม่เมาะ 4 ได้ประมาณร้อยละ
52-64 ส่วนแม่เมาะ 3 ลดได้ร้อยละ 36.76 ลดก้ำมะกันไพไรต์ในถ่านหิน แม่เมาะ 1, แม่เมาะ
2, แม่เมาะ 4 ได้ประมาณร้อยละ 85-94 ส่วนแม่เมาะ 3 ลดได้ร้อยละ 69.51 ผลการลด
ก้ำมะกันซัลเฟตในถ่านหิน แม่เมาะ 1, แม่เมาะ 2, แม่เมาะ 3 และ แม่เมาะ 4 ได้ร้อยละการ
ลด 97.33, 94.17, 69.51 และ 88.69 ตามลำดับ การลดปริมาณก้ำมะกันต่าง ๆ ให้ผลการ
ทดลองที่แตกต่างกันในตัวอย่งถ่านหินทั้ง 4 ชนิด ซึ่งเป็นถ่านหินเหมืองแม่เมาะเช่นเดียวกัน อาจ
เป็นผลเนื่องมาจากโครงสร้างของถ่านหิน ปริมาณก้ำมะกันถ่านหิน ลักษณะของก้ำมะกันที่
ประกอบอยู่ในถ่านหิน และคุณสมบัติของถ่านหินเริ่มต้นที่ต่างกัน อาจสรุปว่าปริมาณก้ำมะกันไพไรต์
ในถ่านหินสูง เช่น แห้งแม่เมาะ 3 ผลคือร้อยละการลดก้ำมะกันไพไรต์ต่ำ

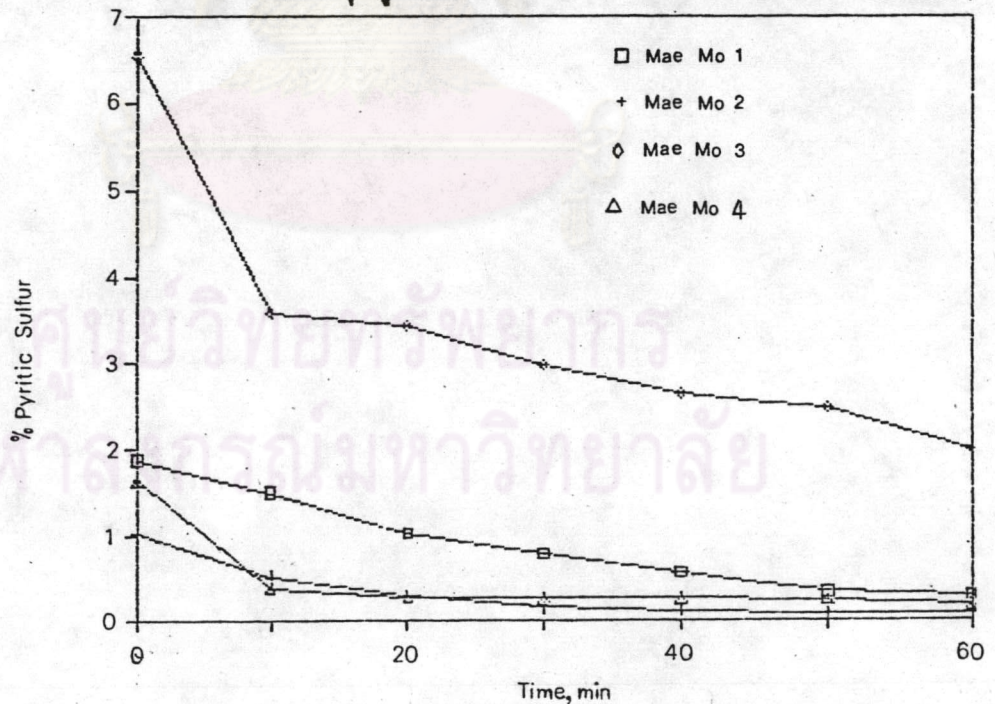
ตารางที่ 4.5 สมบัติของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการจัดกำมะถัน ใช้ตัวอย่างถ่านหินต่าง ๆ กัน (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% น้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 150 °ซ เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)

ตัวอย่างถ่านหิน	ค่าความชื้น (แคลอรี/กรัม)	เถ้า (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			ร้อยละการลดกำมะถัน			ร้อยละ การลด เถ้า	ร้อยละ การเพิ่มค่า ความชื้น
			ซัลเฟต	ไฟไรต์	รวม	ซัลเฟต	ไฟไรต์	รวม		
แม่เมาะ 1*	-	31.87	5.61	1.88	10.18	-	-	-	-	-
แม่เมาะ 1	3936	18.66	0.15	0.29	4.90	97.33	84.67	51.87	41.45	-
แม่เมาะ 2*	-	30.85	3.90	1.03	6.98	-	-	-	-	-
แม่เมาะ 2	3810	21.23	0.22	0.06	3.22	94.17	94.17	53.87	31.18	-
แม่เมาะ 3*	3270	47.64	4.92	6.56	12.27	-	-	-	-	-
แม่เมาะ 3	3846	35.96	0.09	2.00	7.76	69.51	69.51	36.76	24.52	17.60
แม่เมาะ 4*	3482	35.35	3.80	1.54	5.44	-	-	-	-	-
แม่เมาะ 4	4405	16.35	0.11	0.17	1.98	88.96	89.63	63.60	53.75	28.32

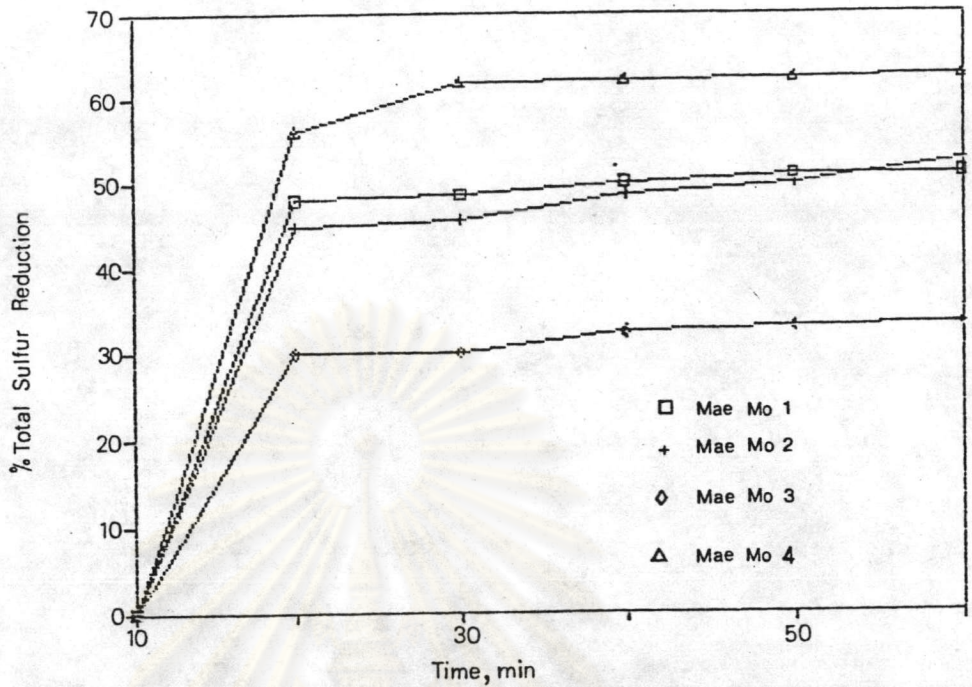
* สมบัติถ่านหินก่อนผ่านกระบวนการ



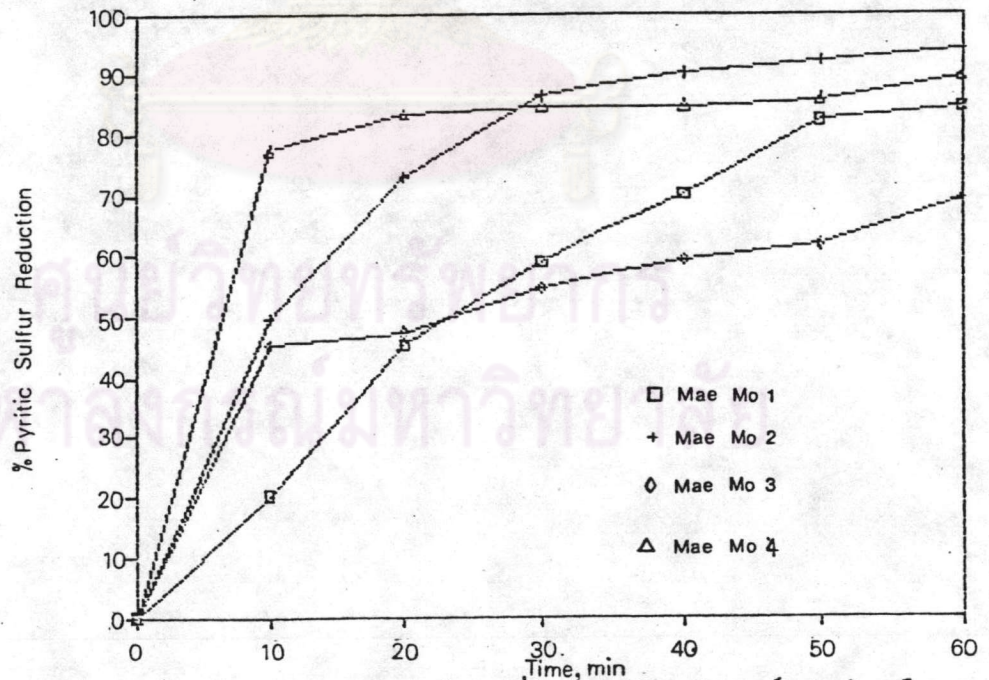
รูปที่ 4.21 ผลของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อกำมะถันรวมในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ ตัวอย่างต่าง ๆ ที่มีองค์ประกอบต่างกัน (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณ ถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 150°ซ เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



รูปที่ 4.22 ผลของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ ตัวอย่างต่าง ๆ ที่มีองค์ประกอบต่างกัน (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณ ถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 150°ซ เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



รูปที่ 4.23 ผลของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในกำนหินเหมืองแม่เมาะ ตัวอย่างต่าง ๆ ที่มีองค์ประกอบต่างกัน (ขนาดกำนหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณกำนหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 150°ซ เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)



รูปที่ 4.24 ผลของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อการลดกำมะถันไพไรต์ในกำนหินเหมืองแม่เมาะตัวอย่างต่าง ๆ ที่มีองค์ประกอบต่างกัน (ขนาดกำนหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณกำนหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150°ซ เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)

4.2 การศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาเคมีของโพไรต์และขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วการทำปฏิกิริยากับโพไรต์ในถ่านหิน

จากข้อมูลการทดลองในการศึกษาการขจัดกำมะถันจากถ่านหินเหมืองแม่เมาะด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเห็นได้ว่ากำมะถันโพไรต์มีอัตราเร็วการทำปฏิกิริยากับสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่สามารถทำการศึกษาได้

ในการทดลองศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาเคมีของโพไรต์และหาขั้นตอนที่เป็นตัวควบคุมอัตราเร็วการทำปฏิกิริยาโพไรต์ในถ่านหินด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ทำการทดลองโดยใช้ตัวอย่างถ่านหินจากเหมืองแม่เมาะทำปฏิกิริยากับสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 20 % น้ำหนักต่อปริมาตร ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัม ต่อสารละลาย 20 % คอปเปอร์ซัลเฟต 500 มล. ที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 150 °C อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชม. โดยเก็บตัวอย่างถ่านหินทุก 10 นาที

4.2.1 การหาอันดับอัตราเร็วปฏิกิริยาเคมีของโพไรต์ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ

กำหนดให้คอปเปอร์ (II) อีออนในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวออกซิไดซ์กำมะถันโพไรต์ในกระบวนการขจัดกำมะถัน ระหว่างทำการทดลองจะเก็บตัวอย่างถ่านหินตามระยะเวลา 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาทีตามลำดับ มาวิเคราะห์หาความเข้มข้นโพไรต์ (C_P) ซึ่งคำนวณให้อยู่ในรูปสัดส่วนการเปลี่ยน (X) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ได้ ดังตารางที่ 4.6, 4.7 และ 4.8

ขั้นตอนการหาอันดับปฏิกิริยา (reaction order) ซึ่งค่านี้หาได้จากข้อมูลการทดลองโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยา (r_P) กับความเข้มข้นของโพไรต์ (C_P) ตามสมการที่ 2.31 คือ

$$-r_P = -dC_P/dt = kC_P \quad (4.1)$$

เนื่องจากผลงานวิจัยที่ผ่านมา (19) ในการทดลองศึกษาจลนศาสตร์ของการขจัดกำมะถันโพไรต์จากถ่านหินโดยอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชัน พบว่าปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันโพไรต์เป็นปฏิกิริยาอันดับสอง (second order reaction) ดังนั้นในการทดลองศึกษาการขจัดกำมะถันโพไรต์ในถ่านหินโดยใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต จึงนำข้อมูลจากการทดลองที่ได้มาทดสอบหาอันดับปฏิกิริยาโดยอาศัยวิธีอินทิเกรตชัน (integration method) ซึ่งจะลองพิจารณาเปรียบเทียบว่าปฏิกิริยาขจัดกำมะถันโพไรต์ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งหรือปฏิกิริยาอันดับสอง ตามวิธีอินทิเกรตชัน ถ้ากำหนดให้ปริมาตรในเครื่องปฏิกรณ์คงที่จากสมการที่ 4.1

ถ้าปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันไพไรต์เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง จะได้ว่า

$$-r_P = -dC_P/dt = k_1 C_P \quad (4.2)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการ (4.2) จะได้

$$\ln C_P - \ln C_{P0} = -k_1 t \quad (4.3)$$

ถ้าเขียนกราฟของ $\ln C_P$ กับ t จะได้กราฟเส้นตรง มีความชันเท่ากับ $-k_1$

ถ้าปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันไพไรต์เป็นปฏิกิริยาอันดับสอง จะได้ว่า

$$-r_P = -dC_P/dt = k_2 C_P^2 \quad (4.4)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการ (4.4) จะได้

$$1/C_P = k_2 t + 1/C_{P0} \quad (4.5)$$

ถ้าเขียนกราฟของ $1/C_P$ กับ t จะได้กราฟเส้นตรง มีความชันเท่ากับ $k_2 C_{P0}$

ดังนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองศึกษาปฏิกิริยาเคมีการขจัดกำมะถันไพไรต์ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 150 °C มาสองเขียนกราฟระหว่าง $\ln C_P$ กับ t และ $1/C_P$ กับ t แล้วพิจารณาว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งหรือปฏิกิริยาอันดับสอง ซึ่งผลการทดลองในที่นี้พบว่าปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันไพไรต์เป็นปฏิกิริยาอันดับสอง เนื่องจากเมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\ln C_P$ กับ t และ $1/C_P$ กับ t ได้กราฟเส้นตรงเช่นเดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์สหพันธ์ (R-Square) ซึ่งเป็นค่าที่อธิบายว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามสามารถอธิบายได้ด้วยเส้นตรงนี้ได้ขนาดไหน ถ้าค่า $r^2 = 1$ แสดงว่าเส้นตรงดังกล่าวอธิบายการเปลี่ยนแปลงได้ 100 % จากข้อมูลการทดลองที่ได้ส่วนใหญ่เมื่อนำมาเขียนกราฟระหว่าง $1/C_P$ กับ t ให้กราฟเส้นตรง ซึ่งให้ค่า r^2 สูงกว่าหรือใกล้เคียง 1 มากกว่า กราฟเส้นตรงที่เขียนระหว่าง $\ln C_P$ กับ t ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29, 4.30, 4.31 และ 4.32

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าร้อยละกำมะถันไฟไรต์ ความเข้มข้นของไฟไรต์ (C_p) ของถ่านหินเหมืองแม่
 เมาะ ตัวอย่างที่ 1 (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อ
 สารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% น้ำหนักต่อ
 ปริมาตรอุณหภูมิ 120, 140 และ 150 °ซ ตามระยะเวลา 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ 120 °ซ			อุณหภูมิ 140 °ซ			อุณหภูมิ 150 °ซ		
	กำมะถัน ไฟไรต์ (%)	Cp กิโลโมล/ ม ³	X	กำมะถัน ไฟไรต์ (%)	Cp กิโลโมล/ ม ³	X	กำมะถัน ไฟไรต์ (%)	Cp กิโลโมล/ ม ³	X
0	2.86	0.77	-	2.91	0.79	-	2.76	0.75	-
10	2.14	0.58	0.247	1.60	0.43	0.456	1.91	0.52	0.307
20	1.91	0.52	0.325	1.39	0.38	0.519	1.29	0.35	0.506
30	1.72	0.46	0.402	1.04	0.28	0.646	0.96	0.26	0.653
40	1.65	0.45	0.416	0.92	0.25	0.684	0.69	0.19	0.747
50	1.55	0.42	0.454	0.88	0.24	0.696	0.41	0.11	0.853
60	1.49	0.40	0.480	0.83	0.22	0.722	0.36	0.10	0.867

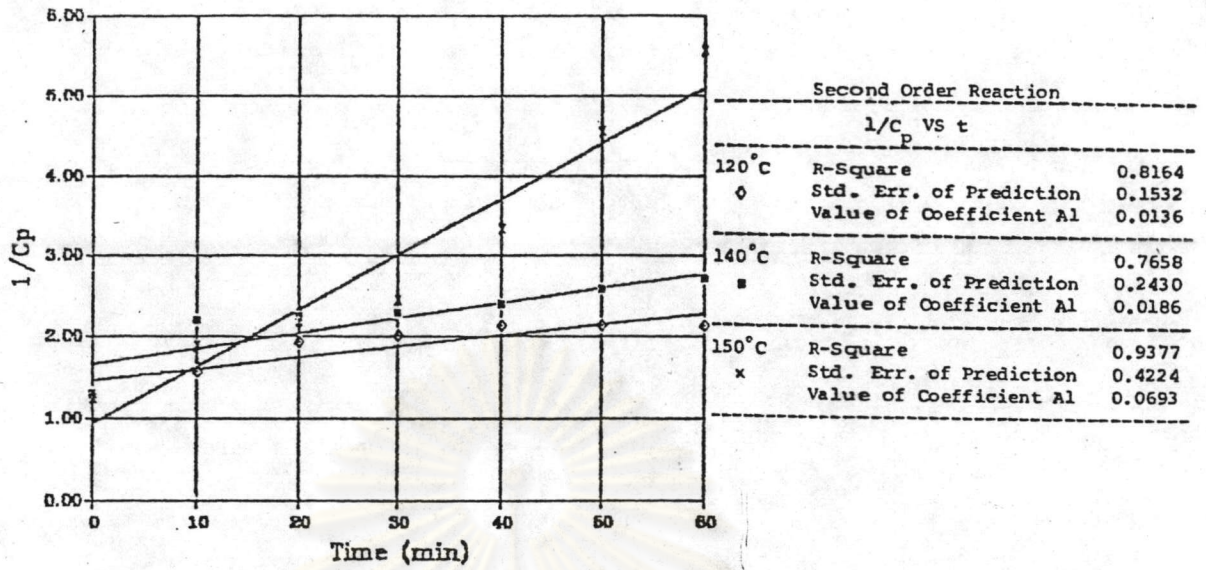
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าร้อยละกำมะถันไฟไรต์ ความเข้มข้นของไฟไรต์ (C_p) ของถ่านหินเมืองแม่
 เมาะ ตัวอย่างที่ 2 (ขนาดถ่านหินต่าง ๆ กัน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย
 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% น้ำหนักต่อปริมาตรอุณหภูมิ
 120, 140 และ 150 °C ตามระยะเวลา 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที

ขนาดถ่านหิน (ไมครอน)	150 - 250			250 - 500			500 - 600		
	กำมะถัน ไฟไรต์ (%)	Cp กิโลโมล/ ม ³	X	กำมะถัน ไฟไรต์ (%)	Cp กิโลโมล/ ม ³	X	กำมะถัน ไฟไรต์ (%)	Cp กิโลโมล/ ม ³	X
0	1.49	0.39	-	1.53	0.40	-	1.52	0.04	-
10	0.68	0.18	0.538	0.87	0.23	0.425	0.96	0.25	0.375
20	0.36	0.09	0.769	0.66	0.17	0.575	0.75	0.20	0.500
30	0.18	0.05	0.872	0.42	0.11	0.725	0.60	0.16	0.600
40	0.13	0.03	0.923	0.32	0.08	0.800	0.39	0.10	0.750
50	0.10	0.03	0.923	0.24	0.06	0.850	0.28	0.07	0.825
60	0.08	0.02	0.949	0.21	0.06	0.850	0.25	0.07	0.825

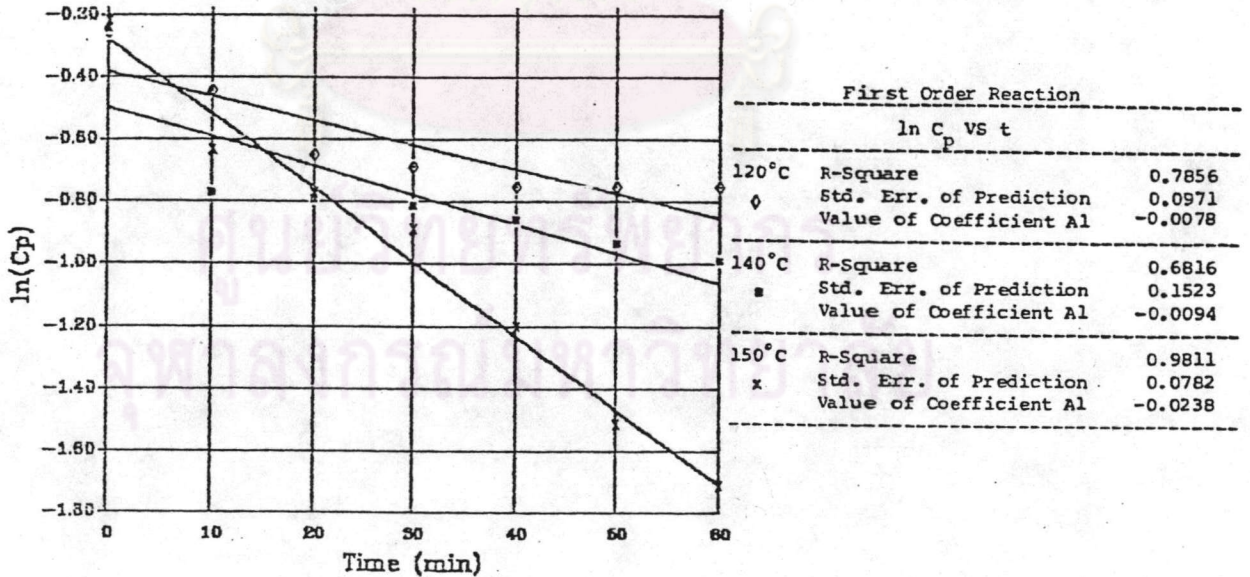
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าร้อยละกำมะถันไฟไรต์ ความเข้มข้นของไฟไรต์ (C_p) ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ ตัวอย่างที่ 3 (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% น้ำหนักต่อปริมาตรอุณหภูมิ 120, 140 และ 150 °ซ ตามระยะเวลา 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ 120 ° ซ			อุณหภูมิ 140 ° ซ			อุณหภูมิ 150 ° ซ		
	กำมะถัน ไฟไรต์ (%)	C_p กิโลโมล/ ม ³	X	กำมะถัน ไฟไรต์ (%)	C_p กิโลโมล/ ม ³	X	กำมะถัน ไฟไรต์ (%)	C_p กิโลโมล/ ม ³	X
0	12.43	3.51	-	12.44	3.52	-	12.59	3.56	-
10	9.40	2.66	0.242	8.18	2.31	0.344	5.86	1.66	0.534
20	7.92	2.24	0.362	7.51	2.12	0.398	5.50	1.55	0.565
30	7.82	2.21	0.370	7.05	1.99	0.435	4.72	1.33	0.626
40	7.56	2.14	0.390	6.87	1.94	0.449	4.29	1.21	0.660
50	7.38	2.09	0.404	6.41	1.81	0.486	3.91	1.10	0.691
60	6.56	1.85	0.473	6.04	1.71	0.514	3.12	0.88	0.753

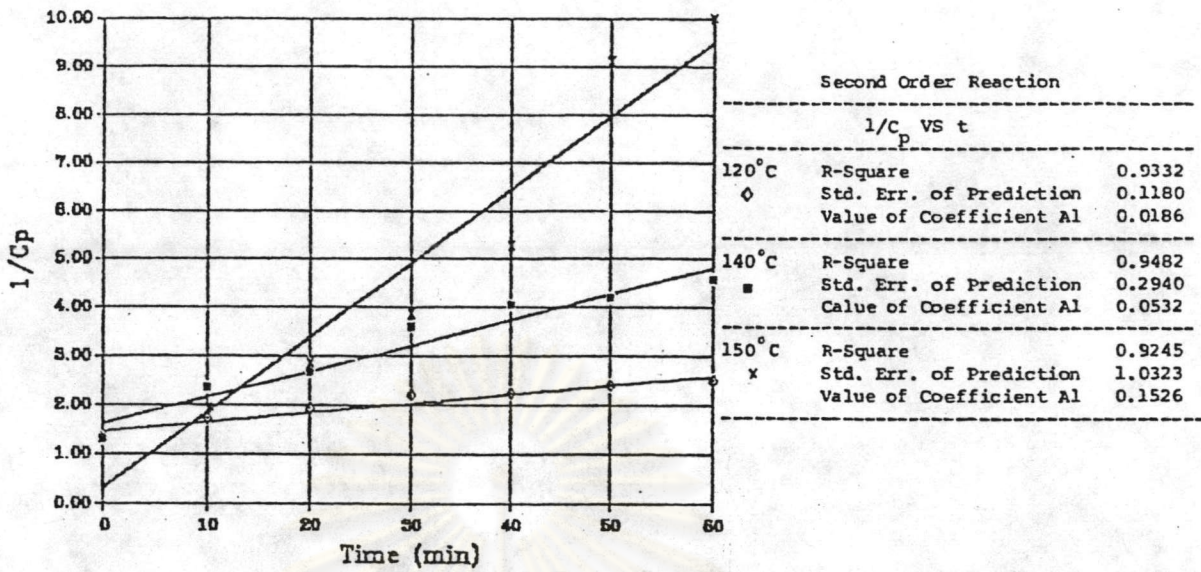




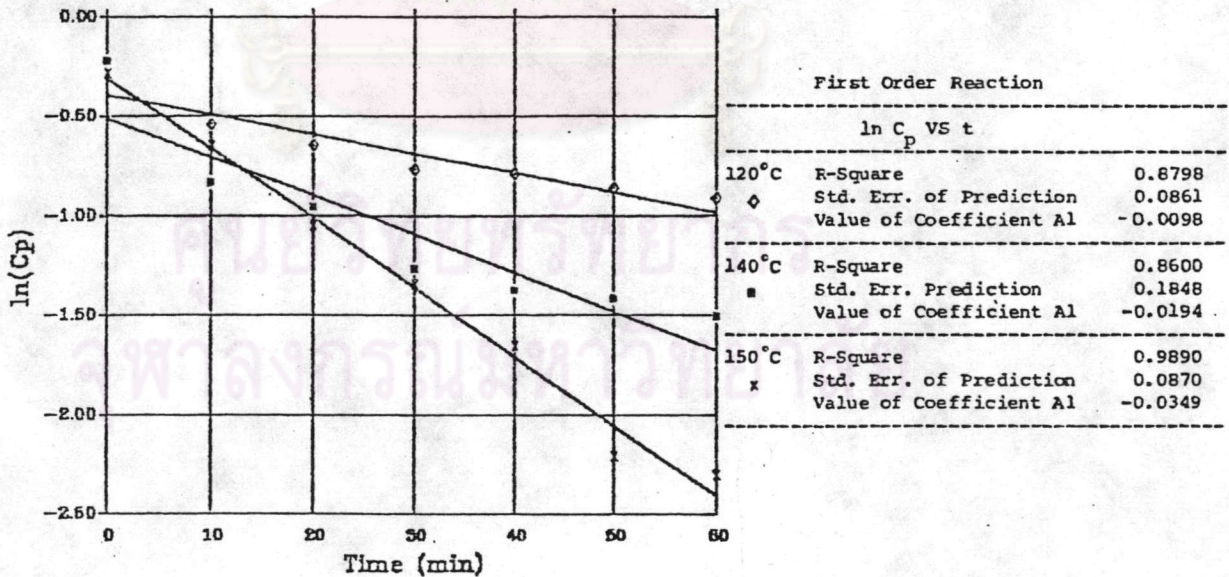
รูปที่ 4.25 กราฟระหว่าง 1/C_p กับเวลา ของถ่านหินเหมือนแม่เมาะ 1 ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10% ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °ซ



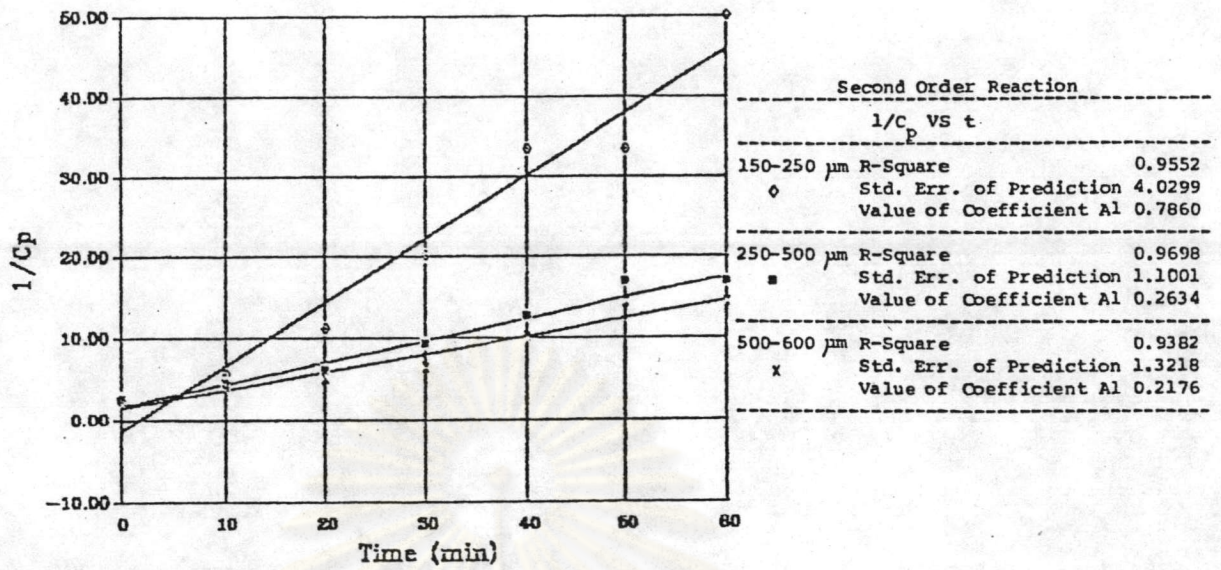
รูปที่ 4.26 กราฟระหว่าง ln C_p กับเวลา ของถ่านหินเหมือนแม่เมาะ 1 ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10% ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °ซ



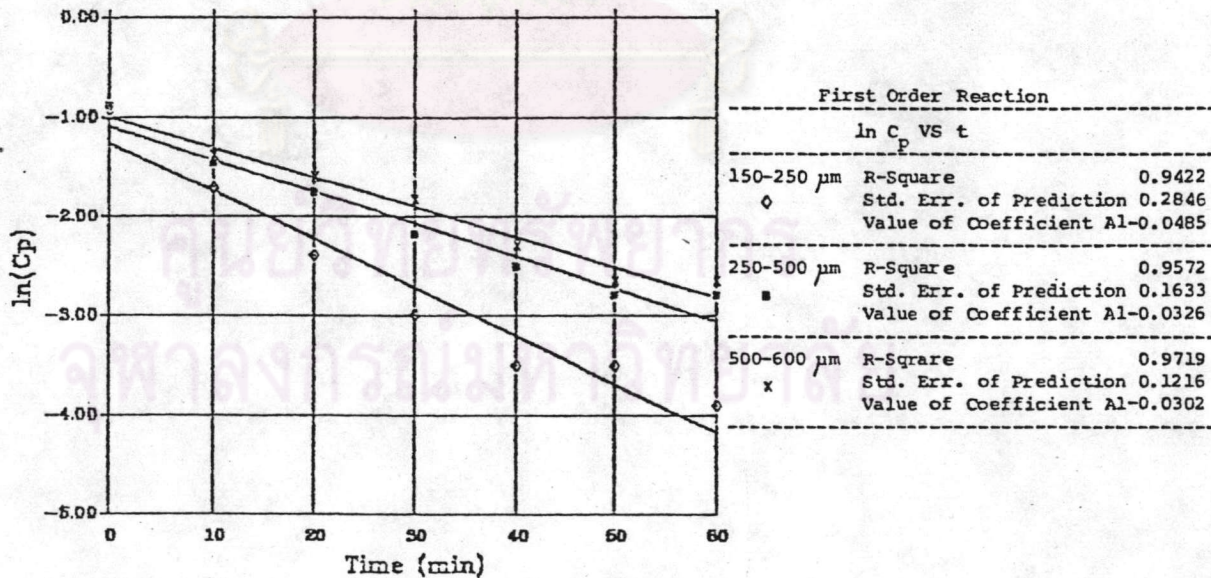
รูปที่ 4.27 กราฟระหว่าง 1/C_p กับเวลา ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ 1 ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °ซ



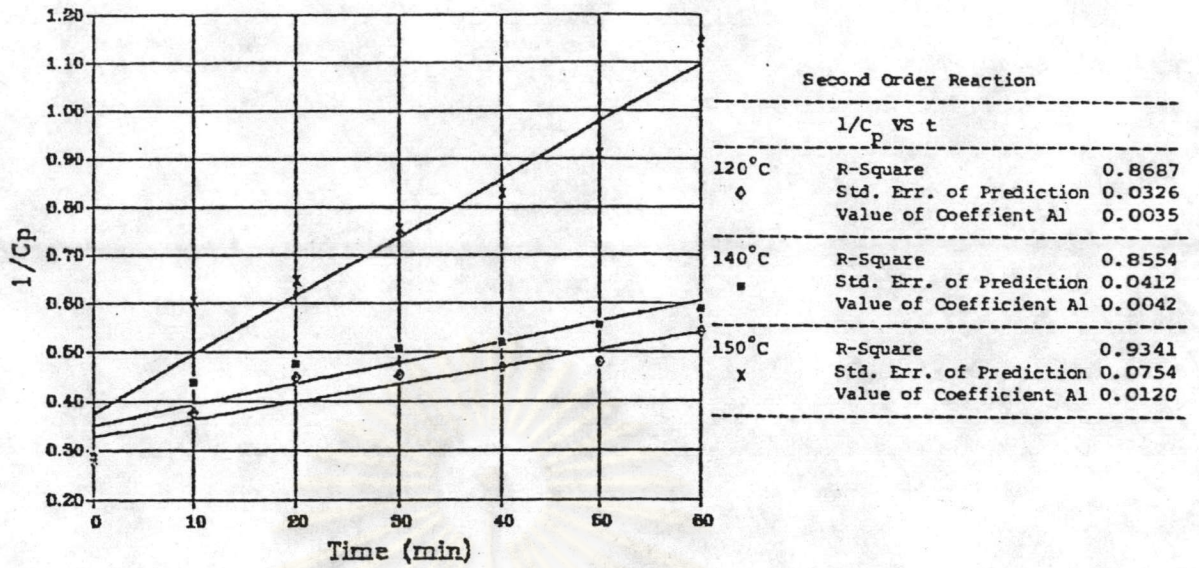
รูปที่ 4.28 กราฟระหว่าง ln Cp กับเวลา ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ 1 ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °ซ



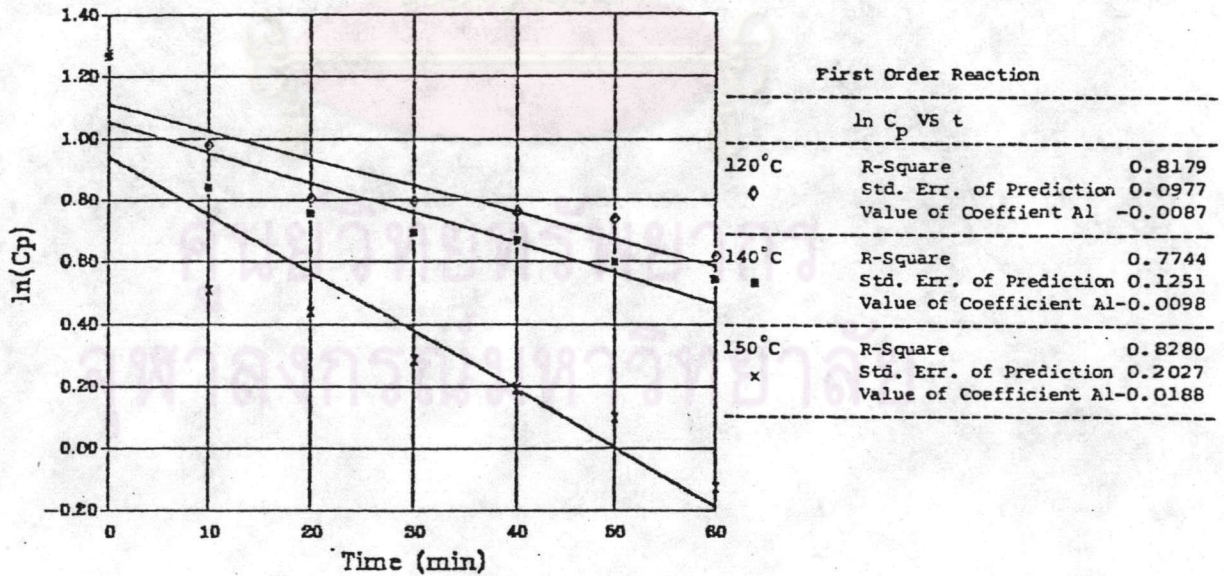
รูปที่ 4.29 กราฟระหว่าง $1/C_p$ กับเวลา ของก้อนหินเหมืองแม่เมาะ 2 ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °ซ



รูปที่ 4.30 กราฟระหว่าง $\ln C_p$ กับเวลา ของก้อนหินเหมืองแม่เมาะ 2 ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °ซ



รูปที่ 4.31 กราฟระหว่าง 1/C_p กับเวลา ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ 3 ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °ซ



รูปที่ 4.32 กราฟระหว่าง ln Cp กับเวลา ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ 3 ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °ซ

4.2.2 การหาค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเคมี (rate constant) และค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) ของกานหินเหมืองแม่เมาะ

ในข้อ 4.2.1 แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันไพไรต์ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\{1/(1-X)\}-1$ กับเวลา ตามสมการที่ (2.41)

รูปที่ 4.33 และ รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ของกราฟระหว่าง $\{1/(1-X)\}-1$ กับเวลา ในปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันไพไรต์จากกานหินแม่เมาะ 1 ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 10% และ 20% ตามลำดับ ในแต่ละอุณหภูมิที่ทำการทดลอง คือ 120, 140 และ 150 °C ส่วนรูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\{1/(1-X)\}-1$ กับเวลา ของปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันไพไรต์จากกานหินแม่เมาะ 3 ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 20 % ในแต่ละอุณหภูมิที่ทำการทดลอง เช่นเดียวกับรูปที่ 4.33 และ 4.35 จากการเขียนกราฟระหว่าง $\{1/(1-X)\}-1$ กับเวลา ได้กราฟเส้นตรงมีความชันเท่ากับ $k_2 C_{P_0}$ ซึ่งสามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา k_2 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ทำการทดลองได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.10 จากตารางนี้จะเห็นได้ว่าค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเป็นค่าคงที่เฉพาะของปฏิกิริยาแต่ละอุณหภูมิ

เมื่อนำค่า k_2 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$ ตามสมการของ Arrhenius คือ

$$k_2 = k_2(o) \exp (-E/RT) \quad (4.6)$$

จะได้กราฟเส้นตรงมีความชันเท่ากับ $-E/R$ ซึ่งจะนำมาคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นได้

รูปที่ 4.34 และรูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ของกราฟระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$ ในปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันไพไรต์จากกานหินเหมืองแม่เมาะ 1 ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 10% และ 20% ตามลำดับ เช่นเดียวกับกราฟรูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$ ของกานหินแม่เมาะ 3 ซึ่งใช้ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20 % ซึ่งความชันของกราฟเส้นตรงที่ได้จากการเขียนกราฟระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$ จากรูปที่ 4.34, 4.36 และ 4.38 แสดงในตารางที่ 4.10 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่ปฏิกิริยากับอุณหภูมิตามรูปแบบสมการของ Arrhenius ด้วย

จากตารางที่ 4.10 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) ของปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันไพไรต์ในกานหินแม่เมาะ 1 ใช้ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10 และ 20 % และกานหินแม่เมาะ 3 ใช้ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20 % ได้ค่าพลังงานกระตุ้น 66.13×10^6 , 96.48×10^6 และ 48.93×10^6 จูลต่อกิโลโมล ตามลำดับ ซึ่งค่าพลังงานกระตุ้นแสดงถึงพลังงานน้อยที่สุดในการที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยา ถ้าพลังงานกระตุ้นมีค่าน้อยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เร็ว

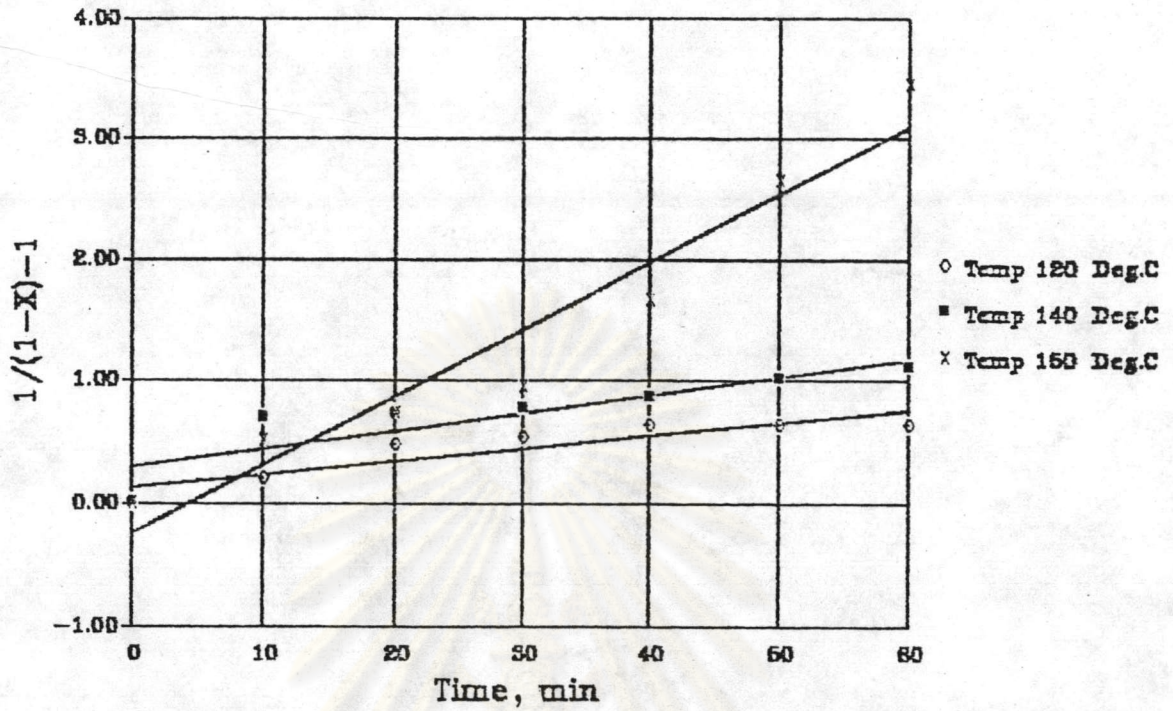
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา (k_2) ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ

ถ่านหิน	ขนาดถ่านหิน (ไมครอน)	อุณหภูมิ ($^{\circ}$ ซ)	ความเข้มข้นของ สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (% , น้ำหนักต่อปริมาตร)	$k_2 C_{Po}$	C_{Po} กิโลโมล/ม. ³	k_2 ม. ³ /กิโลโมล.วินาที	
แม่เมาะ 1	150-250	120	10	0.0105	0.77	2.273×10^{-4}	
		140		0.0145		3.098×10^{-4}	
		150		0.0554		1.154×10^{-3}	
แม่เมาะ 1	150-250	120	20	0.0143	0.77	3.095×10^{-4}	
		140		0.0421		8.882×10^{-4}	
		150		0.1150		2.556×10^{-3}	
แม่เมาะ 2	150-250	150	20	0.3065	0.39	1.310×10^{-2}	
	250-500			0.1054		0.40	4.390×10^{-3}
	500-600			0.0870		0.40	3.627×10^{-3}
แม่เมาะ 3	150-250	120	20	0.0124	3.51	5.888×10^{-5}	
		140		0.0149		3.52	7.055×10^{-5}
		150		0.0427		3.56	1.999×10^{-4}

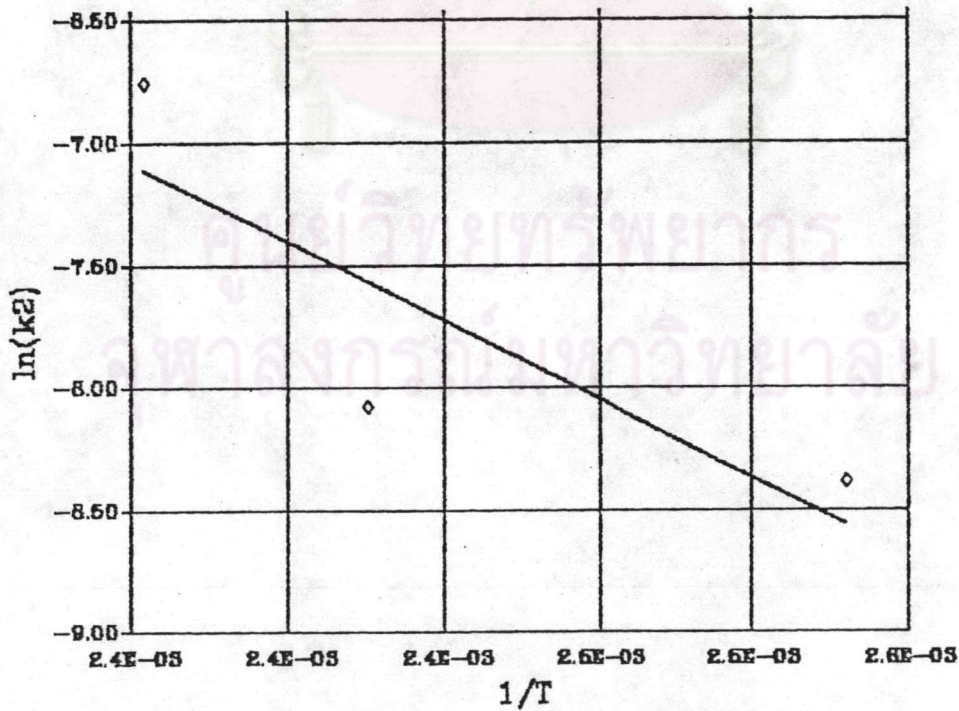
ตารางที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยากับอุณหภูมิของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ ตาม Arrhenius law ($k_2 = k_{2(0)} e^{-E/RT}$)

ถ่านหิน	ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (% , น้ำหนักต่อปริมาตร)	$k_{2(0)}$	$-E/R$	$(k_2 = k_{2(0)} e^{-E/RT})$
แม่เมาะ 1	10	11.84×10^4	7953.72	$k_2 = 11.84 \times 10^4 \exp(-66.13 \times 10^6 / RT)$
แม่เมาะ 1	20	18.71×10^6	11604.91	$k_2 = 18.71 \times 10^6 \exp(-96.48 \times 10^6 / RT)$
แม่เมาะ 3	20	164.09	5885.261	$k_2 = 164.09 \exp(-48.93 \times 10^6 / RT)$

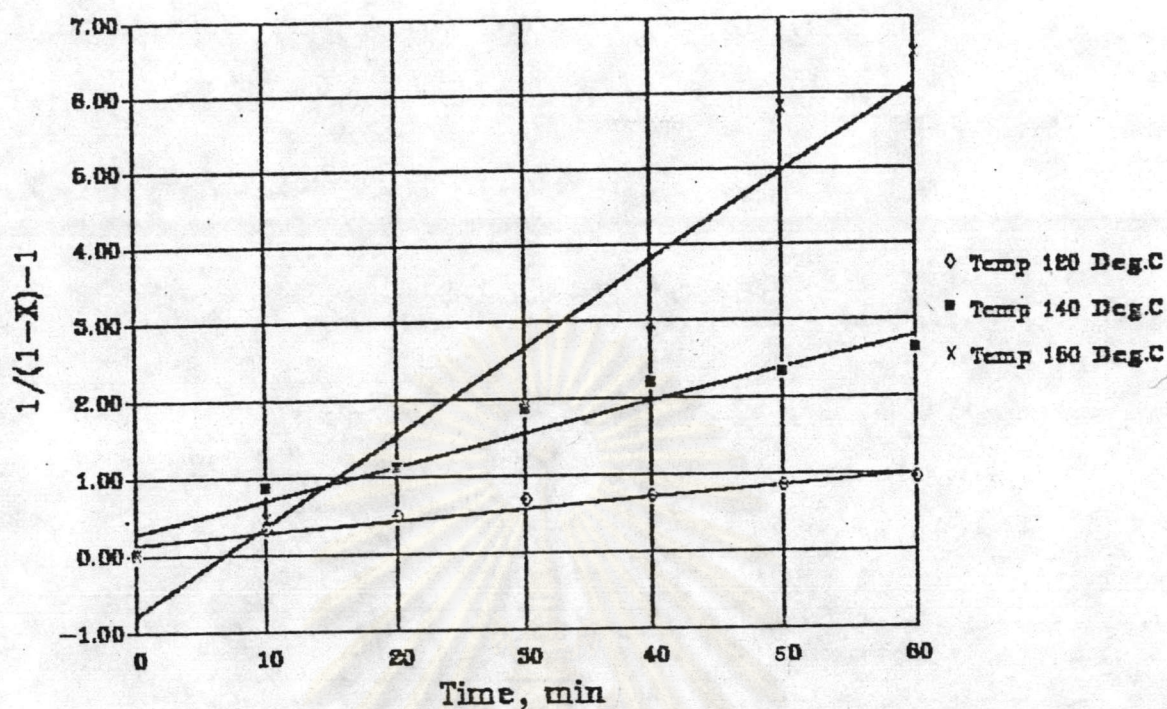
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



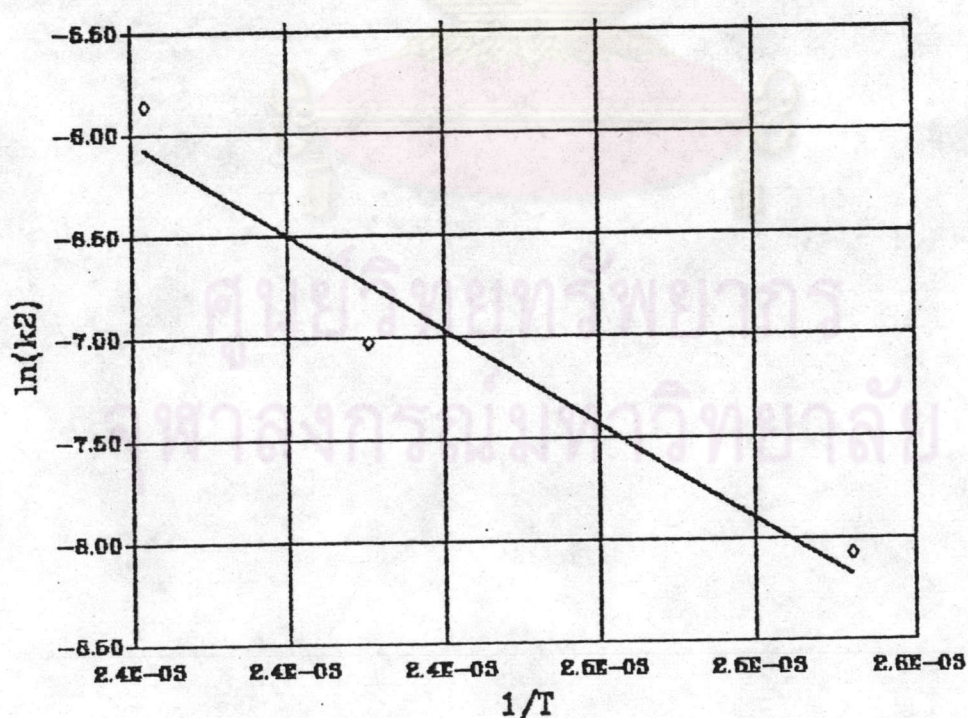
รูปที่ 4.33 แสดงกราฟแบบอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองระหว่าง $(1/1-x)-1$ กับเวลาของปฏิกิริยาการจัดไฟรต์นกำหนดหินแม่เมาะ 1 ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10% ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150°ซ



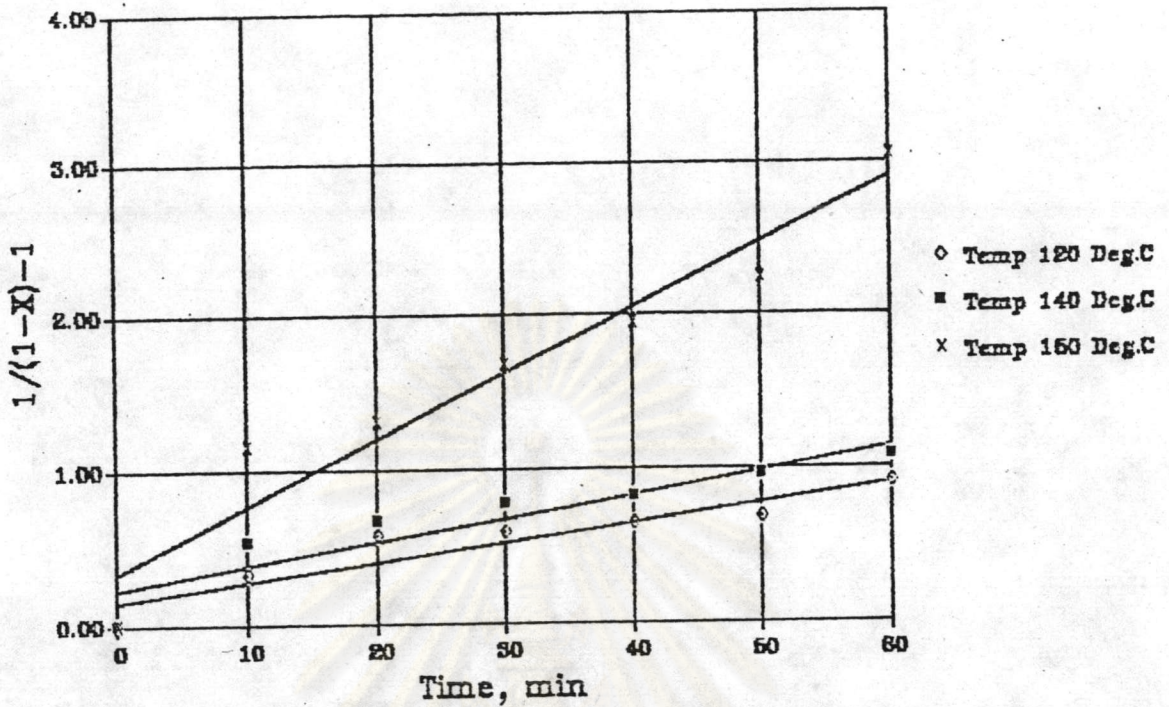
รูปที่ 4.34 แสดงกราฟตามแบบ Arrhenius plot ระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$ ของปฏิกิริยาการจัดไฟรต์นกำหนดหินแม่เมาะ 1 ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10%



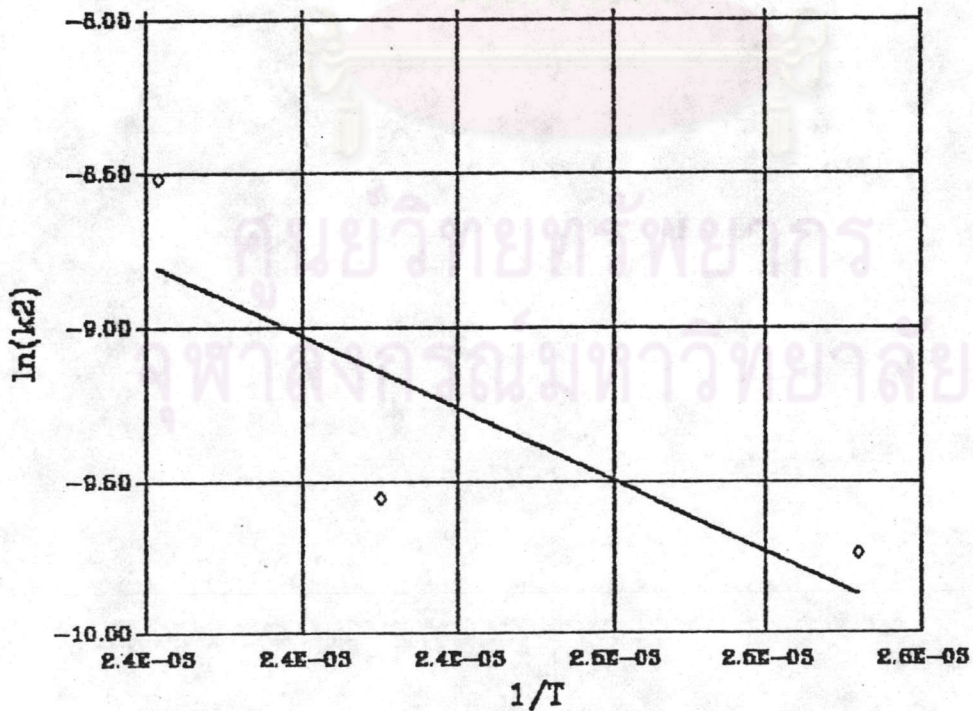
รูปที่ 4.35 แสดงกราฟแบบอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองระหว่าง $(1/1-x)-1$ กับเวลาของปฏิกิริยาการขจัดไขมันด้านหน้าหินแม่เมาะ 1 ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20 % ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °C



รูปที่ 4.36 แสดงกราฟตามแบบ Arrhenius plot ระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$ ของปฏิกิริยาการขจัดไขมันด้านหน้าหินแม่เมาะ 1 ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20%



รูปที่ 4.37 แสดงกราฟแบบอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองระหว่าง $(1/1-x)-1$ กับเวลา ของปฏิกิริยาการขจัดอาหารต้านทานหันแม่เมาะ 3 ด้วยสารละลายคอปเปอร์ ซัลเฟต 20 % ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °C



รูปที่ 4.38 แสดงกราฟตามแบบ Arrhenius plot ระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$ ของ ปฏิกิริยาการขจัดอาหารต้านทานหันแม่เมาะ 3 ด้วยสารละลายคอปเปอร์ ซัลเฟต 20 %

4.2.3 การศึกษาขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วการทำปฏิกิริยากับไฟไรต์ของถ่านหิน เหมืองแม่เมาะ

ในการอธิบายลำดับขั้นตอนในการเข้าทำปฏิกิริยาของคอปเปอร์ (II) อีออนจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ภายใต้อุณหภูมิคงที่ทางคณิตศาสตร์ คือ shrinking core model โดยสมมุติว่าอนุภาคของถ่านหินมีขนาดคงที่ในระหว่างเกิดปฏิกิริยา ซึ่งขั้นตอนในการเกิดปฏิกิริยาประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการแพร่ของคอปเปอร์ (II) อีออน ผ่านชั้นฟิล์ม (Diffusion through film layer) อีกขั้นตอนเป็นการแพร่ผ่านชั้นเถ้าเข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา (Diffusion through ash layer) และขั้นตอนปฏิกิริยาของคอปเปอร์ (II) อีออนกับไฟไรต์ที่แกนกลาง

เมื่อพิจารณาขั้นตอนทั้งสามตามสมการที่ (2.11)(2.19) และ (2.25) แล้วนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการเปลี่ยนของไฟไรต์ของแต่ละขั้นตอนกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ (4.39)(4.40)(4.41) และ (4.42) พบว่าขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นเถ้าเข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาให้ผลสอดคล้องตามสมการได้ดีกว่าขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม และขั้นตอนปฏิกิริยาของคอปเปอร์ (II) อีออนกับไฟไรต์ที่แกนกลาง พิจารณาจากค่ากำลังสองสัมประสิทธิ์สหพันธ์ (R-Square) r^2 ของขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นเถ้าเข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยามีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด ดังนั้นขั้นตอนที่เป็นตัวควบคุมอัตราเร็วการเข้าทำปฏิกิริยาของคอปเปอร์ (II) อีออนเป็นไฟไรต์ คือขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นเถ้าของคอปเปอร์ (II) อีออนเข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา แต่ปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันไฟไรต์ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตไม่ได้เกิดจากขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นเถ้าเข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาเพียงขั้นตอนเดียว ซึ่งปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นทั้งสามขั้นตอนที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จากผลการทดลองแสดงว่าขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นเถ้าของคอปเปอร์ (II) อีออนเข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนหนึ่งที่ช้าที่สุด ดังนั้นอัตราเร็วของปฏิกิริยาจึงขึ้นอยู่กับขั้นตอนนี้

จากกราฟเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการเปลี่ยนของไฟไรต์ของขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นเถ้าของคอปเปอร์ (II) อีออนเข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา คือ $1-3(1-X)^{2/3} + 2(1-X)$ กับเวลา ดังรูปที่ (4.39)(4.40) และ (4.42) ความชันของเส้นตรงคือ $1/\tau$ ซึ่งจะนำไปหาค่าการแพร่ประสิทธิผล (effective diffusivity, D_e) ของแต่ละอุณหภูมิที่ทำการทดลอง คือ 120, 140 และ 150 °C ซึ่งค่าการแพร่ประสิทธิผลนี้ต้องอาศัยสมการ

$$t/\tau = 1-3(1-X)^{2/3} + 2(1-X) \quad (4.7)$$

โดย

$$\tau = \rho_B R^2 / 6bDeC_{AL} \quad (4.8)$$



$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \rho_B &= 26.9 \text{ กิโลกรัม/ม}^3 \\ R_1 &= 1 \times 10^{-4} \text{ เมตร} \\ b &= 0.143 \end{aligned}$$

ค่าการแพร่ประสิทธิผล (De) ของก้อนหินเหมืองแม่เมาะของแต่ละอุณหภูมิที่ทำการทดลองแสดงในตารางที่ 4.11 ซึ่งค่า De ที่ได้นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln De$ กับ $1/T$ ตามสมการของ Arrhenius

$$De = De_0 \exp(-E/RT) \quad (4.9)$$

ได้กราฟเส้นตรงมีความชันเท่ากับ $-E/R$ แสดงในตารางที่ 4.12 ซึ่งค่านี้ไปหาค่าพลังงานกระตุ้นจากกราฟรูปที่ (4.43) (4.44) และ (4.45) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln De$ กับ $1/T$ ในปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันไพไรต์ในก้อนหินแม่เมาะ 1 ไร่ ความเข้มข้นสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10% และ 20% และแม่เมาะ 3 ไร่ ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ตามลำดับ ได้กราฟเส้นตรงมีความชันเท่ากับ $-E/R$ ซึ่งนำไปหาค่าพลังงานกระตุ้นของการแพร่ของคอปเปอร์ (II) อีออน เข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าการแพร่ประสิทธิผล (De) ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ

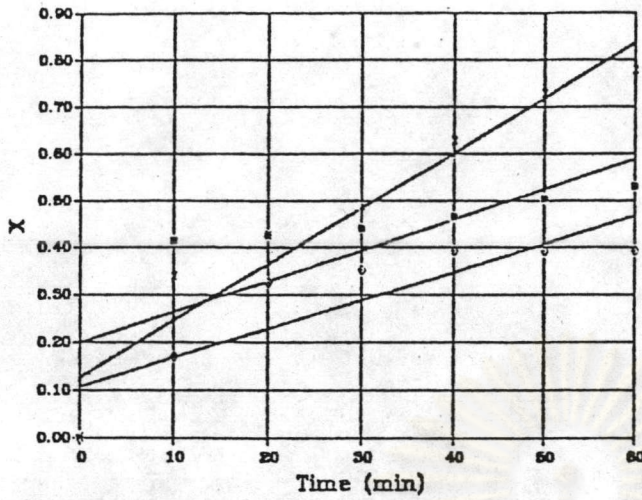
ถ่านหิน	ขนาดถ่านหิน (ไมครอน)	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้นของ สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (%, น้ำหนักต่อปริมาตร)	$1/\tau$ (วินาที) ⁻¹	τ (วินาที)	De (ม ² /วินาที)
แม่เมาะ 1	150-250	120	10	1.952×10^{-5}	5.123×10^4	9.768×10^{-12}
		140		2.898×10^{-5}	3.451×10^4	1.450×10^{-11}
		150		9.713×10^{-5}	1.030×10^4	4.858×10^{-11}
แม่เมาะ 1	150-250	120	20	2.845×10^{-5}	3.515×10^4	7.117×10^{-12}
		140		7.743×10^{-5}	1.291×10^4	1.938×10^{-11}
		150		1.495×10^{-4}	6.689×10^3	3.741×10^{-11}
แม่เมาะ 2	150-250	150	20	1.967×10^{-4}	5.084×10^3	4.922×10^{-11}
	250-500			1.400×10^{-4}	7.143×10^3	1.236×10^{-10}
	500-600			1.283×10^{-4}	7.794×10^3	2.427×10^{-10}
แม่เมาะ 3	150-250	120	20	2.423×10^{-5}	4.127×10^4	6.063×10^{-12}
		140		2.982×10^{-5}	3.353×10^4	7.462×10^{-12}
		150		7.618×10^{-5}	1.313×10^4	1.906×10^{-11}



ตารางที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการแพร่ประสิทธิผลและอุณหภูมิของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ

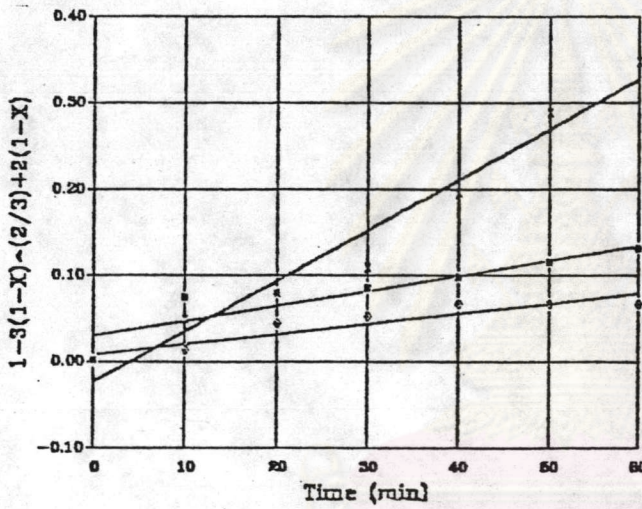
ถ่านหิน	ความเข้มข้นของ สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (%, น้ำหนักต่อปริมาตร)	De_0	$-E/R$	$De = De_0 \exp(-E/RT)$
แม่เมาะ 1	10	6.99×10^{-3}	8083.33	$De = 6.99 \times 10^{-3} \exp(-67.20 \times 10^3 / RT)$
แม่เมาะ 1	20	7.49×10^{-2}	9095.24	$De = 7.49 \times 10^{-2} \exp(-75.62 \times 10^3 / RT)$
แม่เมาะ 3	20	1.11×10^{-5}	5726.19	$De = 1.11 \times 10^{-5} \exp(-47.61 \times 10^3 / RT)$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



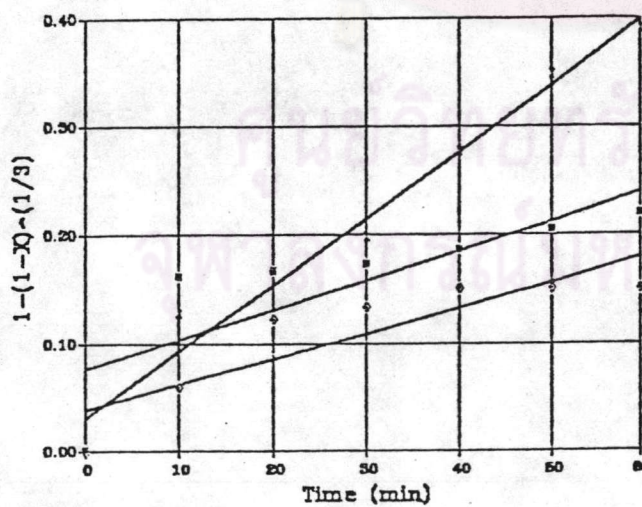
Diffusion through film controls

X		
120°C	R-Square	0.7515
◇	Std. Err. of Prediction	0.0815
	Value of Coefficient A1	0.0060
140°C	R-Square	0.6026
■	Std. Err. of Prediction	0.1233
	Value of Coefficient A1	0.0064
150°C	R-Square	0.9217
x	Std. Err. of Prediction	0.0812
	Value of Coefficient A1	0.0118



Diffusion through ash layer controls

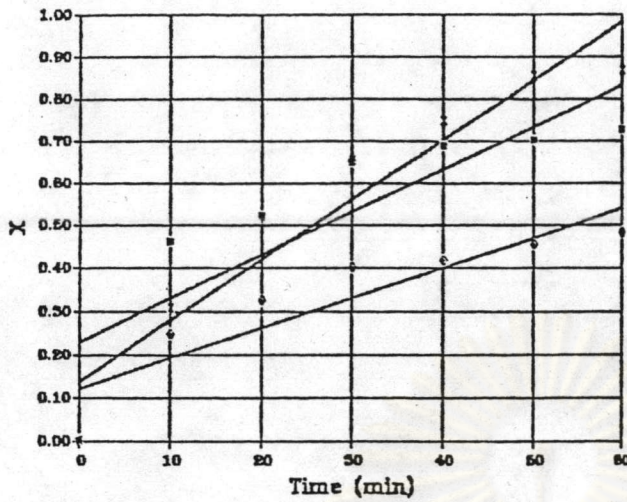
$1-3(1-X)^{2/3} + 2(1-X)$		
120°C	R-Square	0.8585
◇	Std. Err. of Prediction	0.0112
	Value of Coefficient A1	0.0012
140°C	R-Square	0.8260
■	Std. Err. of Prediction	0.0189
	Value of Coefficient A1	0.0017
150°C	R-Square	0.9618
x	Std. Err. of Prediction	0.0275
	Value of Coefficient A1	0.0058



Chemical reaction controls

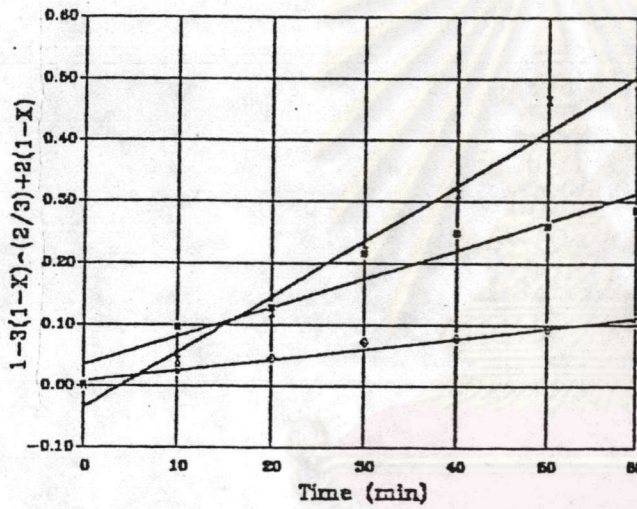
$1-(1-X)^{1/3}$		
120°C	R-Square	0.7713
◇	Std. Err. of Prediction	0.0304
	Value of Coefficient A1	0.0024
140°C	R-Square	0.6530
■	Std. Err. of Prediction	0.0469
	Value of Coefficient A1	0.0027
150°C	R-Square	0.9739
x	Std. Err. of Prediction	0.0237
	Value of Coefficient A1	0.0061

รูปที่ 4.39 กราฟแสดงการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาฟารด์ ของถ่านหินแม่เมาะ 1 ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10 % ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °ซ



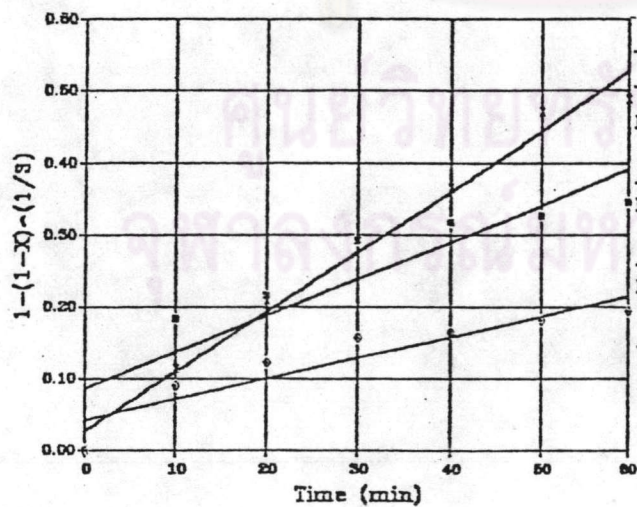
Diffusion through film controls

X		
120°C	R-Square	0.8127
◊	Std. Err. of Prediction	0.0789
	Value of Coefficient A1	0.0069
140°C	R-Square	0.7257
■	Std. Err. of Prediction	0.1458
	Value of Coefficient A1	0.0100
150°C	R-Square	0.9148
x	Std. Err. of Prediction	0.1014
	Value of Coefficient A1	0.0140



Diffusion through ash layer controls

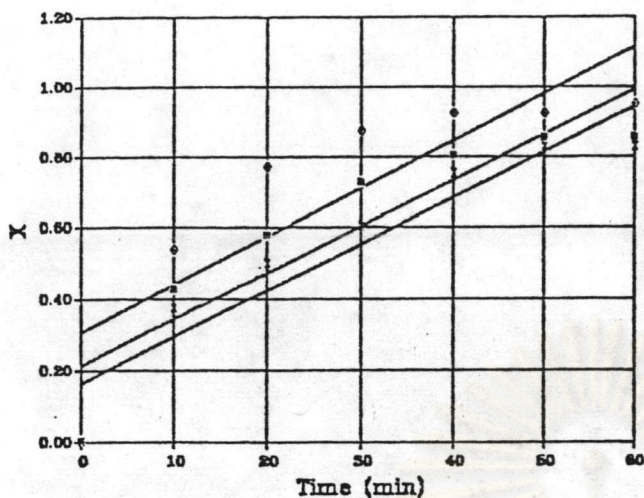
$1-3(1-X)^{2/3} + 2(1-X)$		
120°C	R-Square	0.9731
◊	Std. Err. of Prediction	0.0067
	Value of Coefficient A1	0.0017
140°C	R-Square	0.9321
■	Std. Err. of Prediction	0.0297
	Value of Coefficient A1	0.0046
150°C	R-Square	0.9771
x	Std. Err. of Prediction	0.0325
	Value of Coefficient A1	0.0090



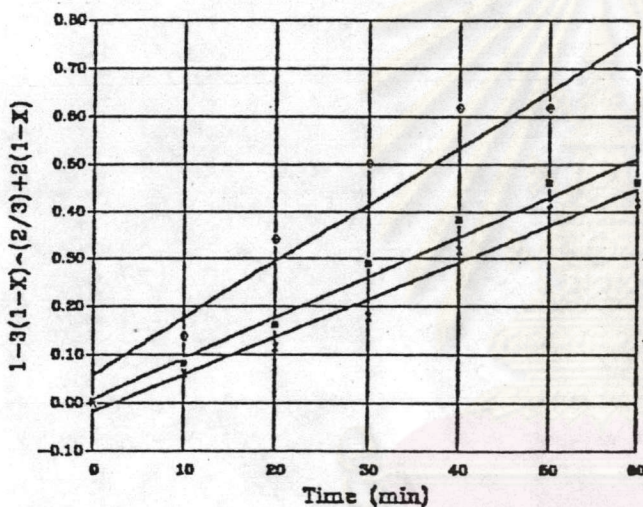
Chemical reaction controls

$1-(1-X)^{1/3}$		
120°C	R-Square	0.8582
◊	Std. Err. of Prediction	0.0277
	Value of Coefficient A1	0.0029
140°C	R-Square	0.8188
■	Std. Err. of Prediction	0.0564
	Value of Coefficient A1	0.0051
150°C	R-Square	0.9816
x	Std. Err. of Prediction	0.0269
	Value of Coefficient A1	0.0083

รูปที่ 4.40 กราฟแสดงการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาพาร์ต
 ของถ่านหินแม่เมาะ 1 ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20 %
 ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °ซ



Diffusion through film Controls		
X		
150-250 μm ○	R-Square	0.7140
	Std. Err. of Prediction	0.2017
	Value of Coefficient A1	0.0135
250-500 μm ■	R-Square	0.8208
	Std. Err. of Prediction	0.1432
	Value of Coefficient A1	0.0129
500-600 μm x	R-Square	0.8867
	Std. Err. of Prediction	0.1095
	Value of Coefficient A1	0.0129

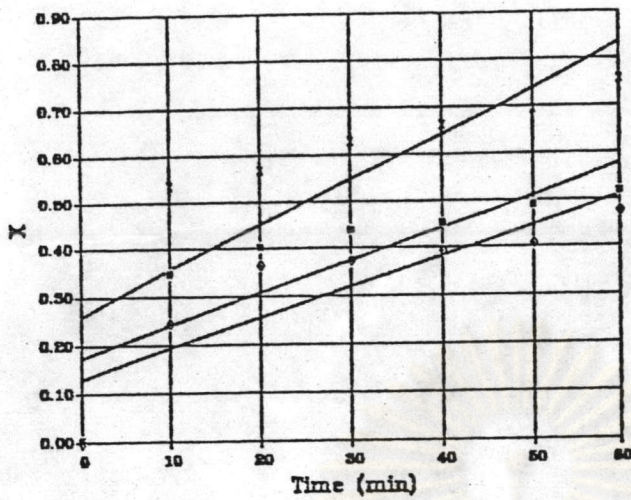


Diffusion through ash layer controls		
$1-3(1-X)^{2/3} + 2(1-X)$		
150-250 μm ○	R-Square	0.9331
	Std. Err. of Prediction	0.0751
	Value of Coefficient A1	0.0118
250-500 μm ■	R-Square	0.9688
	Std. Err. of Prediction	0.0357
	Value of Coefficient A1	0.0084
500-600 μm x	R-Square	0.9653
	Std. Err. of Prediction	0.0347
	Value of Coefficient A1	0.0077



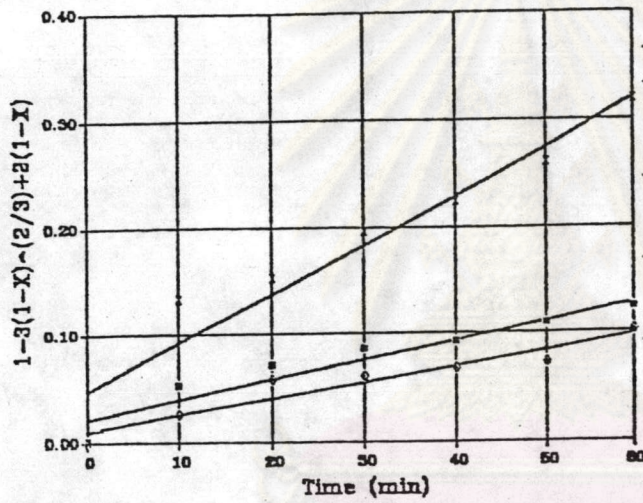
Chemical reaction Controls		
$1-(1-X)^{1/3}$		
150-250 μm ○	R-Square	0.8806
	Std. Err. of Prediction	0.0858
	Value of Coefficient A1	0.0098
250-500 μm ■	R-Square	0.9241
	Std. Err. of Prediction	0.0522
	Value of Coefficient A1	0.0077
500-600 μm x	R-Square	0.9582
	Std. Err. of Prediction	0.0364
	Value of Coefficient A1	0.0074

รูปที่ 4.41 กราฟแสดงการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาฟาร์ต ของก้อนหินแม่เมาะ 2 ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20 % ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °ซ



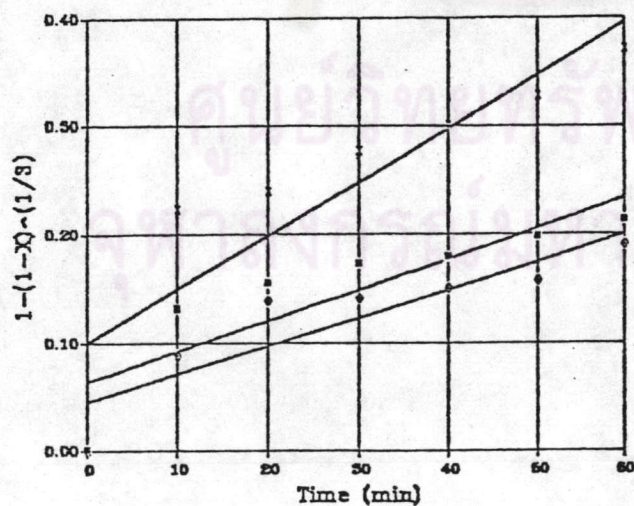
Diffusion through film controls

X		
120°C	R-Square	0.7563
◊	Std. Err. of Prediction	0.0850
	Value of Coefficient A1	0.0063
140°C	R-Square	0.6882
■	Std. Err. of Prediction	0.1068
	Value of Coefficient A1	0.0067
150°C	R-Square	0.6657
x	Std. Err. of Prediction	0.1598
	Value of Coefficient A1	0.0095



Diffusion through ash layer controls

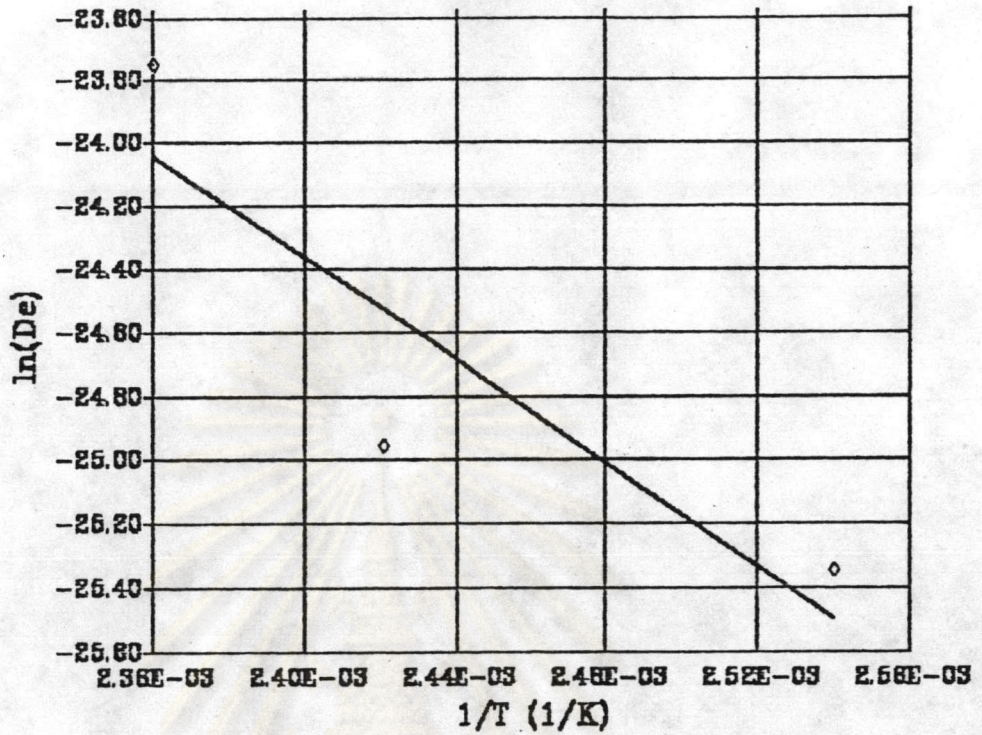
$1-3(1-X)^{2/3}+2(1-X)$		
120°C	R-Square	0.9120
◊	Std. Err. of Prediction	0.0107
	Value of Coefficient A1	0.0014
140°C	R-Square	0.9125
■	Std. Err. of Prediction	0.0131
	Value of Coefficient A1	0.0018
150°C	R-Square	0.9295
x	Std. Err. of Prediction	0.0298
	Value of Coefficient A1	0.0046



Chemical reaction controls

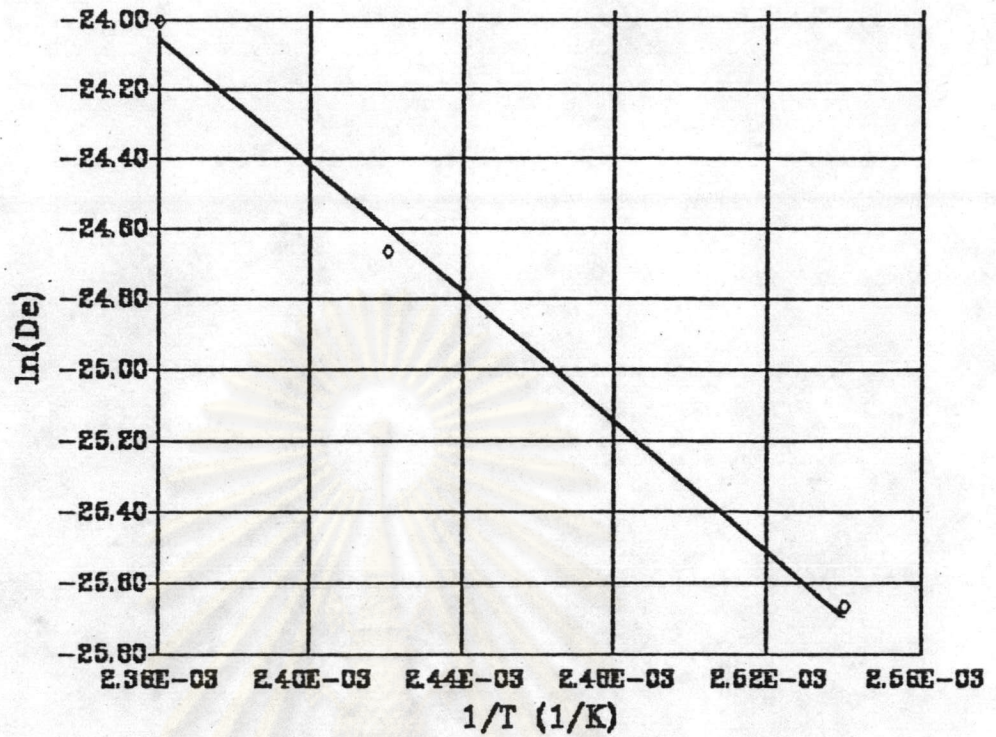
$1-(1-X)^{1/3}$		
120°C	R-Square	0.7974
◊	Std. Err. of Prediction	0.0308
	Value of Coefficient A1	0.0026
140°C	R-Square	0.7448
■	Std. Err. of Prediction	0.0393
	Value of Coefficient A1	0.0028
150°C	R-Square	0.7807
x	Std. Err. of Prediction	0.0617
	Value of Coefficient A1	0.0049

รูปที่ 4.42 กราฟแสดงการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาไฟรต์
ของถ่านหินแม่เมาะ 3 ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20 %
ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °ซ



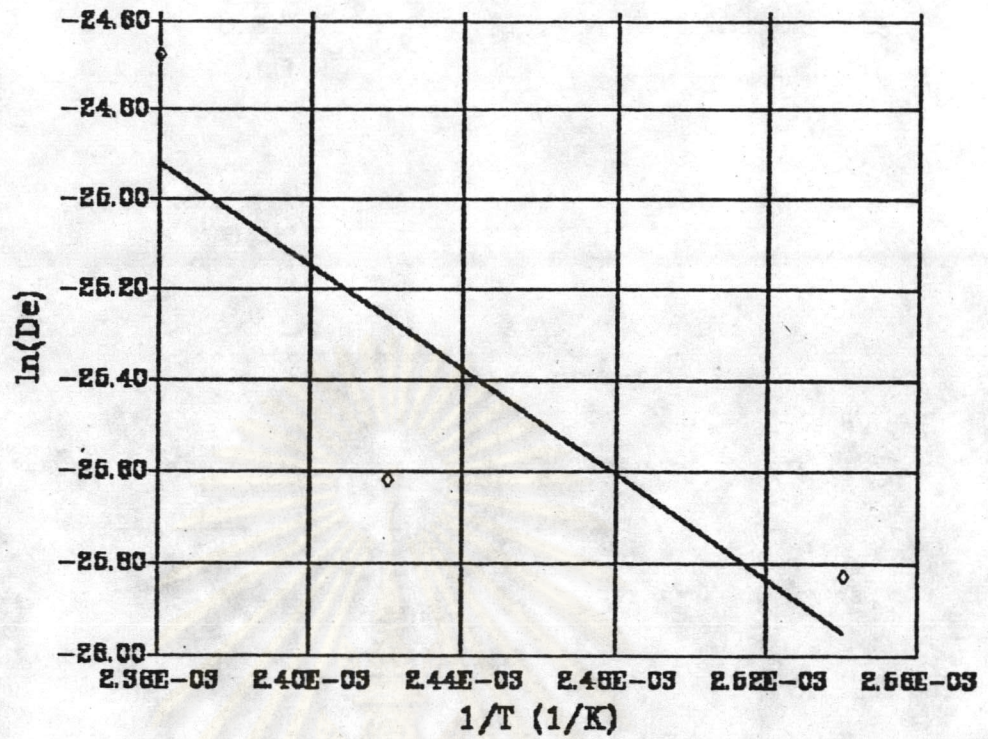
รูปที่ 4.43 แสดงกราฟตามแบบ Arrhenius plot ระหว่าง De กับ $1/T$ ของ
ไพไรต์ก้อนกำหนดหินแม่เกาะ 1 ต้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10% ที่อุณหภูมิ
120 140 และ 150 °C ใช้อาศัย Shrinking core model

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.44 แสดงกราฟตามแบบ Arrhenius plot ระหว่าง De กับ $1/T$ ของ
 ไพร่ดำนํ้าหนักแห้ง 1 ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ
 120 140 และ 150 °C โดยอาศัย Shrinkage core model

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.45 แสดงกราฟตามแบบ Arrhenius plot ระหว่าง D_e กับ $1/T$ ของ
 พาราดีนกำหนดหินแม่เมาะ 3 ตัวอย่างละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ
 120 140 และ 150 °C โดยอาศัย Shrinking core model

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย