

ผลการทดลอง สรุปและวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพถ่านหินโดยการขจัดเถ้าและกำมะถัน ซึ่งอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบดของเหลว สามารถแบ่งงานวิจัยได้เป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อการขจัดเถ้าและกำมะถัน ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกรดซัลฟูริก อัตราการไหลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ขนาดถ่านหิน อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ส่วนที่สองจะเป็นการศึกษาเปรียบเทียบการขจัดเถ้าและกำมะถันของตัวอย่างถ่านหินต่าง ๆ กัน โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และส่วนสุดท้ายจะเป็นการศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีของไพไรต์ และขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วการทำปฏิกิริยาในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การศึกษาองค์ประกอบของถ่านหินจากเหมืองแม่เมาะที่ระดับและตำแหน่งต่าง ๆ กันคือ

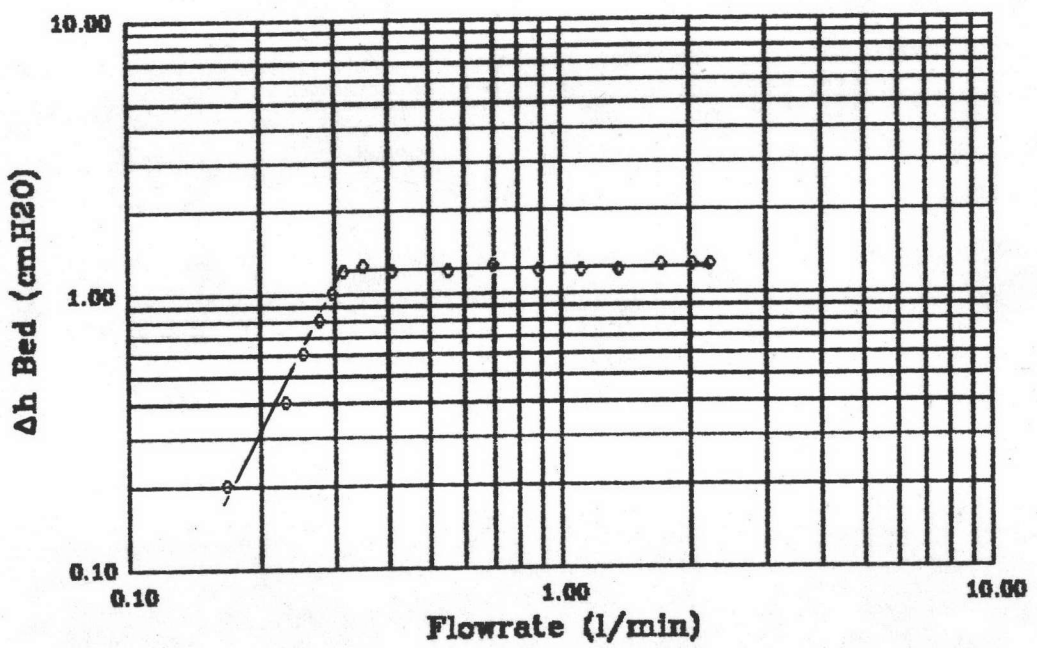
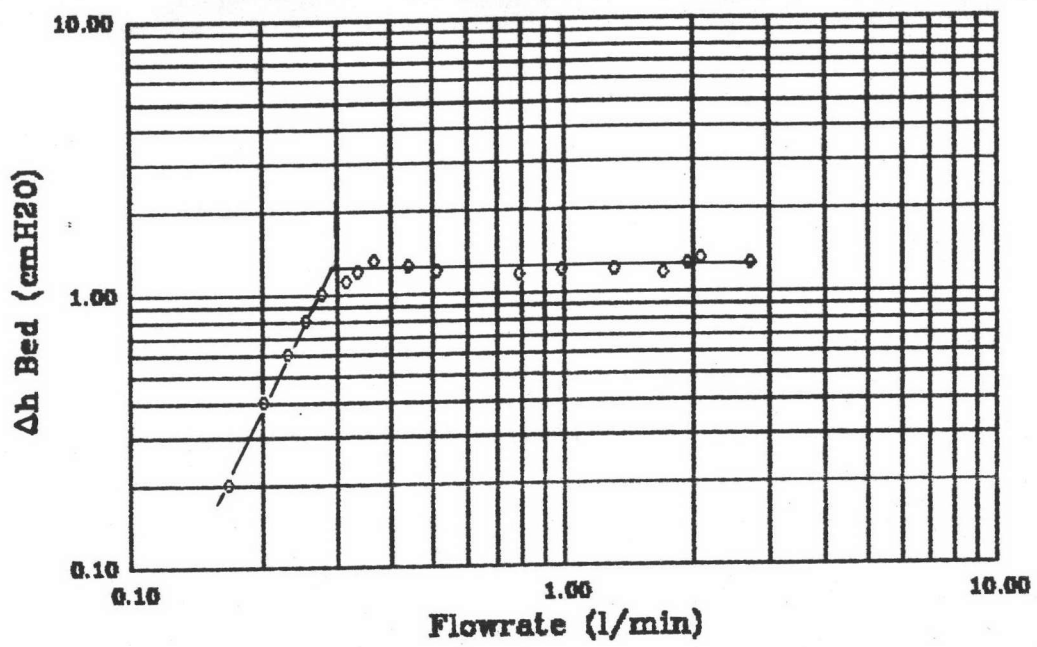
แม่เมาะ 1 ถ่านชั้น Q_1	ตำแหน่ง N 36	W 5.5
แม่เมาะ 2 ถ่านชั้น Q_2	ตำแหน่ง N 35.9	W 5.5
แม่เมาะ 3 ถ่านชั้น Q_3	ตำแหน่ง N 35	W 2
แม่เมาะ 4 ถ่านชั้น Q_4	ตำแหน่ง N 34.8	W 2

ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จะพบว่าถ่านหินแม่เมาะ 1 มีทั้งปริมาณเถ้าและกำมะถันสูงกว่าถ่านหินตัวอย่างอื่น ๆ โดยมีปริมาณเถ้า 46.64 % ปริมาณกำมะถันรวม 12.02 % ปริมาณกำมะถันไพไรต์ 5.33 % ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกถ่านหินแม่เมาะ 1 มาศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อการขจัดเถ้าและกำมะถัน เพื่อที่จะหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบดของเหลวโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ เพราะมีค่าเถ้าและกำมะถันสูงซึ่งจะทำให้เห็นข้อแตกต่างก่อนและหลังปฏิกิริยาได้ชัดเจน

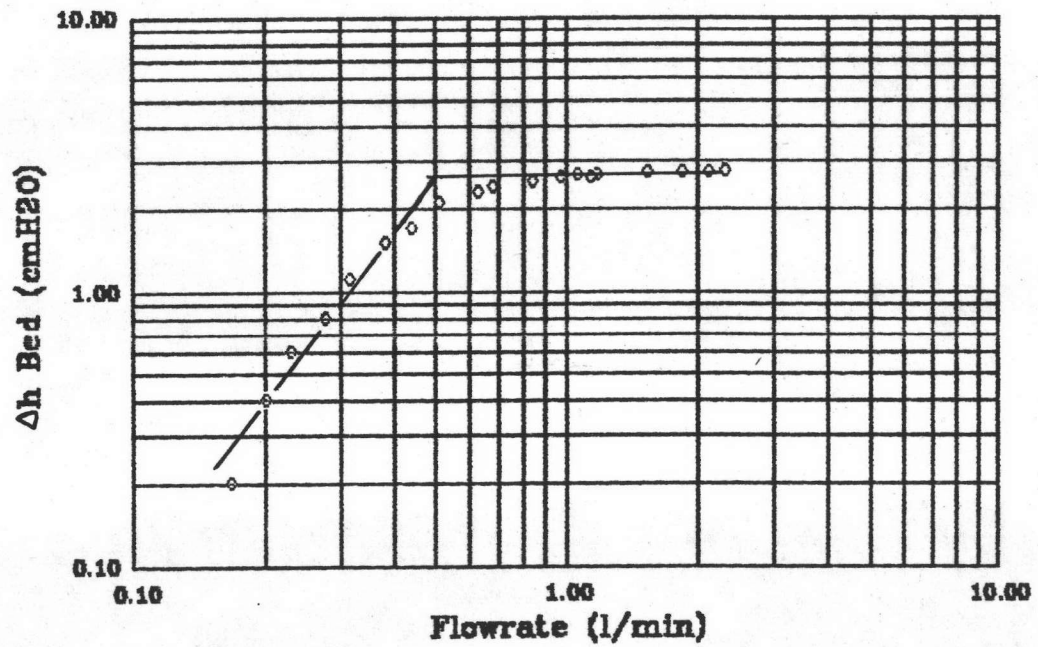
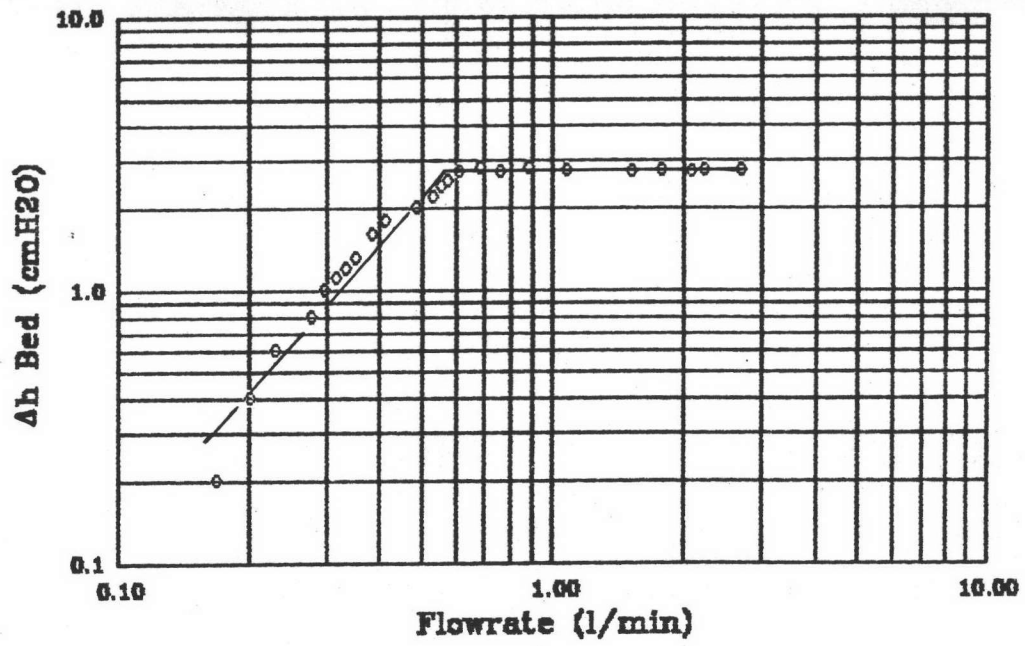
งานวิจัยนี้ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบด ดังนั้นจะหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์ โดยหาในรูปของอัตราการไหลของสารละลายแทน จากการทดลองหาค่าความดันลดของเบด Δh (cm H_2O) กับอัตราการไหลของสารละลาย ที่ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 และ 1.0-2.0 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ จากรูปพบว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์ของถ่านหินขนาด 0.5-1.0 มม. มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.30 ลิตร/นาที่ และของถ่านหินขนาด 1.0-2.0 มม. มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.47 ลิตร/นาที่ ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์นี้จะนำไปใช้เพื่อพิจารณาว่า การทดลองต่อไปนั้นจะใช้อัตราการไหลของสารละลายเป็นกี่เท่าของความเร็วต่ำสุดนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติของถ่านหินเหมืองแม่เมาะที่ระดับชั้นและตำแหน่งต่าง ๆ
(วิเคราะห์แบบไม่รวมความชื้น)

รายการที่ทำการวิเคราะห์ (ข)	แม่เมาะ 1	แม่เมาะ 2	แม่เมาะ 3	แม่เมาะ 4
การวิเคราะห์แบบประมาณ				
สารระเหย	36.72	43.86	46.93	41.44
คาร์บอนคงตัว	16.64	22.89	17.78	24.83
เถ้า	46.64	33.25	35.29	33.73
ความชื้น	(11.67)	(11.58)	(11.63)	(12.29)
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ				
คาร์บอน	22.56	42.76	48.85	50.71
ไฮโดรเจน	2.44	3.43	3.59	3.53
กำมะถัน	12.02	6.20	7.86	6.21
ไนโตรเจน	0.35	1.34	1.54	1.70
เถ้า	46.64	33.25	35.29	33.73
ออกซิเจน (by difference)	15.99	13.02	2.87	4.12
รูปแบบของกำมะถัน				
กำมะถันไพไรต์	5.33	0.70	0.31	0.45
กำมะถันซัลเฟต	4.65	3.98	6.06	4.20
กำมะถันอินทรีย์	2.04	1.52	1.49	1.56
ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม)	2,180	4,131	3,170	3,677



รูปที่ 4.1 และ 4.2 การหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดของถ่านหินขนาด 0.5-1.0 มม.



รูปที่ 4.3 และ 4.4 การหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดซ์ของถ่านหินขนาด 1.0-2.0 มม.

4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไชน์เบดของเหลว

การทดลองนี้ใช้ถ่านหินแม่เมาะ 1 ปริมาณ 150 กรัม ทำปฏิกิริยากับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ คือ ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราการไหลของสารละลาย ขนาดถ่านหิน อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และหาสมบัติของถ่านหินก่อนและหลังปฏิกิริยา เปรียบเทียบและหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไชน์เบดของเหลว

4.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกรดซัลฟูริก

ถ่านหินแม่เมาะ 1 ผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 4, 5 และ 7 % น้ำหนักต่อปริมาตร ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ สำหรับถ่านหินขนาด 1.0-2.0 มม. และ 5, 7 และ 10 % น้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ปริมาณถ่านหินที่ใช้ 150 กรัม อัตราการไหลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.49 ลิตร/นาทีก สำหรับถ่านหินขนาด 1.0-2.0 มม. และ 1.25 ลิตร/นาทีก สำหรับถ่านหินขนาด 0.5-1.0 มม. อุณหภูมิ 20° C ระยะเวลา 60 นาที สมบัติของถ่านหินก่อนและหลังกระบวนการตั้งแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3

ผลของความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการลดปริมาณเถ้าและการเพิ่มค่าความร้อนดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าสำหรับถ่านหินขนาด 1.0-2.0 มม. เมื่อเพิ่มความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 4 % เป็น 7 % ให้ผลร้อยละการลดปริมาณเถ้าเพิ่มจาก 11.29 เป็น 17.45 และสามารถเพิ่มค่าความร้อนได้ร้อยละ 7.27-10.34 สำหรับถ่านหินขนาด 0.5-1.0 มม. เมื่อเพิ่มความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 5 % เป็น 10 % ให้ผลร้อยละการลดปริมาณเถ้าเพิ่มจาก 14.56 เป็น 30.84 และสามารถเพิ่มค่าความร้อนได้ร้อยละ 7.40-14.78

ผลของความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการลดปริมาณกำมะถันในถ่านหินดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าสำหรับถ่านหินขนาด 1.0-2.0 มม. เมื่อเพิ่มความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 4 % เป็น 7 % ให้ผลร้อยละการลดปริมาณกำมะถันซัลเฟตเพิ่มจาก 76.85 เป็น 88.89 ร้อยละการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์เพิ่มจาก 63.93 เป็น 69.93 และร้อยละการลดปริมาณกำมะถันรวมเพิ่มจาก 27.50 เป็น 33.22 สำหรับถ่านหินขนาด 0.5-1.0 มม. เมื่อเพิ่มความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 5% เป็น 10 % ให้ผลร้อยละการลดปริมาณกำมะถันซัลเฟตเพิ่มจาก 90.91 เป็น 94.20 ร้อยละการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์เพิ่มจาก 66.22-73.39 และร้อยละการลดปริมาณกำมะถันรวมเพิ่มจาก 33.39 เป็น 37.72

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ สำหรับถ่านหินทั้งสองขนาด พบว่าร้อยละการลดปริมาณถ่านจะเพิ่มขึ้นพอสมควร แต่ร้อยละการเพิ่มค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ส่วนการลดปริมาณกำมะถันพบว่า สามารถลดกำมะถันซัลเฟตและไพไรต์ได้มากขึ้น และสามารถลดกำมะถันรวมได้พอสมควร ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นคือไปเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่เข้าทำปฏิกิริยามากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น สำหรับถ่านหินขนาด 0.5-1.0 มม. พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถึง 10 % สามารถลดถ่านและกำมะถันได้มากกว่าที่ 7 % เพียงเล็กน้อย แต่ต้องใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากขึ้น และการควบคุมการทดลองยากกว่ามาก ดังนั้นความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมคือ 7 % โดยสามารถลดถ่านได้ร้อยละ 28.08 เพิ่มค่าความร้อนได้ร้อยละ 11.26 ลดกำมะถันซัลเฟตได้ร้อยละ 92.41 ลดกำมะถันไพไรต์ได้ร้อยละ 68.93 และลดกำมะถันรวมได้ร้อยละ 36.12

ตารางที่ 4.2 สมบัติด้านหินแม่เมาะ 1 (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน ที่ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ (%) โดยน้ำหนัก/ปริมาตร ใน 0.05 โมลาร์ กรดซัลฟูริก อัตราการไหลสารละลาย 1.49 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 1.0-2.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลา 60 นาที

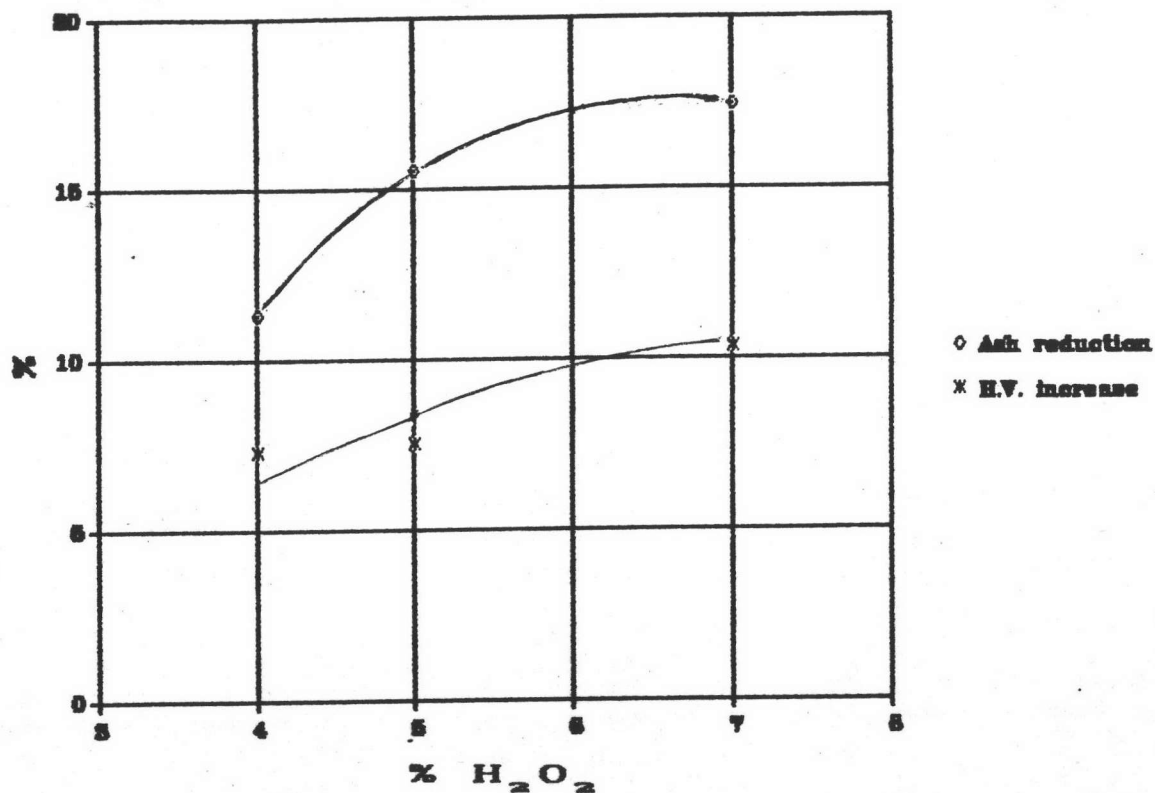
ความเข้มข้นสารละลาย H ₂ O ₂ (%)	ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม)	ร้อยละปริมาณเถ้า	ร้อยละปริมาณ			ร้อยละการลดปริมาณ			ร้อยละการลดปริมาณเถ้า	ร้อยละการเพิ่มค่าความร้อน
			กำมะถันซัลเฟต	กำมะถันไพไรต์	กำมะถันรวม	กำมะถันซัลเฟต	กำมะถันไพไรต์	กำมะถันรวม		
- ^a	3,327	37.64	1.08	3.66	5.89	-	-	-	-	-
4	3,569	33.39	0.25	1.32	4.27	76.85	63.93	27.50	11.29	7.27
- ^a	3,298	36.39	1.10	3.90	5.80	-	-	-	-	-
5	3,546	30.74	0.21	1.23	4.05	80.91	68.46	30.17	15.53	7.52
- ^a	3,171	43.66	1.08	4.49	5.84	-	-	-	-	-
7	3,499	36.04	0.12	1.35	3.90	88.89	69.93	33.22	17.45	10.34

^a สมบัติด้านหินก่อนผ่านกระบวนการ H₂O₂ (หลังจากน้ำ 15 นาที)

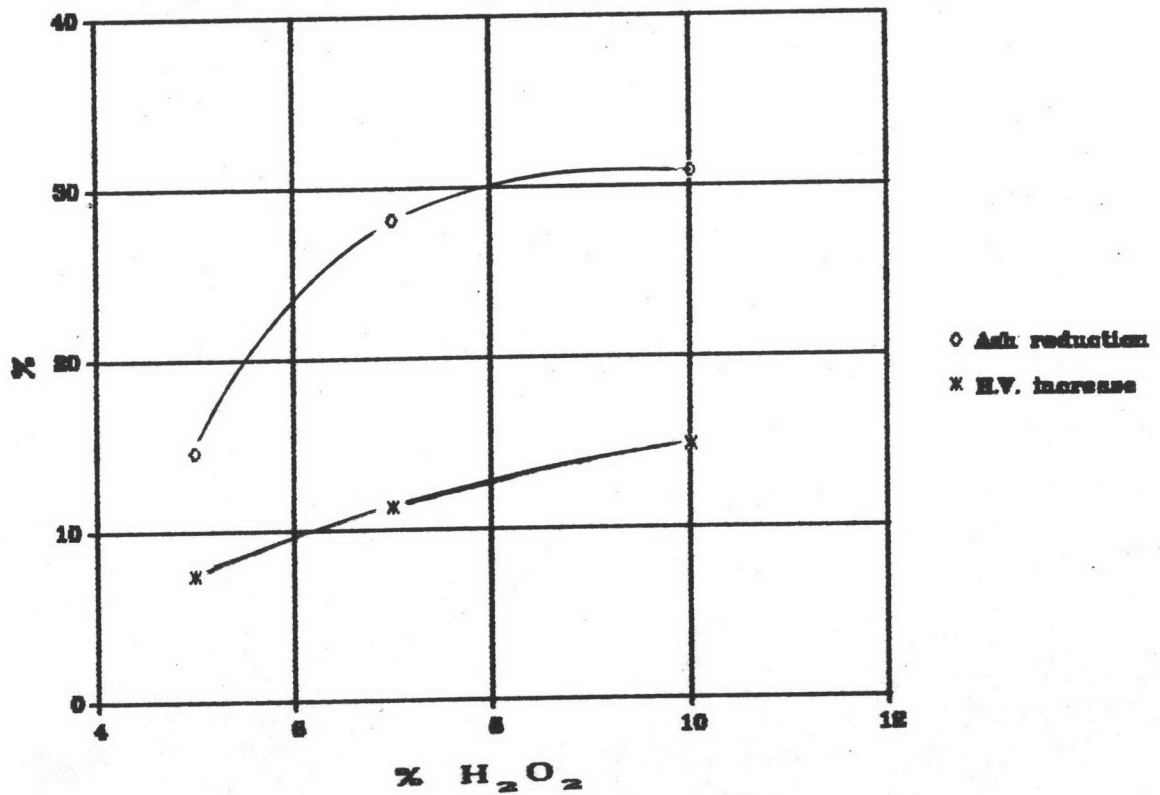
ตารางที่ 4.3 สมบัติด้านหินแม่เมาะ 1 (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน ที่ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ (% โดยน้ำหนัก/ปริมาตร) ใน 0.05 โมลาร์ กรดซัลฟูริก อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดด้านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณด้านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลา 60 นาที

ความเข้มข้นสารละลาย H ₂ O ₂ (%)	ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม)	ร้อยละปริมาณเถ้า	ร้อยละปริมาณ			ร้อยละการลดปริมาณ			ร้อยละการลดปริมาณเถ้า	ร้อยละการเพิ่มค่าความร้อน
			กำมะถันซัลเฟต	กำมะถันไพไรต์	กำมะถันรวม	กำมะถันซัลเฟต	กำมะถันไพไรต์	กำมะถันรวม		
- ^a	3,284	43.69	0.99	2.96	6.14	-	-	-	-	-
5	3,527	37.33	0.09	1.00	4.09	90.91	66.22	33.39	14.56	7.40
- ^a	3,428	44.76	0.79	3.38	6.81	-	-	-	-	-
7	3,814	32.19	0.06	1.05	4.35	92.41	68.93	36.12	28.08	11.26
- ^a	2,855	39.53	0.69	4.36	6.68	-	-	-	-	-
10	3,277	27.34	0.04	1.16	4.16	94.20	73.39	37.72	30.84	14.78

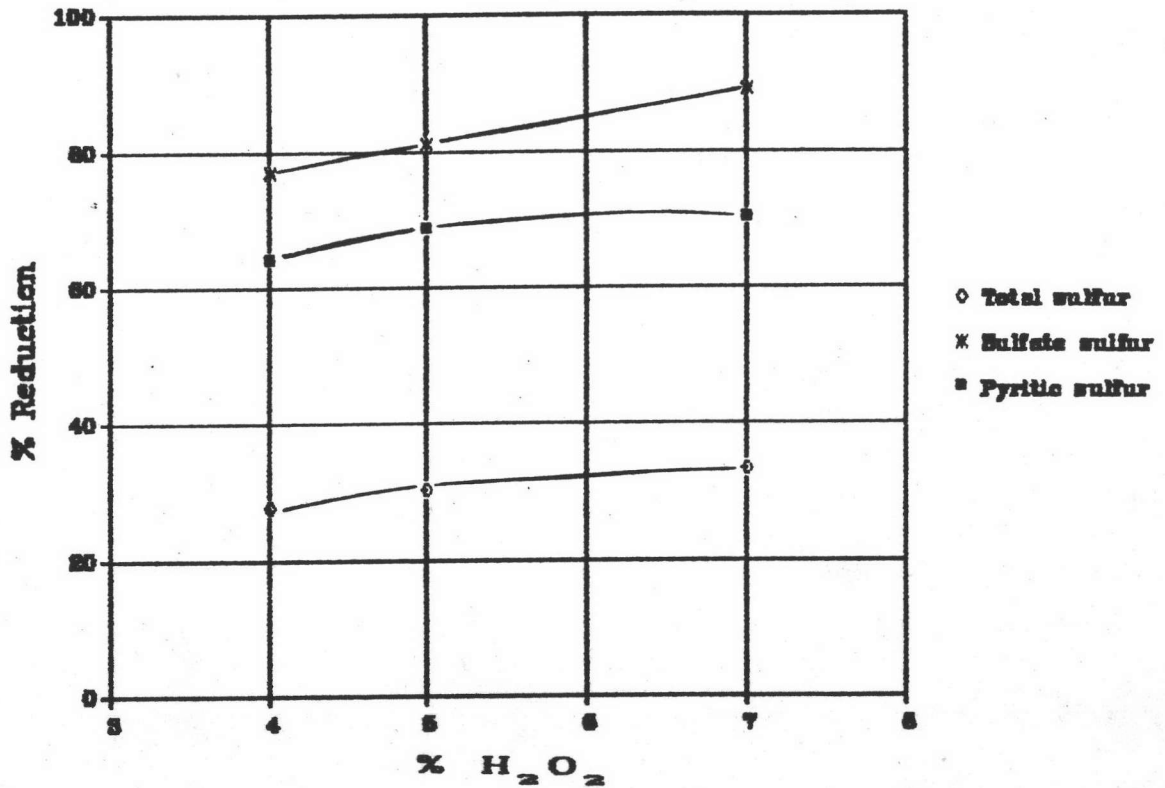
^a สมบัติด้านหินก่อนผ่านกระบวนการ H₂O₂ (หลังจากน้ำ 15 นาที)



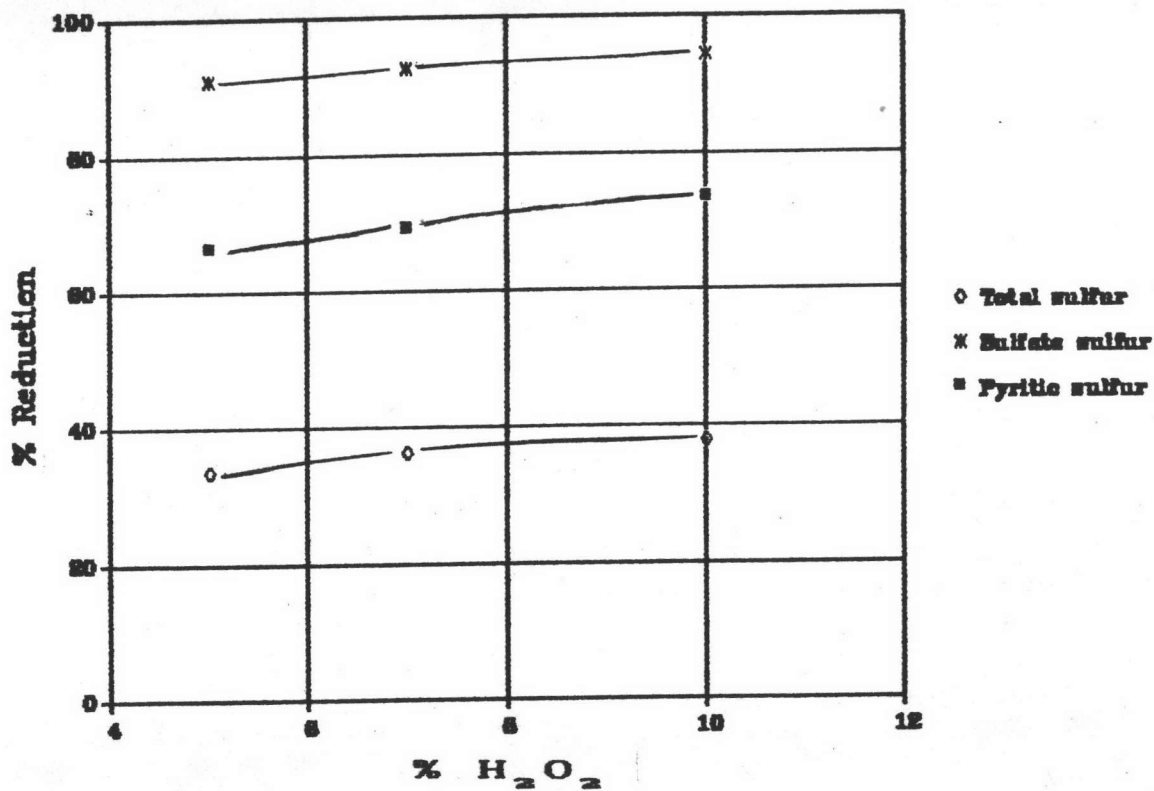
รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ที่มีต่อร้อยละการลดปริมาณเถ้าและการเพิ่มความร้อนของถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (อัตราการไหลสารละลาย 1.49 ลิตรต่อนาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 1.0-2.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลา 60 นาที)



รูปที่ 4.6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ที่มีต่อร้อยละการลดปริมาณเถ้าและการเพิ่มค่าความร้อนของถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตรต่อนาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลา 60 นาที)



รูปที่ 4.7 ผลของความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ที่มีต่อร้อยละการลดปริมาณกำมะถันชนิดต่าง ๆ ถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้า และกำมะถัน (อัตราการไหลสารละลาย 1.49 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 1.0-2.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลาดำเนินการ 60 นาที)



รูปที่ 4.8 ผลของความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ที่มีต่อร้อยละการลดปริมาณกำมะถันชนิดต่าง ๆ ผ่านหินแม่เมาะ 1 หลังจากกระบวนการขจัดเถ้า และกำมะถัน (อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลา 60 นาที)

4.1.2 ผลของอัตราการไหลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ถ่านหินแม่เมาะ 1 ผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % น้ำหนักต่อปริมาตร ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ เปลี่ยนค่าอัตราการไหลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.06, 1.25 และ 1.49 ลิตร/นาที่ ตามลำดับ (คิดเป็น 3.53, 4.17 และ 4.97 เท่าของค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดซ์) ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ถ่านหินขนาด 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ และระยะเวลา 60 นาที สมบัติถ่านหินก่อนและหลังกระบวนการดังแสดงในตารางที่ 4.4

ผลของอัตราการไหลสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการลดเถ้า และการเพิ่มค่าความร้อนดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 1.06-1.49 ลิตร/นาที่ ให้ผลร้อยละการลดปริมาณเถ้าเพิ่มจาก 17.83 เป็น 28.09 และสามารถเพิ่มค่าความร้อนได้ร้อยละ 9.32-12.76

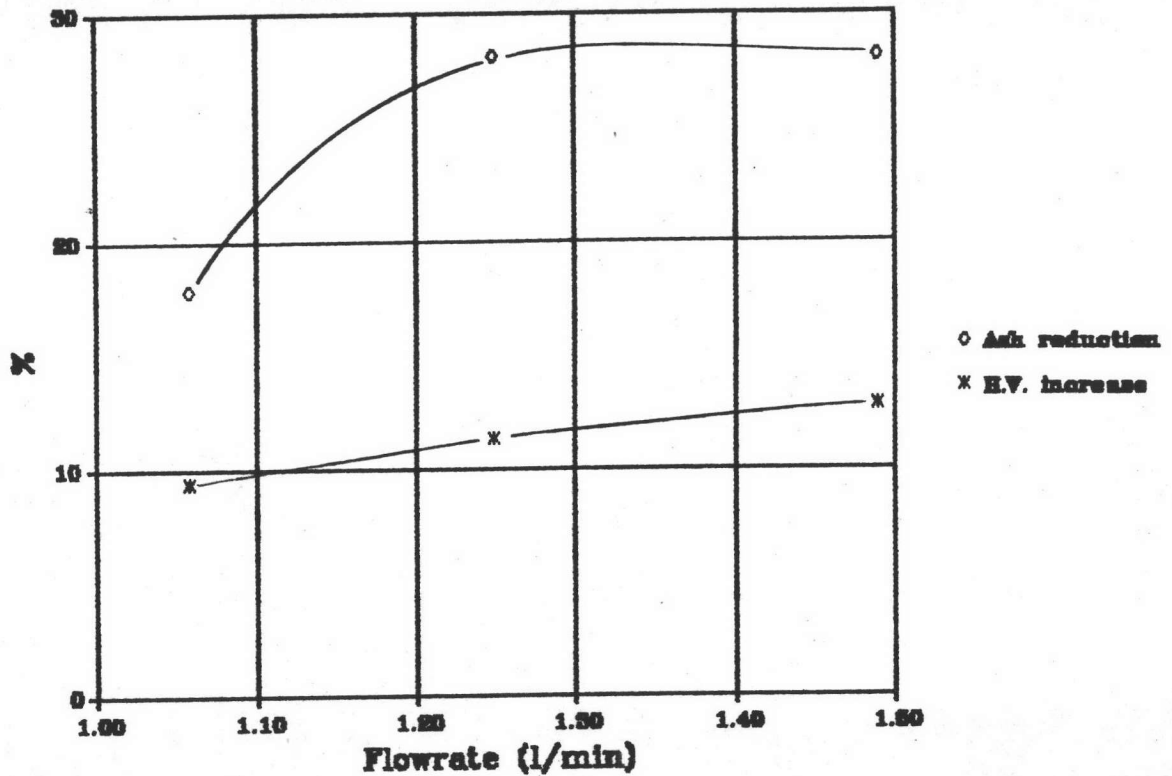
ผลของอัตราการไหลสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อการลดปริมาณกำมะถันชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 1.06 เป็น 1.49 ลิตร/นาที่ ให้ผลร้อยละการลดปริมาณกำมะถันซัลเฟตเพิ่มจาก 90.00 เป็น 92.41 ร้อยละการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์เพิ่มจาก 54.17 เป็น 70.39 และร้อยละการลดปริมาณกำมะถันรวมเพิ่มจาก 35.44 เป็น 37.61

จากผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่า การลดเถ้าและกำมะถัน ตลอดจนการเพิ่มค่าความร้อนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลถึง 1.49 ลิตร/นาที่ พบว่าการลดเถ้าและกำมะถันมีค่าใกล้เคียงกันกับที่อัตราการไหล 1.25 ลิตร/นาที่ เพราะเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายเป็นการเพิ่มการปั่นป่วนในเขตทำให้การแพร่ของก๊าซออกซิเจนดีขึ้นเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น แต่ถ้าเพิ่มอัตราการไหลมากเกินไปจะทำให้เม็ดถ่านหินบางส่วนจะหลุดลอยออกจากเขตได้ ดังนั้นอัตราการไหลที่เหมาะสมคือ 1.25 ลิตร/นาที่ โดยให้ร้อยละการลดปริมาณเถ้า 28.08 เพิ่มค่าความร้อนได้ร้อยละ 11.26 ลดกำมะถันซัลเฟตได้ร้อยละ 92.41 ลดกำมะถันไพไรต์ได้ร้อยละ 68.93 และลดกำมะถันรวมได้ร้อยละ 36.12

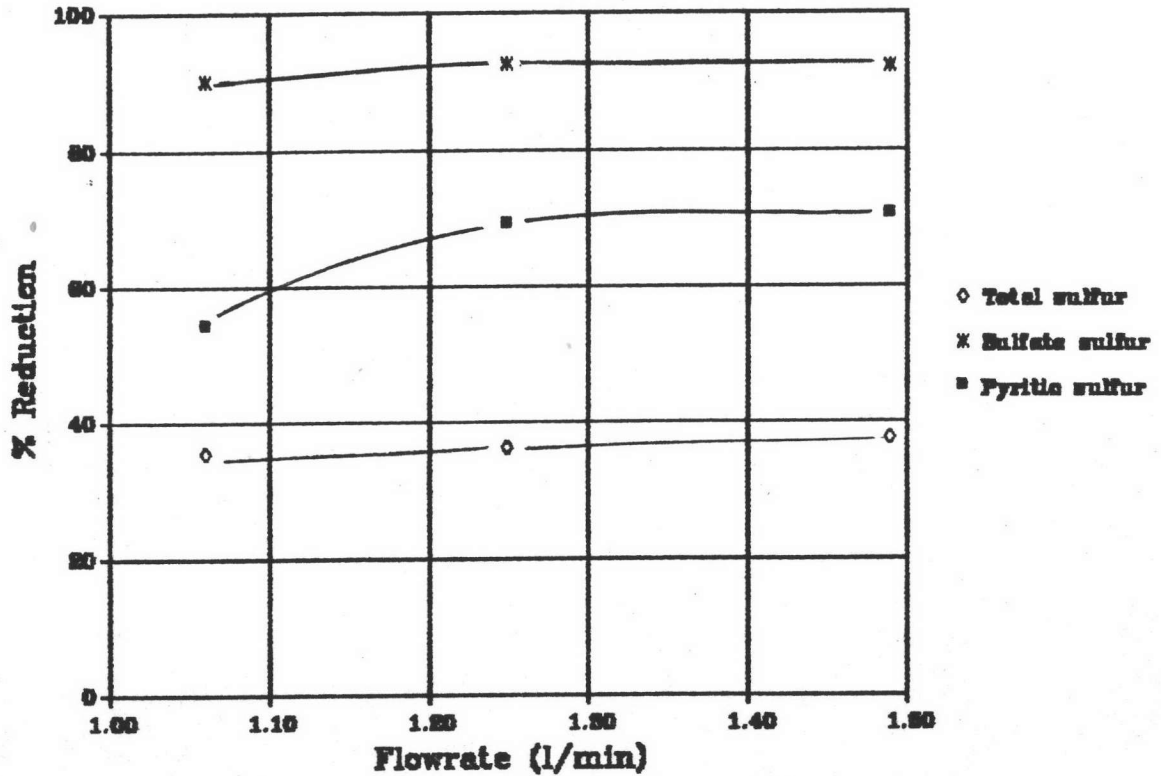
ตารางที่ 4.4 สมบัติถ่านหินแม่เมาะ 1 (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน ที่ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนัก/ปริมาตร ใน 0.05 โมลาร์ กรดซัลฟูริก อัตราการไหลสารละลายต่าง ๆ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลา 60 นาที

อัตราการไหลสารละลาย H ₂ O ₂ (ลิตร/นาที)	ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม)	ร้อยละปริมาณเถ้า	ร้อยละปริมาณ			ร้อยละการลดปริมาณ			ร้อยละการลดปริมาณเถ้า	ร้อยละการเพิ่มค่าความร้อน
			กำมะถันซัลเฟต	กำมะถันไพไรต์	กำมะถันรวม	กำมะถันซัลเฟต	กำมะถันไพไรต์	กำมะถันรวม		
- ^a	3,368	43.69	1.00	2.16	6.66	-	-	-	-	-
1.06	3,682	35.90	0.10	0.99	4.30	90.00	54.17	35.44	17.83	9.32
- ^a	3,428	44.76	0.79	3.38	6.81	-	-	-	-	-
1.25	3,814	32.19	0.06	1.05	4.35	92.41	68.93	36.12	28.08	11.26
- ^a	3,095	44.82	0.88	3.31	6.54	-	-	-	-	-
1.49	3,490	32.23	0.07	0.98	4.08	92.05	70.39	37.61	28.09	12.76

^a สมบัติถ่านหินก่อนผ่านกระบวนการ H₂O₂ (หลังผ่านน้ำ 15 นาที)



รูปที่ 4.9 ผลของอัตราการไหลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่มีต่อร้อยละการลดปริมาณเถ้าและการเพิ่มค่าความร้อนของถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลา 60 นาที)



รูปที่ 4.10 ผลของอัตราการไหลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่มีต่อร้อยละการลดปริมาณกำมะถันชนิดต่าง ๆ ของถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลา 60 นาที)

4.1.3 ผลของขนาดถ่านหิน

ถ่านหินแม่เมาะ 1 ผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถันโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % น้ำหนักต่อปริมาตร ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.49 ลิตร/นาที่ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ถ่านหินขนาด 0.5-1.0 และ 1.0-2.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ สำหรับขนาดถ่านหินต่างกันมีค่า Umf ต่างกัน ดังนั้นสามารถคำนวณ U/Umf ดังแสดง

ขนาดถ่านหิน (มม.)	อัตราการไหลของสารละลายที่ Umf (ลิตร/นาที่)	U/Umf
0.5-1.0	0.30	4.97
1.0-2.0	0.47	3.17

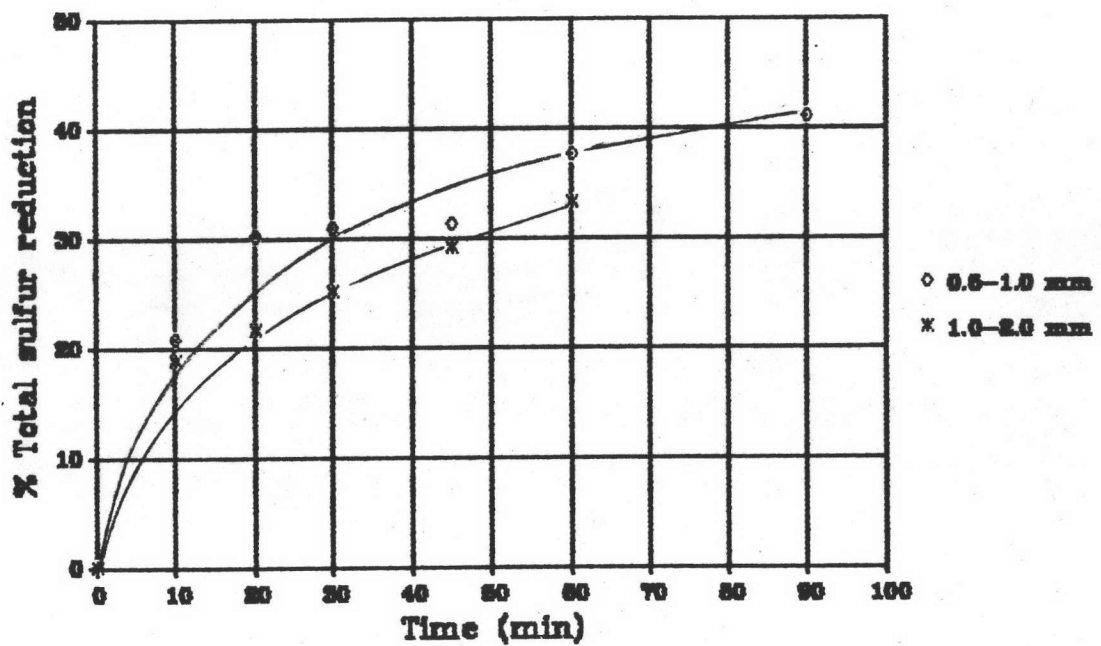
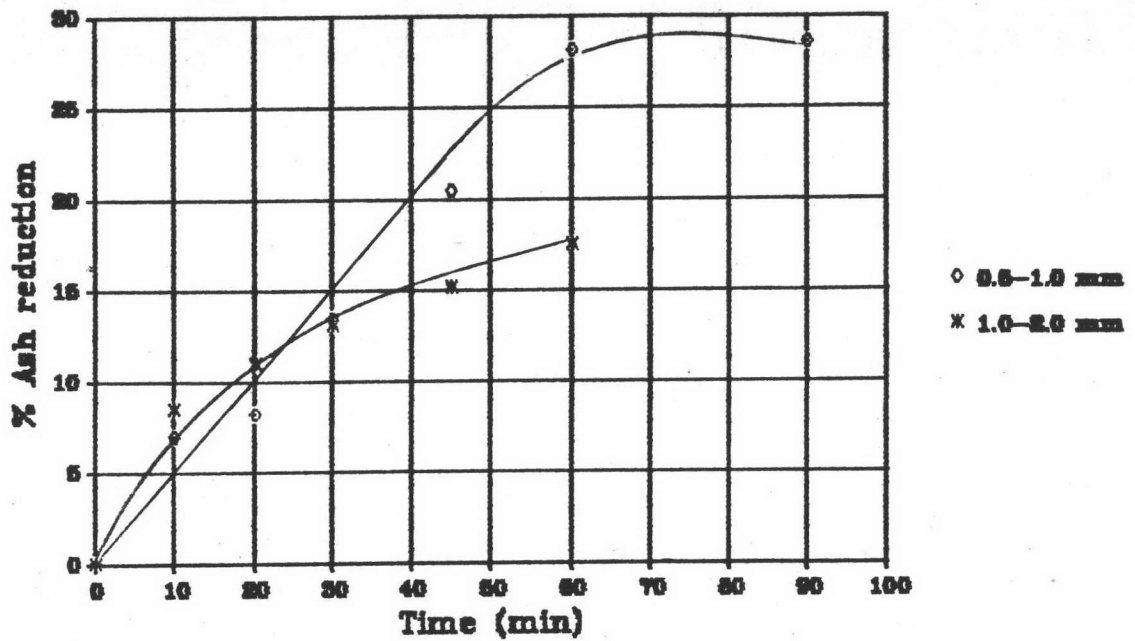
สมบัติถ่านหินก่อนและหลังกระบวนการดังแสดงในตารางที่ 4.5

ผลของขนาดถ่านหินต่อการลดปริมาณเถ้าและกำมะถันดังแสดงในรูปที่ 4.11, 4.12, 4.13 และ 4.14 พบว่าถ่านหินขนาดเล็ก (0.5-1.0 มม.) จะสามารถขจัดเถ้าและกำมะถันได้เร็วและมากกว่าถ่านหินขนาดใหญ่ (1.0-2.0 มม.) โดยจะขจัดได้เร็วในช่วง 20-30 นาทีแรก หลังจากนั้นจะช้าลงเกือบจะคงที่ สำหรับถ่านหินขนาด 0.5-1.0 มม. เวลา 60 นาที สามารถลดปริมาณเถ้าได้ร้อยละ 28.09 ลดกำมะถันซัลเฟตได้ร้อยละ 92.04 ลดกำมะถันไพไรต์ได้ร้อยละ 70.39 และลดกำมะถันรวมได้ร้อยละ 37.61 สำหรับถ่านหินขนาด 1.0-2.0 มม. เวลา 60 นาที สามารถลดปริมาณเถ้าได้ร้อยละ 17.45 ลดกำมะถันซัลเฟตได้ร้อยละ 88.89 ลดกำมะถันไพไรต์ 69.93 และลดกำมะถันรวมได้ร้อยละ 33.22

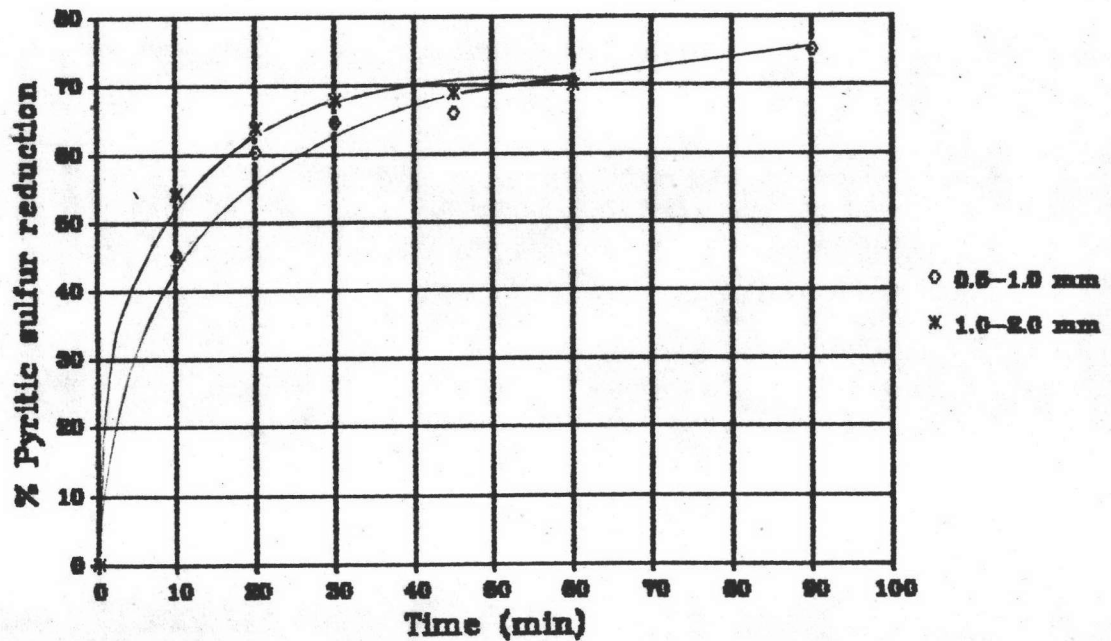
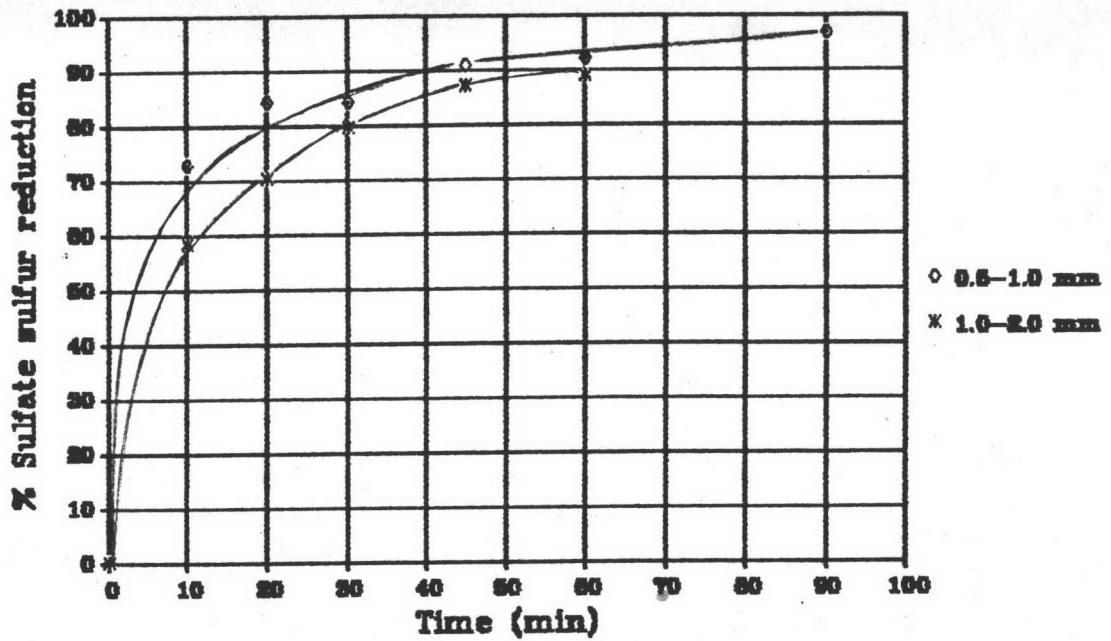
จากผลการทดลองข้างต้น สรุปว่าเมื่อถ่านหินขนาดเล็กจะเกิดปฏิกิริยาได้เร็ว และดีกว่าถ่านหินขนาดใหญ่ ทั้งนี้เพราะว่าถ่านหินขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารละลายมากกว่าถ่านหินขนาดใหญ่จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็ว และแกนกลางของอนุภาคถ่านหินที่มีขนาดเล็ก ก๊าซออกซิเจนยอมเข้าทำปฏิกิริยาได้เร็วและทั่วถึงกว่าอนุภาคถ่านหินขนาดใหญ่ ดังนั้นขนาดถ่านหินที่เหมาะสมควรเป็นถ่านหินขนาดเล็ก คือ 0.5-1.0 มม.

ตารางที่ 4.5 สมบัติถ่านหินแม่เมาะ 1 (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการซังค์ถ่านและกำมะถัน ที่ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % น้ำหนัก/ปริมาตร ใน 0.05 โมลาร์ กรดซัลฟูริก อัตราการไหลสารละลาย 1.49 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 และ 1.0-2.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

เวลา (นาที)	ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม.								ขนาดถ่านหิน 1.0-2.0 มม.							
	ร้อยละ ปริมาณ ถ่าน	ร้อยละปริมาณ			ร้อยละ การลด ปริมาณ ถ่าน	ร้อยละการลดปริมาณ			ร้อยละ ปริมาณ ถ่าน	ร้อยละปริมาณ			ร้อยละ การลด ปริมาณ ถ่าน	ร้อยละการลดปริมาณ		
		กำมะถัน ซัลเฟต	กำมะถัน ไพไรต์	กำมะถัน รวม		กำมะถัน ซัลเฟต	กำมะถัน ไพไรต์	กำมะถัน รวม		กำมะถัน ซัลเฟต	กำมะถัน ไพไรต์	กำมะถัน รวม		กำมะถัน ซัลเฟต	กำมะถัน ไพไรต์	กำมะถัน รวม
0	44.82	0.88	3.31	6.54	-	-	-	-	43.66	1.08	4.49	5.84	-	-	-	-
10	41.71	0.24	1.82	5.18	6.94	72.73	45.02	20.80	39.97	0.45	2.06	4.74	8.45	58.33	54.12	18.84
20	41.15	0.14	1.32	4.57	8.19	84.09	60.12	30.12	38.88	0.32	1.63	4.58	10.95	70.37	63.70	21.58
30	38.83	0.14	1.18	4.52	13.36	84.09	64.35	30.89	37.94	0.22	1.45	4.37	13.10	79.63	67.71	25.17
45	35.68	0.08	1.13	4.50	20.39	90.91	65.86	31.19	37.04	0.14	1.40	4.14	15.16	87.04	68.82	29.11
60	32.23	0.07	0.98	4.08	28.09	92.04	70.39	37.61	36.04	0.12	1.35	3.90	17.45	88.89	69.93	33.22
90	32.04	0.03	0.83	3.86	28.51	96.59	74.92	40.98	-	-	-	-	-	-	-	-



รูปที่ 4.11 และ 4.12 ผลของขนาดถ่านหิน ที่มีต่อร้อยละการลดปริมาณเถ้าและกำมะถันรวมของถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนัก ต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.49 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ)



รูปที่ 4.13 และ 4.14 ผลของขนาดถ่านหิน ที่มีต่อร้อยละการลดปริมาณกำมะถันซัลเฟตและไพไรต์ของถ่านหินแม่เมฆ 1 หลังจากผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันและกำมะถัน (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.49 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ)

4.1.4 ผลของอุณหภูมิ

ถ่านหินแม่เมาะ 1 ผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถันโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % น้ำหนักต่อปริมาตร ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.25 ลิตร/นาที่ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ถ่านหินขนาด 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 10, 20 และ 30°ซ ระยะเวลา 60 นาที สมบัติถ่านหินก่อนและหลังกระบวนการดังแสดงในตารางที่ 4.6

ผลของอุณหภูมิต่อการลดปริมาณเถ้าและการเพิ่มค่าความร้อนดังในรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 10-30°ซ ให้อัตราการลดปริมาณเถ้าเพิ่มจาก 25.79 เป็น 30.05 และสามารถเพิ่มค่าความร้อนได้ร้อยละ 9.12-14.54

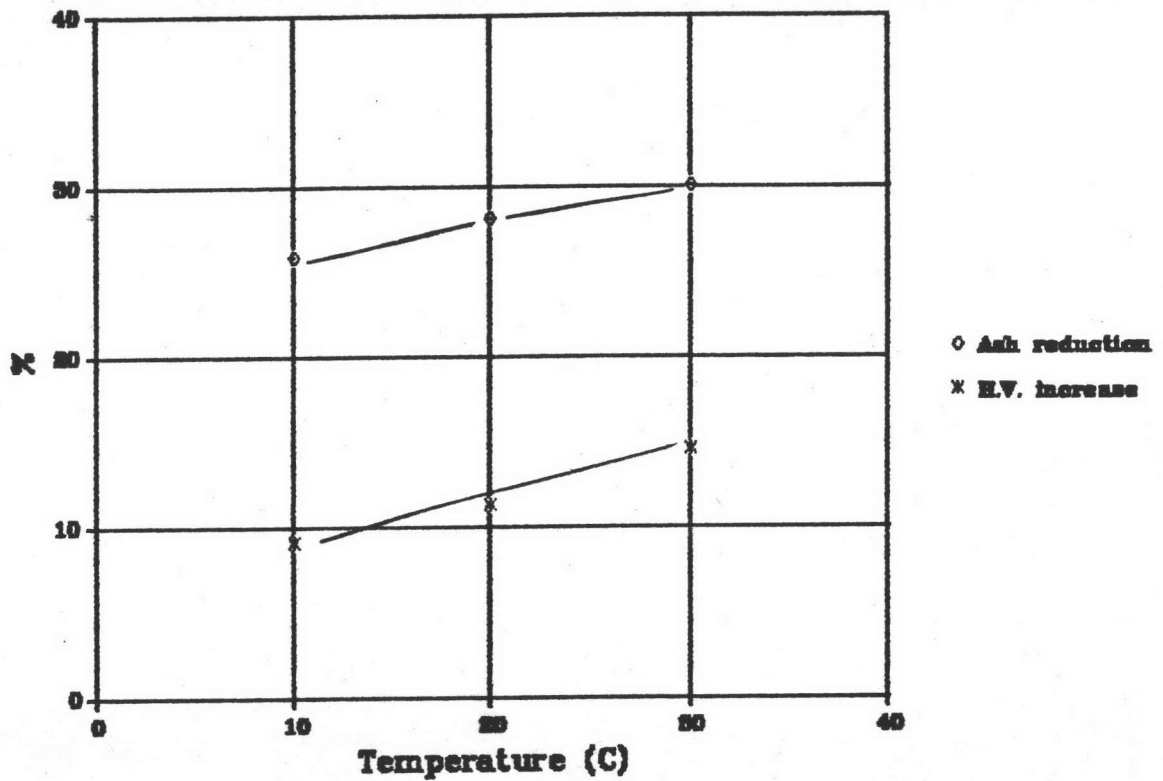
ผลของอุณหภูมิต่อการลดปริมาณกำมะถันในถ่านหินดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 10 เป็น 20°ซ ให้อัตราการลดปริมาณกำมะถันซัลเฟตเพิ่มจาก 79.75 เป็น 94.57 ร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์เพิ่มจาก 66.11 เป็น 72.96 และร้อยละการลดกำมะถันรวมเพิ่มจาก 27.37 เป็น 43.60

จากผลการทดลองข้างต้น สรุปได้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อการขจัดเถ้าและกำมะถันมาก โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นการขจัดเถ้าและกำมะถันจะดีขึ้น เพราะเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ปฏิกิริยาระหว่างไพไรต์กับออกซิเจนเกิดเร็วขึ้น คือทำให้โมเลกุลของไพไรต์มีพลังงานสูงกว่าพลังงานกระตุ้น และการแพร่ของก๊าซออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาที่แกนกลางอนุภาคถ่านหินเกิดได้ดีขึ้น แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิมากเกินไปอาจทำให้มีพลังงานส่วนเกินไปสลายพันธะของอินทรีย์สารในถ่านหิน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 30°ซ พบว่าการขจัดเถ้าและกำมะถันจะใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ 20°ซ ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 20°ซ

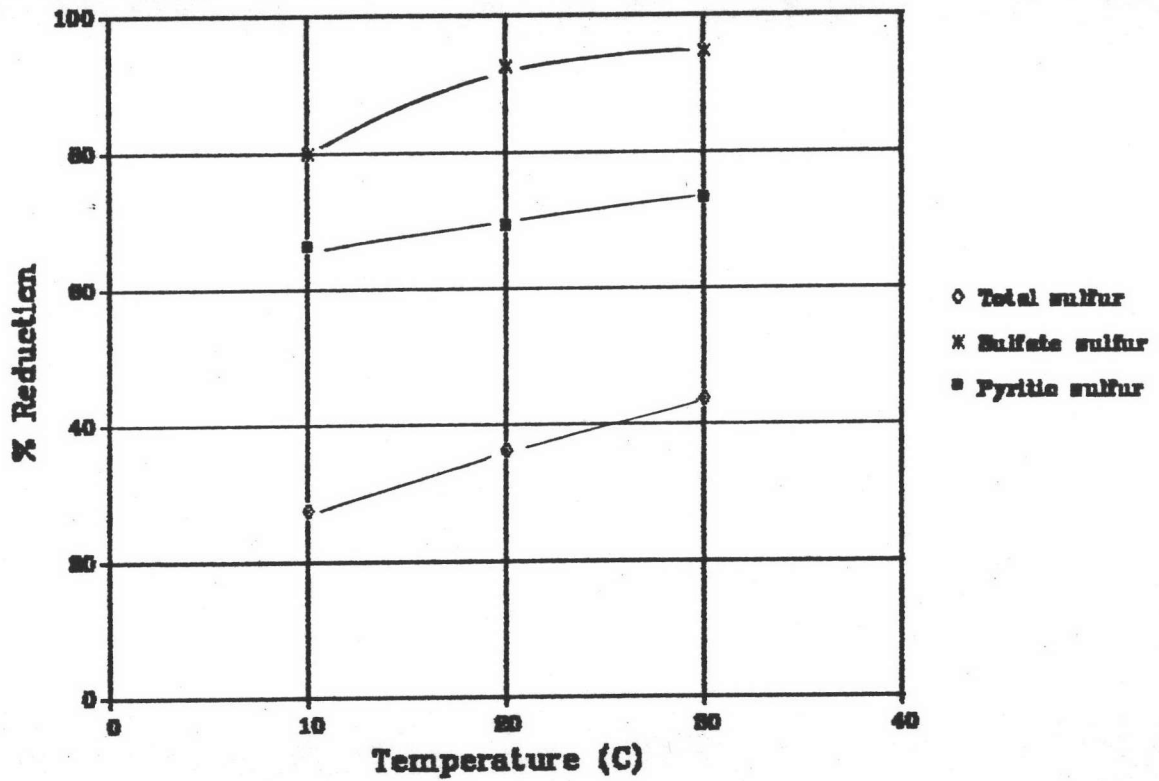
ตารางที่ 4.6 สมบัติถ่านหินแม่เมาะ 1 (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน ที่ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 x โดยน้ำหนัก/ปริมาตร ใน 0.05 โมลาร์ กรดซัลฟูริก อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ระยะเวลา 60 นาที

อุณหภูมิ (°C)	ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม)	ร้อยละ ปริมาณ เถ้า	ร้อยละปริมาณ			ร้อยละการลดปริมาณ			ร้อยละ การลด ปริมาณ เถ้า	ร้อยละ การเพิ่มค่า ความร้อน
			กำมะถัน ซัลเฟต	กำมะถัน ไพไรต์	กำมะถัน รวม	กำมะถัน ซัลเฟต	กำมะถัน ไพไรต์	กำมะถัน รวม		
-	3,346	46.68	0.79	2.98	6.76	-	-	-	-	-
	3,651	34.64	0.16	1.01	4.91	79.75	66.11	27.37	25.79	9.12
20	3,428	44.76	0.79	3.38	6.81	-	-	-	-	-
	3,814	32.19	0.06	1.05	4.35	92.41	68.93	36.12	28.08	11.26
30	3,472	40.67	0.92	2.70	6.95	-	-	-	-	-
	3,977	28.45	0.05	0.73	3.92	94.57	72.96	43.60	30.05	14.54

^a สมบัติถ่านหินก่อนผ่านกระบวนการ H_2O_2 (หลังผ่านน้ำ 15 นาที)



รูปที่ 4.15 ผลของอุณหภูมิ ที่มีต่อร้อยละการลดปริมาณเถ้าและการเพิ่มความร้อนของถ่านหิน
แม่เมฆ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (ความเข้มข้นของสารละลาย
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์
อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาด
ถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม ระยะเวลา 60 นาที)



รูปที่ 4.16 ผลของอุณหภูมิ ที่มีต่อร้อยละการลดปริมาณกำมะถันชนิดต่าง ๆ ของถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม ระยะเวลา 60 นาที)

4.1.5 ผลของระยะเวลา

ถ่านหินแม่เมาะ 1 ผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถันโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % น้ำหนักต่อปริมาตร ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ถ่านหินขนาด 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลา 0, 10, 20, 30, 45, 60 นาที สมบัติถ่านหินก่อนและหลังกระบวนการดังแสดงในตารางที่ 4.7

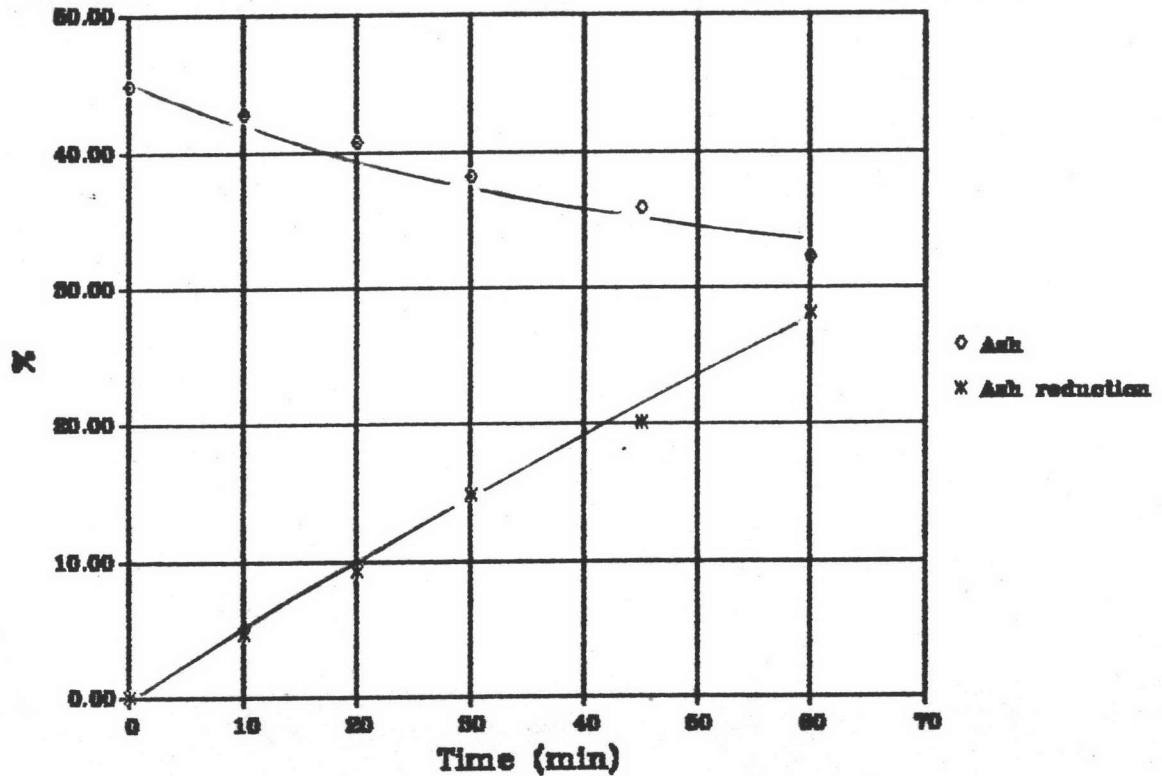
ผลของระยะเวลาต่อปริมาณเถ้าและการลดปริมาณเถ้าดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ปริมาณเถ้าจะลดลงจากร้อยละ 44.76 เป็น 32.19 และลดปริมาณเถ้าได้ร้อยละ 28.08

ผลของระยะเวลาต่อปริมาณกำมะถันและการลดปริมาณกำมะถัน ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19 พบว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นปริมาณกำมะถันจะลดลง โดยร้อยละกำมะถันซัลเฟตจะลดลงจาก 0.79 เป็น 0.06 ร้อยละกำมะถันไพไรต์จะลดลงจาก 3.38 เป็น 1.05 และร้อยละกำมะถันรวมลดลงจาก 6.81 เป็น 4.35 สำหรับการลดกำมะถันซัลเฟตจะลดได้ร้อยละ 92.41 ลดกำมะถันไพไรต์ได้ร้อยละ 68.93 และลดกำมะถันรวมได้ร้อยละ 36.12

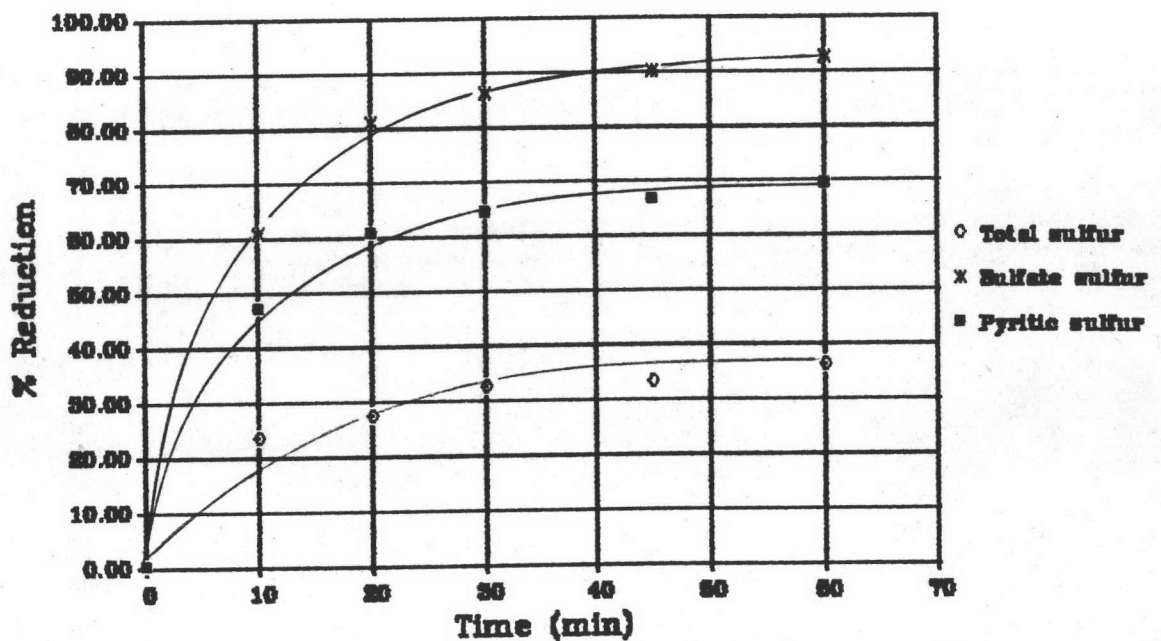
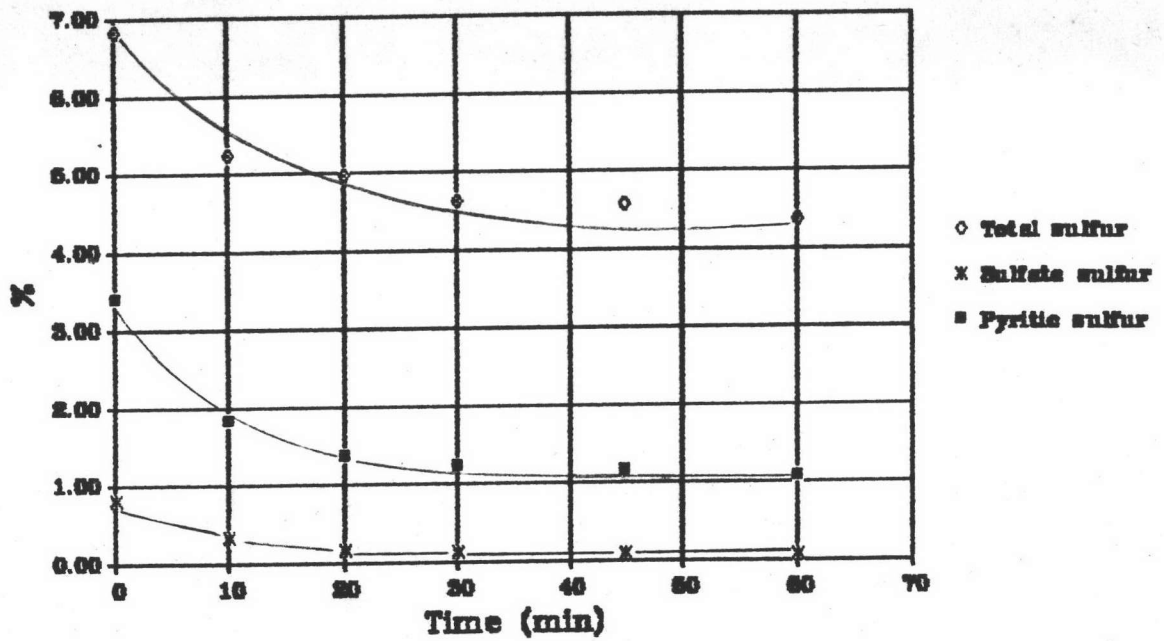
จากผลการทดลองข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าการขจัดเถ้าและกำมะถันในถ่านหินจะเกิดขึ้นได้ดีในช่วง 20-30 นาทีแรก และเกิดช้าลงในช่วงหลัง โดยเฉพาะจะเห็นได้ชัดเจน ในการขจัดกำมะถันซัลเฟตและไพไรต์ เพราะในช่วงแรกยังมีปริมาณกำมะถันมากอยู่ และชั้นผลิตภัณฑ์ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยายังน้อยอยู่จึงยังเกิดปฏิกิริยาได้ดี ต่อมาในช่วงหลังปริมาณกำมะถันเหลือน้อยลง (แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาเล็กลง) และเกิดขึ้นผลิตภัณฑ์หนาขึ้น ดังนั้นก๊าซออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยาได้ช้าลง ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสม คือ 60 นาที เพราะถ้าใช้เวลานานกว่านี้ก็จะไม่ทำให้การขจัดเถ้าและกำมะถันดีขึ้นมากนัก

ตารางที่ 4.7 สมบัติถ่านหินแม่เมาะ 1 (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน ที่ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนัก/ปริมาตร ใน 0.05 โมลาร์ กรดซัลฟูริก อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาทึ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

เวลา (นาทึ)	ร้อยละ ปริมาณ เถ้า	ร้อยละปริมาณ			ร้อยละ การลด ปริมาณ เถ้า	ร้อยละการลดปริมาณ		
		กำมะถัน ซัลเฟต	กำมะถัน ไฟโรต์	กำมะถัน รวม		กำมะถัน ซัลเฟต	กำมะถัน ไฟโรต์	กำมะถัน รวม
0	44.76	0.79	3.38	6.81	-	-	-	-
10	42.71	0.31	1.80	5.22	4.58	60.76	46.75	23.35
20	40.63	0.15	1.34	4.95	9.23	81.01	60.36	27.31
30	38.15	0.11	1.21	4.60	14.77	86.08	64.20	32.45
45	35.80	0.08	1.14	4.55	20.02	89.87	66.27	33.19
60	32.19	0.06	1.05	4.35	28.08	92.41	68.93	36.12



รูปที่ 4.17 ผลของระยะเวลาที่มีต่อปริมาณเถ้าและร้อยละการลดปริมาณเถ้าของถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ)



รูปที่ 4.18 และ 4.19 ผลของระยะเวลาที่มีต่อปริมาณกำมะถันและร้อยละการลดปริมาณกำมะถันชนิดต่าง ๆ ของถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ)

4.1.6 ผลของการล้างผ่านหินด้วยน้ำก่อนกระบวนการขจัดเถ้า และกำมะถันด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

สำหรับงานวิจัยนี้ทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดของเหลว โดยมีระบบการล้างผ่านหินด้วยน้ำประมาณ 15 นาที ก่อนเริ่มทดลองด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผลของการล้างผ่านหินด้วยน้ำที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.8

จากตารางที่ 4.8 พบว่า การล้างผ่านหินด้วยน้ำก่อนการทดลองด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถลดกำมะถันซัลเฟตได้มาก และสามารถลดเถ้าและกำมะถันไพไรต์ได้เล็กน้อย ดังนั้นที่สภาวะเหมาะสม คือ ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหล 1.25 ลิตรต่อ นาที ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลา 60 นาที ผลของการขจัดเถ้าและกำมะถันด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เทียบกับตัวอย่างถ่านหินเริ่มต้น คือ ลดเถ้าได้ร้อยละ 30.98 ลดปริมาณกำมะถันซัลเฟตได้ร้อยละ 98.71 ลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ได้ร้อยละ 80.30 และลดปริมาณกำมะถันรวมได้ร้อยละ 63.81

ตารางที่ 4.8 ผลการล้างถ่านหินด้วยน้ำประมาณ 15 นาที และผ่านกระบวนการ H_2O_2 อีก 60 นาที สำหรับการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ (วิเคราะห์แยกไม่รวมความชื้น)

ตัวอย่าง	ถ้ำ (%)	ปริมาณกำมะถัน (%)			ร้อยละการลดกำมะถัน			ร้อยละการลดถ้ำ
		ซิลเฟต	ไพไรต์	รวม	ซิลเฟต	ไพไรต์	รวม	
ถ่านหินแม่เมาะ 1 เริ่มต้น	46.64	4.65	5.33	12.02	-	-	-	-
ผ่านน้ำ (15 นาที)	44.76	0.79	3.38	6.81	83.01	36.59	43.34	4.03
ผ่าน H_2O_2 (7%, 0.5-1.0 มม.)	32.19	0.06	1.05	4.35	98.71	80.30	63.81	30.98
ผ่านน้ำ (15 นาที)	39.53	0.69	4.36	6.68	85.16	18.20	44.43	15.24
ผ่าน H_2O_2 (10%, 0.5-1.0 มม.)	27.34	0.04	1.16	4.16	99.14	78.24	65.39	41.38
ผ่านน้ำ (15 นาที)	43.66	1.08	4.49	5.84	76.77	15.76	51.41	6.39
ผ่าน H_2O_2 (7%, 1.0-2.0 มม.)	36.04	0.12	1.35	3.90	97.42	74.67	67.55	22.73
ผ่านน้ำ (15 นาที)	44.82	0.88	3.31	6.54	81.07	37.90	45.59	3.90
ผ่าน H_2O_2 (7%, 1.49 l/min)	32.23	0.07	0.98	4.08	98.49	81.61	66.06	30.90

4.2 การเปรียบเทียบผลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการขจัดฝ้าและก้ำมะถันใน ถ่านหินตัวอย่างต่าง ๆ

การศึกษาผลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อถ่านหินที่มีโครงสร้าง และองค์ประกอบแตกต่างกัน โดยใช้ถ่านหิน 4 ตัวอย่างที่ระดับชั้นและตำแหน่งต่างกัน ดังได้แสดงไว้ข้างต้น โดยจะใช้สภาวะที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลของสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที่ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลา 60 นาที สมบัติของถ่านหินก่อนและหลังกระบวนการดังแสดงในตารางที่ 4.8

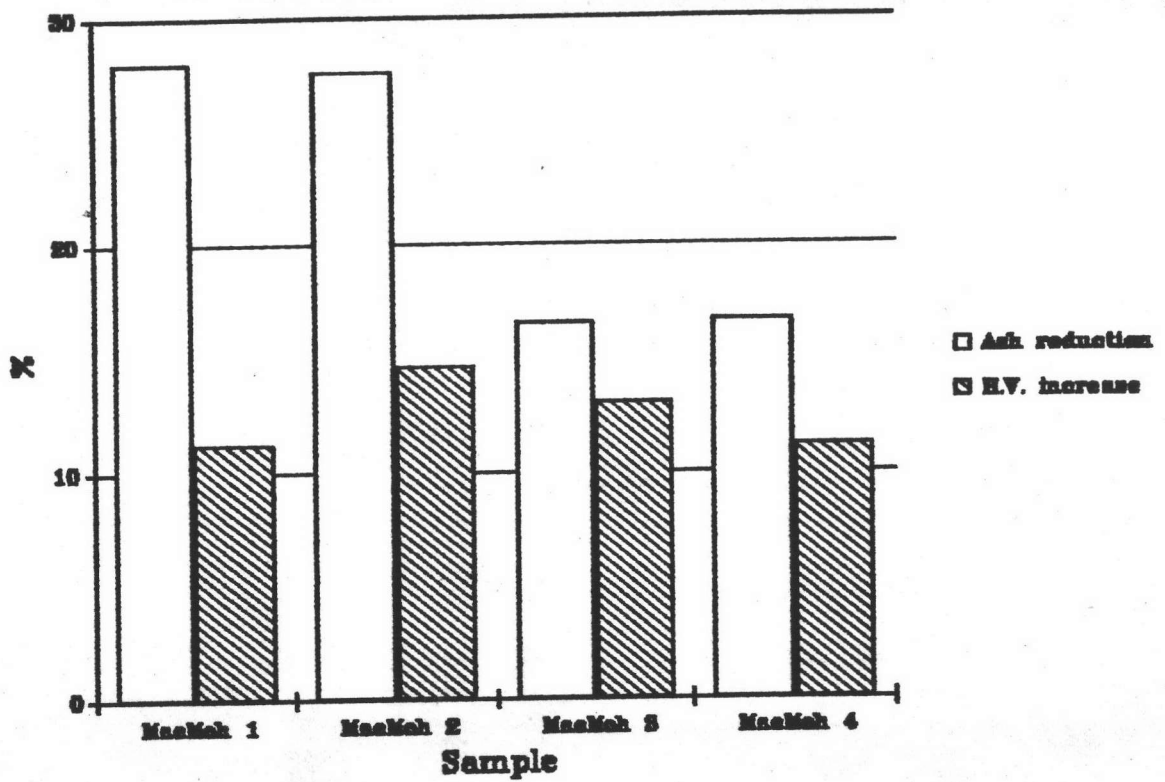
ผลการลดปริมาณฝ้าและการเพิ่มค่าความร้อนของถ่านหินตัวอย่างต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าการลดปริมาณฝ้าของถ่านหินแม่เมฆ 1 และ 2 ใกล้เคียงกัน คือ ลดได้ร้อยละ 28.08 และ 27.63 ตามลำดับ ส่วนถ่านหินแม่เมฆ 3 และ 4 ก็ลดได้ในปริมาณใกล้เคียงกันคือ 16.62 และ 16.74 ตามลำดับ สำหรับการเพิ่มค่าความร้อนพบว่าถ่านหินแม่เมฆ 2 เพิ่มได้มากที่สุด คือ เพิ่มได้ร้อยละ 14.66

ผลของการลดปริมาณก้ำมะถันของถ่านหินตัวอย่างต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.21 พบว่าถ่านหินแม่เมฆ 1 สามารถลดปริมาณก้ำมะถันทุกชนิดได้ดีที่สุด ส่วนถ่านหินอีก 3 ตัวอย่างสามารถลดได้ใกล้เคียงกัน โดยก้ำมะถันซัลเฟตสามารถลดได้ร้อยละ 92.41, 82.76, 87.84 และ 82.93 ลดก้ำมะถันไพไรต์ได้ร้อยละ 68.93, 50.00, 50.00 และ 27.27 ลดก้ำมะถันรวมได้ร้อยละ 36.12, 24.39, 27.33 และ 21.16 ตามลำดับ

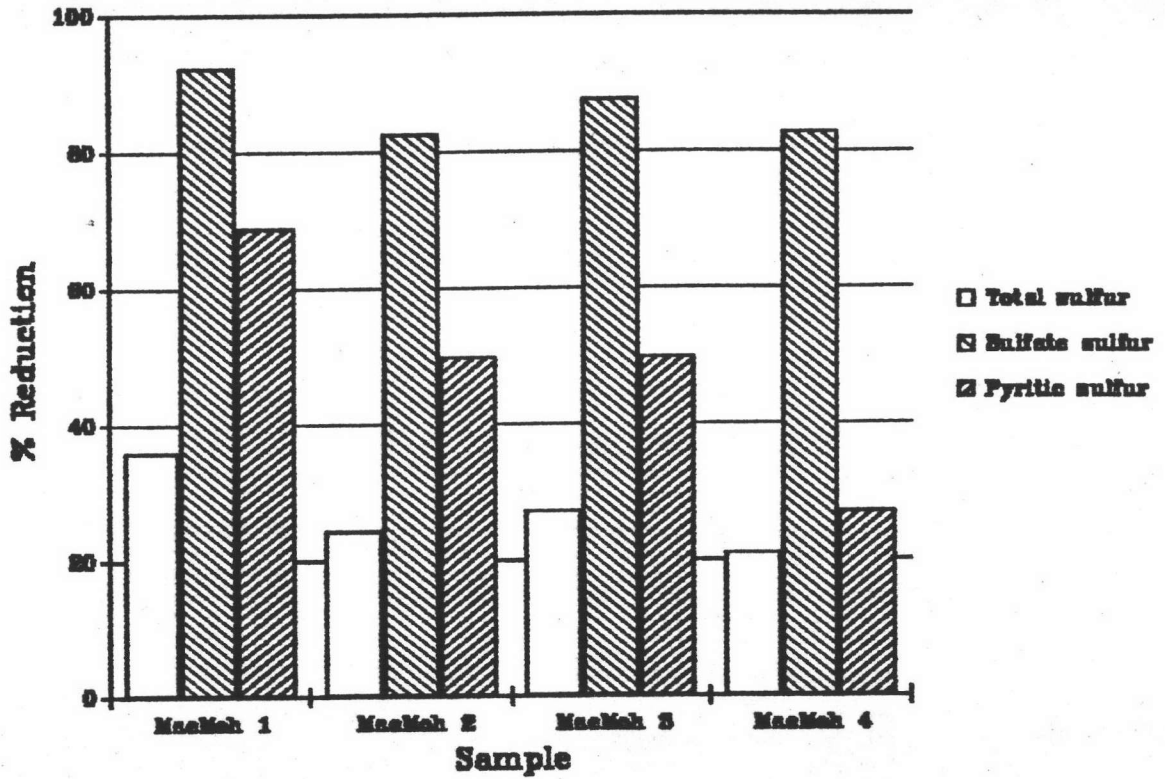
ตารางที่ 4.9 สมบัติด้านหินแม่เมาะระดับชั้นและตำแหน่งต่าง ๆ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน ที่ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนัก/ปริมาตร ใน 0.05 โมลาร์ กรดซัลฟูริก อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดด้านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม ที่อุณหภูมิ 20° ซ ระยะเวลา 60 นาที

ตัวอย่าง	ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม)	ร้อยละ ปริมาณ เถ้า	ร้อยละปริมาณ			ร้อยละการลดปริมาณ			ร้อยละ การลด ปริมาณ เถ้า	ร้อยละ การเพิ่มค่า ความร้อน
			กำมะถัน ซัลเฟต	กำมะถัน ไพไรต์	กำมะถัน รวม	กำมะถัน ซัลเฟต	กำมะถัน ไพไรต์	กำมะถัน รวม		
- ^a แม่เมาะ 1	3,428	44.76	0.79	3.38	6.81	-	-	-	-	-
	3,814	32.19	0.06	1.05	4.35	92.41	68.93	36.12	28.08	11.26
- ^a แม่เมาะ 2	4,645	23.27	0.58	0.28	3.69	-	-	-	-	-
	5,326	16.83	0.10	0.14	2.79	82.76	50.00	24.39	27.68	14.66
- ^a แม่เมาะ 3	5,247	11.31	0.74	0.12	3.11	-	-	-	-	-
	5,934	9.43	0.09	0.06	2.26	87.84	50.00	27.33	16.62	13.09
- ^a แม่เมาะ 4	5,164	13.08	0.41	0.11	2.41	-	-	-	-	-
	5,742	10.89	0.07	0.08	1.90	82.93	27.27	21.16	16.74	11.19

^a สมบัติด้านหินก่อนผ่านกระบวนการ H₂O₂ (หลังผ่านน้ำ 15 นาที)



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบผลร้อยละการลดปริมาณเถ้าและการเพิ่มค่าความร้อนของถ่านหินระดับชั้น และตำแหน่งต่าง ๆ (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลา 60 นาที)



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบผลร้อยละการลดปริมาณกำมะถันชนิดต่าง ๆ ของถ่านหินระดับชั้น และตำแหน่งต่าง ๆ (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°C ระยะเวลา 60 นาที)

4.3 การศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีของไพไรต์และขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยากับไพไรต์ในถ่านหิน

จากการศึกษาการขจัดเถ้าและกำมะถันในถ่านหินในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 สามารถนำข้อมูลของกำมะถันไพไรต์ที่ระยะเวลาต่าง ๆ มาศึกษาปฏิกิริยาเคมีระหว่างไพไรต์กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นการศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยจะหาอันดับของปฏิกิริยา ค่าคงที่ของปฏิกิริยา และค่าพลังงานกระตุ้น ส่วนที่สองจะเป็นการหาขั้นตอนที่ควบคุมอัตราเร็วการทำปฏิกิริยาไพไรต์ในถ่านหินด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

4.3.1 การศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีของไพไรต์

4.3.1.1 การหาอันดับและค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเคมีของไพไรต์

ปฏิกิริยาออกซิดีซัลเฟอไรเซชัน (oxydesulfurization) ของไพไรต์กับก๊าซออกซิเจนในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะสามารถหาอันดับและค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาได้โดยใช้ข้อมูลระหว่างระยะเวลากับปริมาณกำมะถันไพไรต์ในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 ซึ่งสามารถคำนวณได้ค่าความเข้มข้นของไพไรต์ (C_p) และสัดส่วนการเปลี่ยนแปลง (X) ดังแสดงในตารางที่ 4.10-4.14 (ข้อมูลและการคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ข.)

การหาอันดับของปฏิกิริยาอาศัยความสัมพันธ์อัตราเร็วปฏิกิริยากับความเข้มข้นของไพไรต์ ดังสมการที่ 4.1

$$-r_p = -\frac{dC_p}{dt} = k_n C_p^n \quad \dots (4.1)$$

ถ้าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

$$-\frac{dC_p}{dt} = k_1 C_p \quad \dots (4.2)$$

$$-\int_{C_{p_0}}^{C_p} \frac{dC_p}{C_p} = k_1 \int_0^t dt \quad \dots (4.3)$$

$$\begin{aligned} \ln(C_{p_0}) - \ln(C_p) &= k_1 t \\ \ln(C_p) &= \ln(C_{p_0}) - k_1 t \quad \dots (4.4) \end{aligned}$$

ถ้าเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง

$$-\frac{dC_p}{dt} = k_2 C_p^2 \quad \dots (4.5)$$

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าร้อยละกัมมันต์ไฟไรต์ (แบบไม่รวมความชื้น) ความเข้มข้นของไฟไรต์ (C_p) และสัดส่วนการเปลี่ยน (X) ตามระยะเวลาที่ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ ใน 0.05 โมลาร์ กรดซัลฟูริก อัตราการไหลสารละลาย 1.49 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 1.0-2.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ

เวลา (นาที)	4% H ₂ O ₂			5% H ₂ O ₂			7% H ₂ O ₂		
	กัมมันต์ ไฟไรต์ (%)	C _p kmol/m ³	X	กัมมันต์ ไฟไรต์ (%)	C _p kmol/m ³	X	กัมมันต์ ไฟไรต์ (%)	C _p kmol/m ³	X
0	3.66	0.755	-	3.90	0.788	-	4.49	1.025	-
10	1.69	0.348	0.539	1.88	0.377	0.522	2.06	0.441	0.570
20	1.47	0.297	0.607	1.45	0.283	0.641	1.63	0.343	0.665
30	1.44	0.286	0.621	1.45	0.279	0.646	1.45	0.300	0.707
45	-	-	-	1.35	0.257	0.674	1.40	0.286	0.721
60	1.32	0.255	0.662	1.23	0.228	0.711	1.35	0.271	0.736
90	1.12	0.214	0.717	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าร้อยละกัมมันต์ไฟไรต์ (แบบไม่รวมความชื้น) ความเข้มข้นของไฟไรต์ (C_p) และ สัดส่วนการเปลี่ยนแปลง (X) ตามระยะเวลาที่ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ต่าง ๆ ใน 0.05 โมลาร์ กรดซัลฟูริก อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณ สารละลาย 10 ลิตร ขนาดถาดหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถาดหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ

เวลา (นาที)	5% H ₂ O ₂			7% H ₂ O ₂			10% H ₂ O ₂		
	กัมมันต์ ไฟไรต์ (%)	C _p kmol/m ³	X	กัมมันต์ ไฟไรต์ (%)	C _p kmol/m ³	X	กัมมันต์ ไฟไรต์ (%)	C _p kmol/m ³	X
0	2.96	0.676	-	3.38	0.787	-	4.36	0.927	-
10	1.83	0.402	0.405	1.80	0.404	0.487	2.72	0.562	0.394
20	1.48	0.318	0.530	1.34	0.290	0.632	1.45	0.290	0.687
30	1.23	0.264	0.609	1.21	0.252	0.680	1.30	0.247	0.734
45	1.19	0.251	0.629	1.14	0.228	0.710	-	-	-
60	1.00	0.205	0.697	1.05	0.199	0.747	1.16	0.205	0.779
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าร้อยละกัมมะถันไฟไรต์ (แบบไม่รวมความชื้น) ความเข้มข้นของไฟไรต์ (C_p) และ สัดส่วนการเปลี่ยน (X) ตามระยะเวลาที่ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7% น้ำหนัก/ปริมาตรใน 0.05 โมลาร์กรดซัลฟูริก อัตราการไหลสารละลายต่าง ๆ ปริมาณ สารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ

เวลา (นาที)	อัตราการไหล 1.06 l/min			อัตราการไหล 1.25 l/min			อัตราการไหล 1.49 l/min		
	กัมมะถัน ไฟไรต์ (%)	C_p kmol/m ³	X	กัมมะถัน ไฟไรต์ (%)	C_p kmol/m ³	X	กัมมะถัน ไฟไรต์ (%)	C_p kmol/m ³	X
0	2.16	0.493	-	3.38	0.787	-	3.31	0.771	-
10	1.30	0.284	0.424	1.80	0.404	0.487	1.82	0.401	0.480
20	1.24	0.263	0.467	1.34	0.290	0.632	1.32	0.288	0.626
30	1.21	0.255	0.483	1.21	0.252	0.680	1.18	0.248	0.678
45	1.15	0.239	0.515	1.14	0.228	0.710	1.13	0.226	0.707
60	0.99	0.199	0.596	1.05	0.199	0.747	0.98	0.186	0.759
90	0.72	0.139	0.718	-	-	-	0.83	0.157	0.796

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าร้อยละกัมมะถันไฟไรต์ (แบบไม่รวมความชื้น) ความเข้มข้นของไฟไรต์ (C_p) และสัดส่วนการเปลี่ยน (X) ตามระยะเวลาที่ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนัก/ปริมาตรใน 0.05 โมลาร์ กรดซัลฟูริก อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที่ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เวลา (นาที่)	อุณหภูมิ 10 (°ซ)			อุณหภูมิ 20 (°ซ)			อุณหภูมิ 30 (°ซ)		
	กัมมะถัน ไฟไรต์ (%)	C_p kmol/m^3	X	กัมมะถัน ไฟไรต์ (%)	C_p kmol/m^3	X	กัมมะถัน ไฟไรต์ (%)	C_p kmol/m^3	X
0	2.98	0.719	-	3.38	0.787	-	2.70	0.585	-
10	2.52	0.599	0.167	1.80	0.404	0.487	1.94	0.402	0.313
20	1.85	0.430	0.402	1.34	0.290	0.632	1.08	0.220	0.624
30	1.73	0.402	0.441	1.21	0.252	0.680	0.85	0.165	0.718
45	1.11	0.243	0.662	1.14	0.228	0.710	0.78	0.144	0.754
60	1.01	0.199	0.723	1.05	0.199	0.747	0.73	0.131	0.776
90	1.01	0.189	0.737	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าร้อยละกัมมันต์ไฟไรต์ (แบบไม่รวมความชื้น) ความเข้มข้นของไฟไรต์ (C_p) และสัดส่วนการเปลี่ยน (X) ตามระยะเวลาที่ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนัก/ปริมาตร ใน 0.05 โมลาร์ กรดซัลฟูริก อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที่ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ้ำหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ้ำหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20° ซ สำหรับถ้ำหินระดับชั้นและตำแหน่งต่าง ๆ

เวลา (นาที่)	แม่เมฆ 1			แม่เมฆ 2			แม่เมฆ 3			แม่เมฆ 4		
	กัมมันต์ ไฟไรต์ (%)	C_p kmol/m^3	X	กัมมันต์ ไฟไรต์ (%)	C_p kmol/m^3	X	กัมมันต์ ไฟไรต์ (%)	C_p kmol/m^3	X	กัมมันต์ ไฟไรต์ (%)	C_p kmol/m^3	X
0	3.38	0.787	-	0.28	0.0338	-	0.12	0.0114	-	0.11	0.0113	-
10	1.80	0.404	0.487	0.22	0.0259	0.234	0.08	0.0075	0.342	0.10	0.0102	0.097
20	1.34	0.290	0.632	0.20	0.0236	0.302	0.06	0.0056	0.509	0.10	0.0102	0.097
30	1.21	0.252	0.680	0.17	0.0194	0.426	0.06	0.0056	0.509	0.10	0.0101	0.106
45	1.14	0.228	0.710	0.16	0.0182	0.462	0.06	0.0056	0.509	0.09	0.0091	0.195
60	1.05	0.199	0.747	0.14	0.0156	0.538	0.06	0.0056	0.509	0.08	0.0081	0.283
90	-	-	-	0.08	0.0089	0.737	0.06	0.0055	0.518	0.04	0.0040	0.646

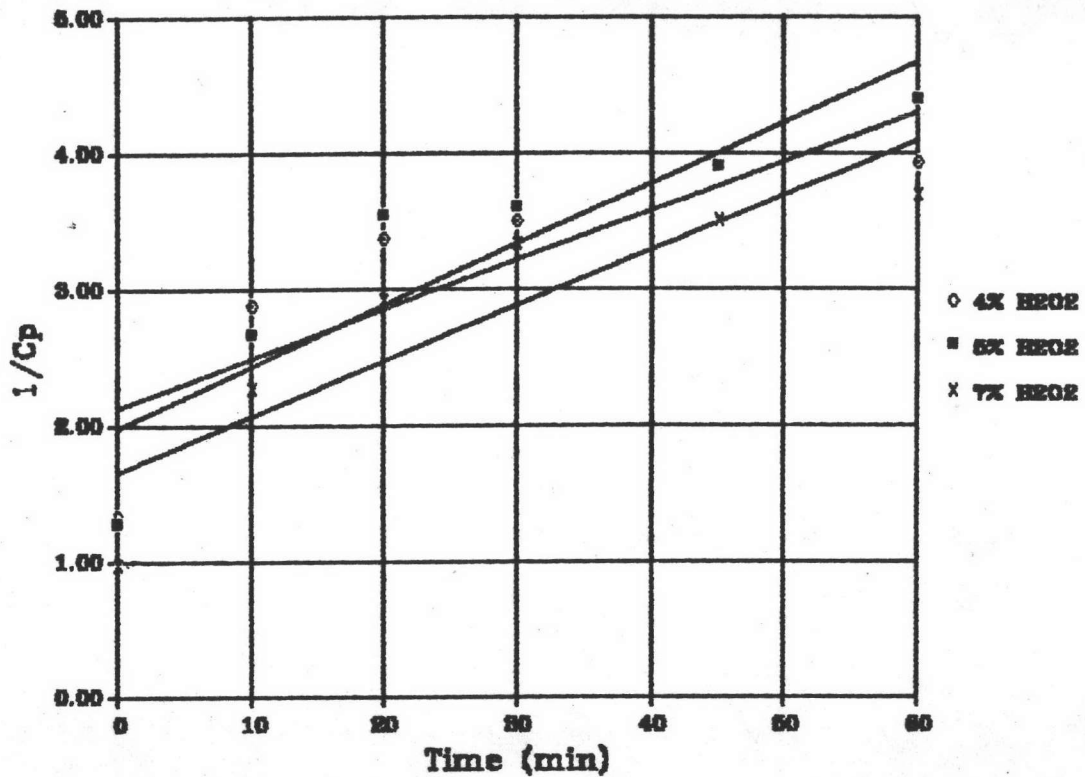
$$-\int_{Cp_0}^{Cp} \frac{dCp}{Cp^2} = k_2 \int_0^t dt \quad \dots (4.6)$$

$$\frac{1}{Cp} - \frac{1}{Cp_0} = k_2 t$$

$$\frac{1}{Cp} = k_2 t + \frac{1}{Cp_0} \quad \dots (4.7)$$

การทดสอบว่าจะเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งหรือสองนั้น จะทำโดยใช้สมการที่ 4.4 และ 4.7 โดยจะพลอตค่าระหว่าง $\ln(Cp)$ กับ เวลา สำหรับอันดับหนึ่ง และ $1/Cp$ กับ เวลา สำหรับอันดับสอง แล้วตรวจสอบดูว่าอันดับใดจะให้ค่าถูกต้องกว่ากัน (โดยดูได้เป็นกราฟเส้นตรงหรือไม่และพิจารณาจากค่า r^2 และ standard error) จากการทดสอบพบว่าปฏิกิริยาอันดับสองให้ผลดีกว่าอันดับหนึ่ง ซึ่งผลและค่าต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.22-4.26 และค่าความชันของกราฟจะเป็นค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา (k_2) ดังแสดงในตารางที่ 4.15

จากตารางที่ 4.15 พบว่าค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาของถ่านหินตัวอย่างเดียวกันจะค่อนข้างใกล้เคียงกันประมาณ $0.8-1.05 \times 10^{-3}$ ม³/กิโลโมล.วินาที แต่จะขึ้นกับอุณหภูมิตามความสัมพันธ์แบบ Arrhenius ซึ่งสามารถจะใช้หาพลังงานกระตุ้นได้



รูปที่ 4.22 กราฟระหว่าง $1/C_p$ กับ เวลา ของถ่านหินแม่เมาะ 1 (ที่ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.49 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 1.0-2.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ)

หมายเหตุ - 4 % H₂O₂

$$r^2 = 0.7757$$

$$\text{correlation coefficient} = 0.8808$$

$$\text{standard error of prediction} = 0.5977$$

- 5 % H₂O₂

$$r^2 = 0.8126$$

$$\text{correlation coefficient} = 0.9014$$

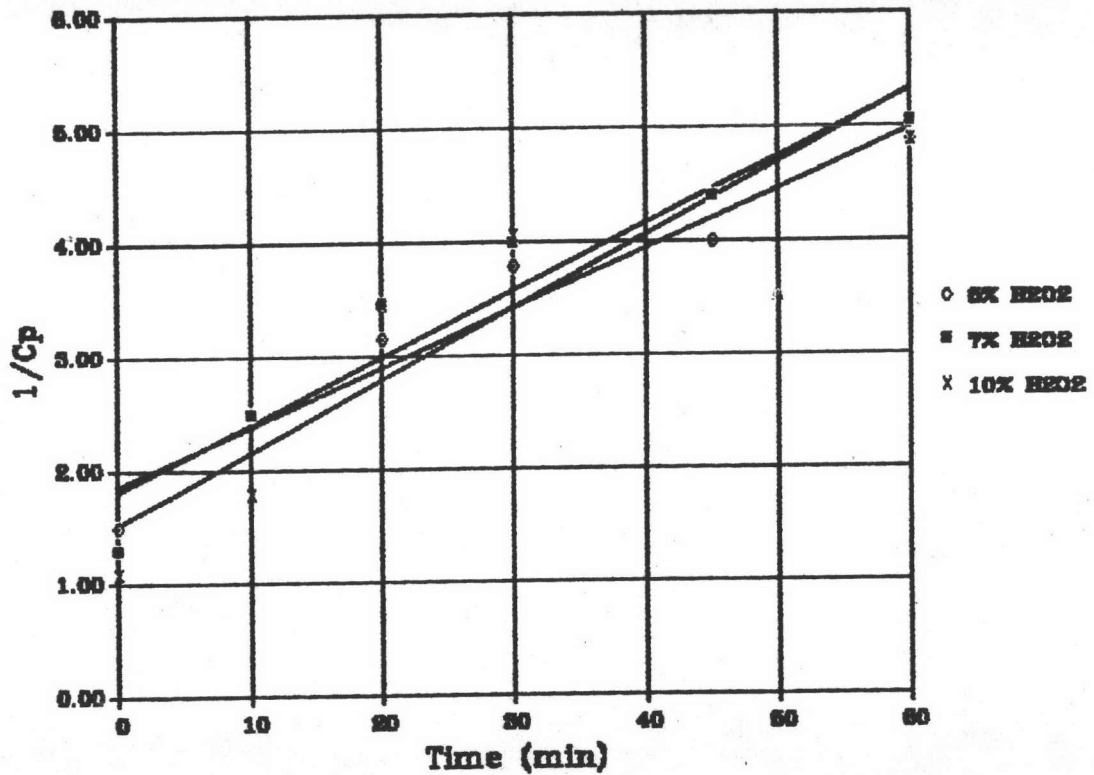
$$\text{standard error of prediction} = 0.5367$$

- 7 % H₂O₂

$$r^2 = 0.7916$$

$$\text{correlation coefficient} = 0.8897$$

$$\text{standard error of prediction} = 0.5191$$



รูปที่ 4.23 กราฟระหว่าง $1/C_p$ กับ เวลา ของถ่านหินแม่เมาะ 1 (ที่ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ)

หมายเหตุ - 5 % H₂O₂

$$r^2 = 0.9441$$

$$\text{correlation coefficient} = 0.9716$$

$$\text{standard error of prediction} = 0.3169$$

- 7 % H₂O₂

$$r^2 = 0.9168$$

$$\text{correlation coefficient} = 0.9575$$

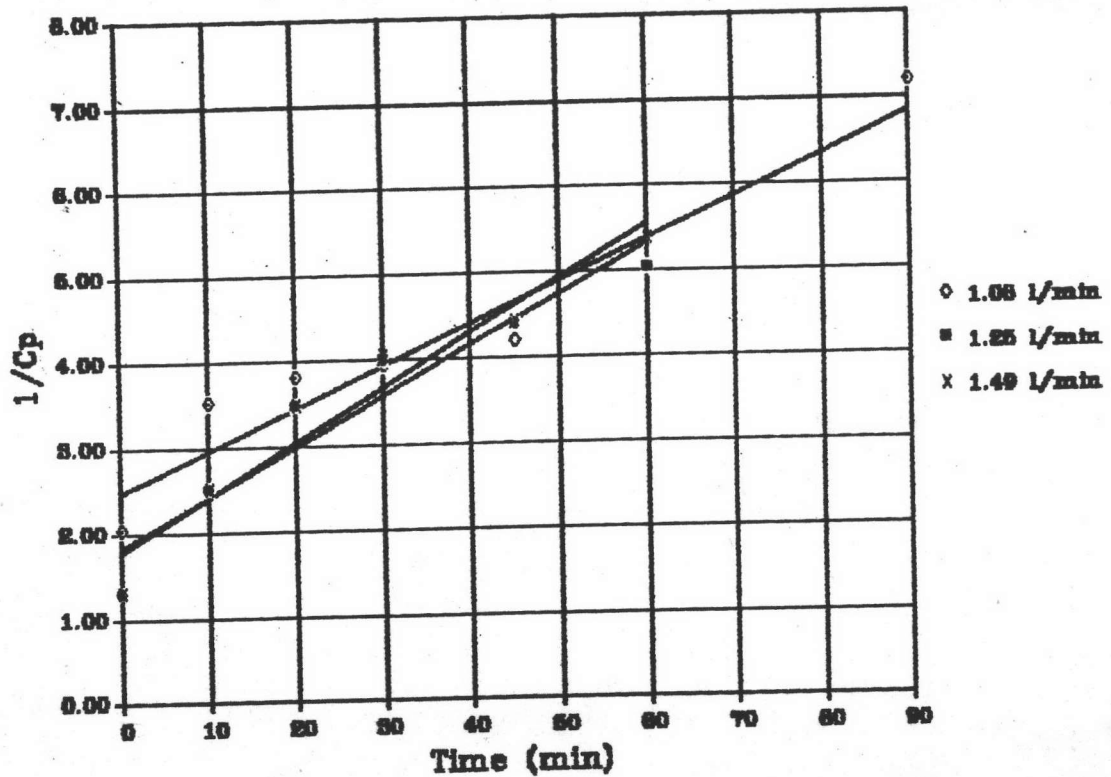
$$\text{standard error of prediction} = 0.4399$$

- 10 % H₂O₂

$$r^2 = 0.8632$$

$$\text{correlation coefficient} = 0.9291$$

$$\text{standard error of prediction} = 0.6745$$



รูปที่ 4.24 กราฟระหว่าง $1/C_p$ กับ เวลา ของถ่านหินแม่เมาะ 1 (ที่ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลายต่าง ๆ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ)

หมายเหตุ - อัตราการไหล 1.06 ลิตร/นาที

$$r^2 = 0.9274$$

$$\text{correlation coefficient} = 0.9630$$

$$\text{standard error of prediction} = 0.4666$$

- อัตราการไหล 1.25 ลิตร/นาที

$$r^2 = 0.9168$$

$$\text{correlation coefficient} = 0.9575$$

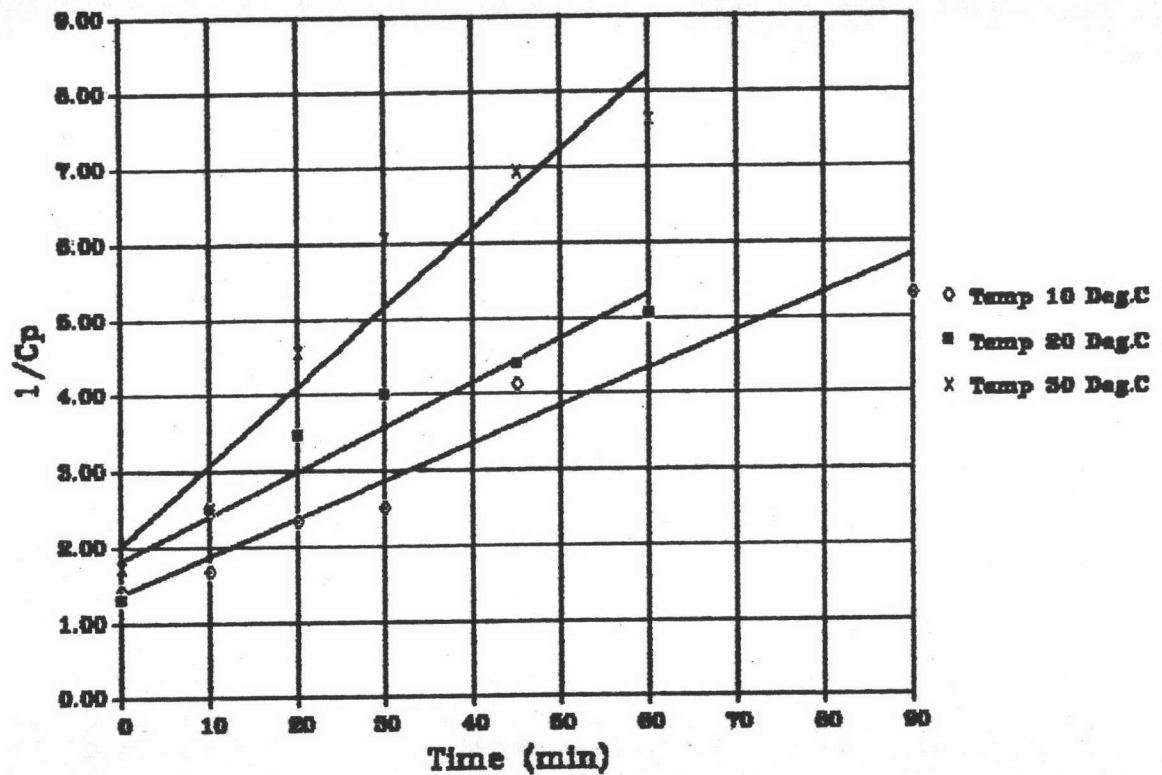
$$\text{standard error of prediction} = 0.4399$$

- อัตราการไหล 1.49 ลิตร/นาที

$$r^2 = 0.9410$$

$$\text{correlation coefficient} = 0.9700$$

$$\text{standard error of prediction} = 0.3944$$



รูปที่ 4.25 กราฟระหว่าง $1/C_p$ กับ เวลา ของถ่านหินแม่เมาะ 1 (ที่ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ)

หมายเหตุ - อุณหภูมิ 10° ซ

$$r^2 = 0.9213$$

$$\text{correlation coefficient} = 0.9598$$

$$\text{standard error of prediction} = 0.4929$$

- อุณหภูมิ 20° ซ

$$r^2 = 0.9168$$

$$\text{correlation coefficient} = 0.9575$$

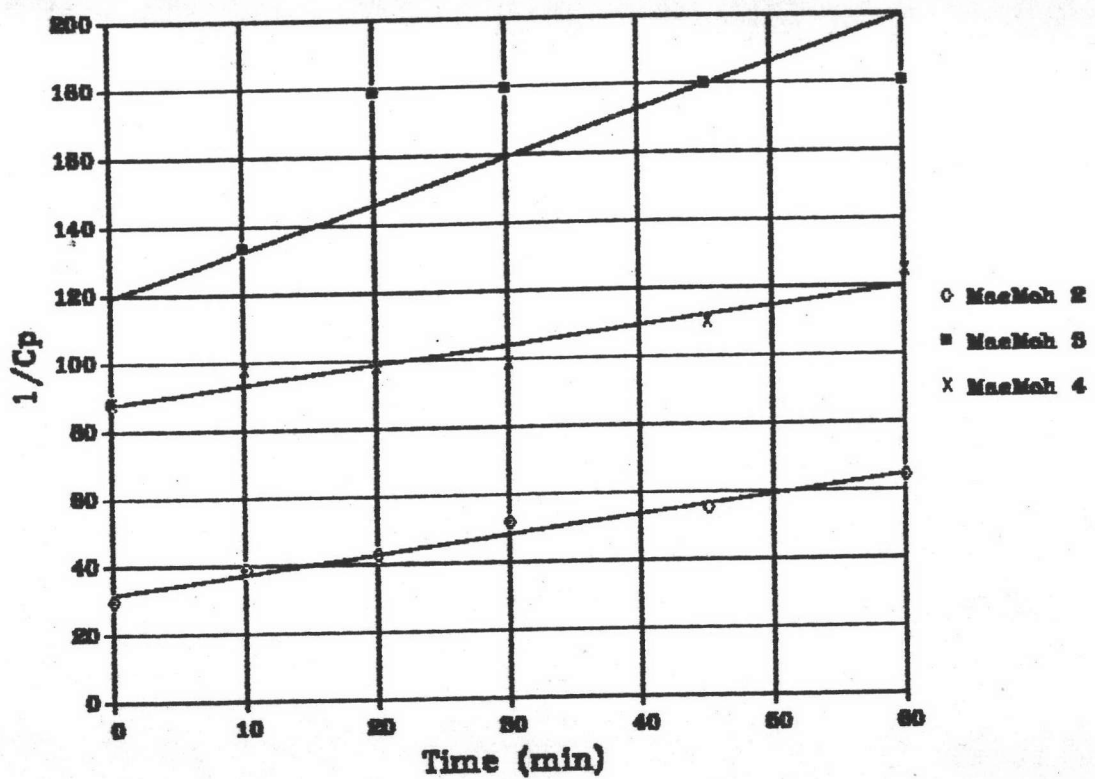
$$\text{standard error of prediction} = 0.4399$$

- อุณหภูมิ 30° ซ

$$r^2 = 0.9345$$

$$\text{correlation coefficient} = 0.9667$$

$$\text{standard error of prediction} = 0.6887$$



รูปที่ 4.26 กราฟระหว่าง $1/C_p$ กับ เวลา ของถ่านหินแม่เมาะระดับชั้นและตำแหน่งต่าง ๆ (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม ที่ อุณหภูมิ 20°ซ)

หมายเหตุ - แม่เมาะ 2

$$r^2 = 0.9739$$

$$\text{correlation coefficient} = 0.9869$$

$$\text{standard error of prediction} = 2.2436$$

- แม่เมาะ 3

$$r^2 = 0.6169$$

$$\text{correlation coefficient} = 0.7854$$

$$\text{standard error of prediction} = 26.3942$$

- แม่เมาะ 4

$$r^2 = 0.9115$$

$$\text{correlation coefficient} = 0.9547$$

$$\text{standard error of prediction} = 4.1787$$

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา (k_2) ของกัมมันตภาพรังสีกับก๊าซออกซิเจนในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ ที่สภาวะต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ขนาดถ่านหิน (มม.)	ความเข้มข้น H_2O_2 (%)	อัตราการไหล H_2O_2 (ลิตร/นาที)	อุณหภูมิ (°ซ)	$k_2 \times 10^3$ (ม ³ /กิโลโมล.วินาที)
แม่เมฆ 1	1.0-2.0	4	1.49	20	0.488
		5			0.747
		7			0.677
แม่เมฆ 1	0.5-1.0	5	1.25	20	0.870
		7			0.977
		10			1.062
แม่เมฆ 1	0.5-1.0	7	1.06	20	0.813
			1.25		0.977
			1.49		1.053
แม่เมฆ 1	0.5-1.0	7	1.25	10	0.823
				20	0.977
				30	1.738
แม่เมฆ 1	0.5-1.0	7	1.25	20	0.977
แม่เมฆ 2					9.158
แม่เมฆ 3					22.383
แม่เมฆ 4					8.960

4.3.1.2 การหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy)

จากหัวข้อ 4.3.1.1 แสดงว่าปฏิกิริยาระหว่างไนโตรตกับก๊าซ ออกซิเจนเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง เมื่อพลอตสัดส่วนการเปลี่ยนกับเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.27 และจากสมการที่ 4.7

$$\frac{1}{C_p} = k_2 t - \frac{1}{C_{p_0}}$$

สามารถเปลี่ยนในรูปสัดส่วนการเปลี่ยนได้

$$X = 1 - \frac{C_p}{C_{p_0}}$$

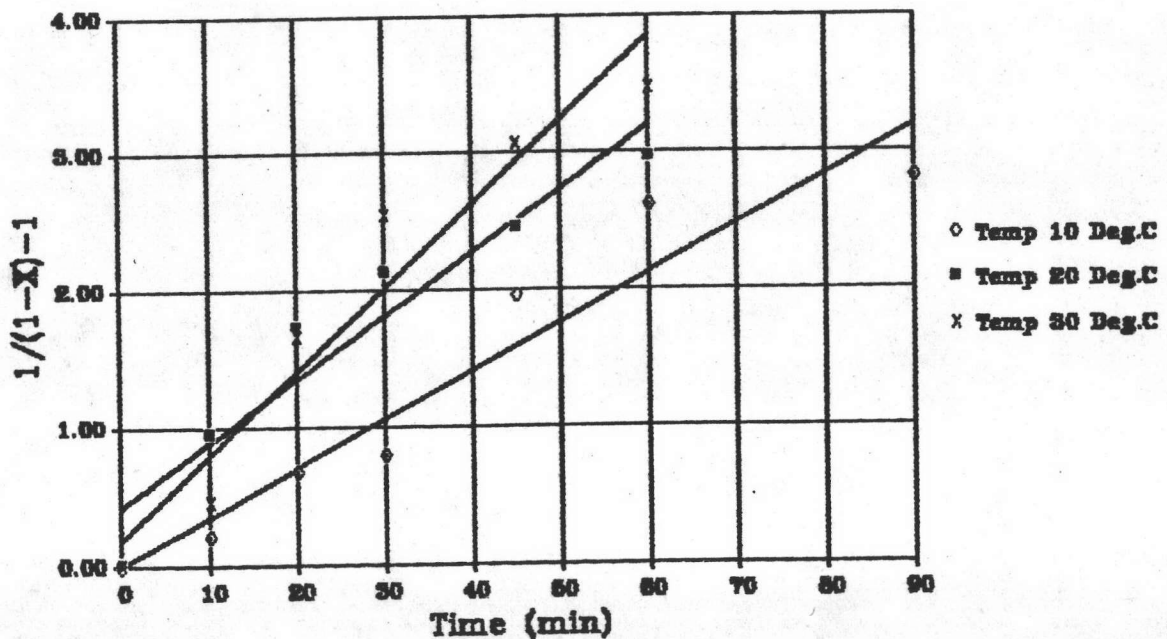
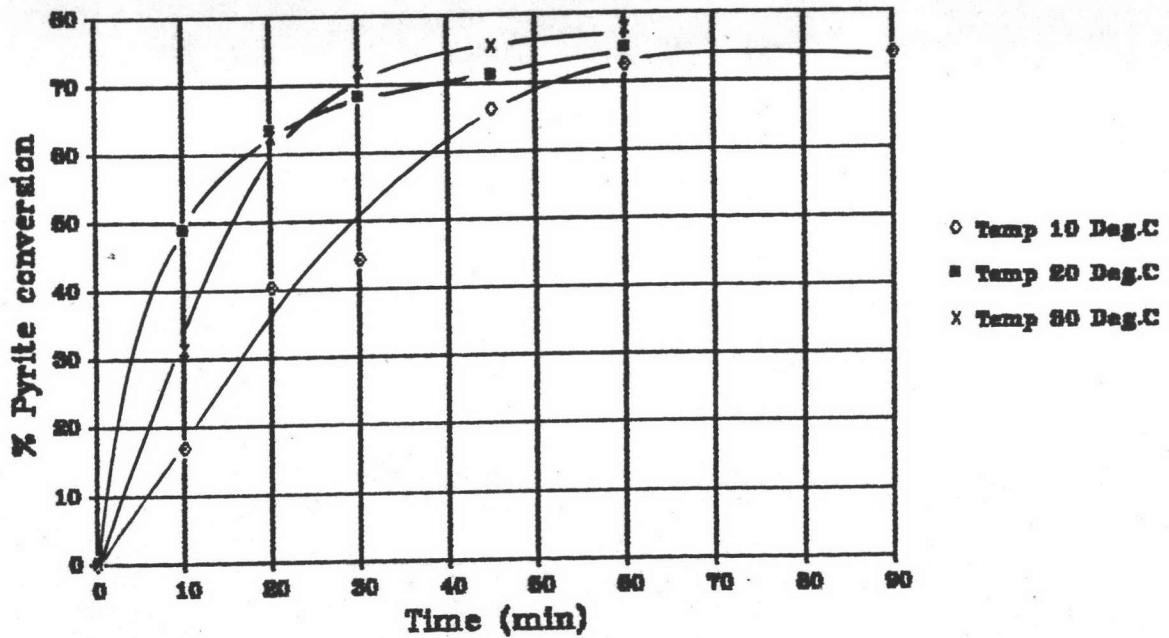
ดังนั้น

$$k_2 t C_{p_0} = \frac{1}{1-X} - 1 \quad \dots\dots (4.8)$$

และเมื่อพลอตค่าระหว่าง $1/(1-X) - 1$ กับเวลาได้กราฟเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 4.28 ในแต่ละอุณหภูมิสามารถหาความชัน $k_2 C_{p_0}$ ได้ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่า k_2 ได้สำหรับอุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 แสดงค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา (k_2) ของถ่านหินแม่เมาะ 1 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	$k_2 C_{p_0}$ (นาที) ⁻¹	C_{p_0} กิโลโมล/ม ³	$k_2 \times 10^3$ (ม ³ /กิโลโมล.วินาที)
10	0.0355	0.719	0.823
20	0.0461	0.787	0.977
30	0.0612	0.585	1.743



รูปที่ 4.27 และ 4.28 กราฟระหว่างสัดส่วนการเปลี่ยนแปลง (X) และ $1/(1-X)-1$ กับเวลาของถ่านหินแม่เมาะ 1 (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม ที่อุณหภูมิ 10, 20 และ 30°ซ)

จากความสัมพันธ์แบบ Arrhenius คือ ค่า k_2 ขึ้นกับอุณหภูมิ

ตั้งสมการ

$$k_2 = k_{2(0)} e^{-E/RT} \quad \dots (4.9)$$

หรือ

$$\ln(k_2) = \ln(k_{2(0)}) - \frac{E}{RT} \quad \dots (4.10)$$

เมื่อพลอตค่าระหว่าง $\ln(k_2)$ กับ $1/T$ ดังแสดงในรูปที่ 4.29
จะได้ค่าความชัน คือ $-E/R$ และ จุดตัดแกน y คือ $\ln(k_{2(0)})$ ดังต่อไปนี้

$$\frac{-E}{R} = -3194.91$$

$$\ln(k_{2(0)}) = 4.1122$$

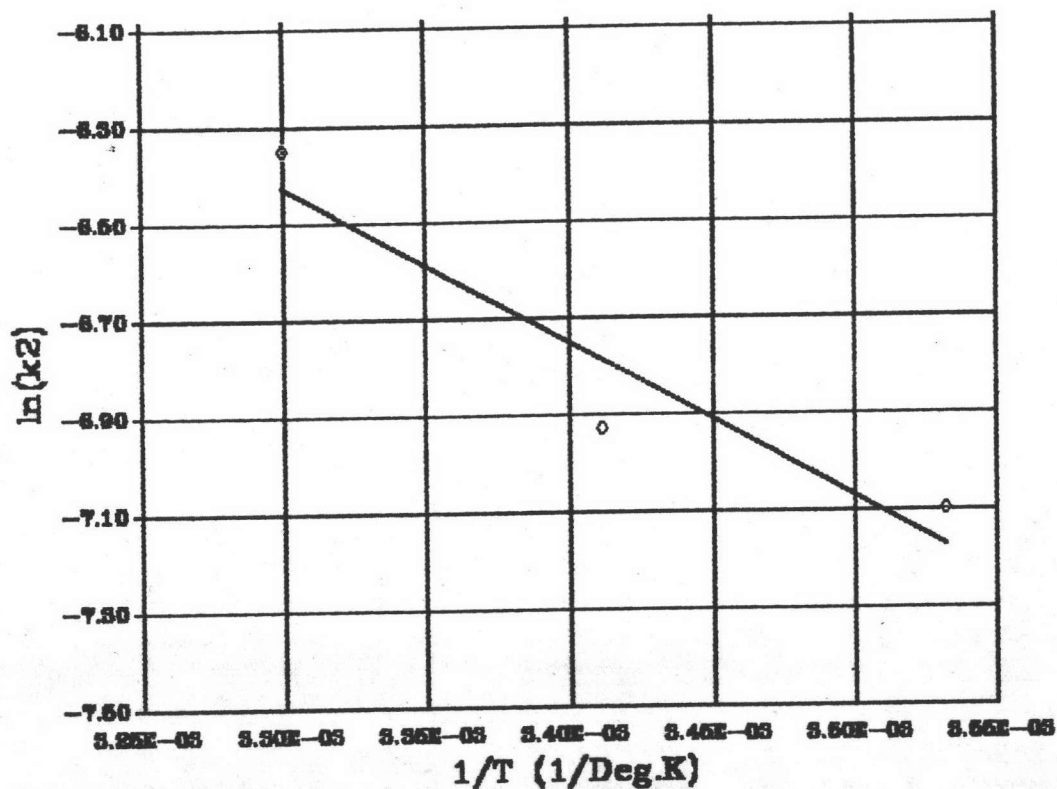
$$\text{ค่า } R = 8.3144 \times 10^3 \text{ จูล/(กิโลโมล)(องศาเซลวิน)}$$

$$\text{ดังนั้นค่าพลังงานกระตุ้น } E = 26.56 \times 10^6 \text{ จูล/กิโลโมล}$$

$$\text{ค่าคงที่ } k_{2(0)} = 61.08 \text{ ม}^3/\text{กิโลโมล.วินาที}$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ของค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยากับอุณหภูมิเป็น

$$k_2 = 61.08 \exp(-26.56 \times 10^6 / RT)$$



รูปที่ 4.29 กราฟระหว่าง $\ln(k_2)$ กับ $1/T$ ตามแบบ Arrhenius plot ของปฏิกิริยาระหว่างกัมมะถันไฟรต์กับก๊าซออกซิเจนในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

หมายเหตุ

$$r^2 = 0.8969$$

$$\text{correlation coefficient} = -0.9471$$

$$\text{standard error of prediction} = 0.1785$$

4.3.2 การศึกษาขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วการทำปฏิกิริยาของก๊าซออกซิเจนกับไพไรต์ จากหัวข้อ 2.4 สมมติว่าอนุภาคถ่านหินมีขนาดไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการทำปฏิกิริยา และโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ unreacted shrinking core model ในการอธิบายขั้นตอนการทำปฏิกิริยาของก๊าซออกซิเจนในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับไพไรต์ในถ่านหิน ซึ่งจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการแพร่ของก๊าซออกซิเจนผ่านชั้นของเหลว (liquid thin film) ขั้นตอนการแพร่ของก๊าซออกซิเจนผ่านชั้นผลิตภัณฑ์ (product layer) และขั้นตอนการทำปฏิกิริยาของก๊าซออกซิเจนกับไพไรต์ที่แกนกลาง

ผลการทดลองโดยใช้ข้อมูลในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 เมื่อนำมาพิจารณาตามสมการที่ 2.18, 2.28 และ 2.32 ตามลำดับ พบว่าขั้นตอนการแพร่ของก๊าซออกซิเจนผ่านชั้นฟิล์มของเหลวให้ผลไม่สอดคล้องตามสมการ ส่วนขั้นตอนการทำปฏิกิริยาของก๊าซออกซิเจนที่แกนกลางนั้นให้ผลสอดคล้องดีไม่เท่ากับขั้นตอนการแพร่ของก๊าซออกซิเจนผ่านชั้นผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ขั้นตอนการแพร่ของก๊าซออกซิเจนผ่านชั้นผลิตภัณฑ์เป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็ว การเข้าทำปฏิกิริยาของก๊าซออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.30-4.34 ที่เป็นเช่นนี้เพราะ เมื่อเริ่มเกิดปฏิกิริยาจะมีแค่ความต้านทานในชั้นฟิล์มของเหลวและการทำปฏิกิริยาที่แกนกลางเท่านั้นที่มีผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา ต่อมาเมื่อเวลาผ่านไปจะมีชั้นผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นและหนาขึ้นเรื่อยๆ ก๊าซออกซิเจนจะต้องแพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์นี้เพื่อเข้าไปทำปฏิกิริยากับแกนกลาง แต่เนื่องจากความต้านทานของชั้นฟิล์มมีผลน้อยมาก ดังนั้นความต้านทานในชั้นผลิตภัณฑ์และการทำปฏิกิริยาที่แกนกลางเท่านั้นที่จะมีผลต่ออัตราเร็วปฏิกิริยา และจากผลการทดลองก็พบว่าสอดคล้องกันและขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์มีผลมากกว่าการทำปฏิกิริยาที่แกนกลาง ยกเว้นตัวอย่างแม่หมายเลข 4 เท่านั้นที่ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม และการทำปฏิกิริยาที่แกนกลางให้ผลสอดคล้องกว่าขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าปริมาณไพไรต์มีน้อย ความต้านทานชั้นผลิตภัณฑ์จึงไม่มีผลมากนัก

การหาค่าการแพร่ประสิทธิผล (effective diffusivity) ของขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์จากสมการที่ 2.28 โดย

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

$$\tau = \frac{\rho_B R_1^2}{6bDeC_{A1}}$$

โดยที่ $\rho_B = 26.9$ กิโลโมล/ม³

$R_1 = 3.75 \times 10^{-4}$ และ 7.5×10^{-4} เมตร

$b = 4/15 = 0.267$ หากจากสมการที่ 2.4

$C_{A1} =$ ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
คงที่ตลอดเวลา

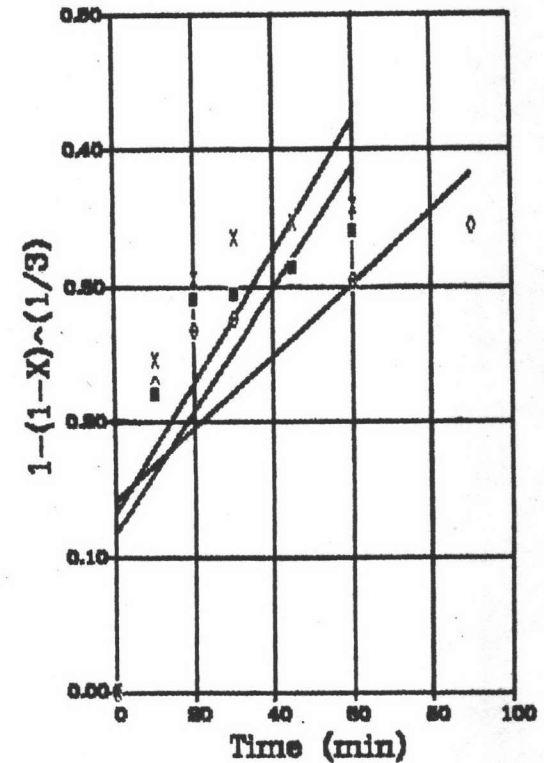
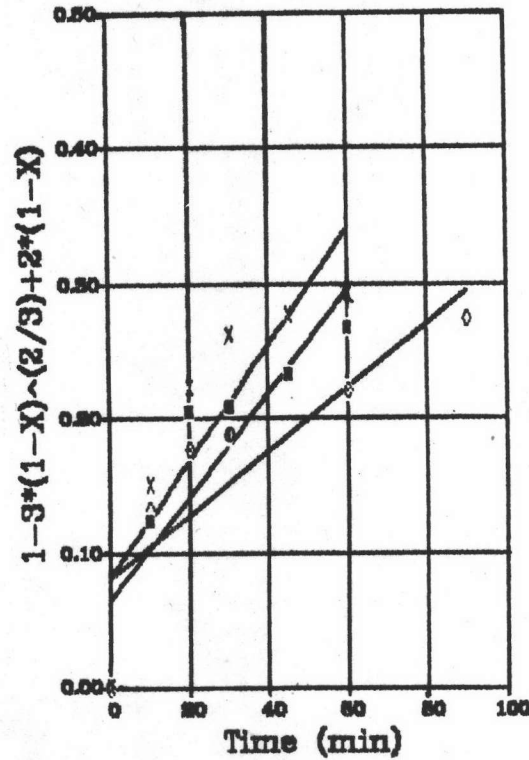
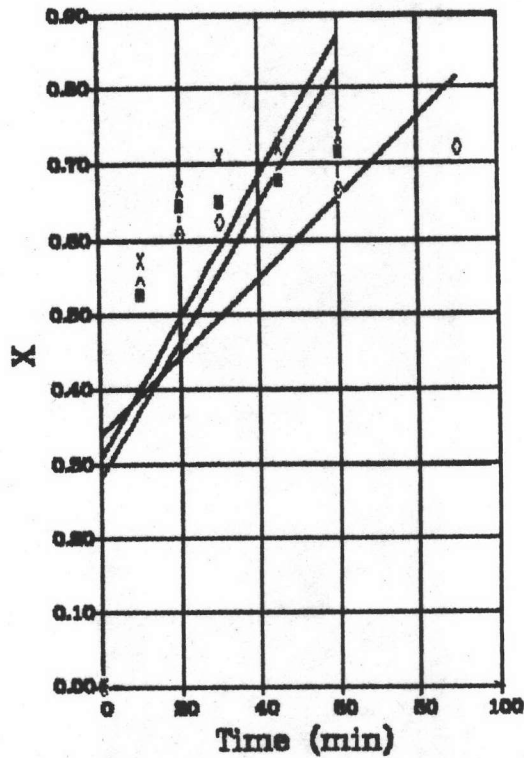
ดังนั้นเมื่อพลอตค่าระหว่าง $1 - 3(1-X)^{2/3} + 2(1-X)$ กับเวลา ดังในรูปที่ 4.30-4.34 จะได้ค่าความชัน $1/\tau$ ซึ่งจะคำนวณหาค่า De ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.16 จากตารางที่ 4.16 พบว่าค่าการแพร่ประสิทธิผลสำหรับถ่านหินตัวอย่างเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ $1.0-2.1 \times 10^{-10}$ $\text{m}^2/\text{วินาที}$ และค่าการแพร่ประสิทธิผลจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและลักษณะ pore ของพื้นผิวของอนุภาคถ่านหิน โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าการแพร่ประสิทธิผลจะเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.30 กราฟแสดงการทดสอบขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาของก๊าซออกซิเจนกับไนโตรเจนของถ่านหินแม่เมาะ 1

Film resistance control

Diffusion through product layer control

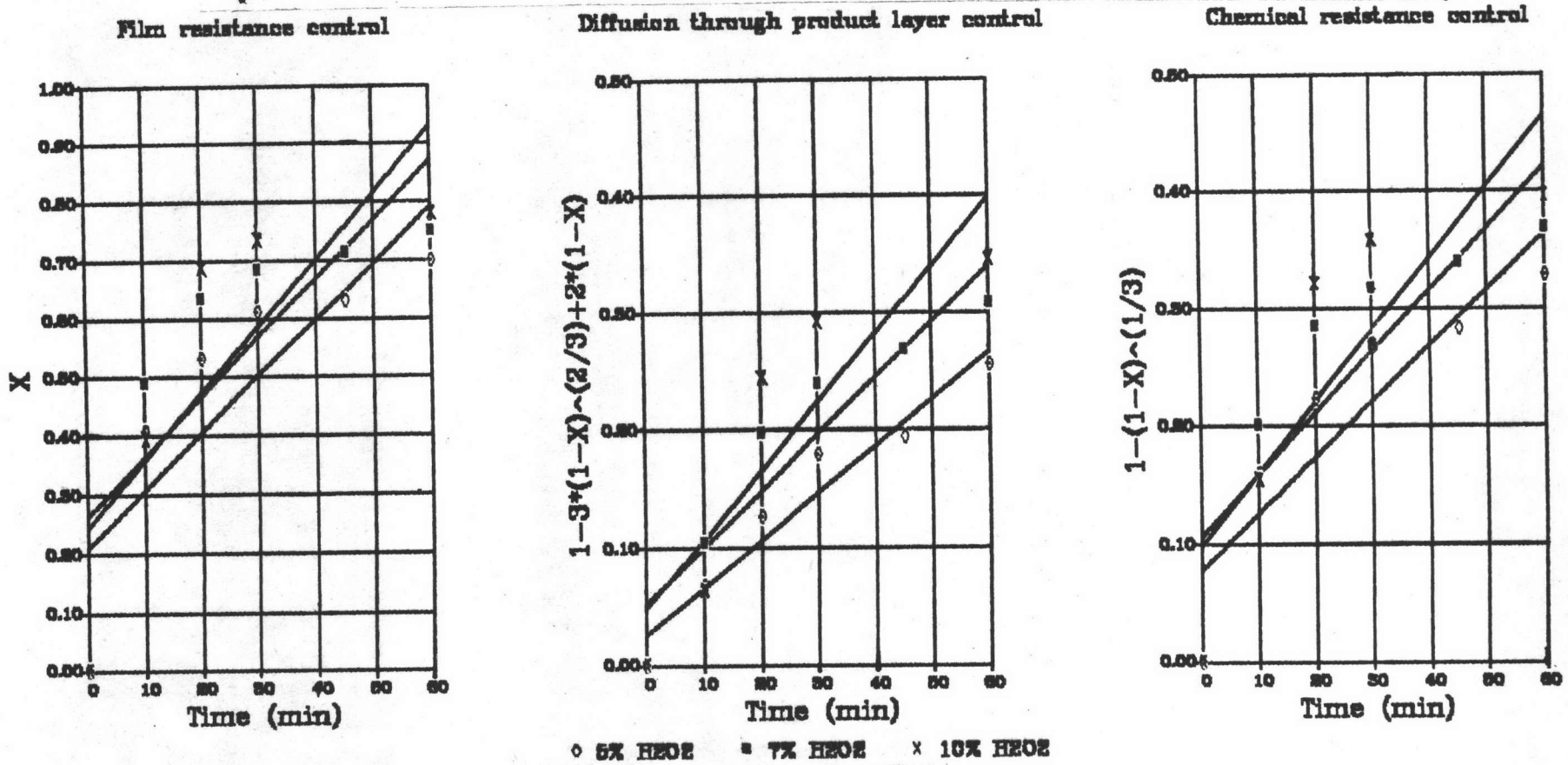
Chemical resistance control



○ 4% H₂O₂ ■ 5% H₂O₂ × 7% H₂O₂

	Film resistance control			Diffusion through product layer			Chemical reaction control		
	4% H ₂ O ₂	5% H ₂ O ₂	7% H ₂ O ₂	4% H ₂ O ₂	5% H ₂ O ₂	7% H ₂ O ₂	4% H ₂ O ₂	5% H ₂ O ₂	7% H ₂ O ₂
R-Square	0.4596	0.5688	0.5436	0.7418	0.7891	0.7522	0.5535	0.6467	0.6220
Correlation Coefficient	0.6780	0.7542	0.7373	0.8613	0.8883	0.8673	0.7440	0.8042	0.7887
Std. Err. of Prediction	0.2166	0.1971	0.2144	0.0531	0.0496	0.0617	0.0912	0.0831	0.0936
Slope	0.0053	0.0091	0.0094	0.0024	0.0038	0.0043	0.0027	0.0045	0.0048

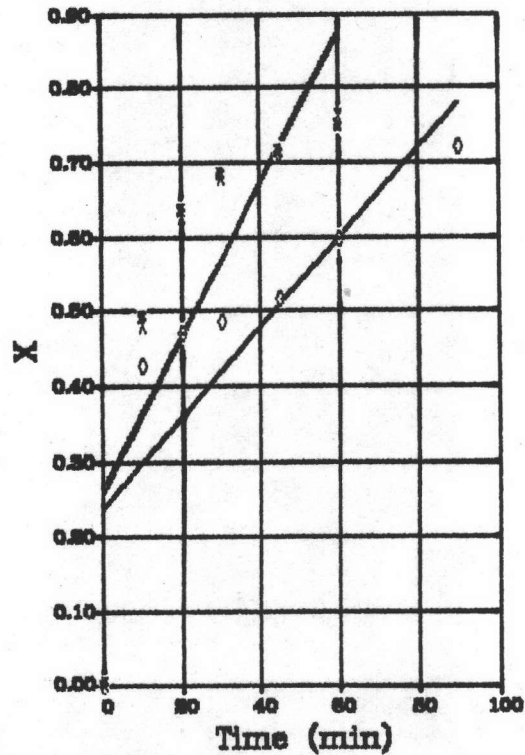
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงการทดสอบขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาของก๊าซออกซิเจนกับไฟโรต์ของถ่านหินแม่เมาะ 1



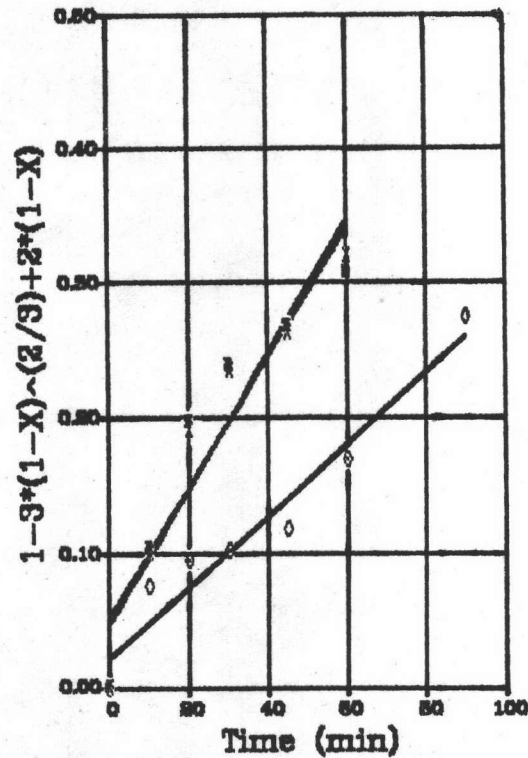
	Film resistance control			Diffusion through product layer			Chemical reaction control		
	5% H ₂ O ₂	7% H ₂ O ₂	10% H ₂ O ₂	5% H ₂ O ₂	7% H ₂ O ₂	10% H ₂ O ₂	5% H ₂ O ₂	7% H ₂ O ₂	10% H ₂ O ₂
R-Square	0.7209	0.6446	0.6460	0.9421	0.8800	0.8020	0.8087	0.7416	0.7227
Correlation Coefficient	0.8490	0.8028	0.8038	0.9706	0.9381	0.8955	0.8993	0.8612	0.8501
Std. Err. of Prediction	0.1505	0.1872	0.2245	0.0247	0.0441	0.0768	0.0576	0.0771	0.1005
Slope	0.0097	0.0101	0.0114	0.0040	0.0048	0.0058	0.0048	0.0052	0.0061

รูปที่ 4.32 กราฟแสดงการทดสอบขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาของก๊าซออกซิเจนกับไพล์ของถ่านหินแม่เมาะ 1

Film resistance control

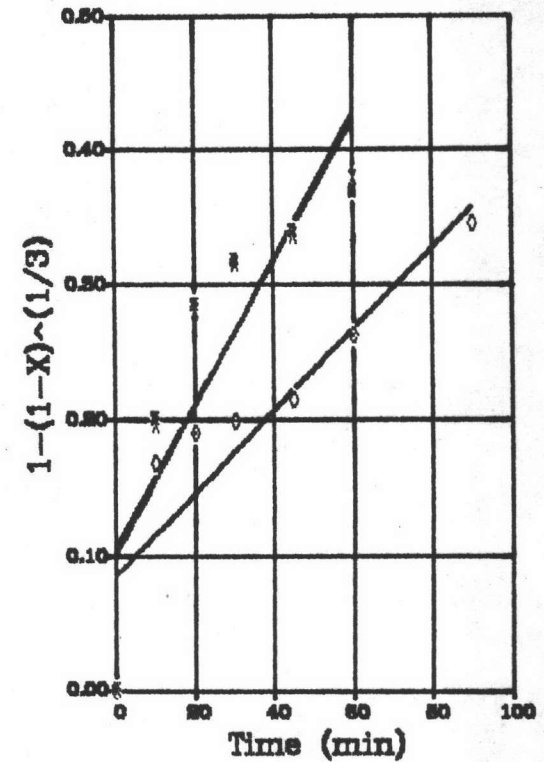


Diffusion through product layer control



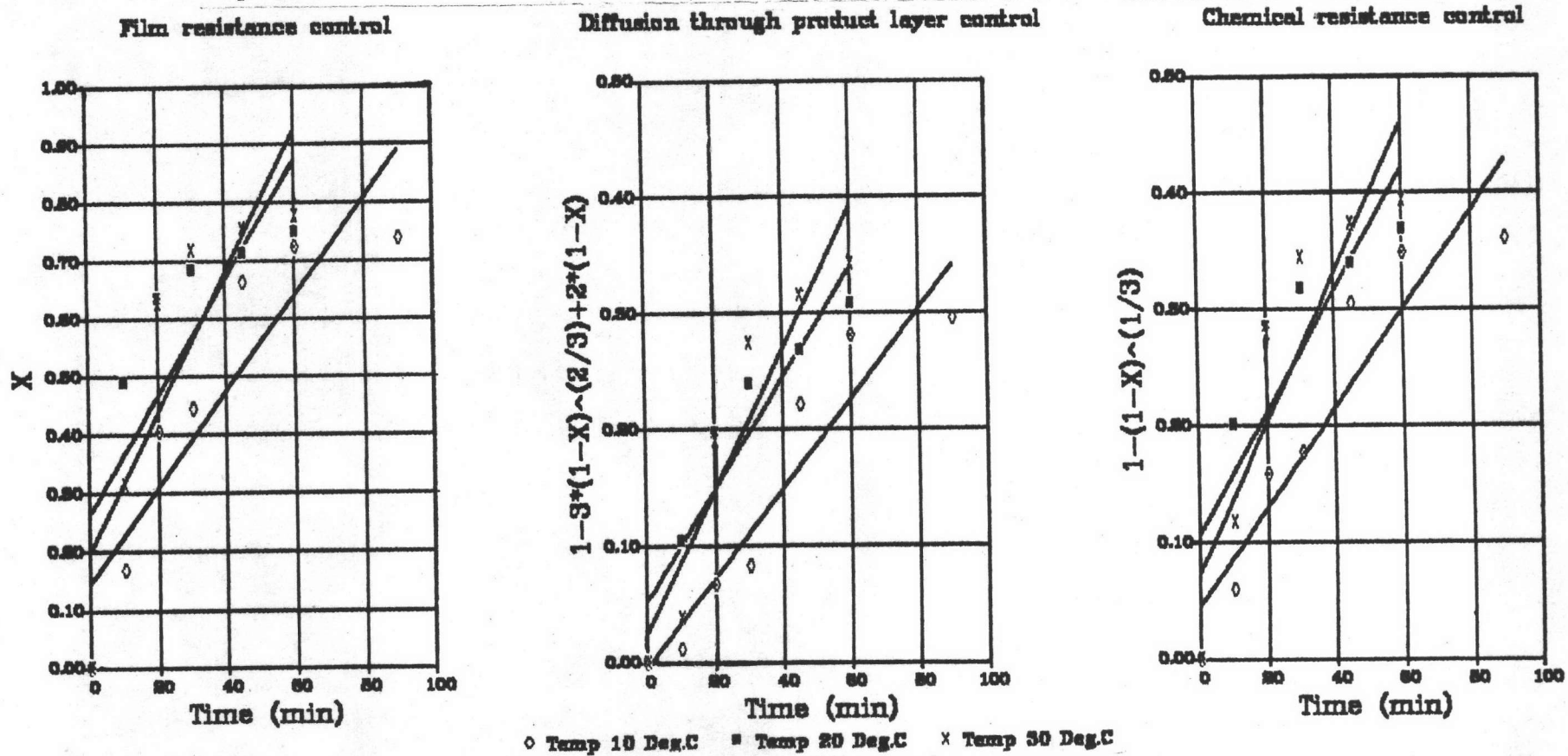
○ 1.06 l/min ■ 1.25 l/min × 1.49 l/min

Chemical resistance control



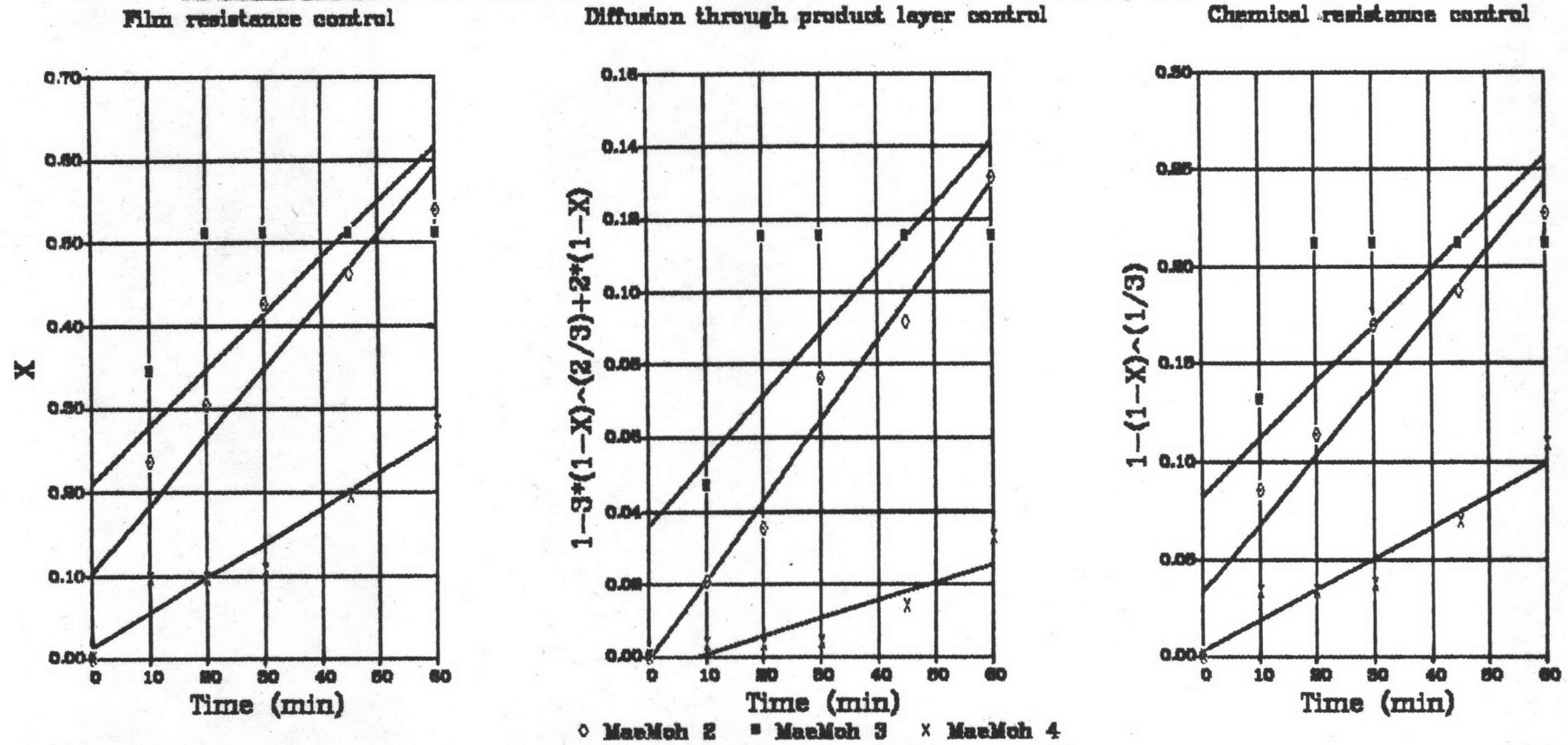
	Film resistance control			Diffusion through product layer			Chemical reaction control		
	1.06 l/min	1.25 l/min	1.49 l/min	1.06 l/min	1.25 l/min	1.49 l/min	1.06 l/min	1.25 l/min	1.49 l/min
R-Square	0.6940	0.6446	0.6649	0.9442	0.8800	0.9070	0.8079	0.7416	0.7684
Correlation Coefficient	0.8331	0.8028	0.8154	0.9717	0.9381	0.9523	0.8988	0.8612	0.8766
Std. Err. of Prediction	0.1358	0.1872	0.1825	0.0220	0.0441	0.0398	0.0503	0.0771	0.0738
Slope	0.0060	0.0101	0.0103	0.0027	0.0048	0.0050	0.0030	0.0052	0.0054

รูปที่ 4.33 กราฟแสดงการทดสอบขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาของก๊าซออกซิเจนกับไฟโรต์ของถ่านหินแม่เมาะ 1



	Film resistance control			Diffusion through product layer			Chemical reaction control		
	10 (Deg.C)	20 (Deg.C)	30 (Deg.C)	10 (Deg.C)	20 (Deg.C)	30 (Deg.C)	10 (Deg.C)	20 (Deg.C)	30 (Deg.C)
R-Square	0.8228	0.6446	0.7519	0.9035	0.8800	0.8881	0.8746	0.7416	0.8228
Correlation Coefficient	0.9071	0.8028	0.8671	0.9505	0.9381	0.9424	0.9352	0.8612	0.9071
Std. Err. of Prediction	0.1313	0.1872	0.1730	0.0428	0.0441	0.0541	0.0549	0.0771	0.0745
Slope	0.0083	0.0101	0.0121	0.0038	0.0048	0.0061	0.0042	0.0052	0.0064

รูปที่ 4.34 กราฟแสดงการทดสอบขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาของก๊าซออกซิเจนกับไนโรต์ของถ่านหินแม่เมาะระดับชั้นและตำแหน่งต่าง ๆ



	Film resistance control			Diffusion through product layer			Chemical reaction control		
	MaeMoh 2	MaeMoh 3	MaeMoh 4	MaeMoh 2	MaeMoh 3	MaeMoh 4	MaeMoh 2	MaeMoh 3	MaeMoh 4
R-Square	0.8755	0.5459	0.9284	0.9817	0.6214	0.8073	0.9190	0.5681	0.9224
Correlation Coefficient	0.9357	0.7389	0.9635	0.9908	0.7883	0.8985	0.9586	0.7537	0.9604
Std. Err. of Prediction	0.0766	0.1547	0.0291	0.0074	0.0341	0.0061	0.0260	0.0631	0.0117
Slope	0.0082	0.0068	0.0042	0.0022	0.0018	0.0005	0.0035	0.0029	0.0016

ตารางที่ 4.17 แสดงค่าการแพร่ประสิทธิผล (De) ของก๊าซออกซิเจนในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์ ที่สภาวะต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ขนาดถ่านหิน (มม.)	ความเข้มข้น H ₂ O ₂ (%)	อัตราการไหล H ₂ O ₂ (ลิตร/นาทีก)	อุณหภูมิ (°ซ)	De x 10 ¹⁰ (ม ² /วินาที)
แม่เมฆ 1	1.0-2.0	4	1.49	20	6.362
		5			8.238
		7			6.599
แม่เมฆ 1	0.5-1.0	5	1.25	20	2.140
		7			1.831
		10			1.555
แม่เมฆ 1	0.5-1.0	7	1.06	20	1.014
			1.25		1.831
			1.49		1.907
แม่เมฆ 1	0.5-1.0	7	1.25	10	1.466
				20	1.831
				30	2.337
แม่เมฆ 1	0.5-1.0	7	1.25	20	1.831
แม่เมฆ 2					0.833
แม่เมฆ 3					0.665
แม่เมฆ 4					0.191

การหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตามความสัมพันธ์แบบ Arrhenius คือ

$$D_e = D_{e_0} e^{-E/RT} \quad \dots (4.11)$$

หรือ
$$\ln(D_e) = \ln(D_{e_0}) - \frac{E}{RT} \quad \dots (4.12)$$

จากรูปที่ 4.35 เมื่อพลอตค่าระหว่าง $1 - 3(1-X)^{2/3} + 2(1-X)$ กับเวลาของปฏิกิริยาไฟไรต์กับก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 10, 20 และ 30°ซ จะได้ค่าความชัน $1/\tau$ และค่าแนวหาค่า D_e ดังแสดงในตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 แสดงค่าการแพร่ประสิทธิผล (D_e) ของถ่านหินแม่เมาะ 1 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°ซ)	$1/\tau \times 10^4$ (วินาที) ⁻¹	$\tau \times 10^{-4}$ (วินาที)	$D_e \times 10^{10}$ (ม ² /วินาที)
10	0.639	1.565	1.466
20	0.798	1.253	1.831
30	1.018	0.982	2.337

เมื่อพลอตค่าระหว่าง $\ln(D_e)$ กับ $1/T$ ดังแสดงในรูปที่ 4.36 จะได้ค่าความชัน คือ $-E/R$ และ จุดตัดแกน y คือ $\ln(D_{e_0})$ ดังต่อไปนี้

$$\frac{-E}{R} = -1972.16$$

$$\ln(D_{e_0}) = -15.6804$$

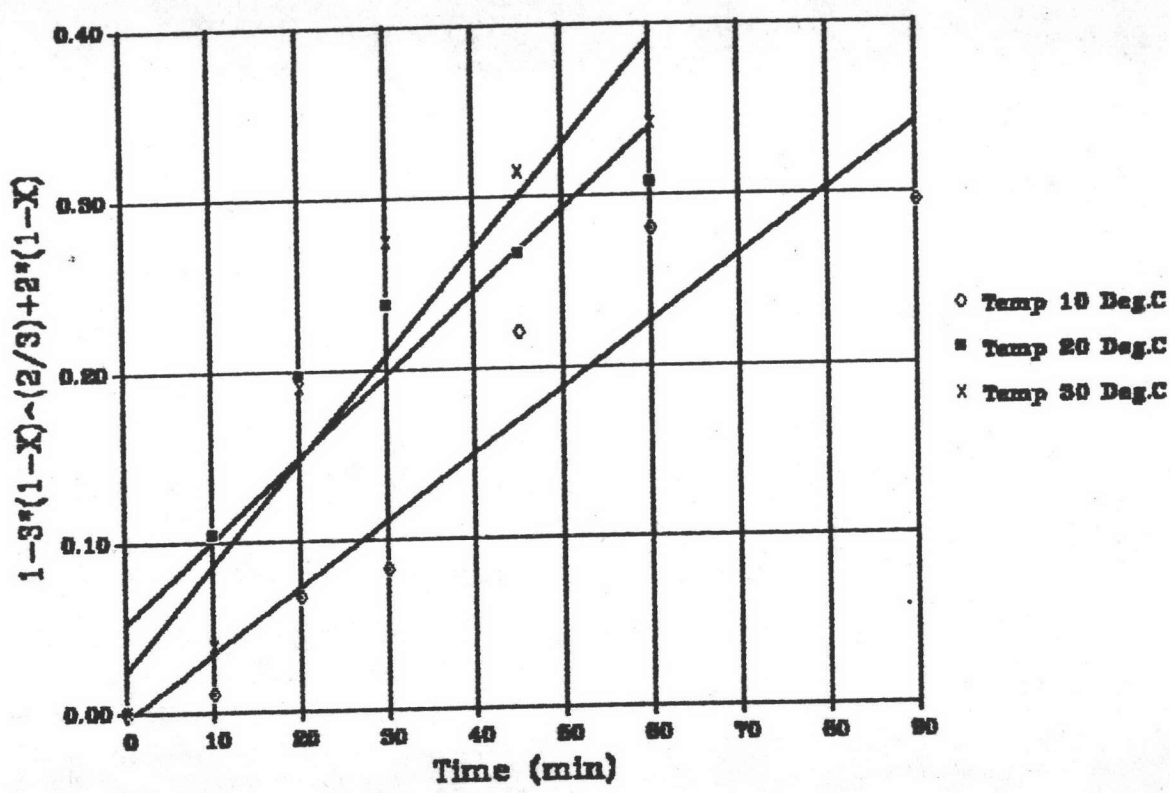
ค่า $R = 8.3144 \times 10^3$ จูล/(กิโลโมล)(องศาเซลเซียส)

ดังนั้นค่าพลังงานกระตุ้น $E = 16.40 \times 10^5$ จูล/กิโลโมล

ค่าคงที่ $D_{e_0} = 1.55 \times 10^{-7}$ ม²/กิโลโมล·วินาที

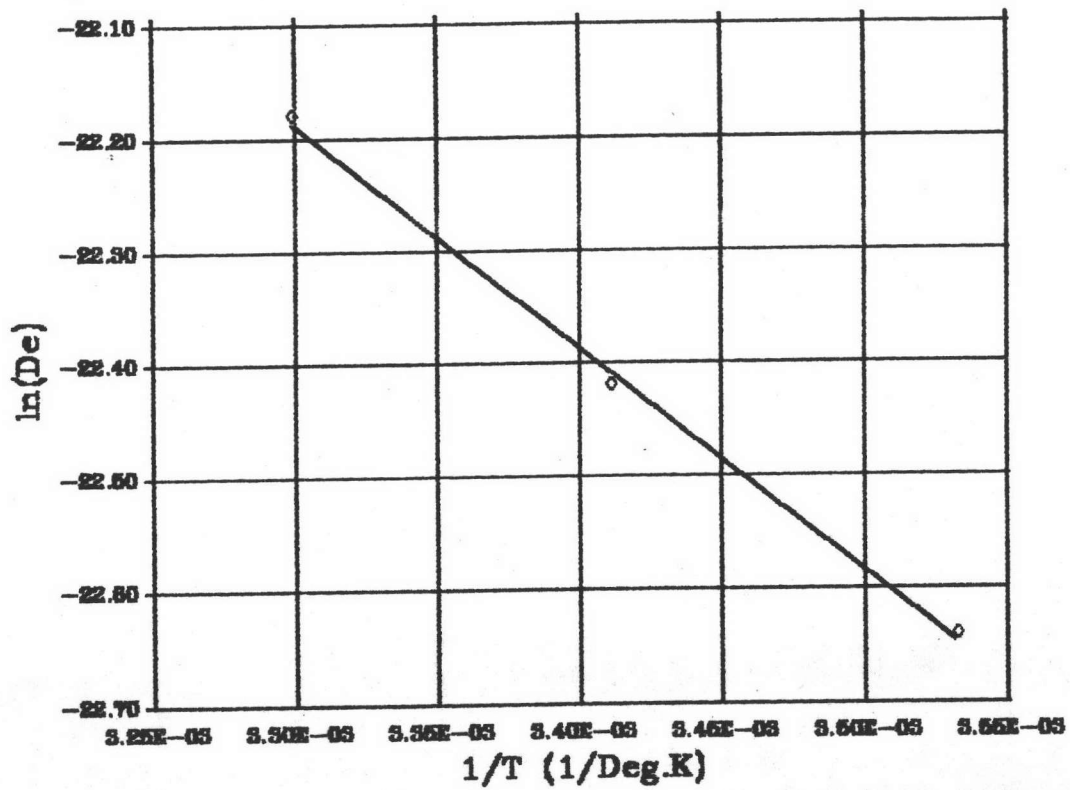
ดังนั้นความสัมพันธ์ของค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยากับอุณหภูมิเป็น

$$D_e = 1.55 \times 10^{-7} \exp(-16.40 \times 10^5 / RT)$$



รูปที่ 4.35 กราฟระหว่าง $1-3(1-X)^{2/3}+2(1-X)$ กับ เวลา โดยอาศัย unreacted shrinking core model ของถ่านหินแม่เมาะ 1 (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ)

- หมายเหตุ - อุณหภูมิ 10° ซ
- $r^2 = 0.9035$
 - correlation coefficient = 0.9505
 - standard error of prediction = 0.0428
- อุณหภูมิ 20° ซ
- $r^2 = 0.8800$
 - correlation coefficient = 0.9381
 - standard error of prediction = 0.0441
- อุณหภูมิ 30° ซ
- $r^2 = 0.8881$
 - correlation coefficient = 0.9424
 - standard error of prediction = 0.0541



รูปที่ 4.36 กราฟระหว่าง $\ln(D_e)$ กับ $1/T$ ตามแบบ Arrhenius plot ของปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันไฟรต์กับก๊าซออกซิเจนในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยอาศัย unreacted shrinking core model

หมายเหตุ

$$r^2 = 0.9978$$

$$\text{correlation coefficient} = -0.9989$$

$$\text{standard error of prediction} = 0.0154$$