

ผลการทดลอง การวิเคราะห์ และวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการซ้ดก่ามะถันในด้านหินโดยอาศัยปฏิบัติการออกซิเดชันซึ่งสามารถแบ่งงานวิจัยได้เป็น 4 ส่วน ส่วนแรกเป็นการเปรียบเทียบผลของชนิดสารละลายที่มี การศึกษามาบ้างแล้วในการซ้ดก่ามะถันจากด้านหินคือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต เพอริกซ์ลเพต คอปเปอร์ซัลเพต ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ส่วนที่ สอง เป็นการศึกษาสภาวะต่าง ๆ โดยพิจารณาถึงความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใน สารละลาย ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในสารละลาย ปริมาณด้านหินต่อสารละลาย อุณหภูมิ เวลา และอัตราการกวน ส่วนที่สาม การเปรียบเทียบผลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์- ออกไซด์ที่มีต่อการซ้ดก่ามะถันจากด้านหินแหล่งต่าง ๆ ส่วนที่สี่ เป็นการศึกษาอัตราเร็ว ปฏิกริยาเคมีของไฟไรต์ และขั้นตอนที่เป็นตัวควบคุมอัตราเร็วการทำปฏิกริยาในสารละลายไฮ- โดรเจนเปอร์ออกไซด์

การศึกษาองค์ประกอบก่ามะถันในด้านหินเหมืองป่าคา แม่เมาะ หวายเล็ก ดัง ตารางที่ 4.1 ให้ผลการวิเคราะห์ว่าด้านหินเหมืองป่าคามีร้อยละของเถ้าสูงคือ 48.61 แต่ มีก่ามะถันรูปแบบต่าง ๆ ก่อนข้างคำ โดยด้านหินเหมืองแม่เมาะมีปริมาณก่ามะถันสูงกว่า และ ด้านหินเหมืองหวายเล็กมีปริมาณก่ามะถันสูงสุดคือร้อยละ 5.03 แต่ด้านหินเหมืองแม่เมาะมี ร้อยละก่ามะถันไฟไรต์สูงมากกว่าคือร้อยละ 1.20 งานวิจัยนี้จึงเลือกด้านหินเหมืองแม่เมาะ มาศึกษาการซ้ดก่ามะถัน ซึ่งค่าก่ามะถันที่สูงจะทำให้เห็นข้อแตกต่างก่อนและหลังปฏิกริยาได้ ชัดเจน จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของด้านหินเหมืองแม่เมาะใน แต่ละการทดลอง ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกันเพราะตัวอย่างด้านหินที่นำมาทดลองมาจากจุดเดียวกัน และมีค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบเป็นเถ้าร้อยละ 20.30 สารระเหยร้อยละ 45.41 คาร์บอน คงตัว 34.53 ค่าความร้อน 5063 แคลอรี/กรัม ร้อยละปริมาณก่ามะถันรวม 3.83 ร้อยละ ก่ามะถันซัลเพต 0.70 ร้อยละก่ามะถันไฟไรต์ 1.16 และร้อยละก่ามะถันอินทรีย์ 1.97 ตาม ลำดับ

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติถ่านหินเหมืองต่าง ๆ (แบบไม่รวมความชื้น)

| สมบัติถ่านหิน | แหล่งถ่านหิน | | |
|---------------------------|--------------|---------|----------|
| | ปากา | แม่เมาะ | ทวายเล็ก |
| เถ้า | 84.61 | 20.23 | 31.53 |
| สารระเหย | 30.15 | 45.34 | 39.13 |
| คาร์บอนคงตัว | 21.24 | 34.43 | 92.34 |
| ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม) | 3410 | 4987 | 3832 |
| ปริมาณกำมะถันรวม (%) | 1.74 | 3.87 | 5.03 |
| กำมะถันซัลเฟต | 0.76 | 0.57 | 1.95 |
| กำมะถันไพไรต์ | 0.45 | 1.20 | 0.56 |
| กำมะถันอินทรีย์ | 0.53 | 2.10 | 2.52 |

ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น)

| สมบัติถ่านหิน | การทดสอบครั้งที่ | | | | | | | | |
|---------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | เฉลี่ย |
| เถ้า | 20.23 | 20.61 | 20.05 | 19.88 | 20.19 | 22.05 | 20.14 | 19.29 | 20.30 |
| สารระเหย | 45.34 | 45.04 | 45.15 | 45.58 | 45.61 | 45.47 | 45.35 | 45.75 | 45.41 |
| คาร์บอนคงตัว | 34.43 | 34.35 | 34.80 | 34.54 | 34.20 | 34.48 | 34.51 | 34.96 | 34.53 |
| ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม) | 4987 | - | - | 5105 | 5027 | 4949 | 5139 | 5170 | 5063 |
| ปริมาณกำมะถันรวม (%) | 3.87 | 3.94 | 3.80 | 3.81 | 3.77 | 3.78 | 3.89 | 3.82 | 3.83 |
| กำมะถันซัลเฟต | 0.57 | 0.69 | 0.68 | 0.70 | 0.80 | 0.72 | 0.74 | 0.74 | 0.70 |
| กำมะถันไพไรต์ | 1.20 | 1.26 | 1.12 | 1.11 | 1.16 | 1.09 | 1.19 | 1.17 | 1.16 |
| กำมะถันอินทรีย์ | 2.10 | 1.99 | 2.00 | 2.00 | 1.81 | 1.97 | 1.91 | 1.91 | 1.97 |

4.1 การเปรียบเทียบผลของสารละลายต่างชนิดในการขจัดกัมมันตจากรังสี

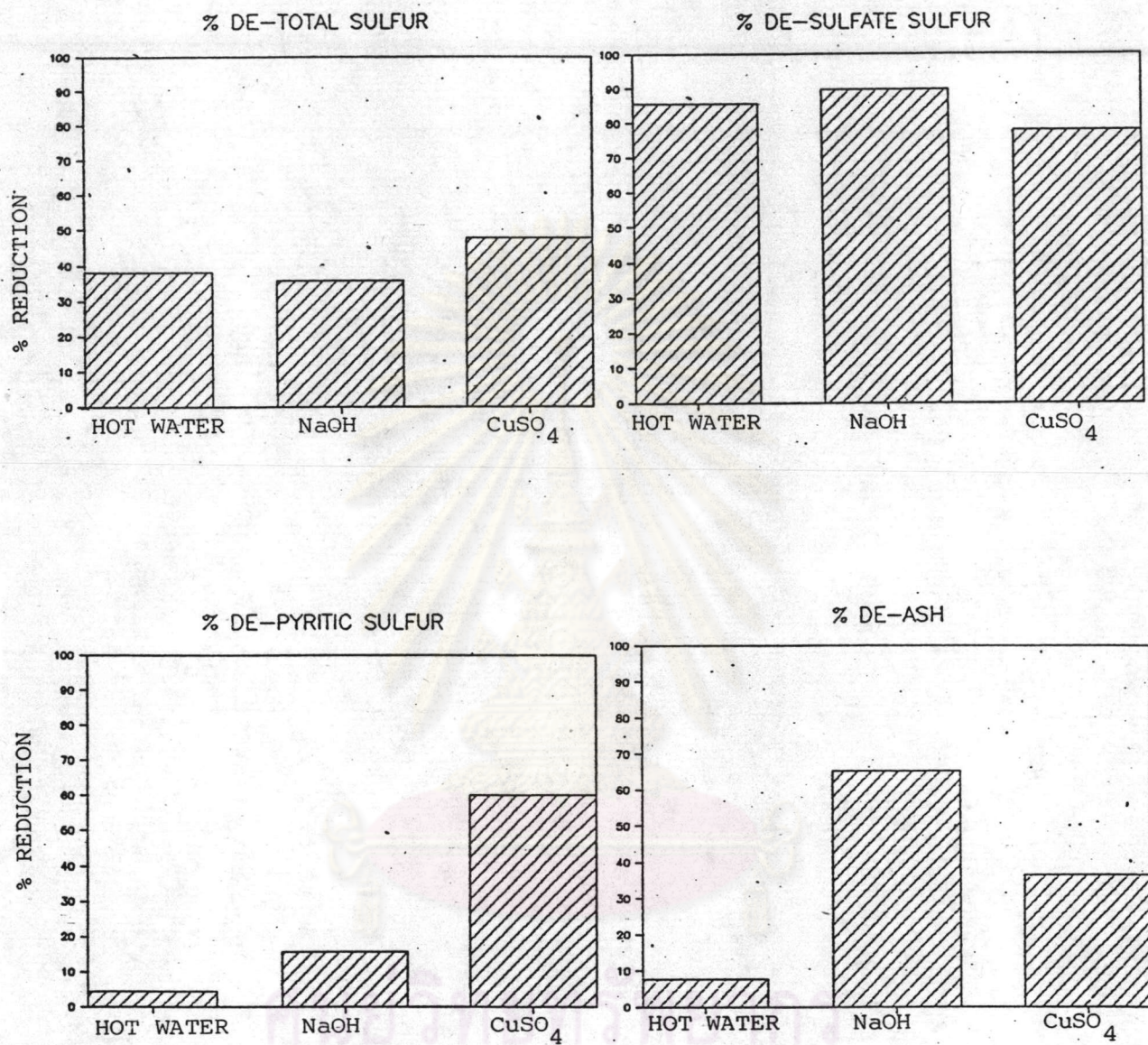
4.1.1 ในการศึกษาเปรียบเทียบผลของสารละลายต่างชนิดใช้แหล่งกำเนิดจากรังสี
เมมบริน โดยใช้น้ำขนาดด้านหน้าเท่ากันคือ 150-250 ไมครอน อุณหภูมิ 120 °ซ ระยะเวลา
1 ชม.

ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติของด้านหน้าเมมบริน (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและ
หลังผ่านกระบวนการขจัดกัมมันต โดยใช้น้ำขนาดต่างชนิดกันคือ น้ำกลั่น สารละลายโซ-
เดียมคาร์บอเนต 1.0 โมลาร์ สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 5% อัตราการกวาด 1000-1400
รอบ/นาที ความชื้นด้านหน้าเริ่มต้นร้อยละ 12.11 รูปที่ 4.1 แสดงผลของชนิดสารละลายต่อ
การลดกัมมันตรวม กัมมันตซัลเฟต กัมมันตไฟโรส และปริมาณน้ำจากด้านหน้า พบว่า
สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตให้ผลร้อยละการลดกัมมันตรวมและกัมมันตไฟโรสได้ดีกว่าคือ 47.7
และ 60.0 ตามลำดับ กัมมันตซัลเฟตให้ร้อยละการลดใกล้เคียงกันคือ 77.63-89.47 ส่วน
กัมมันตอินทรีย์ไม่ปรากฏว่าลดลง สำหรับการลดปริมาณน้ำในด้านหน้า สารละลายโซเดียมไฮ-
ดรอกไซด์ให้ผลร้อยละการลดได้ดีกว่าสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตคือ 65.23

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 สมบัติถ่านหินเหมืองป่าคา (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการ
 ซักล้างกำมะถันด้วยสารละลายต่าง ๆ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน
 อุณหภูมิ 120 °ซ เวลา 1 ชม. อัตราการกววน 1000-1200 รอบ/นาที
 ความชื้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 12.11)

| ถ่านหิน/สารละลาย | เริ่มต้น | น้ำร้อน | 1.0 M NaOH | 5% CuSO ₄ |
|----------------------|----------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | 100 กรัม/ 500 มล. | 100 กรัม/ 500 มล. | 50 กรัม/ 500 มล. |
| ถ้ำ | 48.61 | 44.89 | 16.09 | 30.86 |
| สารระเหย (V.M.) | 30.15 | 31.17 | 46.64 | 35.55 |
| คาร์บอนคงตัว (F.C.) | 21.24 | 23.94 | 36.46 | 33.59 |
| F.C./V.M. | 0.70 | 0.77 | 0.78 | 0.94 |
| ปริมาณกำมะถันรวม (%) | 1.74 | 1.08 | 1.12 | 0.91 |
| กำมะถันซัลเฟต | 0.76 | 0.11 | 0.08 | 0.71 |
| กำมะถันไพไรต์ | 0.45 | 0.43 | 0.38 | 0.18 |
| กำมะถันอินทรีย์ | 0.53 | 0.54 | 0.66 | 0.56 |
| % De-total sulfur | - | 37.93 | 35.63 | 47.70 |
| % De-sulfate sulfur | - | 85.53 | 89.47 | 77.63 |
| % De-pyritic sulfur | - | 4.44 | 15.55 | 60.0 |
| % De-ash | - | 7.65 | 65.23 | 36.51 |



รูปที่ 4.1 ผลของน้ำร้อน 0.1 M NaOH และ 5% CuSO₄ ต่อการขจัดปริมาณเถ้าและกำมะถันจากถ่านหินเหมืองป่าคา

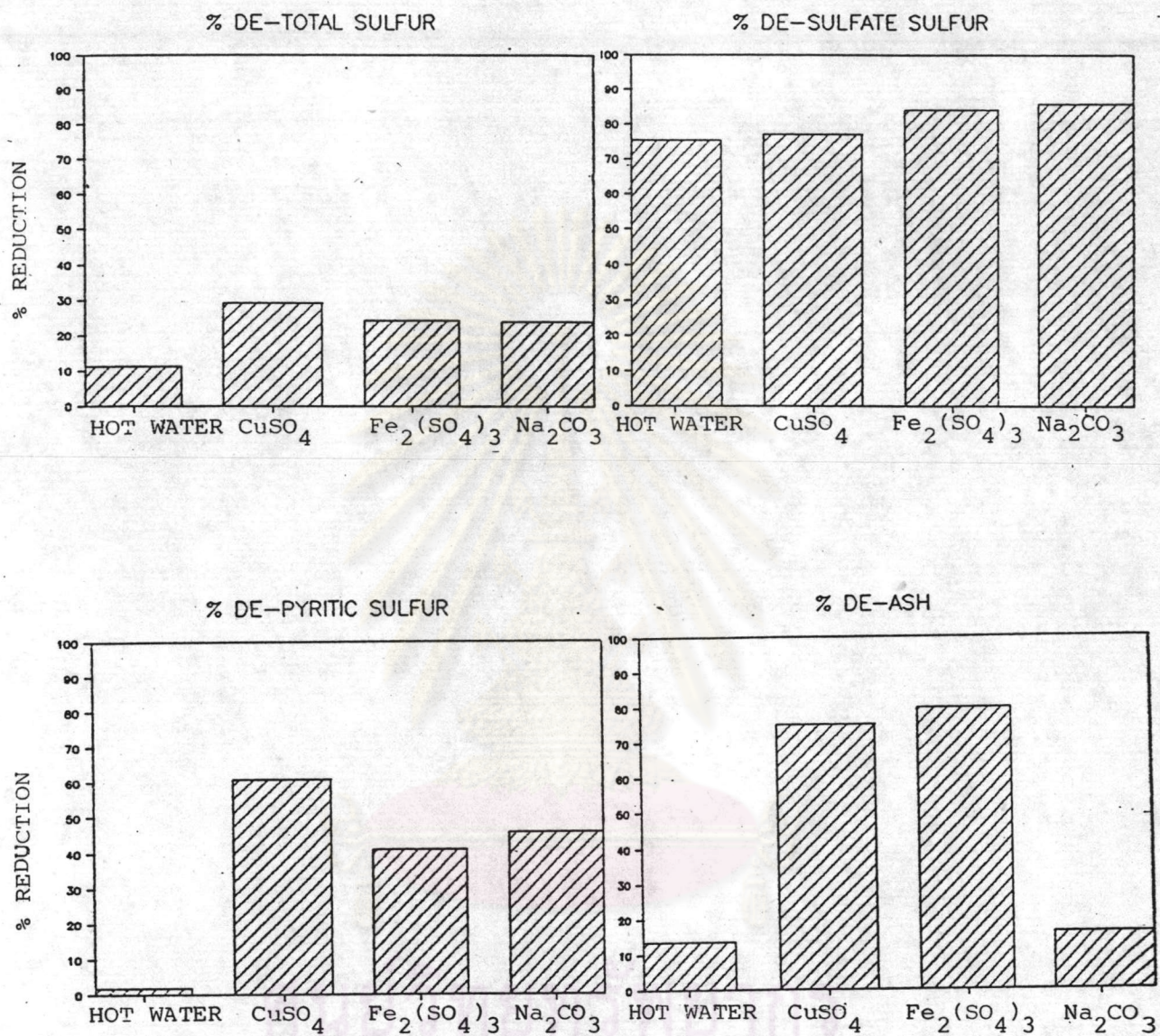
4.1.2 ในการศึกษาเปรียบเทียบผลของสารละลายต่างชนิด โดยใช้ถ่านหินเหมืองแม่เมาะ

ตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการซ้ดกำมะถัน โดยใช้ไอน้ำกลั่นร้อนอุณหภูมิ 120 °ซ สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 5% สารละลายเพอริกซัลเฟต 0.5 โมลาร์ สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 0.2 โมลาร์ อัตราเร็วการทวน 1000-1400 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 22.36 รูปที่ 4.2 แสดงผลการซ้ดกำมะถันพบว่าสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตให้ผลร้อยละการลคกำมะถันรวมได้ 29.2 มากกว่าสารละลายเพอริกซัลเฟตและสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเล็กน้อย และได้ร้อยละการลคกำมะถันไฟไรต์ 60.83 เท่ากับผลที่ลคได้จากถ่านหินเหมืองป่าคาข้างต้น ในขณะที่สารละลายเพอริกซัลเฟตและสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตได้ร้อยละการลคกำมะถันไฟไรต์ 40.83 และ 45.83 ตามลำดับ สารละลายต่างชนิดให้ผลร้อยละการลคกำมะถันซัลเฟตใกล้เคียงกันคือ 77.19-85.96 . กำมะถันอินทรีย์ไม่ปรากฏว่าลดลง การลคปริมาณเข้าในถ่านหินนั้น สารละลายเพอริกซัลเฟตได้ร้อยละการลคปริมาณเข้า 79.88 มากกว่าการใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเล็กน้อยแต่ให้ผลดีกว่าการใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและน้ำร้อนมาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 สมบัติถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันด้วยสารละลายต่าง ๆ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน อุณหภูมิ 120°ซ เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1000-1200 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 22.36)

| ถ่านหิน/สารละลาย | เริ่มต้น | น้ำร้อน | 5% CuSO ₄ | 0.5 M Fe ₂ (SO ₄) ₃ | 0.2 M Na ₂ CO ₃ |
|---------------------------|----------|------------------|----------------------|---|---------------------------------------|
| | | 100 กรัม/500 มล. | 50 กรัม/500 มล. | 100 กรัม/500 มล. | 100 กรัม/500 มล. |
| เถ้า | 20.23 | 17.49 | 5.04 | 4.08 | 71.01 |
| สารระเหย (V.M.) | 45.34 | 43.09 | 42.18 | 48.10 | 48.19 |
| คาร์บอนคงตัว (F.C.) | 34.43 | 39.42 | 52.78 | 47.82 | 34.80 |
| F.C./V.M. | 0.76 | 0.91 | 1.25 | 0.99 | 0.72 |
| ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม) | 4987 | 5009 | 5737 | 5182 | 4783 |
| ปริมาณกำมะถันรวม (%) | 3.87 | 3.44 | 2.74 | 2.94 | 2.95 |
| กำมะถันซัลเฟต | 0.57 | 0.14 | 0.13 | 0.09 | 0.08 |
| กำมะถันไพไรต์ | 1.20 | 1.18 | 0.47 | 0.71 | 0.65 |
| กำมะถันอินทรีย์ | 2.10 | 2.12 | 2.14 | 2.14 | 2.22 |
| % De-total sulfur | - | 11.11 | 29.19 | 24.03 | 23.77 |
| % De-sulfate sulfur | - | 75.44 | 77.19 | 84.21 | 45.83 |
| % De-pyritic sulfur | - | 1.67 | 60.83 | 40.83 | 45.83 |
| % De-ash | - | 13.54 | 75.09 | 79.83 | 15.92 |



รูปที่ 4.2 ผลของน้ำร้อน, 5% CuSO_4 , 0.5 M $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ และ 0.2 M Na_2CO_3 .

ต่อการขจัดปริมาณเข้าและกำมะถันจากด้านหินเหมืองแม่เมาะ

ตารางที่ 4.5 แสดงสมบัติของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน โดยใช้ ก) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 นอร์มอล อุณหภูมิ 120 °ซ ข) สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ในกรดซัลฟูริก 0.1 นอร์มอล อุณหภูมิ 22 °ซ ค) ใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 15% ในกรดซัลฟูริก 0.1 นอร์มอล แต่หลังจากถ่านหินทำปฏิกิริยากับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แล้วทำการล้าง (leaching) ท่อด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 0.2 โมลาร์ อุณหภูมิ 80 °ซ เป็นเวลา 15 นาที สุกท้ายล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง ความชื้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 24.23

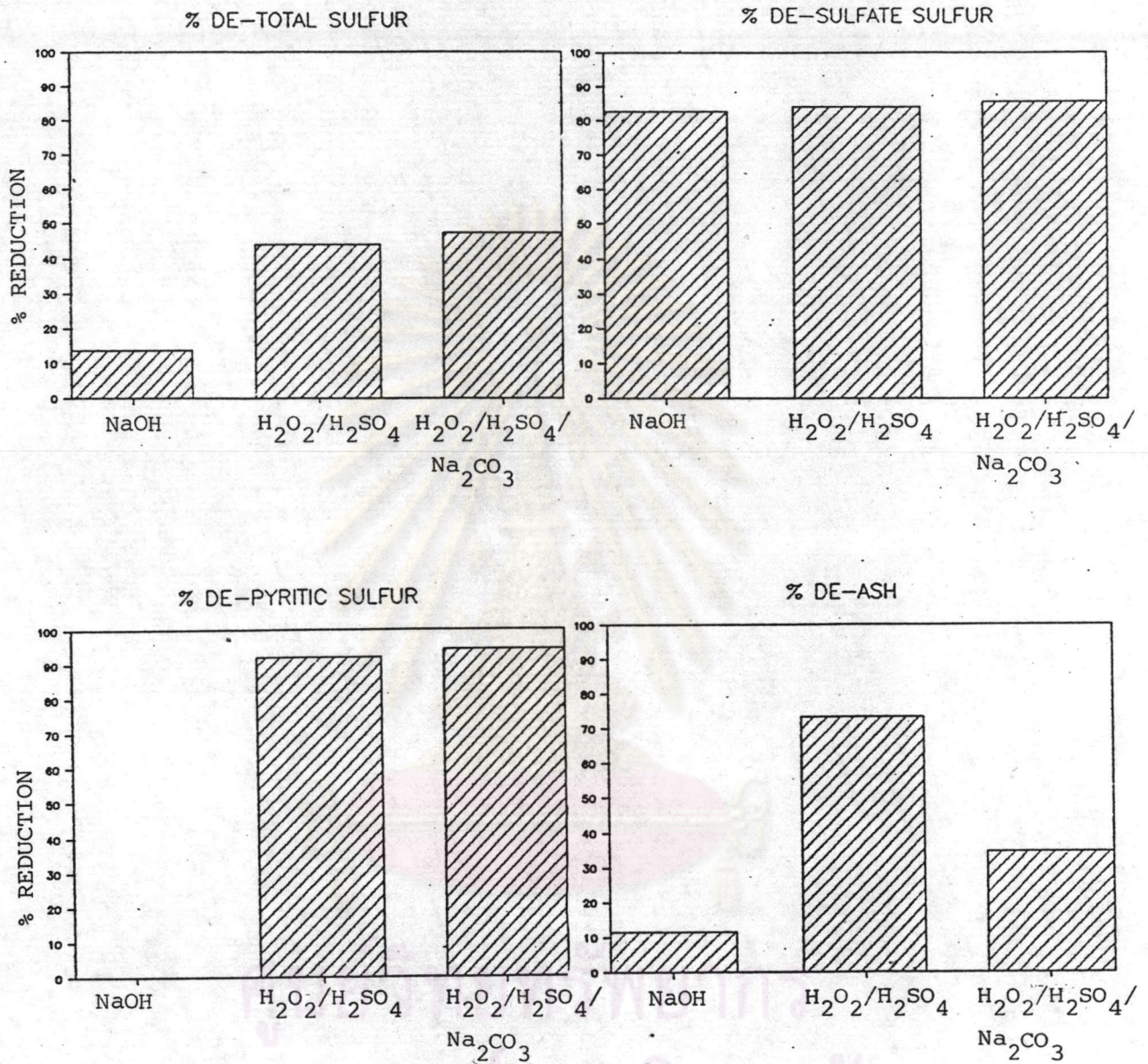
รูปที่ 4.3 แสดงผลของสารละลายต่อการลดกำมะถันรวม กำมะถันซัลเฟต กำมะถันไพไรต์ และปริมาณเถ้า พบว่าสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้ผลในการลดกำมะถันรวมและกำมะถันไพไรต์ได้ดีคือร้อยละการลดกำมะถันรวม 43.91 ร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์ 92.06 ส่วนการล้างด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตได้ร้อยละการลดกำมะถันรวมและกำมะถันไพไรต์เพิ่มอีก 2-3 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าให้ผลดีกว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งได้ร้อยละการลดกำมะถันรวมเพียง 13.7 และไม่สามารถลดกำมะถันไพไรต์และกำมะถันอินทรีย์ลงได้ กำมะถันซัลเฟตได้ร้อยละการลดใกล้เคียงกันคือ 82.61 สำหรับการลดปริมาณเถ้าในถ่านหิน การใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวให้ผลร้อยละการลดเถ้าได้มากถึง 73.31 และการล้างด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ปรากฏว่าได้ร้อยละการลดเถ้า 34.59 เท่านั้น ส่วนการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ร้อยละการลดเถ้าเพียง 11.6

จากผลของตารางที่ 4.3, 4.4, 4.5 จะเห็นว่า การใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ให้ผลที่ดีที่สุดคือได้ร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์ 92.26 ต่อไปจะเป็นการศึกษาสภาวะการทำปฏิกิริยาของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ตารางที่ 4.5 สมบัติถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันด้วยสารละลายต่าง ๆ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน เวลา 2 ชม. อัตราการกววน 1000 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 24.23)

| | เริ่มต้น | 0.25 N NaOH 120 °ซ | 15%H ₂ O ₂ ใน 0.1NH ₂ SO ₄ 22 °ซ | 15%H ₂ O ₂ ใน 0.1 H ₂ SO ₄ 22 °ซ |
|----------------------|----------|-----------------------|---|---|
| ถ่านหินต่อสารละลาย | | 100 กรัม/500 มล. | 20 กรัม/300 มล. | leaching with 0.2M Na ₂ CO ₃ (80 °ซ) 20 กรัม/300 มล. |
| ถ้ำ | 20.61 | 18.22 | 5.50 | 13.84 |
| สารระเหย (V.M.) | 45.04 | 47.50 | 49.63 | 44.72 |
| คาร์บอนคงตัว (F.C.) | 34.35 | 34.28 | 44.87 | 41.80 |
| F.C./V.M. | 0.76 | 0.72 | 0.90 | 0.93 |
| ปริมาณกำมะถันรวม (%) | 3.94 | 3.40 | 2.21 | 2.07 |
| กำมะถันซัลเฟต | 0.69 | 0.21 | 0.11 | 0.10 |
| กำมะถันไพไรต์ | 1.26 | 1.27 | 0.10 | 0.07 |
| กำมะถันอินทรีย์ | 1.99 | 2.01 | 2.00 | 1.90 |
| % De-total sulfur | - | 13.70 | 43.91 | 47.46 |
| % De-sulfate sulfur | - | 82.61 | 84.06 | 85.51 |
| % De-pyritic sulfur | - | - | 92.06 | 94.44 |
| % De-ash | - | 11.60 | 73.31 | 34.59 |





รูปที่ 4.3 ผลของสารละลาย NaOH 15% H₂O₂/0.1 N H₂SO₄ และ 15% H₂O₂/0.1 N H₂SO₄ ที่ตามด้วยการล้างด้วย 0.2 M Na₂CO₃ ต่อการขจัดปริมาณเถ้าและกำมะถันชนิดต่าง ๆ จากถ่านหินเหมืองแม่เมาะ

ตารางที่ 4.6 สมบัติถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการ
ขจัดกำมะถันด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% น้ำหนักต่อปริมาตร
ใน 0.1 นอร์มอลกรดซัลฟูริก โดยใช้อัตราส่วนปริมาณถ่านหินต่อสารละลายต่าง
กัน (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ควบคุมอุณหภูมิในอ่างน้ำแข็ง เวลา
2 ชม. ความชื้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 23.27)

| | เริ่มต้น | 15% H ₂ O ₂ ใน 0.1 N H ₂ SO ₄ | | |
|----------------------|----------|---|-----------------|-----------------|
| | | 30 กรัม/300 มล. | 30 กรัม/150 มล. | 60 กรัม/300 มล. |
| | | (1:10) 14 ชม | (1:5) 14 ชม | (1:5) 18 ชม |
| เถ้า | 20.05 | 8.57 | 13.24 | 8.64 |
| สารระเหย (V.M.) | 45.15 | 49.71 | 51.14 | 49.32 |
| คาร์บอนคงตัว (F.C.) | 34.80 | 41.72 | 35.62 | 42.04 |
| F.C./V.M. | 0.77 | 0.84 | 0.70 | 0.85 |
| ปริมาณกำมะถันรวม (%) | 3.80 | 2.32 | 2.39 | 2.04 |
| กำมะถันซัลเฟต | 0.68 | 0.12 | 0.11 | 0.08 |
| กำมะถันไพไรต์ | 1.12 | 0.28 | 0.35 | 0.16 |
| กำมะถันอินทรีย์ | 2.00 | 1.92 | 1.93 | 1.80 |
| % DE-total sulfur | - | 38.95 | 37.10 | 46.31 |
| % De-sulfate sulfur | - | 82.35 | 83.82 | 88.23 |
| % De-pyritic sulfur | - | 75.0 | 68.75 | 85.71 |
| % De-organic sulfur | - | 4.00 | 3.50 | 10.00 |
| % De-ash | - | 57.26 | 33.96 | 56.91 |

4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การทดลองนี้ใช้ถ่านหินเหมืองแม่เมาะช่วงขนาด 150-250 ไมครอน ทำปฏิกิริยากับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรคือ ปริมาณถ่านหินต่อสารละลาย ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก เวลา อุณหภูมิ อัตราการกวน และขนาดถ่านหิน และหาสมบัติของถ่านหินที่เปลี่ยนแปลงก่อนและหลังปฏิกิริยา

4.2.1 ผลของปริมาณถ่านหินต่อสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การเปลี่ยนแปลงปริมาณถ่านหินต่อสารละลายคือ ถ่านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 30 มล. (1:10) ถ่านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 150 มล.(1:5) และถ่านหิน 60 กรัมต่อสารละลาย 15% ใน 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก ระยะเวลา 2 ชม. ทำปฏิกิริยาในขวดชมพู (flask) แช่ในอ่างน้ำแข็ง

ตารางที่ 4.6 แสดงสมบัติของถ่านหินเหมืองแม่เมาะก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน ความชื้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 23 เมื่อพิจารณาจะเห็นว่า การใช้ปริมาณถ่านหินต่อสารละลาย 1:10 และ 1:5 ที่อุณหภูมิ 14 °ซ พบว่าการใช้อัตราส่วน 1:10 ให้ผลการลดกำมะถันรวมและกำมะถันไพไรต์ได้ร้อยละ 38.95 และ 75.0 ซึ่งดีกว่าการใช้อัตราส่วน 1:5 เล็กน้อย เมื่อคิดเทียบกับอัตราส่วนที่มากเป็นสองเท่า การเปรียบเทียบการใช้อัตราส่วนเดียวกันคือ 1:5 แต่ใช้อุณหภูมิ 18 °ซ ให้ผลการลดกำมะถันรวมและกำมะถันไพไรต์ได้ร้อยละ 46.31 และ 85.71 ดีกว่าอัตราส่วน 1:5 ที่อุณหภูมิ 14 °ซ แสดงว่าอุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้ และมีอิทธิพลมากกว่าปริมาณถ่านหินต่อสารละลายด้วย ถึงแม้จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนแต่จะมีเพียงช่วงอุณหภูมิหนึ่งที่เหมาะสม

4.2.2 ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลาย

ตารางที่ 4.7 แสดงสมบัติของถ่านหินเหมืองแม่เมาะก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน โดยการเปลี่ยนความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 10 15 25 % น้ำหนักต่อปริมาตร ใน 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก โดยใช้ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 30 มล. (1:10) อุณหภูมิ 25 °C ระยะเวลา 2 ชม. อัตราการกวน 1000-1200 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 22.79

รูปที่ 4.4 แสดงผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลาย กรดซัลฟูริกต่อการลดปริมาณกำมะถันในถ่านหิน พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 5 10 15 25 % สามารถลดกำมะถันรวมจากเดิมร้อยละ 3.81 เป็น 2.49 1.98 1.95 และ 1.82 ตามลำดับ

ผลต่อกำมะถันไพไรต์คือ สามารถลดจากเดิมร้อยละ 1.11 เป็น 0.38 เมื่อใช้ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5% และเหลือเป็นร้อยละ 0.04-0.01 เมื่อความเข้มข้นเพิ่มเป็น 10-25%

ผลต่อกำมะถันซัลเฟตคือ สามารถลดจากเดิมร้อยละ 0.70 เป็น 0.14-0.09 ซึ่งจะเห็นว่าลดลงได้มาก และให้ผลใกล้เคียงกันสำหรับทุกค่าความเข้มข้น

ผลต่อกำมะถันอินทรีย์คือ สามารถลดจากเดิมร้อยละ 2.0 เป็น 1.72 เมื่อความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มเป็น 25% เห็นได้ว่าคุณสมบัติในการลดกำมะถันอินทรีย์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

รูปที่ 4.5 แสดงผลของรูปที่ 4.4 ในรูปของร้อยละการลดปริมาณกำมะถันรูปแบบต่าง ๆ พบว่าได้ร้อยละการลดกำมะถันซัลเฟต 80.0-87.14 ได้ร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์ 65.76-99.10 ส่วนร้อยละการลดกำมะถันอินทรีย์อยู่ในช่วง 1.50-14.0 ซึ่งเห็นได้ว่าตั้งแต่ความเข้มข้น 10% ขึ้นไปร้อยละการลดกำมะถันซัลเฟตและกำมะถันไพไรต์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย นอกจากร้อยละการลดกำมะถันอินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จึงทำให้ร้อยละการลดกำมะถันรวมเพิ่มขึ้นได้เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น

รูปที่ 4.6 แสดงผลความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อปริมาณถ่านหิน ต่อค่าความร้อนของถ่านหิน และความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนคาร์บอนคงตัวต่อสารระเหยในถ่านหิน

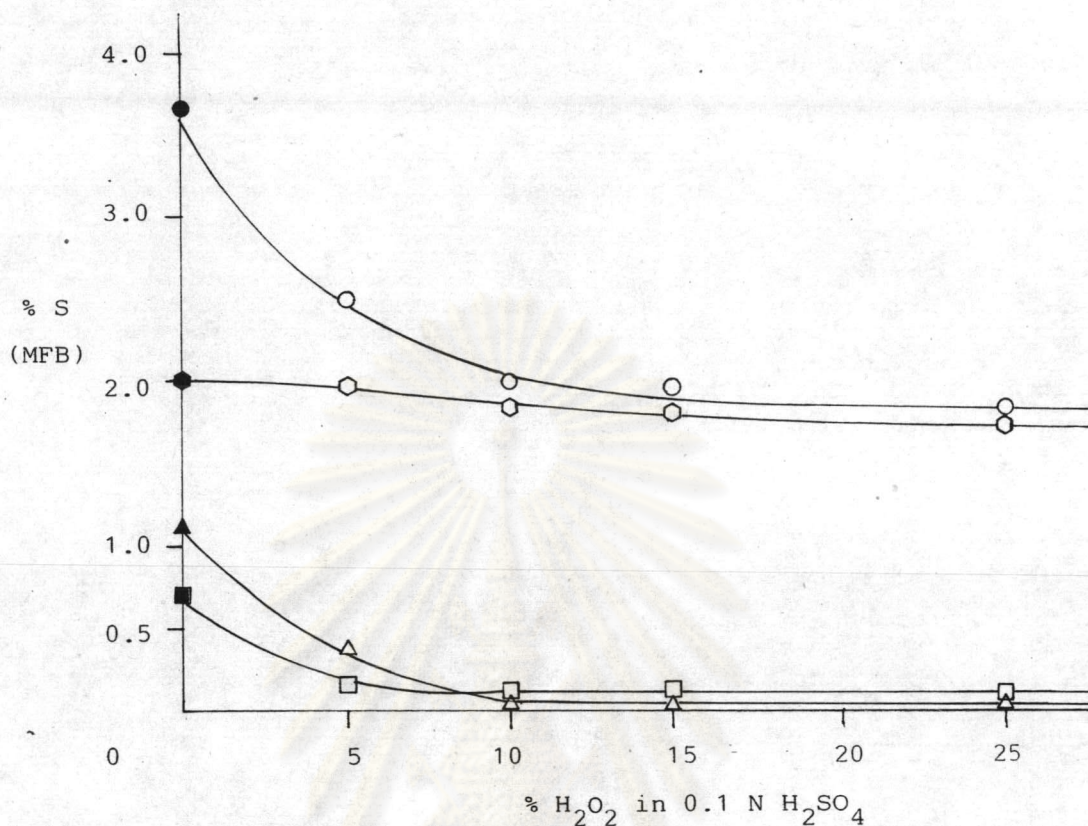
เมื่อความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 10-25% ให้ผลร้อยละการลด ปริมาณเถ้าเป็น 66.50-71.43 สำหรับผลต่อการเพิ่มค่าความร้อนของถ่านหินจากเดิม 5105 แคลอรี/กรัม (MFB) สามารถเพิ่มค่าความร้อนได้ร้อยละ 12.38 เมื่อใช้ความเข้มข้นไฮโดร- เจนเปอร์ออกไซด์ 5% ซึ่งสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนคาร์บอนคงตัวต่อสารระเหยใน ถ่านหิน (F.C./V.M.) จากเดิม 0.76 เพิ่มเป็น 0.93 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 10-25% ทำให้ค่าความร้อนลดลงเล็กน้อยโดยค่าสัดส่วน F.C./V.M. ลดลงอยู่ในช่วง 0.89- 0.86 เนื่องจากการสลายตัวของคาร์บอน

โดยสรุปการใช้ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5% เพิ่มค่าความร้อนของ ถ่านหินได้สูงถึงร้อยละ 12.38 แต่ปริมาณกำมะถันชนิดต่าง ๆ ลดลงไม่มากนัก เมื่อเพิ่มความ เข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณกำมะถันรูปแบบต่าง ๆ ลดลงได้มากขึ้น โดยความเข้มข้น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงกว่า 10% ขึ้นไปให้ผลการลดกำมะถันซัลเฟตและกำมะถันไพไรต์ได้ ใกล้เคียงกัน แต่การลดกำมะถันอินทรีย์มีแนวโน้มดีขึ้นสัมพันธ์กับค่าสัดส่วน F.C./V.M. ที่ลดลง จากการสลายพันธะระหว่างคาร์บอนและกำมะถันอินทรีย์ในถ่านหินทำให้โครงสร้างคาร์บอนบาง ส่วนหายไป (decompose) ดังนั้นความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมคือ 10-15% โดยได้ร้อยละการลดกำมะถันซัลเฟต กำมะถันไพไรต์ และกำมะถันอินทรีย์ 84.28 9.730 และ 9.50 ตามลำดับ ได้ร้อยละการลดเถ้า 68.81 และเพิ่มค่าความร้อนได้ร้อยละ 11.69

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

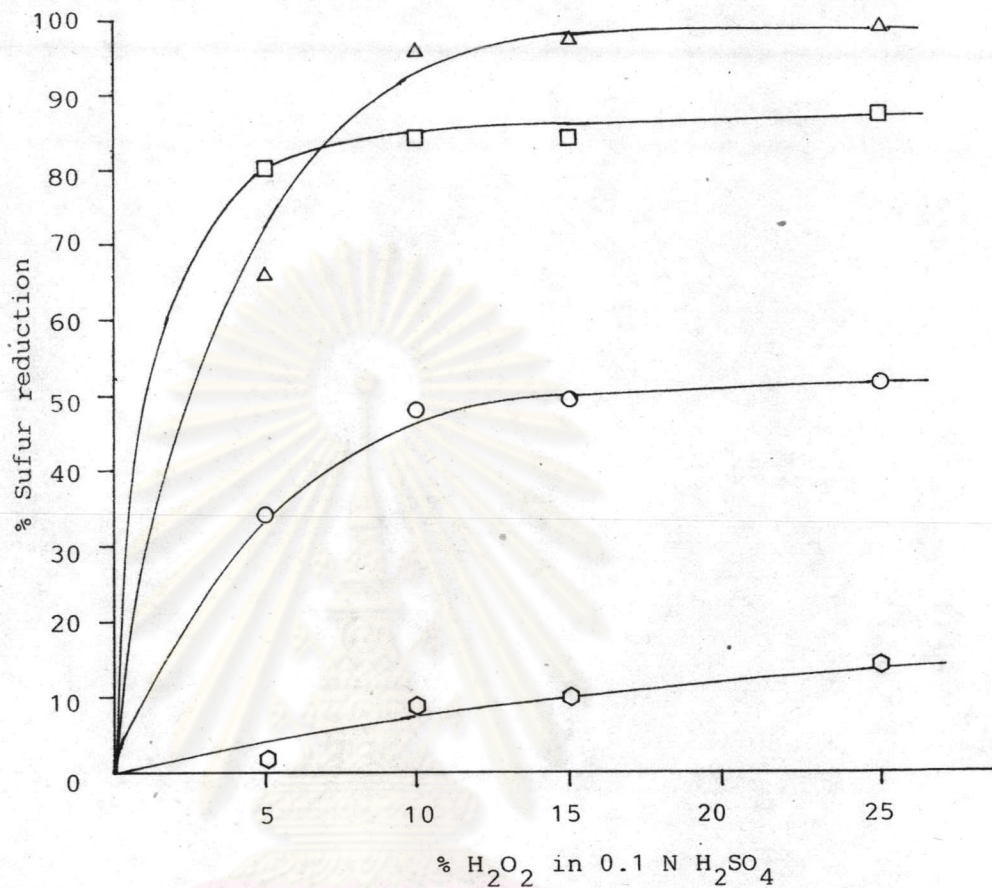
ตารางที่ 4.7 สมบัติถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ ใน 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 300 มล. อุณหภูมิ 25°ซ เวลา 2 ชม. อัตราการกวน 100-1200 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 22.79)

| | เริ่มต้น | H ₂ O ₂ ใน 0.1 N H ₂ SO ₄ | | | |
|---------------------------|----------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | | 5% H ₂ O ₂ | 10% H ₂ O ₂ | 15% H ₂ O ₂ | 25% H ₂ O ₂ |
| เถ้า | 19.88 | 9.59 | 6.65 | 6.20 | 5.68 |
| สารระเหย (V.M.) | 45.58 | 46.85 | 49.65 | 49.72 | 50.80 |
| คาร์บอนคงตัว (F.C.) | 34.54 | 43.56 | 43.70 | 44.08 | 43.52 |
| F.C./V.M. | 0.76 | 0.93 | 0.88 | 0.89 | 0.86 |
| ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม) | 5105 | 5737 | 5675 | 5702 | 5671 |
| ปริมาณกำมะถันรวม (%) | 3.81 | 2.49 | 1.98 | 1.95 | 1.82 |
| กำมะถันซัลเฟต | 0.70 | 0.14 | 0.11 | 0.11 | 0.09 |
| กำมะถันไพไรต์ | 1.11 | 0.38 | 0.04 | 0.03 | 0.01 |
| กำมะถันอินทรีย์ | 2.00 | 1.97 | 1.83 | 1.81 | 1.72 |
| % De-total sulfur | - | 34.64 | 48.03 | 48.82 | 52.23 |
| % De-sulfate sulfur | - | 80.0 | 84.28 | 84.28 | 87.14 |
| % De-pyritic sulfur | - | 65.76 | 96.40 | 97.30 | 99.10 |
| % De-organic sulfur | - | 1.50 | 8.50 | 9.50 | 14.0 |
| % De-ash | - | 51.76 | 66.50 | 68.81 | 71.43 |
| % Heating value increase | - | 12.38 | 16.16 | 11.69 | 11.09 |



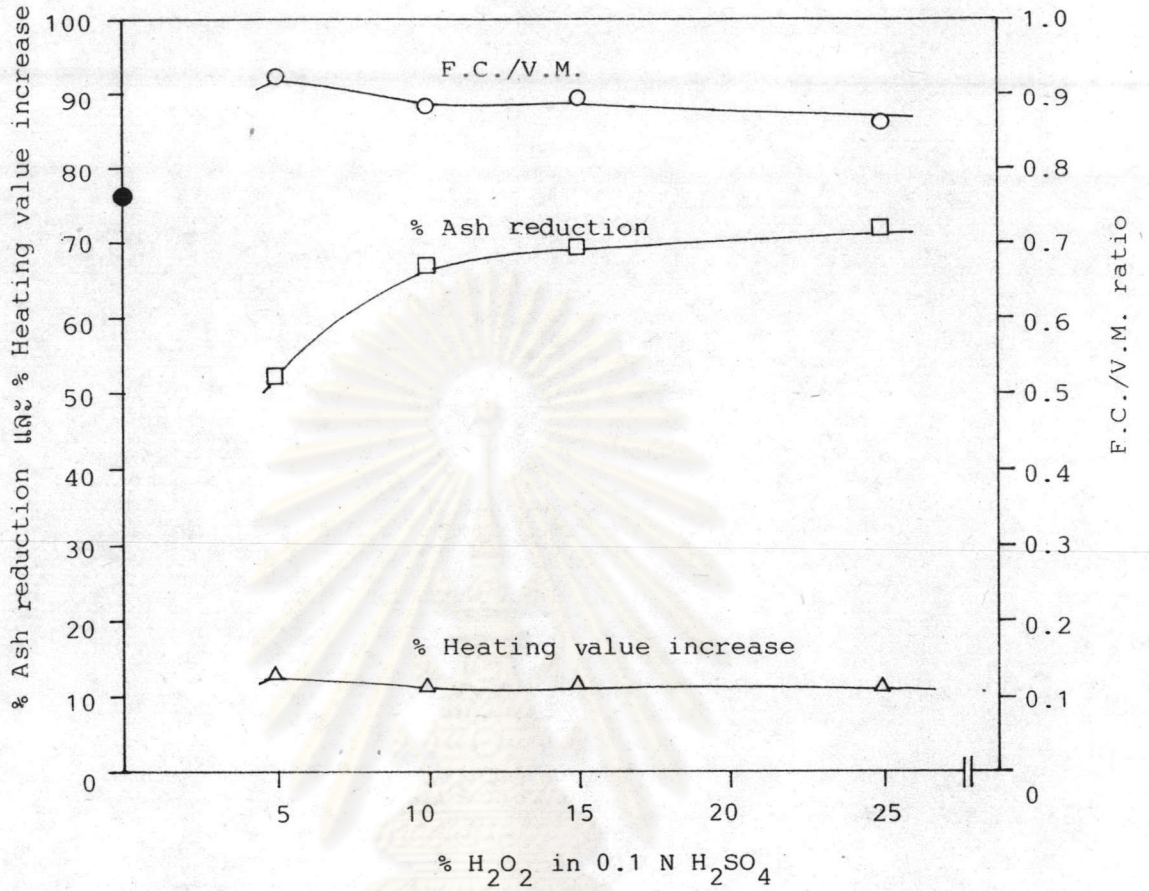
รูปที่ 4.4 ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลาย 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก ที่มีต่อกำมะถันชนิดต่าง ๆ ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ หลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 300 มล. อุณหภูมิ 25 °ซ ระยะเวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1000-1200 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 22.79)

- และ ○ แสดงร้อยละของกำมะถันรวมเริ่มต้นและหลังปฏิกิริยา
- ▲ และ △ แสดงร้อยละของกำมะถันไพไรต์เริ่มต้นและหลังปฏิกิริยา
- และ □ แสดงร้อยละของกำมะถันซัลเฟตเริ่มต้นและหลังปฏิกิริยา
- และ ○ แสดงร้อยละของกำมะถันอินทรีย์เริ่มต้นและหลังปฏิกิริยา



รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลาย 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก ที่มีต่อการขจัดกำมะถันชนิดต่าง ๆ ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ หลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 300 มล. อุณหภูมิ 25 °C ระยะเวลา 2 ชม. อัตราการกวน 1000-1200 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 22.29)

- แสดง % De-total sulfur
- △ แสดง % De-pyritic sulfur
- แสดง % De-sulfate sulfur
- ◇ แสดง % De-organic sulfur



รูปที่ 4.6 ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลาย 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก ที่มีผลต่อการลดปริมาณเถ้า การเพิ่มค่าความร้อนและสัดส่วนคาร์บอนคงตัวต่อสารระเหย (F.C./V.M.) ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ หลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน (ขนาด ถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 300 มล. อุณหภูมิ 25 °ซ ระยะเวลา 2 ชม. อัตราการกวน 1000-1200 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหิน เริ่มต้นร้อยละ 22.79)

- และ ○ แสดง สัดส่วนคาร์บอนคงตัวต่อสารระเหย (F.C./V.M.) ก่อนและหลังปฏิกิริยา
- △ แสดง % Heating value increase
- แสดง % Ash reduction

4.2.3 ผลของความเข้มข้นกรดซัลฟูริกในสารละลาย

ตารางที่ 4.8 แสดงสมบัติของถ่านหินเหมืองแม่เมาะก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน โดยการเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกจาก 0 0.05 0.1 0.5 1.0 และ 2.0 นอร์มอล ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% โดยใช้ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 300 มล. (1:10) อุณหภูมิ 25 °C ระยะเวลา 2 ชม. อัตราการกวน 1000-1200 รอบ/นาที ความเข้มข้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 22.39

รูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 แสดงผลของกรดซัลฟูริกในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวกับถ่านหินไฟไรต์ลดลงจากร้อยละ 1.16 เป็น 0.28 คิดเป็นร้อยละการลดกำมะถันไฟไรต์ 75.86 เมื่อใช้ความเข้มข้นกรดซัลฟูริกจากช่วง 0.05-2.0 นอร์มอล ให้ผลการลดกำมะถันไฟไรต์เป็นร้อยละ 0.08-0.024 คิดเป็นร้อยละการลดกำมะถันไฟไรต์เพิ่ม 93.10-97.93

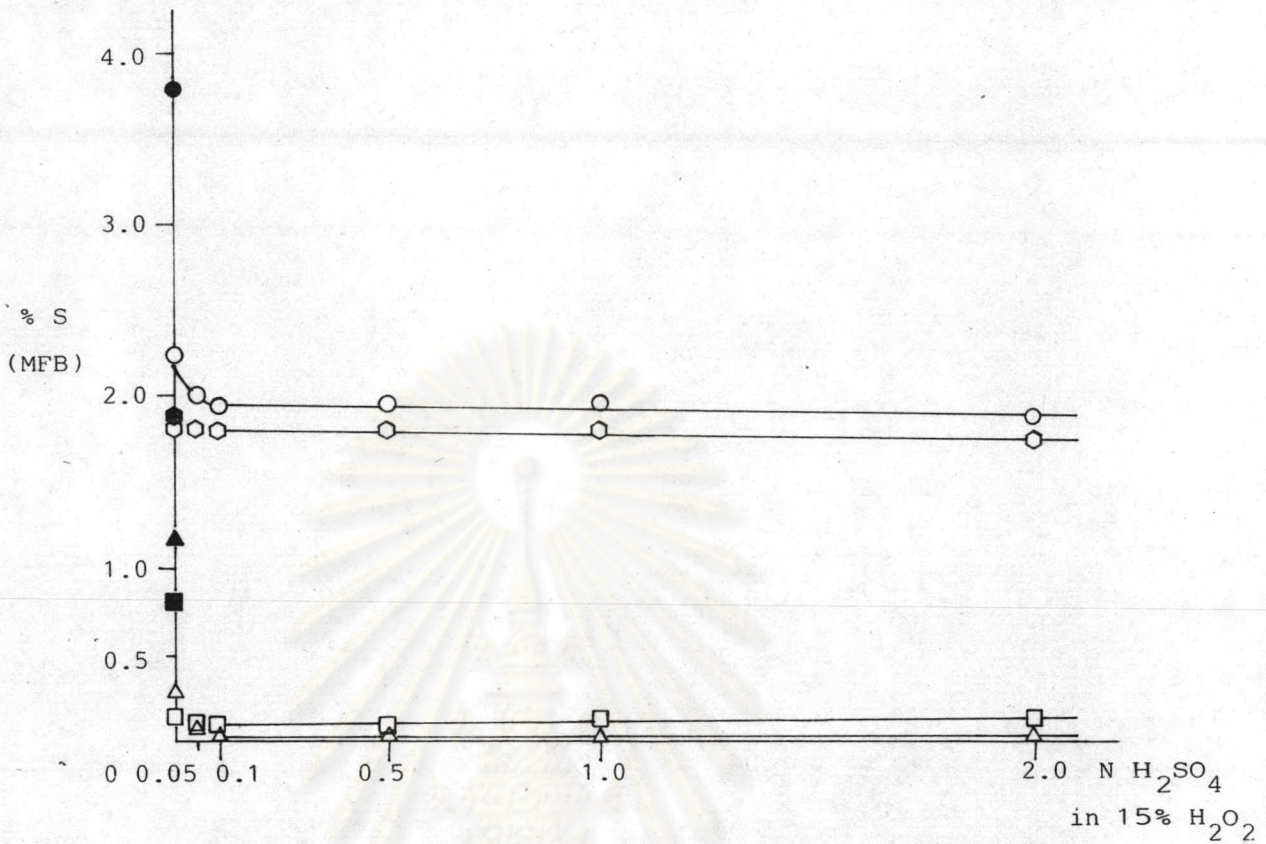
รูปที่ 4.9 แสดงผลของความเข้มข้นกรดซัลฟูริกในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อปริมาณถ่านหิน ค่าความร้อนของถ่านหินและความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนคาร์บอนคงตัวต่อสารระเหยในถ่านหิน

เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวลดถ่านหินได้จากร้อยละ 20.19 เป็น 1.356 คิดเป็นร้อยละการลดถ่านหิน 32.84 แต่การใช้กรดซัลฟูริกร่วมกับ 0.05-2.0 นอร์มอล สามารถลดถ่านหินได้เป็นร้อยละ 7.63-4.58 คิดเป็นร้อยละการลด 62.21-77.31

โดยสรุปของการใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% เพียงอย่างเดียวได้ร้อยละการลดกำมะถันซัลเฟตและกำมะถันไฟไรต์ 83.75 และ 75.86 ตามลำดับ ได้ร้อยละการลดถ่านหิน 32.84 และเพิ่มค่าความร้อนได้ร้อยละ 9.17 โดยกำมะถันอินทรีย์ไม่ลดลง แต่เมื่อเพิ่มกรดซัลฟูริกลงในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถลดกำมะถันชนิดต่าง ๆ ลดปริมาณถ่านหิน และเพิ่มค่าความร้อนได้มากขึ้น โดยที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริกตั้งแต่ 0.1-2.0 นอร์มอล ให้ผลการลดกำมะถันชนิดต่าง ๆ และเพิ่มค่าความร้อนใกล้เคียงกัน แต่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริกที่สูงสามารถลดปริมาณถ่านหินได้มากขึ้น ดังนั้นการเพิ่มกรดซัลฟูริกลงในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เล็กน้อยช่วยให้ความสามารถขจัดกำมะถันและถ่านหินที่ขึ้นกว่าการใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวและขนาดความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ 0.1 นอร์มอล

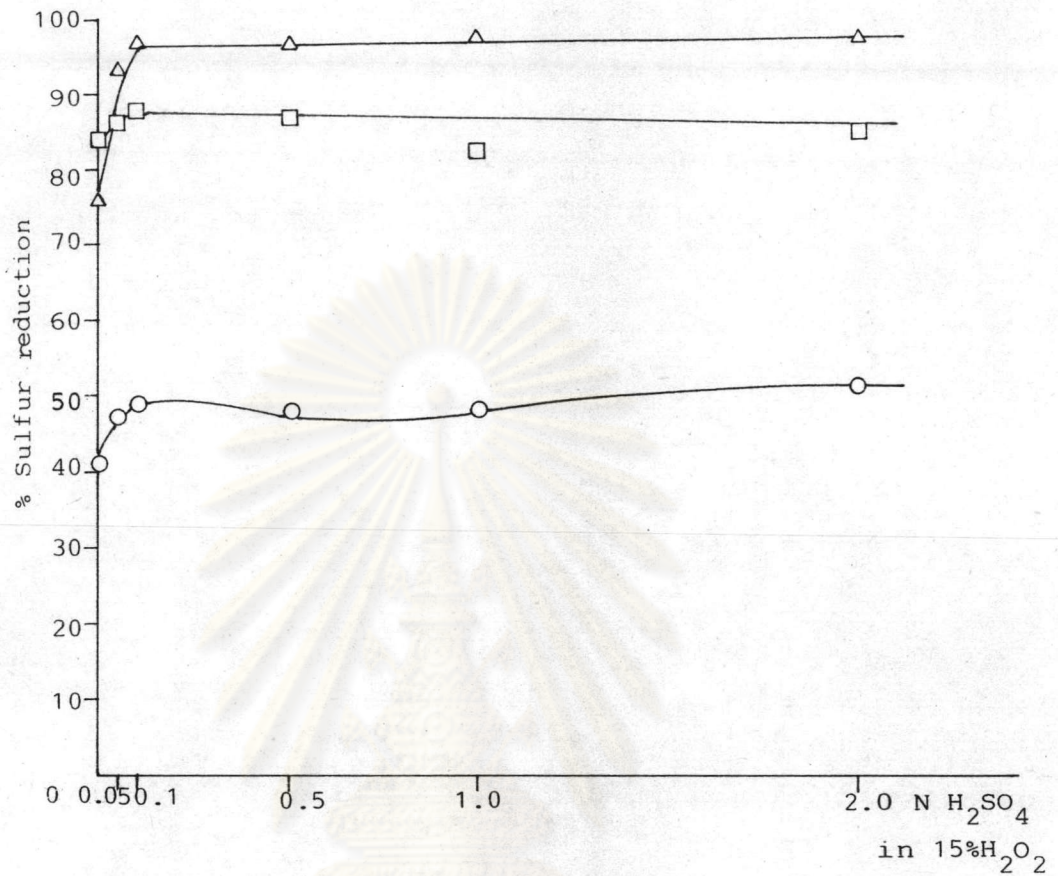
ตารางที่ 4.8 สมบัติถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการซัดกำมะถัน แปรเปลี่ยนความเข้มข้นกรดซัลฟูริกในสารละลายไฮโครเจนเปอร์ออกไซด์ 15% (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 300 มล. อุณหภูมิ 25 °ซ เวลา 2 ชม. อัตราการกวน 1000-1200 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 22.39)

| | เริ่มต้น | 15% H ₂ O ₂ ใน | | | | | |
|---------------------------|----------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | | None H ₂ SO ₄ | 0.05 N H ₂ SO ₄ | 0.1 N H ₂ SO ₄ | 0.5 N H ₂ SO ₄ | 1.0 N H ₂ SO ₄ | 2.0 N H ₂ SO ₄ |
| เถ้า | 20.19 | 13.56 | 7.63 | 6.29 | 6.02 | 5.74 | 4.58 |
| สารระเหย (V.M.) | 45.61 | 46.75 | 49.52 | 49.44 | 51.38 | 50.06 | 49.98 |
| คาร์บอนคงตัว (F.C.) | 34.20 | 39.69 | 42.85 | 43.77 | 42.42 | 44.20 | 45.44 |
| F.C./V.M. | 0.75 | 0.85 | 0.86 | 0.88 | 0.82 | 0.88 | 0.91 |
| ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม) | 5027 | 5488 | 5569 | 5682 | 5535 | 5647 | 5767 |
| ปริมาณกำมะถันรวม (%) | 3.77 | 2.21 | 1.99 | 1.93 | 1.95 | 1.95 | 1.86 |
| กำมะถันซัลเฟต | 0.80 | 0.31 | 0.11 | 0.10 | 0.11 | 0.14 | 0.12 |
| กำมะถันไพไรต์ | 1.16 | 0.28 | 0.08 | 0.035 | 0.036 | 0.024 | 0.028 |
| กำมะถันอินทรีย์ | 1.81 | 1.80 | 1.80 | 1.795 | 1.804 | 1.786 | 1.712 |
| % De-total sulfur | - | 41.38 | 47.21 | 48.81 | 48.27 | 48.27 | 50.66 |
| % De-sulfate sulfur | - | 83.75 | 86.25 | 87.5 | 8.625 | 82.5 | 85.0 |
| % De-pyritic sulfur | - | 75.86 | 93.10 | 96.98 | 96.89 | 97.93 | 97.58 |
| % De-organic sulfur | - | 0.55 | 0.55 | 0.83 | 0.33 | 1.32 | 5.41 |
| % De-ash | - | 32.48 | 62.21 | 68.84 | 69.29 | 71.57 | 77.31 |
| % Heating value increase | - | 9.17 | 10.78 | 13.03 | 10.10 | 12.33 | 14.72 |



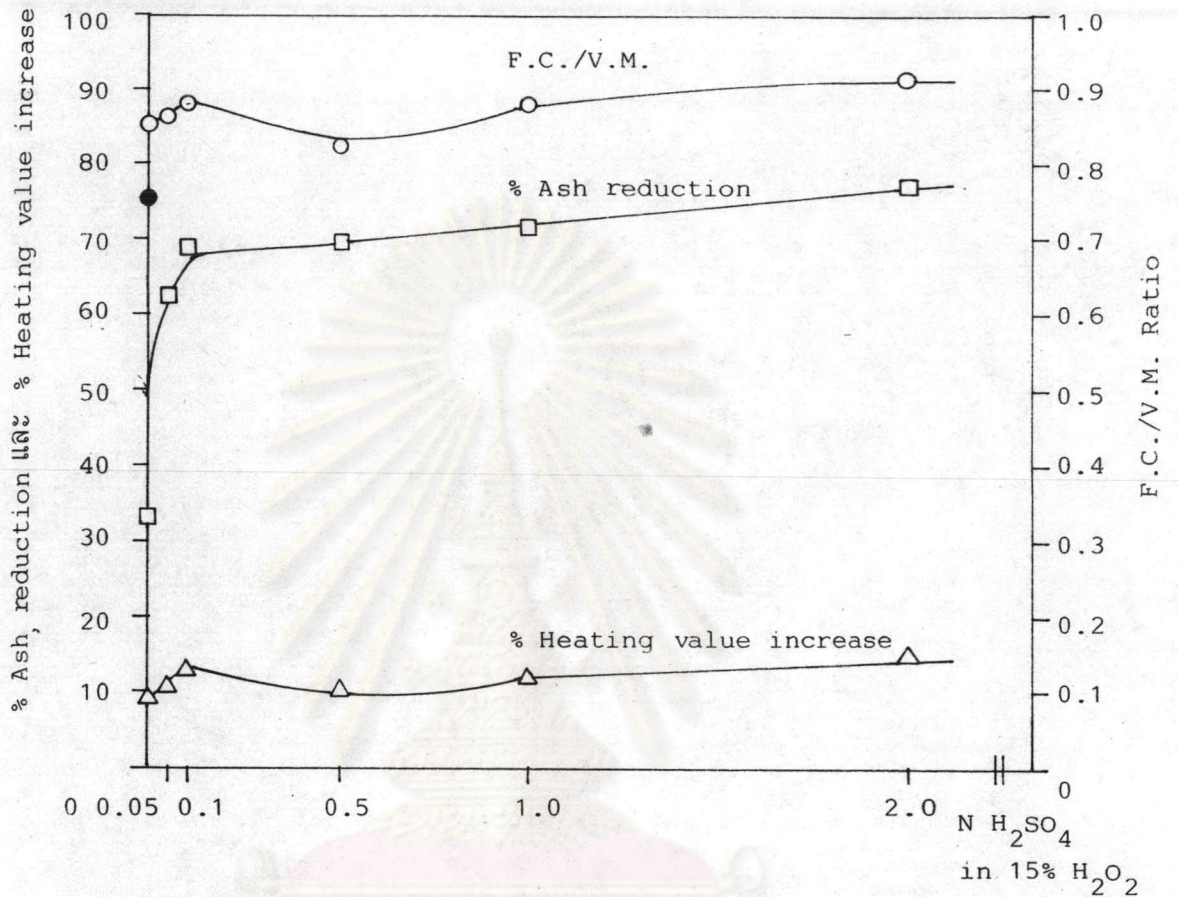
รูปที่ 4.7 ผลของความเข้มข้นกรดซัลฟูริกในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ที่มีต่อกำมะถันชนิดต่าง ๆ ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ หลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 300 มล. อุณหภูมิ 25 °C ระยะเวลา 2 ชม. อัตราการกวน 1000-1200 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 22.39)

- และ ○ แสดงร้อยละของกำมะถันรวมเริ่มต้นและหลังปฏิกิริยา
- ▲ และ △ แสดงร้อยละของกำมะถันไพไรต์เริ่มต้นและหลังปฏิกิริยา
- และ □ แสดงร้อยละของกำมะถันซัลเฟตเริ่มต้นและหลังปฏิกิริยา
- ◆ และ ◇ แสดงร้อยละของกำมะถันอินทรีย์เริ่มต้นและหลังปฏิกิริยา



รูปที่ 4.8 ผลของความเข้มข้นกรดซัลฟูริกในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ที่มี
 ต่อกำมะถันชนิดต่าง ๆ ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ หลังผ่านกระบวนการขจัด
 กำมะถัน (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 30 กรัมต่อสาร
 ละลาย 300 มล. อุณหภูมิ 25 °C ระยะเวลา 2 ชม. อัตราการกวน 1000-
 1200 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 22.39)

- แสดง % De-total sulfur
- △ แสดง % De-pyritic sulfur
- แสดง % De-sulfate sulfur



รูปที่ 4.9 ผลของความเข้มข้นกรดซัลฟูริกในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ที่มีต่อการลดปริมาณเถ้า การเพิ่มค่าความร้อนและสัดส่วนคาร์บอนคงตัวต่อสารระเหย ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ หลังผ่านกระบวนการซัลเฟอร์กำจัดกำมะถัน (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 300 มล. อุณหภูมิ 25 °C ระยะเวลา 2 ชม. อัตราการกวน 1000-1200 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหิน เริ่มต้น 22.39)

- และ ○ แสดงสัดส่วนคาร์บอนคงตัวต่อสารระเหย (F.C./V.M.) ก่อนและหลังปฏิบัติการ
- △ แสดง % Heating value increase
- แสดง % Ash reduction

4.2.4 ผลของระยะเวลา


ตารางที่ 4.9 แสดงสมบัติของถ่านหินเหมืองแม่เมาะก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน เมื่อใช้ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ใน 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก ทำการทดลองแปรเปลี่ยนระยะเวลา 15 30 60 90 120 180 240 นาที โดยใช้ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 30 มล. (1:10) อุณหภูมิ 25°C อัตราการกวน 1000-1200 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 22.53

รูปที่ 4.10 แสดงผลของกำมะถันชนิดต่าง ๆ ในรูปแบบของพื้นที่ โดยกำมะถันรวมเริ่มต้นร้อยละ 3.78 คิดเป็น 100 ดังนั้นกำมะถันซัลเฟต กำมะถันไพไรต์ กำมะถันอินทรีย์ คิดเป็นร้อยละ 19.05 28.83 และ 52.12 ของกำมะถันทั้งหมด ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ชัดเจนว่าการลดกำมะถันของถ่านหินเป็นการลดกำมะถันไพไรต์และกำมะถันซัลเฟตได้อย่างมากในช่วง 0-30 นาที ต่อจากนั้นช่วง 60-120 นาที การลดเกิดขึ้นน้อย และช่วง 180-240 นาที มีการลดน้อยมาก เมื่อพิจารณาจากกราฟพื้นที่การลดกำมะถันเป็นการลดกำมะถันไพไรต์และกำมะถันซัลเฟต ส่วนการลดกำมะถันอินทรีย์เกิดขึ้นน้อยมาก

รูปที่ 4.11 แสดงผลของระยะเวลาของปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ใน 0.1 นอร์มอล ต่อการลดปริมาณได้ในถ่านหิน การเพิ่มค่าความร้อนของถ่านหิน และความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนคาร์บอนคงตัวต่อสารระเหยในถ่านหิน ช่วงเวลาของปฏิกิริยา 15-30 นาที การลดได้เป็นอย่างมากคือ ได้ร้อยละการลดได้ 55.61-56.81 และเมื่อเพิ่มเวลาเป็น 60-240 นาที ได้ร้อยละการลดได้ 64.69-72.22 ซึ่งมีแนวโน้มการลดได้เพิ่มขึ้นกับเวลา และผลที่ตามมาคือ การเพิ่มค่าความร้อนได้ร้อยละ 17.46-17.17 เมื่อใช้ระยะเวลา 60-90 นาที ซึ่งสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนคาร์บอนคงตัวต่อสารระเหย (F.C./V.M.) จาก 0.76 เป็น 0.99

โดยสรุปผลของเวลาได้ว่าช่วง 15-30 นาที ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าสูงก็่าออกซิเจนที่มีอยู่จึงเข้าทำปฏิกิริยากับกำมะถันไพไรต์ได้ดีที่สุด ส่วนกำมะถันอินทรีย์มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะในโมเลกุลถ่านหินมากกว่าปฏิกิริยากับกำมะถันอินทรีย์ จึงเกิดได้น้อยมาก หลังจากช่วง 30 นาที ปริมาณกำมะถันไพไรต์และกำมะถันซัลเฟตเหลืออยู่ ดังนั้นการลดกำมะถันซัลเฟตและการลดกำมะถันไพไรต์จึงคงดำเนินไปแต่ช้าลง ส่วนกำมะถัน-

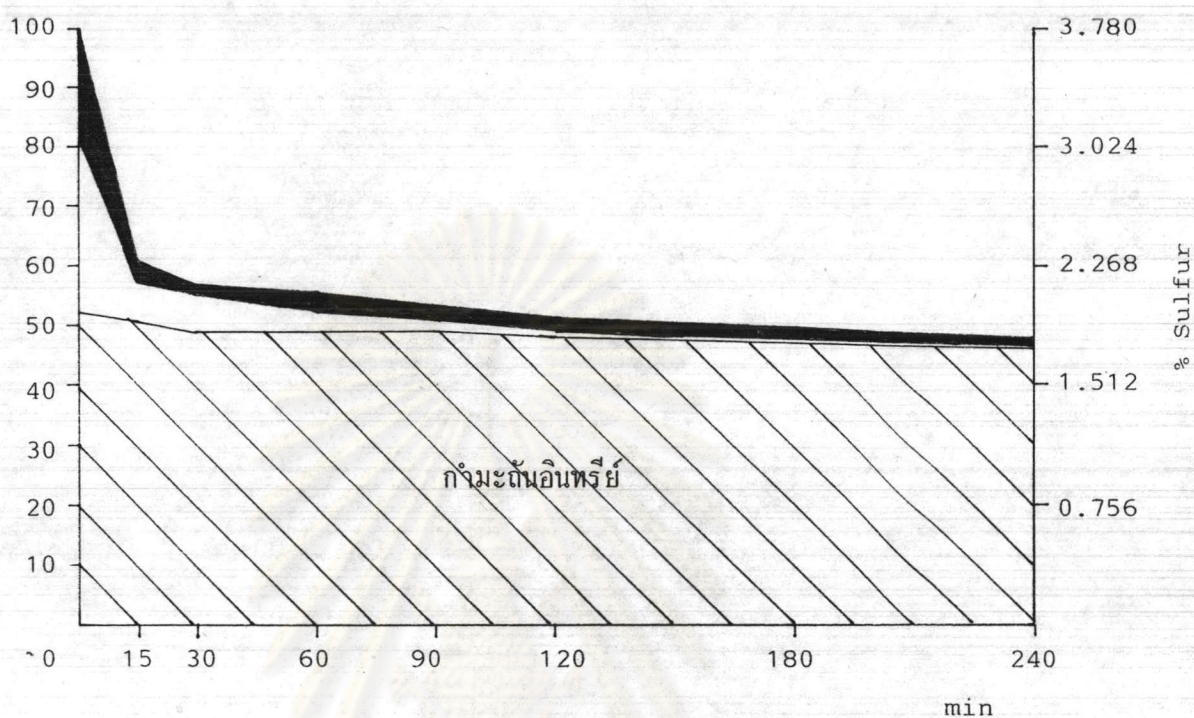
อินทรีย์ก่อนข้างคองที่ หลังจากช่วง 120 นาที ปริมาณกัมมันตภาพและกัมมันตภาพไฟโรติก่อนข้างน้อยเนื่องจากความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่เหลืออยู่น้อยนั่นเอง และผลจากการสลายพันธะเพื่อขจัดกัมมันตภาพอินทรีย์กับระยะเวลาที่มากขึ้นซึ่งมีผลของการกวนมาเกี่ยวข้องทำให้อุณหภูมิของภาชนะ-หินสลายลงมากขึ้นเป็นผลทำให้สูญเสียคาร์บอนไปค่าสัดส่วน F.C./V.M. จึงลดลง และการเพิ่มค่าความร้อนลดลงด้วย ดังนั้นพอสรุปได้ว่าเวลาที่เหมาะสมของการขจัดกัมมันตภาพคือ 60-90 นาที ให้ร้อยละการลดกัมมันตภาพรวม 44.71 ร้อยละการลดกัมมันตภาพซัลเฟต 84.72 ร้อยละการลดกัมมันตภาพไฟโรติก 88.99 ร้อยละการลดกัมมันตภาพอินทรีย์ 5.58 ร้อยละการลดเถ้า 64.69 และเพิ่มค่าความร้อนได้ร้อยละ 17.46



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 สมบัติด้านหินเหมืองแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน โดยการแปรเปลี่ยนระยะเวลา ใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ใน 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก (ขนาดด้านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณด้านหิน 30 กรัม ต่อ สารละลาย 300 มล. อุณหภูมิ 25 °ซ อัตราการกวน 1000-1200 รอบ/นาที ความชื้นด้านหินเริ่มต้นร้อยละ 22.53)

| | เริ่มต้น | 15% H ₂ O ₂ ใน 0.1 N H ₂ SO ₄ | | | | | | |
|--------------------------|----------|---|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| | | 15 นาที | 30 นาที | 60 นาที | 90 นาที | 120 นาที | 180 นาที | 240 นาที |
| ไถ้ | 20.05 | 8.90 | 8.66 | 7.08 | 7.03 | 6.33 | 6.22 | 5.57 |
| สารระเหย (V.M.) | 45.47 | 64.75 | 46.80 | 46.5 | 46.79 | 47.47 | 48.56 | 49.41 |
| คาร์บอนคงตัว (F.C.) | 34.48 | 44.35 | 44.54 | 46.42 | 46.18 | 46.10 | 45.42 | 45.02 |
| F.C./V.M. | 0.76 | 0.95 | 0.95 | 0.99 | 0.99 | 0.97 | 0.93 | 0.91 |
| ค่าความร้อน | 4949 | 5698 | 5736 | 5813 | 5799 | 5771 | 5693 | 5520 |
| ปริมาณกำมะถันรวม (%) | 3.78 | 2.29 | 2.18 | 2.09 | 2.01 | 1.94 | 1.88 | 1.80 |
| กำมะถันซัลเฟต | 0.72 | 0.12 | 0.10 | 0.11 | 0.07 | 0.09 | 0.70 | 0.04 |
| กำมะถันไพไรต์ | 1.09 | 0.25 | 0.24 | 0.12 | 0.06 | 0.03 | 0.02 | 0.02 |
| กำมะถันอินทรีย์ | 1.97 | 1.92 | 1.84 | 1.86 | 1.86 | 1.83 | 1.79 | 1.74 |
| % De-total sulfur | - | 39.42 | 42.33 | 44.71 | 46.83 | 48.68 | 50.27 | 52.38 |
| % De-sulfate sulfur | - | 83.33 | 86.11 | 84.72 | 87.5 | 88.89 | 90.28 | 94.44 |
| % De-pyritic sulfur | - | 77.06 | 77.98 | 88.99 | 94.49 | 97.25 | 98.16 | 98.16 |
| % De-organic sulfur | - | 2.54 | 6.59 | 5.58 | 5.58 | 7.11 | 9.14 | 11.67 |
| % De-ash | - | 55.61 | 56.81 | 64.69 | 64.94 | 68.43 | 69.97 | 72.22 |
| % Heating value increase | - | 15.13 | 15.90 | 17.46 | 17.17 | 16.61 | 15.03 | 11.54 |



รูปที่ 4.10 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ใน 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก ที่มีต่อกำมะถันชนิดต่าง ๆ ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 30 กรัม ต่อ 300 มล. อุณหภูมิ 25^oซ ระยะเวลา 2 ชม. อัตราการกวน 1000-1200 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 22.53)



แสดงร้อยละปริมาณกำมะถันรวม



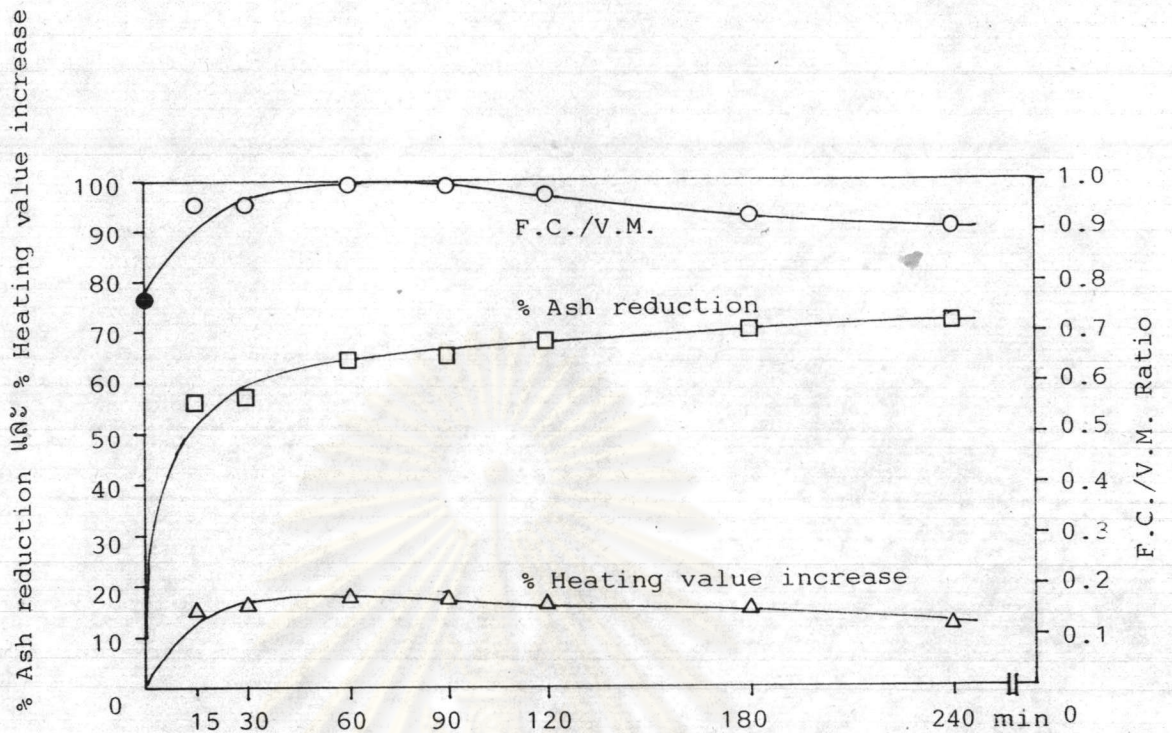
แสดงร้อยละปริมาณกำมะถันซัลเฟต



แสดงร้อยละปริมาณกำมะถันไพไรต์



แสดงร้อยละปริมาณกำมะถันอินทรีย์



รูปที่ 4.11 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ใน 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก ที่มีต่อการลดปริมาณเถ้า การเพิ่มค่าความร้อนและ สัดส่วนคาร์บอนคงตัวต่อสารละลายในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ หลังผ่านกระบวนการ ชักค้ำมะถัน (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 300 มล. อุณหภูมิ 25°ซ อัตรากววน 1000-1200 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 22.53)

- และ ○ แสดง สัดส่วนคาร์บอนคงตัวต่อสารละลาย (F.C./V.M.) ก่อนและหลังปฏิกิริยา
- △ แสดง % Heating value increase
- แสดง % Ash reduction

4.2.5 ผลของอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.10 แสดงสมบัติของถ่านหินเหมืองแม่เมาะก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน โดยใช้ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ใน 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก ศึกษาการเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 15 25 30 40 °ซ โดยใช้ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 300 มล. (1:10) ระยะเวลา 2 ชม. อัตราการกวน 1000-1200 รอบ/นาที ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 22.59

รูปที่ 4.12 แสดงผลในรูปร้อยละการลดปริมาณกำมะถันชนิดต่าง ๆ พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิ 15 °ซ ได้ร้อยละการลดกำมะถันซัลเฟต 79.73 และได้ร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์ เพียง 68.07 ซึ่งพบว่าอุณหภูมิต่ำมีค่าน้อยไปสำหรับปฏิกิริยาขจัดกำมะถันไพไรต์ โดยเมื่ออุณหภูมิเป็น 25-40 °ซ ร้อยละการลดกำมะถันซัลเฟตเพิ่มเล็กน้อยเป็น 85.13-86.49 แต่ร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์เพิ่มเป็น 97.48-98.32 จะเห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 25 °ซ ไม่ทำให้การลดกำมะถันซัลเฟตและกำมะถันไพไรต์เพิ่มขึ้น

สำหรับการลดกำมะถันอินทรีย์การเพิ่มอุณหภูมิเป็น 15 25 30 และ 40 °ซ ได้ร้อยละการลดกำมะถันอินทรีย์ 3.57 4.59 8.67 และ 12.24 ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การลดกำมะถันอินทรีย์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ดังนั้นทำให้ผลทั้งหมดต่อร้อยละการลดกำมะถันรวมเป็น 37.79 48.59 50.64 และ 52.70 ตามลำดับ โดยช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 25 °ซ ผลที่ได้จะมาจาก การลดกำมะถันซัลเฟต และกำมะถันไพไรต์ จากช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 25 °ซ จะมีผลจากการลดกำมะถันอินทรีย์มาเกี่ยวข้องเพิ่มมากขึ้น

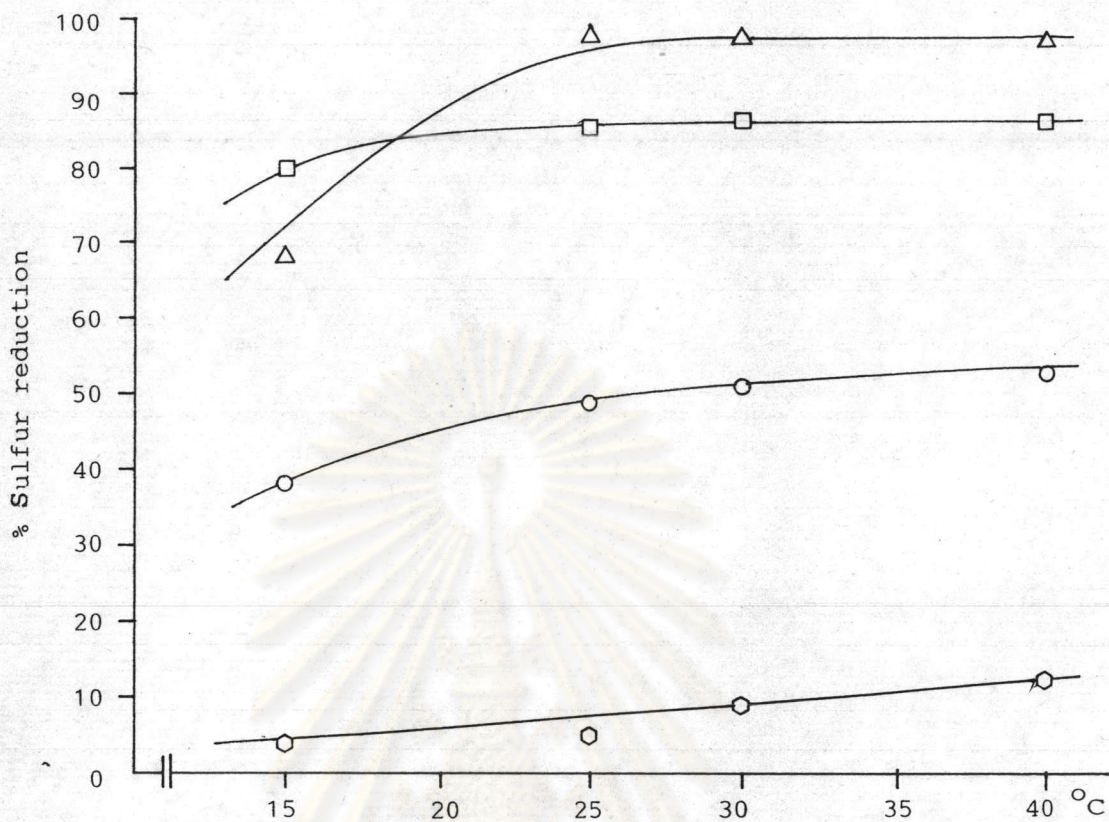
รูปที่ 4.13 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดปริมาณเข้าในถ่านหิน ต่อการเพิ่มค่าความร้อนของถ่านหิน และความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนคาร์บอนคงตัวต่อสารระเหยในถ่านหิน พบว่าที่อุณหภูมิ 15 °ซ ได้ร้อยละการลดเข้า 62.46 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 25, 30 และ 40 °ซ ได้ร้อยละการลดเข้าเพิ่มเป็น 69.61-71.99 แต่ทำให้สัดส่วนคาร์บอนคงตัวต่อสารระเหยลดลงกับการเพิ่มอุณหภูมิ

โดยสรุปได้ว่า อุณหภูมิมีผลต่อการลดกำมะถันไพไรต์ โดยที่อุณหภูมิ 15 °ซ ได้ร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์ 68.07 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 25 °ซ ได้ร้อยละการลดถึง 98.32 ซึ่งลดได้ในเกณฑ์ที่สูง สำหรับอุณหภูมิที่สูงกว่า 25 °ซ ขึ้นไปมีพลังงานเหลือเกินพอสำหรับปฏิกิริยา

ของกำมะถันออกซิเจนกับกำมะถันไพไรต์ โดยอุณหภูมิและพลังงานส่วนเกินมีผลต่อการลดกำมะถัน-อินทรีย์ในการสลายพันธะระหว่างธาตุคาร์บอนกับกำมะถันอินทรีย์ในโครงสร้างด้านหินมากขึ้นสัมพันธ์กับค่าสัดส่วน F.C./V.M. ที่ลดลงจากการสลายโครงสร้างด้านหินบางส่วนไป

ตารางที่ 4.10 สมบัติด้านหินเหมืองแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่อุณหภูมิต่าง ๆ ใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ใน 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก (ขนาดด้านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณด้านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 300 มล. เวลา 2 ชม. อัตราการทวน 1000-1200 รอบ/นาที ความชื้นด้านหินเริ่มต้นร้อยละ 22.59)

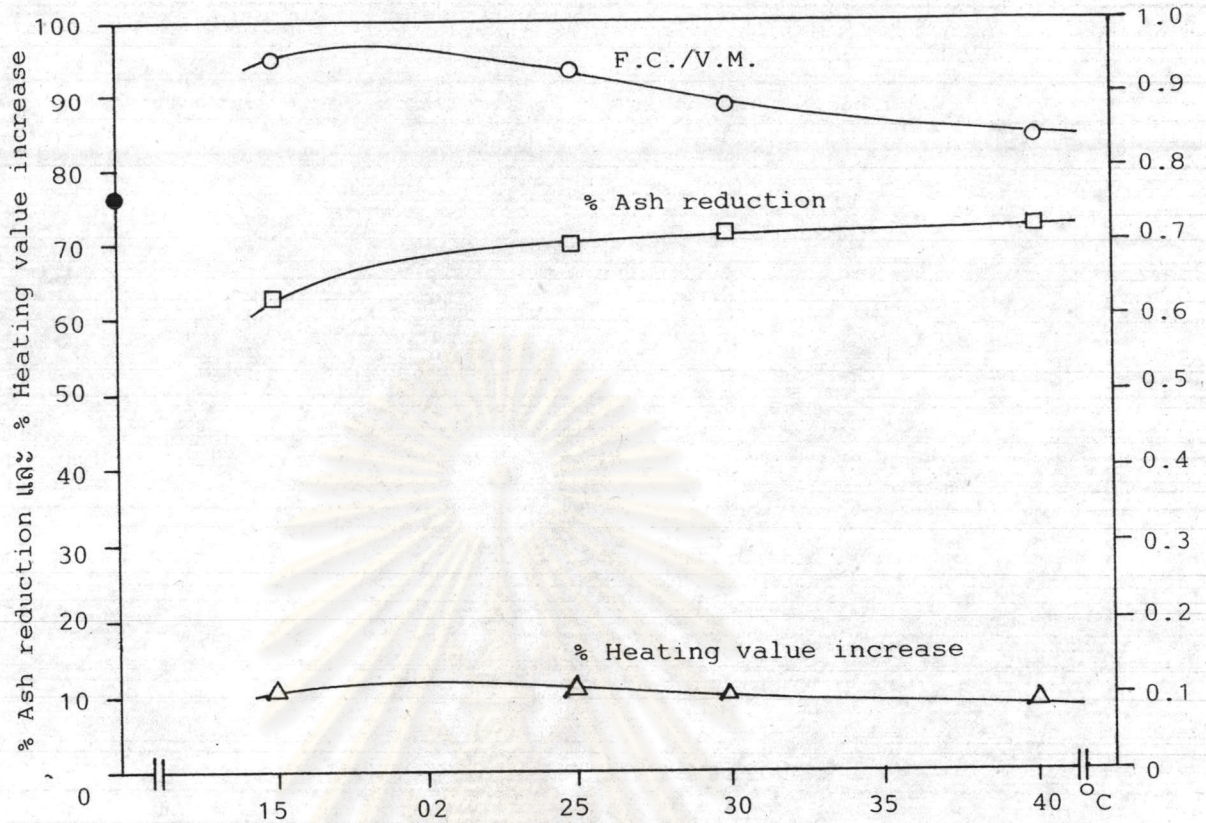
| | เริ่มต้น | 15% H ₂ O ₂ ใน 0.1 N H ₂ SO ₄ | | | |
|---------------------------|----------|---|-------|-------|-------|
| | | 15°ซ | 25°ซ | 30°ซ | 40°ซ |
| เถ้า | 20.14 | 7.56 | 6.12 | 5.76 | 5.64 |
| สารระเหย (V.M.) | 45.35 | 47.37 | 48.72 | 50.02 | 51.32 |
| คาร์บอนคงตัว (F.C.) | 34.51 | 45.07 | 45.28 | 44.22 | 43.04 |
| F.C./V.M. | 0.76 | 0.95 | 0.93 | 0.88 | 0.84 |
| ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม) | 5139 | 5692 | 5709 | 5668 | 5617 |
| ปริมาณกำมะถันรวม (%) | 3.89 | 2.42 | 2.00 | 1.92 | 1.84 |
| กำมะถันซัลเฟต | 0.74 | 0.15 | 0.11 | 0.10 | 0.10 |
| กำมะถันไพไรต์ | 1.19 | 0.38 | 0.02 | 0.03 | 0.02 |
| กำมะถันอินทรีย์ | 1.96 | 1.89 | 1.87 | 1.79 | 1.72 |
| % De-total sulfur | - | 37.79 | 48.59 | 50.64 | 52.70 |
| % De-sulfate sulfur | - | 79.73 | 85.13 | 86.49 | 86.49 |
| % De-pyritic sulfur | - | 68.07 | 98.32 | 97.48 | 98.32 |
| % De-organic sulfur | - | 3.57 | 4.59 | 8.67 | 12.24 |
| % De-ash | - | 62.46 | 69.61 | 71.40 | 71.99 |
| % Heating value increase | - | 10.76 | 11.09 | 10.29 | 9.30 |



รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดกำมะถันชนิดต่าง ๆ ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ หลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน โดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ใน 0.1 นอร์มอลกรดซัลฟูริก (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 300 มล. ระยะเวลา 2 ชม. อัตราการกวน 1000-1200 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 22.59)

- แสดง % De-total sulfur
- △ แสดง % De-pyritic sulfur
- แสดง % De-sulfate sulfur
- ⬡ แสดง % De-organic sulfur





รูปที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดปริมาณเถ้า การเพิ่มค่าความร้อนและสัดส่วนคาร์บอนคงตัวต่อสารระเหย ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ หลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน โดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ใน 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 30.กรัมต่อสารละลาย 300 มล. อุณหภูมิ 25°ซ ระยะเวลา 2 ชม. อัตราการกวน 1000-1200 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 22.59)

- และ ○ แสดง สัดส่วนคาร์บอนคงตัวต่อสารระเหย (F.C./V.M.) ก่อนและหลังปฏิกิริยา
- △ แสดง % Heating value increase
- แสดง % Ash reduction

4.2.6 ผลของความเร็วยรอบการกวน

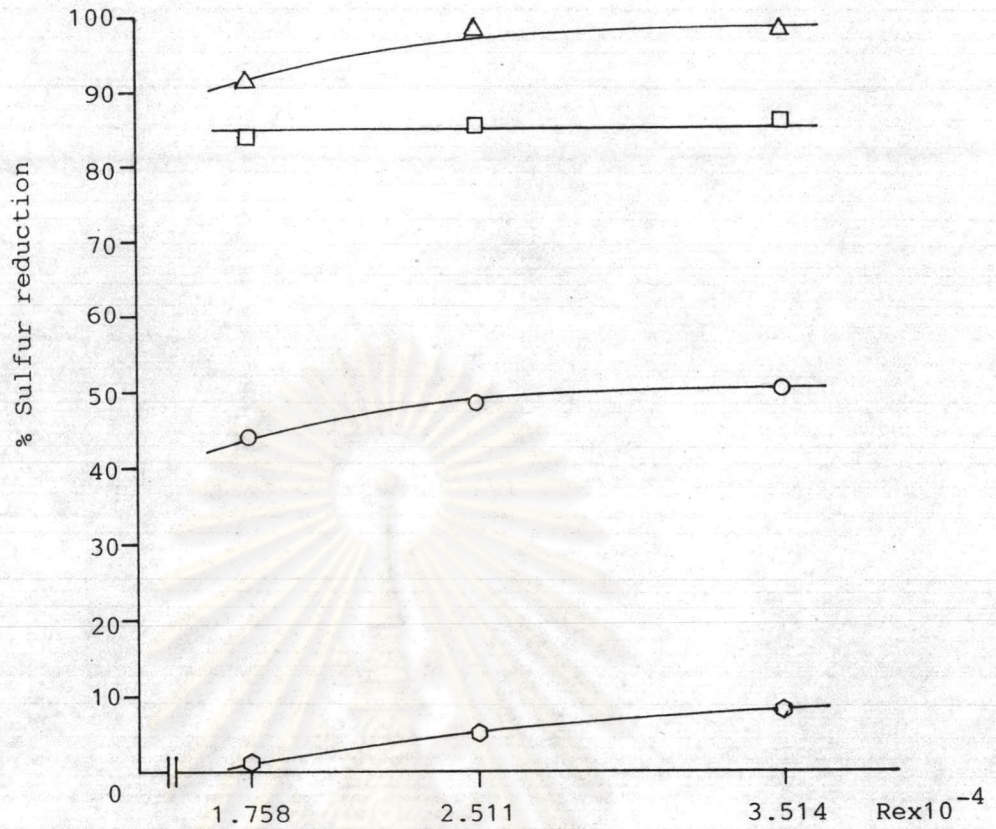
ตารางที่ 4.11 แสดงสมบัติของถ่านหินเหมืองแม่เมาะก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ใน 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก โดยการเปลี่ยนอัตราการกวนเฉลี่ยคือ 700 1000 1400 รอบ/นาที ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 300 มล. (1:10) ระยะเวลา 2 ชม. อุณหภูมิ 25 °ซ ความชื้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 22.50

รูปที่ 4.14 แสดงผลในรูปร้อยละการลดปริมาณกำมะถันชนิดต่าง ๆ จากอัตราการกวนที่ต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนอัตราการกวนไม่มีผลต่อการลดกำมะถันซัลเฟต แต่การเพิ่มอัตราการกวนทำให้การลดกำมะถันไพไรต์และกำมะถันอินทรีย์เพิ่มขึ้น แต่จะค่อนข้างคงที่ในช่วง 1000-1400 รอบ/นาที โดยการใช้อัตราการกวน 700 รอบ/นาที ให้ผลการลดกำมะถันได้คือ ร้อยละการลดกำมะถันรวม 43.96 และร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์ 90.76 ในขณะที่เพิ่มอัตราการกวนเฉลี่ยเป็น 1000-1400 รอบ/นาที ร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์เพิ่มเป็น 97.48-98.32 ร้อยละการลดกำมะถันอินทรีย์เป็น 4.59-7.65 และร้อยละการลดได้เป็น 69.61-71.05 นั่นคืออัตราการกวนที่เหมาะสม คือเฉลี่ย 1000 รอบ/นาที สำหรับการเพิ่มเป็น 1400 รอบ/นาที ไม่ค่อยมีผลต่อการขจัดกำมะถันมากนัก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.11 สมบัติด้านหินเหมืองแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันแปรเปลี่ยนความเร็วรอบการกวน โดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ใน 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก (ขนาดด้านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณด้านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 300 มล. อุณหภูมิ 25°C ระยะเวลา 2 ชม. ความชื้นด้านหินเริ่มต้นร้อยละ 22.50)

| | เริ่มต้น | 15% H ₂ O ₂ ใน 0.1 N H ₂ SO ₄ | | |
|---------------------------|----------|---|---|---|
| | | 700 รอบ/นาที Re=1.758x10 ⁴ | 1000 รอบ/นาที Re=2.511x10 ⁴ | 1400 รอบ/นาที Re=3.514x10 ⁴ |
| เถ้า | 20.14 | 7.92 | 6.12 | 5.83 |
| สารระเหย (V.M.) | 45.35 | 47.12 | 48.72 | 49.31 |
| คาร์บอนคงตัว (F.C.) | 34.51 | 44.96 | 45.28 | 44.86 |
| F.C./V.M. | 0.76 | 0.95 | 0.93 | 0.91 |
| ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม) | 5139 | 5721 | 5709 | 5630 |
| ปริมาณกำมะถันรวม (%) | 3.89 | 2.18 | 2.00 | 1.94 |
| กำมะถันซัลเฟต | 0.74 | 0.12 | 0.11 | 0.10 |
| กำมะถันไพไรต์ | 1.19 | 0.11 | 0.02 | 0.03 |
| กำมะถันอินทรีย์ | 1.96 | 1.95 | 1.87 | 1.81 |
| % De-total sulfur | - | 43.96 | 48.59 | 50.13 |
| % De-sulfate sulfur | - | 83.78 | 85.13 | 86.47 |
| % De-pyritic sulfur | - | 90.76 | 98.32 | 97.48 |
| % De-organic sulfur | - | 0.51 | 4.59 | 7.65 |
| % De-ash | - | 60.67 | 69.61 | 71.05 |



รูปที่ 4.14 ผลความเร็วรอบการกวนที่มีต่อกำมะถันชนิดต่าง ๆ ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ หลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันโดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ใน 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 300 มล. อุณหภูมิ 25^oซ ระยะ เวลา 2 ชม. ความขึ้นถ่านหินเริ่มต้นร้อยละ 22.50)

- แสดง % De-total sulfur
- △ แสดง % De-pyritic sulfur
- แสดง % De-sulfate sulfur
- ⬡ แสดง % De-organic sulfur

4.2.7 ผลของขนาดถ่านหิน

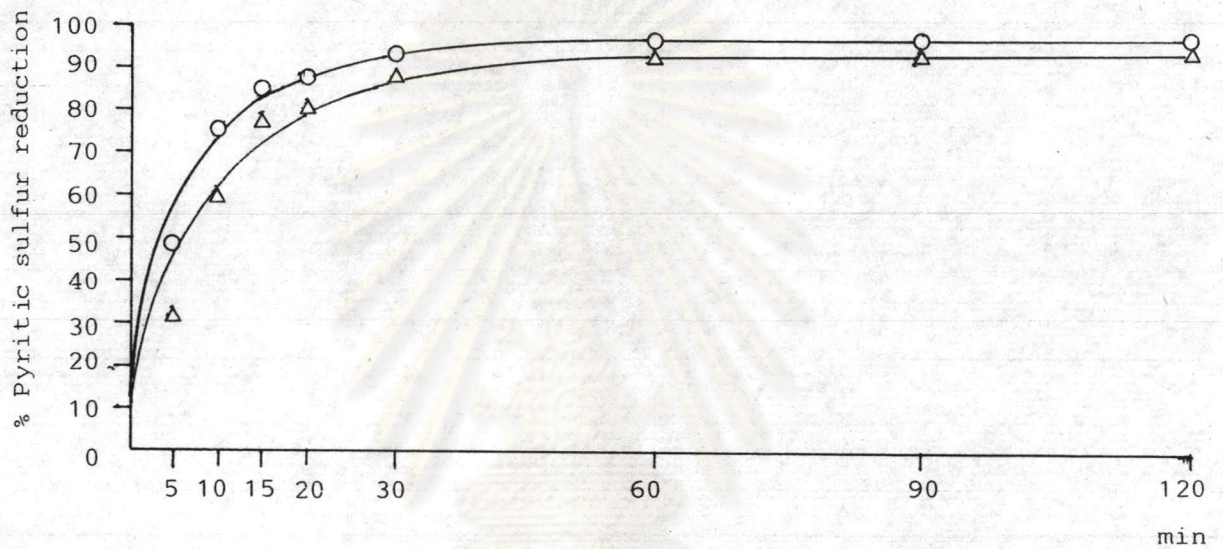
ตารางที่ 4.12 แสดงผลการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน โดยใช้ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน และ 250-500 ไมครอน สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ใน 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก ปริมาณถ่านหิน 70 กรัมต่อสารละลาย 700 มล. (1:10) ระยะเวลา 0-120 นาที อุณหภูมิ 30 °ซ อัตราการกวน 1000-1200 รอบ/นาที

รูปที่ 4.15 แสดงผลร้อยละการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์จากถ่านหิน 2 ขนาด โดยใช้สภาวะเช่นเดียวกัน ผลจากการทดลองได้ว่าสามารถลดกำมะถันไพไรต์จากถ่านหินขนาด 150-250 ไมครอน ได้เร็วกว่าและมากกว่าการใช้ถ่านหินขนาด 250-500 ไมครอน โดยลดได้เร็วในช่วง 30 นาทีแรก คือลดได้ร้อยละ 93.79 หลังจากนั้นจะช้าและคงที่ต่อมาโดยลดได้ร้อยละ 97.29 ที่เวลา 120 นาที ส่วนถ่านหินขนาด 250-500 ไมครอน โดยลดได้เร็วในช่วง 30 นาทีแรกลดได้ร้อยละ 88.94 และที่ 120 นาทีลดได้ร้อยละ 94.35 โดยลดในลักษณะที่คล้ายกัน ในที่นี้จะกล่าวได้ว่า ถ่านหินขนาดเล็กให้ผลการลดกำมะถันไพไรต์ดีกว่าถ่านหินขนาดใหญ่ขึ้นโดยปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นและขจัดกำมะถันไพไรต์ได้มากขึ้น เล็กน้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 ปริมาณกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันด้วยขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน และ 250-500 ไมครอน ตามระยะเวลา 5, 10, 15, 20, 30, 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ โดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ใน 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก (ปริมาณถ่านหิน 70 กรัมต่อสารละลาย 700 มล. อุณหภูมิ 30 °ซ)

| ขนาดถ่านหิน | 150-250 ไมครอน | | 250-500 ไมครอน | |
|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | ร้อยละกำมะถันไพไรต์ | % De-pyritic sulfur | ร้อยละกำมะถันไพไรต์ | % De-pyritic sulfur |
| 0 | 0.960 | - | 0.882 | - |
| 5 | 0.498 | 48.12 | 0.568 | 31.73 |
| 10 | 0.236 | 75.42 | 0.336 | 59.61 |
| 15 | 0.145 | 84.89 | 0.191 | 77.04 |
| 20 | 0.118 | 87.71 | 0.164 | 80.29 |
| 30 | 0.060 | 93.79 | 0.092 | 88.94 |
| 60 | 0.033 | 96.56 | 0.055 | 93.39 |
| 90 | 0.027 | 97.19 | 0.050 | 93.99 |
| 120 | 0.026 | 97.29 | 0.047 | 94.35 |



รูปที่ 4.15 ผลของอนุภาคถ่านหินต่อการขจัดกำมะถันไพไรต์ด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ใน 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก

○ แสดง % De-pyritic sulfur ของถ่านหินขนาด 150-250 ไมครอน

△ แสดง % De-pyritic sulfur ของถ่านหินขนาด 250-500 ไมครอน

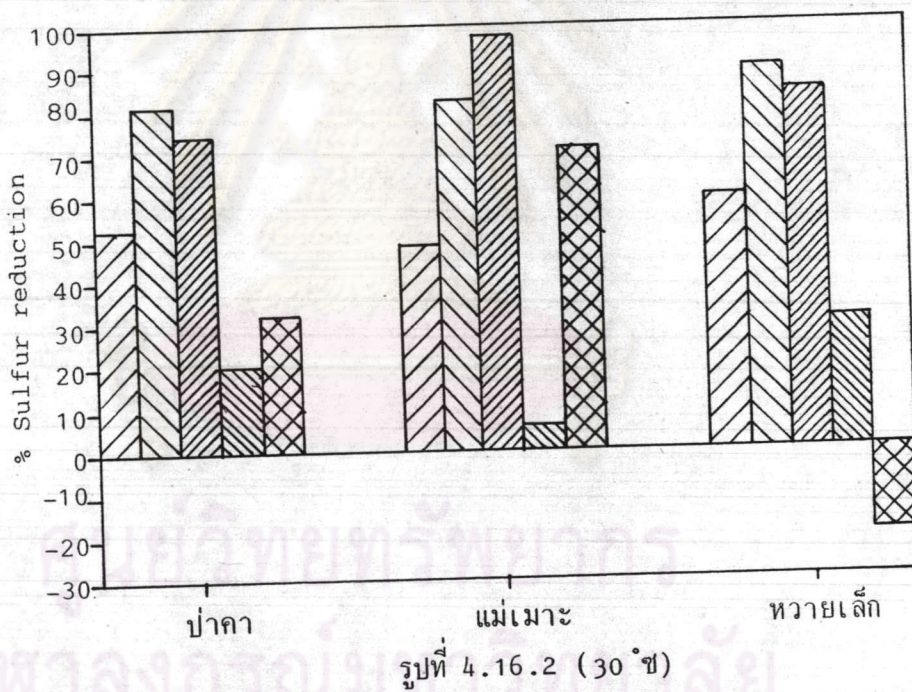
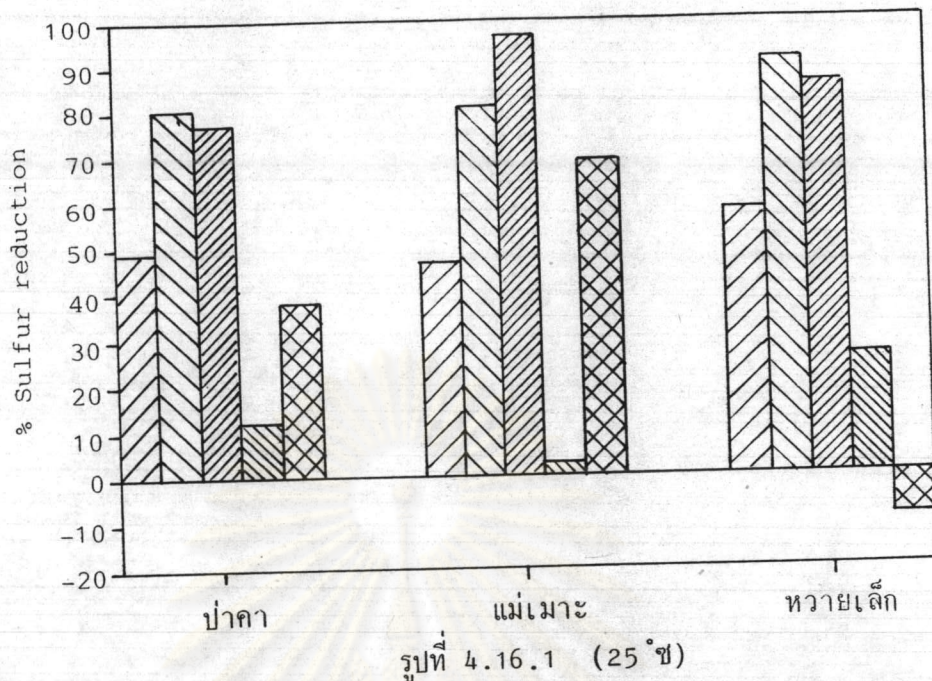
4.3 การเปรียบเทียบผลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการขจัดกำมะถันจากถ่านหินบางแหล่ง

การศึกษาผลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อถ่านหินที่มีโครงสร้างและองค์ประกอบต่างกัน โดยใช้ถ่านหินจาก 3 แหล่ง คือ ถ่านหินเหมืองป่าคา แม่เมาะ และห้วยเล็ก ใช้ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ระดับปานกลางและความเข้มข้นกรดซัลฟูริกระดับต่ำ คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ใน 0.1 นอร์มอลกรดซัลฟูริก ปริมาณถ่านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 300 มล. (1:10) ที่อุณหภูมิ 25 และ 30 °ซ

ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.13 ผลร้อยละการลดกำมะถันชนิดต่าง ๆ และค่าแสดงในรูปที่ 4.16 จากรูปที่ 4.16.1 ที่อุณหภูมิ 25 °ซ สามารถลดกำมะถันซัลเฟต และกำมะถันไพไรต์ได้มาก โดยได้ร้อยละการลดกำมะถันซัลเฟตในถ่านหินเหมืองป่าคา แม่เมาะ และห้วยเล็ก 80.61 81.08 และ 90.77 ตามลำดับ และได้ร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์ 77.14 96.58 และ 85.71 ตามลำดับเช่นกัน ส่วนกำมะถันอินทรีย์ลดลงได้น้อยกว่า โดยได้ร้อยละการลดในถ่านหินเหมืองป่าคา แม่เมาะ และห้วยเล็ก 11.93 2.62 และ 25.40 ตามลำดับ สำหรับผลร้อยละการลดปริมาณเถ้าสามารถลดได้ดีในถ่านหินเหมืองป่าคาและแม่เมาะคือ 38.08 และ 68.89 แต่เพิ่มปริมาณเถ้าในถ่านหินเหมืองห้วยเล็กคือเพิ่มร้อยละ 9.36 จากรูปที่ 4.16.2 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 30 °ซ ให้ผลในลักษณะเดียวกับรูปที่ 4.16.1 และจะเห็นว่าลดกำมะถันอินทรีย์มากขึ้นสอดคล้องกับการศึกษาผลของอุณหภูมิ ตามหัวข้อ 4.2.5 จากผลการทดลองสรุปได้ว่า สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถลดกำมะถันรวมในถ่านหินจาก 3 แหล่งได้ประมาณร้อยละ 50 โดยลดกำมะถันซัลเฟตและกำมะถันไพไรต์ได้มากใกล้เคียงกัน ส่วนการลดกำมะถันอินทรีย์ให้ผลแตกต่างกันในถ่านหินทั้ง 3 แหล่ง ซึ่งเป็นผลจากโครงสร้างของถ่านหินแหล่งต่าง ๆ เห็นได้จากผลของถ่านหินเหมืองห้วยเล็ก ซึ่งได้ร้อยละการลดกำมะถันอินทรีย์ถึง 25.40 แต่ปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.36 เนื่องจากโครงสร้างคาร์บอนในถ่านหินสลายได้ง่ายกว่าเถ้ามาก

ตารางที่ 4.13 สมบัติถ่านหินเหมืองปากา แม่เมาะ และห้วยเล็ก (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน โดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ใน 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก อุณหภูมิ 25 30 °ซ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 300 มล. เวลา 2 ชม. ความชื้นถ่านหินเหมืองปากา แม่เมาะ และห้วยเล็ก เริ่มต้นร้อยละ 11.72, 21.57 และ 12.95 ตามลำดับ)

| | ปากา | | แม่เมาะ | | ห้วยเล็ก | | | | |
|---------------------------|----------|---|----------|---|----------|---|-------|-------|--------|
| | เริ่มต้น | 15% H ₂ O ₂ ใน 0.1 N H ₂ SO ₄ | เริ่มต้น | 15% H ₂ O ₂ ใน 0.1 N H ₂ SO ₄ | เริ่มต้น | 15% H ₂ O ₂ ใน 0.1 N H ₂ SO ₄ | | | |
| | | 25 °ซ | | 30 °ซ | | 25 °ซ | 30 °ซ | | |
| เถ้า | 47.64 | 29.50 | 32.37 | 6.00 | 19.29 | 5.61 | 31.53 | 34.48 | 37.71 |
| สารระเหย (V.M.) | 31.16 | 42.35 | 41.65 | 49.09 | 45.75 | 50.45 | 39.13 | 41.25 | 39.84 |
| คาร์บอนคงตัว (F.C.) | 21.20 | 28.15 | 25.98 | 44.91 | 34.96 | 43.94 | 29.34 | 24.27 | 22.45 |
| F.C./V.M. | 0.68 | 0.66 | 0.62 | 0.91 | 0.76 | 0.87 | 0.75 | 0.59 | 0.56 |
| ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม) | 3254 | 4401 | 4245 | 5512 | 5170 | 5428 | 3832 | 3825 | 3679 |
| ปริมาณกำมะถันรวม (%) | 2.42 | 1.23 | 1.14 | 2.04 | 3.82 | 1.96 | 5.03 | 2.14 | 2.05 |
| กำมะถันซัลเฟต | 0.98 | 0.19 | 0.18 | 0.14 | 0.74 | 0.13 | 1.95 | 0.18 | 0.20 |
| กำมะถันไพไรต์ | 0.35 | 0.08 | 0.09 | 0.04 | 1.17 | 0.03 | 0.56 | 0.08 | 0.09 |
| กำมะถันอินทรีย์ | 1.09 | 0.96 | 0.87 | 1.86 | 1.91 | 1.80 | 2.52 | 1.88 | 1.76 |
| % De-total sulfur | - | 49.17 | 52.89 | 46.59 | - | 48.69 | - | 57.45 | 59.24 |
| % De-sulfate sulfur | - | 80.61 | 81.63 | 81.08 | - | 82.43 | - | 90.77 | 89.74 |
| % De-pyritic sulfur | - | 77.14 | 74.28 | 96.58 | - | 97.43 | - | 85.71 | 83.93 |
| % De-organic sulfur | - | 11.93 | 20.18 | 2.62 | - | 5.76 | - | 25.40 | 30.16 |
| % De-ash | - | 38.08 | 32.05 | 68.89 | - | 70.92 | - | -9.36 | -19.60 |



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงผลการลดปริมาณกำมะถันรวม กำมะถันซัลเฟต กำมะถันไพไรต์ กำมะถันอินทรีย์ และเถ้า ของถ่านหินเหมืองป่าคา แม่เมาะ และหวายเล็ก ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน โดยรูปที่ 4.16.1 แสดงผลที่อุณหภูมิ 25 °ซ รูปที่ 4.16.2 แสดงผลที่อุณหภูมิ 30 °ซ

- ▨ แสดงร้อยละการลดกำมะถันรวม
- ▨ แสดงร้อยละการลดกำมะถันซัลเฟต
- ▨ แสดงร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์
- ▨ แสดงร้อยละการลดกำมะถันอินทรีย์
- ▨ แสดงร้อยละการลดเถ้า

4.4 การศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาเคมีของไพไรต์และขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วการทำปฏิกิริยากับไพไรต์ในด้านหิน

การทดลองซ้ดักำมะดันจากด้านหินในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 โดยเฉพาะกำมะดันที่มีความสำคัญ คือกำมะดันไพไรต์และกำมะดันอินทรีย์จะเห็นได้ว่กำมะดันไพไรต์มีอัตราเร็วการทำปฏิกิริยากับสารละลายไฮโครเจนเปอร์ออกไซด์ที่สามารถทำการศึกษาได้ ส่วนกำมะดันอินทรีย์มีอัตราที่ช้ากว่ามากในสภาวะต่าง ๆ ที่อุณหภูมและเครื่องมือทดลองสามารถควบคุมให้ดำเนินไปได้ด้วยดี ดังนั้นจึงทำการทดลองศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาเคมีของไพไรต์และศึกษาหาขั้นตอนที่เป็นตัวควบคุมอัตราเร็วการทำปฏิกิริยาไพไรต์ในด้านหินด้วยสารละลายไฮโครเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้ตัวอย่างด้านหินจากเหมืองแม่เมาะและด้านหินเหมืองป่าคาในการทดลองทำปฏิกิริยากับสารละลายไฮโครเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ใน 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก ขนาดด้านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณด้านหิน 70 กรัมต่อสารละลาย 700 มล. ที่อุณหภูมิ 15 25 และ 30 °ซ้อ อัตราการกวน 1000-1400 รอบ/นาที โดยเก็บตัวอย่างด้านหินตามระยะเวลา 5-60 นาที

4.4.1 การหาอันดับอัตราเร็วปฏิกิริยาเคมีของไพไรต์ในด้านหินเหมืองแม่เมาะ โดยปฏิกิริยาออกซิดีซัลเฟอไรเซชัน (Oxydesulfurization) กับออกซิเจนในสารละลายไฮโครเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อทำการเก็บตัวอย่างด้านหินตามระยะเวลา 5 10 15 20 30 60 นาที มาวิเคราะห์จะได้ความเข้มข้นไพไรต์ (C_p) ซึ่งสามารถแสดงในรูปสัดส่วนการเปลี่ยนแปลง (x) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.17

ขั้นตอนการหาอันดับอัตราเร็วปฏิกิริยาอาศัยความสัมพันธ์อัตราเร็วปฏิกิริยา ($-r_p$) กับความเข้มข้นไพไรต์ ($-C_p$) ตามสมการที่ 2.32 คือ

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

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าร้อยละกำมะถันไฟไรต์ ความเข้มข้นของไฟไรต์ (c_p) และอัตราเร็วปฏิกิริยา ($-r_p$) ตามระยะเวลาที่อุณหภูมิ 15 25 และ 30 °ซ

| อุณหภูมิ (°ซ) | เวลา (นาที) | กำมะถันไฟไรต์ (%) (MFB) | ความเข้มข้นไฟไรต์ ในถ่านหิน c_p (กิโลโมล/ม ³) | สัดส่วนการเปลี่ยน x | อัตราเร็วปฏิกิริยา $-r_p \times 10^4$ (กิโลโมล/ม ³ ·วินาที) |
|---------------|-------------|-------------------------|---|---------------------|--|
| 15 | 0 | 1.21 | 0.610 | - | - |
| | 5 | 0.62 | 0.315 | 0.484 | 2.602 |
| | 10 | 0.49 | 0.248 | 0.594 | 1.753 |
| | 15 | 0.42 | 0.212 | 0.652 | 1.258 |
| | 20 | 0.34 | 0.174 | 0.715 | 0.831 |
| | 30 | 0.26 | 0.129 | 0.788 | 0.316 |
| | 60 | 0.07 | 0.038 | 0.937 | - |
| 25 | 0 | 1.42 | 0.715 | - | - |
| | 5 | 0.51 | 0.255 | 0.643 | 4.252 |
| | 10 | 0.34 | 0.174 | 0.757 | 2.086 |
| | 15 | 0.25 | 0.128 | 0.821 | 1.115 |
| | 20 | 0.21 | 0.108 | 0.849 | 0.719 |
| | 30 | 0.13 | 0.067 | 0.906 | 0.286 |
| | 60 | 0.05 | 0.027 | 0.962 | - |
| 30 | 0 | 1.45 | 0.730 | - | - |
| | 5 | 0.46 | 0.234 | 0.679 | 5.803 |
| | 10 | 0.31 | 0.158 | 0.783 | 2.329 |
| | 15 | 0.19 | 0.097 | 0.867 | 0.930 |
| | 20 | 0.16 | 0.079 | 0.892 | 0.641 |
| | 30 | 0.09 | 0.047 | 0.935 | 0.316 |
| | 60 | 0.04 | 0.021 | 0.971 | - |

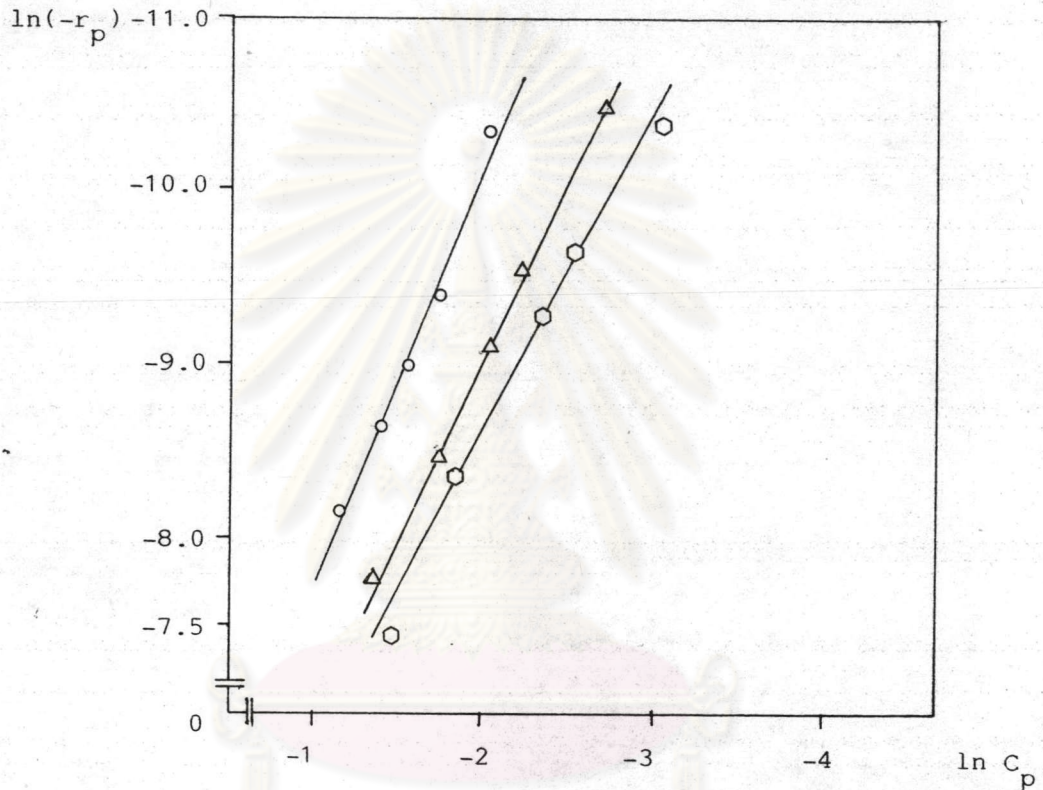


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงสัดส่วนการเปลี่ยนของไพไรต์ (x) ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะขนาด 150-250 ไมครอน ตามระยะเวลา 5 10 15 20 30 และ 60 นาที ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 15°C ○ , อุณหภูมิ 25°C △ และอุณหภูมิ 30°C ◻

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อพลอตค่า $\ln(-r_p)$ กับ $\ln C_p$ จะสามารถหาค่าอันดับอัตราเร็วปฏิกิริยา (order of reaction) ได้จากค่าความชัน (n) ที่แต่ละอุณหภูมิ ตามสมการที่

$$\ln(-r_p) = \ln k + n \ln C_p \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.18 กราฟระหว่าง $\ln(-r_p)$ กับ $\ln C_p$ ของด้านหินเหมืองแม่เมาะ
ที่อุณหภูมิ 15 °ซ ○ , อุณหภูมิ 25 °ซ △ และอุณหภูมิ 30 °ซ ◻

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 4.18 ได้ค่าความชันหรืออันดับอัตราเร็วปฏิกิริยา (n) ที่อุณหภูมิ 15 25 และ 30 °ซ โดยแสดงในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าความชันจากรูปที่ 4.18

| อุณหภูมิ (°ซ) | อันดับอัตราเร็วปฏิกิริยา (n) |
|------------------|---------------------------------|
| 15 | 2.34 |
| 25 | 2.04 |
| 30 | 1.82 |

จากตารางที่ 4.15 ค่าอันดับอัตราเร็วที่ได้ทั้งสามอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกับค่าอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสอง (2^{nd} order) ดังนั้นจึงใช้วิธีอินทิเกรตชัน (integration method) ทดสอบปฏิกิริยาอันดับสอง และกำหนดให้ปริมาตรในเครื่องปฏิกรณ์คงที่ จากสมการที่ 4.1

$$-r_p = k_2 C_p^2 \quad (4.3)$$

$$k_2 dt = \frac{-dC_p}{C_p^2} \quad (4.4)$$

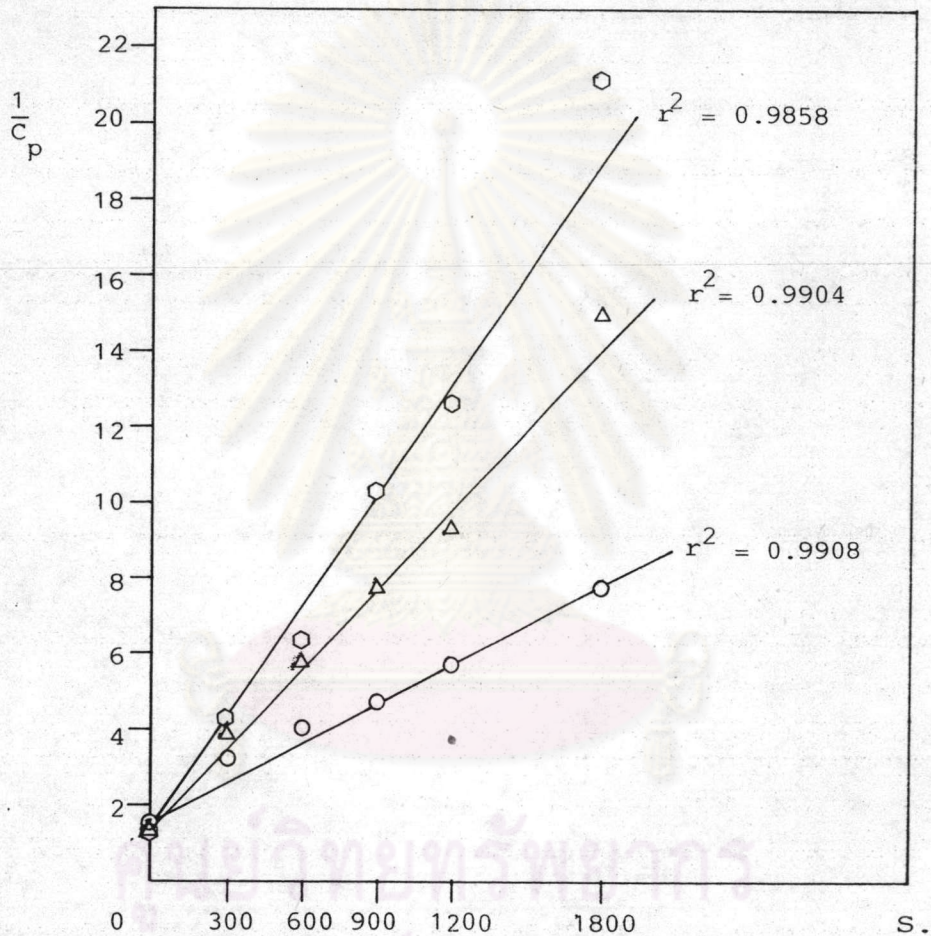
$$k_2 t = \frac{1}{C_p} - \frac{1}{C_{p_0}} \quad (4.5)$$

$$k_2 t + \frac{1}{C_{p_0}} = \frac{1}{C_p} \quad (4.6)$$

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

$$k_2 t C_{p_0} = \frac{1}{1-x} - 1 \quad (4.7)$$

ซึ่งเมื่อพลอต $\frac{1}{C_p}$ กับ t ตามสมการที่ 4.6 จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการเส้นตรง ตามรูปที่ 4.19 ดังนั้นการกำหนดให้ปฏิกิริยาเป็นอันดับสองของไฟโรตถือว่าใช้ได้



รูปที่ 4.19 กราฟระหว่าง $\frac{1}{C_p}$ กับเวลา ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ ที่อุณหภูมิตั้งที่ 15° ซ ○ , อุณหภูมิ 25° ซ △ และอุณหภูมิ 30° ซ ○

หมายเหตุ $r^2 = \text{coefficient of determination.}$

4.4.2 การหาค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเคมี (rate constant) และค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ

หัวข้อ 4.4.1 แสดงว่าปฏิกิริยาไพไรต์กับก๊าซออกซิเจนเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง เมื่อพลอตค่าระหว่าง $\frac{1}{1-X} - 1$ กับเวลาตามสมการ 4.7 ดังรูปที่ 4.20 ในแต่ละอุณหภูมิที่ทำการทดลองคือ 15 °ซ และ 30 °ซ สามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา (k_2) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ จากรูปที่ได้ค่าความชัน $k_2 C_{pO}$ ซึ่งสามารถหาค่า k_2 ได้สำหรับแต่ละอุณหภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 แสดงค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา (k_2) ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ

| | 15 °ซ | 25 °ซ | 30 °ซ |
|---|------------------------|------------------------|-------------------------|
| $k_2 C_{pO}$ | 2.135×10^{-3} | 5.161×10^{-3} | 7.50×10^{-3} |
| C_{pO} (กิโลโมล/ม ³) | 0.610 | 0.715 | 0.730 |
| k_2 (ม ³ /กิโลโมล.วินาที) | 3.50×10^{-3} | 7.215×10^{-3} | 10.273×10^{-3} |

เมื่อนำค่า k_2 ที่ได้มาสร้างกราฟในลักษณะ Arrhenius plot คือ k_2 กับ $\frac{1}{T}$ ตาม Arrhenius law

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

รูปที่ 4.21 ได้ค่าความชัน $-\frac{E \log e}{R} = -2747.97$

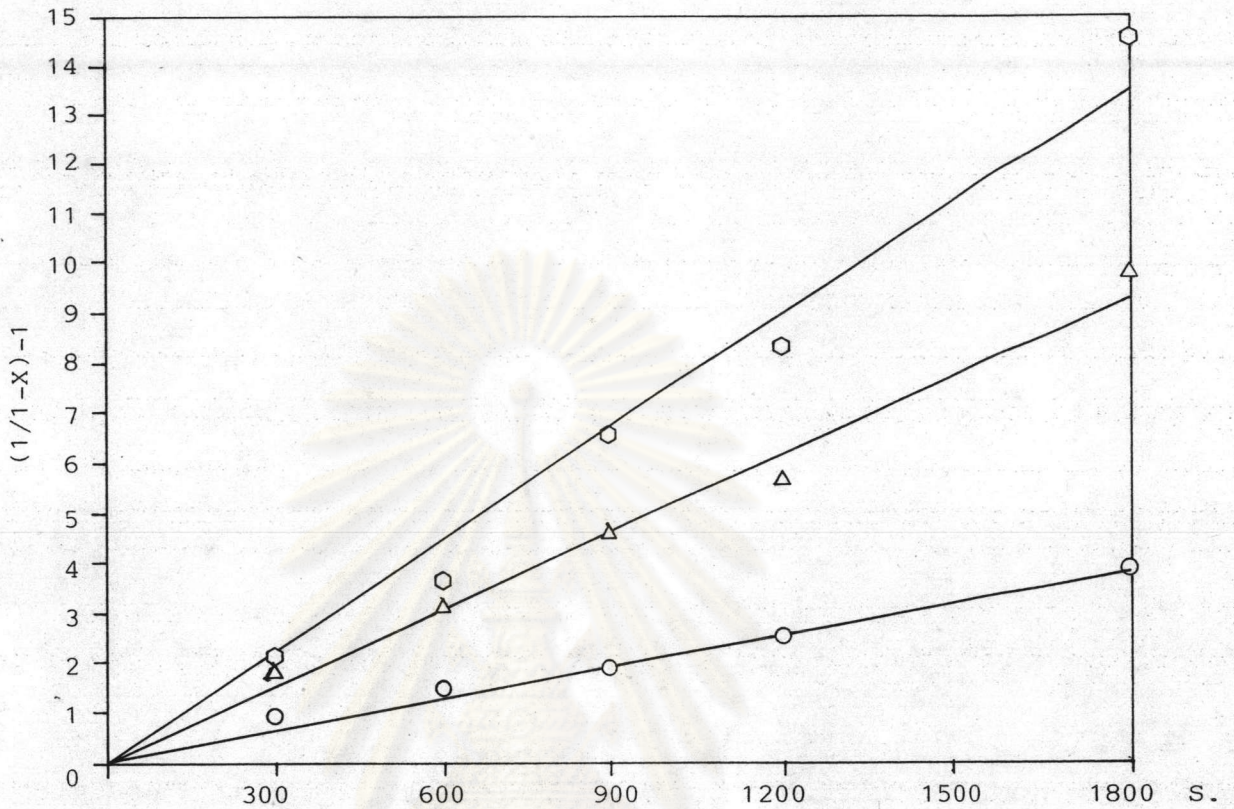
และคำนวณได้ค่าพลังงานกระตุ้น $E = 52.61 \times 10^6$ จูล/กิโลโมล

ค่าคงที่ $k_{2(0)} = 12.02 \times 10^6$ ม³/กิโลโมล.วินาที

ดังนั้นความสัมพันธ์ของค่าคงที่ปฏิกิริยากับอุณหภูมิเป็น

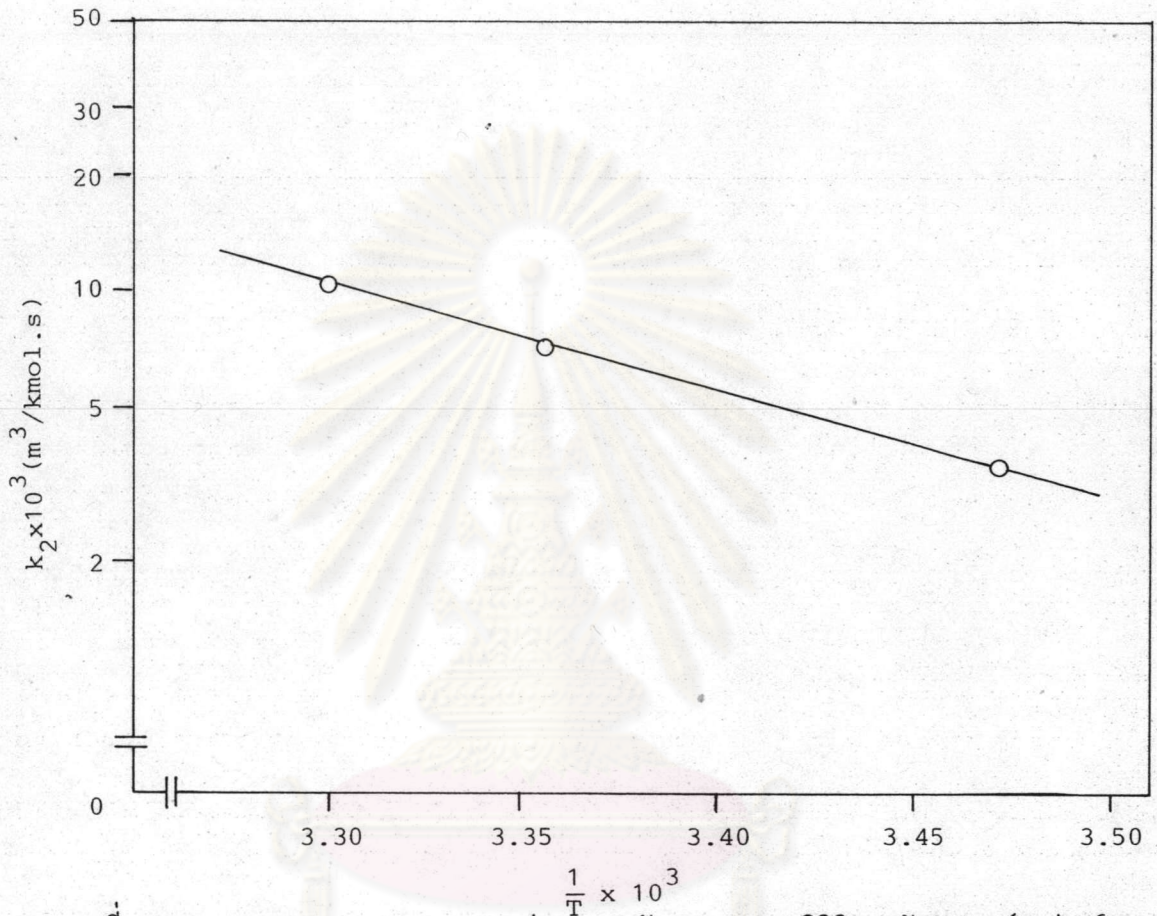
$$k_2 = 12.02 \times 10^6 \exp(-52.61 \times 10^6 / RT)$$

หมายเหตุ (1) ค่า $k_2 C_{pO}$ หาจากการคำนวณด้วยวิธี linear regression ของโปรแกรม



รูปที่ 4.20 แสดงกราฟแบบอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองระหว่าง $\frac{1}{1-x} - 1$ กับเวลา ของปฏิกิริยาซัคไฟโรสในถ่านหินเหมืองแม่เมาะกับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 15 °C (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 70 กรัมต่อสารละลาย 700 มล. อัตราการกวน 1000-1400 รอบ/นาที) ที่อุณหภูมิ 15 °C ○ , อุณหภูมิ 25 °C △ และ อุณหภูมิ 30 °C ◻

- (2) ค่า E และ $k_2(0)$ หาจากการคำนวณด้วยวิธี linear regression
รายละเอียดแสดงในภาคผนวก



รูปที่ 4.21 Arrhenius plot ระหว่าง k_2 กับ $\frac{1}{T}$ ของปฏิกิริยาจัดไฟโรตีในถ่านหิน
เหมือนแม่เมาะกับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



4.4.3 การศึกษาขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วการทำปฏิกิริยากับไฟโรต์ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ

จากหัวข้อ 2.3 สมมติว่าอนุภาคของถ่านหินมีขนาดไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างทำปฏิกิริยาและโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูป shrinking core model ในการอธิบายลำดับขั้นตอนในการเข้าทำปฏิกิริยาของก๊าซออกซิเจนจากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการแพร่ของก๊าซออกซิเจนผ่านชั้นฟิล์ม (thin film) ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์เข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา (diffusion through product layer) และขั้นตอนปฏิกิริยาของก๊าซออกซิเจนกับไฟโรต์ที่แกนกลาง

ผลการทดลองเมื่อพิจารณาจากขั้นตอนทั้งสามตามสมการที่ (2.7) (2.14) (2.22) โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับสัดส่วนการเปลี่ยนของไฟโรต์ของแต่ละขั้นตอน พบว่าขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและขั้นตอนปฏิกิริยาที่แกนกลางมิได้ให้ผลสอดคล้องตามสมการได้คือเท่าขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์เข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 20 ดังนั้นขั้นตอนที่เป็นตัวควบคุมอัตราเร็วการทำปฏิกิริยาคือขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์ของ ก๊าซออกซิเจนเข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา

การหาค่าการแพร่ประสิทธิผล (effective diffusivity) ที่อุณหภูมิ 15 25 และ 30 °C และค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตาม Arrhenius law ต้องอาศัยสมการ 4.8

$$\frac{t}{\tau} = 1 - 3(1-X)^{2/3} + 2(1-X) \quad (4.8)$$

โดย

$$\tau = \frac{\rho_B R_1^2}{6bDeC_{AL}} \quad (4.9)$$

ซึ่ง

$$\begin{aligned} \rho_B &= 26.9 \text{ กิโลโมล/ม}^3 \\ R_1 &= 1 \times 10^{-4} \text{ เมตร} \\ b &= 0.267 \\ C_{AL} &= 2.2059 \text{ กิโลโมล/ม}^3 \end{aligned}$$

เมื่อนำผลการทดลองมาพลอตในรูปที่ 4.22 และได้ค่าความชัน $\frac{1}{\tau}$ ซึ่งหาค่า De ได้สำหรับแต่ละอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.17 แสดงค่าการแพร่ประสิทธิผล (De) ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ

| | 15 °ซ | 25 °ซ | 30 °ซ |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $\frac{1}{\tau}$ (วินาที) ⁻¹ | 2.173×10^{-4} | 3.673×10^{-4} | 4.247×10^{-4} |
| τ (วินาที) | 4501.29 | 2722.57 | 2354.60 |
| De (ม ² /วินาที) | 1.654×10^{-11} | 2.796×10^{-11} | 3.233×10^{-11} |

ค่า De ที่ได้นำไปสร้าง Arrhenius plot ระหว่าง De กับ $\frac{1}{\tau}$

ตามรูปที่ 4.23 ได้ค่าความชัน $-\frac{E \log e}{R} = -1735.9$ จูล/กิโลโมล
 คำนวณได้ค่าพลังงานกระตุ้น $E = 33.22 \times 10^6$
 ค่าคงที่ $De_0 = 1.78 \times 10^{-5}$ ม²/วินาที

ดังนั้นความสัมพันธ์ของค่าการแพร่ประสิทธิผลและอุณหภูมิคือ

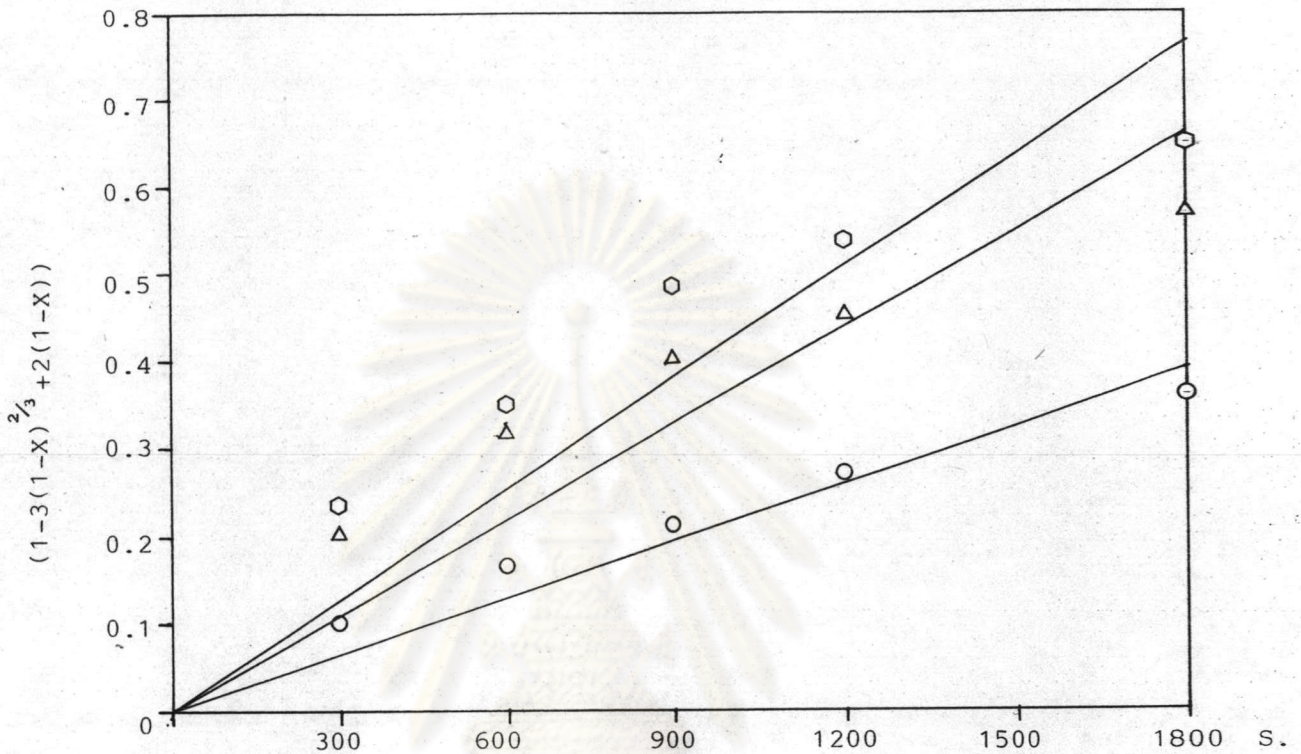
$$De = 1.78 \times 10^{-5} \exp(-33.22 \times 10^6 / RT)$$

หมายเหตุ (1) ค่า $1/\tau$ หาจากการคำนวณด้วยวิธี linear regression ของโปรแกรม

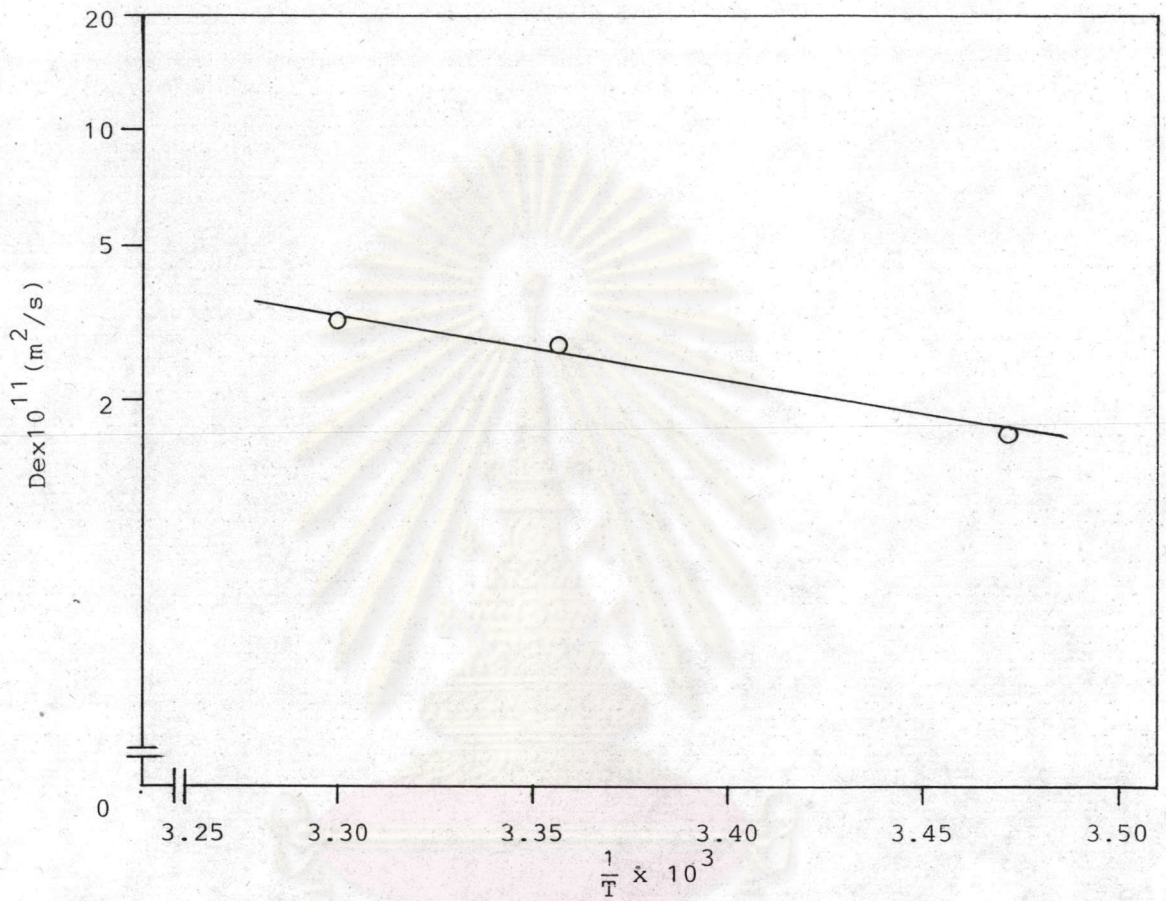
Lotus version 2.0

(2) ค่า E และ De_0 หาจากการคำนวณด้วยวิธี linear regression
 รายละเอียดแสดงในภาคผนวก

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

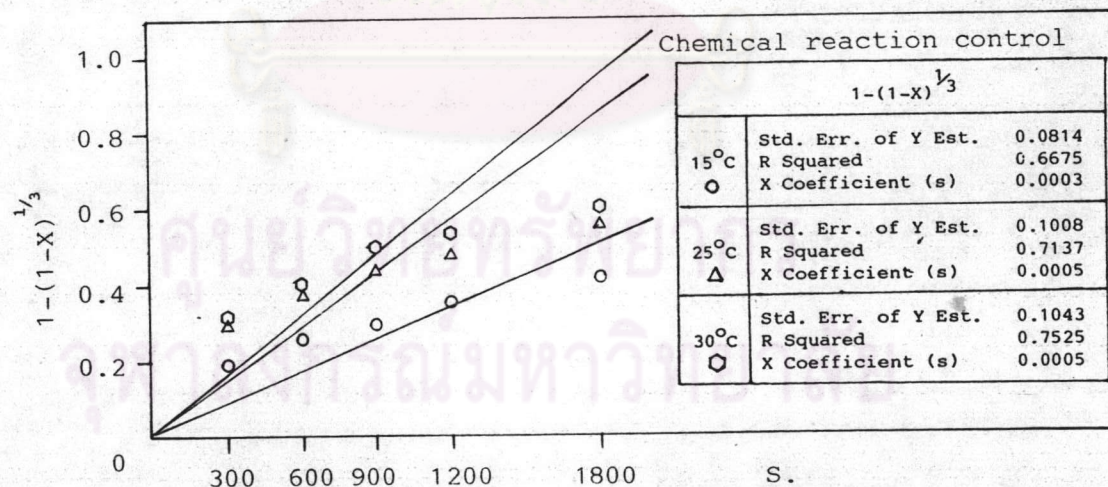
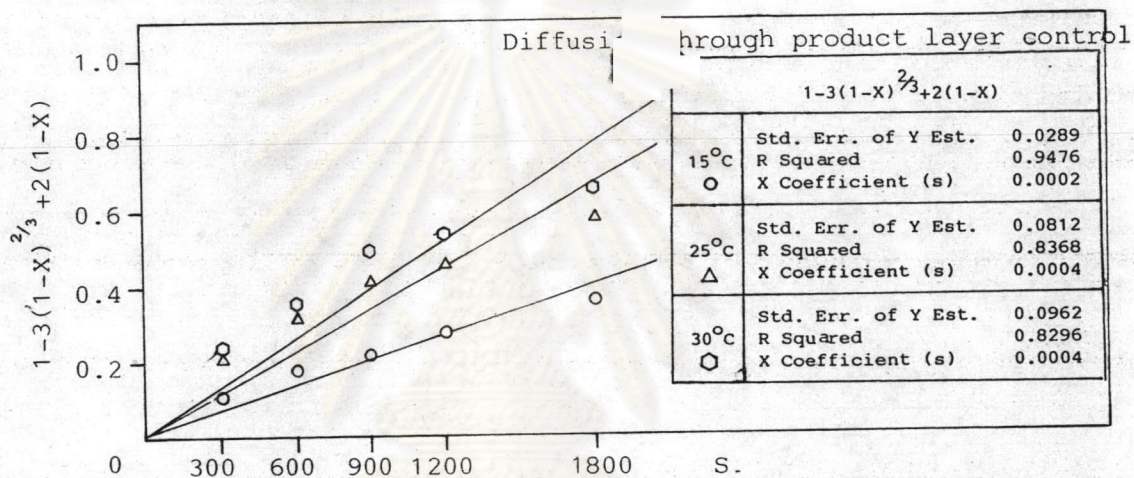
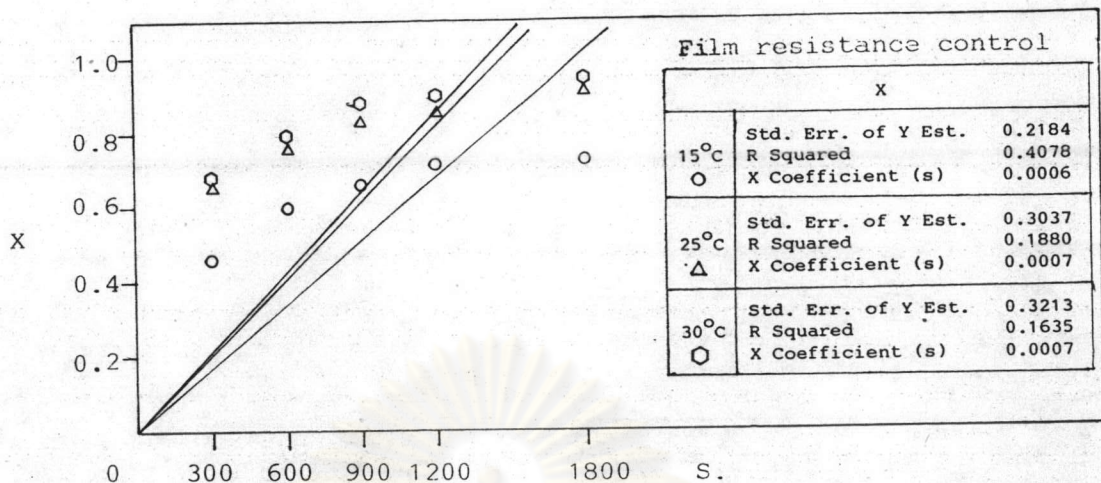


รูปที่ 4.22 กราฟระหว่าง $1-3(1-x)^{2/3}+2(1-x)$ กับเวลา โดยอาศัย shrinking core model ของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับไฟไรต์ใน ถ่านหินเหมืองแม่เมาะ ที่อุณหภูมิ 15 25 และ 30 °ซ ตามลำดับ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 70 กรัมต่อสารละลาย 700 มล. อัตราการ กวน 1000-1400 รอบ/นาที) ที่อุณหภูมิ 15 °ซ ○ , อุณหภูมิ 25 °ซ △ และอุณหภูมิ 30 °ซ ◻



รูปที่ 4.23 Arrhenius plot ระหว่าง D_{ex} กับ $\frac{1}{T}$ ของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
 เข้าทำปฏิกิริยากับไฟโรซินด้านหินเหมือนแม่เมาะ โดยอาศัย shrinking core
 model

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยากับไฟไรต์ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ

4.4.4 การหาค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเคมี (rate constant) และค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) สำหรับด่านหินเหมืองป่าคา

จากผลการทดลองและคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4.19 โดยวิธีการเดียวกับหัวข้อ

4.4.2 ในการหาค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา (k_2) จากการพลอต $\frac{1}{1-x} - 1$ กับเวลา ดังรูปที่ 4.26 จะได้ค่า $k_2 C_{p0}$ และคำนวณค่า k_2 ที่แต่ละอุณหภูมิ ดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 แสดงค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา (k_2) ของด่านหินเหมืองป่าคา

| | 15 °ซ | 25 °ซ | 30 °ซ |
|---|------------------------|------------------------|-------------------------|
| $k_2 C_{p0}$ | 1.371×10^{-3} | 2.595×10^{-3} | 3.207×10^{-3} |
| C_p (กิโลโมล/ม ³) | 0.371 | 0.333 | 0.315 |
| k_2 (ม ³ /กิโลโมล.วินาที) | 3.695×10^{-3} | 7.793×10^{-3} | 10.181×10^{-3} |

เมื่อสร้าง Arrhenius plot ระหว่าง k_2 กับ $\frac{1}{T}$ ตามรูปที่ 4.27

$$\text{ได้ค่าความชัน} \quad - \frac{E \log e}{R} = - 2596.78$$

$$\text{คำนวณค่าพลังงานกระตุ้น} \quad E = 49.71 \times 10^6 \text{ จูล/กิโลโมล}$$

$$\text{และ ค่าคงที่} \quad k_{2(0)} = 3.88 \times 10^6 \text{ ม}^3/\text{กิโลโมล}$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ของค่าคงที่ปฏิกิริยากับอุณหภูมิเป็น

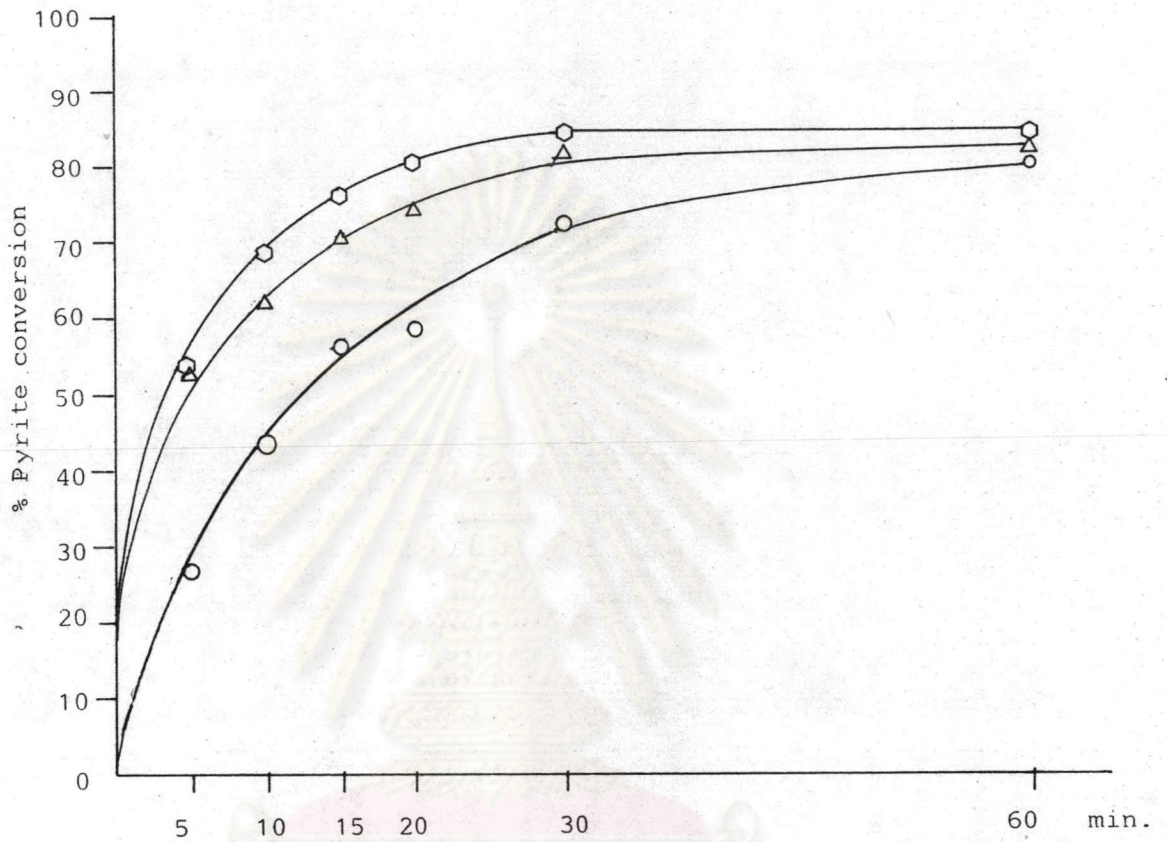
$$k_2 = 3.88 \times 10^6 \exp(-49.71 \times 10^6 / RT)$$

หมายเหตุ ค่า $k_2 C_{p0}$, E และ $k_{2(0)}$ หาค่าตามวิธีการ linear regression ในหัวข้อ

4.4.2

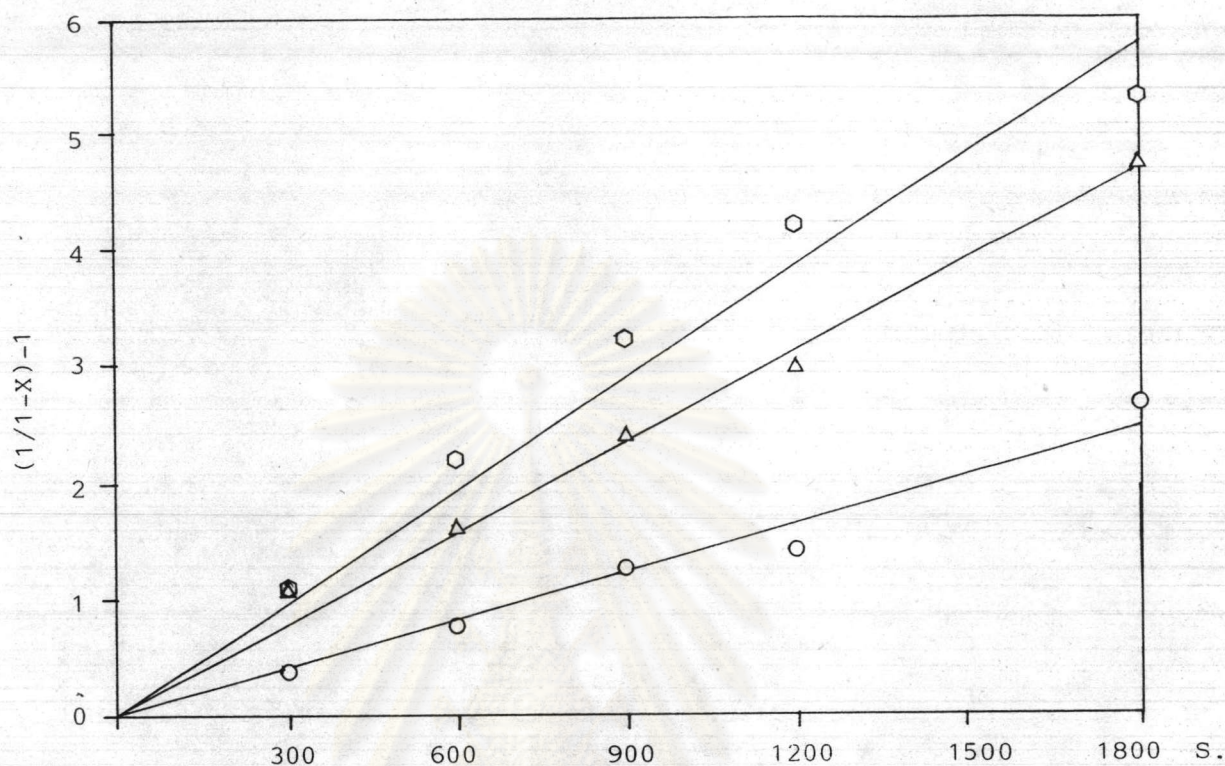
ตารางที่ 4.19 แสดงค่าร้อยละกัมมันไพไรต์ ความเข้มข้นของไพไรต์ (c_p) และค่าสัดส่วนการเปลี่ยน (x) ตามระยะเวลาที่อุณหภูมิ 15 25 และ 30 °C

| อุณหภูมิ (°C) | เวลา (นาที) | กัมมันไพไรต์ (%) (MAF) | ความเข้มข้นไพไรต์ ในถ่านหิน c_p (กิโลโมล/ม ³) | ค่าสัดส่วนการเปลี่ยน x |
|------------------|----------------|------------------------------|--|-----------------------------|
| 15 | 0 | 0.74 | 0.371 | - |
| | 5 | 0.54 | 0.270 | 0.273 |
| | 10 | 0.42 | 0.212 | 0.429 |
| | 15 | 0.33 | 0.165 | 0.556 |
| | 20 | 0.31 | 0.155 | 0.583 |
| | 30 | 0.20 | 0.102 | 0.726 |
| | 60 | 0.15 | 0.075 | 0.798 |
| 25 | 0 | 0.66 | 0.333 | - |
| | 5 | 0.31 | 0.158 | 0.524 |
| | 10 | 0.25 | 0.127 | 0.617 |
| | 15 | 0.19 | 0.098 | 0.705 |
| | 20 | 0.17 | 0.084 | 0.747 |
| | 30 | 0.12 | 0.059 | 0.824 |
| | 60 | 0.12 | 0.059 | 0.824 |
| 30 | 0 | 0.62 | 0.315 | - |
| | 5 | 0.30 | 0.149 | 0.526 |
| | 10 | 0.20 | 0.099 | 0.686 |
| | 15 | 0.15 | 0.075 | 0.763 |
| | 20 | 0.12 | 0.061 | 0.807 |
| | 30 | 0.10 | 0.050 | 0.841 |
| | 60 | 0.10 | 0.050 | 0.841 |



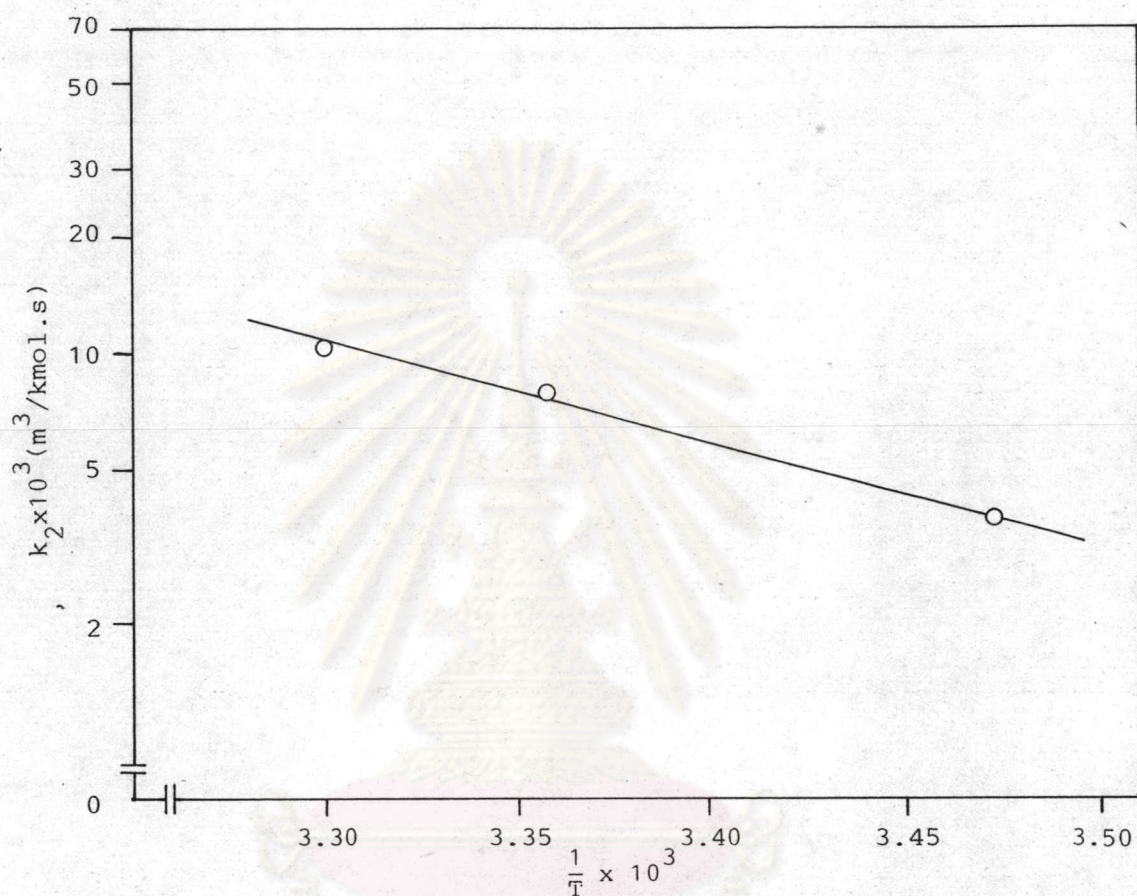
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงสัดส่วนการเปลี่ยนของไพไรต์ (x) ของถ่านหินเหมืองป่าคา
ขนาด 150-250 ไมครอน ที่อุณหภูมิ 15°C ○ , อุณหภูมิ 25°C △
และอุณหภูมิ 30°C ◻

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.26. กราฟแบบอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองระหว่าง $\frac{1}{1-x} - 1$ กับเวลา ของปฏิกิริยา
 ซักไฟโรตีนในถ่านหินเหมืองป่าคา กับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่
 อุณหภูมิ 15 °C, 25 °C และ 30 °C (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน
 70 กรัมต่อสารละลาย 700 มล. อัตราการกวน 1000-1400 รอบ/นาที)
 ที่อุณหภูมิ 15 °C ○ , อุณหภูมิ 25 °C △ และอุณหภูมิ 30 °C ◻

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.27 Arrhenius plot ระหว่าง k_2 กับ $\frac{1}{T}$ ของปฏิกิริยาขจัดไฟโรต์ในถ่านหิน
เหมืองป่าคา กับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.5 การศึกษาขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วการทำปฏิกิริยากับไพโรไลต์ในด้านหิน เหมืองป่าคา

จากหัวข้อ 4.4.3 พบว่าขั้นตอนที่เป็นตัวควบคุมอัตราเร็วการทำปฏิกิริยา คือ ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์ของก๊าซออกซิเจนเข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาของด้านหินเหมืองแม่เมาะ จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.19 สำหรับด้านหินเหมืองป่าคา เมื่อแสดงโดยรูปที่ 4.28 ก็ได้ผลเช่นเดียวกันคือ ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์เป็นขั้นตอนควบคุม

ดังนั้นเมื่อนำค่าความชันจากรูปที่ 4.28 มาคำนวณจะได้ค่า De ของแต่ละอุณหภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 แสดงค่าการแพร่ประสิทธิผล (De) ของด้านหินเหมืองป่าคา

| | 15 °ซ | 25 °ซ | 30 °ซ |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $(1/T)^{-1}$ (วินาที) ⁻¹ | 1.478×10^{-4} | 2.563×10^{-4} | 2.90×10^{-4} |
| τ (วินาที) | 6726.46 | 3995.20 | 3448.27 |
| De (ม. ² /วินาที) | 1.132×10^{-11} | 1.905×10^{-11} | 2.207×10^{-11} |

จาก Arrhenius plot ระหว่าง De กับ $\frac{1}{T}$ ตามรูปที่ 4.29

$$\text{ได้ค่าความชัน} \quad - \frac{E \log e}{R} = - 1728.82$$

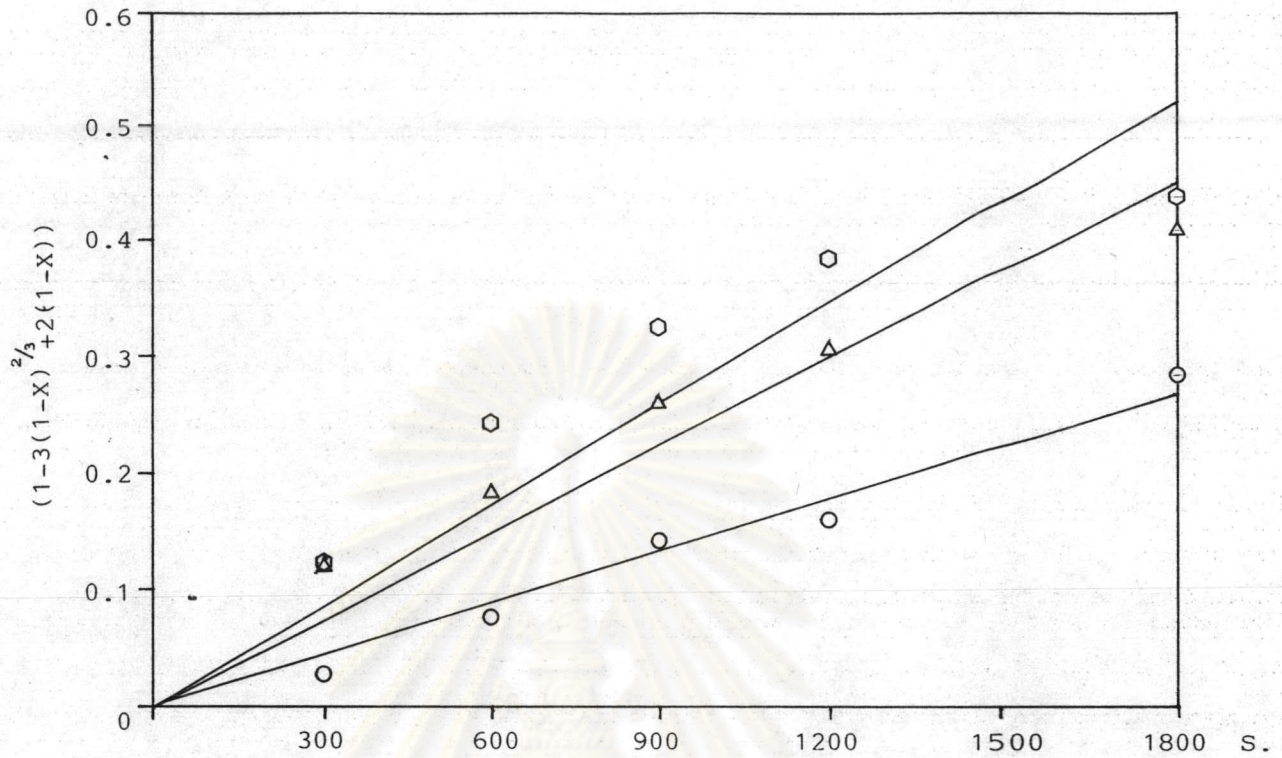
$$\text{คำนวณค่าพลังงานกระตุ้น} \quad E = 33.09 \times 10^6 \text{ จูล/กิโลโมล}$$

$$\text{และ ค่าคงที่} \quad De_0 = 1.15 \times 10^{-5} \text{ ม.}^2/\text{วินาที}$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ของค่าการแพร่ประสิทธิผลและอุณหภูมิคือ

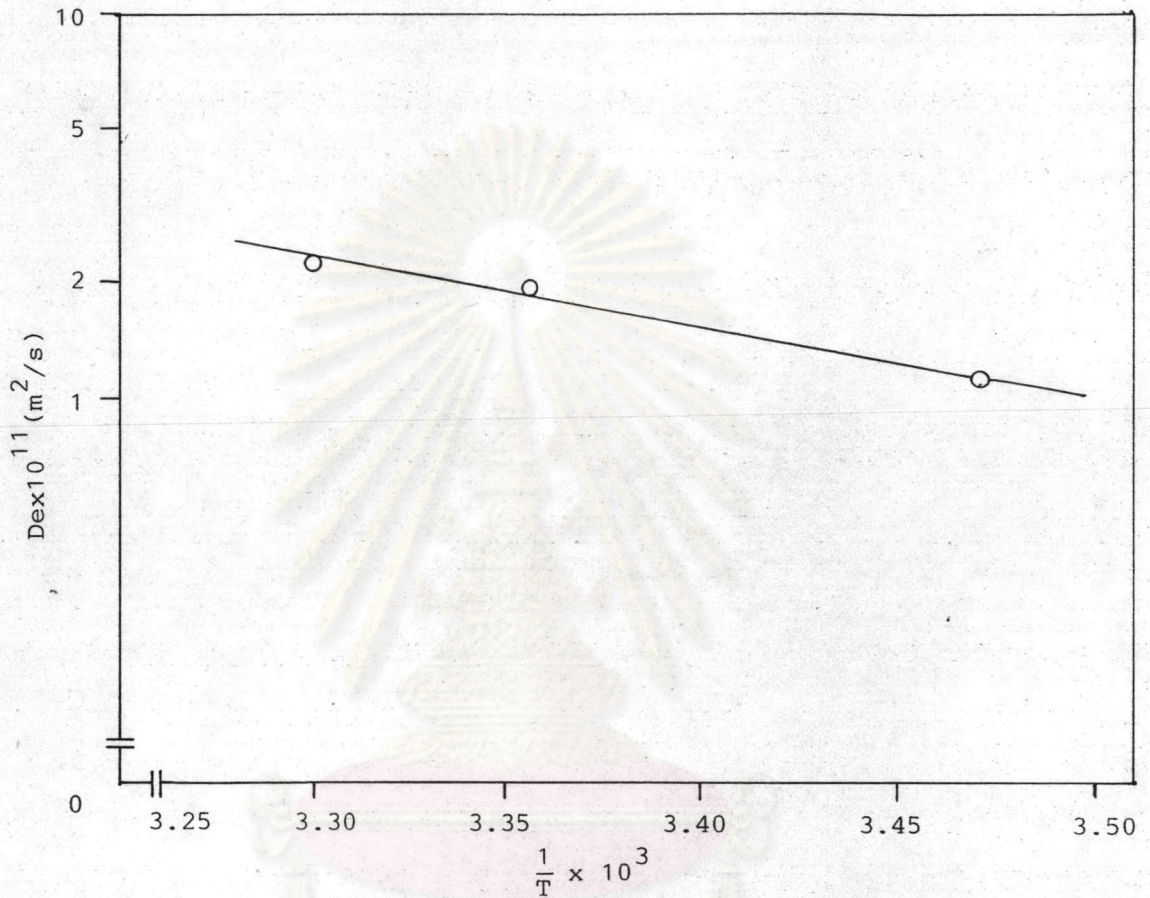
$$De = 1.15 \times 10^{-5} \exp(-33.09 \times 10^6 / RT)$$

หมายเหตุ ค่า $1/\tau$, E และ De_0 หาตามวิธีการ linear regression ในหัวข้อ 4.4.3

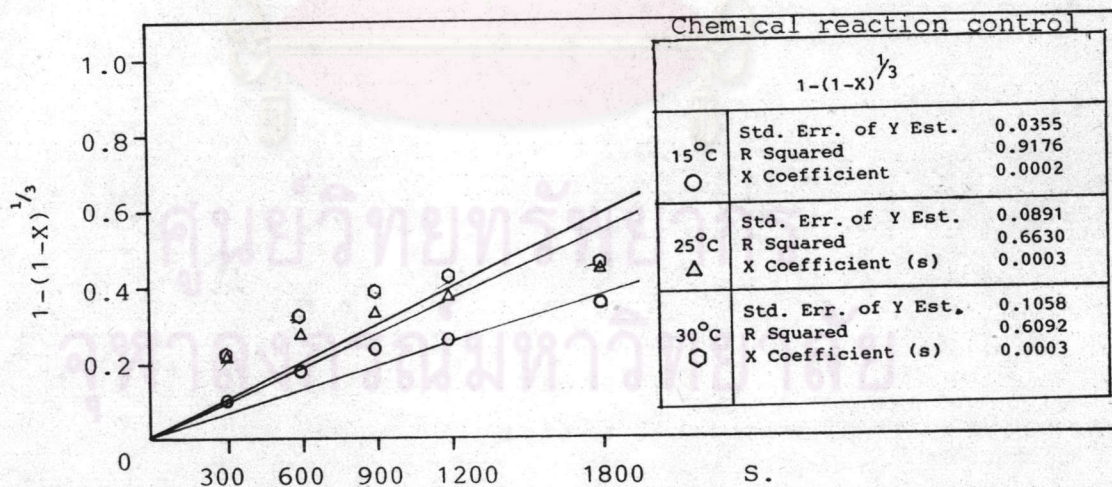
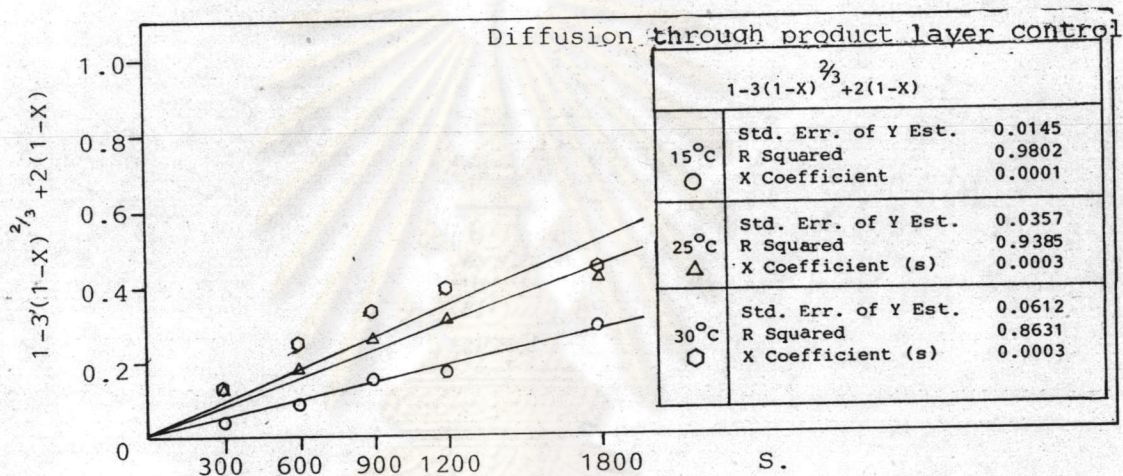
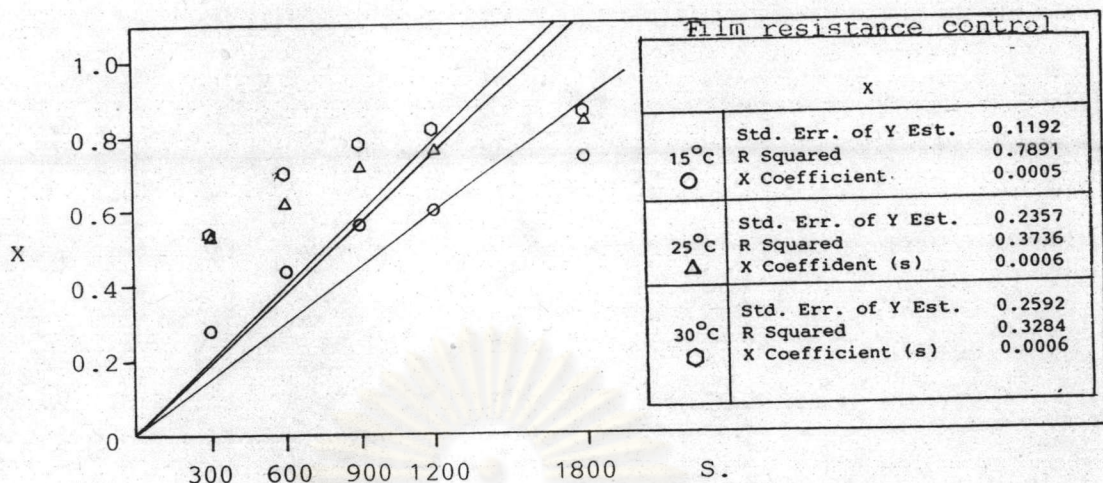


รูปที่ 4.28 กราฟระหว่าง $1-3(1-x)^{2/3}+2(1-x)$ กับเวลา โดยอาศัย shrinking core model ของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับไฟไรต์ในถ่านหินเหมืองป่าคา ที่อุณหภูมิ 15 °C และ 30 °C ตามลำดับ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 70 กรัมต่อสารละลาย 700 มล. อัตราการกวน 1000-1400 รอบ/นาที) ที่อุณหภูมิ 15 °C ○ , อุณหภูมิ 25 °C △ และอุณหภูมิ 30 °C ◻

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.29 Arrhenius plot ระหว่าง D_e กับ $\frac{1}{T}$ ของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับไฟโรตีนในถ่านหินเหมืองป่าคา โดยอาศัย shrinking core model



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยากับไฟรต์ของถ่านหินเหมืองป่าคา