บทที่ 4

ผลการทดลองการวิเคราะห์และวิจารณ์

การศึกษาการขจัดกำมะถันโดยอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชันได้แบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ตอน คือ ตอนแรก ทำการศึกษาหาแหล่งถ่านหินในประเทศไทยที่มีกำมะถันไพไรต์ประกอบอยู่สูง เพื่อจะได้นำมาใช้ในการทดลอง ตอนที่สองเป็นการทดลองศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินกับสารละลายเฟอริกซัลเฟตโดยพิจารณาถึงความเข้มข้นของสารละลาย เวลา ปริมาณถ่านหินที่ใช้ อัตราการกวน อุณหภูมิ และตอนที่สามจะเป็นการทดลองใช้ก๊าซออกซิเจนเข้าร่วมในการทำปฏิกิริยาเพื่อศึกษาถึง regeneration ของสารละลายเฟอริกซัลเฟต

4.1 การศึกษาองค์ประกอบกำมะถันในถ่านหินแหล่งต่าง ๆ

4.1.1 ถ่านหินจากแหล่งเหมืองหวายเล็ก เหมืองบางปูดำ จังหวัดกระบี่ และเหมืองแม่เมาะจังหวัดลำปาง

ตารางที่ 4.1 แสดงผลของการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของถ่านหินจากเหมืองหวายเล็กที่เก็บตัวอย่างจากบริเวณที่เปิดทำเหมืองกับบริเวณที่เป็นหลุมเจาะที่ระดับความลึกต่าง ๆ จากผิวดิน เหมืองบางปูดำและเหมืองแม่เมาะเก็บตัวอย่างบริเวณที่เปิดทำเหมือง จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าร้อยละของกำมะถันรวม และค่าร้อยละของกำมะถันในรูปต่าง ๆ (แบบไม่รวมความชื้น) มีค่าค่อนข้างสูงคือ เหมืองบางปูดำมีค่าร้อยละ 3.88 เหมืองแม่เมาะร้อยละ 4.07 เหมืองหวายเล็กพบว่าแต่ละระดับความลึกของเหมืองมีค่าร้อยละของกำมะถันรวมแตกต่างกันคืออยู่ในช่วง 4.07-7.46 ส่วนกำมะถันไพไรต์เหมืองบางปูดำอยู่ในระดับต่ำคือมีค่าร้อยละ 0.55 ส่วนเหมืองหวายเล็กพบว่าที่ระดับต่าง ๆ กันมีค่าร้อยละของกำมะถันไพไรต์ประกอบอยู่ในถ่านหินต่างกันโดยมีค่ามากที่สุดถึงร้อยละ 3 คือ หลุมเจาะหมายเลข 1909 ระดับความลึก 42 เมตรจากผิวดิน ซึ่งน่าเสียดายที่ไม่สามารถจะนำถ่านหิน

มาใช้ในการทดลองในปริมาณมาก ๆ ได้เพราะเป็นหลุมเจาะที่ยังไม่ได้เปิดผิวดินทำเหมือง

ส่วนองค์ประกอบของกำมะถันในรูปกำมะถันอินทรีย์และกำมะถันซัลเฟตพบว่าแต่ละเหมืองมีค่าแตกต่างกันและในส่วนของเหมืองหวายเล็กเหมืองเดียวกันที่ระดับความลึกต่างกันก็มีค่าไม่เท่ากันด้วย นอกจากนี้จะพบว่าค่าร้อยละของกำมะถันซัลเฟตของเหมืองหวายเล็กและเหมืองแม่เมาะมีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าร้อยละของกำมะถันไพไรต์และกำมะถันอินทรีย์ ยกเว้นเหมืองบางปูดำที่ค่าร้อยละของกำมะถันซัลเฟตสูงกว่าร้อยละของกำมะถันไพไรต์คือมีค่าร้อยละ 1.13 กับ 0.55 ตามลำดับ

4.1.2 ถ่านหินจากเหมืองแม่เมาะ

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของถ่านหินจากเหมืองแม่เมาะจังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นผลจากหัวข้อ 4.1.1 คือค่าร้อยละของกำมะถันไพไรต์อยู่ในช่วงที่น่าสนใจคือ 1.31 ดังนั้นจึงได้ทำการเก็บตัวอย่างถ่านหินจากเหมืองแม่เมาะโดยเก็บบริเวณที่เปิดทำเหมืองจากบริเวณที่สูงสุดถึงบริเวณที่ต่ำสุดของเหมืองมา 12 จุด โดยเก็บแต่ละจุดระยะต่างกันประมาณ 50 เมตร เก็บมาจุดละ 6 กิโลกรัม และนำมาวิเคราะห์หาสมบัติโดยพิจารณาค่าร้อยละของกำมะถันรวมและร้อยละของกำมะถันในรูปต่าง ๆ

จากการทดลองพบว่าค่าร้อยละของกำมะถันรวมแบบไม่คิดรวมความชื้นทั้ง 12 จุด มีค่าแตกต่างกันคือ มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 1.54 ถึง 3.63 ค่าร้อยละของกำมะถันไพไรต์ทั้ง 12 จุด ก็มีค่าไม่เท่ากันคือ ร้อยละ 0.72 ถึง 1.52 จุดที่มีค่าร้อยละของกำมะถันไพไรต์สูงที่สุดคือจุดที่ 11 มีค่ากำมะถันไพไรต์ประกอบอยู่ร้อยละ 1.52 กำมะถันรวมร้อยละ 2.75 รองลงมาคือจุดที่ 4 มีค่าร้อยละของกำมะถันไพไรต์ 1.06 กำมะถันรวมร้อยละ 3.03 ดังนั้นในการทดลองจะใช้ตัวอย่างของถ่านหินของ 2 จุดนี้มาใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการขจัดกำมะถัน ส่วนค่าร้อยละของกำมะถันอินทรีย์และร้อยละของกำมะถันซัลเฟตที่ประกอบอยู่ในถ่านหินทั้ง 12 จุด ก็มีค่าแตกต่างกัน ค่าร้อยละของกำมะถันอินทรีย์ มีค่าสูงสุดคือบริเวณจุดที่ 3 คือมีค่า 1.93 และค่าร้อยละของกำมะถันซัลเฟตมีค่าสูงสุดคือ จุดที่ 5 มีค่า 1.69 ซึ่งทั้งจุดที่ 3 และจุดที่ 5 นี้จะนำมาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีต่อกำมะถันอินทรีย์และกำมะถันซัลเฟต

4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชัน

สำหรับการทดลองนี้ใช้ถ่านหินที่มีกำมะถันไพไรต์สูงจากเหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ทำปฏิกิริยากับสารละลายเฟอริกซัลเฟตในเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนขนาด 1 ลิตร แล้วทดลองศึกษาถึงอิทธิพลที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันคือ พิจารณาค่าความเข้มข้นของสารละลาย เวลา ปริมาณถ่านหินที่ใช้ อัตราการกวน และอุณหภูมิ โดยจะศึกษาเน้นถึงค่าที่เปลี่ยนแปลงคือ กำมะถันรวม กำมะถันไพไรต์ เถ้า ค่าความร้อนของทุก ๆ การทดลอง

4.2.1 ผลของความเข้มข้น

ในการพิจารณาค่าความเข้มข้นของสารละลายได้ทำการทดลอง 2 การทดลอง ที่สภาวะเหมือนกันเพียงแต่ระยะเวลาต่างกันเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายต่อการขจัดกำมะถันในถ่านหิน

การทดลองที่ 1 ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติของถ่านหินที่ผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชันที่ค่าความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายคือค่า 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.50 M โดยใช้ขนาดถ่านหิน 106-250 μm อุณหภูมิ 100°ซ เวลา 2 ชม. อัตราการกวน 1,000-1,400 รอบ/นาที ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล. สารละลายในการทำปฏิกิริยา ผลการทดลองพบว่าถ่านหินเมื่อผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชันที่ความเข้มข้น 0.50-1.50 มีสมบัติดังนี้

- ค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันรวม (% De-S) อยู่ในช่วง 22.90 - 26.55 โดยจะลดปริมาณกำมะถันรวมได้มากที่สุดถึงร้อยละ 26.55 เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย 1.00 M ขึ้นไป

- ค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ (% De-pyrite) อยู่ในช่วง 36.59-40.65 โดยจะลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ได้มากที่สุดร้อยละ 40.65 ที่ค่าความเข้มข้นสารละลาย 1.00 M

- ค่าร้อยละของการลดปริมาณเถ้า (% De-ashing) อยู่ในช่วง 15.86-25.32 โดยจะลดปริมาณเถ้าได้มากที่สุดร้อยละ 25.32 ที่ค่าความเข้มข้นสารละลาย 1.00 M

- ถ่านหินมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 9.09-13.85

การทดลองที่ 2 ตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติของถ่านหินที่ผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชันที่ค่าความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายคือ 0.50, 1.00 และ 1.50 M โดยใช้ขนาดถ่านหิน 106-250 µm อุณหภูมิ 100°ซ เวลา 4 ชม. อัตราการกวน 1000-1400 รอบ/นาที ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล. สารละลายในการทำปฏิกิริยา ผลการทดลองพบว่าถ่านหินเมื่อผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชันที่ค่าความเข้มข้น 0.50-1.50 M มีสมบัติดังนี้

- ค่าร้อยละของลดปริมาณกำมะถันรวม (% De-S) อยู่ในช่วง 22.40-30.19 สำหรับความเข้มข้นสารละลาย 1M และ 1.5 M ตามลำดับ
- ค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ (% De-pyrite) อยู่ในช่วง 51.38-54.13 โดยค่าความเข้มข้นของสารละลายทั้งสามคือ 0.50, 1.00, 1.50 M สามารถลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ได้ใกล้เคียงกันมาก
- ค่าร้อยละของการลดปริมาณเถ้า (% De-ashing) พบว่าอยู่ในช่วง 11.52 - 28.80
- ถ่านหินมีค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 4.38-7.05

นอกจากนี้ยังได้นำข้อมูลจากตารางที่ 4.4 มาสร้างกราฟรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันรวมร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ และร้อยละของการลดปริมาณเถ้ากับค่าความเข้มข้นของสารละลาย การลดปริมาณกำมะถันรวม (% De-S) เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้น จนถึงความเข้มข้นสารละลาย 1.00M (ความเข้มข้นสารละลายไม่มีผลต่อการลดปริมาณกำมะถันรวม(%De-S) เมื่อความเข้มข้นสารละลายสูงกว่า 1M)การลดปริมาณกำมะถันไพไรต์พบว่า ความเข้มข้นทั้งสามค่าสามารถลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ได้ใกล้เคียงกันคือไม่ต่ำกว่าร้อยละ 51.38 จากผลการทดลองทั้งสองนี้ค่าความเข้มข้นของการละลายเมื่อใช้ระยะเวลาต่างกันคือ การทดลองที่ 1 ใช้ 2 ชม. การทดลองที่ 2 ใช้เวลา 4 ชม. ให้ผลที่ใกล้เคียงกันคือ ค่าความเข้มข้นของสารละลาย 1.00 M เป็นค่าที่เหมาะสมในการขจัดกำมะถันในถ่านหิน

4.2.2 ผลของเวลา

ตารางที่ 4.5 แสดงสมบัติของถ่านหินที่ผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชันที่เวลาต่าง ๆ คือ 2, 3 และ 4 ชม. โดยใช้ขนาดถ่านหิน 106-250μm อุณหภูมิ 100°ซ อัตราการกวน 1000-1400 รอบ/นาที ความเข้มข้นสารละลาย 1.00 M ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล. สารละลายในการทำปฏิกิริยา ผลการทดลองพบว่าถ่านหินเมื่อผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชันที่ระยะเวลา 2-4 ชม. มีสมบัติดังนี้คือ

- ค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันรวม (% De-S) อยู่ในช่วง 23.59-29.22 โดยสามารถลดปริมาณกำมะถันรวมได้มากที่สุดเมื่อใช้เวลาที่ทดลอง 4 ชม. สามารถลดได้ร้อยละ 29.22

- ค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ (% De-pyrite) อยู่ในช่วง 48.72-59.83 โดยสามารถลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ได้มากที่สุดเมื่อใช้เวลาทดลอง 4 ชม. สามารถลดได้ร้อยละ 59.83

- ค่าร้อยละของการลดปริมาณเถ้า (% De-ashing) อยู่ในช่วง 14.94-36.94 โดยสามารถลดปริมาณเถ้าได้มากที่สุดเมื่อใช้เวลาทดลอง 4 ชม. สามารถลดได้ร้อยละ 36.94

- ถ่านหินมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 8.83-22.68

นอกจากนี้ยังได้นำข้อมูลจากตารางที่ 4.5 มาสร้างกราฟรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันรวม ร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์และร้อยละของการลดปริมาณเถ้ากับเวลาผลที่ได้พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันให้สูงขึ้น ค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันรวมร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ ร้อยละของการลดปริมาณเถ้าจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นทั้งสามค่า ดังนั้นจากผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเวลาจะพบว่า ถ้าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น การลดปริมาณกำมะถันเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ระยะเวลาสูงสุด 4 ชม. จะให้ผลในการขจัดกำมะถันได้สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลา 2 และ 3 ชม.

4.2.3 ผลของปริมาณถ่านหิน

ตารางที่ 4.6 แสดงสมบัติของถ่านหินที่ผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชัน ใช้ปริมาณถ่านหินต่าง ๆ กันคือ 25, 50, 100, 150 กรัม/500 มล. สารละลาย และใช้ขนาดถ่านหิน 106-250 µm อุณหภูมิ 100°ซ เวลา 4 ชม. อัตราการกวน 1000-1400 รอบ/นาที ความเข้มข้นสารละลาย 1.00 M ในการทำปฏิกิริยาผลการทดลองพบว่าถ่านหินเมื่อผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชันที่ปริมาณถ่านหิน 25-150 กรัม/500 มล. สารละลายมีสมบัติดังนี้

- ค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันรวม (% De-S) อยู่ในช่วง 26.07-38.21 โดยสามารถลดกำมะถันรวมได้มากที่สุดเมื่อใช้ปริมาณถ่านหินในการทำปฏิกิริยาน้อยที่สุดคือ 25 กรัม/500 มล. สารละลาย
- ค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ (% De-pyrite) อยู่ในช่วง 32.31-60.77 โดยสามารถลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ได้มากที่สุด เมื่อใช้ปริมาณถ่านหินน้อยที่สุดในการทำปฏิกิริยาคือปริมาณ 25 กรัม/500 มล. สารละลาย
- ค่าร้อยละของการลดปริมาณเถ้า (% De-ashing) อยู่ในช่วง 14.62-39.35
- ถ่านหินมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 5.6-12.14

นอกจากนี้ยังได้นำข้อมูลจากตารางที่ 4.6 ไปสร้างกราฟรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันรวมร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ และร้อยละของการลดปริมาณเถ้ากับค่าปริมาณถ่านหินที่ใช้ทำปฏิกิริยาในสารละลาย 500 มล. ผลที่ได้พบว่า ในกรณีของการลดปริมาณกำมะถันรวมกับการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์สูง เมื่อใช้ถ่านหินในการทำปฏิกิริยาในปริมาณน้อย

4.2.4 ผลของอัตราการกวน

ตารางที่ 4.7 แสดงสมบัติถ่านหินที่ผ่านกระบวนการ ดีซัลเฟอไรเซชัน ที่อัตราการกวนต่าง ๆ กันคือ 700, 1400, 1800รอบ/นาที. โดยใช้ขนาดถ่านหิน

106-250 µm อุณหภูมิ 100°ซ เวลา 4 ชม. ความเข้มข้นสารละลาย 1.00 M ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล. สารละลายในการทำปฏิกริยา ผลการทดลองพบว่าถ่านหินเมื่อผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชันที่อัตราการกวน 700-1400 รอบ/นาที มีสมบัติดังนี้

- ค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันรวม (% De-S) อยู่ในช่วง 28.00-30.27 โดยอัตราการกวนทั้งสามค่าที่ใช้สามารถลดปริมาณกำมะถันรวมได้ใกล้เคียงกัน
- ค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ (% De-pyrite) อยู่ในช่วง 47.41-48.28 โดยอัตราการกวนทั้งสามค่าที่ใช้สามารถลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ได้ใกล้เคียงกันมาก
- ค่าร้อยละของการลดปริมาณเถ้า (% De-ashing) อยู่ในช่วง 17.30-35.32 ซึ่งค่าที่ลดเถ้าได้มากที่สุดคือใช้อัตราการกวน 1800 รอบ/นาที
- ถ่านหินมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 10-16

นอกจากนี้ยังได้นำข้อมูลจากตารางที่ 4.7 ไปสร้างกราฟรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันรวมร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ และร้อยละของการลดปริมาณเถ้ากับค่าอัตราการกวน ผลที่ได้พบว่า อัตราการกวนในช่วง 700-1400 รอบ/นาที ไม่มีผลต่อการลดปริมาณกำมะถันรวมและกำมะถันไพไรต์ ซึ่งกล่าวได้ว่าการลดปริมาณกำมะถันไม่ขึ้นกับอัตราการถ่ายเทมวล (mass transfer rate) แต่ขึ้นกับอัตราเร็วของปฏิกิริยา

4.2.5 ผลของอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.8 แสดงสมบัติของถ่านหินที่ผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชันที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ 80°, 100° 125°ซ โดยใช้ขนาดของถ่านหิน 106 - 250 µm เวลา 4 ชม. ความเข้มข้นสารละลาย 1.00 M ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล. สารละลายอัตราการกวน 1000-1400 รอบ/นาทีในการทำปฏิกิริยาผลการทดลองพบว่าถ่านหินเมื่อผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชันที่อุณหภูมิ 80°-125°ซ มีสมบัติดังนี้ คือ

- ค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันรวม (% De-S) อยู่ในช่วง 26.32-37.19 โดยอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการทดลองคือ 125 °ซ สามารถลดปริมาณกำมะถันรวมได้มากที่สุดคือลดได้ร้อยละ 37.19

- ค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ (% De-pyrite) อยู่ในช่วง 35.54-57.85 โดยลดกำมะถันไพไรต์ได้สูงสุดเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิสูงสุดคือ 125 °ซ

- ค่าร้อยละของการลดปริมาณเถ้า (% De-ashing) อยู่ในช่วง 19.82-36.56 โดยลดปริมาณเถ้าได้มากที่สุด ที่อุณหภูมิสูงที่สุดคือ อุณหภูมิ 125 °ซ สามารถลดลงได้ร้อยละ 36.56

- ถ่านหินมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 2.01-4.11

นอกจากนี้ยังได้นำข้อมูลจากตารางที่ 4.8 ไปสร้างกราฟรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของ ค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันรวมร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ และร้อยละของการลดปริมาณเถ้ากับค่าอุณหภูมิผลที่ได้พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นการลดกำมะถันรวมและกำมะถันไพไรต์สูงขึ้น สำหรับปริมาณเถ้าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการลดปริมาณเถ้ากลับมีค่าน้อยลง แต่อย่างไรก็ตามก็สามารถลดเถ้าลงได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 19.82

4.3 การศึกษาการใช้ก๊าซออกซิเจนเข้าร่วมในปฏิกิริยาออกซิเดชัน

4.3.1 ศึกษาสมบัติของถ่านหินที่ผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชันเมื่อใช้ออกซิเจนทำปฏิกิริยาร่วมกับสารละลายเฟอริกซัลเฟตและสมบัติของสารละลายเฟอริกซัลเฟตที่มีการ regenerate

ในกรณีถ่านหิน ตารางที่ 4.9 แสดงคุณสมบัติของถ่านหินที่ผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชันที่ความดันออกซิเจนต่าง ๆ กันคือ 1.41, 2.82 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ใช้ขนาดถ่านหิน 106-250 µm อุณหภูมิ 100 °ซ เวลา 2 ชม. ความเข้มข้นสารละลาย 0.50M

ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล.สารละลาย อัตราการกวน 1,000-1,400 รอบ/นาที ในการทำปฏิกิริยาผลการทดลองพบว่าถ่านหินที่ผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชันโดยใช้สารละลายเฟอริกซัลเฟตและออกซิเจนที่ความดัน 0-2.82 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีสมบัติดังนี้คือ

- ค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันรวม (% De-S) อยู่ในช่วง 23.97-29.11 โดยสามารถลดปริมาณกำมะถันรวมได้มากที่สุด เมื่อใช้ความดันออกซิเจนสูงสุดในการทดลองคือ 2.82 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สามารถลดได้ร้อยละ 29.11
- ค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ (% De-pyrite) อยู่ในช่วง 43.88-56.12 โดยสามารถลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ได้มากที่สุด เมื่อใช้ความดันออกซิเจนสูงสุดในการทดลองคือ 2.82 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สามารถลดกำมะถันไพไรต์ได้ร้อยละ 56.12
- ค่าร้อยละของการลดปริมาณเถ้า (% De-ashing) อยู่ในช่วง 22.59 - 27.04
- ถ่านหินมีค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 9.99-17.98

นอกจากนี้ยังได้นำข้อมูลจากตารางที่ 4.9 สร้างกราฟรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันรวม ร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์และร้อยละของการลดปริมาณเถ้ากับค่าความดันออกซิเจน ผลที่ได้พบว่าเมื่อเพิ่มความดันของออกซิเจนที่ใช้ทำปฏิกิริยาให้สูงขึ้น สามารถลดปริมาณกำมะถันรวม และกำมะถันไพไรต์ได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.9 ยังแสดงสมบัติถ่านหินที่ผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชัน โดยใช้น้ำทำปฏิกิริยาพร้อมกับออกซิเจน (ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์) ที่ความดัน 2.82 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบว่าสามารถลดปริมาณกำมะถันรวมได้ร้อยละ 20.21 ลดกำมะถันไพไรต์ได้ร้อยละ 28.57 และลดเถ้าได้ร้อยละ 2.12 ซึ่งการลดของกำมะถันรวม กำมะถันไพไรต์ เถ้ามีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาที่ใช้สารละลายเฟอริกซัลเฟตอย่างเดียวทำปฏิกิริยา หรือใช้ทั้งสารละลายเฟอริกซัลเฟตกับออกซิเจนที่ความดัน 2.82 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทำปฏิกิริยา

จากการทดลองข้างต้นที่ศึกษาผลของออกซิเจน แสดงสมบัติถ่านหินในตารางที่ 4.9 สำหรับสารละลายจะแสดงสมบัติดังตารางที่ 4.12 พบว่าในตอนเริ่มแรก

ของการทำปฏิกิริยาสารละลายเฟอริกซัลเฟตมีปริมาณเหล็กในรูป Fe^{2+} ที่เป็นตัวทำปฏิกิริยากับกำมะถันไพไรต์เท่านั้น เมื่อทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง แล้วพบว่าจะมีปริมาณ Fe^{2+} ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้น แต่มีปริมาณน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ Fe^{3+} และจะเห็นว่าถ้าใช้ความดันออกซิเจนสูงขึ้นจะเกิดปริมาณ Fe^{2+} น้อยลง (จาก 0.58-0.48 กรัม/500 มล.) เพราะสารละลายที่ประกอบด้วยเกลือ ของ Fe^{2+} จะถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายโดยออกซิเจนกลายเป็นเกลือของ Fe^{3+} จึงเปรียบเหมือนการ regenerate สารละลาย ดังนั้นจึงสามารถทำให้สารละลายเฟอริกซัลเฟตหลังทำปฏิกิริยามีคุณภาพใกล้เคียงกับสารละลายเริ่มแรก (ค่า Fe^{3+} ไม่เปลี่ยนแปลง)

4.3.2 ศึกษาการลดปริมาณกำมะถันจากถ่านหินโดยใช้สารละลายใช้แล้วทำปฏิกิริยาร่วมกับออกซิเจน

การทดลองนี้จะพิจารณาถึงความสามารถในการขจัดกำมะถันของสารละลายเฟอริกซัลเฟตใช้แล้วที่มีการ regenerate ด้วยออกซิเจนตลอดเวลาการทดลอง โดยจะพิจารณาทั้งด้านที่เป็นของแข็งคือ ถ่านหินกับของเหลวคือสารละลายเฟอริกซัลเฟต

ในกรณีถ่านหิน ตารางที่ 4.10 แสดงสมบัติถ่านหินที่ผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชันโดยใช้สารละลายเฟอริกซัลเฟตที่ทำปฏิกิริยาแล้ว 1 ครั้ง 2 ครั้ง และ 3 ครั้ง นำกลับมาทำปฏิกิริยาใหม่กับถ่านหินโดยใช้ขนาดถ่านหิน 106-250 µm อุณหภูมิ 100°ซ เวลา 2 ชม. ความเข้มข้นสารละลาย 0.50 M ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล. สารละลาย อัตราการกวน 1000-1400 รอบ/นาที ความดันออกซิเจน 2.82 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในการทำปฏิกริยา ผลที่ได้ถ่านหินมีสมบัติดังนี้

- ค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันรวม (% De-S) อยู่ในช่วง 25.78-26.13 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าสมบัติของสารละลายที่ใช้แล้ว 1 ครั้ง, 2 ครั้ง และ 3 ครั้ง มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีเท่ากันในการทำปฏิกิริยากับกำมะถันในถ่านหิน

- ค่าร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ (% De-pyrite) อยู่ในช่วงที่สูงทั้งสามค่าสำหรับการใช้สารละลายที่ใช้แล้วคือ 60.19-68.93

- ค่าร้อยละของการลดปริมาณเถ้า %De-ashing อยู่ในช่วงที่ลดได้ไม่ต่ำกว่า 23.41

- ถ่านหินมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 11.24 - 28.17

ในกรณีสารละลายตารางที่ 4.13 แสดง สมบัติของสารละลายเฟอริกซัลเฟต ใช้แล้วจากการทำปฏิกิริยา 1 ครั้ง 2 ครั้ง และ 3 ครั้ง พบว่าปริมาณเหล็กในรูป Fe^{2+} ซึ่งเป็นผลที่ได้ จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของกำมะถันไพไรต์ มีค่าน้อยมาก (0.64-0.86 กรัม/500 มล) เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ Fe^{3+} (25.89 - 27.67 กรัม/500 มล.) ในสารละลาย อันเป็นผลเนื่องมาจากสารละลายมีการ regenerate ตลอดเวลาของการทำปฏิกิริยา แสดงว่าสารละลายใช้แล้วมี สมบัติเหมือนสารละลายเริ่มแรกจึงสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ตลอดเวลา

4.4 ผลขององค์ประกอบกำมะถันรูปอื่นในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ในการทดลองนี้ ใช้ถ่านหินที่ประกอบด้วยกำมะถันซัลเฟตกำมะถันอินทรีย์ในปริมาณสูงจากแหล่งเหมืองกระบี่และเหมืองแม่เมาะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารละลายเฟอริกซัลเฟตร่วมกับออกซิเจน ดังตารางที่ 4.11 แสดงสมบัติถ่านหินที่ผ่านกระบวนการ ดีซัลเฟอไรเซชัน โดยใช้ขนาดถ่านหิน 106-250μm อุณหภูมิ 100°ซ เวลา 2 ชม. ความเข้มข้นสารละลาย 0.50 M ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล. สารละลาย อัตราการกวน 1000-1400 รอบ/นาที ผลการทดลองพบว่า

ถ่านหินจากเหมืองกระบี่ที่มีปริมาณกำมะถันซัลเฟตประกอบอยู่สูง คือร้อยละ 2.83 กำมะถันไพไรต์ 0.68 และกำมะถันอินทรีย์ 1.72 สามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายเฟอริกซัลเฟตและออกซิเจนทำให้ปริมาณกำมะถันรวมลดลงได้ร้อยละ 43.22 ปริมาณกำมะถันไพไรต์ลดลงร้อยละ 61.43 และปริมาณเถ้าลดลงร้อยละ 34.28 กล่าวได้ว่าการลดปริมาณกำมะถันรวมส่วนใหญ่เกิดจาก

1. การลดปริมาณกำมะถันซัลเฟตคือ ลดลงร้อยละ 87.28 โดยเกิดจากการที่น้ำสามารถละลายกำมะถันซัลเฟต

2. การลดปริมาณของกำมะถันไพไรต์โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ถ่านหินจากเหมืองแม่เมาะที่มีปริมาณกำมะถันซัลเฟตสูงถึงร้อยละ 2.30 กำมะถันไพไรต์ 0.25 และกำมะถันอินทรีย์ 1.66 สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารละลายเฟอริกซัลเฟตและออกซิเจน ทำให้ปริมาณกำมะถันรวมลดลงได้ร้อยละ 51.17 ซึ่งเกิดจากการที่น้ำสามารถละลายกำมะถันซัลเฟต ทำให้กำมะถันซัลเฟตลดลงร้อยละ 91.74 ส่วนกำมะถันไพไรต์ลดลงในปริมาณน้อยมากคือร้อยละ 11.54 เนื่องมาจากการที่ถ่านหินเริ่มต้นมีกำมะถันไพไรต์ประกอบอยู่ในปริมาณน้อย

สรุปได้ว่าถ่านหินที่ประกอบด้วยกำมะถันซัลเฟตสูงจะสามารถลดปริมาณกำมะถันได้ง่ายในสารละลายทั่ว ๆ ไปที่มีน้ำประกอบอยู่ ส่วนการลดกำมะถันไพไรต์นั้นถ่านหินที่มีกำมะถันไพไรต์ประกอบอยู่สูง จะสามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารละลายเฟอริกซัลเฟตและออกซิเจนได้ดีกว่าถ่านหินที่ประกอบด้วยกำมะถันไพไรต์ในปริมาณต่ำหรือกล่าวได้ว่าปริมาณกำมะถันไพไรต์ของถ่านหินมีผลต่อการลดปริมาณกำมะถันโดยปฏิกริยาออกซิเดชัน

ถ่านหินจากเหมืองแม่เมาะที่มีปริมาณกำมะถันอินทรีย์ประกอบอยู่สูงคือร้อยละ 1.78 กำมะถันไพไรต์ 0.21 กำมะถันซัลเฟต 0.47 เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วสามารถลดปริมาณกำมะถันรวมได้เพียงร้อยละ 15.38 ซึ่งเกิดจากลดปริมาณกำมะถันซัลเฟตเป็นส่วนใหญ่คือลดได้ร้อยละ 57.45 และไม่มีการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ เนื่องจากปริมาณกำมะถันไพไรต์เริ่มต้นมีค่าน้อยมากสำหรับถ่านหินนี้ ซึ่งมีกำมะถันอินทรีย์สูง จากถ่านหินทั้ง 3 ตัวอย่างใช้สารละลายเฟอริกซัลเฟตกับออกซิเจนการลดกำมะถันอินทรีย์น้อย เมื่อเทียบกับการลดกำมะถันซัลเฟตและกำมะถันไพไรต์ ซึ่งสนับสนุนปฏิกริยาออกซิเดชันของกำมะถันไพไรต์

จากการทดลองวิเคราะห์ผลได้ว่า

ก. แหล่งถ่านหินที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาคือ แหล่งแม่เมาะจังหวัดลำปาง ใช้ถ่านหินจุดที่ 11 และจุดที่ 4 ที่มีปริมาณกำมะถันไพไรต์ที่ประกอบอยู่สูง ซึ่งเก็บตัวอย่างมาจุดละ 6 กิโลกรัม มาบดให้ละเอียดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเพื่อให้ได้ขนาดที่ต้องการคือ 106-250 μm แล้วเก็บรวบรวมไว้ เวลาที่จะทดลองจะสุ่มตัวอย่างโดยนำออกมา 50 กรัม เพื่อใช้ทำปฏิกิริยา และแต่ละการทดลองจะวิเคราะห์ผลของถ่านหินเริ่มต้นพร้อมกับถ่านหินที่ทำปฏิกิริยาแล้วเสมอ เพื่อให้อยู่ในสภาวะเหมือนกัน (ในด้านการวิเคราะห์ผล) เพื่อต้องการให้ผลต่างของการวิเคราะห์ผลถ่านหินเริ่มต้นกับถ่านหินที่ทำปฏิกิริยาแล้วมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุด

ข. สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาพบว่า ความเข้มข้นของสารละลาย เวลา ปริมาณถ่านหินที่ใช้และอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มสูงขึ้นแต่ไม่เกิน 1M ปริมาณถ่านหินที่ใช้จำนวนน้อย เวลา และอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ทำให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกำมะถันไพไรต์เกิดดีขึ้น ซึ่งทำให้ร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันไพไรต์เพิ่มขึ้น จึงเป็นเหตุให้ร้อยละของการลดปริมาณกำมะถันรวมเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนร้อยละของการลดปริมาณเถ้านั้นน่าจะเพิ่มขึ้นตามการลดของกำมะถันไพไรต์ซึ่งถ้ากำมะถันไพไรต์ลดลงมาก ปริมาณเถ้าก็น่าจะลดลงมากตามไปด้วย เพราะกำมะถันไพไรต์ก็ถือว่าเป็นเถ้าชนิดหนึ่ง(เพราะมีเหล็กประกอบอยู่) แต่จากการทดลองพบว่าไม่เป็นไปตามนี้เข้าใจว่ามีสาเหตุจาก ขณะที่ทำการล้างถ่านหินด้วยน้ำร้อน ให้น้ำล้างมีสมบัติเป็นกลางไม่ได้ทำการกรองเพียงแต่ใช้วิธีการเทน้ำล้างจากภาชนะที่ใช้ล้างทิ้ง (เพราะพิจารณาเน้นถึงการล้างให้หมดปริมาณกำมะถันที่มีในถ่านหิน) ทำให้ปริมาณเถ้าที่รวมอยู่กับถ่านหินติดมากับน้ำล้างจึงเป็นสาเหตุให้เถ้าที่เหลืออยู่ผิดไปจากค่าที่เป็นจริง ส่วนอัตราการกวนพบว่าถ้าอยู่ในช่วงความเร็ว 700 รอบ/นาที ขึ้นไปจะไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกำมะถันไพไรต์เลย

ค. การใช้ออกซิเจนร่วมทำปฏิกิริยาพบว่าสารละลายมีการ regenerate ตลอดเวลา ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้โดยการใช้สารละลายใช้แล้วมาทดลองหลาย ๆ ครั้ง จะให้ผลเช่นเดียวกับการใช้สารละลายเริ่มต้นทำปฏิกิริยา คือสามารถลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ กำมะถันรวมได้ใกล้เคียงกันมาก นอกจากนี้ในการใช้ออกซิเจนเข้าร่วมทำปฏิกิริยายังมีผลทำให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันดีขึ้นคือ เมื่อลดค่าความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกซัลเฟต (จาก 1M เป็น 0.50M) ลดระยะเวลา (จาก 4 ชม. เป็น 2 ชม) สามารถลดปริมาณกำมะถันรวมได้เช่นเดียวกันกับเมื่อใช้สารละลายเฟอริกซัลเฟตทำปฏิกิริยาคือ ลดได้ปริมาณร้อยละ 30 เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย 1M เวลา 4 ชม. ทำปฏิกิริยาโดยไม่รวมออกซิเจน

ตารางที่ 4.1 สมบัติถ่านหิน (แบบไม่รวมความชื้น) จากจุดต่าง ๆ เหมืองหวายเล็ก, เหมืองบางปูดำ จังหวัดกระบี่, เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

สมบัติ	เหมืองหวายเล็ก	หลุมเจาะ1911 เหมืองหวายเล็ก	หลุมเจาะ1910 ระดับ 101-108 เมตร เหมืองหวายเล็ก	หลุมเจาะ1906 ระดับ55-69 เมตร เหมืองหวายเล็ก	หลุมเจาะ1909 ระดับ 42 เมตร เหมืองหวายเล็ก	เหมืองแม่เมาะ	เหมืองบางปูดำ
การวิเคราะห์โดยประมาณ (%)							
เถ้า	41.46	62.95	20,74	42.68	24.46	23.01	29.80
สารระเหย	31.52	66.88	25.50	31,25	18.67	34.53	34.05
คาร์บอนคงตัว	68.48	33.12	74.50	68,75	81.33	65.46	65.95
กำมะถันรวม (%)	4.50	2.48	7.46	6.77	7.12	4,07	3.88
กำมะถันไพไรต์	1.14	0.85	2,24	1,80	3.00	1.31	0.55
กำมะถันอินทรีย์	3.06	1,25	4,52	4.79	4,06	2,06	2.20
กำมะถันซัลเฟต	0.30	0.38	0,96	0.17	0.06	0.69	1.13

ตารางที่ 4.2 สมบัติถ่านหิน (แบบไม่รวมความชื้น) 12 จุดจากเหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

สมบัติ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	จุดที่ 9	จุดที่ 10	จุดที่ 11	จุดที่ 12
การวิเคราะห์โดยประมาณ (%)												
เถ้า	9.41	15.90	8.16	23.97	15.82	11.55	8.95	16.33	11.37	9.69	13.33	10.68
สารระเหย	53.13	48.76	47.41	40.62	53.82	41.49	48.35	50.20	41.07	46.31	46.12	49.18
คาร์บอนคงตัว	46.87	51.24	52.59	59.38	46.18	58.51	51.65	49.80	58.93	53.69	53.88	50.82
กำมะถันรวม (%)	2.75	2.39	2.52	3.03	3.63	2.51	1.31	2.18	2.32	2.00	2.75	1.54
กำมะถันไพไรต์	0.93	0.80	0.37	1.06	0.63	0.31	0.22	0.81	0.98	0.72	1.52	0.46
กำมะถันอินทรีย์	1.55	1.31	1.93	1.73	1.30	1.67	1.09	1.09	1.18	1.21	1.10	1.08
กำมะถันซัลเฟต	0.27	0.28	0.22	0.24	1.69	0.53	0.00	0.28	0.16	0.06	0.13	0.00

หมายเหตุ เก็บตัวอย่างถ่านหิน 12 จุดซึ่งมีระยะห่างกันประมาณ 50 เมตร จากบริเวณสูงสุดถึงบริเวณต่ำสุดของเหมือง

ตารางที่ 4.3 สมบัติถ่านหิน (แบบไม่รวมความชื้น) ที่ผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชัน ที่ความเข้มข้นสารละลายต่าง ๆ (ขนาดถ่านหิน 106-250 µm อุณหภูมิ 100°ซ เวลา 2 ชม., อัตราการกวน 1,000-1,400 รอบ/นาที ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล.สารละลาย ความชื้นถ่านหินเริ่มต้น = 24.44%)

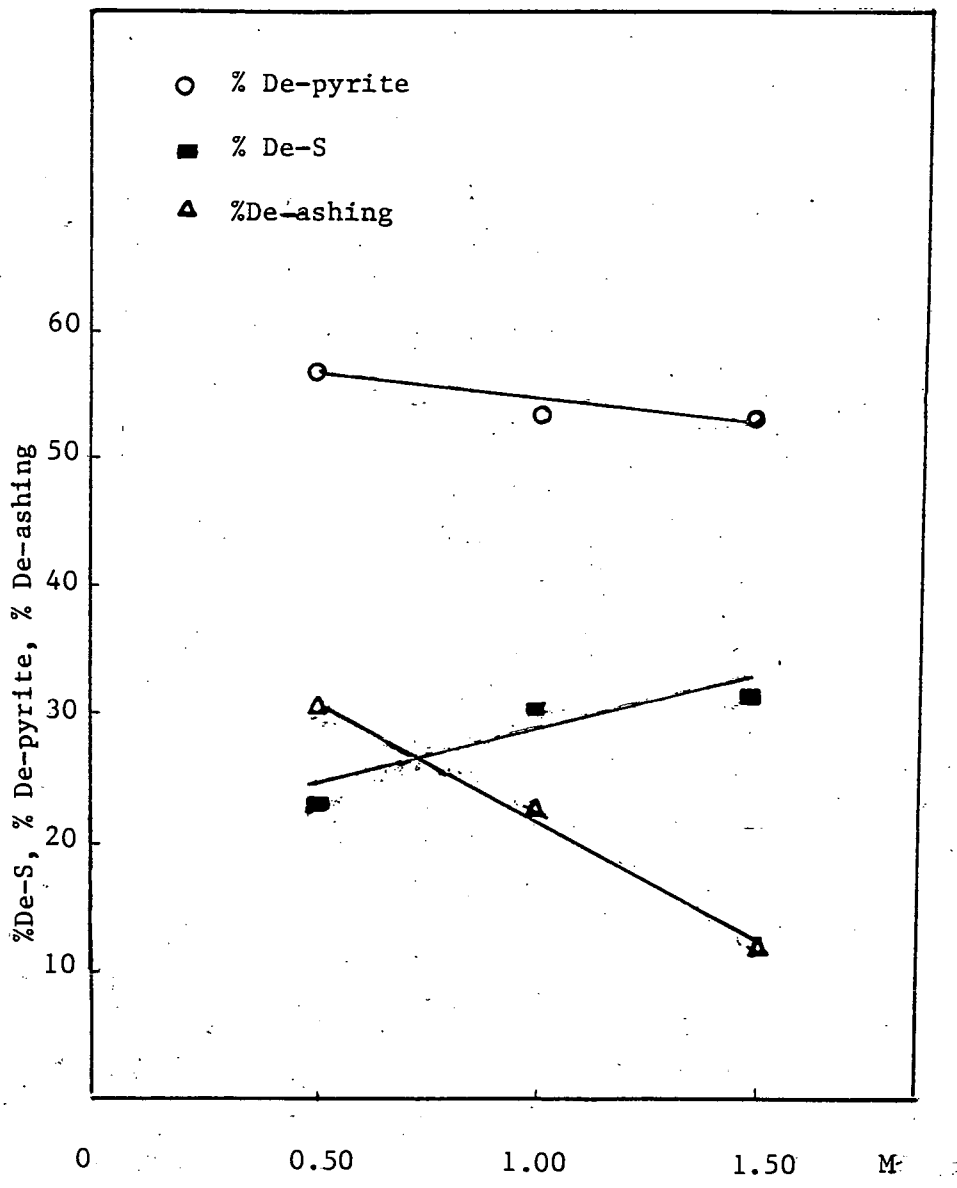
สมบัติ	เริ่มต้น	ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกซัลเฟต (M)			
		0.50	0.75	1.00	1.50
การวิเคราะห์โดยประมาณ(%)					
เถ้า	17.46	14.20	14.69	13.04	13.49
สารระเหย	38.49	45.74	44.41	46.71	44.70
คาร์บอนคงตัว	61.51	54.26	55.58	53.29	55.30
ค่าความร้อน(แคลอรี่/กรัม)	4961	5648	5412	5550	5503
กำมะถันรวม (%)	2.75	2.12	2.08	2.02	2.02
กำมะถันไพไรต์	1.23	0.78	0.78	0.73	0.76
กำมะถันอินทรีย์	1.26	1.18	1.18	1.15	1.16
กำมะถันซัลเฟต	0.26	0 15	0.12	0.14	0.10
% De-S	-	22.91	24.36	26.55	26.55
% De-pyrite	-	36.59	36.59	40.65	38.21
% De-ashing	-	18.67	15.86	25.32	22.74

หมายเหตุ ถ่านหินจุดที่ 11 เหมืองแม่เมาะจังหวัดลำปาง

ตารางที่ 4.4 สมบัติถ่านหิน (แบบไม่รวมความชื้น) ที่ผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชัน ที่ความเข้มข้นสารละลายต่าง ๆ (ขนาดถ่านหิน 106-250 μm อุณหภูมิ 100°ซ เวลา 4 ชม., อัตราการกวน 1,000-1,400 รอบ/นาที ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล. สารละลาย ความชื้นถ่านหินเริ่มต้น = 19.75%)

สมบัติ	เริ่มต้น	ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกซัลเฟต (M)		
		0.50	1.00	1.50
การวิเคราะห์โดยประมาณ (%)				
เถ้า	29.51	21.00	23.05	26.11
สารระเหย	28.71	33.13	31.59	31.67
คาร์บอนคงตัว	41.78	45.86	45.36	42.21
ค่าความร้อน (แคลอรี่/กรัม)	5065	5287	5339	5422
กำมะถันรวม (%)	3.08	2.39	2.18	2.15
กำมะถันไพไรต์	1.09	0.50	0.53	0.53
กำมะถันอินทรีย์	1.60	1.61	1.57	1.53
กำมะถันซัลเฟต	0.39	0.08	0.08	0.09
% De-S	-	22.40	29.22	30.19
% De-Pyrite	-	54.13	51.38	51.38
% De-ashing	-	28.80	21.84	11.52

หมายเหตุ ถ่านหินจุดที่ 4 เหมืองแม่เมาะจังหวัดลำปาง

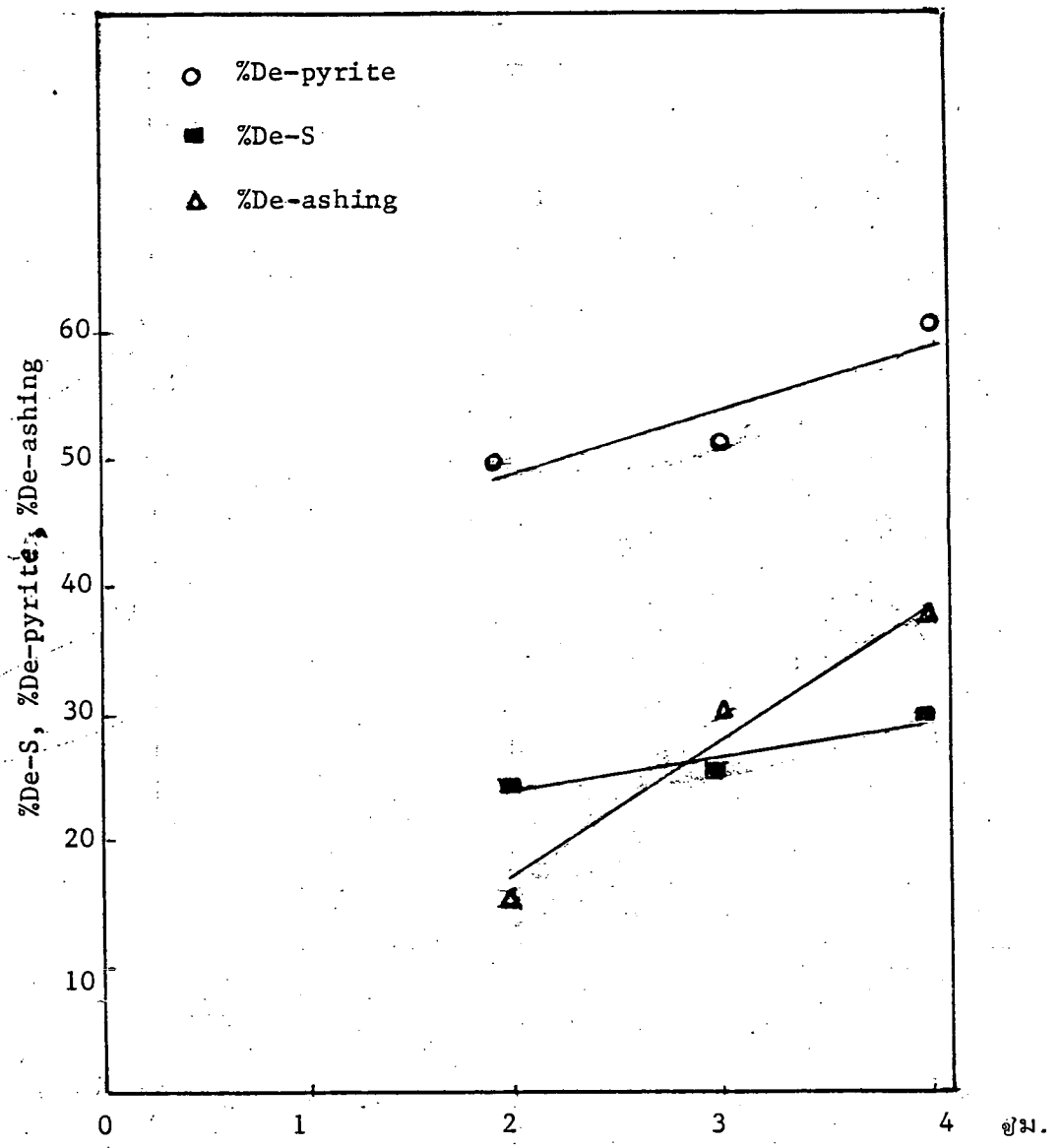


รูปที่ 4.1 ผลของความเข้มข้นที่มีต่อ % De-S, %De-pyrite และ De-ashing (ขนาดถ่านหิน 106-250 µm อุณหภูมิ 100°ซ, เวลา 4 ชม., อัตราการกวน 1,000-1,400 รอบ/นาที ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล. สารละลาย ความชื้นถ่านหินเริ่มต้น = 19.75%)

ตารางที่ 4.5 สมบัติถ่านหิน (แบบไม่รวมความชื้น) ที่ผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชันที่เวลาต่าง ๆ (ขนาดถ่านหิน 106-250 μm อุณหภูมิ 100°ซ อัตราการกวน 1,000-1,400 รอบ/นาที ความเข้มข้นสารละลาย 1.00 M ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล.สารละลาย ความชื้นถ่านหินเริ่มต้น = 24.02%)

สมบัติ	เริ่มต้น	เวลา (ชม.)		
		2	3	4
การวิเคราะห์โดยประมาณ (%)				
เถ้า	14.32	12.18	10.23	9.03
สารระเหย	29.88	32.55	28.46	36.31
คาร์บอนคงตัว	55.80	55.28	61.25	54.66
ค่าความร้อน (แคลอรี่/กรัม)	5286	5720	6125	6448
กำมะถันรวม (%)	2.84	2.17	2.12	2.01
กำมะถันไพไรต์	1.17	0.60	0.58	0.47
กำมะถันอินทรีย์	1.33	1.45	1.42	1.42
กำมะถันซัลเฟต	0.34	0.12	0.12	0.12
% De-S	-	23.59	25.35	29.22
% De-pyrite	-	48.72	50.43	59.83
% De-ashing	-	14.94	28.56	36.94

หมายเหตุ ถ่านหินจุดที่ 11 เหมืองแม่เมาะจังหวัดลำปาง



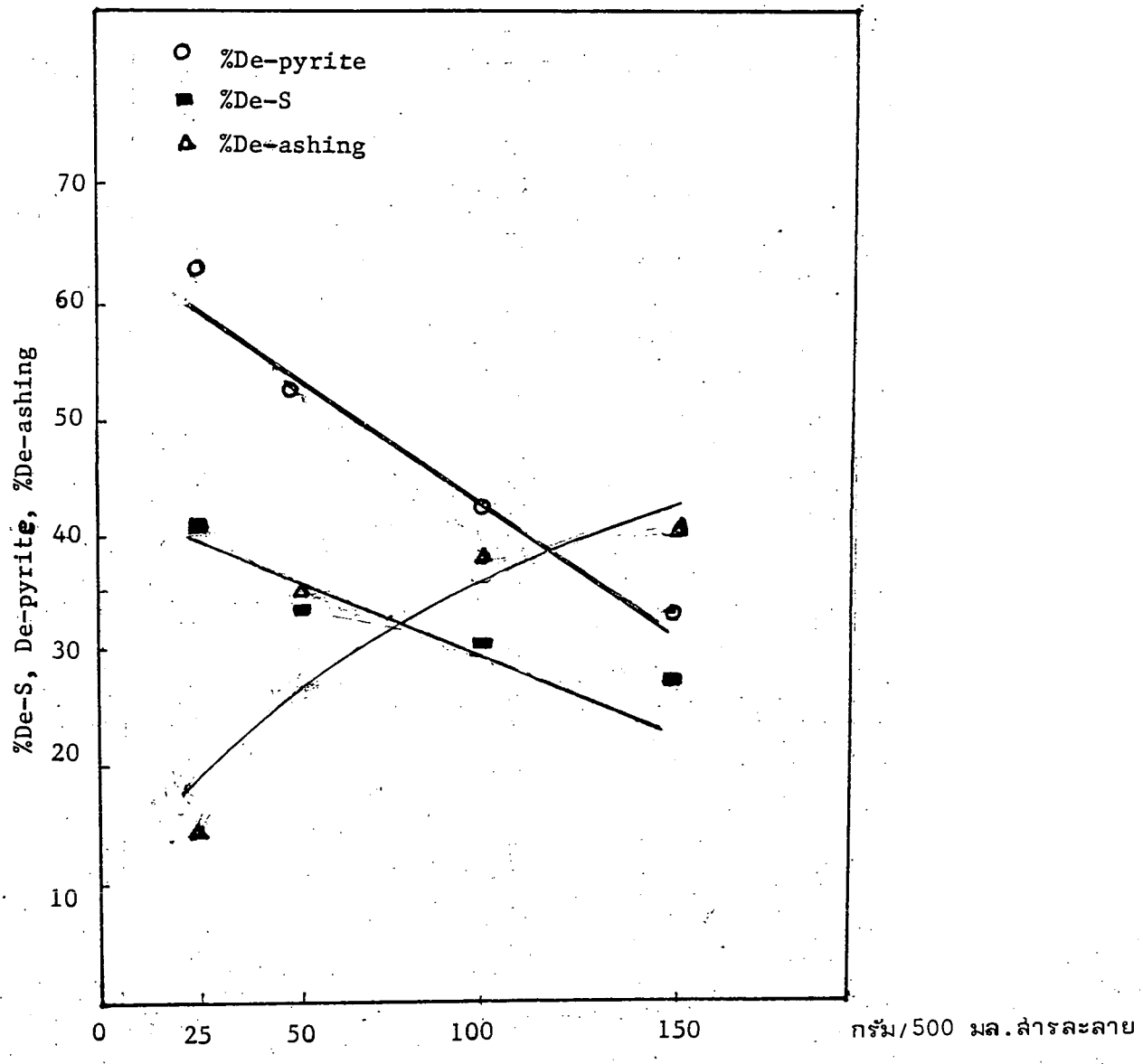
รูปที่ 4.2 ผลของเวลาที่มีต่อ %De-S, %De-pyrite และ De-ashing (ขนาดถ่านหิน 106-250 μm อุณหภูมิ 100°ซ, อัตราการกวน 1000-1400 รอบ/นาที, ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล. ตัวทำละลาย, ความเข้มข้น 1.00 M ความชื้นถ่านหินเริ่มต้น = 24.02%)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 สมบัติถ่านหิน (แบบไม่รวมความชื้น) ที่ผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชั่น โดยใช้ปริมาณถ่านหินต่าง ๆ (ขนาดถ่านหิน 106-250 um อุณหภูมิ 100 °ซ, เวลา 4 ชม. อัตราการกวน 1000-1400 รอบ/นาที ความเข้มข้นสารละลาย 1.00M ความชื้นถ่านหินเริ่มต้น = 10.27%)

สมบัติ	เริ่มต้น	ปริมาณถ่านหิน (กรัม/500 มล.)			
		25	50	100	150
การวิเคราะห์โดยประมาณ (%)					
เถ้า	12.58	10.74	7.93	7.90	7.63
สารระเหย	37.04	39.68	40.79	39.58	40.85
คาร์บอนคงตัว	50.37	49.58	51.28	52.52	51.44
ค่าความร้อน (แคลอรี่/กรัม)	4967	5246	5394	5421	5570
กำมะถันรวม (%)	2.80	1.73	1.86	1.96	2.07
กำมะถันไพไรต์	1.30	0.51	0.64	0.77	0.88
กำมะถันอินทรีย์	1.32	1.12	1.15	1.14	1.11
กำมะถันซัลเฟต	0.18	0.10	0.07	0.05	0.08
% De-S	-	38.21	33.57	30.00	26.07
% De-pyrite	-	60.77	50.77	40.77	32.31
% De-ashing	-	14.62	36.91	37.20	39.35

หมายเหตุ ถ่านหินจุดที่ 11 เหมืองแม่เมาะจังหวัดลำปาง



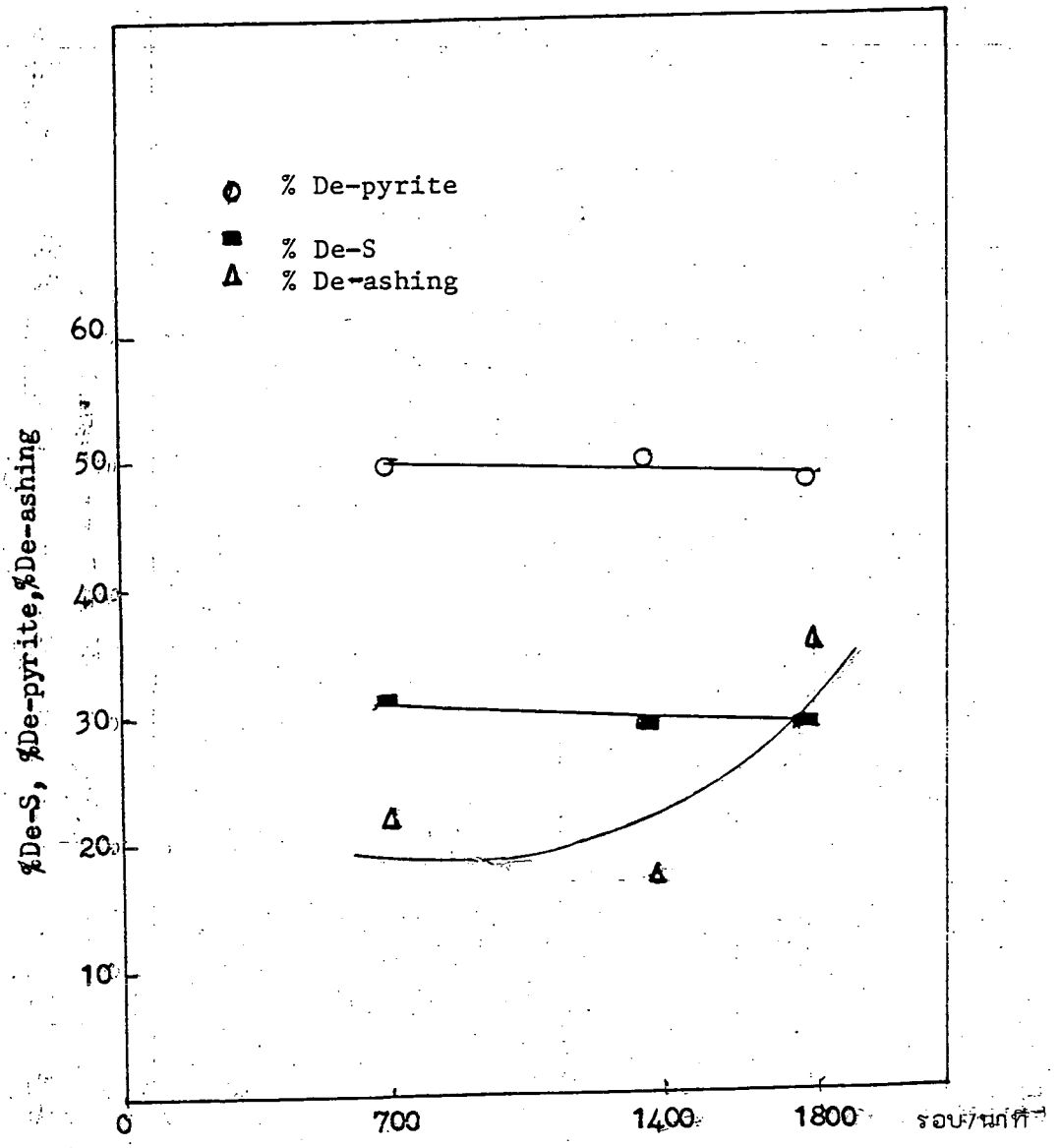
รูปที่ 4.3 ผลของปริมาณถ่านหินที่มีต่อ %De-S, %De-pyrite และ %De-ashing (ขนาดถ่านหิน 106-250 µm อุณหภูมิ 100°ซ อัตราการกวน 1000-1400 รอบ/นาที เวลา 4 ชม. ความเข้มข้น 1.00 M ความชื้นถ่านหินเริ่มต้น = 10.27%)

ตารางที่ 4.7 สมบัติถ่านหิน (แบบไม่รวมความชื้น) ที่ผ่านกระบวนการดีซัลเฟไรเซชันที่อัตราการกวนต่าง

(ขนาดถ่านหิน 106-250μm อุณหภูมิ 100°ซ เวลา 4 ชม. ความเข้มข้น
สารละลาย 1.00 M ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล. สารละลาย
ความชื้นถ่านหินเริ่มต้น = 7.76%)

สมบัติ	เริ่มต้น	อัตราการกวน (รอบ/นาที)		
		700	1,400	1,800
การวิเคราะห์โดยประมาณ(%)				
เถ้า	13.76	10.85	11.38	8.90
สารระเหย	42.60	48.38	45.79	50.29
คาร์บอนคงตัว	43.67	40.77	42.83	40.80
ค่าความร้อน(แคลอรี่/กรัม)	4506	5139	5289	4957
กำมะถันรวม (%)	2.61	1.82	1.88	1.88
กำมะถันไพไรต์	1.16	0.60	0.60	0.61
กำมะถันอินทรีย์	1.21	1.11	1.18	1.18
กำมะถันซัลเฟต	0.24	0.11	0.10	0.09
% De-S	-	30.27	28.00	28.00
%De-pyrite	-	48.28	48.28	47.41
% De-ashing	-	21.15	17.30	35.32

หมายเหตุ ถ่านหินคุดที่ 11 เหมืองแม่เมาะจังหวัดลำปาง

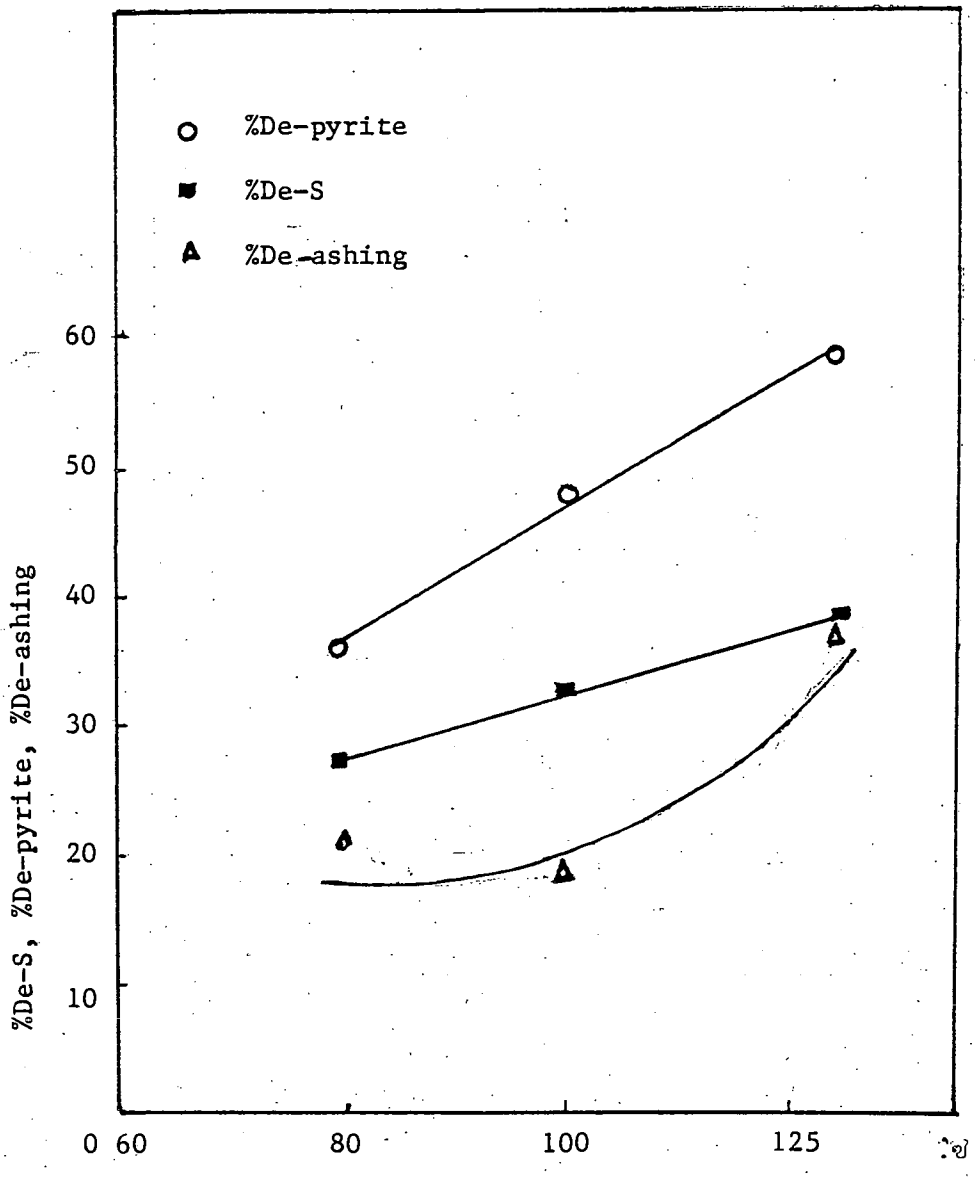


รูปที่ 4.4 ผลของอัตราการกวนที่มีต่อ % De-S, %De-pyrite และ De-ashing (ขนาดถ่านหิน 106-250 µm อุณหภูมิ 100°ซ, เวลา 4 ชม., ความเข้มข้น 1.00 M ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล. ลำรละลาย ความชื้นถ่านหินเริ่มต้น = 7.76%)

ตารางที่ 4.8 สมบัติถ่านหิน (แบบไม่รวมความชื้น) ที่ผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชัน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ขนาดถ่านหิน 106-250 μm เวลา 4 ชม. ความเข้มข้นสารละลาย 1.00 M ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล. สารละลาย อัตราการกวน 1000-1400 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหินเริ่มต้น = 15.55%)

สมบัติ	เริ่มต้น	อุณหภูมิ (°ซ)		
		80	100	125
การวิเคราะห์โดยประมาณ (%)				
เถ้า	13.62	10.92	11.24	8.64
สารระเหย	39.03	46.50	39.15	45.57
คาร์บอนคงตัว	47.99	42.58	49.62	45.79
ค่าความร้อน (แคลอรี่/กรัม)	5615	5806	5728	5846
กำมะถันรวม (%)	2.85	2.10	1.94	1.79
กำมะถันไพไรต์	1.21	0.78	0.65	0.51
กำมะถันอินทรีย์	1.26	1.16	1.14	1.10
กำมะถันซัลเฟต	0.38	0.16	0.15	0.18
% De-S	-	26.32	31.93	37.19
% De-pyrite	-	35.54	46.28	57.85
% De-ashing	-	19.52	17.47	36.56

หมายเหตุ ถ่านหินลุดที่ 11 เหมืองแม่เมาะจังหวัดลำปาง

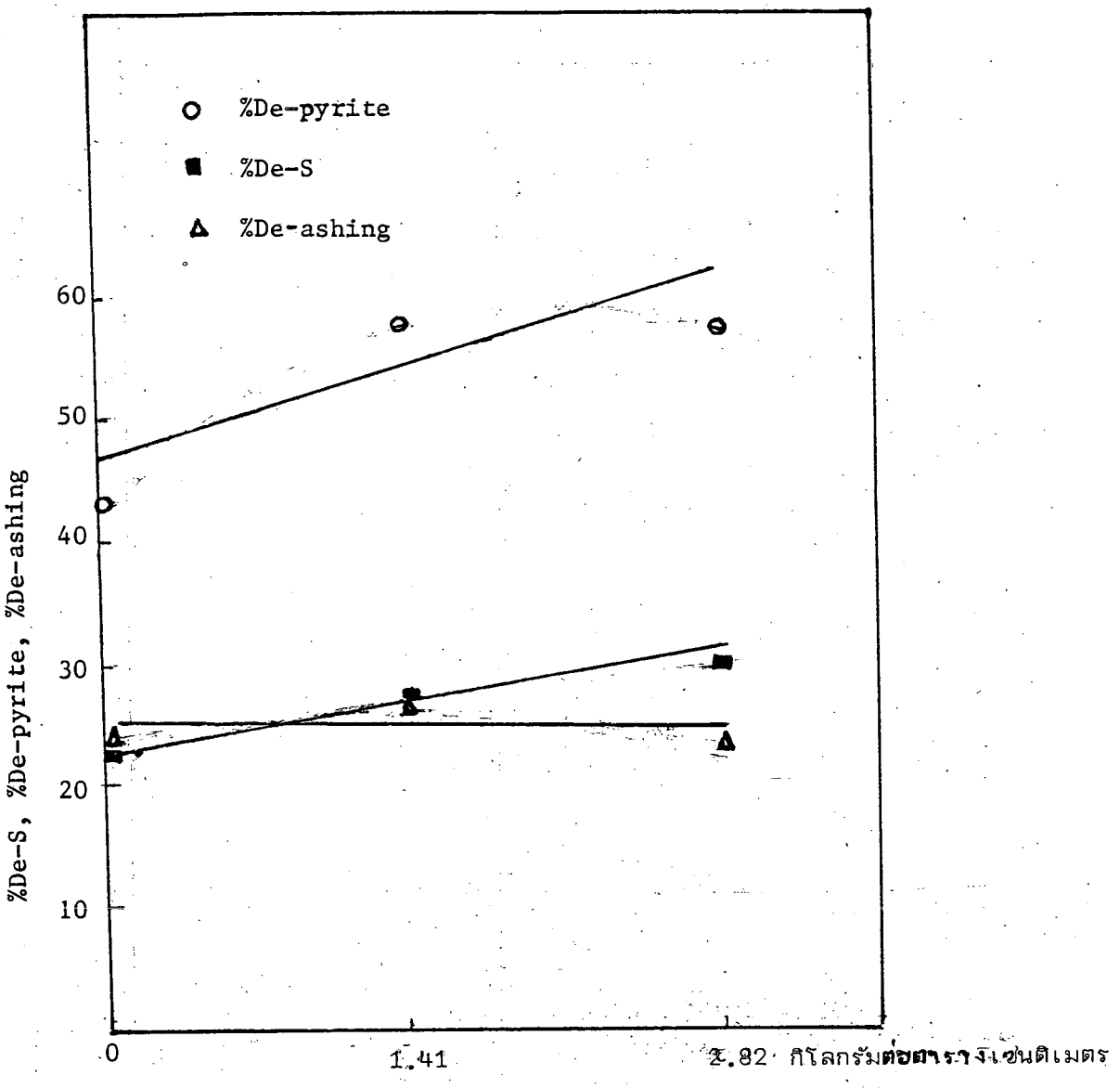


รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ %De-S, %De-pyrite และ %De-ashing (ขนาดถ่านหิน 106-250 μm เวลา 4 ชม. ความเข้มข้น 1.00 M ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล. สารละลาย อัตราการกวน 1,000-1,400 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหินเริ่มต้น = 15.55%)

ตารางที่ 4.9 สมบัติถ่านหิน (แบบไม่รวมความชื้น) ที่ผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชัน เมื่อใช้ออกซิเจน (ขนาดถ่านหิน 106-250 µm อุณหภูมิ 100 °ซ, เวลา 2 ชม. ความเข้มข้นสารละลาย 0.50 M ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล. สารละลาย อัตราการกวน 1000-1400 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหินเริ่มต้น = 4.94%)

สมบัติ	เริ่มต้น	สารละลายเฟอริกซัลเฟต ความดันออกซิเจน (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			น้ำ ความดันกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
		0	1.41	2.82	2.82
การวิเคราะห์โดยประมาณ (%)					
เถ้า	28.29	21.62	20.64	21.90	27.69
สารระเหย	29.64	34.53	33.67	34.31	36.85
คาร์บอนคงตัว	42.06	43.85	45.69	43.79	35.46
ค่าความร้อน (แคลอรี่/กรัม)	4521	4973	5334	5121	5560
กำมะถันรวม (%)	2.92	2.22	2.12	2.07	2.33
กำมะถันไพไรต์	0.98	0.55	0.43	0.43	0.70
กำมะถันอินทรีย์	1.57	1.58	1.58	1.64	1.63
กำมะถันซัลเฟต	0.37	0.09	0.11	0.00	0.00
% De-S	-	23.97	27.39	29.11	20.21
% De-pyrite	-	43.88	56.12	56.12	28.57
% De-ashing	-	23.58	27.04	22.59	2.12

หมายเหตุ ถ่านหินจุดที่ 4 เหมืองแม่เมาะจังหวัดลำปาง



รูปที่ 4.6 ผลของความดันออกซิเจนที่มีต่อ % De-S, %De-pyrite, %De-ashing (ขนาดถ่านหิน 106-250 μm อุณหภูมิ 100°ซ, เวลา 2 ชม. ความเข้มข้น 0.50 M ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล. สารละลาย อัตราการกวน 1,000-1,400 รอบ/นาที ความชื้นถ่านหินเริ่มต้น = 4.94%)

ตารางที่ 4.10 สมบัติถ่านหิน (แบบไม่รวมความชื้น) ที่ผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชัน เมื่อใช้สารละลายเฟอริกซัลเฟตใช้แล้วทำปฏิกิริยา (ขนาดถ่านหิน 106-250 µm อุณหภูมิ 100°ซ เวลา 2 ชม. ความเข้มข้นสารละลาย 0.50 M ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล.สารละลาย อัตราการกวน 1000-1400 รอบ/นาที ความดันออกซิเจน 2.82 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความชื้นถ่านหินเริ่มต้น = 4.19%)

	เริ่มต้น	สารละลายที่ใช้แล้ว		
		1 ครั้ง	2 ครั้ง	3 ครั้ง
การวิเคราะห์โดยปริมาณ(%)				
เถ้า	38.15	29.22	27.76	18.03
สารระเหย	30.80	37.21	35.84	40.72
คาร์บอนคงตัว	31.05	31.52	36.20	41.25
ค่าความร้อน(แคลอรี่/กรัม)	4956	5513	5522	6352
กำมะถันรวม (%)	2.87	2.12	2.13	2.13
กำมะถันไพไรต์	1.03	0.41	0.32	0.41
กำมะถันอินทรีย์	1.40	1.54	1.65	1.55
กำมะถันซัลเฟต	0.44	0.17	0.16	0.17
% De-S	-	26.13	25.78	25.78
% De-pyrite	-	60.19	68.93	60.19
% De-ashing	-	23.41	26.71	52.74

หมายเหตุ ถ่านหินจุดที่ 4 เหมืองแม่ เมาะจังหวัดลำปาง

ตารางที่ 4.11 สมบัติถ่านหิน (แบบไม่รวมความชื้น) ที่ผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชันโดยการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบกำมะถันในถ่านหิน (ขนาดถ่านหิน 106-250 µm อุณหภูมิ 100°ซ เวลา 2 ชม. ความเข้มข้นสารละลาย 0.50 M ปริมาณถ่านหิน 50 กรัม/500 มล. สารละลาย อัตราการกวน 1000-1400 รอบ/นาที ความดันออกซิเจน 2.82 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

	ถ่านหินบางปูดำ (กระบี่)[1]		ถ่านหินแม่เมาะ[2]		ถ่านหินแม่แมะ[3]	
	เริ่มต้น	หลัง[4]	เริ่มต้น	หลัง	เริ่มต้น	หลัง
การวิเคราะห์โดยประมาณ (%)						
เถ้า	29.23	19.21	18.76	12.94	8.17	8.27
สารระเหย	35.66	39.70	40.95	41.91	41.04	44.82
คาร์บอนคงตัว	35.11	41.09	40.29	45.16	50.78	46.84
ค่าความร้อน (แคลอรี่/กรัม)	3585	4663	4587	5199	4978	5502
กำมะถันรวม (%)	5.25	2.98	4.26	2.08	2.47	2.09
กำมะถันไพไรต์	0.68	0.26	0.25	0.22	0.21	0.29
กำมะถันอินทรีย์	1.72	2.35	1.70	1.66	1.78	1.59
กำมะถันซัลเฟต	2.83	0.36	2.30	0.19	0.47	0.20
% De-S	-	43.22	-	51.17	-	15.38
% De-pyrite	-	61.43	-	11.54	-	0.00
% De-ashing	-	34.28	-	31.02	-	0.00

หมายเหตุ

1. ถ่านหินบางปูดำ (กระบี่) ปริมาณกำมะถันซัลเฟตสูง ความชื้นถ่านหินเริ่มต้น = 3.21%
2. ถ่านหินแม่เมาะจังหวัดลำปาง จุดที่ 5 ปริมาณกำมะถันซัลเฟตสูง ความชื้นถ่านหินเริ่มต้น = 3.20%
3. ถ่านหินแม่เมาะจังหวัดลำปาง จุดที่ 3 ปริมาณกำมะถันอินทรีย์สูง ความชื้นถ่านหินเริ่มต้น = 3.71%
4. ภายหลังดีซัลเฟอไรเซชัน

ตารางที่ 4.12 ปริมาณ Fe^{3+} และ Fe^{2+} ในสารละลายเฟอริกซัลเฟตที่ผ่านกระบวนการดีซัลเฟอไรเซชันเมื่อใช้ออกซิเจน (ความเข้มข้นสารละลาย 0.50 M เวลา 2 ชม.)

		ความเข้มข้น $Fe^{3+}+Fe^{2+}$ (กรัม/500 มล.)	ความเข้มข้น Fe^{2+} (กรัม/500 มล.)	ความเข้มข้น Fe^{3+} (กรัม/500 มล.)
สารละลายเริ่มต้น	1	24.87	0.00	24.87
	2	24.75	0.00	24.75
1.41 กิโลกรัมต่อตาราง	1	29.50	0.58	28.92
เซนติเมตร	2	29.50	0.58	28.92
2.82 กิโลกรัมต่อตาราง	1	33.00	0.48	32.52
เซนติเมตร	2	32.75	0.48	32.27

ตารางที่ 4.13 ปริมาณ Fe^{3+} และ Fe^{2+} ของสารละลายเฟอริกซัลเฟตเมื่อใช้สารละลายใช้แล้ว ทำปฏิกิริยาร่วมกับออกซิเจน

	ความเข้มข้น $Fe^{3+}+Fe^{2+}$ (กรัม/500 มล.)	ความเข้มข้น Fe^{3+} (กรัม/500 มล.)	ความเข้มข้น Fe^{3+} (กรัม/500 มล.)
สารละลายเริ่มต้น	26.75	0.86	25.89
สารละลายใช้แล้ว 1 ครั้ง	27.75	0.83	26.92
สารละลายใช้แล้ว 2 ครั้ง	28.25	0.58	24.64
สารละลายใช้แล้ว 3 ครั้ง	23.75	0.64	27.11