

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การปรับปรุงคุณภาพถ่านหินเป็นสิ่งที่จำเป็นมากในปัจจุบัน ทั้งนี้เพราะกำมะถันในถ่านหินเป็นตัวก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษในอากาศ การศึกษาพัฒนาการนำถ่านหินมาใช้ในงานจึงมุ่งเน้นศึกษาในการขจัดกำมะถันในถ่านหิน งานวิจัยนี้เป็นการขจัดกำมะถันในถ่านหินก่อนผ่านกระบวนการเผาไหม้โดยใช้กระบวนการทางเคมีทำปฏิกิริยากับสารประกอบโลหะอินทรีย์ งานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและตัวแปรที่เกี่ยวข้องที่มีผลต่อการขจัดกำมะถันในถ่านหิน การศึกษาจลนพลศาสตร์การขจัดของกำมะถันไพไรต์ เพื่อหาอันดับของปฏิกิริยาค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา พลังงานกระตุ้น ขั้นตอนที่ควบคุมอัตราเร็วการเข้าทำปฏิกิริยา และสมการอัตราเร็วปฏิกิริยา และส่วนสุดท้าย เป็นการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาของกำมะถันอินทรีย์ เพื่อหาอันดับปฏิกิริยา ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา และพลังงานกระตุ้น จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

5.1.1 ผลของอัตราส่วน โดยน้ำหนักของ โลหะ โซเดียมต่อถ่านหิน

ปริมาณโลหะ โซเดียมที่ต้องการในการขจัดกำมะถันจะมีขีดจำกัดอยู่ค่าหนึ่ง ขึ้นกับปริมาณกำมะถันเบื้องต้นที่มีอยู่ในถ่านหิน แต่ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของกำมะถันที่เป็นองค์ประกอบในถ่านหินด้วย โดยจะพบว่าเมื่อถ่านหินมีปริมาณกำมะถันอินทรีย์อยู่มาก การใช้โลหะโซเดียมมากเกินไป จะทำให้ปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าใช้โลหะโซเดียมสูงเกินไป โลหะโซเดียมจะแทรกเข้าไปในโครงสร้างของถ่านหิน ทำให้โครงสร้างของถ่านหินเปลี่ยนแปลงไป ไม่เหมาะในการนำไปใช้งาน ดังนั้นการขจัดกำมะถันในถ่านหินต้องใช้โลหะ โซเดียมในปริมาณที่จำเป็นเท่านั้น

5.1.2 ผลของชนิดสารละลายและอุณหภูมิ

ทุกสารละลาย ร้อยละการลดกัมมะถันจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับโซเดียมอ็อกไซด์ในการเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น โดยอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการจัดของแต่ละสารละลาย คือ อุณหภูมิที่จุดเดือด และพบว่า โซเดียมเบนซอกลไซด์ สามารถจัดกัมมะถันจากถ่านหินได้ดีกว่า โซเดียมบิวทอกไซด์ และโซเดียมเมทอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ สามารถจัดกัมมะถันได้ดีที่สุด เนื่องจากจุดเดือดของสารละลายต่ำ ชนิดสารละลายและอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการจัดเรียงตามลำดับ คือ โซเดียมเบนซอกลไซด์ที่อุณหภูมิ 205 °ซ โซเดียมบิวทอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 117 °ซ และโซเดียมเมทอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 65 °ซ

5.1.3 ผลของชนิดของถ่านหิน

กัมมะถันในถ่านหินที่มีปริมาณกัมมะถันต่ำ จะถูกจัดได้ดีกว่ากัมมะถันในถ่านหินที่มีปริมาณกัมมะถันสูงกว่า และความสามารถในการจัดกัมมะถันรูปต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในถ่านหินจะขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างของถ่านหิน โดยชนิดถ่านหินที่สามารถจัดได้ดีที่สุดในงานวิจัยนี้เรียงตามลำดับ คือ แม่ลอง บ้านปู นาทราช แม่เมาะ1 และแม่เมาะ2

5.1.4 ผลของขนาดอนุภาคถ่านหินและเวลา

ขนาดอนุภาคถ่านหินเล็กกว่า 250 ไมครอน (75-250 ไมครอน) การจัดสมบูรณ์ภายในเวลา 10 นาที แต่ที่ขนาดอนุภาคถ่านหินใหญ่กว่า 250 ไมครอน ขึ้นไป การจัดจะลดลงเมื่อขนาดอนุภาคถ่านหินใหญ่ขึ้น และการจัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการจัดเพิ่มขึ้น โดยขนาดอนุภาคถ่านหินที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ในการหาจลนพลศาสตร์การจัดกัมมะถันไพไรต์ และกัมมะถันอินทรีย์ คือ 250-850 ไมครอน

5.1.5 ผลของตัวทำละลายที่ผ่านการ Recovery

สามารถนำตัวทำละลายกลับมาใช้ได้ใหม่ โดยความสามารถในการจัดกัมมะถันของตัวทำละลายที่ได้จากการ Recovery จะลดลงเล็กน้อย เนื่องจากกระบวนการ Recovery ใช้การกลั่นธรรมชาติที่ความดันบรรยากาศ ตัวทำละลายที่ได้มีความบริสุทธิ์ลดลงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาปริมาณการ Recovery พบว่าสามารถ Recovery ตัวทำละลาย ได้ประมาณ 85-91 %

ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ในปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันในถ่านหินแม่เมาะ 1 คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโลหะโซเดียมต่อถ่านหิน 1:30 สารละลาย 200 มิลลิลิตร สารละลายเป็นโซเดียมเบนซอไซด์ ที่อุณหภูมิจุดเดือด 205 °ซ ขนาดถ่านหิน 75-250 ไมครอน เวลา 10 นาที และที่ความดันบรรยากาศ โดยสามารถลดกำมะถันรวมได้ร้อยละ 47.6 ลดกำมะถันซัลเฟตได้ร้อยละ 92.5 ลดกำมะถันไพไรต์ได้ร้อยละ 63.2 ลดกำมะถันอินทรีย์ได้ร้อยละ 35.56 และลดเถ้าได้ร้อยละ 10.5

5.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การขจัดกำมะถันไพไรต์

5.2.1 โมเดลปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง

จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อใช้สารละลายเป็นโซเดียมเบนซอไซด์ อันดับของปฏิกิริยาเป็นอันดับสอง และสามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา (k_2) ได้เท่ากับ 8.95 ม³/กิโลโมล.วินาที ค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ได้เท่ากับ 31.5×10^6 จูล/กิโลโมล เขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของ Arrhenius ได้

$$k_2 = 8.95 \exp(-31.5 \times 10^6 / RT)$$

และความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการเปลี่ยนกับรัศมีอนุภาค อุณหภูมิ และเวลา เขียนได้เป็น

$$\frac{1}{1-X} - 1 = 2.08 r^{-0.41} \exp(-3783/T) t$$

เมื่อใช้สารละลายเป็นโซเดียมบิวทอกไซด์ พบว่า อันดับของปฏิกิริยาเป็นอันดับสอง และค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา (k_2) ได้เท่ากับ 1.78×10^3 ม³/กิโลโมล.วินาที ค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ได้เท่ากับ 43.9×10^6 จูล/กิโลโมล เขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของ Arrhenius ได้

$$k_2 = 1.78 \times 10^3 \exp(-43.9 \times 10^6 / RT)$$

และความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการเปลี่ยนกับรัศมีอนุภาค อุณหภูมิ และเวลา เขียนได้เป็น

$$\frac{1}{1-X} - 1 = 702 r^{-0.34} \exp(-5279/T) t$$

5.2.2 Shrinking Core model (Constant size particles)

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้สารละลายเป็นโซเดียมเบนซอไซด์ การศึกษาขั้นตอนที่ควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา สอดคล้องกับการแพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์เข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา (Diffusion through products layer control) สามารถหาค่าการแพร่ประสิทธิผล (effective diffusivity , De_0) ได้เท่ากับ 3.67×10^{-6} $m^2/วินาที$ ค่าพลังงานกระตุ้นได้เท่ากับ 34.9×10^6 จูล/กิโลโมล เขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของ Arrhenius ได้

$$De = 3.67 \times 10^{-6} \exp(-34.9 \times 10^6 / RT)$$

เมื่อใช้สารละลายเป็นโซเดียมบิวทอกไซด์ การศึกษาขั้นตอนที่ควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา สอดคล้องกับการแพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์เข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา (Diffusion - through products layer control) ค่าการแพร่ประสิทธิผล (effective diffusivity De_0) ได้เท่ากับ 2.52×10^{-2} $m^2/วินาที$ ค่าพลังงานกระตุ้นได้เท่ากับ 58.5×10^6 จูล/กิโลโมล เขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของ Arrhenius ได้

$$De = 2.52 \times 10^{-2} \exp(-58.5 \times 10^6 / RT)$$

5.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์การขจัดกำมะถันอินทรีย์ (โมเดลปฏิกิริยาต่อเนื่อง)

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้สารละลายเป็นโซเดียมเบนซอไซด์ อันดับของปฏิกิริยาเป็นอันดับศูนย์ และสามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา (k_{00}) ได้เท่ากับ 6.87×10^{-3} $m^3/กิโลโมล.วินาที$ ค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ได้เท่ากับ 15.4×10^6

จูล/กิโลโมล เขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของ Arrhenius ได้

$$k_o = 6.87 \times 10^{-3} \exp(-15.4 \times 10^6 / RT)$$

เมื่อใช้สารละลายเป็นโซเดียมบิวทอกไซด์ พบว่า อันดับของปฏิกิริยาเป็นอันดับศูนย์ และสามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา (k_o) ได้เท่ากับ 3.85×10^{-3} ม³/กิโลโมล.วินาที ค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ได้เท่ากับ 21.2×10^6 จูล/กิโลโมล เขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของ Arrhenius ได้

$$k_o = 3.85 \times 10^{-3} \exp(-21.2 \times 10^6 / RT)$$

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบผลการขจัดกำมะถันและกำในถ่านหินและจลนพลศาสตร์การขจัดกำมะถันไพไรต์และกำมะถันอินทรีย์ของสารละลายโซเดียมเบนซอกไซด์ และสารละลายโซเดียมบิวทอกไซด์

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. การหาปริมาณกำมะถันอินทรีย์ในถ่านหิน ควรใช้การวิเคราะห์โดยตรง ไม่ควรใช้การคำนวณเมื่อทราบกำมะถันในรูปอื่น ๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์
2. ศึกษาจลนพลศาสตร์การขจัดกำมะถันจากถ่านหินเหมืองอื่น ๆ นอกจากถ่านหินเหมืองแม่เมาะ เพื่อเปรียบเทียบผลการลดปริมาณกำมะถันและกำ อัตราเร็วปฏิกิริยา และสมการอัตราเร็วปฏิกิริยา
3. ศึกษาถึงผลการนำตัวทำละลายกลับมาใช้หลาย ๆ ครั้ง
4. ศึกษาผลการขจัดกำมะถันในถ่านหินโดยใช้ตัวทำละลายเป็นแอลกอฮอล์ชนิดอื่น ๆ
5. ศึกษาผลการขจัดกำมะถันในถ่านหินโดยใช้ธาตุอื่น ๆ แทนโลหะโซเดียม อาทิเช่น โปแตสเซียม
6. การหารัศมีอนุภาคเฉลี่ยควรใช้หลาย ๆ วิธีแล้วเปรียบเทียบผลกัน

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบผลการทำงานของถังหมักและถ้ำในถ่านหิน และจนผลสารชีวภาพของถังหมัก
 โฟไวด์และถ้ำหมักอินทรีย์ ของโซเซียมเบนซอกโซล กับ โซเซียมบิวทอกโซล

ชนิดของ สารละลาย	ร้อยละการออกก่อกำเนิด					จนผลสารชีวภาพของถังหมักในถ่านหินแถมภาวะ 1 (ในเซลล์ปฏิกริยาต่อเนื่อง)			
	รวม	ซัลเฟต	โฟไวด์	อินทรีย์	แก้ว	อันดับปฏิกริยา	ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกริยา	พลังงานกระตุ้น จูล/กิโลโมล	สมการอัตราเร็ว
โซเซียม เบนซอกโซล 160–205 °ซ	47.6	92.5	63.2	35.3	10.5	โฟไวด์ อันดับสอง	$k_{so} = 8.95 \exp(-31.5 \times 10^6 / RT)$	31.5×10^6	$[1/(1-X)] - 1 = 2.08 [r^{-0.41}] [\exp(-3783/T)] t$
						อินทรีย์ อันดับศูนย์	$k_{so} = 6.87 \times 10^{-3} \exp(-15.4 \times 10^6 / RT)$	15.4×10^6	
โซเซียม บิวทอกโซล 85–117 °ซ	27.3	75.0	56.1	11.5	12.0	โฟไวด์ อันดับสอง	$k_{so} = 1.78 \times 10^3 \exp(-43.9 \times 10^6 / RT)$	43.9×10^6	$[1/(1-X)] - 1 = 702 [r^{-0.34}] [\exp(-5279/T)] t$
						อินทรีย์ อันดับศูนย์	$k_{so} = 3.85 \times 10^{-3} \exp(-21.2 \times 10^6 / RT)$	21.2×10^6	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย