บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ศึกษาการกำจัดกำมะถันในถ่านหินโดยไพโรไลซิสถ่านหินลิกไนต์ซึ่งมีปริมาณกำมะถันรวมร้อยละ 3.770 กำมะถันอินทรีย์ร้อยละ 2.582 กำมะถันไพไรต์ร้อยละ 0.763 และกำมะถันซัลเฟตร้อยละ 0.423 (เมื่อไม่คิดความชื้น) จากเหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิสุดท้ายตั้งแต่ 400 ถึง 900 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10, 20 และ 40 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนและไฮโดรเจน และศึกษาจลนพลศาสตร์การสูญเสียน้ำหนักระหว่างไพโรไลซิสจากเทอร์โมแกรมที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการกำจัดกำมะถันพบว่า

1. **อุณหภูมิ** ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการกำจัดกำมะถันในถ่านหิน พิจารณาเมื่อไพโรไลส์ในบรรยากาศไฮโดรเจนพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดกำมะถันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถกำจัดกำมะถันได้สูงสุดร้อยละ 58.74 ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อไพโรไลส์ในบรรยากาศไนโตรเจนพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ร้อยละกำมะถันรวมในถ่านชาร์ลดลงจนถึงอุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียส และสามารถกำจัดกำมะถันได้สูงสุดร้อยละ 54.35 ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ ร้อยละกำมะถันในถ่านชาร์กลับเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงผลของอุณหภูมิต่อการกำจัดกำมะถันรูปแบบต่าง ๆ พบว่า ในบรรยากาศไนโตรเจน ร้อยละกำมะถันอินทรีย์จะลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิต่ำไม่เกิน 600 องศาเซลเซียส โดยสามารถกำจัดได้สูงสุดร้อยละ 49.46 ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ร้อยละกำมะถันอินทรีย์ในถ่านชาร์กลับเพิ่มขึ้น ขณะที่เมื่อไพโรไลส์ในบรรยากาศไฮโดรเจนพบว่า สามารถกำจัดกำมะถันอินทรีย์ได้สูงสุดร้อยละ 53.07 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ร้อยละกำมะถันอินทรีย์ในถ่านชาร์ค่อนข้างคงที่ ส่วนผลต่อกำมะถันซัลเฟตและไพไรต์พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ร้อยละกำมะถันซัลเฟตในถ่านชาร์ลดลง และพบน้อยมากหรือไม่พบเมื่อไพโรไลส์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส และการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ร้อยละกำมะถันไพไรต์ในถ่านชาร์ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อไพโรไลส์ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศไนโตรเจนส่วนที่อุณหภูมิอื่นกำจัดกำมะถันไพไรต์ได้เล็กน้อย ส่วนในบรรยากาศไฮโดรเจนร้อยละกำมะถันไพไรต์ลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 องศาเซลเซียสขึ้นไป

2. **อัตราการให้ความร้อน** เมื่อพิจารณาผลของอัตราการให้ความร้อนที่อุณหภูมิเดียวกันพบว่า การเพิ่มอัตราการให้ความร้อนทำให้ถ่านหินเกิดการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้นได้ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ลดลง ในขณะเดียวกันมีแนวโน้มว่าอัตราการให้ความร้อนสูงกว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดกำมะถันได้ดีกว่า

3. **บรรยากาศ** บรรยากาศที่ใช้ระหว่างไพโรไลซิสมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดกำมะถันโดยเฉพาะกำมะถันอินทรีย์ ในบรรยากาศไนโตรเจนจากเริ่มต้นร้อยละ 2.582 (เมื่อไม่คิดความชื้น) สามารถกำจัดกำมะถันอินทรีย์ได้มากที่สุดร้อยละ 49.46 โดยร้อยละกำมะถันอินทรีย์กลับเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส ขณะที่เมื่อไพโรไลส์ในบรรยากาศไฮโดรเจนสามารถกำจัดกำมะถันอินทรีย์ได้มากที่สุดร้อยละ 53.07 และร้อยละกำมะถันอินทรีย์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส ส่วนอิทธิพลต่อกำมะถันไพไรต์พบว่า บรรยากาศไฮโดรเจนมีประสิทธิภาพในการกำจัดมากกว่า และเริ่มเกิดสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า อย่างไรก็ตามไพโรไลซิสในบรรยากาศไฮโดรเจน (ที่ความดันบรรยากาศ) มีประสิทธิภาพในการกำมะถันสูงกว่าในบรรยากาศไนโตรเจนไม่มากนัก เมื่อพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์ไพโรไลซิสในบรรยากาศไนโตรเจนจึงมีความเหมาะสมมากกว่า

ผลการวิเคราะห์เทอร์โมแกรมและการศึกษาจลนพลศาสตร์ระหว่างไพโรไลซิสถ่านหินโดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งพบว่า ระหว่างไพโรไลซิสถ่านหินเกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสำคัญแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่หนึ่งเกิดขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 180 องศาเซลเซียส สำหรับบรรยากาศไนโตรเจนและต่ำกว่านั้นเล็กน้อยในบรรยากาศไฮโดรเจน และมีค่าพลังงานกระตุ้นต่ำประมาณ 48 กิโลจูลต่อโมล ทั้งสองบรรยากาศ ช่วงที่สองเกิดขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 470 องศาเซลเซียส ใกล้เคียงกันทั้งสองบรรยากาศ โดยมีค่าพลังงานกระตุ้น 144.7 และ 157.7 กิโลจูลต่อโมล ในบรรยากาศไนโตรเจนและไฮโดรเจนตามลำดับ และช่วงที่สามเกิดขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 780 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศไนโตรเจนและต่ำกว่านั้นประมาณ 10 องศาเซลเซียสในบรรยากาศไฮโดรเจน โดยมีค่าพลังงานกระตุ้นใกล้เคียงกันประมาณ 237.5 กิโลจูลต่อโมล ทั้งในบรรยากาศไนโตรเจนและไฮโดรเจน เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่กำมะถันเกิดการสลายตัวสูงสุด (ประมาณ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโดยสำคัญของตัวอย่างถ่านหินที่วิเคราะห์ได้จากเทอร์โมแกรม แสดงให้เห็นว่ากำมะถันจะสลายตัวในช่วงที่สอง

ข้อเสนอแนะ

1. ควรพัฒนาเทคนิคในการวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันรวมและรูปแบบกำมะถัน ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์ปริมาณกำมะถันโดยวิธีทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM D 2492 และ 3177 ซึ่งใช้ปริมาณตัวอย่างมาก ใช้เวลานาน และเกิดข้อผิดพลาดได้ง่าย ปัจจุบันงานวิจัยในต่างประเทศนิยมใช้เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้เทคนิคทางด้านรังสีเอ็กซ์ เช่น x-ray photoelectron spectroscopy (XPS) และ x-ray absorption near-edge structure (XANES) spectroscopy ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว ถูกต้อง ใช้ตัวอย่างปริมาณน้อย และสามารถใช้วัดปริมาณกำมะถันอินทรีย์แบบประมาณได้โดยตรง (Maes, *et al.*, 1997)

2. ตัวแปรที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อนและบรรยากาศ เนื่องจากข้อจำกัดในการทดลองและการวิเคราะห์ตัวอย่าง งานวิจัยในอนาคตควรมีการศึกษาตัวแปรอื่น ๆ ที่มีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักและการสลายตัวของกำมะถันในถ่านหิน เช่น ชนิดและขนาดของถ่านหิน ความดัน และชนิดของเครื่องมือ เป็นต้น

3. การวิเคราะห์ผลการทดลองในงานวิจัยนี้ ศึกษาเฉพาะผลิตภัณฑ์ของแข็งเท่านั้น เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ละเอียดและถูกต้องยิ่งขึ้น ควรติดตั้งเครื่องมือเพื่อตรวจจับและวัดปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สและของเหลวที่เกิดขึ้นระหว่างไพโรไลซิส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย