การจำลองการเผาไหม้ของแอมโมเนียร่วมกับถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันสูง โดยใช้โปรแกรม Aspen Plus

โปรดปราน สิริธีรศาสน์*, ณัฐนรี ชำนาญ, และ บุณยชา ปายัน

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี ประเทศไทย
**Corresponding author: sprod@tu.ac.th*

บทคัดย่อ

เพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดภาวะโลกร้อน (global warming effect) จึงนำแอมโมเนีย (NH_3) ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่ปราศจากคาร์บอน มาเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อการปล่อย CO_2 ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และออกไซด์ของกำมะถัน (SO_x) จากการเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันสูงด้วยการจำลองกระบวนการเผาไหม้โดยใช้โปรแกรม Aspen Plus V.12.1 จำนวน 360 การทดลอง ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิของการเผาไหม้ (500 ถึง 2,000 °C) สัดส่วนมวลของแอมโมเนียในเชื้อเพลิงผสมระหว่างแอมโมเนียกับถ่านหิน (ร้อยละ 0 ถึง 100) ปริมาณอากาศเกินพอ (ร้อยละ -15 ถึง +15) และปริมาณกำมะถันในถ่านหิน (ร้อยละ 0.5 ถึง 5) ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนมวลของแอมโมเนียในเชื้อเพลิงผสมส่งผลให้การปล่อย CO_2 ลดลง และเมื่อใช้ปริมาณอากาศเกินพอร้อยละ 15 ทำให้มีการปล่อย CO_2 ต่ำที่สุด เมื่อเพิ่มอุณภูมิของการเผาไหม้และปริมาณอากาศเกินพอ ส่งผลให้การปล่อย NO_x เพิ่มขึ้น การเพิ่มสัดส่วนมวลของแอมโมเนียในเชื้อเพลิงผสมไม่ส่งผลต่อการปล่อย NO_x เมื่อปริมาณกำมะถันในถ่านหินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการปล่อย SO_x เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มสัดส่วนมวลของแอมโมเนียในเชื้อเพลิงผสมส่งผลให้การปล่อย SO_x ลดลง นอกจากนี้ ยังพบว่า การเพิ่มขึ้นของการปล่อย SO_x ส่งผลให้การปล่อย NO_x ลดลงเล็กน้อย

คำสำคัญ: การเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหิน / การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ / การปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจน / การปล่อยออกไซด์ของกำมะถัน

Simulation of the co-firing of ammonia and high-sulphur-content coal using Aspen Plus

Prodpran Siritheerasas*, Natnaree Chamnan, and Boonyacha Payan

Department of Chemical Engineering, Thammasat School of Engineering, Thammasat University, Pathumthani, Thailand
**Corresponding author: sprod@tu.ac.th*

Abstract

In an attempt to lower the emission of carbon dioxide (CO_2), one of the most potential greenhouse gases that causes the global warming effect, ammonia (NH_3), a carbon-free fuel, is co-fired with another fossil fuel. In the present study, the effects of various variables on the emissions of CO_2, oxides of nitrogen (NO_x), and oxides of sulphur (SO_x) from the co-firing of ammonia and high-sulphur-content coal were investigated using Aspen Plus V.12.1 for 360 test runs. The variables examined in this study included the combustion temperature (500 to 2,000 °C), the NH_3 mass percentage in the NH_3-coal fuel mixture (0 to 100 wt.%), the percentage of excess air (-15 to +15%), and the percentage of sulphur in coal (0.5 to 5 wt.%). The results revealed that an increase in NH_3 percentage in the fuel mixture led to a decrease in CO_2 emission. The co-firing with the excess air percentage of +15% resulted in the lowest CO_2 emission. Increases in combustion temperature and excess air percentage resulted in an increase in the emission of NO_x, but an increase in NH_3 percentage in the fuel mixture had an insignificant effect on NO_x emission. When the percentage of sulphur in coal increased, the emission of SO_x also increased. However, the emission of SO_x decreased with an increase in NH_3 percentage in the fuel mixture. It was also found that an increase in the emission of SO_x led to a slight decrease in the emission of NO_x.

Keywords: Ammonia-coal co-firing / CO_2 emission / NO_x emission / SO_x emission

1. บทนำ

ในปัจจุบันโลกกำลังเผชิญกับปัญหาภาวะโลกร้อน (global warming effect) ที่ทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้นทุกปี [1-3] โดยภาวะโลกร้อนเป็นปรากฏการณ์ที่อุณหภูมิของโลกมีค่าสูงขึ้น อันเกิดจากการสะสมของก๊าซเรือนกระจก ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) กลุ่มไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (hydrofluorocarbons: HFCs) กลุ่มเพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (perfluorocarbons: PFCs) ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) และไนโตรเจนไตรฟลูออไรด์ (NF_3) [4] ในชั้นบรรยากาศ ซึ่งก๊าซเรือนกระจกเหล่านี้มีสมบัติในการกักเก็บรังสีอินฟราเรด (infrared) ไว้ในชั้นบรรยากาศ ทำให้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไม่สามารถปล่อยออกจากบรรยากาศของโลกได้ตามปกติ นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของชั้นบรรยากาศของโลก [4] ทั้งนี้ จากก๊าซเรือนกระจกที่กล่าวถึงข้างต้น ก๊าซ CO_2 ถือเป็นก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศของโลกมากที่สุด และเป็นตัวการที่ทำให้เกิดการสะสมของความร้อนในชั้นบรรยากาศของโลกมากที่สุดเช่นกัน [1-3] โดย CO_2 ที่ปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศส่วนใหญ่มาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ (fossil fuel) เช่น ถ่านหิน น้ำมันปิโตรเลียม และก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น [1-3]

เพื่อป้องกันความเสียหายหรือบรรเทาความรุนแรงที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิของโลก ทุกประเทศจึงมีแนวคิดที่ต้องการลดการปล่อย CO_2 ลง โดยกิจกรรมแรก ๆ ที่เป็นความพยายามในการลดการปล่อย CO_2 ของประชาคมโลก คือ พิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol) ในปี ค.ศ. 1997 ซึ่งเป็นสนธิสัญญาระหว่างประเทศฉบับแรกที่กำหนดเป้าหมายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศต่าง ๆ โดยเฉพาะกลุ่มประเทศที่พัฒนาแล้ว [5] อย่างไรก็ตาม หลังจากที่มีพิธีสารเกียวโตแล้ว ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยเฉพาะ CO_2 ก็ยังไม่ได้ลดลงตามเจตนารมณ์ของพิธีสารดังกล่าว จึงนำไปสู่การประชุม Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) ครั้งที่ 21 (COP-21) หรือข้อตกลงปารีส (Paris Agreement) ในปี ค.ศ. 2015 ซึ่งได้มีการกำหนดแนวทางใหม่ในการบรรเทาภาวะโลกร้อน โดยมีเป้าหมายหลักในการรักษาอุณหภูมิของโลกให้ไม่เกิน 2 °C จากระดับก่อนยุคอุตสาหกรรม พร้อมทั้งพยายามจำกัดการเพิ่มของอุณหภูมิของโลกให้ไม่เกิน 1.5 °C จากระดับก่อนยุคอุตสาหกรรม [6]

สำหรับประเทศไทย หลังจากที่ได้เข้าร่วมการประชุม COP-21 แล้ว ได้กำหนดเป้าหมายในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้ได้ร้อยละ 20-25 จากระดับที่คาดว่าจะปล่อยในปี พ.ศ. 2573 (ค.ศ. 2030) ทั้งนี้ จากการประมาณการ พบว่าในปี พ.ศ. 2573 (ค.ศ. 2030) ประเทศไทยจะปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณ 555 ล้านตันของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ดังนั้น ประเทศไทยต้องพยายามลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้ได้ในช่วง 111-139 ล้านตันของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าภายในปี พ.ศ. 2573 (ค.ศ. 2030) [7]

ในปี ค.ศ. 2021 ได้มีการประชุม COP-26 ซึ่งในการประชุมดังกล่าว หลายประเทศ รวมถึงองค์กรด้านพลังงานได้แสดงจุดยืนเพื่อขับเคลื่อนการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยเฉพาะ CO_2 ให้บรรลุเป้าหมายที่ได้ตั้งไว้จากการประชุม COP-21 ภายในปี ค.ศ. 2050 พร้อมกันนี้ ที่ประชุมดังกล่าว ได้เพิ่มความชัดเจนในการพัฒนาและนำเทคโนโลยีต่าง ๆ มาใช้เพื่อช่วยลดการปล่อย CO_2 ภายในปี ค.ศ. 2030 โดยในส่วนของประเทศไทย กระทรวงพลังงานได้เข้าร่วมประชุม Asia Zero Emission Community (AZEC) ครั้งที่ 1 ในปี พ.ศ. 2566 (ค.ศ. 2023) ซึ่งที่ประชุมดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยเหลือประเทศต่าง ๆ ในทวีปเอเชียในการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดการปล่อย CO_2 ตามสภาพแวดล้อมของแต่ละประเทศ โดยหนึ่งในเทคโนโลยีที่มีความเป็นไปได้สูง คือ การนำแอมโมเนีย (NH_3) ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่ปราศจากคาร์บอน (carbon-free fuel) มาเผาไหม้ร่วมกับถ่านหิน [8]

แอมโมเนีย (NH_3) เป็นสารที่มีสถานะเป็นก๊าซที่อุณหภูมิห้อง ไม่มีสี มีกลิ่นฉุน และมีความระคายเคืองสูง สามารถละลายน้ำได้ดี และสามารถถูกบีบอัดได้ง่าย ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นของเหลวใสไม่มีสี มีมวลโมเลกุล 17.03 g/mol มีจุดเดือด -33.35 °C และมีจุดเยือกแข็ง -77.7 °C [9] สามารถติดไฟได้ในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 16-25 เมื่อผสมกับอากาศ [10] แอมโมเนียเป็นสารประกอบที่ปราศจากคาร์บอน (C) เช่นเดียวกับไฮโดรเจน (H_2) อนึ่ง เมื่อเทียบกับ H_2 แอมโมเนียมีต้นทุนในการจัดเก็บและขนส่งต่อหน่วยพลังงานที่ต่ำกว่า เนื่องจากมีความหนาแน่นสูงกว่า [11] อย่างไรก็ตาม แม้ว่าแอมโมเนียจะเป็นเชื้อเพลิงที่ปราศจากคาร์บอน ซึ่งจะทำให้ไม่ปล่อย CO_2 ออกสู่บรรยากาศเมื่อถูกเผาไหม้ แต่แอมโมเนียมีไนโตรเจน (N) เป็นองค์ประกอบ เมื่อถูกเผาไหม้จะทำให้เกิดออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ขึ้น [12]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำแอมโมเนียมาเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินที่ผ่านมา อันได้แก่ งานวิจัยของ Wang และคณะ [13] ซึ่งได้เปรียบเทียบการปล่อย CO_2 และ NO_x จากการเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหินที่สัดส่วนโดย

มวลระหว่างแอมโมเนียต่อถ่านหิน (NH_3/coal mass ratio) ต่าง ๆ ในเตาเผาแบบท่อ (tube furnace) ซึ่งวางในแนวตั้งที่อุณหภูมิ 1,100 °C ทั้งแบบที่มีการป้อนของอากาศเป็นช่วง ๆ ตามความสูงของเตาเผา (air-staged condition) และแบบที่ป้อนอากาศร่วมกับเชื้อเพลิงผสมที่ด้านบนของเตาเผาโดยไม่มีการป้อนเป็นช่วง ๆ ตามความสูง (non-staged combustion) ผลการศึกษาพบว่า การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแอมโมเนียกับถ่านหินนำไปสู่การลดการปล่อย CO_2 ลงได้อย่างมีนัยสำคัญ และพบว่า การเผาไหม้ในเตาเผาที่มีการป้อนอากาศเป็นช่วง ๆ (air-staged condition) นำไปสู่การปล่อย NO_x ที่น้อยกว่าการเผาไหม้ในเตาเผาที่ไม่มีการป้อนอากาศเป็นช่วง ๆ (non-staged combustion) เนื่องจากการป้อนอากาศเป็นช่วง ๆ ทำให้เกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมในภาวะที่มีเชื้อเพลิงมากกว่าอากาศ (fuel-rich condition) ซึ่งนำไปสู่การลดการเกิดของ NO_x งานวิจัยของ Wang และคณะ [14] ซึ่งได้ศึกษาการปล่อย NO_x จากการเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหินในเตาเผาแบบท่อซึ่งวางในแนวตั้ง ที่อุณหภูมิ 1,100-1,400 °C โดยมีการป้อนเชื้อเพลิงผสม 2 แบบ แบบที่ 1 เป็นแบบที่ป้อนแอมโมเนียในท่อที่แยกจากถ่านหินและอากาศ (lagging co-firing mode) และแบบที่ 2 เป็นแบบที่ป้อนแอมโมเนียร่วมกับถ่านหินและอากาศในท่อเดียวกัน (premixed co-firing mode) ผลการศึกษาพบว่า การเผาไหม้ในรูปแบบที่ป้อนแอมโมเนียแยกกับถ่านหินและอากาศ (lagging co-firing mode) มีการปล่อย NO_x น้อยกว่าการเผาไหม้ในรูปแบบที่ป้อนแอมโมเนียร่วมกับถ่านหินและอากาศในท่อเดียวกัน เนื่องจากการป้อนแบบแยกกันทำให้เกิดภาวะการเผาไหม้ที่มีเชื้อเพลิงมากกว่าอากาศ (fuel-rich condition) ซึ่งนำไปสู่การปล่อย NO_x ในปริมาณต่ำ ขณะที่การป้อนแอมโมเนียร่วมกับถ่านหินและอากาศทำให้เกิดภาวะการเผาไหม้ที่มีเชื้อเพลิงน้อยกว่าอากาศ (fuel-lean condition) ซึ่งเป็นภาวะที่ทำให้เกิดการปล่อย NO_x ในปริมาณสูง งานวิจัยของ Xie และคณะ [15] ซึ่งได้ศึกษาการปล่อย NO_x จากการเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหิน โดยใช้สัดส่วนของแอมโมเนียต่อถ่านหินในช่วงร้อยละ 10-30 ในเตาเผาแบบท่อซึ่งวางในแนวตั้ง ด้วยการป้อนแอมโมเนียที่ตำแหน่งต่าง ๆ ได้แก่ ที่ด้านบนของเตาเผาร่วมกับการป้อนถ่านหินและอากาศ และที่ด้านข้างของเตาเผา ขณะที่ถ่านหินและอากาศถูกป้อนจากด้านบน ผลการศึกษาพบว่า ระบบการเผาไหม้ที่ป้อนแอมโมเนียแยกจากถ่านหินและอากาศก่อให้เกิดภาวะการเผาไหม้ที่มีเชื้อเพลิงมากกว่าอากาศ (fuel-rich condition) ซึ่งทำให้มีการปล่อย NO_x ต่ำกว่าระบบการเผาไหม้ที่ป้อนแอมโมเนียร่วมกับอากาศจากด้านบนของเตาเผา นอกจากนี้ ยังพบว่า การเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหินนำไปสู่การลดลงของการปล่อย CO_2 อย่างมีนัยสำคัญ และงานวิจัยของ Li และคณะ [16] ที่ศึกษาผลของสัดส่วนระหว่างแอมโมเนียกับถ่านหิน รูปแบบของการป้อนอากาศ อุณหภูมิของการเผาไหม้ และปริมาณของอากาศเกินพอ (ในรูปของความเข้มข้นของออกซิเจนที่ขาออก) ที่มีต่อการปล่อย CO_2 และ NO_x จากการเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหินในเตาเผาแบบ fluidized bed ในช่วงอุณหภูมิ 850-900 °C ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มสัดส่วนของแอมโมเนียในเชื้อเพลิงผสมระหว่างแอมโมเนียกับถ่านหินนำไปสู่การลดลงของการปล่อย CO_2 ขณะที่การปล่อย NO_x เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ความเข้มข้นของ NO_x ที่ปล่อยออกมาอยู่ในช่วง 150-200 ppm ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับต่ำ การป้อนอากาศเป็นช่วง ๆ ตามความสูงของเตาเผาทำให้ลดการปล่อย NO_x ลงได้ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของการเผาไหม้ทำให้การปล่อย NO_x สูงขึ้น ส่วนการลดลงของปริมาณอากาศเกินพอ (นั่นคือมีความเข้มข้นของออกซิเจนที่ขาออกลดลง) ส่งผลให้มีการปล่อย NO_x ลดลง แสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหินนำไปสู่การปล่อย CO_2 ในปริมาณที่ลดลง และสามารถลดปริมาณการปล่อยของ NO_x ได้เช่นกัน หากมีการควบคุมการเผาไหม้ให้อยู่ในภาวะที่เหมาะสม (นั่นคือภาวะการเผาไหม้ที่มีเชื้อเพลิงมากกว่าอากาศ หรือ fuel-rich condition)

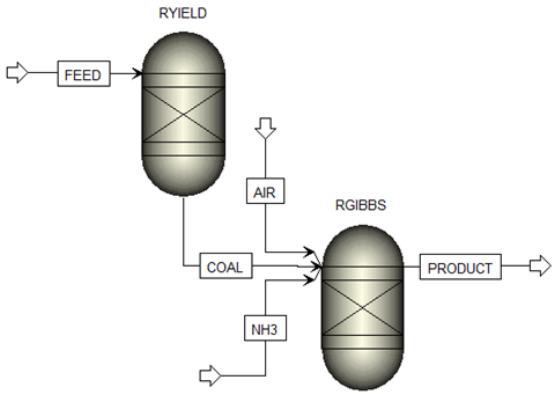
อย่างไรก็ตาม หากจะนำแอมโมเนียมาเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินในประเทศไทย ซึ่งเป็นถ่านหินที่มีปริมาณของกำมะถัน (S) สูง อาจทำให้ออกไซด์ของกำมะถัน (SO_x) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ ไปส่งผลต่อการปล่อย NO_x ได้ ซึ่งงานวิจัยที่ได้กล่าวถึงข้างต้นยังไม่ได้มีการศึกษาผลของการนำแอมโมเนียมาเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันสูงแต่อย่างใด ดังนั้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันสูงที่มีต่อการปล่อยมลพิษต่าง ๆ ซึ่งรวมถึง NO_x และ SO_x พร้อมทั้งศึกษาผลของการปล่อย SO_x ที่มีต่อการปล่อย NO_x

2. วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการจำลองการเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันสูงโดยใช้โปรแกรมจำลองกระบวนการ Aspen Plus V. 12.1 ซึ่งตัวแปรที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ อุณหภูมิของการเผาไหม้ (ในช่วง 500 ถึง 2,000 °C) สัดส่วนมวลของแอมโมเนียในเชื้อเพลิงผสมระหว่างแอมโมเนียกับถ่านหิน (ในช่วงร้อยละ 0-100) ปริมาณอากาศ

เกินพอ (ในช่วงร้อยละ -15 ถึง +15) และปริมาณกำมะถันในถ่านหิน (ในช่วงร้อยละ 0.5 ถึง 5) ทั้งนี้ สมบัติของถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สมบัติของถ่านหินจากงานวิจัยของ Pintana และ Tippayawong [17]

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์ (reactor) 2 ประเภท ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ประเภท RYield และเครื่องปฏิกรณ์ประเภท RGibbs โดยเครื่องปฏิกรณ์ประเภท RYield ใช้สำหรับปฏิกิริยาที่ทราบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น จึงใช้เครื่องปฏิกรณ์นี้ในขั้นตอนของการกำหนดองค์ประกอบของถ่านหิน ซึ่งเป็นสารที่ไม่อยู่ในฐานข้อมูลของโปรแกรม ให้เป็นสารที่โปรแกรมสามารถนำไปใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ในขั้นถัดไปได้ โดยการกำหนดให้องค์ประกอบของถ่านหินที่ได้จาก RYield เป็นไปดังแสดงในตารางที่ 1 ในส่วนของขั้นตอนการจำลองกระบวนการเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหิน เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการเผาไหม้ที่ภาวะสมดุล (equilibrium state) จึงเลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์ประเภท RGibbs เพื่อให้โปรแกรมคำนวณความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ (products) ที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ภาวะสมดุล (equilibrium) หรือในภาวะของการดำเนินไปของปฏิกิริยาที่ทำให้ได้ค่า Gibbs free energy (ΔG) ต่ำที่สุด ทั้งนี้ ได้แสดงแผนผังกระบวนการ (process flow diagram: PFD) ของการจำลองกระบวนการเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหินไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังกระบวนการ (process flow diagram: PFD) ของการจำลองกระบวนการเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหิน

อุณหภูมิและความดันเริ่มต้นของถ่านหินที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ประเภท RYield และ RGibbs และของอากาศ (air) และแอมโมเนีย (NH_3) ที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ประเภท RGibbs ได้กำหนดไว้ที่ 25 °C และ 1 atm ตามลำดับ ทั้งนี้ กำหนดให้อากาศประกอบด้วย N_2 ร้อยละ 79 และ O_2 ร้อยละ 21 โดยโมล

ตารางที่ 1 ค่าการวิเคราะห์ต่าง ๆ ของถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัย

การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) [wt.%]	ปริมาณกำมะถันในถ่านหิน [wt.%]					
	0.5	1	2	3	4	5
Ash	22.11	21.61	20.61	19.61	18.61	17.61
Volatile matter (VM)	37.10	37.35	37.85	38.35	38.85	39.35
Fixed carbon (FC)	40.79	41.04	41.54	42.04	42.54	43.04
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) [wt.%]						
Ash	22.11	21.61	20.61	19.61	18.61	17.61
Carbon (C)	53.34	53.34	53.34	53.34	53.34	53.34
Hydrogen (H)	3.04	3.04	3.04	3.04	3.04	3.04
Nitrogen (N)	1.93	1.93	1.93	1.93	1.93	1.93
Oxygen (O)	13.08	13.08	13.08	13.08	13.08	13.08

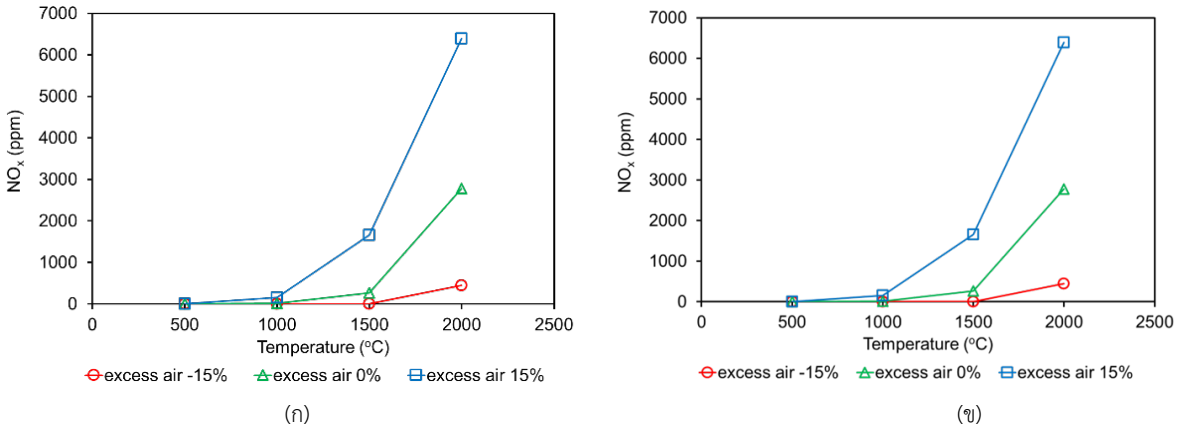
ตารางที่ 1 ค่าการวิเคราะห์ต่าง ๆ ของถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) [wt.%]	ปริมาณกำมะถันในถ่านหิน [wt.%]					
	0.5	1	2	3	4	5
Sulphur (S)	0.5	1	2	3	4	5
การวิเคราะห์กำมะถัน (sulphur analysis)						
Pyritic sulphur	0.075	0.15	0.30	0.45	0.60	0.75
Sulphate sulphur	0.175	0.35	0.70	1.05	1.40	1.75
Organic sulphur	0.25	0.50	0.10	1.50	2.00	2.50

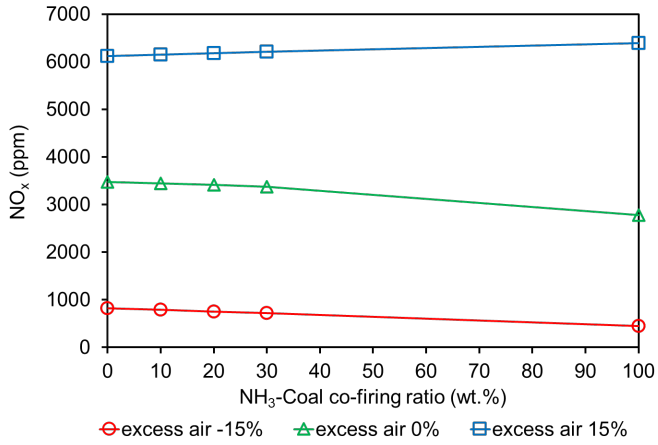
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการพิจารณาผลของอุณหภูมิของการเผาไหม้และอากาศเกินพอที่มีต่อการปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) จากการเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหินที่มีสัดส่วนมวลระหว่างแอมโมเนียกับถ่านหินร้อยละ 30 โดยมวล ในรูปที่ 2 พบว่า สำหรับอากาศเกินพอร้อยละ -15 และ 0 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของการเผาไหม้จาก 500 เป็น 1,500 °C ส่งผลให้ความเข้มข้นของ NO_x ที่ปล่อยออกมาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่ออุณหภูมิของการเผาไหม้เพิ่มจาก 1,500 เป็น 2,000 °C ความเข้มข้นของ NO_x ที่ปล่อยออกมามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่า สำหรับอากาศเกินพอร้อยละ +15 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของการเผาไหม้ส่งผลให้ความเข้มข้นของ NO_x ที่ปล่อยออกมาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ปริมาณของกำมะถันในถ่านหินไม่มีผลต่อความเข้มข้นของ NO_x ที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 2 เช่นเดียวกัน ทั้งนี้ พบว่า การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนมวลของแอมโมเนียในเชื้อเพลิงผสมระหว่างแอมโมเนียกับถ่านหินมีผลน้อยมากต่อความเข้มข้นของ NO_x ที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 3

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของการเผาไหม้และอากาศเกินพอที่ส่งผลให้การปล่อย NO_x เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นไปตามกลไก (mechanism) ของการเกิด NO_x ที่อุณหภูมิสูง (thermal-NO_x) ของ Zeldovich [18] ซึ่งเป็นกลไกของการเกิด NO_x จาก N_2 ที่อยู่ในอากาศ โดยที่ N_2 เป็นโมเลกุลที่ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะสาม (triple bond) [18] ดังนั้น จึงต้องใช้อุณหภูมิสูงในการสลายพันธะ และการเพิ่มขึ้นของอากาศเกินพอส่งผลให้อากาศที่เผาไหม้กับเชื้อเพลิงมี N_2 เพิ่มขึ้น จึงทำให้การปล่อย NO_x เพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้ การที่การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนมวลของแอมโมเนียในเชื้อเพลิงผสมระหว่างแอมโมเนียกับถ่านหินมีผลทำให้การปล่อย NO_x เปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าการปล่อย NO_x จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแอมโมเนียกับถ่านหินมาจาก N_2 ในอากาศเป็นหลัก



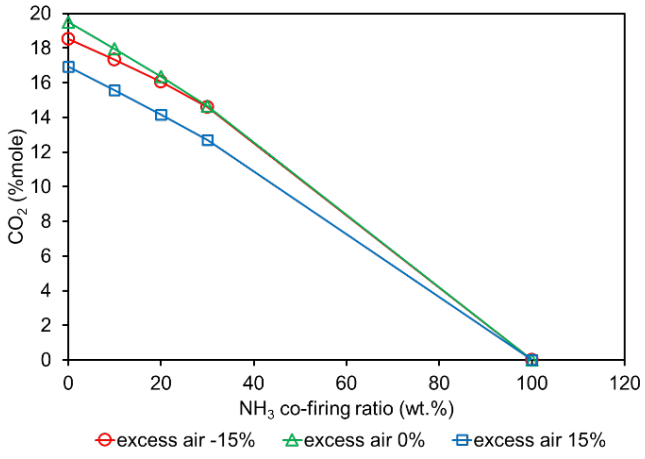
รูปที่ 2 ความเข้นข้นของ NO_x จากการเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหินที่มีสัดส่วนมวลของแอมโมเนียในเชื้อเพลิงผสมร้อยละ 30 ที่อุณหภูมิของการเผาไหม้และอากาศเกินพอต่าง ๆ สำหรับถ่านหินที่มี (ก) กำมะถัน (S) ร้อยละ 0.5 และ (ข) กำมะถัน (S) ร้อยละ 5



รูปที่ 3 ความเข้มข้นของ NO_x ที่ได้จากการเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหินที่มีสัดส่วนมวลของแอมโมเนียในเชื้อเพลิงผสมในช่วงร้อยละ 0-100 และปริมาณอากาศเกินพอต่าง ๆ ที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ 2,000 °C สำหรับถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถัน (S) ร้อยละ 5

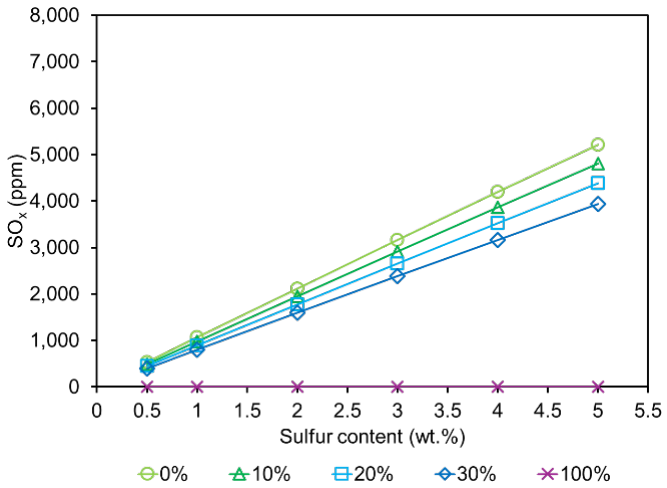
ผลของอากาศเกินพอที่มีต่อการปล่อย NO_x จากการเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหินที่ได้จากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิจัยของ Wang และคณะ [13] งานวิจัยของ Wang และคณะ [14] งานวิจัยของ Xie และคณะ [15] และงานวิจัยของ Li และคณะ [16] ที่พบว่า การเผาไหม้ในภาวะที่มีเชื้อเพลิงมากกว่าอากาศ (fuel-rich condition) ส่งผลให้การปล่อย NO_x ลดลง ส่วนผลของอุณหภูมิที่มีการปล่อย NO_x ที่ได้จากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิจัยของ Li และคณะ [16] ที่พบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้เกิดการปล่อยของ NO_x มากขึ้น

จากการพิจารณาการปล่อย CO_2 จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแอมโมเนียกับถ่านหินที่สัดส่วนมวลของแอมโมเนียต่าง ๆ ในรูปที่ 4 พบว่า การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนมวลของแอมโมเนียในเชื้อเพลิงผสมส่งผลให้การปล่อย CO_2 ลดลง จนไม่มีการปล่อย CO_2 เมื่อเผาไหม้แอมโมเนียร้อยละ 100 ทั้งนี้ เนื่องจากแอมโมเนียเป็นเชื้อเพลิงที่ปราศจากคาร์บอน ซึ่งผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับผลที่ได้จากงานวิจัยของ Wang และคณะ [13] Xie และคณะ [15] และ Li และคณะ [16] ที่พบว่า การเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหินนำไปสู่การปล่อย CO_2 ที่ลดลง นอกจากนี้ ยังพบว่า การปล่อย CO_2 มีค่าน้อยที่สุดเมื่อใช้อากาศเกินพอร้อยละ +15 ซึ่งน่าจะมาจากการที่ก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ (flue gas) ถูกเจือจางจากปริมาณอากาศเกินพอที่มี N_2 ในสัดส่วนถึงร้อยละ 79



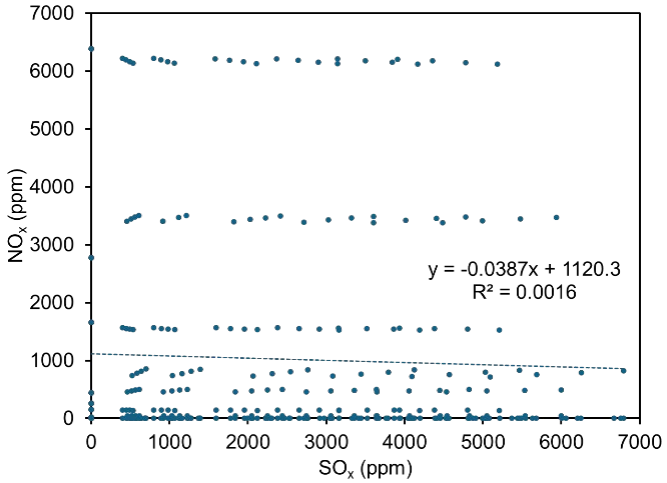
รูปที่ 4 ความเข้มข้นของ CO_2 ที่ได้จากการเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหินที่มีสัดส่วนมวลของแอมโมเนียในเชื้อเพลิงผสมในช่วงร้อยละ 0-100 และปริมาณอากาศเกินพอต่าง ๆ ที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ 500 °C สำหรับถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถัน (S) ร้อยละ 0.5

เมื่อปริมาณของกำมะถัน (S) ในถ่านหินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การปล่อยออกไซด์ของกำมะถัน (SO_x) จากการเผาไหม้เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนมวลของแอมโมเนียในเชื้อเพลิงผสมระหว่างแอมโมเนียกับถ่านหินส่งผลให้การปล่อย SO_x ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5 ทั้งนี้ เนื่องจากการเพิ่มสัดส่วนมวลของแอมโมเนียในเชื้อเพลิงผสม ทำให้เชื้อเพลิงผสมมีถ่านหินในสัดส่วนที่ลดลง จึงส่งผลให้กำมะถันในเชื้อเพลิงผสมลดลงตามไปด้วย การปล่อย SO_x จึงลดลง



รูปที่ 5 ความเข้มข้นของ SO_x ที่ได้จากการเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหินที่มีสัดส่วนมวลของแอมโมเนียในเชื้อเพลิงผสมในช่วงร้อยละ 0-100 และปริมาณกำมะถันในถ่านหินต่าง ๆ ที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ 2,000 °C และปริมาณอากาศเกินพอร้อยละ +15

จากการพิจารณาผลของการปล่อย SO_x ที่มีการปล่อย NO_x ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของ SO_x ส่งผลให้การปล่อย NO_x ลดลงเล็กน้อย แสดงว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณกำมะถันในถ่านหิน (S) ส่งผลให้การปล่อย NO_x ลดลงเล็กน้อย ซึ่งน่าจะมีเหตุผลมาจากการเกิด SO_x และ NO_x ต่างต้องใช้อนุมูล (radical) เดียวกัน นั่นคือ H, O, และ OH radicals ดังนั้น เมื่ออนุมูลเหล่านี้ถูกใช้ไปสำหรับการเกิด SO_x (จาก S) ซึ่งมีพลังงานกระตุ้น (activation energy) ต่ำกว่าการเกิด NO_x (จาก N_2 ในอากาศ) ไปแล้ว จึงเหลืออนุมูลที่ต้องใช้สำหรับการเกิด NO_x ลดลง ส่งผลให้การปล่อย NO_x ลดลง [19]



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ SO_x กับความเข้มข้นของ NO_x จากการเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันสูง

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการเผาไหม้แอมโมเนียร่วมกับถ่านหินด้วยการจำลองกระบวนการโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus พบว่า การเพิ่มสัดส่วนมวลของแอมโมเนียในเชื้อเพลิงผสมระหว่างแอมโมเนียกับถ่านหินส่งผลให้การปล่อย CO_2 ลดลง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของการเผาไหม้และอากาศเกินพอส่งผลให้มีการปล่อย NO_x เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มสัดส่วนมวลของแอมโมเนียในเชื้อเพลิงผสมไม่ส่งผลต่อการปล่อย NO_x การเพิ่มขึ้นของปริมาณกำมะถันในถ่านหินส่งให้การปล่อย SO_x เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มสัดส่วนมวลของแอมโมเนียในเชื้อเพลิงผสมทำให้การปล่อย SO_x ลดลง นอกจากนี้ ยังพบว่า การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของ SO_x ส่งผลให้การปล่อย NO_x ลดลงเล็กน้อย

เอกสารอ้างอิง

[1] Kobaysahi, H., Hayakawa, A., Somarathne, K.D.K.A., & Okafor, E. (2019). Science and technology of ammonia combustion. *Progress of the Combustion Institute 37*, 109-133.

[2] Elbaz, A.M., Wang, S., Guiberti, T.F., & Roberts, W.L. (2022). Review on the recent advances on ammonia combustion from the fundamentals to the applications. *Fuel Communications 10*, 100053.

[3] Alnasif, A., Marshruk, S., Shi, H., Alnajideen, M., Wang, P., Pugh, D., & Valera-Medina, A. (2023). Evolution of ammonia-reaction mechanisms and modeling parameters: A review. *Application in Energy and Combustion Science 15*, 100175.

[4] vanLoon, G.W. & Duffy, S.J. (2017). *Environmental Chemistry: A Global Perspective*. 4th ed. UK: Oxford University Press.

[5] European Commission (n.d.). The Kyoto Protocol: The world's first international treaty to reduce greenhouse gas emissions. Retrieved from https://climate.ec.europa.eu/eu-action/international-action-climate-change/kyoto-protocol_en.

[6] UNFCCC secretariat (n.d.). Key aspects of the Paris Agreement. Retrieved from https://unfccc.int/most-requested/key-aspects-of-the-paris-agreement.

[7] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (2566). แผนปฏิบัติราชการระยะ 5 ปี (พ.ศ. 2566-2570). สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. กรุงเทพฯ: สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน.

[8] กุลิศ สมบัติศิริ (2023). Thailand's Energy Policy. กรุงเทพฯ: สำนักงานปลัดกระทรวงพลังงาน. กระทรวงพลังงาน. Retrieved from https://www.thailand-energy-academy.org/assets/upload/coursedocument/file/Thailand's%20Energy%20Policy.pdf.

[9] โศรดา ขุนโหร (2544). แอมโมเนียกับอุตสาหกรรม. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ 49(157)*, 11-13.

[10] ยุทธศรี หล้ามณี (ม.ป.ป.): คุณสมบัติของแอมโมเนียและการรั่วซึม. บริษัท มายคอม (ประเทศไทย) จำกัด. สืบค้นจาก: https://www.netenergy-tech.com/doc/knowledge/Properties_and_leakage_of_ammonia_gas.pdf.

[11] Alnajideen, M., Shi, H., Northrop, W., Emberson, D., Kane, S., Czyzewski, P., Alnaeli, M., Mashruk, S., Rouwenhorst, K., Yu, C., Eckart, S., & Valera-Medina, A. (2024). Ammonia combustion and emissions in practical applications: a review. *Carbon Neutrality 3*, 13.

[12] Butterworth, P. (2022). Green ammonia fuel faces three big challenges. London: CRU. Retrieved from: https://www.crugroup.com/en/communities/thought-leadership/sustainability/green-ammonia-fuel-faces-threebig-challenges/.

[13] Wang, X., Fan, W., Chen, J., Feng, G., & Zhang, X. (2022). Experimental study and kinetic analysis of the impact of ammonia co-firing ratio on products formation characteristics in ammonia/coal co-firing process. *Fuel 329*, 125496.

[14] Wang, X., Fan, W., Chen, J., & Zhang, H. (2024). Experimental study of effect of a novel ammonia/coal co-firing mode on NO_x emission under high temperature conditions. *Renewable Energy 235*, 121379.

[15] Xie, Y., Yan, J., Li, J., Zhang, C., Liu, X., Zhang, W., & Wang, H. (2024). Experimental study on the effects of ammonia cofiring ratio and injection mode on the NO_x emission characteristics of ammonia-coal cofiring. *Fuel 363*, 130996.

[16] Li, T., Li, L., Liu, C., Liu, H., Sun, G., Ding, N., Lu, D., & Duan, L. (2024). Investigating combustion efficiency and NO_x emission reduction in fluidized bed ammonia co-firing. *Combustion and Flame 270*, 113735.

[17] Pintana, P. & Tippayawong, N. (2013). Nonisothermal Thermogravimetric Analysis of Thai Lignite with High CaO Content. *The Scientific World Journal*. 216975.

[18] Turns, S.R. (2012). *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. 3rd ed. Singapore: McGraw-Hill.

[19] Glassman, I., Yetter, R.A., & Glumac, N.G. (2015). *Combustion*. 5th ed.: Elsevier.