

การศึกษาผลของการป้อนอากาศแบบขั้นต่อการเกิดก๊าซ NO และ N₂O
จากการเผาไหม้ลิกไนต์ในเตาเผาแบบฟลูอิดไชด์เบด
Effects of Air Staging on NO and N₂O Emissions of
Lignite Combustion in a Fluidised Bed Combustor

พรวิภา บุญนุช^{*} สุธรรม ปทุมสวัสดิ์ และบัณฑิต ฟุ้งธรรมสาร
ศูนย์วิจัยการเผาไหม้ของเสีย ภาควิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถ.พิบูลสงคราม บางซื่อ กทม. 10800
โทรศัพท์ 0-2913-2500 ต่อ 8303, โทรสาร 0-2586-9541, อีเมลล์ : stt@kmitnb.ac.th

Pornwipa BOONNUCH^{*}, Suthum PATUMSAWAD and Bundit FUNGTHAMMASAN
Waste Incineration Research Centre (WIRC)
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
1518 Pibulsongkram Rd. Bangsue Bangkok 10800
Tel. +66 2913 2500 ext 8303 Fax. +66 2587 9541 E-mail: stt@kmitnb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าผลของการป้อนอากาศแบบขั้นต่อการเกิด NO และ N₂O โดยมีวัตถุประสงค์คือหาผลกระทบของอากาศส่วนเกิน สัดส่วนและตำแหน่งในการฉีดอากาศทุติยภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ พฤติกรรมการเผาไหม้ การเกิดก๊าซต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ก๊าซ NO และ N₂O โดยผลการทดลองได้จากการเผาไหม้ลิกไนต์ที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ (H) สามตำแหน่งได้แก่ที่ตำแหน่ง 525, 675 และ 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลมภายในเตา โดยทุกกรณีทำการเผาไหม้ที่สภาวะปริมาณอากาศส่วนเกิน 40, 60 และ 80% และสัดส่วนของปริมาณอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (SA) 0.1, 0.2 และ 0.3 ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่ายิ่งความสูงของตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิ (H) และสัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (SA) มีค่าเพิ่มมากขึ้น จะมีผลให้ความเข้มข้นของก๊าซ NO มีค่าลดลง โดยมีค่าลดลงสูงสุดถึง 83% เมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิจาก 525 มิลลิเมตร เป็น 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลม ที่สัดส่วน SA = 0.3 ซึ่งตรงกันข้ามกับแนวโน้มของการเกิด N₂O ปรากฏการณ์นี้ถูกอธิบายด้วยปฏิกิริยาลด NO ด้วยถ่านคาร์บอนและก๊าซ CO ทั้งปฏิกิริยาที่สถานะเดียวกันและต่างสถานะบนพื้นฐานของการเผาไหม้สภาวะขาดแคลนออกซิเจน อย่างไรก็ตามการเผาไหม้ที่สภาวะอากาศส่วนเกินสูงมี

ผลให้ก๊าซ NO เพิ่มขึ้น 62 % ในขณะที่ไม่มีผลต่อการเกิด N₂O สำหรับค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ η_{CE} และ η'_{CE} นั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิ (คำสำคัญ : fluidised bed, NO, N₂O, air staging)

Abstract

In this study, effects of secondary air staging on NO and N₂O emissions in FBC of Thai lignite were investigated. The purposes were to determine the influence excess air (EA), degree (SA) and position (H) of air staging on the combustion efficiency, characteristic of combustion and gas emission—especially emissions of NO and N₂O gas species. Experimental data of lignite combustion were obtained from the conditions of three values of secondary air nozzle height: 525, 675 and 825 mm above air distribution plate. In each case, the excess ratio was varied for three values: 40, 60 and 80% and degree of air staging was varied for: 0.1, 0.2 and 0.3. The results show that, the higher the secondary-air nozzle height and the greater the degree of air staging, the less NO emission will be formed. NO concentration sharply decrease to 83% when the secondary air nozzle height is

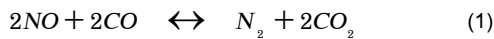
* Corresponding author

increased from 525 mm to 825 mm above air distribution plate at SA = 0.3, opposite the trend of N₂O.

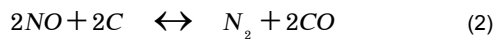
(keywords : fluidised bed, NO, N₂O, air staging)

1. บทนำ

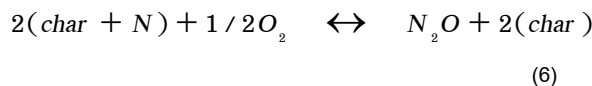
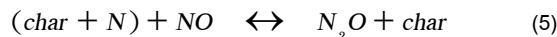
ในการเผาไหม้ลิกไนต์ในเตาฟลูอิดไคซ์เบด จะส่งผลให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์ (NO) และไนตรัสออกไซด์ (N₂O) ขึ้น วิธีการลดจำนวนไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์โดยใช้วิธีป้อนอากาศแบบขั้น (staging air) เป็นอีกวิธีหนึ่งสำหรับการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ในเตาฟลูอิดไคซ์เบดซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการเผาไหม้ที่บริเวณความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำ โดยอากาศส่วนแรกหรืออากาศปฐมภูมิ (primary air) จะถูกป้อนเข้าสู่เตาฟลูอิดไคซ์เบดจากทางด้านล่างของแผ่นกระจายลม (air distributor) และอากาศส่วนที่สองหรืออากาศทุติยภูมิ (secondary air) จะถูกป้อนเข้าสู่บริเวณเหนือเบด (freeboard) เมื่อกระบวนการสันดาปเกิดขึ้นที่สภาวะความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำ CO และอนุภาคคาร์บอน (char) จึงยังคงมีอยู่ในปริมาณที่สูง



และ



เมื่อป้อนอากาศทุติยภูมิที่มีอุณหภูมิต่ำเข้าไปยังบริเวณเหนือเบด CO จะรวมตัวกับออกซิเจน ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ แต่ทว่าในขณะที่เดียวกันที่การเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำ (T<900°C) เช่น การเผาไหม้ภายในเตา ฟลูอิดไคซ์เบดนั้น N₂O สามารถเกิดขึ้นได้จากสมการต่อไปนี้ [1] คือ



ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ ด้วยวิธีป้อนอากาศแบบขั้น โดยทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการใส่อากาศทุติยภูมิ (secondary air) ในบริเวณฟรีบอร์ด เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ในเตาทดลองฟลูอิดไคซ์เบด โดยใช้ลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง

2. อุปกรณ์และเครื่องมือทดลอง

เตาเผาที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเตาฟลูอิดไคซ์เบดขนาดห้องปฏิบัติการ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 ลักษณะเตาเป็นท่อทรงกระบอกทำจากสแตนเลสเกรด 310S ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 115 mm. สูง 2.4 m. ภายนอกหุ้มด้วยฉนวนไฟเบอร์เซรามิก ใช้ทรายซิลิกาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 500 μm และความหนาแน่น 2600 kg/m³ เป็นวัสดุเบด อากาศส่วนแรกถูกป้อนเข้าสู่ด้านล่างของเตาผ่านรูอากาศของแผ่นกระจายลมจำนวน 96 รู แต่ละรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm.

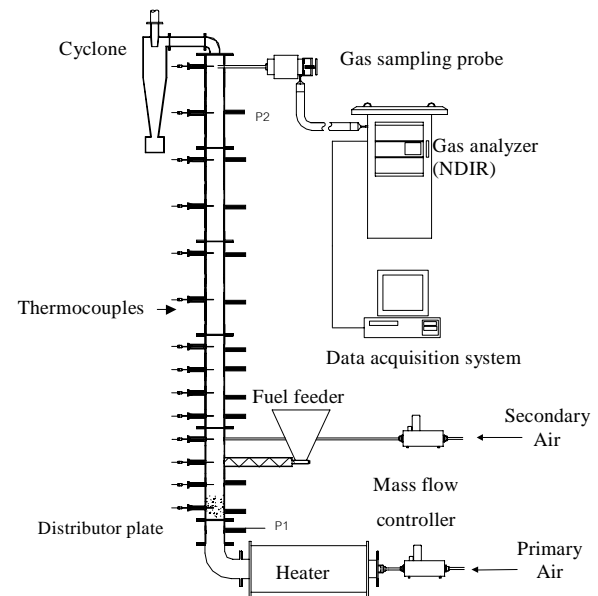
อากาศจะถูกอุ่นให้มีอุณหภูมิประมาณ 600°C ก่อนเข้าสู่เตาด้วยเครื่องทำความร้อนขนาด 18 กิโลวัตต์ ซึ่งจะส่งผลให้ทรายในเบดมีอุณหภูมิเฉลี่ย ≈500°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สามารถจุดลิกไนต์ให้ติดไฟในช่วงเริ่มต้นของการเผาไหม้ จากนั้นอุณหภูมิจะสูงขึ้นเนื่องจากการเผาไหม้จากเชื้อเพลิง ซึ่งในที่นี้ใช้ลิกไนต์ในกลุ่มที่มีปริมาณเถ้าและซัลเฟอร์มาก ซึ่งองค์ประกอบของเชื้อเพลิงได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 Proximate analysis (% wt, as received) of lignite

Moisture	Volatile	Fixed carbon	Ash	LHV (MJ/kg)
10.0	38.5	37.0	14.5	20.2

ตารางที่ 2 Ultimate analysis (% wt, as received) of lignite

C	H	O	N	S
49.1	4.0	25.4	1.5	4.4



ภาพที่ 1 รูปเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดขนาดห้องปฏิบัติการ

คุณลักษณะที่แสวงหา คือ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ พฏิกิริมการเผาไหม้ และการเกิดก๊าซต่างๆ โดยตำแหน่งที่ป้อนอากาศทุติยภูมิ ได้แก่ที่ตำแหน่ง 525, 675 และ 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลมภายในเตาฟลูอิดไธซ์เบด และทำการป้อนเชื้อเพลิงอัตราป้อนคงที่ 760 กรัมต่อชั่วโมง สำหรับตัวแปรที่ทำการศึกษประกอบด้วยสัดส่วนของปริมาณอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (SA) ได้แก่ 0.1, 0.2 และ 0.3 และในทุกกรณีทำการเผาไหม้ที่สภาวะปริมาณอากาศส่วนเกิน 40, 60 และ 80% ได้ตั้งตารางที่ 3 โดยการบันทึกข้อมูลการทดลองกระทำเมื่อการเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) และเก็บข้อมูลอย่างน้อย 300 ข้อมูลสำหรับการทดลองในแต่ละสภาวะ ค่าความเข้มข้นของก๊าซต่างๆแสดงในหน่วยของร้อยละ (%) โดยปริมาตร และส่วนในล้านส่วน (ppm) ซึ่งเปรียบเทียบกับปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนที่ 6%

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้จริงต่ออากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ในทางทฤษฎีที่สภาวะการทดลองต่างๆ

EA (%) \ SA	40	60	80
0.1	1.26	1.44	1.62
0.2	1.12	1.26	1.44
0.3	0.98	1.12	1.26

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลของอากาศส่วนเกิน

3.1.1 พฏิกิริมและประสิทธิภาพการเผาไหม้

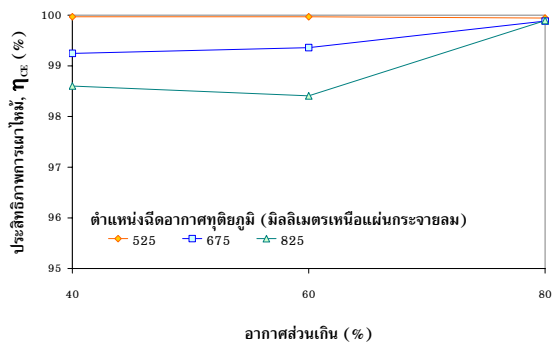
ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ η_{ce} ที่นำมาใช้พิจารณาตัวแรกได้จากการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซ CO และก๊าซ CO₂ ที่ได้จากการเผาไหม้ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนอนุภาคคาร์บอนและก๊าซ CO ไปเป็นก๊าซ CO₂ โดยไม่พิจารณาถึงอนุภาคคาร์บอนที่สูญเสีย ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{ce} = \frac{[CO_2]}{[CO] + [CO_2]} \times 100\% \quad (7)$$

เมื่อ [] คือค่าความเข้มข้นของก๊าซที่วัดได้

เมื่อทำการเผาไหม้ในสภาวะสัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (SA) เท่ากับ 0.2 โดยทำการเปลี่ยนตำแหน่งการฉีดอากาศ ทุติยภูมิและเพิ่มอากาศส่วนเกินครั้งละ 20% โดยให้อากาศส่วนเกินมีค่าเท่ากับ 40%, 60% และ 80% นั้น จากภาพที่ 2 จะเห็นว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ η_{ce} มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งในการฉีดอากาศทุติยภูมิ ที่ทุกสภาวะของอากาศส่วนเกิน โดยจะเห็นได้อย่างชัดเจนที่สภาวะอากาศส่วนเกิน 40% และ 60% ซึ่งค่า

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สภาวะดังกล่าวมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 98.4-100% เมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งในการฉีดอากาศทุติยภูมิเป็น 675 และ 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลม โดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 98.4% ที่สภาวะอากาศส่วนเกิน 60% ในขณะที่ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สภาวะอากาศส่วนเกิน 80% มีค่าเฉลี่ย $\approx 100\%$ ที่ทุกตำแหน่งของการป้อนอากาศ ทุติยภูมิ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่มากเป็นผลดีต่อการเผาไหม้ของถ่านคาร์บอนและก๊าซ CO โดยส่งผลให้เกิดการออกซิไดซ์ไปเป็น CO₂ ได้มากขึ้น ในขณะที่การลดลงของค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้เมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมินั้นน่าจะเกิดมาจากสาเหตุจากการป้อนอากาศทุติยภูมิในตำแหน่งที่สูง จะตรงกับบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ (ภาพที่ 3) ซึ่งไม่เหมาะสมกับการเผาไหม้ก๊าซ CO ที่บริเวณดังกล่าว ซึ่งในที่นี่สังเกตได้ว่าค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ของทุกสภาวะอากาศส่วนเกินที่ตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิ 525 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลมมีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 100% ซึ่งเป็นการสนับสนุนเหตุผลที่ได้กล่าวมาในข้างต้น เนื่องจากที่ตำแหน่ง 525 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลมน้อยใกล้เคียงกับผิวของเบดมากกว่า



ภาพที่ 2 ผลของอากาศส่วนเกิน (EA) และตำแหน่งของการฉีดอากาศทุติยภูมิต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้, η_{ce}

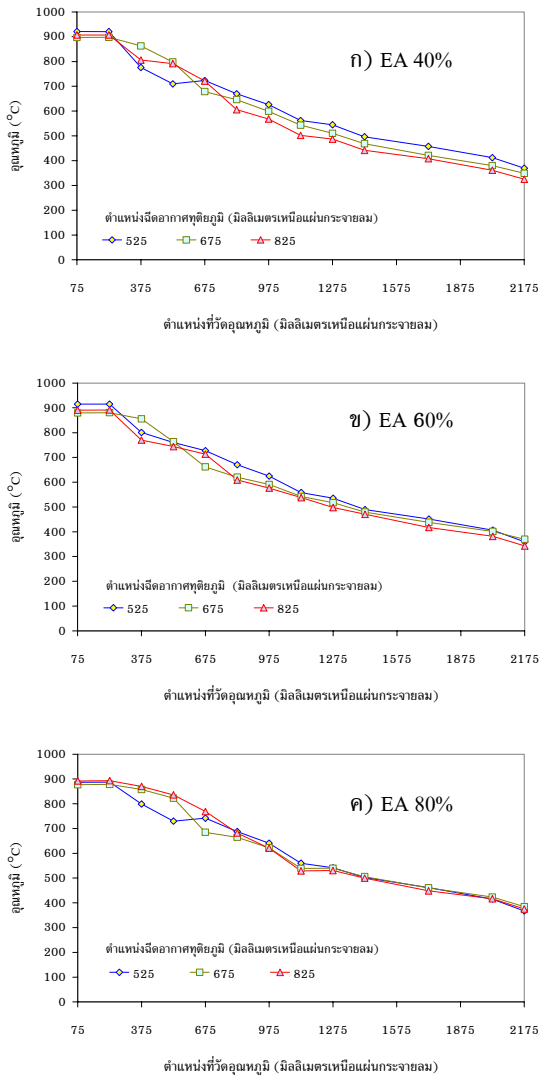
และเนื่องจากกระบวนการเผาไหม้ในเตาเผาแบบฟลูอิดไธซ์เบดจะมีอนุภาคคาร์บอนที่ยังไม่ได้เผาไหม้บางส่วนหลุดลอยออกจากเตาเผา ดังนั้นค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้อีกตัวหนึ่งจะถูกนำมาใช้เพื่อพิจารณาถึงมลพิษทั้งหมดที่มีอยู่ในก๊าซที่ทางออก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\eta'_{ce} = (B/C) \times 100 \quad (8)$$

เมื่อ B และ C คือสัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนที่ถูกเผาไหม้และคาร์บอนทั้งหมดที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงตามลำดับ

โดยค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ของคาร์บอน η'_{ce} ที่ได้จากการทดลองที่สภาวะเดียวกันนี้มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งในการฉีดอากาศทุติยภูมิที่ทุกสภาวะของอากาศส่วนเกิน จากภาพที่ 4 จะเห็นว่าค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ของ

คาร์บอน η'_{CE} ในแต่ละสภาวะของอากาศส่วนเกินนั้นมีค่าลดลงเฉลี่ย $\approx 0.5\%$ เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิจาก 525 มิลลิเมตร เป็น 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลมโดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 97.7% ที่สภาวะอากาศส่วนเกิน 80% เมื่อทำการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ ตำแหน่ง 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลม

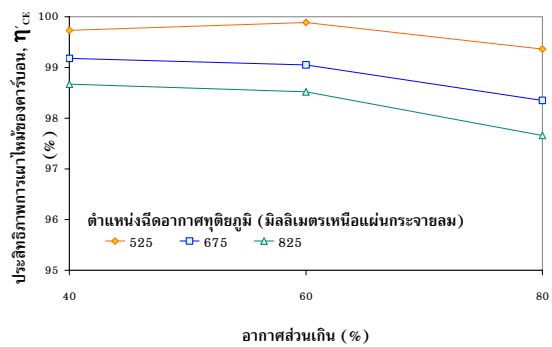


ภาพที่ 3 ผลของตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดปฏิกรณ์ในสภาวะสัดส่วน $SA=0.2$ ที่อากาศส่วนเกิน ก) 40% ข) 60% และ ค) 80%

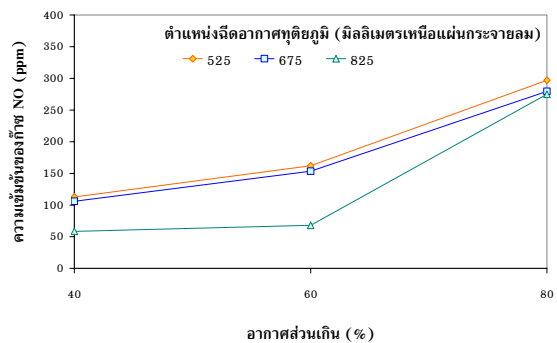
ทั้งนี้การลดลงของค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ของคาร์บอน η'_{CE} เมื่อทำการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินนั้น ผลเป็นเนื่องจากความเร็วลมที่ใช้ในการเผาไหม้เพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้แรงฉุดลากของของไหล (fluid drag) มีมากเพียงพอที่จะพัดพาให้อนุภาคถ่านคาร์บอนที่ยังไม่ได้เผาไหม้บางส่วนหลุดลอยออกจากห้องเผาไหม้ [2]

3.1.2 การปล่อยก๊าซจากการเผาไหม้

การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิให้สูงขึ้น จาก ตำแหน่ง 525 มิลลิเมตรเป็น 675 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลม มีผลทำให้ปริมาณ NO ลดลงเล็กน้อยในทุกกรณีของปริมาณอากาศส่วนเกิน และลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิจาก 675 เป็น 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลม (ภาพที่ 5) โดยความเข้มข้นของ NO สามารถลดลงได้สูงสุด 58% (จาก 162 ppm เป็น 68 ppm) เมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิเป็น 525 มิลลิเมตรจาก 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลม ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 60%

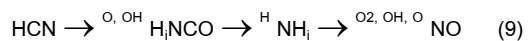


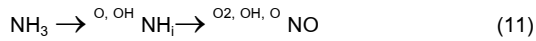
ภาพที่ 4 ผลของอากาศส่วนเกิน (EA) และตำแหน่งของการฉีดอากาศทุติยภูมิต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ของคาร์บอน, η'_{CE}



ภาพที่ 5 ผลของอากาศส่วนเกิน (EA) และตำแหน่งของการฉีดอากาศทุติยภูมิต่อปริมาณความเข้มข้นของ NO

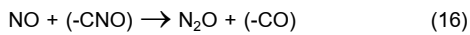
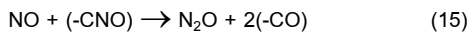
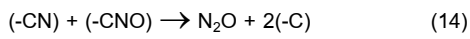
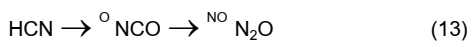
ในที่นี้จะเห็นได้ว่า NO มีค่าลดลงเมื่อลดปริมาณอากาศส่วนเกิน ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจากปริมาณออกซิเจนที่ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนในเชื้อเพลิงลดลง ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



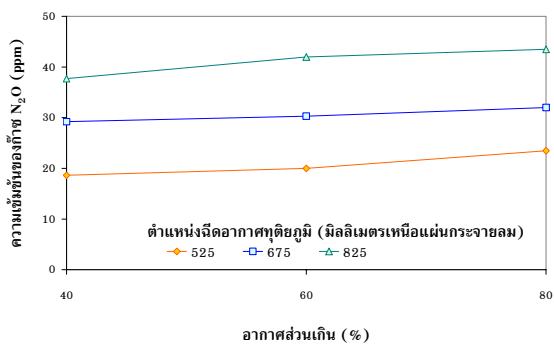


หมายเหตุ: * ฝวอนุภาค, (-) ปฏิกริยาที่ฝวอนุภาค [3]

เช่นเดียวกันกับความเข้มข้นของ N_2O ซึ่งลดลงเล็กน้อยเมื่อลดปริมาณอากาศส่วนเกิน (ดังภาพที่ 6) รวมทั้งอาจเป็นผลต่อเนื่องมาจากปริมาณ NO ที่ลดลงทำให้อัตราการทำปฏิกริยาของ NO กับออกซิเจนหรือก๊าซอื่นๆ ทั้งจากการทำปฏิกริยาที่สถานะเดียวกันหรือต่างสถานะเพื่อสร้าง N_2O ลดลงดังปฏิกริยาต่อไปนี้



ในขณะที่การเพิ่มความสูงของตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิส่งผลให้ปริมาณ N_2O เพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยความเข้มข้นของ N_2O เพิ่มขึ้นจาก 19, 20 และ 23 ppm เป็น 38, 42 และ 44 ppm เมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิเป็น 525 มิลลิเมตรจาก 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลม

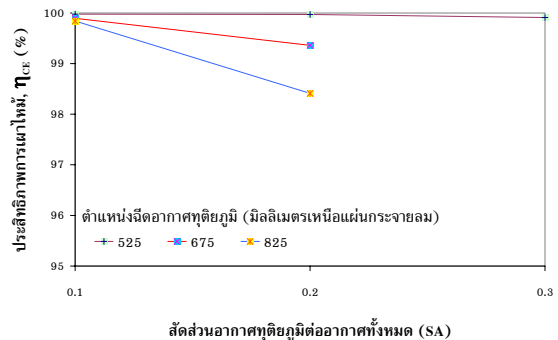


ภาพที่ 6 ผลของอากาศส่วนเกิน (EA) และตำแหน่งของการฉีดอากาศทุติยภูมิต่อปริมาณความเข้มข้นของ N_2O

3.2 ผลของสัดส่วนอากาศทุติยภูมิ

3.2.1 พฏิกิริยาและประสิทธิภาพการเผาไหม้

เมื่อทำการเผาไหม้ในสัดส่วนอากาศส่วนเกิน 60% โดยทำการเปลี่ยนตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิและลดสัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (SA) ลงครั้งละ 0.1 โดยให้สัดส่วนอากาศทุติยภูมิมีค่าเท่ากับ 0.1, 0.2 และ 0.3 นั้น พบว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วน SA และความสูงของตำแหน่งในการฉีดอากาศ ทุติยภูมิ จากภาพที่ 7 จะเห็นได้ว่าความชันของกราฟจะยิ่งเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งในการฉีดอากาศทุติยภูมิ SA โดยค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าสูงสุด 100% เมื่อฉีดอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 525 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลมที่สัดส่วน SA=0.1 และมีค่าต่ำสุดที่ 98.4% เมื่อฉีดอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลม ที่ SA=0.2 โดยมีค่าลดลงจากเดิม 1.6% ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิเบดซึ่งเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วน SA เพิ่มขึ้น และที่บริเวณเหนือเบดขึ้นไปอุณหภูมิจะลดลงตามความสูงอยู่แล้ว (ดังภาพที่ 7) ดังนั้นการป้อนอากาศทุติยภูมิในตำแหน่งที่สูงขึ้นจะตรงกับบริเวณที่อุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้อุณหภูมิเหนือเบดลดลงเนื่องจากการพาความร้อน (convective cooling) ซึ่งไม่เอื้อต่อการเผาไหม้ที่บริเวณเหนือเบดอันเป็นสาเหตุให้ปริมาณ CO สูงขึ้น (ดังภาพที่ 8) ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องจากการลดอัตราส่วนอากาศพอดี (stoichiometric ratio) ที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ในเบด เมื่อ SA เพิ่มขึ้นด้วย ดังตารางที่ 3



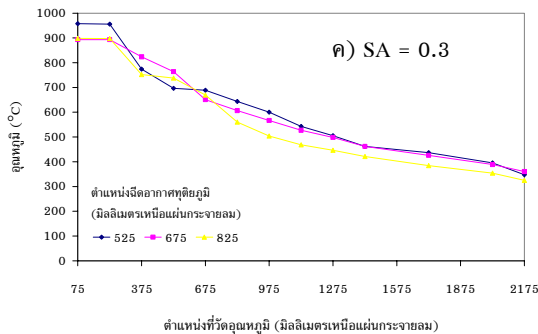
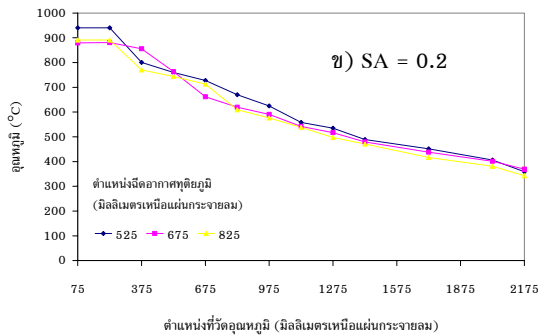
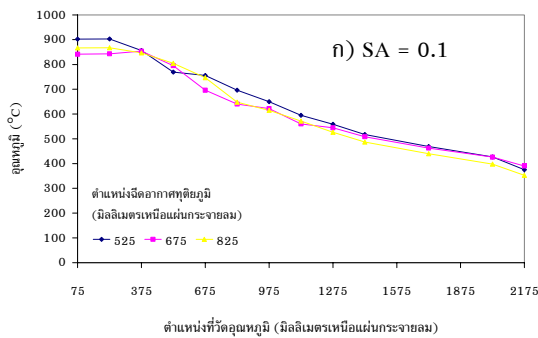
ภาพที่ 7 ผลของสัดส่วนอากาศทุติยภูมิ (SA) และตำแหน่งของการฉีดอากาศทุติยภูมิต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้, η_{CE}

จากภาพที่ 9 เนื่องจากความเข้มข้นของ CO จากการเผาไหม้ที่สภาวะ SA=0.3 ณ ตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิที่ 675 และ 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลมมีค่ามากกว่าขีดจำกัดของเครื่องมือวัด (ขีดจำกัดที่ 3,000 ppm) จึงไม่สามารถทราบปริมาณความเข้มข้นของ CO ที่แท้จริงได้ ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ได้จากการคำนวณที่สภาวะดังกล่าวได้เช่นเดียวกัน

ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ของคาร์บอน η'_{CE} ที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้ขึ้นอยู่กับทั้งตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิและสัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 10 สำหรับการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 525 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลมเป็นตำแหน่งที่ให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เชิงคาร์บอนสูงสุด ซึ่งมีค่าประมาณ 100% และมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งในการ

ฉีดอากาศทุติยภูมิและ SA โดยมีค่าประสิทธิภาพ การเผาไหม้ต่ำสุด เท่ากับ 98.5% ที่ตำแหน่ง 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลมและ SA=0.2

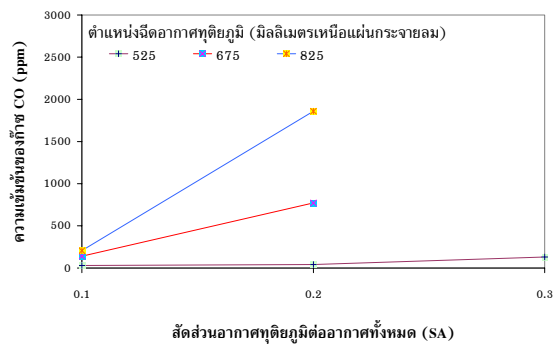
ทั้งนี้อธิบายได้ว่าการเพิ่ม SA น่าจะส่งผลให้ปริมาณอนุภาค คาร์บอนที่ยังไม่ได้เผาไหม้และ CO หลงเหลืออยู่ในเบดเป็นจำนวนมาก และเมื่อถูกพัดพาขึ้นสู่บริเวณเหนือเบดจะมีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ได้รับการเผาไหม้ เนื่องจากการป้อนอากาศทุติยภูมิในตำแหน่งที่สูงจะตรงกับบริเวณที่อุณหภูมิต่ำ (ดังแสดงในภาพที่ 8) ซึ่งสังเกตได้ว่าแม้ว่าอุณหภูมิเบดจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วน SA แต่อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปฏิกรณ์กลับต่ำกว่ากรณีที่มีสัดส่วน SA ต่ำ ดังนั้นจึงทำให้สารที่เผาไหม้ได้บางส่วนถูกพัดพาออกจากห้องเผาไหม้ซึ่งเป็นผลให้มีอัตราการหลุดลอย (Carry-over) สูง ประสิทธิภาพการเผาไหม้เชิงคาร์บอนจึงมีค่าลดลง



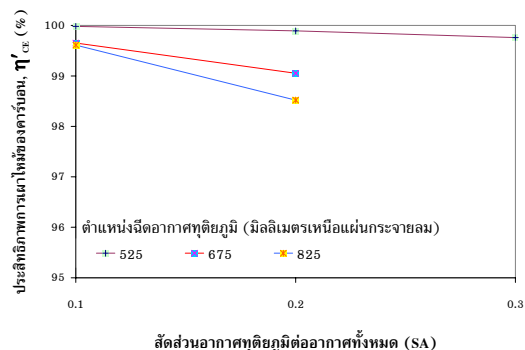
ภาพที่ 8 ผลของตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิต่อการกระจายอุณหภูมิที่ ก) SA=0.1, ข) SA=0.2 และ ค) SA=0.3

3.2.2 การปล่อยก๊าซจากการเผาไหม้

เมื่อทำการเปรียบเทียบ NO ที่ได้จากกรทดลองเปลี่ยนแปลงค่า SA พบว่าโดยส่วนใหญ่ NO มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งในการฉีดอากาศทุติยภูมิ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ SA มีค่าตั้งแต่ 0.2 ขึ้นไป ปริมาณ NO จะลดลงอย่างมาก (ภาพที่ 11) โดยสามารถลดลงได้สูงสุดถึง 83% (จาก 118 ppm เป็น 20 ppm) เมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งในการฉีดอากาศทุติยภูมิจาก 525 มิลลิเมตร เป็น 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลม ที่ SA=0.3 จากภาพที่ 11 แสดงให้เห็นว่าการลดลงของ NO ในเตาฟลูอิดไธซ์เบดจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อ SA และตำแหน่งในการฉีดอากาศทุติยภูมิเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น จากปรากฏการณ์ดังกล่าว อาจเป็นเพราะ NO ในบริเวณเหนือเบดลดลงด้วยปฏิกิริยาการลด NO ที่การเผาไหม้สถานะเดียวกัน (homogeneous reduction) ระหว่าง NO และ CO โดยมีผิวอนุภาคถ่านที่เหลือจากการเผาไหม้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งสูง (อุณหภูมิต่ำ) มีผลให้ทั้ง CO และอนุภาคถ่านที่เหลือจากการเผาไหม้มีปริมาณมากขึ้น (ดังภาพที่ 9) ทั้งยังเพิ่มระยะเวลาในการเผาไหม้ของอนุภาคในบริเวณรีดิวซ์ (reducing zone) จึงเอื้อต่อการลด NO



ภาพที่ 9 ผลของสัดส่วนอากาศทุติยภูมิ (SA) และตำแหน่งของการฉีดอากาศทุติยภูมิต่อปริมาณความเข้มข้นของ CO

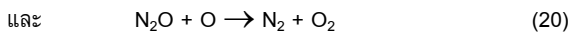
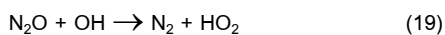
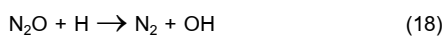


ภาพที่ 10 ผลของสัดส่วนอากาศทุติยภูมิ (SA) และตำแหน่งของการฉีดอากาศทุติยภูมิต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ของคาร์บอน (η'_{ce})

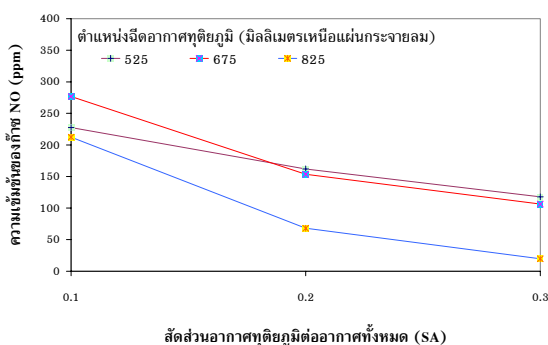
ผลของการป้อนอากาศแบบขั้นต่อการปล่อย N_2O แสดงไว้ในภาพที่ 12 พบว่าการเพิ่มสัดส่วน SA จาก 0.1 เป็น 0.2 นั้น มีผลให้ N_2O มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (2-12 ppm) เมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งในการฉีดอากาศทุติยภูมิจาก 525 มิลลิเมตรเป็น 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลม ในขณะที่แนวโน้มดังกล่าวจะเห็นได้อย่างชัดเจนที่สัดส่วน SA=0.3 โดยค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจากเดิม 14 ppm เป็น 88 และ 114 ppm เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิจากตำแหน่ง 525 มิลลิเมตรเป็นตำแหน่ง 675 และ 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลมตามลำดับ

ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากสองประการ ดังนี้

ก) เนื่องจากการเพิ่มความสูงของตำแหน่งในการฉีดอากาศทุติยภูมิจากเดิมที่ตำแหน่ง 525 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลม มาเป็น 675 และ 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลมนั้น ส่งผลให้อุณหภูมิภายใน เบทลดลงจนต่ำกว่า $900^\circ C$ เล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าความเข้มข้นของอนุภาคอิสระ H, OH และ O ซึ่งเป็นตัวลด N_2O มีค่าน้อยกว่ากรณีที่อุณหภูมิสูง ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงจะเป็นตัวเร่งอัตราการสลายตัวของ N_2O เนื่องจากความร้อน (thermal decomposition) และเพิ่มการชนกันของอนุภาคอิสระกับ N_2O [1]



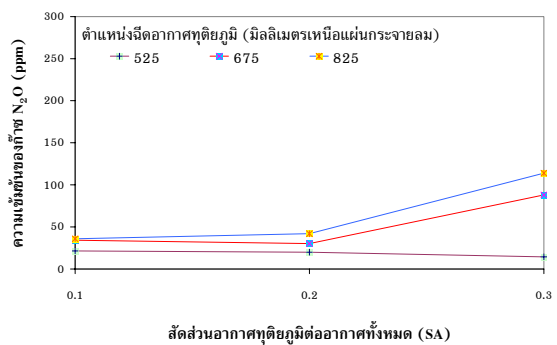
ข) เนื่องจากตำแหน่งในการฉีดอากาศทุติยภูมิที่สูงขึ้นมีผลให้ CO มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก (ดังภาพที่ 9) ดังนั้นจึงอาจเป็นไปได้ว่าอนุภาคอิสระประเภท OH และ O อาจถูกแย่งไปในปฏิกิริยาที่ทำให้เกิด CO ทำให้ปฏิกิริยาในการลด N_2O โดยอนุภาคดังกล่าวมีโอกาสน้อยลง



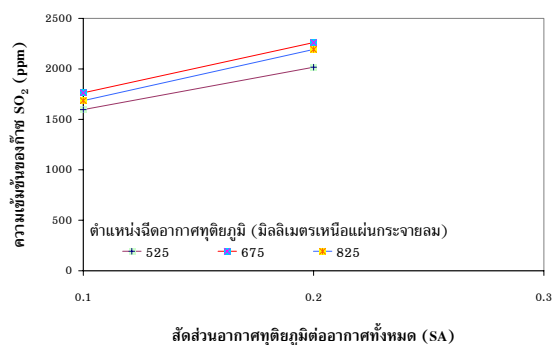
ภาพที่ 11 ผลของสัดส่วนอากาศทุติยภูมิ (SA) และตำแหน่งของการฉีดอากาศทุติยภูมิต่อปริมาณความเข้มข้นของ NO

จากภาพที่ 13 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลง SA และตำแหน่งของการป้อนอากาศแบบขั้นทั้งสามตำแหน่งต่อการปล่อย SO_2 พบว่า

ในทุกกรณี SO_2 จะเพิ่มอย่างมากเมื่อเพิ่ม SA จาก 0.1 ถึง 0.2 โดยความเข้มข้นของ SO_2 เพิ่มขึ้นจาก 1597, 1764 และ 1685 ppm เป็น 2016, 2261 และ 2193 ppm เมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิจาก 525 มิลลิเมตรเป็น 675 และ 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลม โดยในที่นี้ค่าความเข้มข้นของ SO_2 ที่สภาวะ SA=0.1 มีค่ามากเกินกว่าขีดจำกัดของเครื่องวัดก๊าซจึงไม่สามารถวัดค่าได้ สำหรับการเพิ่มขึ้นของ ของ SO_2 นั้นอาจเป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มอัตราส่วน SA ทำให้การเผาไหม้ในช่วงแรก (primary zone) เป็นการเผาไหม้ที่ใกล้กับสภาวะอากาศพอดี (stoichiometric condition) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่สภาวะ SA=0.3 จะเป็นสภาวะที่มีเชื้อเพลิงเข้มข้น (fuel-rich zone) ซึ่งส่งผลให้เกิด H_2S ในปริมาณมาก ดังนั้นเมื่อทำการฉีดอากาศทุติยภูมิเข้าสู่บริเวณเหนือเบต ออกซิเจนที่รวมตัวกับ H_2S จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิด SO_2 [4] ในขณะที่เดียวกันการฉีดอากาศทุติยภูมิเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่ตำแหน่งต่ำ (525 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลม) มีผลให้อัตราการปล่อย SO_2 น้อยกว่าที่ตำแหน่งสูง (675 และ 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลม) เล็กน้อย



ภาพที่ 12 ผลของสัดส่วนอากาศทุติยภูมิ (SA) และตำแหน่งของการฉีดอากาศทุติยภูมิต่อปริมาณความเข้มข้นของ N_2O



ภาพที่ 13 ผลของสัดส่วนอากาศทุติยภูมิ (SA) และตำแหน่งของการฉีดอากาศทุติยภูมิต่อปริมาณความเข้มข้นของ SO_2

ทั้งนี้อาจเป็นเพราะที่ตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิต่ำมีอุณหภูมิภายในเบตสูงกว่าที่ตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิสูง ซึ่งอุณหภูมิที่สูง

นั้นอาจจะเป็นตัวเพิ่มอัตราการทำปฏิกิริยาของอนุภาคถ่านและนำไปสู่การลดความเข้มข้นของ SO₂ แต่ทว่าผลที่ได้จากการทดลองนี้ยังไม่ชัดเจนพอที่จะสรุปได้ว่าตำแหน่งในการฉีดอากาศทุติยภูมิมีผลในการเพิ่มหรือลดปริมาณ SO₂

4. สรุป

จากการทดลองทั้งหมด สามารถสรุปผลได้ดังนี้

4.1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ η_{CE} และ η'_{CE} มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งในการฉีดอากาศทุติยภูมิและสัดส่วนอากาศทุติยภูมิ

4.2 ความเข้มข้นของ NO มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งในการฉีดอากาศทุติยภูมิ และสัดส่วน SA โดยสามารถลดลงได้สูงสุดถึง 83% เมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งในการฉีดอากาศทุติยภูมิจาก 525 มิลลิเมตร เป็น 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลม ที่ SA=0.3

4.3 อัตราการปล่อย N₂O โดยส่วนใหญ่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งในการฉีดอากาศทุติยภูมิ

4.4 การเพิ่มสัดส่วน SA ทำให้ความเข้มข้นของ SO₂ มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ผลของตำแหน่งในการฉีดอากาศทุติยภูมิต่อการเกิดก๊าซ SO₂ ไม่ชัดเจนพอที่จะสรุปได้

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Findlay, K. and Probert, S. D. "Limiting NO_x and SO₂ emissions from an industrial-size fluidised-bed combustor." Applied Energy. 45, (1993) : 1-99.
- [2] Suksankraisorn, K. [et al.]. "Combustion characteristics of Thai lignite in a fluidized bed." การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย. ครั้งที่ 15 (พฤศจิกายน 2543) : 20-21
- [3] Leckner, B. "Fluidized Bed Combustion: Mixing and Pollutant Limitation." Prog. Energy Combust. Sci., 24 (1998) : 31-61.
- [4] Suksankraisorn, K. [et al.]. "SO₂ emission and control during fluidized-bed combustion of Thai lignite" Proceedings of the 1st National Environmental Conference. January 2002.