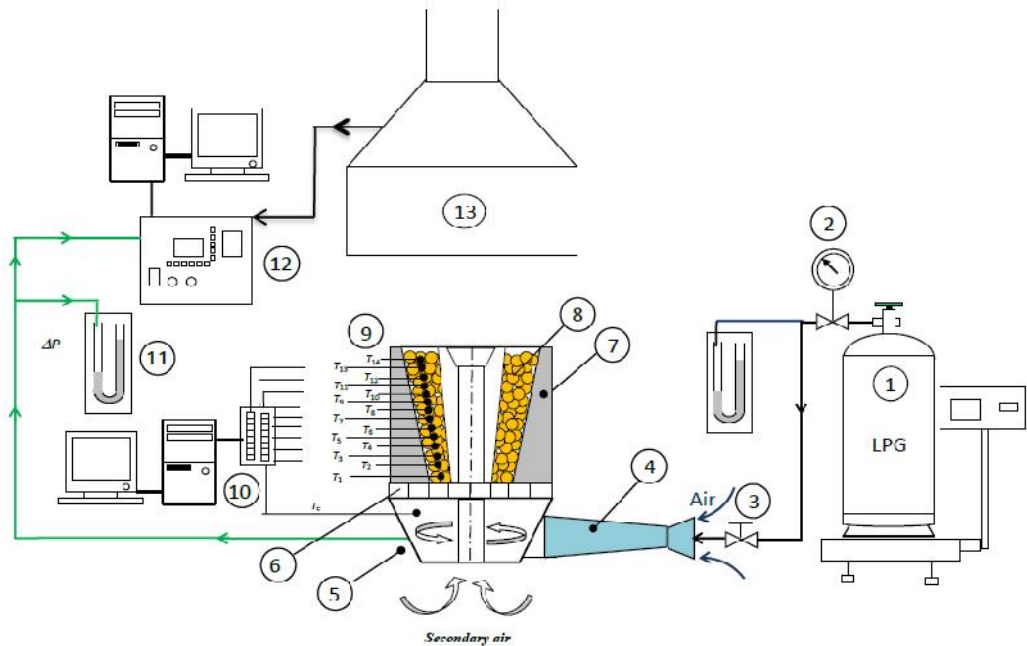


บทที่ 6 การศึกษาเปลวไฟแบบอิสระและเปลวไฟแบบพุ่งชน

6.1 การทดลองศึกษาเปลวไฟแบบอิสระ (Free flame)

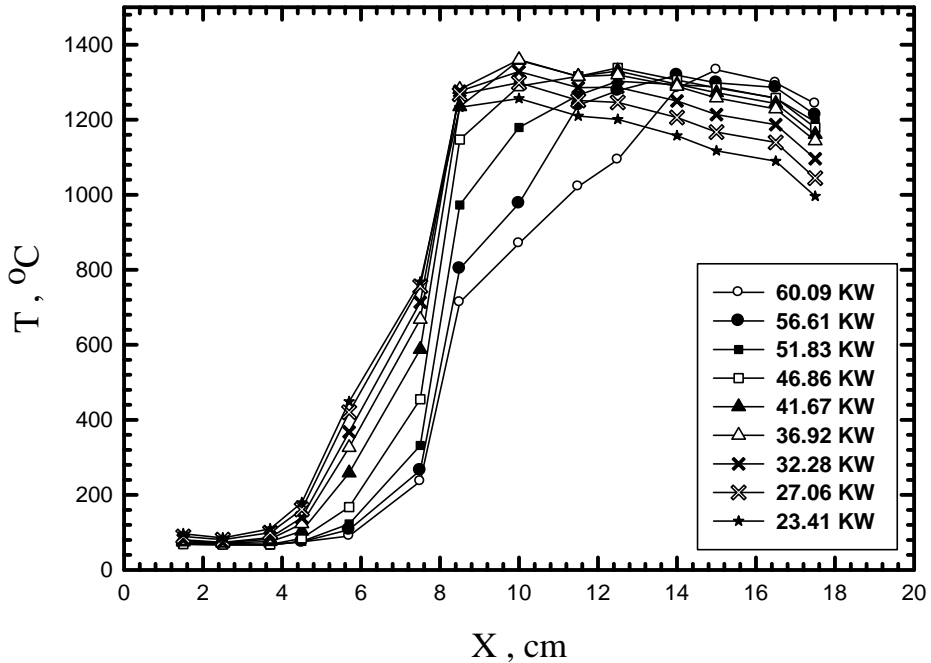


รูปที่ 6.1 schematic Diagram ของอุปกรณ์ทดลองเปลวไฟแบบอิสระ

1. Fuel (LPG) 2. Pressure regulator 3. Ball valve & fuel nozzle 4. Mixing tube 5. Mixing chamber
6. Perforated stainless steel plate 7. High temperature cement 8. Packed bed 9. Thermo-couples 10. Data logger & computer display 11. Water manometer 12. Exhaust gas analyzer & oxygen sensor & computer display 13. Hood & Exit

จากรูปที่ 6.1 แสดงการต่ออุปกรณ์ทดลองเพื่อศึกษาเปลวไฟแบบอิสระโดยจะใช้เชื้อเพลิง LPG ต่อผ่าน Pressure regulator เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ในการปรับ FR ที่ใช้ในการทดลอง มีการวัดอุณหภูมิในชั้นวัสดุพูนและวัดการปลดปล่อย Emission ซึ่งตำแหน่งการวัด Emission จะอยู่ทางปากปล่องของ Hood โดยจะแสดงผลผ่าน monitor ของคอมพิวเตอร์ สำหรับமானอมิเตอร์น้ำใช้วัด pressure drop ที่ตกรวมชั้นวัสดุพูน

6.1.1 Temperature distribution ของเปลวไฟแบบ Free flame

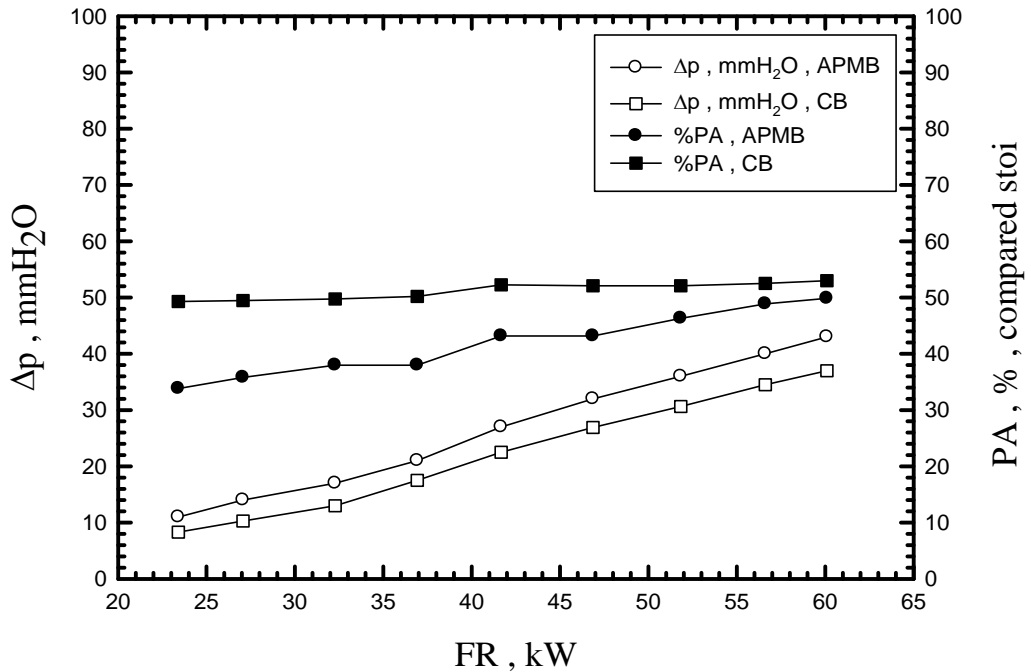


รูปที่ 6.2 กราฟแสดง Temperature distribution ที่ตำแหน่งต่างๆภายในชั้นวัสดุพรุนของเตาเผาวัสดุพรุนแบบวงแหวนที่ FR ต่างๆ

จากรูปที่ 6.2 แสดงให้เห็นช่วงการทำงานของ APMB ซึ่งอยู่ในช่วง 23.41kW - 60.09 kW มีค่า Turndown ratio ค่อนข้างกว้างคือประมาณ 2.5 และจะเห็นว่าอุณหภูมิสูงสุดในแต่ละเส้นกราฟจะอยู่ในที่ช่วงกลางเตาประมาณ 80-120 mm แสดงให้เห็นถึงช่วงที่ reaction zone เกิดบริเวณกลางเตาซึ่งเป็นช่วงที่พึงประสงค์ที่สุดเพราะข้อดีของ porous ที่สามารถแผ่รังสีอย่างรุนแรงจะช่วยในการแผ่รังสีไปทั้งด้าน upstream และ downstream ซึ่งช่วยในการอุ่น mixture เพื่อช่วยในการส่งเสริมการเผาไหม้ได้เป็นอย่างดี เมื่อเพิ่มค่า FR มากขึ้นเปลวไฟจะถูกเป่าให้ไปทางด้าน downstream มากขึ้นเนื่องจากเพิ่มค่า FR เป็นการเพิ่มความเร็วการไหลของ mixture ให้มากขึ้นดังนั้นความเร็วการไหลของ mixture จะเอาชนะ burning velocity ของ mixture และ reaction zone จะเคลื่อนไปติดทางด้าน downstream มากขึ้นโดยสังเกตจากอุณหภูมิทางด้าน upstream จะลดลงและ peak temperature จะเคลื่อนไปอยู่ทางด้าน downstream มากขึ้นและถ้าสังเกตที่รูปร่างของ Temperature profile สามารถแบ่งเปลวไฟได้เป็นสามกลุ่มคือ กลุ่มแรกที่ FR มีค่าตั้งแต่ 23.41 – 36.92 kW กลุ่มที่สอง FR ตั้งแต่ 41.67 – 51.83 kW และกลุ่มสุดท้าย FR ตั้งแต่ 56.61 – 60.09 kW ซึ่งเปลวไฟทั้งสามกลุ่มนี้ มีการเผาไหม้ที่เสถียร และสามารถติดอยู่ภายในวัสดุพรุนได้ (Matrix stabilized flame) อุณหภูมิกลางเตาจะสูงที่สุดและค่อยๆลดลงเมื่อไปทางด้าน downstream เนื่องจากการสูญเสียความร้อนไปกับสิ่งแวดล้อม

6.1.2 f

แรงและความดันตกคร่อมชั้นวัสดุพูน

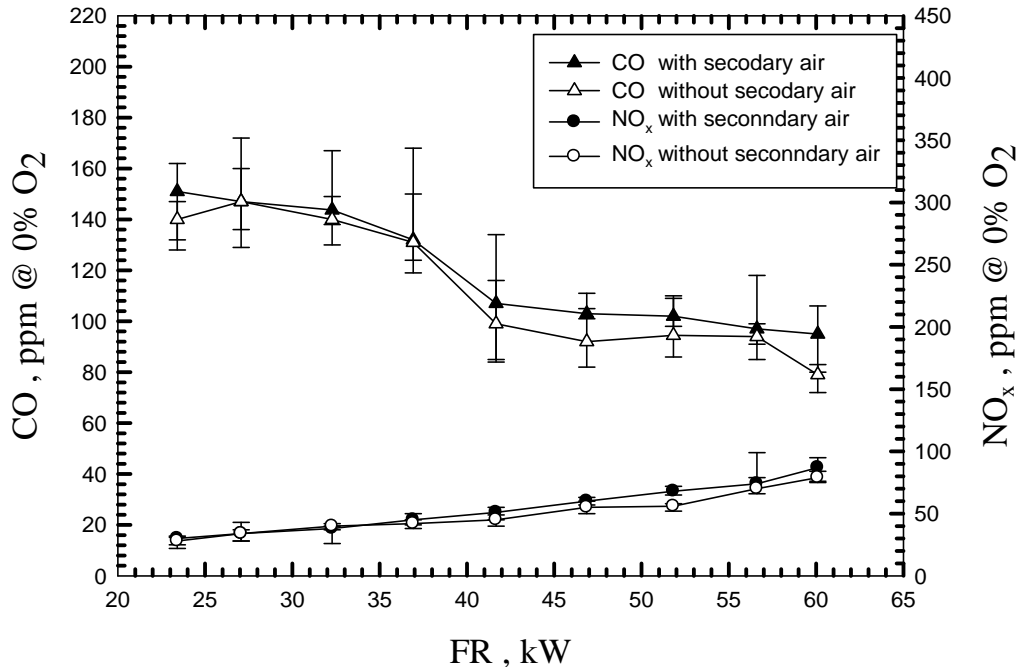


รูปที่ 6.3 กราฟแสดงปริมาณการวัด pressure drop ที่ตกคร่อมใน packed bed และปริมาณ primary aeration ที่ FR ค่าต่างๆ

จากรูปที่ 6.3 พบว่าเมื่อ FR เพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณ Primary aeration และ Pressure drop มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่ม FR ทำให้การ mixture ไหลเข้าไปอื่นใน mixing chamber มากขึ้นทำให้ pressure drop มีค่าเพิ่มมากขึ้นในขณะเดียวกันการเพิ่ม FR ยังทำให้ค่า primary aeration เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่ม FR ก็เป็นการเพิ่มความเร็วของ mixture (Flow velocity of mixture)ซึ่งเป็นการเพิ่ม momentum ของลำเจ็ทเชื้อเพลิงมากขึ้นซึ่งการ entrainment ของอากาศส่วนแรกจะมากขึ้นตามการเพิ่ม FR และ จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่า Primary aeration ของเตาเผาแบบ Cylindrical PMB มีค่าสูงกว่า Primary aeration ของเตาเผาแบบ Annular PMB สาเหตุอาจมาจากหลายประการคือลักษณะรูปร่างของ mixing chamber แตกต่างกันจึงทำให้ pressure drop ของเตา Annular PMB มีค่าสูงกว่าเตาเผาแบบ Cylindrical PMB และส่งผลไปถึงค่า Primary aeration ด้วยหรืออีกประการหนึ่งคือการจัดเรียงหินในแต่ละครั้งไม่เหมือนเดิมซึ่งการเรียงหินมีผลต่อค่าความพูนใน packed bed ซึ่งส่งผลกับค่า pressure drop โดยตรงและค่าของ pressure drop ก็ยังส่งผลต่อปริมาณ primary aeration อีกด้วย

6.1.3 1

Free flame

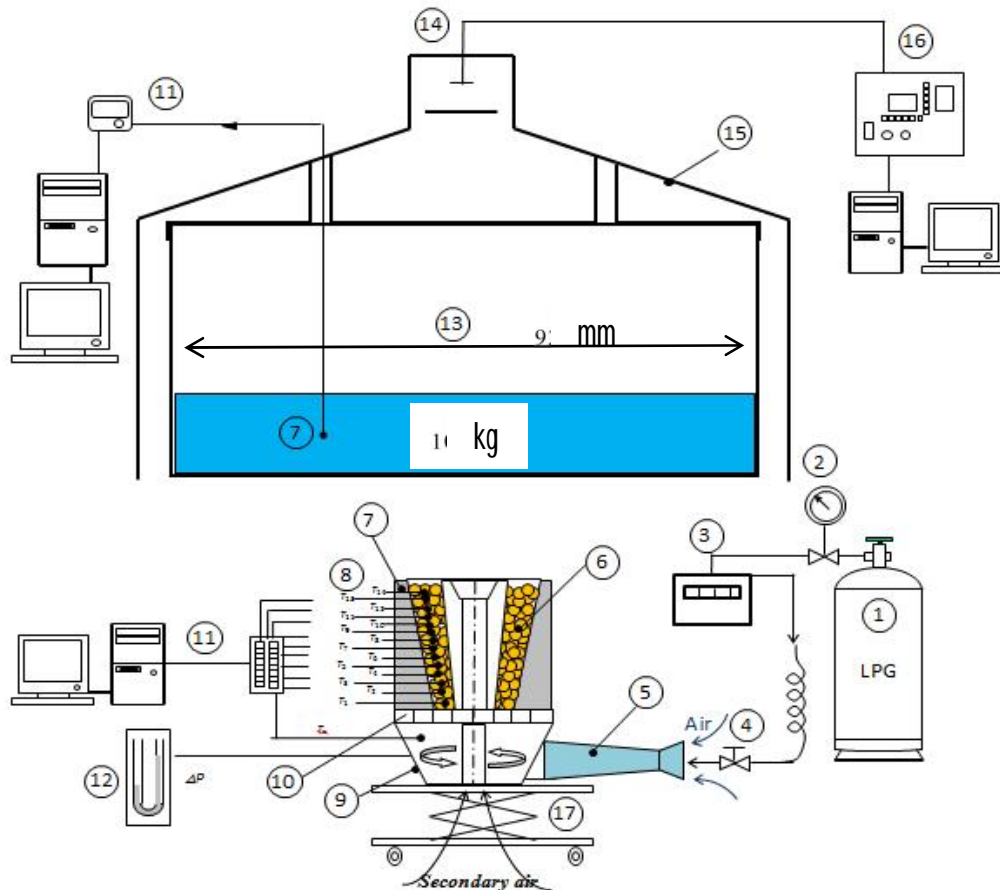


รูปที่ 6.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ CO และปริมาณ NO_x ที่ FR ต่างๆ

จากรูปที่ 6.4 แสดงปริมาณการปลดปล่อยมลพิษของเตาเผาวัสดุพูนแบบวงแหวนโดยทำการวัดที่แบบเปิดและปิด secondary air จะสังเกตเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่ม FR ค่า CO จะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกมากขึ้น โดยสังเกตจากรูปที่ 6.3 ปริมาณ primary aeration เพิ่มขึ้นเมื่อ FR มากขึ้นซึ่งจะทำให้ปริมาณอากาศส่วนแรกเข้าไปช่วยในการส่งเสริมการเผาไหม้มากขึ้นจึงทำให้เผาไหม้ได้สมบูรณ์มากขึ้นการปลดปล่อย CO จึงลดลงทั้งแบบเปิดและปิด secondary air ก็จะทำให้แนวโน้มเดียวกัน และในส่วนของ Effect จากการเปิดและปิด secondary air จะสามารถสังเกตได้ว่าเมื่อทำการเปิด secondary air แล้วปริมาณการปลดปล่อย CO จะมากกว่าการปิด secondary air ทั้งนี้เนื่องจากทดลองเป็นแบบ free flame ซึ่งมีอากาศและเวลาในการเผาไหม้เพียงพออยู่แล้วดังนั้นเมื่อทำการเปิด secondary air จึงทำให้มีอากาศส่วนที่สองเข้าไปเจือจาง (dilution effect) โชนการเผาไหม้มากขึ้นไปจึงทำให้ปลดปล่อย CO สูงขึ้นเมื่อเปิด secondary air ในส่วนของการปลดปล่อย NO_x จะสังเกตว่าเมื่อเพิ่มค่า FR ค่าการปลดปล่อย NO_x มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่ม FR ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้นซึ่งสังเกตได้จาก Temperature profile ในรูปที่ 6.1 ในส่วนของ Effect จากการเปิดและปิด secondary air จะสังเกตได้ว่าเมื่อทำการเปิด secondary air จะให้การปลดปล่อย NO_x สูงกว่าแบบปิด ซึ่งคาดว่า NO [33] ที่เกิดขึ้นเป็นน่าจะเป็น NO ที่เกิดผ่านไนตรัสออกไซด์ (N₂O) เนื่องจาก NO ชนิดนี้จะเกิดขึ้นมากเมื่อการเผาไหม้ถูกเจือ

ซึ่งการ secondary air
 พอที่จะทำให้เกิด NO สูงขึ้น

6.2 การทดสอบการเผาไหม้เปลวไฟแบบพุ่งชน (Impinging Flame Test)



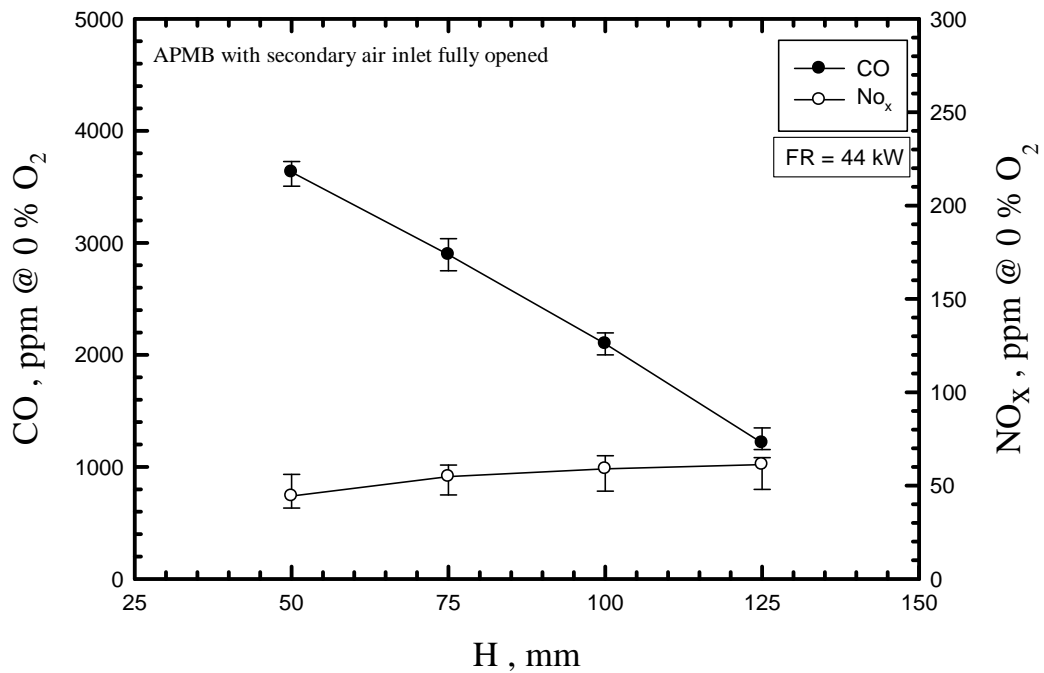
รูปที่ 6.5 Schematic Diagram แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง
 เพื่อศึกษาเปลวไฟแบบพุ่งชน

1. Fuel (LPG) 2. Pressure regulator 3. High pressure gas flow meter 4. Ball valve & fuel nozzle 5. Mixing tube 6. Packed bed 7. High -temperature cement 8. Thermocouples 9. Mixing chamber 10. Perforated stainless steel plate 11. Data logger & computer display 12. Water manometer 13. Vessel containing 14. Probe sampling 15. Hood 16. Exhaust gas analyzer & oxygen sensor & computer display 17. Adjuster base

จากรูปที่ 6.5 เ ทดลองเพื่อศึกษาเปลวไฟแบบ โดยจะใช้เชื้อเพลิง LPG
 Pressure regulator flow meter เพื่อวัดปริมาณแก๊สที่ใช้ ในการทดลองค้มน้ําใช้หม้อต้
 เลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 920 mm และความสูงหม้อ 8 mm ใช้น้ําในการทดสอบ 100 kg
 วัดอุณหภูมิในชั้นวัสดุพอรุนและอุณหภูมิหน้า Hood Emission ซึ่งตำแหน่งการวัด Emission
 Hood monitor ตอร์น้ํา
 pressure drop ที่ตกร้อมชั้นวัสดุพอรุน

6.2.1 f ที่ใช้ Impinging Flame

ในการทดลองเพื่อศึกษาเปลวไฟแบบพุ่งชนจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือศึกษาเปลวไฟแบบ
 ชนของเตาเผาวัสดุพอรุนแบบวงแหวนแบบที่ไม่มีระบบหมุนเวียนคว มร้อนและที่มีระบบหมุนเวียน
 Porous radiant recirculated burner (PRRB)รายละเอียดในบทที่ 7 และในการทดลองทั้ง 2
 ส่วนยังแบ่งย่อยเพื่อศึกษาอิทธิพลของการเปิดและปิดรูทางเข้า secondary air
 โดยการนำเตาเผาวัสดุพอรุนไปค้มน้ําเพื่อศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อน
 อุณหภูมิในชั้นวัสดุพอรุน (packed bed)

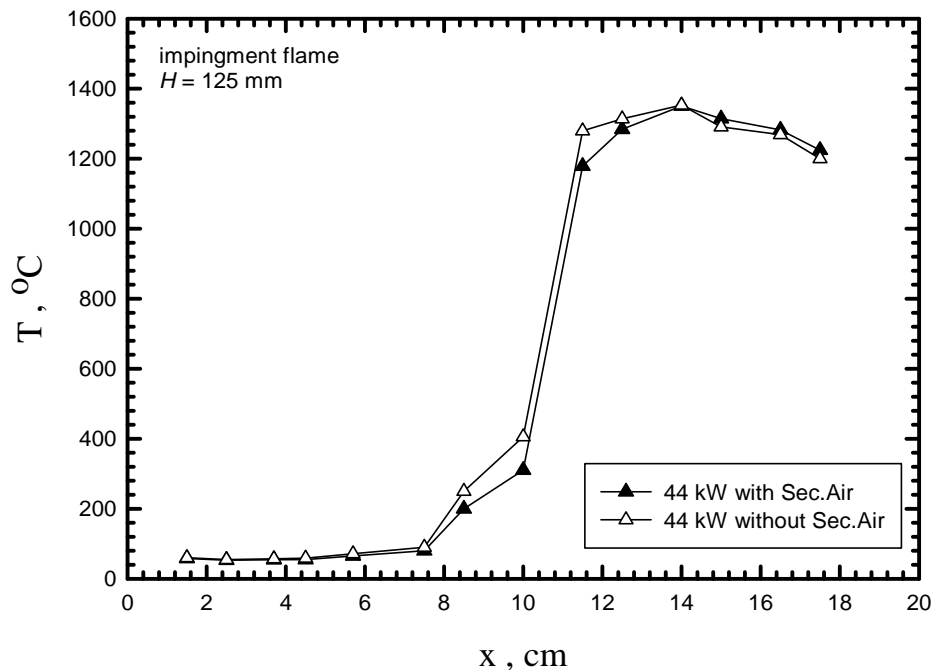


รูปที่ 6.6 CO NO_x ที่ระยะต่างๆจากกัน

จากรูปที่ 6.6 แสดงให้เห็นผลการปลดปล่อย Emission vary (H) ที่ $F_R = 41 \text{ KW}$ secondary air เนื่องจากต้องการทดสอบหา condition ที่ จะใช้ทดลองที่เหมาะสมที่สุด จากกราฟจะเห็นเมื่อเพิ่มระยะ H สูงขึ้นปริมาณ CO NO_x แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่สวนทางกันคือ CO NO_x จะเพิ่มสูงขึ้นแสดงให้เห็นถึงการ เผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มระยะ H คือการเพิ่ม residence time ของการเผา ใให้มีเวลามากพอที่จะให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้นและในขณะที่การลดลงของระยะ H residence time ซึ่งจะทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ทำให้การปลดปล่อย CO มากขึ้นและ NO_x แนวโน้มลดลงแต่ไม่มากดังนั้นจากกราฟแสดงแนวโน้มนการปลดปล่อย Emission ที่ระยะ H เห็นว่าที่ระยะ H เท่ากับ 125 mm Emission CO ต่ำที่สุดแสดงให้เห็น การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ที่สุดในการทดลองปรับเปลี่ยนระยะ H ดังนั้นผู้ทำงานวิจัยจะขอเลือกเอา H เท่ากับ 125 mm

พารามิเตอร์และในการทดสอบนี้จะใช้วิธีการต้มน้ำโดยใช้มวลน้ำเท่ากับ 100 kg และต้มน้ำจน อุณหภูมิถึง 90 °C เพื่อป้องกันการเดือดและลดการสูญเสียมวลของน้ำไปกับไอน้ำและให้เป็นไปตาม European standard : EN 203-1:1995 [23]

6.2.2 Temperature distribution Impinging Flame

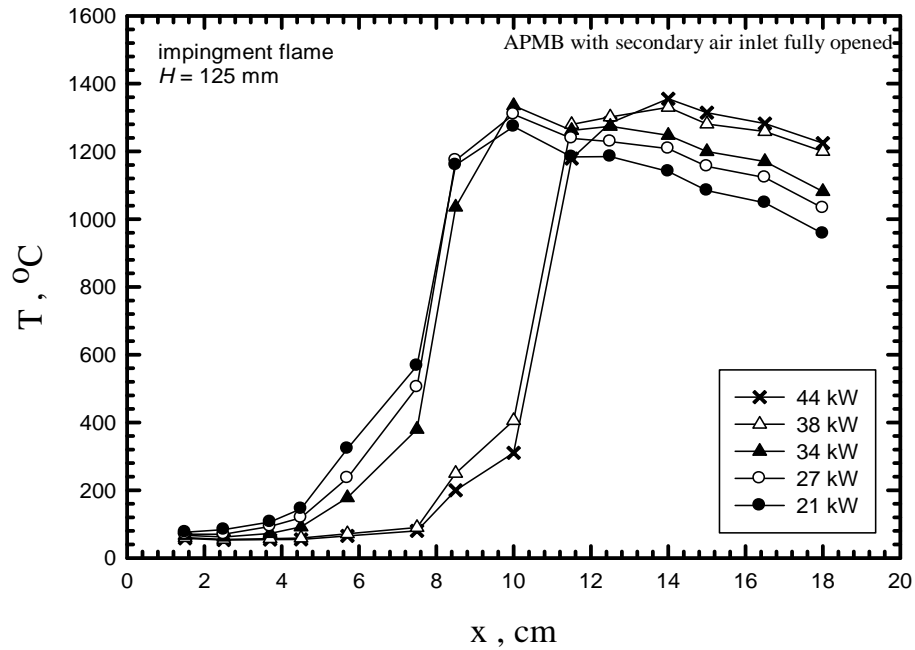


รูปที่ 6.7 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในชั้นวัสดุพอรุน (packed bed) Secondary air ที่ระยะ H เท่ากับ 125 mm

จากรูปที่ 6.7

Secondary air

อุณหภูมิการเผาไหม้ภายในชั้นวัสดุพรุนเนื่องจากเส้นทางของอากาศไม่ได้ส่งเข้าไปในตัวเตาโดยตรง
 post flame ทางปากเตาซึ่งสังเกตจากความสูงของเปลวไฟที่สั้นลงเมื่อทำการ
 Secondary air ซึ่งแสดงในภาคผนวก ก.



รูปที่ 6.8

packed bed

ฟุ้งชนที่ FR

H เท่ากับ 125 mm

จากรูปที่ 6.8 จะเห็นว่าแนวโน้มการกระจายตัวของอุณหภูมิของเปลวไฟแบบฟุ้งชนจะคล้ายกับ
 กระจายตัวของอุณหภูมิของเปลวไฟแบบอิสระในรูปที่ 6.2 คือบริเวณ reaction zone

downstream เมื่อเพิ่มค่า FR มากขึ้น

downstream

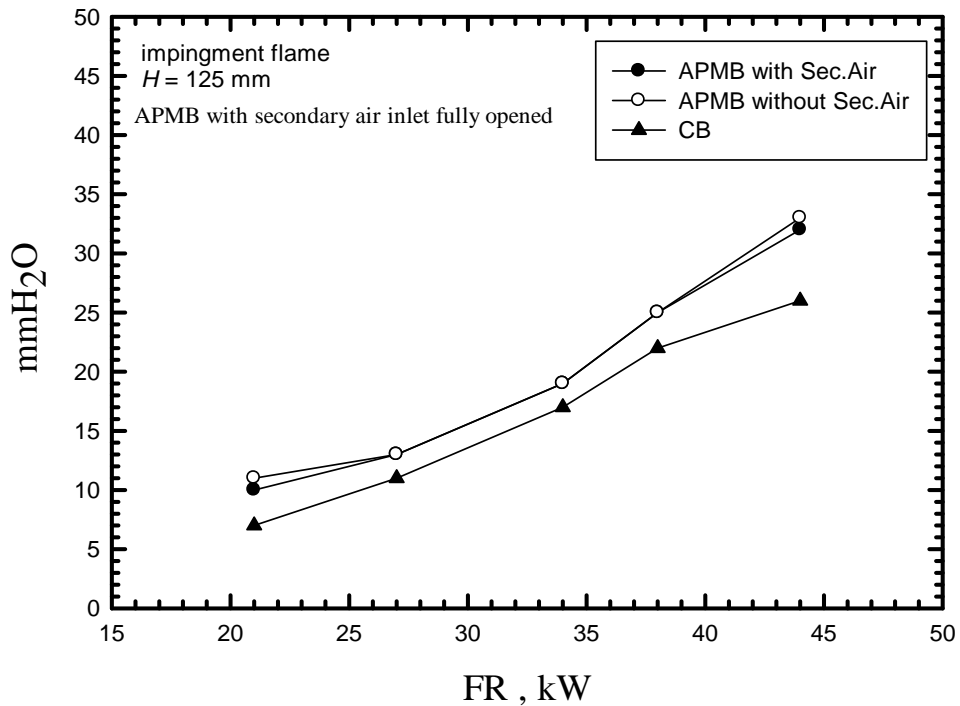
เพราะเมื่อเพิ่มค่า FR มากขึ้นเป็นการเพิ่มความเร็วการไหลของ mixture มากขึ้นดังนั้นความเร็วการ

mixture burning velocity mixture reaction zone จะเคลื่อนไปติด

downstream และอุณหภูมิจะลดลงต่ำลงที่ทางออกของเตาเผาเนื่องจากสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนไปให้กับสิ่งแวดล้อม

6.2.3 ปริมาณความดันที่ตกคร่อมชั้นวัสดุพรุนของภา

Impinging Flame



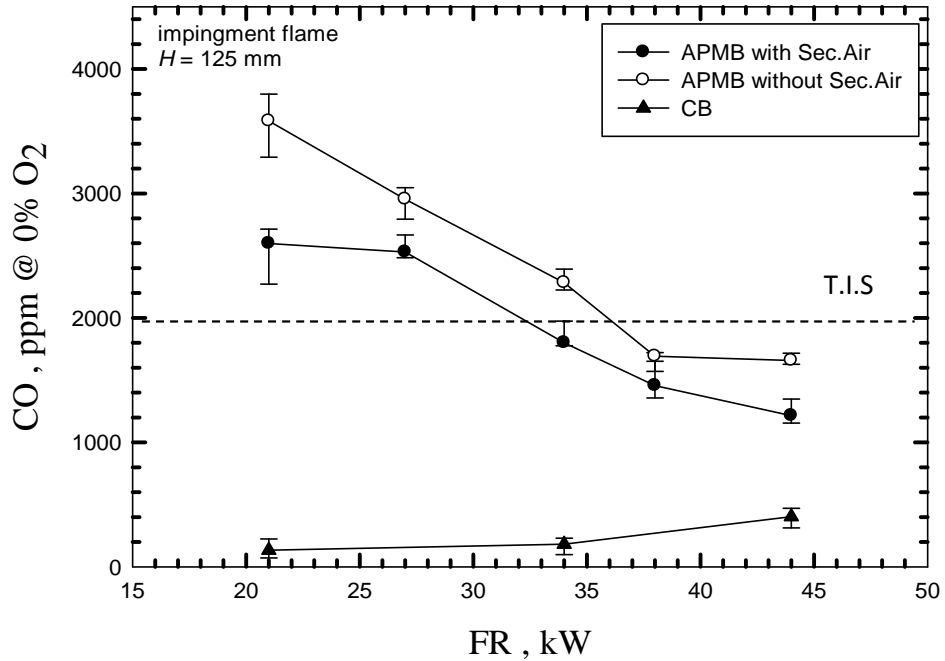
รูปที่ 6.9 pressure drop ที่ FR
เปลวไฟแบบพุ่งชนที่ระยะ H เท่ากับ 125 mm

จากรูปที่ 6.9 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณ pressure drop

CB - KB10 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณ FR ' เพิ่ม mass flow rate ของเชื้อเพลิงมาก
ขึ้นจะทำให้ pressure drop เพิ่มมากเนื่องจากการอันของ mixture mixing chamber
annular pressure drop
ที่สุดแต่แนวโน้มใกล้เคียงกับทั้ง CB secondary air
pressure drop ที่ตกคร่อมชั้นวัสดุพรุน จาก primary aeration pressure drop ได้ตามที่ได้อธิบายและแสดงไว้

6.2.4 1

Impinging Flame

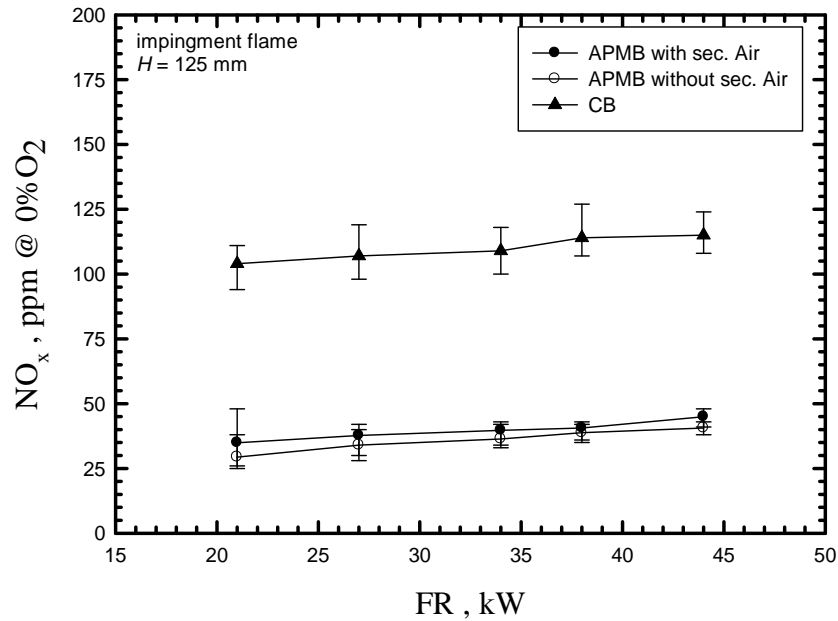


รูปที่ 6.10 กร CO ที่ค่าของ FR ของเปลวไฟแบบพุ่งชนที่ระยะ H เท่ากับ 125 mm

จากรูปที่ 6.10 แสดงการเปรียบเทียบการปลดปล่อยปริมาณ CO ที่ FR H เท่ากับ 125 mm ของเตาเผาวัสดุพูนแบบวงแหวนกับเตาเผาชนิดอื่น ๆ จะเห็นว่า CO ตั้งแต่ 25 - 120 ppm เมื่อค่า FR เพิ่มขึ้นค่า CO มีแนวโน้มลดลงเนื่องจาก effect primary air entrainment เพิ่มขึ้นจากเจ็ทของเชื้อเพลิงที่มีความเร็วสูงขึ้นซึ่งส่งผล primary aeration ที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 6.3 ซึ่งพฤติกรรมเช่นนี้เกิดขึ้นกับทุกเตาและหาก secondary air

CO ต่ำกว่าเนื่องจากมี secondary air มาช่วยในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์มากขึ้น CB CO มากกว่าเนื่องจากมีปริมาณ primary aeration น้อยกว่าซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 6.3 ซึ่งเหตุผลที่ปริมาณ primary aeration เท่ากันเป็นผลเนื่องมาจากใช้ Mixing tube

แบบวงแหวนซึ่งถือว่าเป็นเปลวไฟเป็นแบบ Single jet ซึ่ง: กับอากาศส่วนที่สองได้ CB ที่เป็นแบบ Multi flame CO APMB CB แต่ก็มีช่วงการทำงานอยู่ช่วงหนึ่ง (FR สูงๆ) ที่ให้การปลดปล่อย CO มีค่าที่ยอมรับได้ ต่ำกว่ามาตรฐาน T.I.S. ซึ่งไม่เกิน 2000 ppm



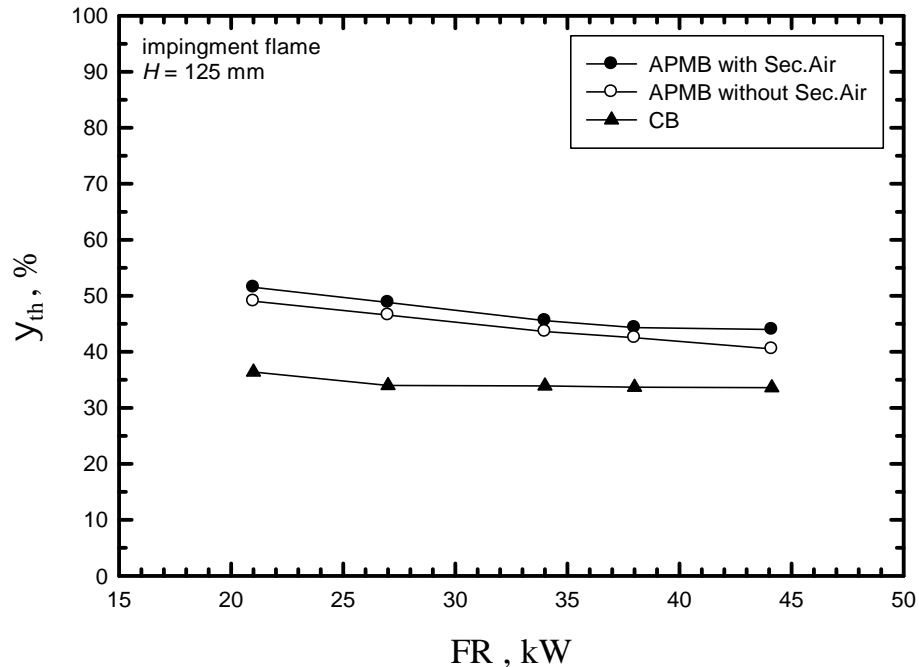
รูปที่ 6.11 กร NO_x ที่ค่าของ FR ของเปลวไฟแบบพุ่งชนที่ระยะ H เท่ากับ 125 mm

จากรูปที่ 6.11 แสดงการเปรียบเทียบการปลดปล่อย NO_x ชนิดอื่นๆ จะเห็นว่าแนวโน้มการปลดปล่อย NO_x จะมีแนวโน้มเหมือนกันทุกตัวคือเมื่อ FR เพิ่มขึ้น NO_x มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเนื่องอุณหภูมิการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้นแต่แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ NO_x มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากแทบจะเป็น linear

secondary air secondary air
 NO_x มากกว่าเนื่องจากอากาศส่วนที่สองเข้ามาช่วยเผาไหม้ได้มากกว่าแบบปิดรูปทำ secondary air และถ้านำเตาเผาที่ใช้วัสดุพอรุนเป็นตัวกลางในการ
 CB NO_x ของเตาเผาที่ใช้วัสดุ
 พอรุนเป็นตัวกลางในการเผาไหม้ทั้งแบบวงแหวนและแบบ SPMB NO_x ต่ำกว่าเตาแบบ
 CB มากทั้งนี้เนื่องมาจากข้อดีของวัสดุที่ความร้อนจากการเผาไหม้จะถูกถ่าย
 ถูกกคให้ต่ำลง Thermal NO_x

6.2.5 f

Impinging Flame



รูปที่ 6.12 กร

Thermal Efficiency ที่ค่า FR

เปลวไฟแบบพุ่งชน

จากรูปที่ 6.12 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาวัสดุพูนแบบวงแหวนกับเตาเผาชนิดอื่นๆ ที่ค่า FR $H=125$ mm

คำนวณจากสมการที่ 3.4 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของ European standard : EN 203-1:1995 [23] ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อทำการลด FR ลงประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีแนวโน้มลดลงซึ่งชี้ให้เห็น

FR เป็นการลดการสูญเสียความร้อนที่ให้กับสิ่งแวดล้อม

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 51.53% ๙

และปัดรวมเปรียบเทียบกันจะเห็นว่าแบบเปิดจะให้อัตราประสิทธิภาพเชิงความร้อนมากกว่าซึ่งแสดงถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากกว่า แต่ถึงแม้เตา

CB

Emission

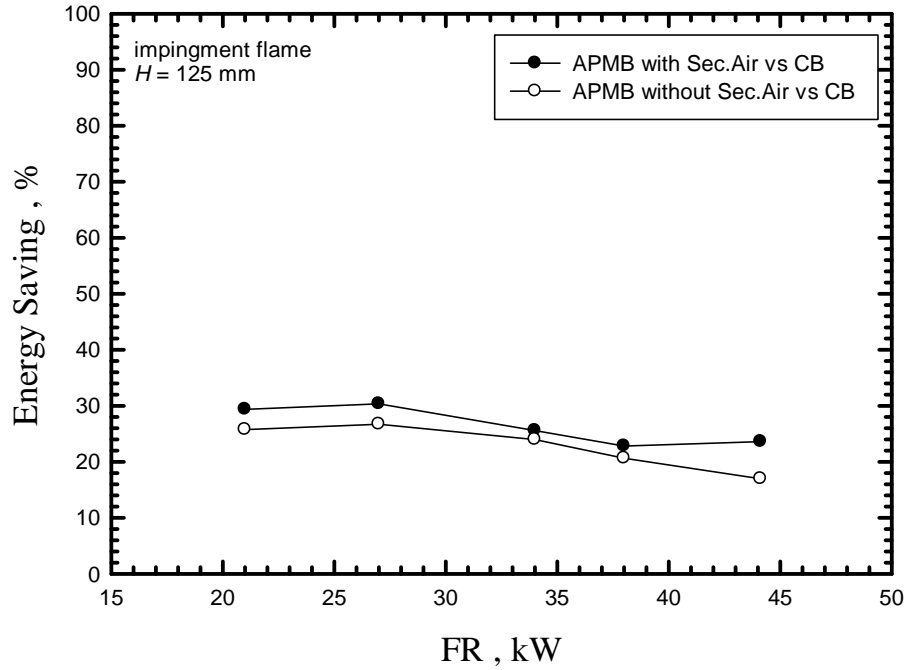
CO

single port flame

secondary air entrainment ที่ไม่คืนกซึ่งต่าง

CB ซึ่งเป็นแบบ Multiple port flame jet ซึ่งทางออกของเจ็ทมีความเร็วสูงทำให้ดึงอากาศส่วนที่สองได้ดีกว่า ทำให้การปลดปล่อย CO จึงต่ำกว่า ซึ่งสังเกตได้จากกราฟที่ 6.10

6.2.6 f



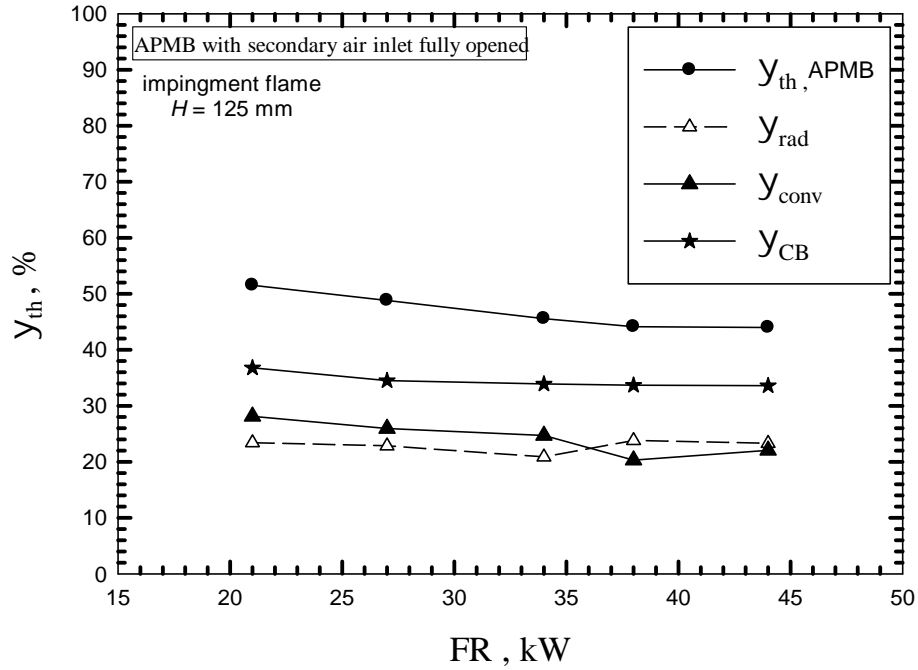
รูปที่ 6.13 กร Energy saving ที่ค่า FR
เปลวไฟแบบพุ่งชน

จากรูปที่ 6.13 ! Energy saving
 CB ที่ค่า FR H = 125 mm Energy saving สามารถคำนวณจากสมการที่ 6.1 ซึ่ง
 Energy saving ที่ FR ของทั้ง APMB
 CB จะถูกทดลองที่มาตรฐานเดียวกันทุกประการ ในที่นี้ผู้
 CB ได้มากขึ้นตามรูปที่ 6.12 ซึ่งจะสามารถเพิ่ม Energy saving ได้มากขึ้นโดยเมื่อ
 CB Energy saving เพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 30.3 %
 เมื่อเทียบกับ CB ที่การทดลอง condition
 Secondary air สามารถเพิ่มการประหยัดพลังงานได้มากกว่าแบบไม่มีรูทางเข้า Secondary air
 เนื่องจาก secondary air
 Energy saving

$$EN = \frac{y_{APMB} - y_{CB}}{y_{APMB}} \times 100\% \tag{6.1}$$

6.2.7

APMB



รูปที่ 6.14 กร

APMB CB

จากรูปที่ 6.14 แสดงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในโหมดต่างๆของ APMB ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามที่แสดงไว้ในภาคผนวก ค. โดย CB ซึ่งจะเห็นว่าค่า APMB ซึ่งมีโหมดการถ่ายเทความร้อน 2 โหมด CB ซึ่งมี η_{rad} η_{conv} ซึ่งแสดงให้เห็นข้อดีของเคาที่มีโหมดการถ่ายเทความร้อนมากกว่า 1 โหมดจากรูปเมื่อ APMB จะพบว่าเมื่อ FR สูงขึ้น η_{rad} η_{conv} ซึ่งแสดงให้เห็นว่า

จากรูปที่ 6.8 จะเห็นว่าบริเวณที่เป็น reaction zone เคลื่อนมาทาง downstream มากขึ้นและ hot zone เข้าใกล้กันหม้อมากขึ้น

มากขึ้นและอิทธิกรแผ่รังสีเริ่มเป็น โหมดหลักในการถ่ายเทความร้อน η_{rad} มีแนวโน้มที่ η_{conv} เมื่อ FR