

เมื่อนำข้อมูลที่ออกแบบของอากาศส่วนที่ 1 มาคิดเป็น Swirl number ได้ดังนี้

จากสมการ

$$S = \sum_{i=1}^m f_i^2 \frac{\pi D_e D_o}{4 A_{t,i}}$$

$$m = 2$$

$$A = \frac{\pi}{4} \times d^2 \text{ (d คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจ่ายอากาศส่วนที่ 3 โดยมีขนาดเท่ากับ 0.1778 m.)}$$

$$f_i = \frac{2.02}{5.83 + 2.19 + 2.02} = 0.201$$

$$D_e = 0.9 \text{ m}$$

$$D_o = 1.8 \text{ m}$$

แทนค่าในสมการ

$$S_3 = \left(0.201^2 \frac{\pi \times 0.9 \times 1.8}{4 \times (\pi/4) \times (0.178)^2} \right) + \left(0.201^2 \frac{\pi \times 0.9 \times 1.8}{4 \times (\pi/4) \times (0.178)^2} \right) = 4.131$$

เมื่อนำค่า Swirl number ของ VFBC ระดับห้องปฏิบัติการมาเปรียบเทียบกับมีค่าใกล้เคียงกันคือ Swirl number ของ VFBC ระดับห้องปฏิบัติการมีค่าเท่ากับ 4.96 และ Swirl number ของ VFBC ขนาด 9 MW มีค่าเท่ากับ 4.131 ดังนั้น เลือกขนาดท่อจ่ายอากาศส่วนที่ 3 เท่ากับ 7 นิ้ว และความเร็วในการจ่ายอากาศส่วนที่ 3 เท่ากับ 25 m/s

1.9 สรุปข้อมูลของ VFBC ระดับห้องปฏิบัติการและ VFBC ระดับอุตสาหกรรม

ตารางที่ 1.5 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลของ VFBC ระดับห้องปฏิบัติการและ VFBC ระดับอุตสาหกรรม

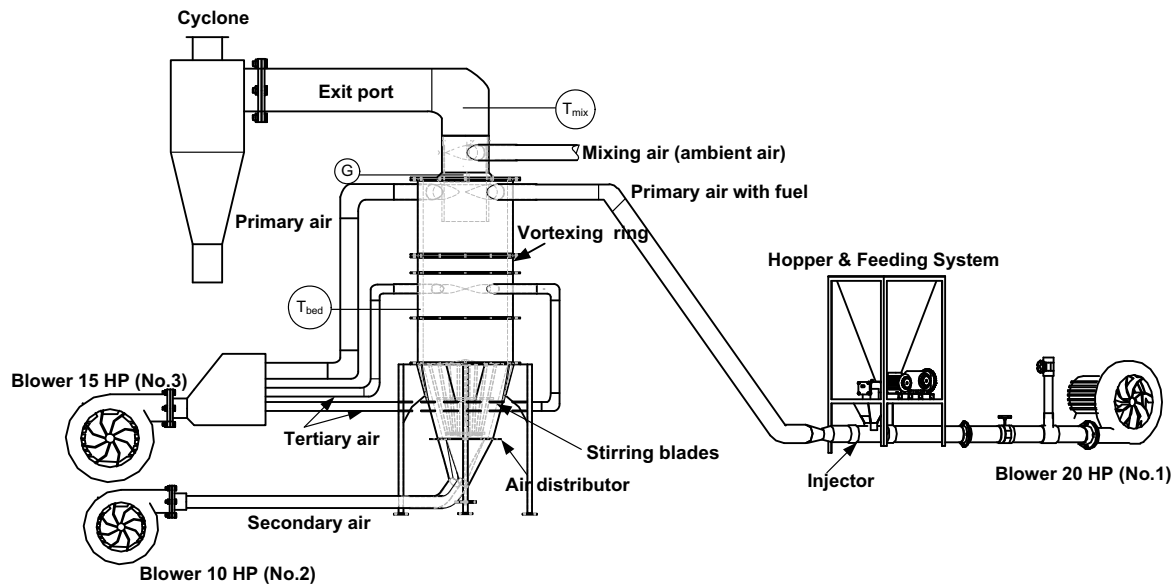
ข้อมูล	VFBC ระดับ ห้องปฏิบัติการ	VFBC ระดับ อุตสาหกรรม (ที่ได้จากการ ออกแบบ)
1. <u>Dimension</u>		
1.1 เส้นผ่านศูนย์กลางเตา (mm)	400	1800
1.2 ความสูงเตา (mm)	1100	5350
1.3 ขนาดของท่อจ่ายอากาศเข้าเตาเผาไหม้		
- อากาศส่วนที่ 1 (inch)	2	2 x @12
- อากาศส่วนที่ 2 (inch)	4	39
- อากาศส่วนที่ 3 (inch)	2	2 x @7
2. <u>ความเร็วของอากาศที่จ่ายเข้าเตาเผาไหม้</u>		
- อากาศส่วนที่ 1 (m/s)	18	22
- อากาศส่วนที่ 2 (m/s)	1.75	1.74
- อากาศส่วนที่ 3 (m/s)	25	25
3. <u>swirl number</u>		
- อากาศส่วนที่ 1	10.452	11.75
- อากาศส่วนที่ 3	4.96	4.131

บทที่ 2

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

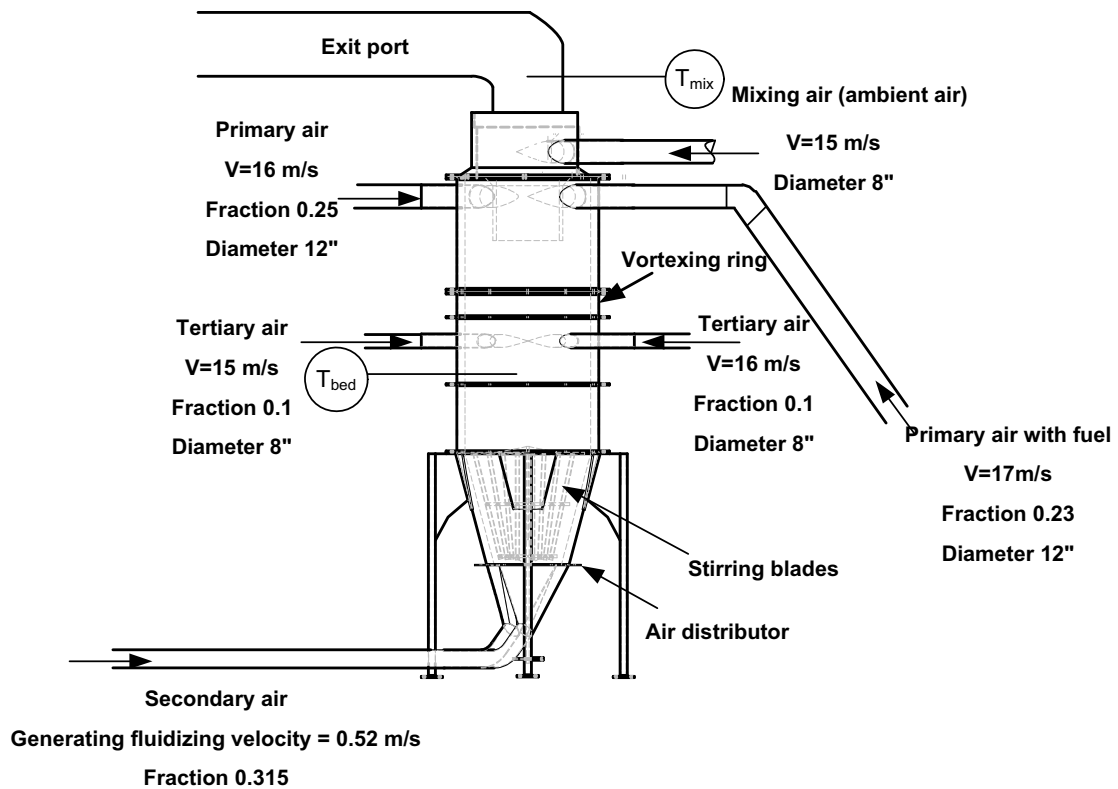
2.1 วิธีการทดลอง

เตรียมอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.1 ทำการจุดเตาเผาโดยใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิงและอุ่นเตาจนอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ประมาณ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ จึงเริ่มป้อนเชื้อเพลิงเข้าไปพร้อมอากาศส่วนที่หนึ่ง



รูปที่ 2.1 แสดงแผนผังของระบบในการทดสอบเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับอุตสาหกรรม

1. ปรับอัตราการไหลของอากาศและแก๊สให้สอดคล้องกับเงื่อนไขที่ 1 ในตารางที่ 2.1 ซึ่งในการทดลองจะใช้พัดลม 4 ตัว เป็นตัวกำลังในการทำให้เกิดอัตราการไหลของอากาศ โดยใช้ vane type anemometer ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน 3% ของค่าที่วัดได้ ในการวัดอัตราการไหลของอากาศทั้งสี่ส่วน ซึ่งตำแหน่งของการจ่ายอากาศแต่ละส่วนแสดงดังรูป 2.2 สำหรับความเร็วของอากาศที่จ่ายในท่อจ่ายอากาศส่วนที่ 2 ทำให้ได้ความเร็วได้ต่ำลงจายลมเท่ากับ 0.52 m/s และในการควบคุมอัตราการป้อนแก๊สจะใช้ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ (inverter) ที่สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ซึ่งเป็นตัวกำลังในการขับสกรูที่ใช้ในการป้อนแก๊ส
2. บันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งภายในเตาที่ระยะความสูง 3.4 m นับจากแผ่นกระจายอากาศที่ทางออกเตาเผา โดยใช้ Thermocouple type K และใช้ อุปกรณ์วัดซึ่งมีความละเอียด $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$
3. บันทึกองค์ประกอบของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้โดยใช้เครื่อง Gas Analyzer รุ่น Testo 350 XL ที่ตำแหน่งที่ทางออกเตาเผา VFBC ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 2.2 แสดงตำแหน่งของการจ่ายอากาศแต่ละส่วน (Run Nos. 4-7)

ตารางที่ 2.1 แสดงเงื่อนไขความเร็วของอากาศแต่ละส่วนที่จ่ายเข้าเตาในแต่ละการทดสอบ

Run No.	feed rate (kg/h)	Velocity (m/s)							
		Primary air		Secondary air		Tertiary air		Mixing air	
		V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)
1	1730	16	16	13	13	15	15	-	-
2	1291	17	17	13	13	19	18	15	15
3	1569	17	17	13	13	19	18	15	15
4	1231	17	16	16	15	15	16	15	15
5	1501	17	16	16	15	15	16	15	15
6	1637	17	16	16	15	15	16	15	15
7	1838	17	16	16	15	15	16	15	15

1 หมายถึง ท่อจ่ายอากาศท่อที่ 1

2 หมายถึง ท่อจ่ายอากาศท่อที่ 2

หมายเหตุ (1).Run NO. 1 ยังไม่ได้ติดตั้ง Mixing box

(2). จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าความเร็วของอากาศส่วนที่ 1 และ 3 ที่จ่ายเข้าเตาเผาไหม้มีค่าน้อยกว่าค่าที่ออกแบบไว้ เนื่องจากข้อจำกัดของขนาดพัดลมที่ใช้อยู่ ส่วนกรณีของอากาศส่วนที่ 2 ความเร็วของอากาศที่แสดงในตารางเป็นความเร็วที่วัดได้จากจุกวัดลม (ท่อขนาด 10 นิ้ว)

ตารางที่ 2.2 แสดงสัดส่วนมวลของอากาศแต่ละส่วนที่จ่ายเข้าเตาในแต่ละการทดสอบ

Run No.	feed rate (kg/h)	Mass fraction (-)		
		Primary air	Secondary air	Tertiary air
1	1730	0.50	0.28	0.21
2	1291	0.49	0.26	0.24
3	1569	0.49	0.26	0.24
4	1231	0.48	0.32	0.20
5	1501	0.48	0.32	0.20
6	1637	0.48	0.32	0.20
7	1838	0.48	0.32	0.20

4. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2-3 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของแก๊สออกคล่องกับเงื่อนไขที่ 2-5 ในตารางที่ 2 ซึ่งดัชนีที่บ่งชี้ถึงสมรรถนะของเตาเผาไหม้แสดงดังนี้

- ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) [2] ของเตาเผาไหม้ได้ด้วยสมการดังนี้

$$\eta_{th} = \left[\frac{(\dot{m}_g T_g C_{p,g}) - (\dot{m}_a T_{amb} C_{p,amb})}{\dot{m}_f HHV} \right] \times 100 \% \quad (7.1)$$

$\dot{m}_a$ = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่จ่ายเข้าเตาเผาไหม้ (kg/h)

$\dot{m}_f$ = อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/h)

$\dot{m}_g$ = อัตราการไหลของแก๊สร้อนที่ทางออกซึ่งเท่ากับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่จ่ายเข้าเตา รวมกับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง โดยที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงต้องหักเผื่อออก 14 % โดยน้ำหนัก ซึ่งเท่ากับ

$$\dot{m}_a + (\dot{m}_f \times (1 - 0.14))$$

T_g = อุณหภูมิอากาศที่ท่อทางออกเตาเผาไหม้ (K)

T_{amb} = อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (K)

$C_{p,g}$ = ค่าความจุความร้อนของอากาศที่ท่อทางออกเตาเผาไหม้ (kJ/kg·K)

$C_{p,amb}$ = ค่าความจุความร้อนของอากาศแวดล้อม (kJ/kg·K)

HHV = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg) = 14.98 MJ/kg

- ภาระความร้อน [2] ของเตา नियามได้ด้วยสมการดังนี้

$$\text{ภาระความร้อนเตา} = \frac{\eta_{th} \times \dot{m}_f \times \text{HHV}}{V}, \text{MW}_{th}/\text{m}^3 \quad (7.2)$$

HHV = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg) = 14.98 MJ/kg

$\dot{m}_f$ = อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/s)

V = ปริมาตรของเตาประกอบด้วยบริเวณส่วนที่เป็นกรวยหงายและทรงกระบอก (m³)

- ประสิทธิภาพการเผาไหม้ [1] ของเตา नियามได้ด้วยสมการดังนี้

$$\eta_C = \left[\frac{(E_F - E_a - E_{fg})}{E_F} \right] \times 100 \% \quad (7.3)$$

E_F = ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าเตาเผาไหม้ (MW)

E_a = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ในเถ้า (MW)

E_{fg} = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในก๊าซเสีย (MW)

2.2 ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดลองได้สรุปไว้ตารางที่ 3 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 แสดงผลการทดสอบสมรรถนะของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับอุตสาหกรรม

$\dot{m}_f$ (kg/h)	A/F (kg _{da} /kg _f)	Volumetric feed rate (kg/h/m ³)	T_{mix} (°C)	T_{bed} (°C)	%EA	Thermal efficiency (%)	Combustion efficiency (%)	Thermal intensity (MW _{th} /m ³)	Capacity (MW _{th})
1730	11.54	163	950*	1170	153	93.02	NA	0.63	6.69
1291	19.97	122	598	NA	267	91.46	96.67	0.46	4.91
1569	16.43	148	690	900	202	87.80	96.99	0.54	5.73
1231	20.90	116	594	1062	284	94.79	97.44	0.46	4.86
1501	17.14	142	661	1120	215	90.96	97.07	0.54	5.68
1637	15.72	155	710	1158	189	90.97	97.26	0.59	6.20
1838	14.00	174	785	1258	157	91.27	95.11	0.66	6.98

หมายเหตุ T_{bed} ที่ตำแหน่งความสูง 3.4 m จากแผ่นกระจายอากาศ

* คือ T_{exit} เนื่องจากเงื่อนไขนี้ยังไม่ได้ติดตั้ง Mixing box

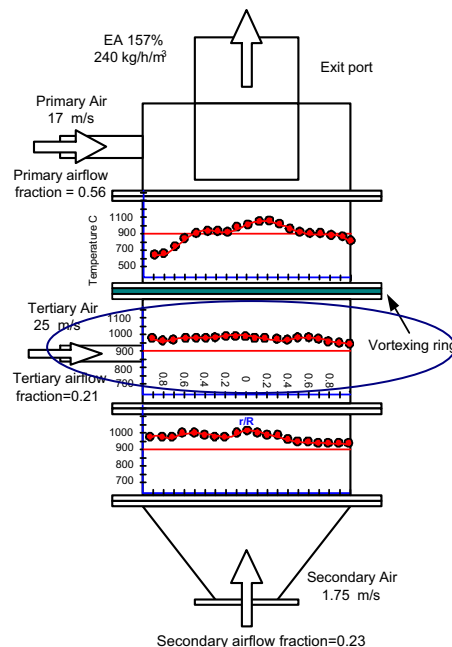
T_{mix} คือ อุณหภูมิผสมระหว่างก๊าซร้อนที่ออกจากเตาและอากาศผสม (ภายนอก)

%EA คือ เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการทดสอบสมรรถนะของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับอุตสาหกรรม ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

2.2.1 อุณหภูมิภายในเบด

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงจะส่งผลให้อุณหภูมิภายในเบดของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับอุตสาหกรรมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีค่าในช่วง 900-1250 °C ซึ่งสามารถเทียบเคียงได้กับอุณหภูมิภายในเบดของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับห้องปฏิบัติการที่มีค่าประมาณ 1000 °C ดังรูป

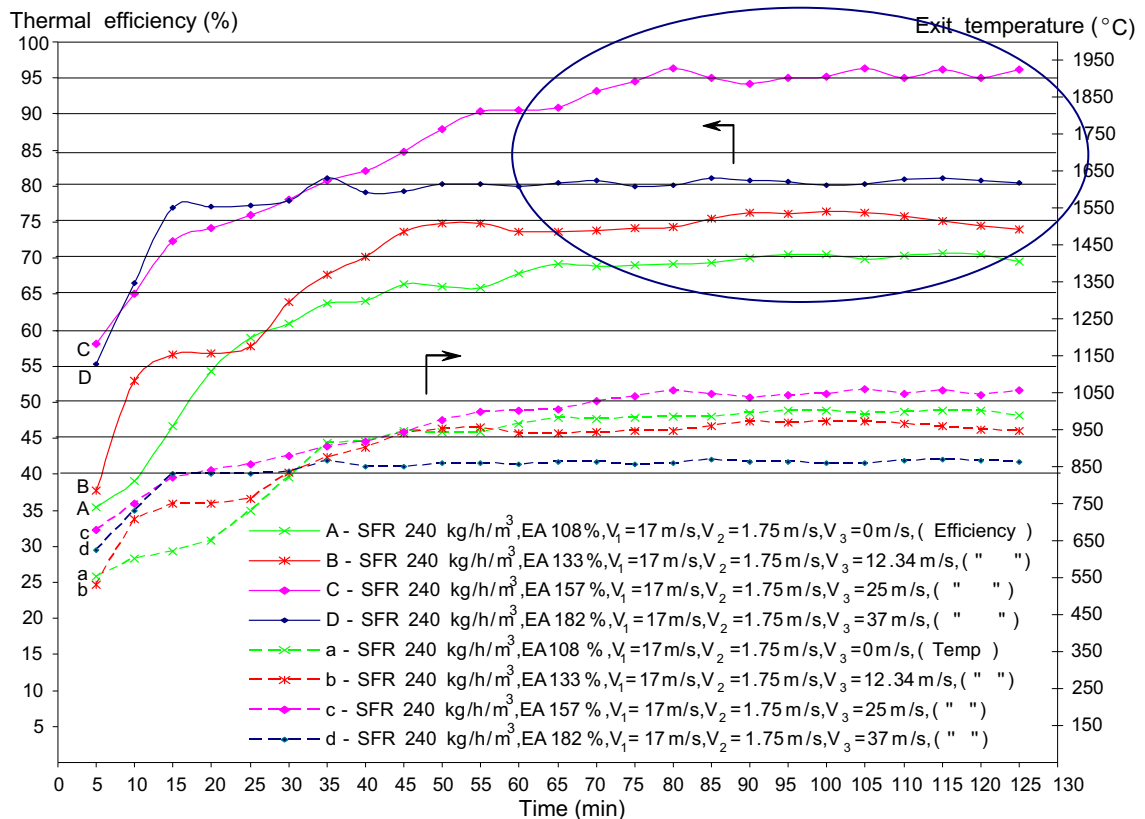


รูปที่ 2.3 แสดงอุณหภูมิภายในเบดของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับห้องปฏิบัติการ [4]

2.2.2 สมรรถนะของเตาเผาไหม้

จากรูปที่ 2.5 พบว่าเมื่อทำการทดสอบสมรรถนะของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับอุตสาหกรรม ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาไหม้มีค่าใกล้เคียงกันทุกเงื่อนไขการทดลองโดยมีค่าระหว่าง 88-94% ซึ่งใกล้เคียงกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับห้องปฏิบัติการดังแสดงในรูปที่ 2.4 พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าอยู่ในช่วง 75-94 % (หลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว) ส่วนประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าอยู่ในช่วง 94-97% ซึ่งมีค่าน้อยกว่าของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับ

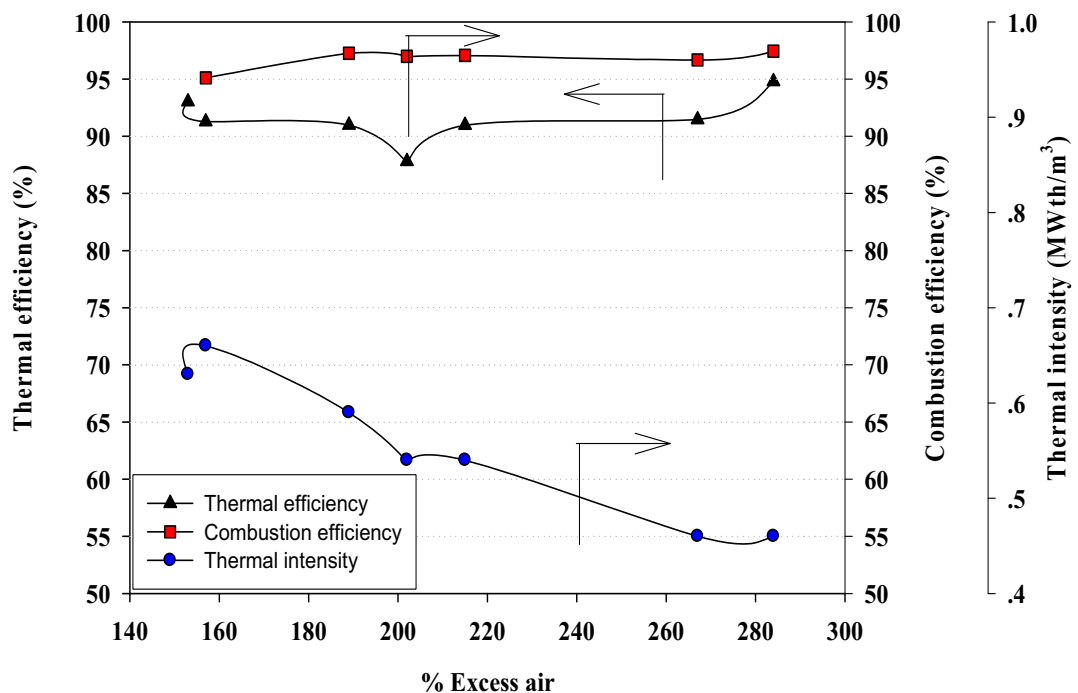
ห้องปฏิบัติการที่มีค่าสูงกว่า 98%(จากการทดลองเพิ่มเติมของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับห้องปฏิบัติการ) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าภาระความร้อนมีค่าในช่วง $0.46\text{-}0.67\text{ (MW}_{\text{th}}/\text{m}^3)$



รูปที่ 2.4 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับห้องปฏิบัติการ [4]

2.2.3 พิกัดเตาและค่าภาระความร้อน

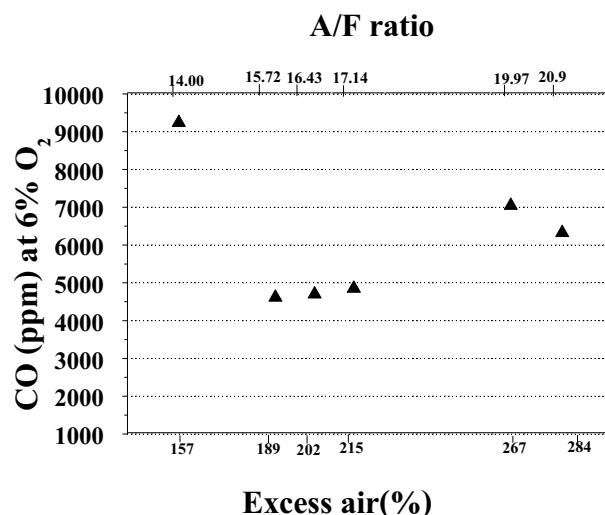
จากการทดลองเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับอุตสาหกรรมพบว่าอัตราการป้อนเชื้อเพลิงสูงสุดที่ทำได้ขณะนี้เท่ากับ $1,838\text{ kg/h}$ ซึ่งน้อยกว่าที่ออกแบบไว้คือ 2500 kg/h สาเหตุที่ไม่สามารถป้อนเชื้อเพลิงได้มากกว่านี้เนื่องจากจะทำให้อุณหภูมิภายในเตาสูงกว่า $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะทำให้เตาเสียหายและเป็นอันตรายได้ ขณะเดียวกันก็ไม่สามารถเพิ่มอากาศส่วนที่หนึ่งที่เข้าพร้อมเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากข้อจำกัดของขนาดพัดลมที่ใช้ อยู่ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ค่าภาระความร้อนเตาเผาไหม้และ พิกัดเตาที่ทดสอบได้จึงมีค่าต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ โดยมีค่ามากที่สุดเท่ากับ $0.67\text{ MW}_{\text{th}}/\text{m}^3$ และ $7.5\text{ MW}_{\text{th}}$ ตามลำดับ ในขณะที่ออกแบบไว้ที่ $0.85\text{ MW}_{\text{th}}/\text{m}^3$ และ 9 MW_{th} ตามลำดับ



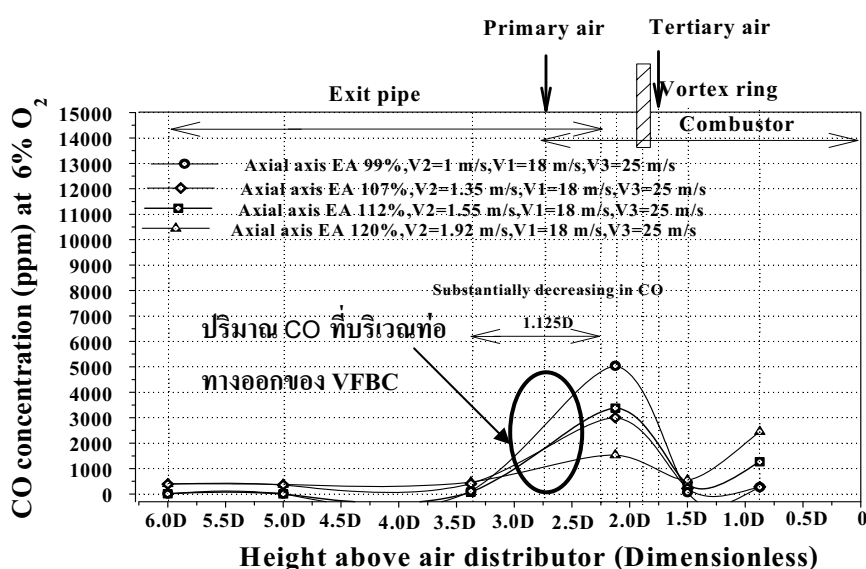
รูปที่ 2.5 แสดงสมรรถนะของ VFBC ระดับอุตสาหกรรม

2.2.4 องค์ประกอบก๊าซไอเสีย

จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับอุตสาหกรรมมีค่าน้อยกว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับห้องปฏิบัติการ เหตุผลคือเนื่องจากเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับอุตสาหกรรมมีความยาวของท่อทางออกเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางน้อย(ประมาณ $0.5D$ เมื่อ D คือเส้นผ่าศูนย์กลางในของเตาเผาไหม้)เมื่อเทียบกับเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับห้องปฏิบัติการทำให้ไม่มีระยะเวลาเพียงพอในการเผาไหม้ CO ให้กลายเป็น CO_2 จึงทำให้ค่า CO ที่วัดได้ที่ตำแหน่งทางออก ในทุกเงื่อนไขการทดลอง มีปริมาณมากโดยมีค่าอยู่ในช่วง 4,000-9,500 ppm ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งจากการศึกษาการกระจายตัวของก๊าซ CO ตามระดับความสูงของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับห้องปฏิบัติการ จะพบว่า CO ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ ที่ระดับความสูงนับจากแผ่นกระจายอากาศ $2.25D$ (ที่ตำแหน่งท่อทางออก) ยังมีปริมาณที่สูงอยู่และจะมีการเผาไหม้ต่อไปจนเหลือปริมาณ CO ประมาณ 100-500 ppm ที่ตำแหน่ง $3.375D$ ซึ่งระยะทางระหว่างตำแหน่งท่อทางออก($2.25D$)กับตำแหน่งที่เริ่มมีปริมาณ CO เหลือน้อย ($3.375D$) มีระยะทางประมาณ $1.125D$ ดังรูปที่ 2.7 ดังนั้นหากต้องการลดปริมาณ CO ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับอุตสาหกรรมจำเป็นต้องเพิ่มความยาวของท่อทางออกจากเดิมอีกเป็นระยะทางประมาณ $0.6D$ หรือประมาณ 1.2 m (เดิมท่อทางออกของเตาสั้นประมาณ $0.5D$) เพื่อให้มีความยาวเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางใกล้เคียงกับท่อทางออกของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับห้องปฏิบัติการ แต่ทั้งนี้เตาเผาไหม้ต้นแบบได้ถูกก่อสร้างภายในอาคารซึ่งมีความสูงจำกัด จึงไม่สามารถเพิ่มความยาวท่อทางออกไปอีก



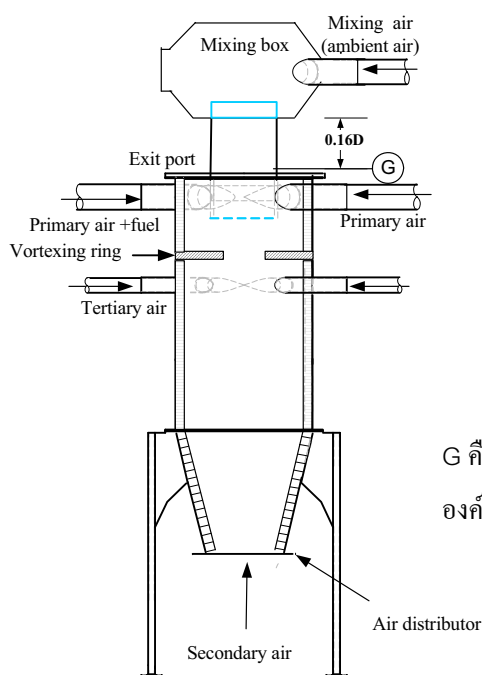
รูปที่ 2.6 แสดงปริมาณ CO ที่ทางออก ที่ Excess air ต่างๆ ของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.7 การกระจายตัวของก๊าซ CO ตามระดับความสูงของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับห้องปฏิบัติการ

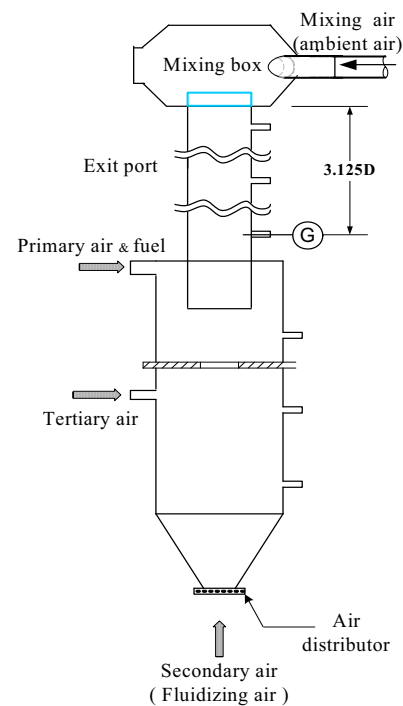
จากรูปที่ 2.6 และ 2.7 จะเห็นได้ว่าปริมาณ CO ที่วัดที่บริเวณท่อทางออกของ VFBC ระดับอุตสาหกรรม (4000-9500 ppm) จะมีค่ามากกว่าปริมาณ CO ที่วัดที่บริเวณท่อทางออกของ VFBC ระดับห้องปฏิบัติการ (2000-3000 ppm) เนื่องจากบริเวณจุดวัดก๊าซไอเสียของ VFBC ระดับอุตสาหกรรมเป็นบริเวณที่ใกล้กับกล่องผสมอากาศ (mixing box) ซึ่งห่างจากกันเพียง 0.3 m (ประมาณ 0.16D) ดังรูปที่ 2.8 จึงทำให้ O₂ ส่วนหนึ่งที่ถูกจ่ายเข้ามาในกล่องผสมอากาศ เข้ามาผสมกับก๊าซร้อนที่บริเวณท่อทางออก (ซึ่งปริมาณ O₂ ที่วัดได้ที่ท่อทางออกมีค่าประมาณ 19-20%) ดังนั้นเมื่อคำนวณปริมาณ CO โดยคิดเทียบกับที่ O₂ ส่วนเกิน 6% จะได้ปริมาณ CO ที่มีค่าสูงมาก ต่างกับบริเวณจุดวัดก๊าซไอเสียของ VFBC ระดับ ห้องปฏิบัติการ ซึ่งห่างจากกล่องผสมอากาศ ประมาณ 1.25m (ประมาณ 3.125D) ดังรูปที่ 2.9 ดังนั้น O₂ จึงไม่มีโอกาสจะเข้ามาผสมกับก๊าซร้อนที่บริเวณท่อทางออกได้เลย (ซึ่งปริมาณ O₂

ที่วัดได้ที่ท่อทางออกมีค่าประมาณ 9-11 %) จึงทำให้ปริมาณ CO ของ VFBC ระดับห้องปฏิบัติการมีค่าต่ำกว่าปริมาณ CO ของ VFBC ระดับอุตสาหกรรมดังกล่าว



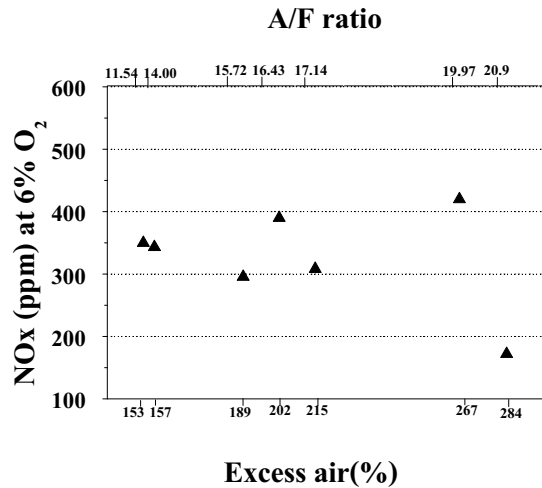
G คือ ตำแหน่งวัด
องค์ประกอบก๊าซเสีย

รูปที่ 2.8 แสดงระยะห่างระหว่างจุดวัดก๊าซกับกล่องผสม
อากาศของ VFBC ระดับอุตสาหกรรม

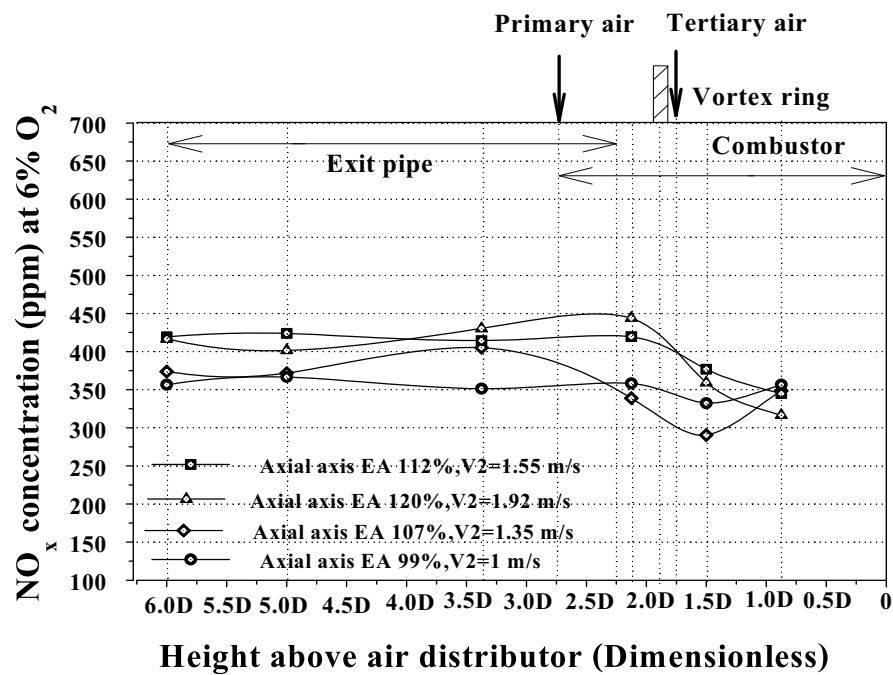


รูปที่ 2.9 แสดงระยะห่างระหว่างจุดวัดก๊าซกับกล่องผสม
อากาศของ VFBC ระดับห้องปฏิบัติการ

ปริมาณก๊าซ NO_x ที่วัดได้จากเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิโดซ์เบดระดับอุตสาหกรรม ดังรูปที่ 2.10 พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 170-420 ppm (ที่ O_2 6%) ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณก๊าซ NO_x ที่วัดได้จากเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิโดซ์เบดในห้องปฏิบัติการแสดงดังรูปที่ 2.11 ซึ่งพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 280-450 ppm (ที่ O_2 6%)



รูปที่ 2.10 แสดงปริมาณ NO_x ที่ทางออก ที่ Excess air ต่างๆ ของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับ
อุตสาหกรรม



รูปที่ 2.11 การกระจายตัวของก๊าซ NO_x ตามระดับความสูงของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับ
ห้องปฏิบัติการ

บทที่ 3

สรุปผลการทดลอง

ตารางที่ 3.1 ความแตกต่างระหว่างผลการทดลองจริงกับที่ออกแบบไว้ (VFBC ระดับห้องปฏิบัติการ)

ประเด็น	ผลการทดลองจริง	ที่ออกแบบไว้ (VFBC ระดับปฏิบัติการ)	เหตุผล
1. ภาระความร้อน(MW_{th}/m^3) และ ขนาดพิกัดของเตา (MW_{th})	$0.67(MW_{th}/m^3)$ และ $7.5MW_{th}$	$0.85(MW_{th}/m^3)$ และ $9 MW_{th}$	เนื่องจากอัตราการป้อนเชื้อเพลิงสูงสุดที่ทำได้ขณะนี้เท่ากับ $1,838 \text{ kg/h}$ (ออกแบบไว้ $2,500 \text{ kg/h}$) สาเหตุที่ไม่สามารถป้อนเชื้อเพลิงได้มากกว่านี้เพราะจะทำให้อุณหภูมิภายในเตาสูงกว่า $1,300^\circ\text{C}$ ซึ่งจะทำให้เตาเสียหายและเป็นอันตรายได้ขณะเดียวกันก็ไม่สามารถเพิ่มอากาศส่วนที่หนึ่งที่จ่ายลมพร้อมกับเชื้อเพลิงได้เนื่องจากข้อจำกัดของพัดลมที่ใช้อยู่
2. ประสิทธิภาพการเผาไหม้	94 - 97%	มากกว่า 98%	เนื่องจากความยาวที่ท่อทางออกสั้นเกินไปทำให้ไม่มีเวลาพอที่ CO จะเผาไหม้กลายเป็น CO_2 ทำให้ปริมาณ CO ที่วัดได้ที่ตำแหน่งทางออกมีปริมาณมากโดยมีค่าอยู่ในช่วง 4,000-9,500 ppm (ที่ O_2 ส่วนเกิน 6%)
3. เวลาในการ Operate	3 - 4 ชั่วโมง	8-10 ชั่วโมง	เนื่องจากถ้าจะ Operate VFBC ระดับอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง 8-10 ชั่วโมง จะต้องใช้เกลบประมาณ 20 ตัน หรือประมาณ 7 คันรถสิบล้อ ซึ่งบริเวณที่ทดสอบมีพื้นที่ไม่มากพอ และการป้อนด้วยกระป๋องยังคงต้องใช้คน (ทีมงานวิจัย) ในการ โยกเกลบเข้าสู่กระป๋องป้อน

3.2. สรุปผลการทดลอง

ในการดำเนินการทดสอบสมรรถนะของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับอุตสาหกรรมสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. อุณหภูมิภายในเบดของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับอุตสาหกรรมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1000-1250°C ในทุกเงื่อนไขการทดลอง
2. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประสิทธิภาพการเผาไหม้เป็นค่าดัชนีที่ใช้บอกสมรรถนะของเตา โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะบอกความคุ้มค่าของการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิง ส่วนประสิทธิภาพการเผาไหม้จะเป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานจากพลังงานเชื้อเพลิงเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับอุตสาหกรรมมีค่าอยู่ระหว่าง 88-94% และประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าอยู่ในช่วง 94-97%
3. ภาระความร้อนเป็นค่าดัชนีอีกตัวหนึ่งที่เป็นดั่งบ่งบอกถึงความคุ้มค่าในการใช้พื้นที่ภายในเตาโดยค่าภาระความร้อนของจะแปรผกผันกับเงินทุนในการก่อสร้างเตา ซึ่งค่าภาระความร้อนของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับอุตสาหกรรมมีค่าประมาณ $0.67 \text{ MW}_{\text{th}}/\text{m}^3$ และมีพิกัดเตาอยู่ประมาณ $7.5 \text{ MW}_{\text{th}}$
4. ปริมาณก๊าซ CO , NO_x ที่วัดจากตำแหน่งทางออกของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับอุตสาหกรรม ซึ่งมีปริมาณ CO มากซึ่งอยู่ในช่วง 4,000-9,500 ppm เนื่องจากความยาวท่อทางออกสั้นเกินไปทำให้ไม่มีเวลาพอที่ CO จะเผาไหม้กลายเป็น CO_2 ส่วนปริมาณก๊าซ NO_x มีค่าอยู่ในช่วง 170-420 ppm (ที่ O_2 6%) ตามลำดับ

3.3. ปัญหาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง

การทดสอบสมรรถนะเบื้องต้นของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับอุตสาหกรรมนี้ แต่ละครั้งพบปัญหาเกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ ทำให้ต้องเสียเวลาปรับปรุงแก้ไขก่อนจึงจะสามารถทดสอบสมรรถนะของ VFBC ต่อได้ สำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นสามารถสรุปประเด็นหลักๆได้ดังนี้

- ปัญหาในเรื่องคน เนื่องจากในการป้อนเชื้อเพลิงเข้าถังพักเกล็ด (hopper) ยังคงต้องใช้กระป๋อง ซึ่งยังคงต้องใช้คน(ทีมงานวิจัย)ในการ โยกเกล็ดเข้าสู่กระป๋องป้อน
- เนื่องจาก VFBC ระดับอุตสาหกรรมมีขนาดใหญ่ทำให้การแก้ปัญหาหน้างานในแต่ละครั้งต้องใช้เวลาและแรงงานเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะไม่คล่องตัวเหมือนในระดับห้องปฏิบัติการและในการแก้ปัญหาทางด้านเทคนิคแต่ละครั้งจะต้องรอช่างเทคนิคของทางบริษัทเกษตรไทยอินเตอร์ จึงทำให้เป็นการเสียเวลามาก

ในส่วนรายละเอียดของปัญหาต่างที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบสมรรถนะแสดงอยู่ในภาคผนวก ค

3.4. ข้อสรุปเกี่ยวกับประเด็นการนำ VFBC ไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม

1. ผู้ประกอบการพอใจกับภาระความร้อนที่เตาอุตสาหกรรมทำได้อยู่ในปัจจุบันคือ $0.67 \text{ MW}_{\text{th}}\text{m}^{-3}$ (ซึ่งในความเห็นของผู้วิจัยน่าจะทำได้มากกว่านี้ถ้าสามารถป้อนแกลบได้ทัน) ซึ่งถึงแม้ว่าจะต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ $0.85 \text{ MW}_{\text{th}}\text{m}^{-3}$ แต่ก็ยังคงสูงกว่าเตาไซโคลนที่ผู้ประกอบการผลิตอยู่ ซึ่งทำได้เพียง $0.25 \text{ MW}_{\text{th}}\text{m}^{-3}$ ทำให้เตา VFBC มีขนาดเล็กลงไปมากเมื่อเทียบกับอัตราการผลิตความร้อนที่เท่ากัน ซึ่งจะทำให้ผู้ประกอบการลดต้นทุนไปได้มาก (พิกัดเตาที่ออกแบบไว้คือ 9 MW_{th} ที่ทำได้ขณะนี้คือ $7.5 \text{ MW}_{\text{th}}$)

2. ในด้านของการนำ VFBC ไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมทางผู้ประกอบการเองก็พยายามจะผลักดันนำ VFBC ไปใช้ในด้านอุตสาหกรรมโรงสีข้าว(เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่มีแกลบเหลือใช้อยู่แล้ว) แต่เนื่องจากในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมโรงสีข้าวเติบโตอย่างมาก ทำให้โรงสีข้าวแต่ละแห่งเพิ่มกำลังผลิตของตัวเองด้วยการสั่งซื้อเตาเผาไหม้ เครื่องอบ ไซโล ฯลฯ เพิ่มเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้กำลังผลิตที่ทำได้ในปัจจุบันนั้นเกินกว่าปริมาณข้าวเปลือกที่ผลิตต่อปี จนทำให้ทุกวันนี้โรงสีข้าวแต่ละแห่งต้องแย่งกันซื้อข้าวเปลือกเพราะกำลังผลิตที่ทำได้นั้นมากกว่าปริมาณข้าวเปลือกที่มีอยู่ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ปัจจุบันนี้ตลาดโรงสีมีศักยภาพในการสั่งซื้อต่ำ เพราะฉะนั้นจึงเป็นการยากที่จะผลักดันนำ VFBC ไปใช้ในด้านอุตสาหกรรมโรงสีข้าวได้ ซึ่งแม้แต่เตาเผาไซโคลนที่ผู้ประกอบการผลิตเอง ในช่วงนี้ยังไม่ค่อยได้มีการจำหน่ายเลย

3. ด้วยเหตุที่ตลาดโรงสีมีศักยภาพในการสั่งซื้อต่ำ จึงทำให้ผู้ประกอบการหันมาสนใจอุตสาหกรรมอื่นที่ไม่ใช่อุตสาหกรรมโรงสี เช่น อุตสาหกรรมผลิตอาหารสัตว์ โรงงานผลิตแป้งมัน โดยจะนำความร้อนที่ได้จากเตาเผาไหม้ไปอบเมล็ดข้าวโพดและผงแป้ง อุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง โดยจะนำความร้อนไปใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อโรค ฯลฯ เพื่อที่จะเปิดกว้างในการนำ VFBC ระดับอุตสาหกรรมไปใช้งานมากขึ้น โดยมีข้อจำกัดที่ว่าต้องปรับเปลี่ยน VFBC นี้ให้สามารถใช้กับเชื้อเพลิงชนิดอื่นที่อุตสาหกรรมนั้นๆมีอยู่ได้ด้วย เช่น ชังข้าวโพด เหมืองถ่าน

3.5. ความคิดเห็นเพิ่มเติมของผู้วิจัย

จากการที่ได้คุยกับผู้ประกอบการถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในเรื่องของการนำ VFBC ไปใช้งานทำให้ทางคณะวิจัยหาช่องทางในการนำ VFBC ไปใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่น โดยได้มีบริษัทเอกชนรายหนึ่งติดต่อประสานเข้ามาคือ บริษัทร่วมทุนจัดการพลังงาน จำกัด ซึ่งประกอบกิจการในการร่วมทุนสร้างโรงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยเป้าหมายของบริษัทคือสร้างโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นหลักซึ่งโรงไฟฟ้าที่จะดำเนินการสร้างนั้นจะมีลักษณะของระบบผลิตไฟฟ้า ความร้อนร่วม(Cogeneration) และเข้าร่วมกับโครงการผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (SPP) สำหรับเชื้อเพลิงที่ได้รับความสนใจอยู่ในขณะนี้คือ ทลายปาล์ม โดยเฉพาะในภาคใต้ซึ่งจะเป็นแหล่งที่จะก่อสร้างโรงไฟฟ้า (ประมาณ 2-3 แห่ง) และชังข้าวโพด โดยตอนนี้ยังอยู่ในช่วงประเมินโครงการ นอกจากนี้ทางผู้รับเหมาสร้างโรงไฟฟ้าชีวมวล ยังมีความสนใจที่จะนำถ่านหินบดกับขี้เถ้าไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวลในสัดส่วน(ความร้อน)ไม่เกิน 25 (ถ่านหิน): 75 (ชีวมวล) ตามข้อกำหนดของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานแห่งชาติ (สนพ.) โดยคาดว่าจะนำเตาเผาไหม้ VFBC ระดับอุตสาหกรรมไปใช้เป็นแหล่งผลิตความร้อน

ตารางที่ 3.2 แสดงผลการดำเนินงานที่ได้เทียบกับวัตถุประสงค์

ผลที่ได้รับ	บรรลุมูลวัตถุประสงค์ข้อที่	โดยทำให้
1. สามารถออกแบบและสร้าง VFBC ที่ใช้เผาไหม้จริงในระดับอุตสาหกรรมขนาด 9 MW _{th} โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงและทำการทดสอบจนได้ผลการทดลองครบถ้วนตามวัตถุประสงค์และได้ข้อสรุปเบื้องต้นของสมรรถนะโดยมีดัชนีชี้วัดอยู่ 3 ตัวคือ η_{th} , E_c และค่าภาระความร้อนของเตาเผาไหม้	1	1. สามารถสร้าง VFBC ที่ใช้เผาไหม้จริงในระดับอุตสาหกรรมขนาด 9 MW _{th} เป็นผลสำเร็จและทำการทดสอบสมรรถนะของ VFBC จนได้ข้อสรุปเบื้องต้นของสมรรถนะ ซึ่งพบว่าให้ค่าภาระความร้อนต่อหน่วยปริมาตรเตามีค่าเท่ากับ 0.67 MW _{th} /m ³ ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าอยู่ในช่วง 94-97% และประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าอยู่ในช่วง 90-95% ซึ่งดัชนีชี้วัดทั้ง 3 ตัวสูงกว่าเตาเผาไหม้ทั่วไปที่ใช้กันอยู่ภายในประเทศและไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

3.6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัท เกษตรไทยอินเตอร์(22) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย คุณวิบูรณ์ เทเพนทร์ สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรมกลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวที่กรุณาให้คำแนะนำต่องานวิจัยนี้ และขอบคุณทีมงานวิจัยทุกท่านที่ช่วยทำให้งานวิจัยนี้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Armesto, L., Bahillo, A., Veijonen, K., Cabanillas, A., Otero, J., Combustion behavior of rice husk in a bubbling fluidized bed, *Biomass & Bioenergy*, 2002 Vol. 23, pp.171-179
- [2] Cengel, Y.A., Boles, M.A., “Thermodynamics an Engineering Approach”, 4th Edition, McGraw-Hill, Newyork, pp.863, 2002
- [3] Kunii D., Levenspiel, O., “Fluidization Engineering”, 2nd Edition, Butterworth-Heinemann, USA, pp.69, 1991
- [4] Madhiyanon, T., Piriyaungroj, N, Nathakaranakule, A. and Soponronnarit, S., A Novel Vortex – Fluidized Bed Combustor with Two Combustion Chambers for Rice-Husk Fuel, *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 2004 Vol. 26 No.6, pp.875-893
- [5] Nag, P.K., “Heat Transfer”, Tata McGraw-Hill, New Delhi, pp.705, 2004
- [6] Natarajan, E., Nordin A and Rao A.N. 1998. Overview of Combustion and Gasification of Rice Husk in Fluidized Bed Reactor, *J. Bioenergy*, 14(5/6) : 533-546
- [7] Soponronnarit, S., Swasdisevi, T., Wetchacama S, Shujinda A and Srisawat B. 2000. Cyclone Rice Husk Furnace and Its Application on Paddy Drying, *Int. Energy J.*, 1(2) : 67-75.

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณดัชนีบ่งบอกสมรรถนะของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดโดยใช้เชื้อเพลิง

แกลบในระดับอุตสาหกรรม กรณีอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 1,838 kg/h

เนื่องจากทางผู้วิจัยใช้ Inverter ในการปรับอัตราป้อนของเชื้อเพลิงซึ่งแสดงผลในหน่วยของ Hz ดังนั้นจึงต้องทำการหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิง โดยจับเวลาการป้อนเชื้อเพลิงจาก Hopper ซึ่งใส่แกลบไว้จนเต็ม สำหรับ Hopper ที่ใช้มีลักษณะดังรูปที่ 14 ซึ่งมีปริมาตรเท่ากับ 2.286 m^3

∴ ความหนาแน่นปรากฏของแกลบมีค่าเท่ากับ 135 kg/m^3

∴ มวลของแกลบต่อ 1 Hopper = $135 \times 2.286 = 308.61 \text{ kg}$

∴ เวลาที่ใช้ป้อนเชื้อเพลิงจนหมด Hopper เท่ากับ 10.09 min

∴ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ $\frac{308.61}{10.09} \times 60 = 1,838 \text{ kg/h}$

เนื่องจากปริมาณอากาศทั้งหมดที่ป้อนเข้าเตามีค่าอัตราไหลเชิงมวลเท่ากับ 7.14 kg/s

$$\therefore \frac{A}{F_{ac}} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = \frac{7.14}{1838} \times 3600 = 13.99$$

- การคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) ของเตา

$$\therefore \eta_{th} = \left[\frac{(\dot{m}_g T_g C_{p,g}) - (\dot{m}_a T_{amb} C_{p,amb})}{\dot{m}_f E_f} \right] \times 100$$

$$\therefore \dot{m}_g = \dot{m}_a + (\dot{m}_f \times (1 - 0.14))$$

จากตารางที่ 3 แทนค่าในสมการจะได้

$$\eta_{th} = \frac{(((7.14 \times 3600) + (1838 \times 0.86)) \times (785 \times 273) \times 1.14) - ((7.14 \times 3600) \times 303 \times 1.005))}{1838 \times 14980} \times 100 = 91.3\%$$

- การคำนวณหาภาระความร้อนของเตา

$$\therefore \text{Thermal intensity} = \frac{\dot{m}_f \text{HHV} \eta_{th}}{\text{Volume}}$$

ปริมาตรของเตาคือ 10.59 m^3

$$\therefore \text{Thermal intensity} = \frac{1838 \times 14.98 \times 0.91}{3600 \times 10.59} = 0.65 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$$

- การคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตา

$$\therefore \eta_C = \left[\frac{(E_F - E_a - E_{fg})}{E_F} \right] \times 100 \%$$

คำนวณปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าเตาเผาไหม้(E_F) จาก

$$E_F = \dot{m}_f e_f$$

e_f = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg) = 14.98 MJ/kg

$\dot{m}_f$ = อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/s) ซึ่งในการทดลองใช้อัตราการป้อนที่ 1838 kg/hr

$$E_F = \frac{1838}{3600} \times 14.98 = 7.648 \text{ MW}$$

คำนวณปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ในเถ้า (E_a)

E_a = คาร์บอนที่เหลือในเถ้า (%) $\times \dot{m}_f \times$ อัตราการออกของเถ้า (%) $\times$ ค่าความร้อนของคาร์บอน MJ/kg ^0C

ความร้อนของคาร์บอน(C) มีค่าเท่ากับ 32.748 MJ/kg ^0C และคาร์บอนที่เหลือในเถ้ามีค่าเท่ากับ 3.726 %

$$\text{ดังนั้น } E_a = 3.726\% \times \frac{1838}{3600} \times 13.9\% \times 32.748 = 0.0866 \text{ MW}$$

คำนวณปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สเสีย (E_{fg})

ที่ Excess Air เท่ากับ 157% มีองค์ประกอบแก๊สเสียออกมาดังนี้

Gas	By Volume	Molecular weight	By Vol. $\times$ Molecular weight	By Mass
CO ₂	0.01984	44	0.8729	0.0300
CO	0.001381	28	0.0386	0.0013
O ₂	0.1878	32	6.0096	0.2067
N ₂	0.790979	28	22.147	0.7619
		Total	29.068	1

จากการทดลอง

- อัตราของเถ้าที่ออกมาจากการเผาไหม้เฉลี่ย = 13.9% (จากการทดลอง)
- ปริมาณคาร์บอนที่เหลืออยู่ในเถ้ามีค่าเฉลี่ยที่ = 3.726% (จากการวิเคราะห์เถ้า)

ทำสมมูลคาร์บอนเพื่อหาแก๊สเผาไหม้แห่งที่เกิดขึ้นต่อ 1 kg เชื้อเพลิง

คาร์บอนที่เผาไหม้(C_b) = ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดใน 1 kg เชื้อเพลิง, C – ปริมาณคาร์บอนในกาก

ของแข็งที่เหลือจากการเผาไหม้, C_{ub}

- หาค่า $C_{ub} = (13.9/100) \times (3.726/100) = 0.00518 \text{ kgC/kg}_f$
- หาค่า $C_b = 0.38 - 0.00518 = 0.3748 \text{ kgC/kg}_f$

คำนวณสัดส่วนคาร์บอนใน 1 kg แก๊สเผาไหม้แห้ง

คำนวณค่าคาร์บอนใน CO_2

$$C_{\text{in CO}_2} = \left[\frac{12}{44} \right] \times 0.03 = 0.008188 \text{ kgC/kg}_{\text{dfg}}$$

คำนวณค่า C ใน CO

$$C_{\text{in CO}} = \left[\frac{12}{28} \right] \times 0.0013 = 0.000557 \text{ kg C/kg}_{\text{dfg}}$$

หาปริมาณแก๊สไอเสียแห้งที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ เท่ากับ ปริมาณ C_b ในเชื้อเพลิง 1 kg จากความจริงที่ว่า คาร์บอนใน CO_2 และ CO ในแก๊สเผาไหม้ เท่ากับ C_b ในเชื้อเพลิง 1 kg ดังนั้นการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg จะเกิด

$$\text{แก๊สเผาไหม้แห้ง} = \frac{0.3748}{0.00874} = 42.8 \text{ kg}_{\text{dfg}} / \text{kg}_f$$

คำนวณปริมาณ CO ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg (โดยค่าความร้อนของ CO มีค่าเท่ากับ 10,106 kJ/kg_{co})

$$\text{CO} = 0.0013 \times 42.8 = 0.05564 \text{ kg}_{\text{CO}} / \text{kg}_f$$

$$E_{\text{fg}} = 0.05564 \frac{\text{kg}_{\text{CO}}}{\text{kg}_f} \times 10,106 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{CO}}} \times 1838 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}}$$

$$= 0.287 \text{ MW}$$

$$\eta_C = \frac{7.648 - 0.0866 - 0.287}{7.648} \times 100 = 95.1\%$$

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข ตารางแสดง Technical specifications พร้อมทั้งตัวอย่างการคำนวณขนาดพัดลมและ ตารางแสดงการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมต่ออัตราการความร้อนที่ผลิตได้ของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด 9 MW_{th} กับ 100 kw

ตารางที่ ข.1 แสดง Technical specifications ของเตาเผาไหม้ระดับอุตสาหกรรม

อุปกรณ์	ขนาด
<u>ชุดจ่ายอากาศส่วนที่ 1 (เปื้อนพร้อมกับเชื้อเพลิง)</u>	
1. Blower	20 (hp)
2. ท่ออากาศ	12 (inch)
<u>ชุดจ่ายอากาศส่วนที่ 2 (ด้านล่างเตา)</u>	
1. Blower	10 (hp)
2. ท่ออากาศ	10 (inch)
<u>ชุดจ่ายอากาศส่วนที่ 1 (จ่ายเฉพาะอากาศ)</u> <u>และส่วนที่ 3 (จ่ายไถ้วงแหวน)</u>	
1. Blower	15 (hp)
2. ท่ออากาศ	8 (inch)
<u>ชุดใบกวน</u>	
1. Motor	5 (hp)
<u>ชุด cyclone (จำนวน 2 ชุด)</u>	D = 1.50 (m)

ตารางที่ ข.2 เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมต่ออัตราการความร้อนที่ผลิตได้

	เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์ เบด 9 MW _{th}		เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์ เบด 100 kW	
	รวม kW	kw _{ไฟฟ้า} /MW _{th}	ขนาด kW	kw _{ไฟฟ้า} /MW _{th}
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลม	33.60	3.73	0.34	3.36

หมายเหตุ สาเหตุที่ไม่สามารถเปรียบเทียบพัดลมแต่ละตัวของเตาในระดับห้องปฏิบัติการและเตาเผาไหม้ในระดับอุตสาหกรรม เพราะว่า พัดลมที่ติดตั้งในระดับอุตสาหกรรมไม่ได้ใช้เพื่อทำหน้าที่อย่างใดอย่างหนึ่งเหมือนที่ใช้ในระดับห้องปฏิบัติการ

ตัวอย่างการคำนวณขนาดพัดลม

การหาอัตราการไหลของอากาศส่วนต่างๆ ที่จ่ายเข้าเตาเผาไหม้

การหาอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายเข้าสู่เตาเผาไหม้คำนวณจากอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ใน VFBC ระดับห้องปฏิบัติการดังนี้

$$(A/F)_{\text{pri. air}} = 5.83 \text{ kg air /kg rice husk}$$

$$(A/F)_{\text{sec. air}} = 2.19 \text{ kg air /kg rice husk}$$

$$(A/F)_{\text{ter. air}} = 2.02 \text{ kg air /kg rice husk}$$

$$\text{รวม } (A/F)_{\text{act}} = (5.83+2.19+2.02) = 10.04 \text{ kg air /kg rice husk}$$

จากการคำนวณข้างต้นค่า(A/F) ของแกลบทางทฤษฎี เท่ากับ 4.55 kg air /kg rice husk

ดังนั้น Excess air = 120 %

∴เตาเผาไหม้วอร์เทคฟลูอิดไคซ์เบดขนาด 9 MW_{th} มีค่าอัตราการป้อนเชื้อเพลิง

$$\text{เท่ากับ } 2,541 \left(\frac{\text{kg fuel}}{\text{h}} \right)$$

∴ ปริมาณอากาศที่ใช้จริงในเตาเผาไหม้วอร์เทคฟลูอิดไคซ์เบดขนาด 9 MW_{th} คือ

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศส่วนที่หนึ่ง} &= 5.83 \left(\frac{\text{kg air}}{\text{kg rice husk}} \right) \times 2,541 \left(\frac{\text{kg fuel}}{\text{h}} \right) \\ &= 14,814 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่หนึ่ง} &= 14,814 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times \frac{1}{1.2} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right) \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \\ &= 3.44 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศส่วนที่สอง} &= 2.19 \left(\frac{\text{kg air}}{\text{kg rice husk}} \right) \times 2,541 \left(\frac{\text{kg fuel}}{\text{h}} \right) \\ &= 5,564.79 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่สอง} &= 5,564.79 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times \frac{1}{1.2} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right) \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \\ &= 1.288 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศส่วนที่สาม} &= 2.02 \left(\frac{\text{kg air}}{\text{kg rice husk}} \right) \times 2,541 \left(\frac{\text{kg fuel}}{\text{h}} \right) \\ &= 5,132 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \end{aligned}$$

$$\therefore \text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่สาม} = 5,132 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times \frac{1}{1.2} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right) \times \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} = 1.18 \text{ m}^3/\text{s}$$

เลือกขนาดพัดลม

อากาศส่วนที่หนึ่ง

อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่หนึ่ง = $3.44 \text{ m}^3/\text{s}$

$\therefore$ ความดันสูญเสียเนื่องการจ่ายอากาศส่วนที่หนึ่งคือ

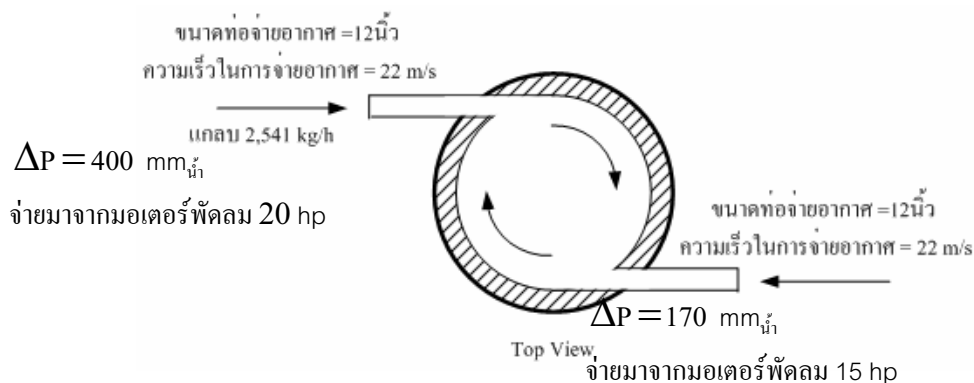
$$\Delta P = \Delta P_{\text{rice husk injector}} + \Delta P_{\text{major \& minor loss}} + \Delta P_{\text{combustor}} + \Delta P_{\text{other}} = 400 \text{ mmHg} = 3.92 \text{ kPa}$$

$\therefore$ ประสิทธิภาพของพัดลมมีค่าเท่ากับ 50 %

$$\therefore \text{ขนาดของมอเตอร์พัดลมมีค่า} = Q \times \Delta P = \frac{3.44 \times 3.92}{0.5} = 26.993 \text{ kW} = 36 \text{ hp}$$

$\therefore$ จะเห็นได้ว่าจะต้องใช้มอเตอร์พัดลมขนาด 36 hp ซึ่งมีขนาดใหญ่และทางโรงงานไม่ได้สร้าง พัดลมขนาดใหญ่เท่านี้จึงต้องทำการแบ่งการจ่ายอากาศส่วนที่หนึ่งออกเป็นสองท่อเท่าๆกัน ซึ่งแสดงไว้ ดังรูปที่ ข.1 โดยแต่ละท่อจะมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ $1.72 \text{ m}^3/\text{s}$ โดยความเร็วที่ใช้ในการจ่ายอากาศจะเท่ากับ 22 m/s

$$\therefore \text{ขนาดของท่อ } D_{\text{pri}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \times \frac{1.72 \text{ (m}^3/\text{s)}}{22 \text{ (m/s)}}} = 0.316 \text{ m} \approx 12"$$



รูปที่ ข.1 แสดงการจ่ายอากาศส่วนที่หนึ่ง

การป้อนแกลบเข้าเตาเผาไหม้จะใช้ท่อเพียงท่อเดียวในการลำเลียงแกลบ

โดยอัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ $1.72 \text{ m}^3/\text{s}$

และความดันสูญเสียเนื่องการจ่ายอากาศส่วนที่หนึ่งคือ $400 \text{ mmHg} = 3.92 \text{ kPa}$

$\therefore$ ประสิทธิภาพของพัดลมมีค่าเท่ากับ 50 %

$$\therefore \text{ขนาดของมอเตอร์พัดลมมีค่า} = Q \times \Delta P = \frac{1.72 \times 3.92}{0.5} = 13.4848 \text{ kW} = 18 \text{ hp}$$

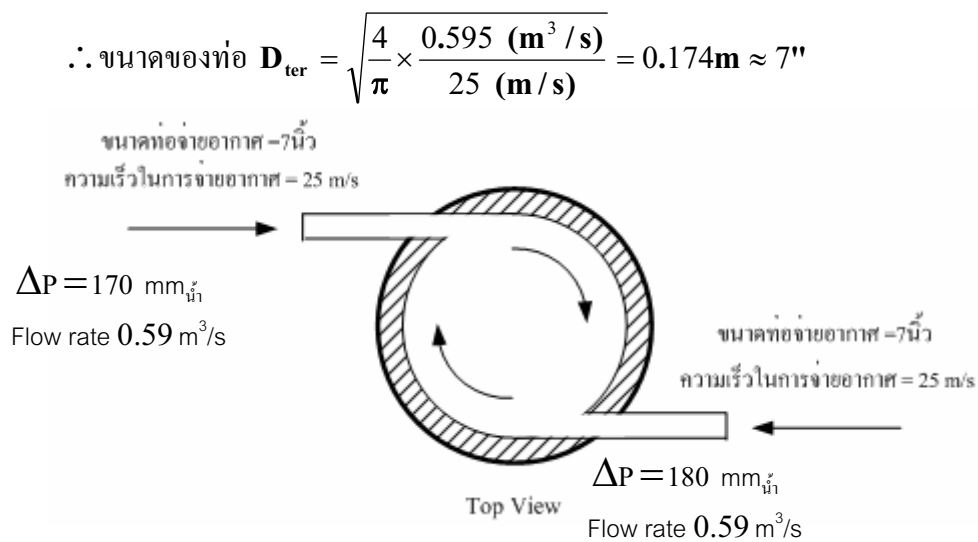
$\therefore$ เลือกใช้มอเตอร์พัดลมขนาด 20 hp #

อากาศอีกส่วนที่ป้อนเข้าทางอากาศส่วนที่หนึ่งจะมีไว้เพื่อรักษามันอากาศที่เกิดขึ้นให้มีค่าใกล้เคียงกับ VFBC ในระดับห้องปฏิบัติการซึ่งอากาศอีกส่วนนี้แบ่งมาจากพัดลมที่ใช้ป้อนอากาศส่วนที่สาม โดยมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ $1.72 \text{ m}^3/\text{s}$ และความดันสูญเสียเนื่องการจ่ายอากาศส่วนที่หนึ่งคือ $\Delta P = \Delta P_{\text{major \& minor loss}} + \Delta P_{\text{combustor}} + \Delta P_{\text{other}} = 150 \text{ mmHg} = 1.47 \text{ kPa}$

อากาศส่วนที่สาม

อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่สาม $= 1.18 \text{ m}^3/\text{s}$

โดยจะแบ่งการจ่ายอากาศออกเป็นสองท่อเท่าๆกัน ซึ่งแสดงไว้ ดังรูปที่ ข.2 โดยแต่ละท่อจะมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ $0.59 \text{ m}^3/\text{s}$ ความเร็วที่ใช้ในการจ่ายอากาศจะเท่ากับ 25 m/s โดยขนาดของท่อที่ใช้สามารถคำนวณได้จาก



รูปที่ ข.2 แสดงการจ่ายอากาศส่วนที่สาม

โดยความดันสูญเสียเนื่องการจ่ายอากาศส่วนที่สามในส่วนของท่อที่จุดที่ 1

$$\Delta P = \Delta P_{\text{major \& minor loss}} + \Delta P_{\text{combustor}} + \Delta P_{\text{other}} = 180 \text{ mmHg} = 1.765 \text{ kPa}$$

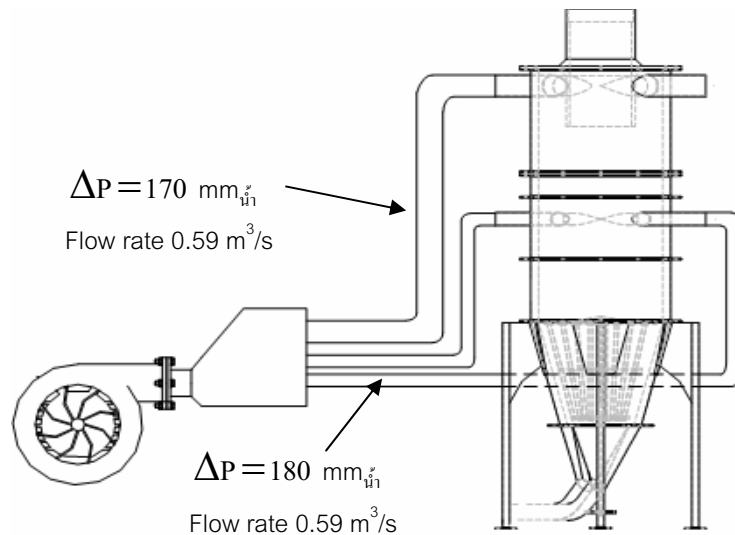
และความดันสูญเสียเนื่องการจ่ายอากาศส่วนที่สามในส่วนของท่อที่จุดที่ 2

$$\Delta P = \Delta P_{\text{major \& minor loss}} + \Delta P_{\text{combustor}} + \Delta P_{\text{other}} = 170 \text{ mmHg} = 1.67 \text{ kPa}$$

$\therefore$ จะเห็นได้ว่าพัดลมตัวนี้มีการจ่ายอากาศโดยแบ่งการจ่ายอากาศออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนที่จ่ายให้กับอากาศส่วนที่สามจำนวน 2 ท่อ และอีกส่วนใช้เพื่อจ่ายให้กับอากาศส่วนที่หนึ่งจำนวน 1 ท่อดังแสดงในรูป

$$\Delta P = 150 \text{ mmHg}$$

$$\text{Flow rate } 1.72 \text{ m}^3/\text{s}$$



รูปที่ ข.3 แสดงการจ่ายอากาศของพัดลมขนาด 15 hp

∴ อัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมคือ $0.59 + 0.59 + 1.72 = 2.9 \text{ m}^3/\text{s}$

∴ ความดันสูญเสียเนื่องจากการจ่ายอากาศจะพิจารณาที่ความดันสูญเสียที่มีค่ามากที่สุด

∴ จากรูป $\Delta P = 180 \text{ mmHg} = 1.765 \text{ kPa}$

∴ ประสิทธิภาพของพัดลมมีค่าเท่ากับ 50 %

$$\therefore \text{ขนาดของมอเตอร์พัดลมมีค่า} = Q \times \Delta P = \frac{2.9 \times 1.765}{0.5} = 10.237 \text{ kW} = 14 \text{ hp}$$

∴ เลือกใช้มอเตอร์พัดลมขนาด 15 hp #

อากาศส่วนที่สอง

อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่สอง = $1.288 \text{ m}^3/\text{s}$

โดยความดันสูญเสียเนื่องจากการจ่ายอากาศส่วนที่สองคือ

$$\Delta P = \Delta P_{\text{major \& minor loss}} + \Delta P_{\text{combustor}} + \Delta P_{\text{other}} = 210 \text{ mmHg} = 2.059 \text{ kPa}$$

∴ ประสิทธิภาพของพัดลมมีค่าเท่ากับ 50 %

$$\therefore \text{ขนาดของมอเตอร์พัดลมมีค่า} = Q \times \Delta P = \frac{1.288 \times 2.059}{0.5} = 5.303 \text{ kW} = 7 \text{ hp}$$

∴ เลือกใช้มอเตอร์พัดลมขนาด 10 hp #

∴ มอเตอร์พัดลมที่ใช้กับเตาเผาไหม้วอร์เทคฟลูอิดไซส์เบดขนาด 9 MW_{th} มี 3 ขนาดคือ

มอเตอร์พัดลมขนาด 20 hp #

มอเตอร์พัดลมขนาด 15 hp #

มอเตอร์พัดลมขนาด 10 hp #

ภาคผนวก ค

ภาคผนวก ก ตารางแสดงปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบสมรรถนะของเตาเผาไหม้วอร์เทคฟลูอิดซ์เบระดับ
อุตสาหกรรม

ตารางที่ ก.1แสดงปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบสมรรถนะของเตาเผาไหม้วอร์เทคฟลูอิดซ์เบระดับ
อุตสาหกรรม

วันที่ทดสอบ	ปัญหาที่เกิดขึ้นขณะทดสอบสมรรถนะเตา	การแก้ปัญหาสำหรับการทดสอบครั้งต่อไป
วันที่ 5-6 สิงหาคม 2547	1.ขนาดพัดลมของอากาศส่วนที่ 1 ที่จ่ายเข้ามา ด้านบนของเตาเผาไหม้ในแนวสัมผัสพร้อม เกลบที่บริษัทติดตั้งให้ไม่ได้ตามพิกัด(ความดัน และอัตราการไหล)ตามที่ออกแบบไว้ ทำให้ป้อน เกลบเข้าเตาเผาไหม้ได้น้อยกว่าที่ออกแบบ	1.ให้ทางบริษัทเกษตรไทย อินเตอร์ เปลี่ยนขนาดพัด ลมให้มีพิกัดมอเตอร์ได้ตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งพัดลม ตัวใหม่นี้แสดงในรูปที่ ก.2
	2.ใบกวนที่ใช้เป็นเหล็กเพลตันซึ่งมีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักมากเมื่อได้รับความดันภายใต้ อุณหภูมิสูงทำให้เหล็กอ่อนตัวและรับน้ำหนัก ไม่ได้จึงเกิดความเสียหายทำให้ไม่สามารถ ทดสอบต่อได้	2. ให้ทางบริษัทเปลี่ยนใบกวนจากเดิมที่เป็นเหล็ก เพลตันเป็นท่อสแตนเลส และมีการจ่ายอากาศเพื่อ หล่อเย็นภายในแกนเพลและที่บริเวณใบกวน แสดง ในรูปที่ ก.3
วันที่ 27-28 สิงหาคม 2547	1. ขณะที่กำลังทดสอบปรากฏว่า ชุดส่งกำลังใบ กวนพังเสียหาย จนไม่สามารถทดสอบต่อได้	1. ซ่อมชุดขับใบกวนและปรับแต่งชุดใบกวนให้ สามารถปรับตั้งความตึงของโซ่ส่งกำลังได้ซึ่งแสดง ในรูปที่ ก.4
วันที่ 23-25 กันยายน 2547	1. ขนาดไซโคลนที่ติดตั้งมีขนาดไม่เหมาะสมกับ ปริมาณก๊าซเสียที่ออกจากเตาเผาไหม้ทำให้เถ้าที่ เกิดจากการเผาไหม้หลุดออกไปด้านบนของ ไซโคลนเป็นส่วนใหญ่ บริเวณที่ทดสอบจึงเต็ม ไปด้วยเถ้าจึงไม่สามารถทดสอบต่อได้	1.ในการทดสอบครั้งต่อไปจึงเพิ่มไซโคลนจากเดิม 1 ตัว เป็น 2 ตัว ซึ่งแสดงในรูปที่ ก.5
	2. สายพานลำเลียงเชื้อเพลิงเกลบไม่สามารถขน ถ่ายเชื้อเพลิงเกลบได้ทัน เนื่องจากระดับ สายพานอยู่สูงต้องใช้แรงงานคนเป็นจำนวนมาก ขนจากกองเกลบด้านล่างขึ้นสู่สายพานจึงทำให้ ลำเลียงเกลบเป็นไปอย่างไม่ต่อเนื่องและไม่ สามารถทดสอบเตาได้ตามที่ต้องการ	2. ในการทดสอบครั้งต่อไปจึงติดตั้งกระพ้อตักเกลบ แทนสายพานลำเลียงซึ่งแสดงในรูปที่ ก.6
วันที่ 28-30 ตุลาคม 2547	1.เพื่อรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่(steady) ซึ่ง หลังการทดสอบไปได้ประมาณ 1 ชั่วโมง ใบ กวนเกิดความเสียหายดังแสดงในรูปที่ ก.8 จึงไม่ สามารถทดสอบเตาเผาไหม้ต่อได้ เนื่องจาก โครงสร้างใบกวนไม่แข็งแรง	ขณะนี้อยู่ในระหว่างการดำเนินการซ่อมใบกวน

	2. เทอร์มอคัปเปิลที่วัดอุณหภูมิภายในเตาเผาใหม่เกิดความเสียหายเนื่องจากไม่สามารถทนอุณหภูมิเตาได้ (เป็นแบบ สเตนเลส)	รองบประมาณงวดต่อไปเพื่อสั่งซื้อเทอร์มอคัปเปิลแบบเซรามิค ที่สามารถทนอุณหภูมิได้ 1300 °C
วันที่ 23-24 พฤศจิกายน 2547	1. ท่อทางออกของเตาเผาใหม่เกิดความเสียหายเนื่องจากไม่ได้บุภายในท่อทางออกด้วยอิฐทนไฟประกอบกับ อุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ทางออกมีค่าสูงประมาณ 1,000 °C ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างเนื้อเหล็กกับ O ₂ อย่างรวดเร็วทำให้ท่อทางออกผุกร่อนและก๊าซร้อนรั่วออกมา	หลังเสร็จสิ้นการทดลองได้ให้ทางโรงงานซ่อมท่อทางออกก๊าซเสียบนหัวเตาและติดตั้งกล่องผสมเพื่อจะนำอากาศไปผสมกับก๊าซร้อนเพื่อลดอุณหภูมิที่ท่อทางออกให้ต่ำลงโดยแสดงในรูปที่ ค.7 และ รูปที่ ค.12
วันที่ 2-3 กุมภาพันธ์ 2548	1. ขณะทดสอบอุปกรณ์ก่อนการทดลองโดยทำการจำลองให้กับอากาศทุกส่วนพบว่าวาล์วปีกผีเสื้อที่ใช้ควบคุมอัตราการไหลของอากาศในส่วนที่ 2 ชำรุดทำให้ไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลของอากาศได้ดังแสดงในรูปที่ ค.9	ทำการเชื่อมแกนของวาล์วปีกผีเสื้อกับคันโยกปรับอัตราการไหลใหม่เพื่อให้สามารถควบคุมอัตราการไหลของอากาศได้แล้วจึงได้เริ่มการทดลอง
วันที่ 10-12 มีนาคม 2548	1. ขณะทดสอบอุปกรณ์ก่อนการทดลองพบว่าชุดขับเคลื่อนใบกวนซึ่งใช้โซ่และเฟืองนั้น หลุดบ่อยเพราะจัดวางเฟืองขับและเฟืองตามนั้นเอียงศูนย์กัน จึงเป็นสาเหตุให้โซ่หลุดบ่อยดังแสดงในรูปที่ ค.10	แก้ปัญหาโดยการเพิ่มอุปกรณ์คันโซ่ซึ่งเป็นเฟืองลูกกลิ้งกดโซ่เพื่อให้โซ่อยู่ภายในร่องของเฟืองดังแสดงในรูปที่ ค.11
วันที่ 24-26 มีนาคม 2548	1. ไม่มีปัญหาใดเกิดขึ้นระหว่างการทดสอบสามารถทดสอบได้อย่างต่อเนื่องประมาณ 3 ชั่วโมง	—



รูปที่ ค.1 แสดงเตาเผาไหม้วอร์เทคฟลูอิดไช้เบดในระดับอุตสาหกรรมขนาดพิกัด 9 MW_{th}



รูปที่ ค.2 พัดลมอากาศส่วนที่ 1 ที่จ่ายเข้าที่ด้านบนของเตาเผาไหม้ในแนวสัมผัสพร้อมทั้งเกลบ



รูปที่ ค.3 แสดงใบกวนที่ใช้ท่อสแตนเลสและมีอากาศหล่อเย็น



รูปที่ ค.4 แสดงชุดต้นกำลังขับเคลื่อนที่ทำการปรับปรุงให้สามารถตั้งความตึงของโซ่ส่งกำลัง



รูปที่ ค.5 แสดงไซโคลนดักเก้าที่เกิดจากการเผาไหม้โดยเพิ่มเป็นจำนวน 2 ตัว



รูปที่ ค.6 พัฒนอากาศส่วนที่ 1 ถึงพักป้อน และกระพ้อ



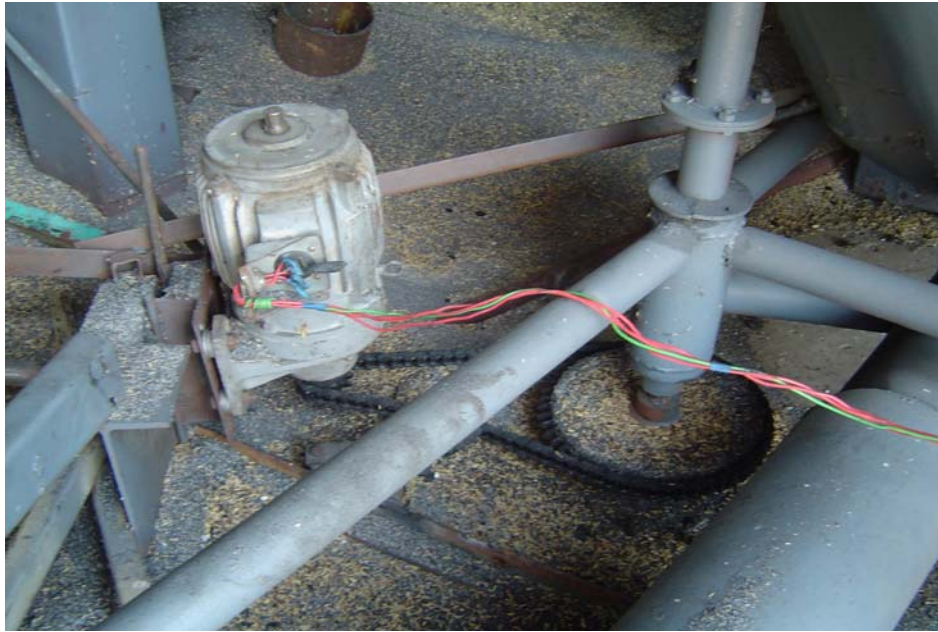
รูปที่ ค.7 แสดงพัดลมที่ใช้ในการจ่ายอากาศผสมกับก๊าซร้อนเพื่อลดอุณหภูมิ



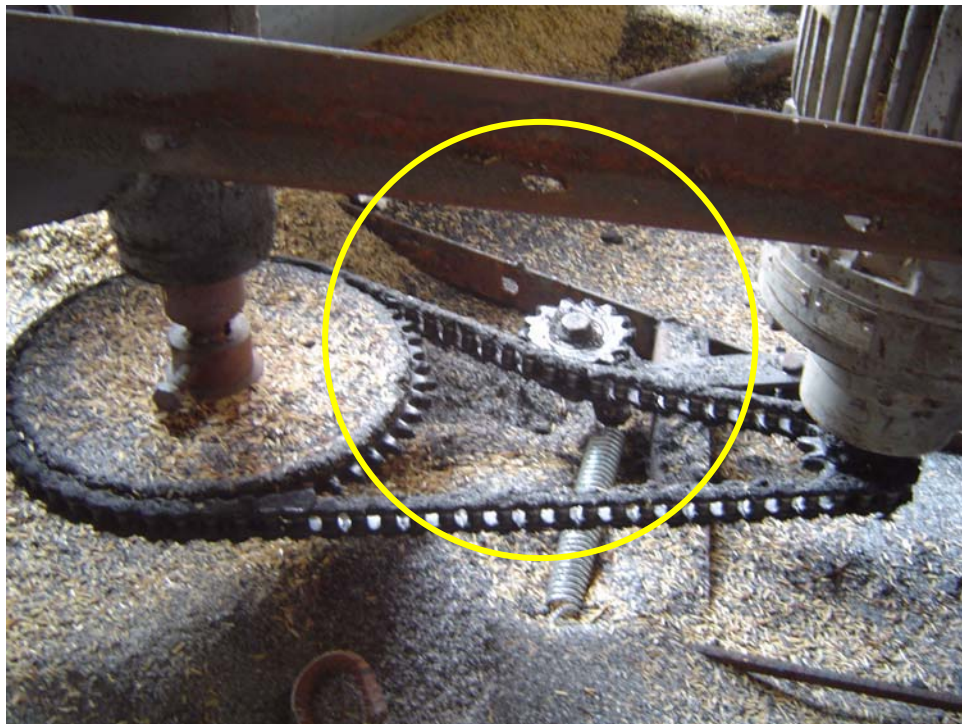
รูปที่ ค.8 แสดงความเสียหายของใบกวาระหว่างการทดสอบ



รูปที่ ค.9 แสดงตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อที่เกิดปัญหา



รูปที่ ค.10 แสดงชุดขับเคลื่อนใบกวนที่เกิดปัญหาหลุดบ้อย



รูปที่ ค.11 แสดงชุดขับเคลื่อนใบกวนหลังการปรับปรุง



รูปที่ ค.12 แสดงกล่องผสมอากาศซึ่งช่วยลดอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้

ภาคผนวก ง

ภาคผนวก ง บทความสำหรับการเผยแพร่

ผลงานของโครงการ VFBC ระดับปฏิบัติการ

1. T.Madhiyanon , N.Piriyarungroj, S.Soponronnarit , Cold flow behavior study in a novel cyclonic fluidized-bed combustor (ψ -FBC), Biomass and Bio energy (impact factor : 0.768) , (in process)
- 2 .T.Madhiyanon, A.Lapirattanakun, P.Sathitruangsak, S.Soponronnarit,A novel cyclonic fluidized-bed combustor(ψ -FBC): Combustor and thermal efficiency, temperature distributions, combustion intensity and emission of pollutants; Part II, Combustion and Flame (impact factor: 1.872), (accept)
3. ฐานิตย์ เมธิยานนท์, นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์, อติศักดิ์ นาถกรณกุล และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2546, การพัฒนาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบดสำหรับเชื้อเพลิงแกลบ, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17 , 15 – 17 ตุลาคม 2546, หน้า 662 - 670
4. ฐานิตย์ เมธิยานนท์, นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์ และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2547, เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบดแบบสองห้องเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงแกลบ, Songklanakarin of science and technology, Vol.26 NO.6, ประจำเดือน พฤศจิกายน – ธันวาคม 2547
5. ฐานิตย์ เมธิยานนท์, นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์, พีระวัตร ทองนอก และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2547, เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบด : Part I ผลกระทบของอากาศส่วนที่หนึ่งต่อสมรรถนะเตา, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18 , 18 – 20 ตุลาคม 2547, หน้า 166
6. ฐานิตย์ เมธิยานนท์, นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์, พีระวัตร ทองนอก และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2547, เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบด : Part II ผลกระทบของอากาศส่วนที่สองต่อสมรรถนะเตา, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18 , 18 – 20 ตุลาคม 2547, หน้า 167
7. ฐานิตย์ เมธิยานนท์, อาวุธ ลภีรัตนากุล, ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2548, เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบด :สมรรถนะของเตาเผาไหม้และการกระจายตัวของก๊าซไอเสียภายในห้องเผาไหม้, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19 , 19 – 21 ตุลาคม 2548