

ภาคผนวก ค : รายการคำนวณระบบดักฝุ่นละอองแบบไฟฟ้าสถิตย์ (ESP)

ภาคผนวก ค-1 : รายการคำนวณระบบดักฝุ่นละออง
แบบไฟฟ้าสถิตย์ (ESP) (ชุดใหม่)

รายการคำนวณระบบบำบัดอากาศจากหม้อไอน้ำขนาด 70 ตัน/ชม.
ที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง
โครงการโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน (โรงไฟฟ้าในโรงงานผลิตกระดาษคราฟท์)

เจ้าของโครงการ



บริษัท ยูไนเต็ด เปเปอร์ จำกัด (มหาชน)

61 หมู่ 8 ต.วัดโบสถ์ อ.เมืองปราจีนบุรี จ.ปราจีนบุรี 25000



นายอนุตร เปียงแก้ว สส. 414

รายการคำนวณระบบบำบัดอากาศจากหม้อไอน้ำขนาด 70 ตัน/ชม.

1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิง, ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง, อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ และองค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้

1.1 องค์ประกอบของถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง

องค์ประกอบ	% โดยน้ำหนัก	
	ฐานเปียก	ฐานแห้ง
ความชื้น (Moisture)	= 13.100	0.00
เถ้า (Ash)	= 5.000	5.75
ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิง		
- คาร์บอน, C	= 62.080	71.44
- ไฮโดรเจน, H	= 4.283	4.93
- ออกซิเจน, O	= 13.243	15.24
- ไนโตรเจน, N	= 1.311	1.51
- ซัลเฟอร์, S	= 0.983	1.13
- คลอไรด์, Cl	= 0.000	0.00
รวม	= 100.000	100.00

เนื่องจากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงมีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันไปตามเวลา จึงปรับเพิ่มสารมลพิษในเชื้อเพลิงให้สูงขึ้นเพื่อรองรับความผันแปรขององค์ประกอบ โดยปรับเพิ่มซัลเฟอร์ (S) จาก 0.983 เป็น 1.000 % และปรับลดออกซิเจนจาก 13.243 เป็น 13.226 % องค์ประกอบใหม่ที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังต่อไปนี้:

	ฐานเปียก	ฐานแห้ง
ความชื้น (Moisture)	= 13.100	0.000
เถ้า (Ash)	= 5.000	5.754
ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิง		
- คาร์บอน, C	= 62.080	71.438
- ไฮโดรเจน, H	= 4.283	4.929
- ออกซิเจน, O	= 13.226	15.220
- ไนโตรเจน, N	= 1.311	1.509
- ซัลเฟอร์, S	= 1.000	1.151
รวม	= 100.000	100.000

1.2 คำนวณสมดุลมวลและพลังงาน

1.2.1 ค่าพลังงานความร้อน (Calorific value) และอัตราการป้อนเชื้อเพลิง

1) ค่าความร้อนสูงสุด (High Calorific Value, HCV), กิโลแคลอรี/กก.

คำนวณโดยใช้สมการของ Dulong (Dulong's formula)

ค่าความร้อนสูงสุด (HCV)	=	$8,080 C + 34,500 (H - O / 8) + 2,240 S$	
	=	$8,080 \times 1 + 34,500 (0 - 0/8) + 2,240 \times 0$	
	=	6,842.03	กิโลแคลอรี/กก.
	=	28,627.07	กิโลแคลอรี/กก.
ค่าความร้อนสูงสุด (HCV) จากการคำนวณ	=	5,945.73	กิโลแคลอรี/กก. 24,876.92 กิโลจูล/กก.
ค่าความร้อนสูงสุด (HCV) จากรายงานผลวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิง			
	=	6,000.00	กิโลแคลอรี/กก. 25,104.00 กิโลจูล/กก.
เลือกใช้ค่าที่ต่ำกว่าในการคำนวณ ดังนั้น HCV	=	5,945.73	กิโลแคลอรี/กก. 24,876.92 กิโลจูล/กก.

2) ค่าความร้อนขั้นต่ำ (Low Calorific Value, LCV), กิโลแคลอรี/กก.

ค่าความร้อนขั้นต่ำ (LCV)	=	$HCV - 587 \times (9H + W)$	
	=	$5945.73 - 587 \times (9 \times 0.0428 + 0.131)$	
ค่าความร้อนขั้นต่ำ (LCV) จากการคำนวณ	=	5,642.56	กิโลแคลอรี/กก. 23,608.47 กิโลจูล/กก.
ปรับลดค่าความร้อนขั้นต่ำ (LCV ar) ของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการคำนวณลง			
เลือกคำนวณค่าความร้อนขั้นต่ำ (LCV ar) ที่	=	3,966.00	กิโลแคลอรี/กก. 16,593.74 กิโลจูล/กก.

3) ตรวจสอบสมดุลพลังงาน (Enthalpy)

จากสมดุลพลังงาน (Energy balance)

พลังงานที่ได้-1: ไอน้ำที่ผลิตได้ (Main steam)

ไอน้ำที่ผลิตได้	=	70.00	ตัน/ชม.
อุณหภูมิ	=	485.00	องศาซ.
ความดัน	=	53.90	บาร์
เอนทัลปีจำเพาะของไอน้ำ	=	3,395.00	กิโลจูล/กก.
เอนทัลปีของไอน้ำที่ผลิตได้ (OUT ₁)	=	237,650,000.00	กิโลจูล/ชม.

พลังงานที่ได้-2: น้ำที่ระบายทิ้ง (Boiler blowdown)

อัตราการระบายน้ำทิ้ง	=	0.07	ตัน/ชม.
อุณหภูมิ	=	250.00	องศาซ.

ความดัน	=	40.00	บาร์
เอนทาลปีจำเพาะของน้ำที่ระบายทิ้ง	=	1,085.69	กิโลจูล/กก.
เอนทาลปีของน้ำที่ระบายทิ้ง (OUT ₂)	=	75,998.30	กิโลจูล/ชม.

พลังงานที่ป้อน-1: ไอน้ำกลั่นตัวเวียนกลับ (Condensate Return)

อัตราการเวียนไอน้ำกลั่นตัวเวียนกลับเข้าหม้อไอน้ำ	=	70.00	ตัน/ชม.
อุณหภูมิ	=	159.70	องศาซ.
ความดัน	=	72.00	บาร์
เอนทาลปีจำเพาะของน้ำที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำ	=	678.30	กิโลจูล/กก.
เอนทาลปีของน้ำที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำ (IN ₁)	=	47,481,000.00	กิโลจูล/ชม.

พลังงานที่ป้อน-2: น้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ (Feed water)

อัตราการป้อนน้ำเข้าหม้อไอน้ำ	=	0.07	ตัน/ชม.
อุณหภูมิ	=	300.10	องศาซ.
ความดัน	=	86.00	บาร์
เอนทาลปีจำเพาะของน้ำที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำ	=	1,345.00	กิโลจูล/กก.
เอนทาลปีของน้ำที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำ (IN ₂)	=	94,150.00	กิโลจูล/ชม.

ความต้องการเชื้อเพลิง

พลังงานที่ต้องการ	=	พลังงานที่ผลิตได้ - พลังงานที่ป้อน
	=	OUT ₁ + OUT ₂ - IN ₁ - IN ₂
	=	190,150,848.30 กิโลจูล/ชม.
พลังงานจากเชื้อเพลิงที่ป้อน	=	พลังงานที่ต้องการ/ประสิทธิภาพ
ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ	=	89.00 %
ดังนั้น ต้องการพลังงานจากเชื้อเพลิงที่ป้อน	=	213,652,638.54 กิโลจูล/ชม.
ค่าความร้อนขั้นต่ำ (LCV) ของเชื้อเพลิง	=	16,593.74 กิโลจูล/กก.
ปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องการ	=	12,875.49 กก./ชม.
	=	12.88 ตัน/ชม.

4) ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง (F_m)

กรณีใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง 100 %

ปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องการ	=	12.88	ตัน/ชม.
เลือกคำนวณปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง (F _m)	=	329.76	ตัน/วัน
	=	13.74	ตัน/ชม.
	≥	12.88	ตัน/ชม. เพียงพอ

1.2.2 ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

1) ความต้องการอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในทางทฤษฎี, ลบ.ม./กก. เชื้อเพลิง

(Theoretical air requirement for complete combustion)

ในทางทฤษฎี การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ต้องการออกซิเจนดังต่อไปนี้

$$\text{ออกซิเจนที่ต้องการสำหรับการสันดาปคาร์บอน 1 กก.} = 8/3 \text{ C}$$

$$\text{ออกซิเจนที่ต้องการสำหรับการสันดาปไฮโดรเจน 1 กก.} = 8 \text{ H}$$

$$\text{ออกซิเจนที่ต้องการสำหรับการสันดาปซัลเฟอร์ 1 กก.} = 1 \text{ S}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการ, กก.} &= 8/3 \text{ C} + 8 \text{ H} + \text{S} - \text{O} \\ &= 8/3 \text{ C} + 8 (\text{H} - \text{O}/8) + \text{S} \end{aligned}$$

$$\text{สัดส่วนของออกซิเจนในอากาศ} = 100/23.20 \text{ กก.อากาศ/กก.ออกซิเจน}$$

$$\text{ดังนั้น ปริมาณอากาศที่ต้องการ} = 100/23.20 \times [8/3 \text{ C} + 8 (\text{H} - \text{O}/8) + \text{S}] \text{ กก.อากาศ/กก.เชื้อเพลิง}$$

$$\text{ความหนาแน่นของอากาศแห้งที่สภาวะมาตรฐาน} = 1.292 \text{ กก./ลบ.ม. ที่สภาวะมาตรฐาน (0 องศา. 1 บรรยากาศ)}$$

$$\text{ดังนั้น ปริมาณอากาศที่ต้องการ} = 1/1.292 \times 100/23.20 \times [8/3 \text{ C} + 8 (\text{H} - \text{O}/8) + \text{S}]$$

$$\begin{aligned} \text{ลบ.ม./กก. ที่สภาวะมาตรฐาน (0 องศา. 1 บรรยากาศ)} &= 3.3362 \times [8/3 \text{ C} + 8 (\text{H} - \text{O}/8) + \text{S}] \\ &= 8.9 \text{ C} + 26.7 (\text{H} - \text{O}/8) + 3.333 \text{ S} \end{aligned}$$

แทนค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงลงในสมการ

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี, } A_0 &= 8.9 \times 0.6208 + 26.7 \times (0.0428 - 0.1323/8) + 3.333 \times 0.01 \\ &= 6.2606 \text{ ลบ.ม./กก. ที่สภาวะมาตรฐาน (0 องศา. 1 บรรยากาศ)} \end{aligned}$$

2) ความต้องการอากาศที่ต้องการต่อหน่วยที่สภาวะจริง (Quantity of unit actual air combustion, A_u)

ความต้องการอากาศที่ต้องการต่อหน่วยที่สภาวะจริง, A_u

$$= l A_0$$

l คือ ค่าสัมประสิทธิ์อากาศส่วนเกิน (Excess air coefficient)

$$\text{กำหนดค่า } l = 1.50 \text{ เท่าของความต้องการอากาศทางทฤษฎี}$$

$$\text{ดังนั้น ความต้องการอากาศที่สภาวะจริง (} A_u \text{)} = 1.5 \times 6.2606 \text{ ลบ.ม./กก. ที่สภาวะมาตรฐาน (0 องศา. 1 บรรยากาศ)}$$

$$= 9.390 \text{ ลบ.ม./กก. ที่สภาวะมาตรฐาน (0 องศา. 1 บรรยากาศ)}$$

3) ปริมาณอากาศที่ต้องการที่สภาวะจริง (Quantity of actual air combustion, A_a)

$$\text{ปริมาณอากาศที่ต้องการที่สภาวะจริง, } A_a = F_m \times A_u$$

$$\text{ปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อน, } F_m = 13,740.00 \text{ กก./ชม.}$$

ความต้องการอากาศที่ต้องการต่อหน่วยที่สภาวะจริง, A_u

$$= 9.390 \text{ ลบ.ม./กก. ที่สภาวะมาตรฐาน (0 องศา. 1 บรรยากาศ)}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ปริมาณอากาศที่ต้องการที่สภาวะจริง, } A_t &= 13740 \times 9.39 \\ &= 129,020.00 \text{ ลบ.ม./ชม. ที่สภาวะมาตรฐาน (0 องศา. 1 บรรยากาศ)} \end{aligned}$$

1.2.3 ปริมาณก๊าซจากการเผาไหม้ (Combustion gas)

1) ปริมาณอากาศที่ต้องการทางทฤษฎี (โดยมวล)

จากหัวข้อ 1.1

ความชื้น (Moisture)	=	13.10	%
เถ้า (Ash)	=	5.00	%
- คาร์บอน, C	=	62.08	%
- ไฮโดรเจน, H	=	4.28	%
- ออกซิเจน, O	=	13.23	%
- ไนโตรเจน, N	=	1.31	%
- ซัลเฟอร์, S	=	1.00	%
รวม	=	100.00	%

$$\begin{aligned} \text{จากหัวข้อ 1.2.2, ออกซิเจนที่ต้องการทางทฤษฎี} &= 8/3 \text{ C} + 8 \text{ H} + \text{S} - \text{O} \\ &= 8/3 \times 0.6208 + 8 \times 0.0428 + 0.01 - 0.1323 \\ &= 1.88 \text{ กก.ออกซิเจน/กก.เชื้อเพลิง} \end{aligned}$$

$$\text{สัดส่วนโดยมวลของอากาศต่อออกซิเจน} = 100/23.20 \text{ กก.อากาศ/กก.ออกซิเจน}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณอากาศที่ต้องการทางทฤษฎี} &= \text{ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการทางทฤษฎี} \times \text{สัดส่วนโดยมวลของอากาศต่อออกซิเจน} \\ &= 1.88 \times (100/23.20) \text{ กก.อากาศ/กก.เชื้อเพลิง} \\ &= 8.09 \text{ กก.อากาศ/กก.เชื้อเพลิง} \end{aligned}$$

2) ปริมาณอากาศที่ป้อนที่สภาวะจริง (โดยมวล)

$$\text{สัมประสิทธิ์อากาศส่วนเกิน, } l = 1.50 \text{ เท่าของความต้องการอากาศทางทฤษฎี}$$

$$\text{ดังนั้น ปริมาณอากาศที่ป้อนที่สภาวะจริง} = 1.5 \times 8.09 \text{ กก.อากาศ/กก.เชื้อเพลิง}$$

$$= 12.13 \text{ กก.อากาศ/กก.เชื้อเพลิง}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณออกซิเจนในอากาศที่ป้อนที่สภาวะจริง} &= \text{ปริมาณอากาศที่ต้องการที่สภาวะจริง} / \text{สัดส่วนโดยมวลของอากาศต่อออกซิเจน} \\ &= 12.13 / (100/23.20) \end{aligned}$$

$$= 2.81 \text{ กก.ออกซิเจน/กก.เชื้อเพลิง}$$

3) ปริมาณไนโตรเจนในอากาศที่ป้อนที่สภาวะจริง

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณไนโตรเจนในอากาศที่ป้อนที่สภาวะจริง} &= \text{ปริมาณอากาศที่ป้อนที่สภาวะจริง} - \text{ปริมาณออกซิเจนที่ป้อนสภาวะจริง} \\
 &= 12.13 - 2.81 \\
 &= 9.31 \text{ กก.ไนโตรเจน/กก.เชื้อเพลิง}
 \end{aligned}$$

4) สมการการเผาไหม้และก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ต่อปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อน (โดยมวล)

สมการการเผาไหม้

ความชื้น (Moisture) หรือ $\text{H}_2\text{O} (\text{l}) \text{ @ } \text{H}_2\text{O} (\text{g})$ มวลโมเลกุลของน้ำ $\text{H}_2\text{O} = 18$, ดังนั้น $\text{H}_2\text{O} (\text{l}) / \text{H}_2\text{O} (\text{g}) = 18/18 = 1.0$ โดยมวล $\text{C} (\text{s}) + \text{O}_2 (\text{g}) \text{ @ } \text{CO}_2 (\text{g})$ มวลโมเลกุลของคาร์บอน $\text{C} = 12$, $\text{CO}_2 = 44$, ดังนั้น $\text{CO}_2 (\text{g}) / \text{C} (\text{s}) = 44/12 = 3.67$ โดยมวล $2\text{H} (\text{s}) + \text{O}_2 (\text{g}) \text{ @ } \text{H}_2\text{O} (\text{g})$ มวลโมเลกุลของไฮโดรเจน $\text{H} = 1$, $\text{H}_2\text{O} = 18$, ดังนั้น $\text{H}_2\text{O} (\text{g}) / 2\text{H} (\text{s}) = 18/(2 \times 1) = 9.0$ โดยมวลจากข้อ 1.2.2 (1), ความต้องการออกซิเจนทางทฤษฎี $= 8/3 \text{ C} + 8 \text{ H} + \text{S} - \text{O}$

ออกซิเจนในเชื้อเพลิงทั้งหมดจะถูกใช้ไปในการเผาไหม้ ดังนั้นในก๊าซจากการเผาไหม้ สัดส่วนของออกซิเจนที่มาจากเชื้อเพลิงที่ป้อนเท่ากับศูนย์

 $2\text{N} (\text{s}) \text{ @ } \text{N}_2 (\text{g})$ มวลโมเลกุลของไนโตรเจน $\text{N} = 14$, ดังนั้น $\text{N} (\text{g}) / \text{N} (\text{s}) = 14/14 = 1.0$ โดยมวล $\text{S} (\text{s}) + \text{O}_2 (\text{g}) \text{ @ } \text{SO}_2 (\text{g})$ มวลโมเลกุลของซัลเฟอร์ $\text{S} = 32$, $\text{SO}_2 = 64$, ดังนั้น $\text{SO}_2 (\text{g}) / \text{S} (\text{s}) = 64/32 = 2.0$ โดยมวล $\text{Cl} (\text{s}) + \text{H} (\text{s}) \text{ @ } \text{HCl} (\text{g})$ มวลโมเลกุลของคลอไรด์ $\text{Cl} = 35.5$, $\text{H} = 1$, ดังนั้น $\text{HCl} (\text{g}) / \text{Cl} (\text{s}) = (35.5+1)/35.5 = 1.028$ โดยมวล

5) องค์ประกอบของก๊าซจากการเผาไหม้ต่อปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อน (โดยมวล)

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของก๊าซจากการเผาไหม้ต่อปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อน (โดยมวล)

องค์ประกอบ ของเชื้อเพลิง	สัดส่วนในเชื้อเพลิง ที่ป้อน (กก./กก.)	องค์ประกอบของก๊าซ จากการเผาไหม้	ก๊าซจากการเผาไหม้ (กก./กก.)
ความชื้น/น้ำ (H ₂ O)	0.1310	น้ำ (H ₂ O)	0.13
เถ้า (Ash)	0.0500	เถ้า (Ash)	0.05
คาร์บอน (C)	0.6208	คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	2.28
ไฮโดรเจน (H)	0.0428	น้ำ (H ₂ O)	0.39
ออกซิเจน (O)	0.1323	ออกซิเจน (O)	0.00
ไนโตรเจน (N)	0.0131	ไนโตรเจน (N)	0.0131
ซัลเฟอร์ (S)	0.0100	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)	0.0200
ออกซิเจนในอากาศที่ป้อน	2.81	ออกซิเจน (O)	2.81
ไนโตรเจนในอากาศที่ป้อน	9.31	ไนโตรเจน (N)	9.31
ออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้			-1.88

6) ปริมาตรของก๊าซแต่ละชนิดในก๊าซจากการเผาไหม้

ที่สภาวะมาตรฐาน (STP) ก๊าซใดๆมีปริมาตร = 22.40 ลิ./โมล (ที่ 0 องศา. 1 บรรยากาศ)

(STP = Standard Temperature and Pressure)

จากตารางที่ 2, CO ₂ ในก๊าซจากการเผาไหม้	=	2.28 กก./กก.เชื้อเพลิง
มวลโมเลกุลของ CO ₂	=	44.00 ก./โมล
จำนวนโมลของ CO ₂	=	2.28 / 44 กิโลโมล/กก.เชื้อเพลิง
	=	0.052 กิโลโมล/กก.เชื้อเพลิง
	=	51.73 โมล/กก.เชื้อเพลิง
ปริมาตรของ CO ₂ ที่สภาวะมาตรฐาน	=	22.4 × 51.73 ลิ./กก.เชื้อเพลิง
	=	1,158.83 ลิ./กก.เชื้อเพลิง
	=	1.1588 ลบ.ม./กก.เชื้อเพลิง
จากตารางที่ 2, O จากอากาศที่ป้อน	=	2.81 กก./กก.เชื้อเพลิง
O ที่ต้องใช้ในการเผาไหม้	=	-1.88 กก./กก.เชื้อเพลิง
O ทั้งหมดในก๊าซจากการเผาไหม้	=	2.81 + -1.88 กก./กก.เชื้อเพลิง
	=	0.94 กก./กก.เชื้อเพลิง
มวลโมเลกุลของ O ₂	=	32.00 ก./โมล

จำนวนโมลของ O_2	=	0.94 / 32	กิโลโมล/กก.เชื้อเพลิง
	=	0.029	กิโลโมล/กก.เชื้อเพลิง
	=	29.31	โมล/กก.เชื้อเพลิง
ปริมาตรของ O_2 ที่สภาวะมาตรฐาน	=	22.4 x 29.31	ล./กก.เชื้อเพลิง
	=	656.55	ล./กก.เชื้อเพลิง
	=	0.6565	ลบ.ม./กก.เชื้อเพลิง
จากตารางที่ 2, N จากเชื้อเพลิง	=	0.0131	กก./กก.เชื้อเพลิง
N จากอากาศที่ป้อน	=	9.31	กก./กก.เชื้อเพลิง
N ทั้งหมดในก๊าซจากการเผาไหม้	=	0.0131 + 9.31	กก./กก.เชื้อเพลิง
	=	9.33	กก./กก.เชื้อเพลิง
มวลโมเลกุลของ N_2	=	28.00	ก./โมล
จำนวนโมลของ N_2	=	9.33 / 28	กิโลโมล/กก.เชื้อเพลิง
	=	0.333	กิโลโมล/กก.เชื้อเพลิง
	=	333.13	โมล/กก.เชื้อเพลิง
ปริมาตรของ N_2 ที่สภาวะมาตรฐาน	=	22.4 x 333.13	ล./กก.เชื้อเพลิง
	=	7,462.13	ล./กก.เชื้อเพลิง
	=	7.4621	ลบ.ม./กก.เชื้อเพลิง
จากตารางที่ 2, H_2O จากเชื้อเพลิง	=	0.13	กก./กก.เชื้อเพลิง
H_2O จากการเผาไหม้	=	0.39	กก./กก.เชื้อเพลิง
H_2O ทั้งหมดในก๊าซจากการเผาไหม้	=	0.13 + 0.39	กก./กก.เชื้อเพลิง
	=	0.52	กก./กก.เชื้อเพลิง
มวลโมเลกุลของ H_2O	=	18.00	ก./โมล
จำนวนโมลของ H_2O	=	0.52 / 18	กิโลโมล/กก.เชื้อเพลิง
	=	0.029	กิโลโมล/กก.เชื้อเพลิง
	=	28.69	โมล/กก.เชื้อเพลิง
ปริมาตรของ H_2O ที่สภาวะมาตรฐาน	=	22.4 x 28.69	ล./กก.เชื้อเพลิง
	=	642.72	ล./กก.เชื้อเพลิง
	=	0.6427	ลบ.ม./กก.เชื้อเพลิง
จากตารางที่ 2, SO_2 ในก๊าซจากการเผาไหม้	=	0.0200	กก./กก.เชื้อเพลิง
มวลโมเลกุลของ SO_2	=	64.00	ก./โมล

$$\begin{aligned}
 \text{จำนวนโมลของ SO}_2 &= 0.02 / 64 \text{ กิโลโมล/กก.เชื้อเพลิง} \\
 &= 0.000313 \text{ กิโลโมล/กก.เชื้อเพลิง} \\
 &= 0.313 \text{ โมล/กก.เชื้อเพลิง} \\
 \text{ปริมาตรของ SO}_2 \text{ ที่สภาวะมาตรฐาน} &= 22.4 \times 0.313 \text{ ล./กก.เชื้อเพลิง} \\
 &= 7.00 \text{ ล./กก.เชื้อเพลิง} \\
 &= 0.0070 \text{ ลบ.ม./กก.เชื้อเพลิง}
 \end{aligned}$$

7) องค์ประกอบของก๊าซจากการเผาไหม้

ตารางที่ 3 องค์ประกอบของก๊าซจากการเผาไหม้

องค์ประกอบ	ปริมาตรที่สภาวะมาตรฐาน ลบ.ม./กก.เชื้อเพลิง	สัดส่วนโดยปริมาตร %	อัตราการไหลที่สภาวะมาตรฐาน ลบ.ม./ชม.
CO ₂	1.1588	11.67	15,922.28
O ₂	0.6565	6.61	9,020.95
N ₂	7.4621	75.17	102,529.63
H ₂ O	0.6427	6.47	8,830.95
รวม	9.9202		136,303.80
SO ₂	0.0070	0.07	96.18
รวมทั้งหมด	9.9272	100.00	136,400.00
ปริมาตรของก๊าซแห้ง (G _d)			127,569.05
% ออกซิเจน (O ₂) ในก๊าซแห้ง			7.07

หมายเหตุ:

อัตราการไหลของก๊าซเผาไหม้ (ลบ.ม./ชม.ที่สภาวะมาตรฐาน) = ปริมาตรก๊าซเผาไหม้ต่อหน่วยที่สภาวะมาตรฐาน (ลบ.ม./กก.) × ปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อน (กก./ชม.)
โดยปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อน จากหัวข้อ 1.2.1 = 13.74 ตัน/ชม.

8) อัตราการไหลของก๊าซจากการเผาไหม้ที่ 7% O₂ (G_{do})

$$\begin{aligned}
 \text{จากตารางที่ 3, อัตราการไหลของก๊าซแห้ง (G}_d\text{)} &= 127,569.05 \text{ ลบ.ม./ชม.ที่สภาวะมาตรฐาน (0 องศา. 1 บรรยากาศ)} \\
 \% \text{ O}_2 \text{ ในก๊าซแห้ง} &= 7.07 \% \\
 \text{ที่ } 7 \% \text{ O}_2 \text{ อัตราการไหลของก๊าซแห้ง (G}_{do}\text{)} &= \text{Dry gas volume (G}_d\text{)} \times (21 - \% \text{ O}_2) / (21 - 7) \\
 &= 127,569.05 \times (21 - 7.07) / (21 - 7) \\
 &= 126,918.24 \text{ ลบ.ม./ชม.ที่สภาวะมาตรฐาน (0 องศา. 1 บรรยากาศ)} \\
 &= 138,534.41 \text{ ลบ.ม./ชม.ที่ 25 องศา. 1 บรรยากาศ 7 \% O}_2
 \end{aligned}$$

2 ค่าความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SOx) ในก๊าซจากการเผาไหม้

จากข้อ 1.1, สัดส่วนของซัลเฟอร์ (S) ในเชื้อเพลิง	=	1.00	% โดยน้ำหนัก
อัตราการป้อนเชื้อเพลิง, Fm	=	13,740.00	กก./ชม.
ภาระซัลเฟอร์ (S load)	=	S content x Fm	กก./ชม.
	=	1/100 x 13740	กก./ชม.
	=	137.40	กก./ชม.
มวลโมเลกุลของซัลเฟอร์ (S)	=	32.00	ก./โมล
จำนวนโมลของซัลเฟอร์ (S)	=	137.4 / 32	กิโลโมล/ชม.
	=	4.29	กิโลโมล/ชม.
ประเมินการเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SOx)	=	100.00	% ของภาระซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิง
ดังนั้น ปริมาณการเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SOx)	=	100/100 x 4.29	กิโลโมล/ชม.
	=	4.29	กิโลโมล/ชม.
	=	4,293.75	มล/ชม.
ที่สภาวะมาตรฐาน (STP) ก๊าซใดๆมีปริมาตร	=	22.40	ล./โมล ที่สภาวะมาตรฐาน (0 องศา. 1 บรรยากาศ)
ดังนั้น ปริมาตรก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SOx)	=	4293.75 x 22.4	ล./ชม.ที่สภาวะมาตรฐาน (0 องศา. 1 บรรยากาศ)
	=	96,180.00	ล./ชม.ที่สภาวะมาตรฐาน (0 องศา. 1 บรรยากาศ)
	=	96.18	ลบ.ม./ชม.ที่สภาวะมาตรฐาน (0 องศา. 1 บรรยากาศ)
	=	104.98	ลบ.ม./ชม.ที่ 25 องศา. 1 บรรยากาศ
ที่ 7 % O ₂ อัตราการไหลของก๊าซแห้ง (G _{do})	=	138,534.41	ลบ.ม./ชม.ที่ 25 องศา. 1 บรรยากาศ 7 % O ₂
ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SOx)	=	SOx / Inlet gas x 10 ⁶	
	=	.04.98 / 138534.41	x 10 ⁶
	=	757.81	ส่วนในล้านส่วนที่ 25 องศา. 1 บรรยากาศ 7 % O ₂
กำหนดค่าออกแบบให้ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SOx) ในก๊าซจากการเผาไหม้	=	800.00	ส่วนในล้านส่วนที่ 25 องศา. 1 บรรยากาศ 7 % O ₂
ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SOx) ตามกฎหมาย (ก๊าซแห้งที่ 25 องศา. ความดัน 1 บรรยากาศ ออกซิเจน 7 %)	≤	150.00	ส่วนในล้านส่วนที่ 25 องศา. 1 บรรยากาศ 7 % O ₂
กำหนดให้ออกแบบค่าความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SOx) ในก๊าซจากการเผาไหม้หลังการบำบัด	≤	135.00	ส่วนในล้านส่วนที่ 25 องศา. 1 บรรยากาศ 7 % O ₂

3 ค่าฝุ่นละอองรวม (Total Suspended Particulate, TSP)

3.1 ปริมาณเถ้าจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (ASH1)

ASH1	=	สัดส่วนของเถ้า x ปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อน (Fm)
จากข้อ 1.1, สัดส่วนของเถ้า	=	5.00 %
ปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อน, Fm	=	13,740.00 กก./ชม.
ASH1	=	5 /100 x 13740 กก./ชม.
	=	687.00 กก./ชม.

3.2 ปริมาณเถ้าลอย (Fly ash, dust scattering) จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (ASH2)

เนื่องจากเป็นหม้อไอน้ำแบบฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed, CFG) ดังนั้นส่วนใหญ่ของเถ้าจะเป็นเถ้าลอย (Fly ash) และมีเพียงส่วนน้อยที่เป็นเถ้าจม (Bottom ash)

ประเมินสัดส่วนของเถ้าลอย (D)	=	90.00 % ของปริมาณเถ้าจากเชื้อเพลิง
ASH2	=	ASH1 X D
	=	90 /100 x 687 กก./ชม.
	=	618.30 กก./ชม.

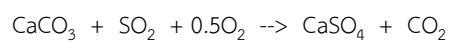
3.3 ฝุ่นละอองรวมในก๊าซจากการเผาไหม้ที่ 7 % O₂

จากข้อ 1.2.3 (8) อัตราการไหลของก๊าซแห้งที่ 7 % ออกซิเจน อุณหภูมิ 25 องศา.

	=	138,534.41 ลบ.ม./ชม. ก๊าซแห้งที่ O ₂ 7% 25 องศา. 1 บรรยากาศ
ปริมาณเถ้าลอยในก๊าซเผาไหม้	=	618.30 กก./ชม.
	=	618,300,000.00 มก./ชม.
ค่าฝุ่นละอองรวม (TSP)	=	ASH2 / อัตราการไหลของก๊าซแห้งที่ O ₂ 7% 25 องศา. 1 บรรยากาศ
	=	618300000 / 138534.41
	=	4,463.15 มก./ลบ.ม. ก๊าซแห้ง 7 % O ₂ ที่ 25 องศา. 1 บรรยากาศ
กำหนดค่าออกแบบให้ฝุ่นละอองรวม (TSP) ในก๊าซจากการเผาไหม้	=	4,500.00 มก./ลบ.ม. ก๊าซแห้ง 7 % O ₂ ที่ 25 องศา. 1 บรรยากาศ
ค่าฝุ่นละอองรวม (TSP) ในก๊าซจากการเผาไหม้ตามกฎหมาย	≤	50.00 มก./ลบ.ม. ก๊าซแห้ง 7 % O ₂ ที่ 25 องศา. 1 บรรยากาศ
ค่าฝุ่นละอองรวม (TSP) ในก๊าซจากการเผาไหม้ที่ควบคุม	≤	45.00 มก./ลบ.ม. ก๊าซแห้ง 7 % O ₂ ที่ 25 องศา. 1 บรรยากาศ

4 การเติมหินปูน (CaCO_3) เพื่อควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x)

เลือกใช้วิธีการผสมหินปูน (CaCO_3) เข้ากับถ่านหินป้อนเข้ากับห้องเผาของหม้อไอน้ำ ดังแสดงในสมการต่อไปนี้



อัตราส่วนระหว่าง $\text{SO}_2:\text{CaCO}_3$ = 0.64 กก./กก.

ภาระซัลเฟอร์ไดออกไซด์ = 145.05 กก./ชม.

= 9.28 กก./ชม.

ความต้องการหินปูนทางทฤษฎี = 14.50 กก./ชม.

เติมหินปูนส่วนเกินในอัตราส่วน = 1.50 เท่าของความต้องการทางทฤษฎี

ดังนั้น อัตราการป้อนหินปูน = 21.76 กก./ชม.

ประสิทธิภาพของการจับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ \geq 83 %

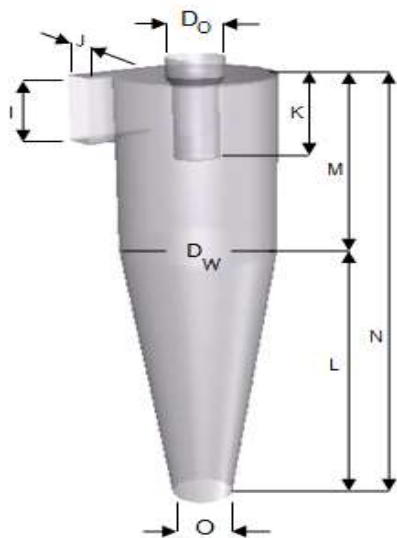
ค่าออกแบบความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการเผาไหม้

= 800.00 ส่วนในล้านส่วนที่ 25 องศา. 1 บรรยากาศ 7 % O_2

ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ระบายออก \leq 135.00 ส่วนในล้านส่วนที่ 25 องศา. 1 บรรยากาศ 7 % O_2

4 มัลติไซโคลน (Multi Cyclone)

4.1 ขนาดของไซโคลนมาตรฐาน



รูปที่ 1 สัดส่วนของไซโคลนมาตรฐาน

4.2 ปริมาณอากาศที่ดูดมาบำบัด

จากหัวข้อ 1.2.3 อัตราการไหลของก๊าซจากการเผาไหม้ =	127,569.05	ลบ.ม./ชม. ที่สภาวะมาตรฐาน
อุณหภูมิของก๊าซ =	150.00	องศาซ.
ดังนั้น อัตราการไหลของก๊าซจากการเผาไหม้ที่สภาวะ =	197,623.45	ลบ.ม./ชม. ที่ 150 องศา. 1 บรรยากาศ
=	3,293.72	ลบ.ม./นาที่ ที่ 150 องศา. 1 บรรยากาศ
เลือกจำนวนที่อัตราการดูดอากาศมาบำบัดสูงสุด =	3,400.00	ลบ.ม./นาที่ ที่ 150 องศา. 1 บรรยากาศ

4.2 ขนาดของไซโคลน

จำนวนไซโคลน =	2.00	ชุด
ปริมาณก๊าซต่อไซโคลน =	1,700.00	ลบ.ม./นาที่ ที่ 150 องศา. 1 บรรยากาศ
=	0.4722	ลบ.ม./วินาที ที่ 150 องศา. 1 บรรยากาศ

61 หมู่ 8 ต.วัดโบสถ์ อ.เมืองปราจีนบุรี จ.ปราจีนบุรี

ที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง โดย นายอนุตร เปียงแก้ว สส.414

ความสูงของช่องเปิดทางเข้าไซโคลน (I)	=	1.00	ม.
ความกว้างของช่องเปิดทางเข้าไซโคลน (J)	=	2.40	ม.
พท.ช่องเปิด (I x J)	=	2.40	ตร.ม.
ความเร็วของก๊าซที่เข้าสู่ไซโคลน, Vi	=	0.197	ม./วินาที
เส้นผ่าศก.ของไซโคลน (Dw)	=	3.05	ม.
ความสูงของไซโคลนของทรงกระบอกช่วงบนของไซโคลน	=	4.54	ม.
ความสูงของไซโคลนช่วงกรวยล่าง (L)	=	3.30	ม.
พื้นที่ทางออก	=	5.421	ตร.ม.
เส้นผ่าศก.ทางออก (Do)	=	1.22	ม.
ความยาวของท่อทางออกที่ยื่นเข้ามาในตัวไซโคลน (K)	=	1.75	ม.
เส้นผ่าศก.ปลายล่างสุดของกรวย (O)	=	1.22	ม.

4.3 ความดันลด (Head loss) ของก๊าซที่ไหลผ่านไซโคลน ⁽³⁾

ความดันลด (Head loss) ของก๊าซที่ไหลผ่านไซโคลน, = $\{rf Vi^2/2g\} \times \{(Kc.I.J.Dw^{0.5})/(Do^2 (M+L)^{0.5})\} \times 1/rw$

อุณหภูมิของก๊าซขาเข้า	=	150.00	องศาเซลเซียส
จากข้อ 1.2.3 ตารางที่ 2 ปริมาณก๊าซจากการเผาไหม้	=	13.13	กก.ก๊าซ/กก.เชื้อเพลิง
จากข้อ 1.2.3 ตารางที่ 3 ปริมาตรก๊าซจากการเผาไหม้	=	9.93	ลบ.ม./กก.เชื้อเพลิง
ดังนั้น r_f , ความหนาแน่นของก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน	=	1.32	กก./ลบ.ม.
r_f , ความหนาแน่นของก๊าซที่อุณหภูมิใช้งาน	=	0.854	กก./ลบ.ม.
Vi, ความเร็วของก๊าซขาเข้า	=	0.197	ลบ.ม./วินาที
g, ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	=	9.81	ม./วินาที ²
Kc, ค่าคงที่, กรณีช่องทางเข้ามีแผ่นบังคับการไหล	=	16.00	
I, ความสูงของช่องทางเข้า	=	1.00	ม.
J, ความกว้างของช่องทางเข้า	=	2.40	ม.
Dw, เส้นผ่าศก.ของทรงกระบอกช่วงบนของไซโคลน	=	3.05	ม.
Do, เส้นผ่าศก.ของช่องทางออก	=	1.22	ม.
M, ความสูงของไซโคลนของทรงกระบอกช่วงบนของไซโคลน	=	4.54	ม.
L, ความสูงของไซโคลนช่วงกรวยล่าง	=	3.30	ม.
N, ความสูงทั้งหมดของไซโคลน (M+L)	=	7.84	ม.

61 หมู่ 8 ต.วัดโบสถ์ อ.เมืองปราจีนบุรี จ.ปราจีนบุรี

ที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง โดย นายอนุตร เปียงแก้ว สส.414

r_w , ความหนาแน่นของน้ำ	=	1,000.00	กก./ลบ.ม.
แทนค่าลงในสมการ, ความดันลดของก๊าซที่ไหลผ่านไซ้	=	0.00003	ม.น้ำ (0.03 มม.น้ำ)
	=	0.27	ปาสคาล

4.4 ประสิทธิภาพในการแยกฝุ่นของไซโคลน ⁽³⁾

No, รอบการหมุนวนประสิทธิภาพ (No. of effective t = $1/I \times [M + (N-M)/2]$

(ปกติอยู่ระหว่าง 4 - 10 รอบ) = 6.19 รอบ

$$dpc, \text{ขนาดตัดของฝุ่นที่เข้าสู่ไซโคลน} = \left[\frac{9 m_s J}{2 p N_0 V_i (r_D - r_f)} \right]^{0.5}$$

อุณหภูมิของก๊าซขาเข้า = 150.00 องศาเซลเซียส

 m_s , ความหนืดของอากาศ = 0.00002380 กก./ม.-วินาทีที่ 150 องศา ซ. 1 บรรยากาศ

J, ความกว้างของช่องทางเข้า = 2.40 ม.

 V_i , ความเร็วของก๊าซขาเข้า = 0.20 ลบ.ม./วินาที

เนื่องจากใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงซึ่งไม่มีฝุ่นหรือมีต่ำมาก จึงเลือกใช้ความหนาแน่นของฝุ่นจากถ่านหินในการคำนวณแทน เพราะเป็นหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงสองชนิด ได้แก่ ก๊าซชีวภาพและถ่านหิน ฝุ่นในกรณีที่ใช้ก๊าซชีวภาพ 100 % ส่วนหนึ่งมาจากฝุ่นถ่านหินที่ตกค้างอยู่ในระบบ

ความหนาแน่นของฝุ่นที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหิน = 35 - 50 ปอนด์/ลบ.ฟุต

 r_D , ความหนาแน่นของอนุภาค/ฝุ่นที่เข้าสู่ไซโคลน เลือ = 45.00 ปอนด์/ลบ.ฟุต

= 720.83 กก./ลบ.ม.

 r_f , ความหนาแน่นของก๊าซ = 0.8537 กก./ลบ.ม. ที่ 150 องศา ซ. 1 บรรยากาศ

แทนค่าลงในสมการ, dpc = 0.0003055 ม.

= 305.46 ไมครอน

ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด, $h_i = 1 / (1 + dpc/dpi)$

เมื่อ dpi คือ ขนาดของอนุภาค

ประสิทธิภาพรวม, $h_T = \sum \frac{Sh_i W_i}{\sum W_i}$ เมื่อ W_i คือ มวลหรือน้ำหนักของอนุภาค = % mass of dpi %

ประสิทธิภาพของไซโคลนแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ขนาดเฉลี่ย (dpi), มวลสะสม (Cumulative % < Stated size) และประสิทธิภาพของไซโคลน

ขนาดเฉลี่ย (dpi) ⁽⁴⁾	มวลสะสม ⁽⁴⁾	(dpc/dpi) ²	ประสิทธิภาพ, hi	Wi	hiWi
ไมครอน	%			%	%
4000	100.00	0.01	0.99	25.10	24.95
1700	74.90	0.03	0.97	31.90	30.90
850	43.00	0.13	0.89	16.40	14.52
300	26.60	1.04	0.49	15.00	7.36
150	11.60	4.15	0.19	5.70	1.11
75	5.90	16.59	0.06	3.30	0.19
38	2.60	64.62	0.02	1.80	0.03
1	0.80	93,305.29	0.00	0.80	0.00
				ShiWi	79.07
เลือกจำนวนที่ประสิทธิภาพของไซโคลน			=	70.00	%

4.5 ค่าฝุ่นละออง (TSP) รวมหลังผ่านการบำบัดด้วยไซโคลน

1) ค่าฝุ่นละอองรวมที่คำนวณได้ตามค่าออกแบบที่กำหนด

ที่สภาวะที่กำหนดตามกฎหมาย คือ ก๊าซแห้ง สัดส่วนของออกซิเจนในก๊าซจากการเผาไหม้ 7 % อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ

ค่าฝุ่นละอองรวม (TSP) ในก๊าซจากการเผาไหม้ ก่อนเข้าไซโคลนตามการออกแบบ

$$= 4,500.00 \text{ มก./ลบ.ม. ที่ } 25 \text{ องศา. } 1 \text{ บรรยากาศ}$$

ประสิทธิภาพของไซโคลน

$$= 70.00 \%$$

ค่าฝุ่นละอองรวม (TSP) ในก๊าซจากการเผาไหม้ ออกจากไซโคลนตามการออกแบบ

$$= 1,350.00 \text{ มก./ลบ.ม. ที่ } 25 \text{ องศา. } 1 \text{ บรรยากาศ}$$

2) ค่าฝุ่นละอองรวมที่คำนวณได้ตามองค์ประกอบของเชื้อเพลิง

ที่สภาวะที่กำหนดตามกฎหมาย คือ ก๊าซแห้ง สัดส่วนของออกซิเจนในก๊าซจากการเผาไหม้ 7 % อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ

ค่าฝุ่นละอองรวม (TSP) ในก๊าซจากการเผาไหม้ ก่อนเข้าไซโคลน

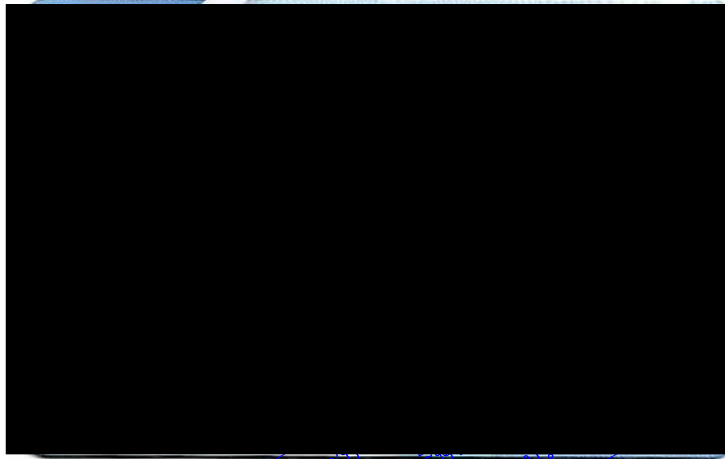
$$= 4,463.15 \text{ มก./ลบ.ม. ที่ } 25 \text{ องศา. } 1 \text{ บรรยากาศ}$$

ประสิทธิภาพของไซโคลน

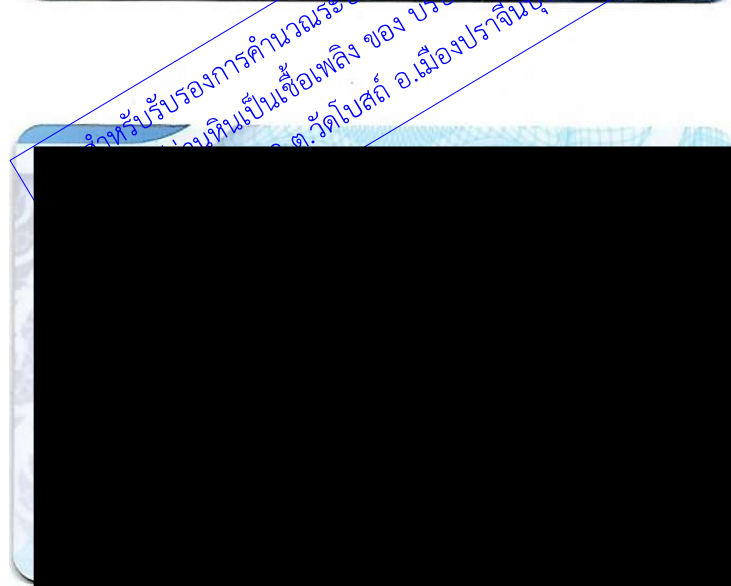
$$= 70.00 \%$$

ค่าฝุ่นละอองรวม (TSP) ในก๊าซจากการเผาไหม้ ออกจากไซโคลน

$$= 1,338.95 \text{ มก./ลบ.ม. ที่ } 25 \text{ องศา. } 1 \text{ บรรยากาศ}$$



น/อช.
(ชน)
=



สำหรับรับรองการคำนวณระดับ
ประเมินเป็นเชื้อเพลิง ของ บริษัท
อ.วัดโปสถ์ อ.เมืองปราจีนบุรี

รับรองสำเนาถูกต้อง

[Redacted signature]

(นายอนุตร เปียงแก้ว)