บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ระหว่างการเผาไหม้ของถ่านหินอัดก้อนที่ใช้ในเตาหุงต้มในครัวเรือน โดยทำการศึกษาถึงรูปแบบการปล่อยก๊าซทั้งสองระหว่างการเผาไหม้ ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกำมะถันรวมและปริมาณการเติมปูนขาวลงไปในถ่านหินอัดก้อน และอิทธิพลของปริมาณอากาศที่เข้าทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ ที่มีต่อการปล่อยก๊าซทั้งสองระหว่างการเผาไหม้ และทำการเปรียบเทียบการใช้งานของถ่านหินอัดก้อนกับถ่านไม้และไม้ฟืน ซึ่งผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลสามารถแสดงและอธิบายได้ตามหัวข้อต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ถ่านหินเบื้องต้น

ถ่านหินดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นถ่านหินจากแหล่งแม่เมาะจำนวน 2 ตัวอย่าง และจากแหล่งเหมืองบ้านปูอีกจำนวน 2 ตัวอย่าง จากการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) พบว่าถ่านหินทั้ง 4 ตัวอย่าง มีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 15-19 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม (air-dried basis) ปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 7-10 ปริมาณสารระเหยได้อยู่ในช่วงร้อยละ 33-43 ปริมาณเถ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 12-36 และปริมาณของคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 23-36 เมื่อนำค่าความร้อนและสมบัติต่าง ๆ ไปเทียบกับการแบ่งถ่านหินตามศักดิ์โดยวิธีมาตรฐาน ASTM D388 (ASTM standards, 1992) พบว่าถ่านหินจากแหล่งเหมืองบ้านปูทั้งสองตัวอย่างสามารถจัดอยู่ในศักดิ์ซับบิทูมินัส ซี ส่วนถ่านหินจากแหล่งแม่เมาะอยู่ในศักดิ์ซับบิทูมินัส เอ 1 ตัวอย่าง และศักดิ์ซับบิทูมินัส บี 1 ตัวอย่าง จากการวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันรวมในถ่านหินทั้ง 4 ตัวอย่าง พบว่าปริมาณกำมะถันรวมอยู่ในช่วงร้อยละ 0.8-7 โดยแบ่งเป็นกำมะถันไพไรต์อยู่ในช่วงร้อยละ 0.1-0.7 กำมะถันซัลเฟตอยู่ในช่วงร้อยละ 0.04-3 และกำมะถันอินทรีย์อยู่ในช่วงร้อยละ 0.5-3.5 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ของถ่านหินจากแหล่งต่าง ๆ นั้นแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ของถ่านหินที่ใช้ในการวิจัย (air-dried basis)

รายการวิเคราะห์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ถ่านหินตัวอย่าง			
	บ้านปู 1	บ้านปู 2	แม่เมาะ 1	แม่เมาะ 2
การวิเคราะห์แบบประมาณ				
- ความชื้น	9.14	7.46	9.33	7.24
- เถ้า	12.62	35.15	25.29	27.95
- สารระเหยได้	42.91	33.98	34.69	34.24
- คาร์บอนคงตัว	35.33	23.41	30.69	30.57
กำมะถันรวม	1.16	0.87	3.76	6.73
- กำมะถันไพไรต์	0.17	0.31	0.57	0.62
- กำมะถันซัลเฟต	0.33	0.04	1.49	2.72
- กำมะถันอินทรีย์	0.66	0.53	1.71	3.43
ค่าความร้อน				
(เมกกะจูลต่อกิโลกรัม)	18.65	13.20	18.63	15.46
(กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)	4,458	3,155	4,452	3,696
ศักดิ์	subbit C	subbit C	subbit A	subbit B

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ของถ่านหินทั้ง 4 ตัวอย่าง พบว่า ความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 7-10 ปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วงร้อยละ 40-51 ปริมาณไฮโดรเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 11-22 ปริมาณไนโตรเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 0.7-1.7 ปริมาณกำมะถันอยู่ในช่วง 1.0-6.6 ปริมาณของเถ้าที่แก้ค่าแล้ว (corrected ash) อยู่ในช่วงร้อยละ 12-26 และปริมาณออกซิเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 3.1-4.4 ซึ่งผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ของถ่านหินทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ถ่านหินแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ของถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัย (air-dried basis)

รายการวิเคราะห์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ถ่านหินตัวอย่าง			
	บ้านปู 1	บ้านปู 2	แม่เมาะ 1	แม่เมาะ 2
- ความชื้น	9.14	7.46	9.33	7.24
- คาร์บอน	50.63	40.98	44.70	43.61
- ไฮโดรเจน	21.83	11.82	13.01	12.96
- ไนโตรเจน	0.82	0.90	1.69	0.73
- กำมะถัน	1.06	0.91	3.84	6.52
- เถ้าที่แก้ค่าแล้ว	12.14	34.80	23.85	25.51
- ออกซิเจน (โดยผลต่าง)	4.38	3.13	3.58	3.43

4.2 ผลการวิเคราะห์ถ่านไม้และไม้ฟืน

ถ่านไม้และไม้ฟืนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นถ่านไม้และไม้ฟืนที่ใช้กันทั่วไปในการหุงต้มในครัวเรือน โดยเป็นไม้โกงกาง ซึ่งผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านไม้และไม้ฟืนแสดงไว้ในตารางที่ 4.3

4.3 ผลการวิเคราะห์ปูนขาว

ปูนขาวที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นปูนขาวที่ใช้ทั่วไปสำหรับการก่อสร้าง โดยเป็นปูนขาวแบบ commercial grade ซึ่งปูนขาวนี้ได้ถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาร้อยละของ CaO ในเนื้อปูนขาว จากการวิเคราะห์พบว่าปูนขาวที่ใช้ในงานวิจัยมีร้อยละของ CaO เฉลี่ยเท่ากับ 64.71

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ถ่านไม้และไม้ฟืนที่ใช้ในงานวิจัย (air-dried basis)

รายการวิเคราะห์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ถ่านไม้	ไม้ฟืน
การวิเคราะห์แบบประมาณ		
- ความชื้น	4.64	10.60
- เถ้า	2.95	1.32
- สารระเหยได้	23.32	63.45
- คาร์บอนคงตัว	69.09	24.63
กำมะถันรวม	น้อยมาก	น้อยมาก
ค่าความร้อน		
(เมกกะจูลต่อกิโลกรัม)	29.01	18.29
(กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)	6,934	4,372

4.4 ผลการวิเคราะห์ถ่านหินอัดก้อน

ถ่านหินอัดก้อนที่ใช้ในวิจัยได้จากการผสมถ่านหินดิบจากแหล่งต่าง ๆ รวมทั้งปูนขาวเข้าด้วยกันในเครื่องผสม เพื่อทำให้ถ่านหินอัดก้อนมีปริมาณกำมะถันและอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S แตกต่างกันไปตามความต้องการ ซึ่งปริมาณกำมะถันที่ต้องการคือ ร้อยละ 1, 2, 3, 4 และ 5 และอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S ที่ต้องการคือ 0, 1, 2, 3 และ 4 ถ่านหินอัดก้อนที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ซึ่งผลการวิเคราะห์ถ่านหินอัดก้อนที่ผลิตได้ แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

4.5 การปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระหว่างการเผาไหม้

4.5.1 รูปแบบของการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระหว่างการเผาไหม้

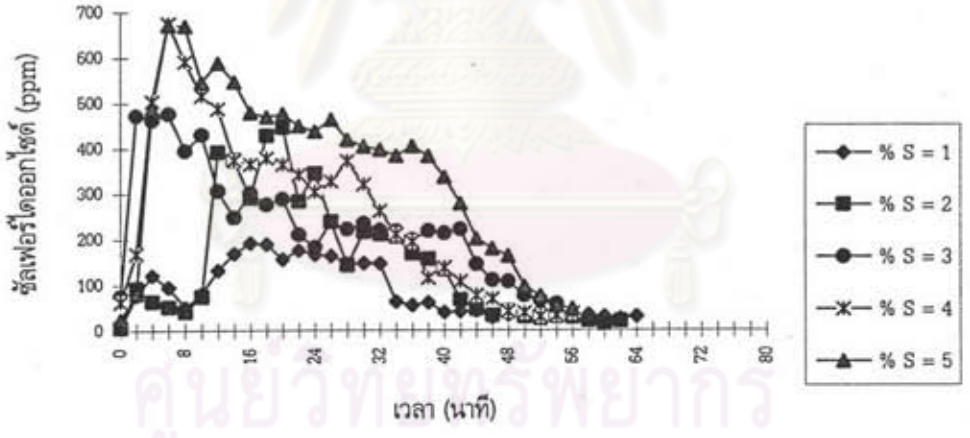
เมื่อพิจารณาจากการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระหว่างการเผาไหม้ของถ่านหินอัดก้อนในรูปที่ 4.1 พบว่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมามีความเข้มข้น (ในหน่วย ppm) สูง

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ถ่านหินอัดก้อนที่ใช้ในงานวิจัย (air-dried basis)

ชุดถ่านหินอัดก้อน	การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				ร้อยละกำมะถันรวม	ค่าความร้อน (แคลอรีต่อกิโลกรัม)	หมายเหตุ
	ความชื้น	เถ้า	สารระเหยได้	คาร์บอนคงตัว			
S10*	10.64	20.75	39.12	29.49	1.10	15.73	ได้จากแหล่งบ้านปู 1
S11	10.71	26.19	38.85	24.25	0.94	15.44	ผสมกับแหล่งบ้านปู 2
S12	9.66	26.99	38.10	25.25	0.95	15.22	ในอัตราส่วนโดยมวล
S13	10.04	30.42	36.30	23.24	0.90	14.55	เท่ากับ 2.6 : 2.4
S14	8.76	30.58	35.51	25.35	0.86	14.11	
S20	9.53	30.05	36.76	23.66	1.98	15.42	ได้จากแหล่งบ้านปู 2
S21	11.14	36.98	33.05	18.83	1.94	14.64	ผสมกับแหล่งแม่เมาะ 1
S22	8.88	36.43	31.77	22.92	1.76	13.83	ในอัตราส่วนโดยมวล
S23	7.92	41.65	31.94	18.49	1.73	13.45	เท่ากับ 3.0 : 2.0
S24	8.18	42.18	30.39	19.25	1.60	12.54	
S30	9.01	26.53	33.51	30.95	3.07	17.63	ได้จากแหล่งบ้านปู 2
S31	10.10	31.22	32.18	26.50	2.84	16.01	ผสมกับแหล่งแม่เมาะ 1
S32	8.89	38.31	26.64	26.16	2.46	14.54	ในอัตราส่วนโดยมวล
S33	10.23	40.78	29.73	19.26	2.31	13.85	เท่ากับ 1.3 : 3.7
S34	9.53	46.24	28.86	15.37	2.26	12.94	
S40	8.06	20.77	41.33	29.84	4.09	16.67	ได้จากแหล่งบ้านปู 1
S41	8.15	26.95	34.02	30.88	3.65	14.70	ผสมกับแหล่งแม่เมาะ 2
S42	10.36	35.11	32.15	22.38	3.50	13.96	ในอัตราส่วนโดยมวล
S43	9.67	42.36	30.69	17.28	3.11	12.48	เท่ากับ 2.3 : 2.7
S50	8.83	25.16	37.00	29.01	4.96	16.72	ได้จากแหล่งบ้านปู 1
S51	9.06	31.84	31.93	27.17	4.50	14.71	ผสมกับแหล่งแม่เมาะ 2
S52	9.54	40.90	32.56	17.00	3.87	12.96	ในอัตราส่วนโดยมวล
							เท่ากับ 1.5 : 3.5

*S10 หมายถึง ถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 1 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 0

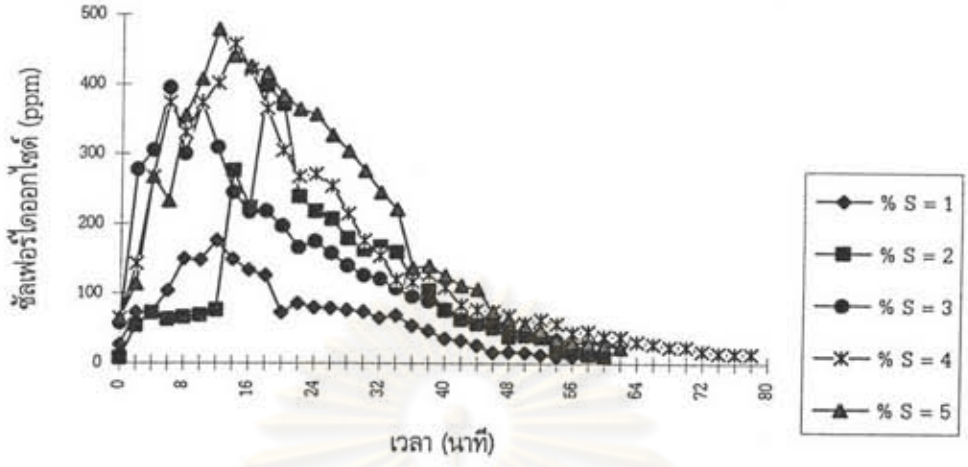
ในช่วงแรก โดยเฉพาะในช่วง 10-30 นาทีของการเผาไหม้ ความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีค่าสูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากช่วงประมาณ 10 นาทีแรกของการเผาไหม้ ถ่านหินอัดก้อนเริ่มติดไฟ กำมะถันในถ่านหินถูกเผาไหม้ออกมาทีละน้อย เมื่อถึงประมาณนาทีที่ 8-10 ถ่านหินอัดก้อนติดไฟไปทั่วทั้งเตาหุงต้ม อัตราการเผาไหม้ (burning rate) ของถ่านหินอัดก้อนมีค่าสูงมากในช่วง 10-30 นาที ทำให้กำมะถันในถ่านหินอัดก้อนถูกเผาไหม้และปล่อยออกมาเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในปริมาณที่สูงมากด้วย หลังจาก 30 นาทีไปแล้ว อัตราการเผาไหม้ของถ่านหินอัดก้อนลดลงจนถึงระดับที่คงที่ แต่เนื่องจากปริมาณกำมะถันได้ถูกเผาไหม้ไปแล้วเป็นส่วนใหญ่ในช่วง 10-30 นาทีของการเผาไหม้ ปริมาณกำมะถันในถ่านหินอัดก้อนจึงเหลืออยู่น้อย ทำให้ความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์หลังจากนาทีที่ 30 ไปแล้ว มีค่าลดลงมาก และลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งถ่านหินอัดก้อนราไฟ (อุณหภูมิของก๊าซที่วัดได้มีค่าต่ำกว่า 70 องศาเซลเซียส)



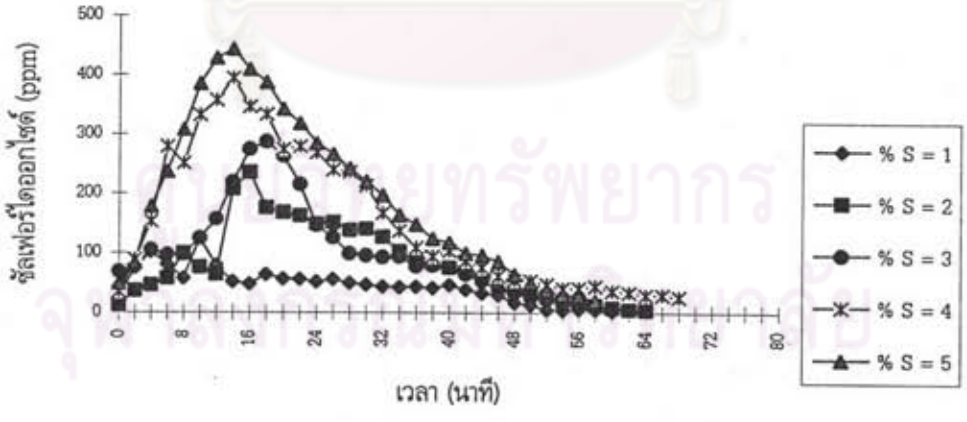
รูปที่ 4.1 การปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ ของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 1-5 และอัตราส่วนของ CaO/S เท่ากับ 0

4.5.2 ผลของปริมาณกำมะถันที่มีต่อการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์

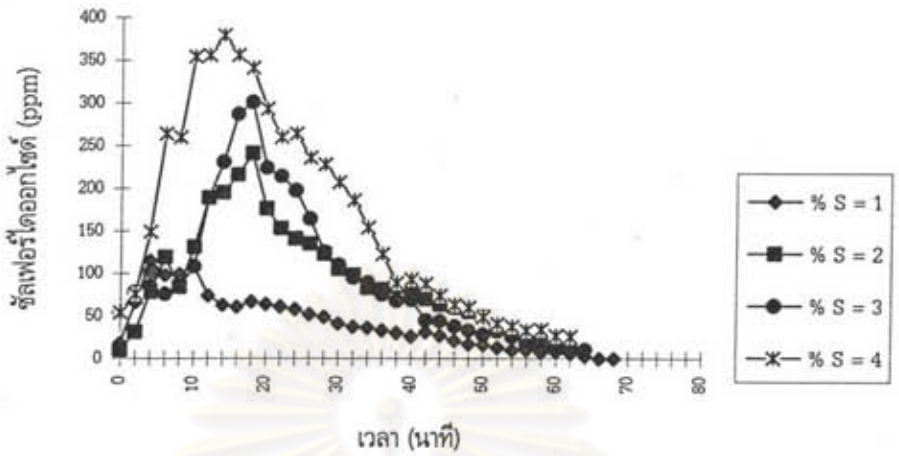
ผลการทดลองเพื่อศึกษาถึงการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระหว่างการเผาไหม้ของถ่านหินอัดก้อนที่มีปริมาณกำมะถันต่าง ๆ กัน โดยให้อัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S มีค่าคงที่ในแต่ละชุดของถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันแตกต่างกันนั้น แสดงไว้ในรูปที่ 4.1-4.5



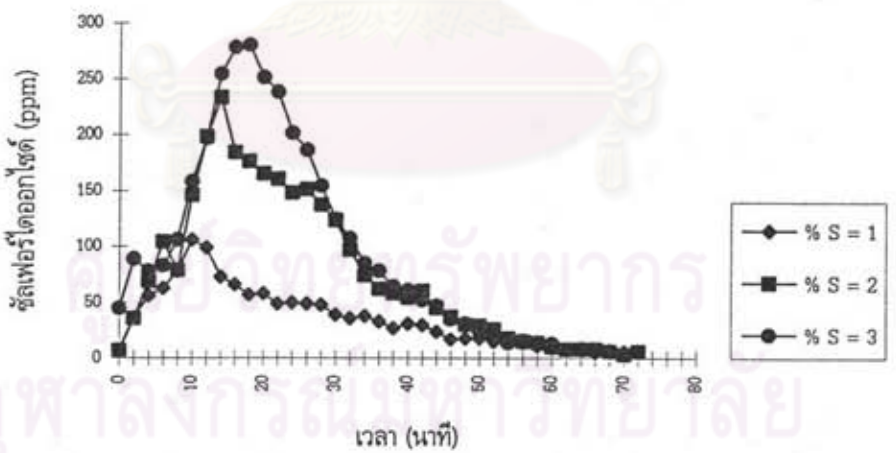
รูปที่ 4.2 การปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ ของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 1-5 และอัตราส่วนของ CaO/S เท่ากับ 1



รูปที่ 4.3 การปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ ของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 1-5 และอัตราส่วนของ CaO/S เท่ากับ 2



รูปที่ 4.4 การปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ ของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 1-5 และอัตราส่วนของ CaO/S เท่ากับ 3

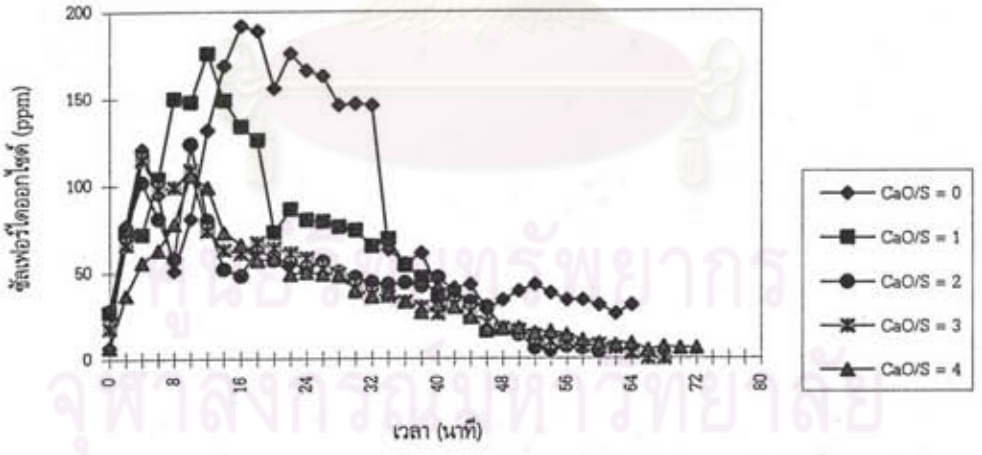


รูปที่ 4.5 การปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ ของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 1-5 และอัตราส่วนของ CaO/S เท่ากับ 4

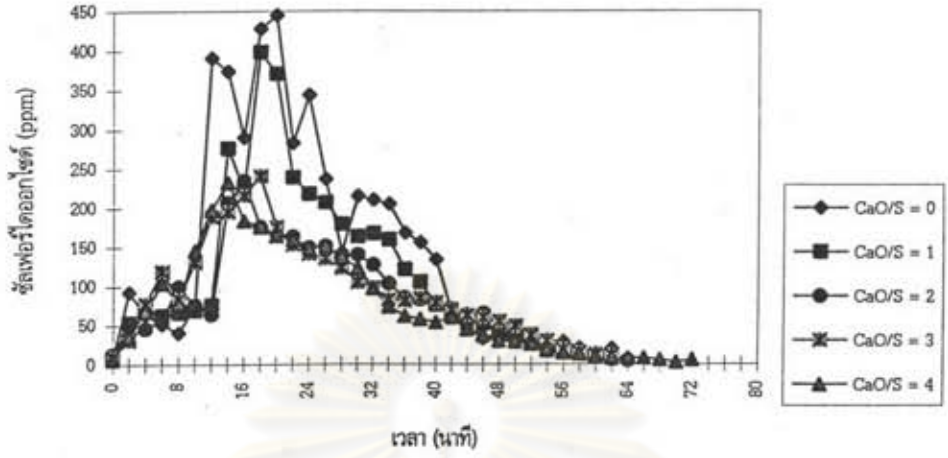
จากรูปที่ 4.1-4.5 พบว่าความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมามีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณกำมะถันในถ่านหินอัดก้อนสูงขึ้น ในทุกอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S แต่เมื่อปริมาณกำมะถันในถ่านหินอัดก้อนสูงขึ้น ความแตกต่างของความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาระหว่างการเผาไหม้มีแนวโน้มลดลง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าความเข้มข้นเฉลี่ยในช่วง 10-30 นาทีของการเผาไหม้ ซึ่งพบว่าความเข้มข้นเฉลี่ย (ในหน่วย ppm) ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาของถ่านหินอัดก้อนที่มีปริมาณกำมะถันเท่ากับ 1, 2, 3, 4 และ 5 มีค่าเท่ากับ 156, 305, 343, 351 และ 470 ตามลำดับ สำหรับถ่านหินอัดก้อนที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 0 และมีค่าเท่ากับ 65, 152, 182, 257 และ 323 ตามลำดับ สำหรับถ่านหินอัดก้อนที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 2

4.5.3 <u>ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S ที่มีต่อการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์</u>

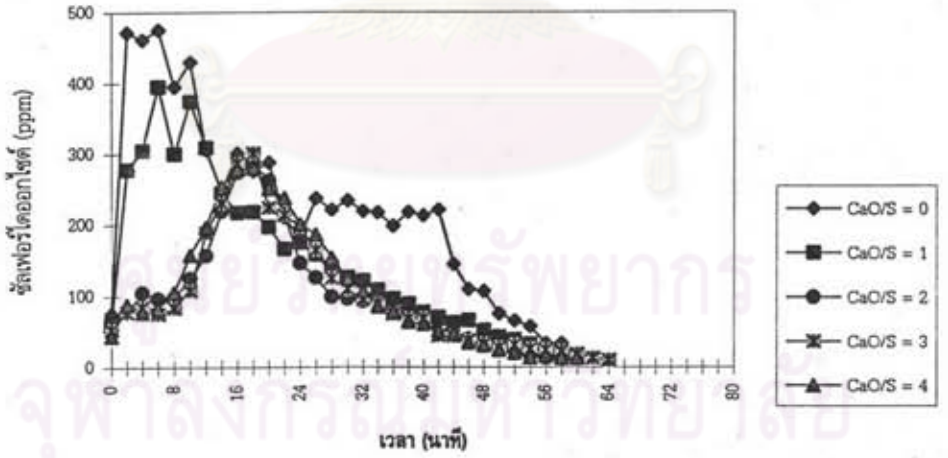
ผลการทดลองเพื่อศึกษาถึงอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S ที่มีต่อการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระหว่างการเผาไหม้ แสดงไว้ในรูปที่ 4.6-4.10



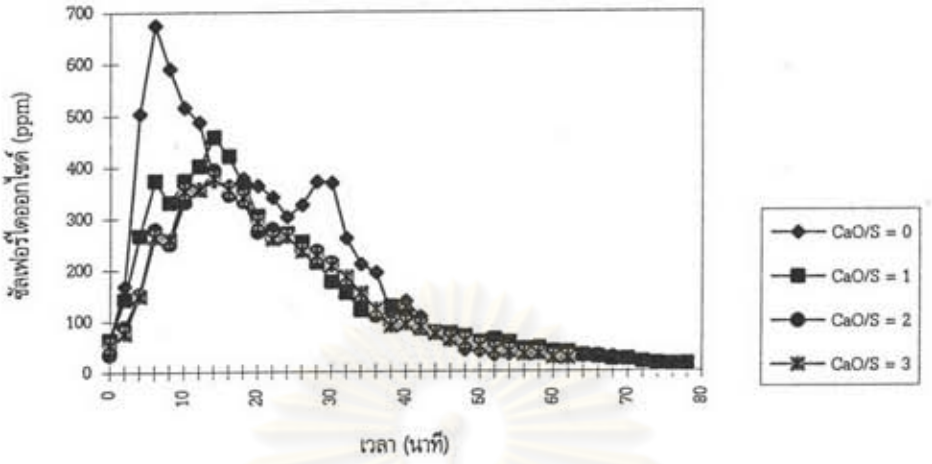
รูปที่ 4.6 การปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ ของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 1 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 0-4



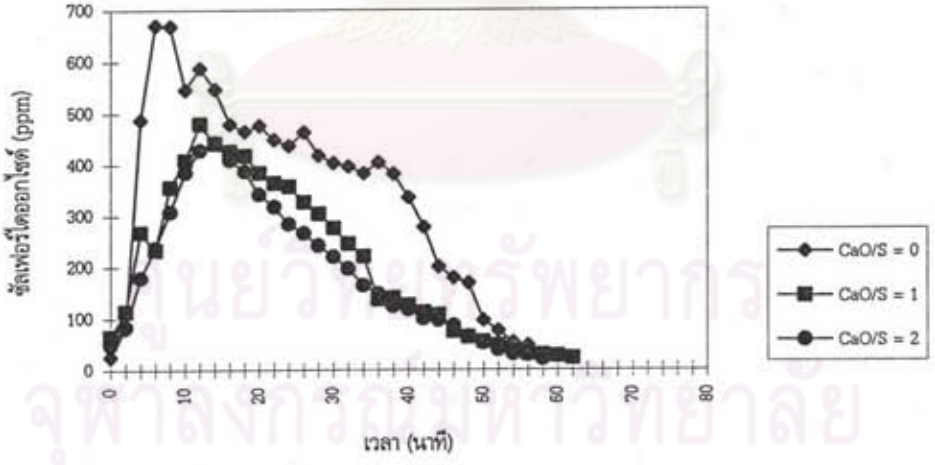
รูปที่ 4.7 การปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ ของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 2 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 0-4



รูปที่ 4.8 การปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ ของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 3 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 0-4



รูปที่ 4.9 การปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ ของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 4 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 0-3



รูปที่ 4.10 การปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ ของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 5 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 0-3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 4.6-4.10 พบว่าที่ปริมาณกำมะถันที่เท่ากัน เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาระหว่างการเผาไหม้มีค่าลดลง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าความเข้มข้นเฉลี่ยในช่วง 10-30 นาทีของการเผาไหม้ ซึ่งพบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาของถ่านหินอัดก้อนที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 0, 1, 2, 3 และ 4 มีค่าเท่ากับ 156, 122, 65, 64 และ 63 ppm ตามลำดับ สำหรับถ่านหินอัดก้อนที่มีปริมาณกำมะถันเท่ากับ 1 และมีค่าเท่ากับ 305, 220, 152, 151 และ 151 ppm ตามลำดับ สำหรับถ่านหินอัดก้อนที่มีปริมาณกำมะถันเท่ากับ 2 สำหรับถ่านหินอัดก้อนที่มีปริมาณกำมะถันค่าอื่น ๆ พบว่ามีแนวโน้มเป็นไปในลักษณะเดียวกันนี้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.5 ทั้งนี้เนื่องจากปูนขาว (CaO) ที่ใส่เข้าไปนั้นเกิดปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) กลายเป็น $CaSO_4$ ซึ่งมีสภาพเป็นของแข็งไม่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ

ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้น (ในหน่วย ppm) เฉลี่ยของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในช่วง 10-30 นาทีของการเผาไหม้ ของถ่านหินอัดก้อนชุดต่าง ๆ

ปริมาณกำมะถันในถ่านหินอัดก้อน	อัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S ในถ่านหินอัดก้อน				
	0	1	2	3	4
	ความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ppm)				
1	156	122	65	64	63
2	305	220	152	151	151
3	343	221	182	152	152
4	351	332	257	249	*
5	470	362	323	*	*

* ไม่ได้ทำการทดลอง

จากตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S มากกว่า 2 ความเข้มข้นเฉลี่ยของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาลดลงน้อยมากจนถือได้ว่าคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากการกำจัดกำมะถันระหว่างการเผาไหม้โดยการใช้ปูนขาวนั้น ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) จะแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของ CaO เข้าไปทำปฏิกิริยากับ CaO เกิดเป็น $CaSO_4$ (พัชรี ชุติศิลป์, 2533; Giogia, 1980; Lalai, 1979) ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นที่รูพรุนของอนุภาคของ CaO แต่เนื่องจาก $CaSO_4$ ที่เกิดขึ้นมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าขนาดของรูพรุนของ CaO (ดวงพร ธีรภาพไพสิฐ, 2530) ทำให้ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ไม่สามารถผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาได้อีก ซึ่งทำให้มีปูนขาวส่วนหนึ่งที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ดังนั้นการเพิ่มการเติมปูนขาว (ซึ่งก็คือการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S นั่นเอง) ลงในถ่านหินอัดก้อน ก็จะเป็นการเพิ่มพื้นที่ที่จะเกิดปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และจากการทดลองพบว่าอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาในการเผาไหม้มีค่าเท่ากับ 2 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ดวงพร ธีรภาพไพสิฐ, 2530; พัชรี ชุติศิลป์, 2533)

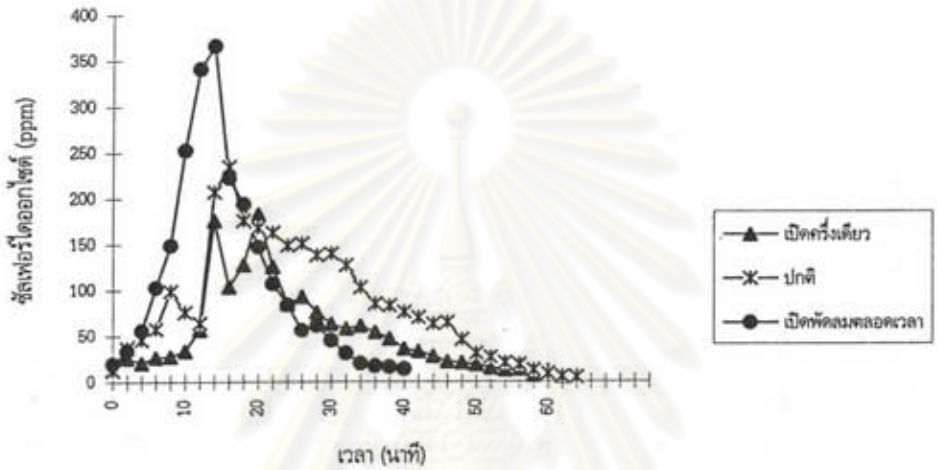
4.5.4 <u>ผลของร้อยละอากาศเกินพอที่มีต่อการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์</u>

การศึกษาถึงผลของร้อยละอากาศเกินพอที่มีต่อการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้น ทำการศึกษาโดยทำการเผาไหม้ถ่านหินอัดก้อนที่มีปริมาณกำมะถันเท่ากับ 2 และอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 2 ที่ภาวะต่าง ๆ คือ 1) ทำการเผาไหม้โดยลดหน้าต่างที่ช่องลมให้เหลือครึ่งหนึ่ง 2) ทำการเผาไหม้ที่ภาวะปกติ และ 3) ทำการเผาไหม้โดยเปิดพัดลมพัดเข้าที่ช่องลมตลอดเวลา ซึ่งผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.11

การเผาไหม้ถ่านหินอัดก้อนที่ภาวะต่าง ๆ กันนี้ จะทำให้วัดปริมาณออกซิเจนใน flue gas ได้ต่างกัน ซึ่งสามารถเทียบได้เป็นร้อยละอากาศเกินพอ (ค่าเฉลี่ยในช่วง 10-30 นาทีของการเผาไหม้) ได้ประมาณ 297 สำหรับสภาวะการเผาไหม้ที่ลดหน้าต่างช่องลมให้เหลือครึ่งเดียว ประมาณ 472 สำหรับการเผาไหม้ที่ภาวะปกติ และประมาณ 612 สำหรับการเผาไหม้โดยเปิดพัดลมพัดเข้าที่ช่องลมตลอดเวลา และพบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาในช่วง 10-30 นาทีของการเผาไหม้มีค่าเท่ากับ 102 ppm สำหรับภาวะการเผาไหม้ที่ลดหน้าต่างช่องลมลงเหลือครึ่งเดียว เท่ากับ 152 ppm สำหรับการเผาไหม้ที่ภาวะปกติ และเท่ากับ 180 ppm สำหรับภาวะการเผาไหม้โดยเปิดพัดลมพัดเข้าที่ช่องลมตลอดเวลา

จากการทดลองจะเห็นว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้นเมื่ออากาศเกินพอสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอากาศเกินพอที่สูงขึ้นทำให้อัตราการเผาไหม้ถ่านหินอัดก้อน

สูงขึ้น ความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจึงมีค่าสูงขึ้น แต่ช่วงเวลาการเผาไหม้ทั้งหมดจะสั้นลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออัตราการเผาไหม้สูงขึ้น ปริมาณถ่านหินอัดก้อนก็จะถูกใช้ให้หมดไปเร็วขึ้น จึงทำให้ช่วงเวลาการเผาไหม้สั้นลง



รูปที่ 4.11 การปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 2 และอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 2 ในสภาวะการเผาไหม้ 1) เปิดหน้าต่างช่องลมครึ่งเดียว 2 ปกติ 3) เปิดพัดลมตลอดเวลา

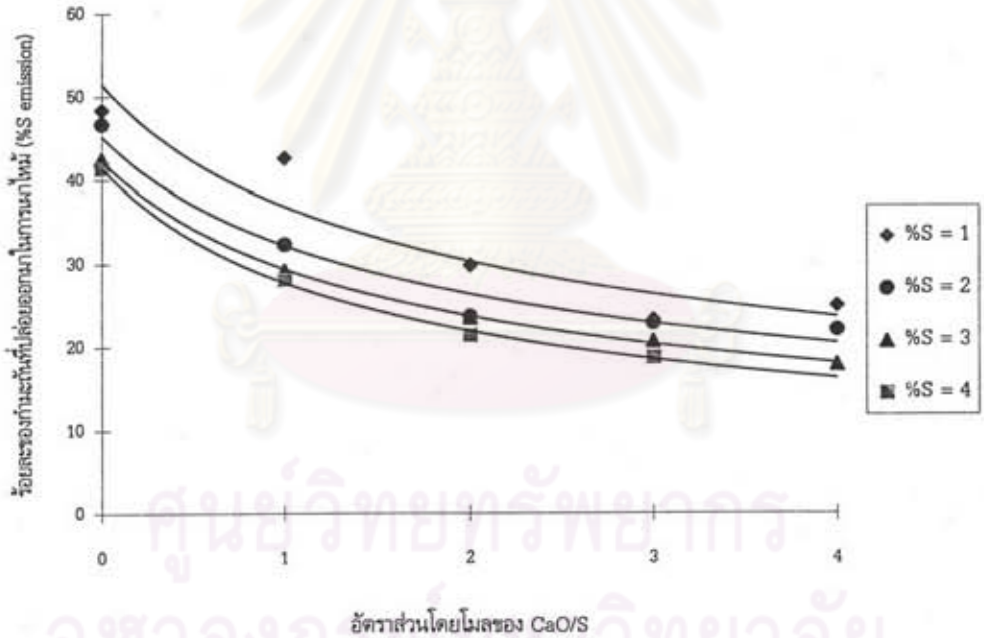
4.6 ร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมาในการเผาไหม้ (% S emission)

ร้อยละกำมะถันที่ปล่อยออกมาในการเผาไหม้ (%S emission) หมายถึง ปริมาณของกำมะถันที่ปล่อยออกมาทั้งหมดระหว่างการเผาไหม้เทียบกับปริมาณกำมะถันที่มีอยู่เดิมในถ่านหินอัดก้อน ซึ่งรายละเอียดการคำนวณ %S emission แสดงไว้ในภาคผนวก ค.

4.6.1 ผลของปริมาณกำมะถันในถ่านหินอัดก้อน

การทดลองเพื่อศึกษาถึงปริมาณกำมะถันที่ปล่อยออกมาในการเผาไหม้ ทำได้โดยการวัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ และอัตราการเผาไหม้ของถ่านหินอัดก้อนในแต่ละชุด และนำไปคำนวณเพื่อหาปริมาณกำมะถันทั้งหมดที่

ปล่อยออกมาระหว่างการเผาไหม้ ซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณหา %S emission ของถ่านหินอัดก้อนชุดนั้น ๆ ต่อไปได้ (ตัวอย่างการคำนวณหา %S emission แสดงไว้ในภาคผนวก ค.) และเมื่อทดสอบการเผาไหม้เสร็จแล้วก็นำเอาเถ้าถ่านหินอัดก้อนไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณกำมะถันในเถ้าถ่านหิน เพื่อตรวจสอบดูว่าผลรวมของกำมะถันทั้งสองส่วนมีค่าเท่ากับปริมาณกำมะถันในถ่านหินอัดก้อนตอนเริ่มต้นหรือไม่ ทั้งนี้แสดงว่าผลการคำนวณที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากน้อยเพียงใด ซึ่งผลการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของปริมาณกำมะถันในถ่านหินอัดก้อนที่มีต่อ %S emission แสดงไว้ในและรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.12 ร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมาในการเผาไหม้ของถ่านหินอัดก้อนชุดต่าง ๆ

ตารางที่ 4.6 ร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมาในการเผาไหม้ และร้อยละของกำมะถันในเถ้าของถ่านหินอัดก้อนชุดต่าง ๆ

ชุดถ่านหินอัดก้อน	ร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมาในการเผาไหม้	ร้อยละของกำมะถันในเถ้าถ่านหิน	ร้อยละของความผิดพลาด	รวม
S10	48.4	48.3	3.3	100.0
S11	42.6	53.8	3.6	100.0
S12	29.8	65.7	4.5	100.0
S13	23.2	72.0	4.8	100.0
S14	24.9	73.5	1.6	100.0
S20	46.7	50.8	2.5	100.0
S21	32.3	66.6	1.1	100.0
S22	23.6	71.2	5.2	100.0
S23	22.8	73.9	3.3	100.0
S24	22.0	74.0	4.0	100.0
S30	42.5	54.9	2.6	100.0
S31	29.2	67.2	3.6	100.0
S32	23.5	71.9	4.6	100.0
S33	20.7	72.7	6.6	100.0
S34	17.9	79.1	3.0	100.0
S40	41.4	57.7	0.9	100.0
S41	28.1	67.9	4.0	100.0
S42	21.4	75.9	2.7	100.0
S43	18.7	79.9	1.4	100.0
S50	42.0	53.4	4.6	100.0
S51	23.5	74.9	1.6	100.0
S52	23.0	73.0	4.0	100.0
		เฉลี่ย	3.20	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซึ่งพบว่าค่าความผิดพลาดจากการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 0.9-6.6 % และมีค่าเฉลี่ย 3.20 % ซึ่งแสดงว่าค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองมีค่าความผิดพลาดอันเนื่องมาจากการทดลองในระดับที่ยอมรับได้

จากรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.6 พบว่าถ้ากำหนดให้อัตราส่วนโดยโมลของ CaO คงที่ เมื่อปริมาณกำมะถันรวมในถ่านหินอัดก้อนเพิ่มขึ้น ร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมามีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อถ่านหินอัดก้อนมีปริมาณกำมะถันสูงขึ้น ปริมาณกำมะถันซัลเฟตในถ่านหินอัดก้อนจะเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 4.1 จากตารางดังกล่าวจะเห็นว่าเมื่อปริมาณกำมะถันรวมในถ่านหินมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณกำมะถันซัลเฟตจะเพิ่มขึ้น และเมื่อนำถ่านหินจากแหล่งต่าง ๆ มาทำการอัดก้อนโดยผสมกันในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 จะทำให้ปริมาณกำมะถันซัลเฟตมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณกำมะถันรวมในถ่านหินอัดก้อนสูงขึ้นด้วย ซึ่งกำมะถันซัลเฟตนี้จะไม่ถูกออกซิไดส์และปล่อยออกมา (Elliott, 1981) จึงทำให้ร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมามีค่าลดลง

4.6.2 <u>ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S</u>

จากรูปที่ 4.12 พบว่า เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เพิ่มขึ้น ร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมามีค่าลดลง แต่เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S มากกว่า 2 อัตราการลดลงของกำมะถันที่ปล่อยออกมามีค่าต่ำลงจนถือได้ว่าค่อนข้างคงที่ ทั้งนี้เนื่องจาก $CaSO_4$ ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะเป็นสิ่งกีดขวางไม่ให้ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับปูนขาวอีกได้ ซึ่งทำให้ปูนขาวส่วนหนึ่งมิได้ถูกใช้ไปเพื่อทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ดังนั้นปูนขาวที่เพิ่มเข้ามาจึงมาเพิ่มพื้นที่ที่จะเกิดปฏิกิริยาได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และจากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ในช่วง 2-3 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ดวงพร ธีรภาพไพสิฐ, 2530; พัชรี ชุติศิลป์, 2533)

4.6.3 <u>ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยมากับปริมาณกำมะถันและอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S</u>

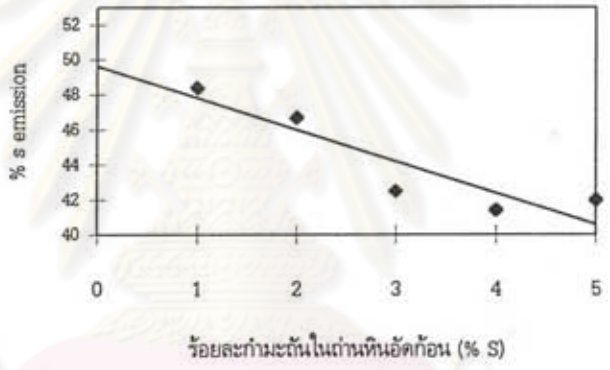
จากหัวข้อที่ 4.6.1 และ 4.6.2 ทำให้ทราบว่า ร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมาในการเผาไหม้ (% S emission) มีความสัมพันธ์กับปริมาณกำมะถันในถ่านหินอัดก้อน (%S) และอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S (CaO/S) และจากรูปที่ 4.12 พบว่าความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ควรอยู่ในรูป

$$\%S \text{ emission} = \frac{A}{e^{B[CaO/S]}} \qquad (4.1)$$

โดยที่ A เป็นค่าร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมาในการเผาไหม้เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 0

และ B เป็นค่าคงที่

ซึ่งร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมาที่อัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 0 ของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ร้อยละกำมะถันที่ปล่อยออกมาของถ่านหินอัดก้อนที่อัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 0

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.13 พบว่า A ควรมีความสัมพันธ์กับปริมาณกำมะถันในถ่านหินอัดก้อนในรูปแบบสมการเส้นตรง

$$A = P + Q[\%\ S] \qquad (4.2)$$

โดยที่ P เป็นระยะตัดแกน Y

Q เป็นความชันของเส้นตรง

จากการคำนวณจะได้ว่า ความชันมีค่าเท่ากับ -1.77 และมีระยะตัดแกน Y เท่ากับ 49.5 (ตัวอย่างการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ค.) ดังนั้นจึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่า A กับร้อยละกำมะถันในถ่านหินอัดก้อนได้เป็น

$$A = 49.5 - 1.77[\%\ S] \qquad (4.3)$$

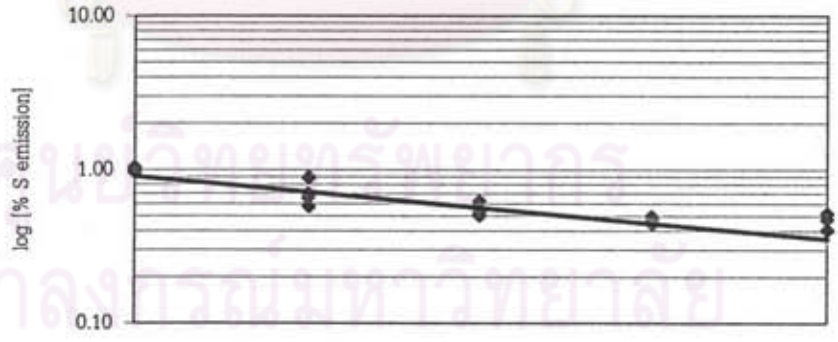
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และจากสมการที่ 4.1 เพื่อหาค่าคงที่ B ของสมการ จึงทำการ normalize ด้วยสมการ 4.1 ด้วยการนำค่า A สำหรับร้อยละกำมะถันค่าต่าง ๆ มาหารสมการที่ 4.1 ซึ่งทำให้ได้สมการในรูปที่ normalize แล้ว เป็นดังนี้

$$\frac{\%\ \mathrm{S}\quad \mathrm{emission}}{\mathrm{A}} = \frac{1}{e^{B[CaO/S]}} \qquad (4.4)$$

จากนั้นเขียนสมการที่ 4.4 .ในรูปของลอกการิทึม ดังสมการที่ 4.5

$$\log\left[\frac{\%\ S\quad emission}{A}\right] = -\left(B \log e\right)[CaO/S] \qquad (4.5)$$

เขียนกราฟระหว่างค่า log [%S emission] กับค่า CaO/S จะได้ความสัมพันธ์ในรูปเส้นตรง โดยมี B log e เป็นความชันของเส้นกราฟ ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าว แสดงได้ดังรูปที่ 4.14

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า log [%S emission] กับค่า CaO/S

จากการคำนวณจะได้ว่าค่าคงที่ B มีค่าเท่ากับ 0.253 (ตัวอย่างการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ค.) ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมาในการเผาไหม้ (% S emission) กับปริมาณกำมะถันในถ่านหินอัดก้อน (% S) และอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S (CaO/S) เป็นดังนี้

$$\%S\ \text{emission} = \frac{49.5 - 1.77[\%S]}{e^{0.253[CaO/S]}} \qquad (4.6)$$

ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจะเป็นไปตามที่แสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากสมการ 4.6 มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง และจากการพิจารณาค่าร้อยละความผิดพลาดของการทำนายร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมาในการเผาไหม้ (% S emission) ด้วยสมการที่ 4.6 พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 1.37-34.40 % แต่ความผิดพลาดส่วนใหญ่มีค่าไม่เกิน 15 % อย่างไรก็ดีการพิสูจน์ความถูกต้องของสมการที่เสนอนี้จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากการทดลองอื่น ๆ มาตรวจสอบเพิ่มเติมด้วย

4.6.4 ผลของร้อยละอากาศเกินพอ

เพื่อศึกษาผลของร้อยละอากาศเกินพอที่มีต่อร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมาในการเผาไหม้ถ่านหินอัดก้อน ได้ใช้ถ่านหินอัดก้อนที่มีปริมาณกำมะถันเท่ากับ 2 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 2 (ถ่านหินอัดก้อนชุด S22) ซึ่งผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.8

จากผลการทดลองพบว่าการใช้อากาศเกินพอไม่มีผลต่อร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมา ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสภาวะการเผาไหม้ในเตาหุงต้มที่ใช้เอื้ออำนวยให้อากาศผ่านเข้าไปเผาไหม้กับถ่านหินอัดก้อนได้มากเกินพออยู่แล้ว การทดลองทุกการทดลองซึ่งอยู่ในภาวะที่มีอากาศเกินพอเป็นอย่างมากทั้งสิ้น จึงทำให้ไม่มีผลต่อร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมาในการเผาไหม้ แต่จะมีผลต่อความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาระหว่างการเผาไหม้ดังอธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.5.4

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบ % S emission จากการทดลองจริง กับค่า % S emission ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4.6

ชุดถ่านหินอัดก้อน	ร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมาในการเผาไหม้ (จากการทดลอง)	ร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมาในการเผาไหม้ (จากการคำนวณ)	ร้อยละของความผิดพลาด
S10	48.4	47.74	1.37
S11	42.6	37.06	12.99
S12	29.8	28.78	3.42
S13	23.2	22.35	3.68
S14	24.9	17.35	30.32
S20	46.7	45.97	1.56
S21	32.3	35.69	10.51
S22	23.6	27.72	17.44
S23	22.8	21.52	5.61
S24	22.0	16.71	24.05
S30	42.5	44.21	4.01
S31	29.2	34.32	17.55
S32	23.5	26.65	13.41
S33	20.7	20.69	0.03
S34	17.9	16.07	10.23
S40	41.4	42.44	2.51
S41	28.1	32.95	17.27
S42	21.4	25.59	19.57
S43	18.7	19.87	6.24
S50	42.0	40.68	3.15
S51	23.5	31.58	34.40
S52	23.0	24.52	6.62
		เฉลี่ย	11.71

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 ร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมา (%S emission) ที่ร้อยละอากาศเกินพอต่าง ๆ ของถ่านหินอัดก้อนชุด S22

ภาวะการทดลอง	ร้อยละอากาศเกินพอ (ค่าเฉลี่ยในช่วง 10-30 นาที ของการเผาไหม้)	% S emission
- ลดหน้าต่างช่องลมลงเหลือครึ่งหนึ่ง	297	23.0
- ปกติ	472	23.6
- เปิดพัดลมเป่าที่ช่องลมตลอดเวลา	612	22.0

4.6.5 ผลของปริมาณถ่านหินอัดก้อน

การศึกษาผลของปริมาณถ่านหินอัดก้อนที่มีต่อร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมาในการเผาไหม้นั้น ทำการศึกษาโดยนำถ่านหินอัดก้อนที่มีปริมาณกำมะถันร้อยละ 2 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 2 (ถ่านหินอัดก้อนชุด S22) ในปริมาณต่าง ๆ กันมาทำการเผาไหม้ โดยให้มีปริมาณความร้อนเทียบเท่าถ่านไม้ในปริมาณ 300, 350, 400 และ 450 กรัม ซึ่งผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.9

จากการศึกษาพบว่าปริมาณของถ่านหินอัดก้อนไม่ได้มีผลต่อร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมามากนัก ยกเว้นในกรณีที่ปริมาณถ่านหินอัดก้อนน้อยที่สุด คือ เทียบเท่าถ่านไม้ 300 กรัม ทั้งนี้เนื่องจากถ่านหินอัดก้อนที่มีปริมาณน้อยเกินไปอาจให้ปริมาณความร้อนน้อย ซึ่งอาจมีผลให้องค์ประกอบกำมะถันในถ่านหินสลายตัวและเผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์

ตารางที่ 4.9 ร้อยละของกำมะถันที่ปล่อยออกมาในการเผาไหม้ที่ปริมาณถ่านหินอัดก้อนต่าง ๆ ของถ่านหินอัดก้อนชุด S22

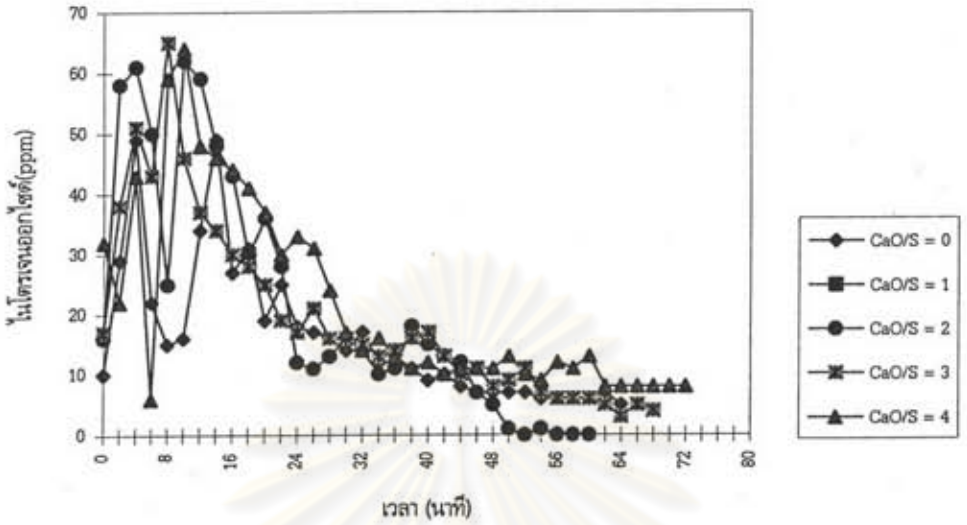
น้ำหนักของถ่านหินอัดก้อน (กรัม)	น้ำหนักถ่านไม้เทียบเท่า (กรัม)	% s emission
629	300	21.6
733	350	25.0
838	400	23.6
943	450	25.0

4.7 การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ระหว่างการเผาไหม้

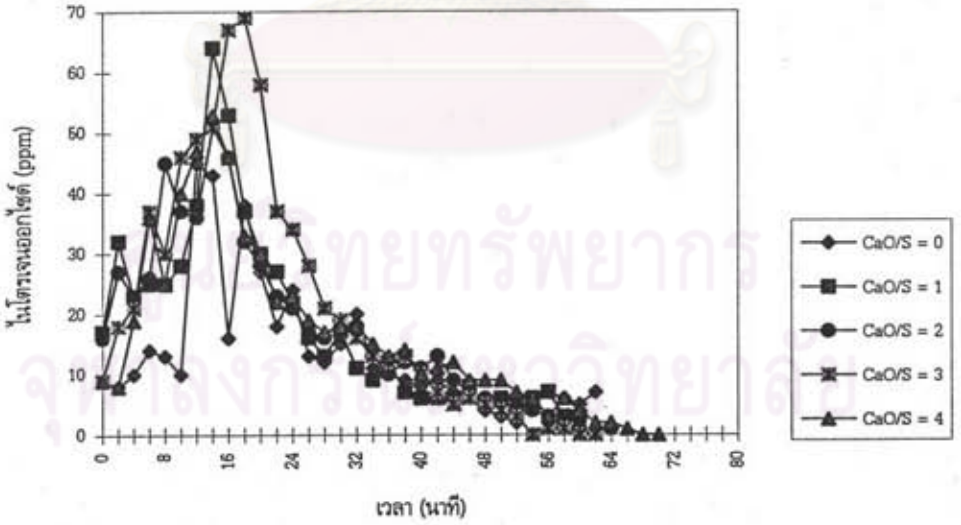
4.7.1 รูปแบบของการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ระหว่างการเผาไหม้

เพื่อศึกษาถึงรูปแบบการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ระหว่างการเผาไหม้ของถ่านหินอัดก้อน จึงทำการทดลองโดยวัดไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยออกมาในถ่านหินอัดก้อนชุดต่าง ๆ ที่มีร้อยละกำมะถันในถ่านหินอัดก้อนและอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S ต่าง ๆ กัน ซึ่งผลการศึกษาแสดงไว้ในรูปที่ 4.15-4.19

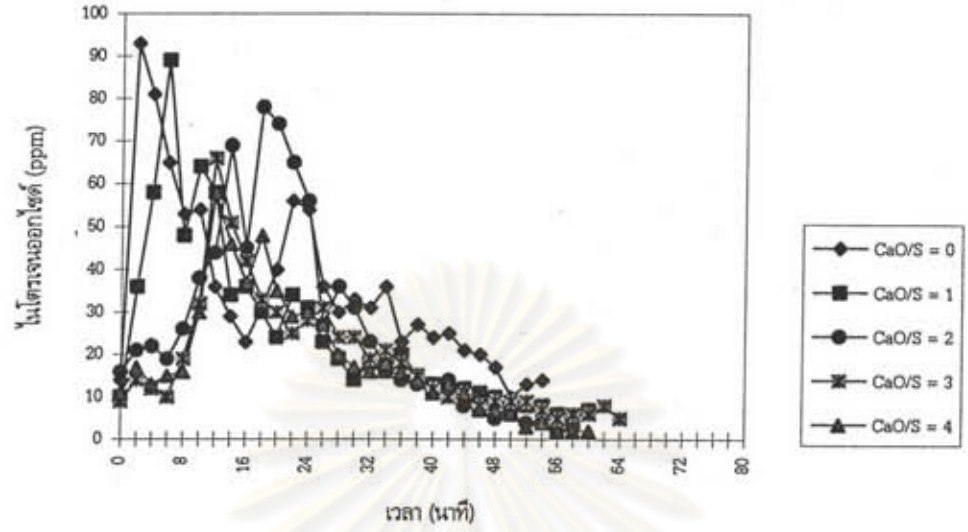
จากรูปที่ 4.15-4.19 จะเห็นว่ารูปแบบการปล่อยของไนโตรเจนออกไซด์จะเหมือนกับรูปแบบการปล่อยของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงแรกอัตราการเผาไหม้ถ่านหินอัดก้อนยังไม่สูงมากนัก เนื่องจากถ่านหินอัดก้อนยังไม่ติดไฟทั้งหมด ไนโตรเจนออกไซด์จึงถูกปล่อยออกมาในปริมาณต่ำ เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 นาที ถ่านหินอัดก้อนจะลุกติดไฟไปทั่วทั้งเตาอัตราการเผาไหม้จะสูงขึ้นอย่างมาก ไนโตรเจนออกไซด์จึงถูกเผาไหม้และปล่อยออกมาในปริมาณสูงในช่วง 10-30 นาทีของการเผาไหม้ หลังจากนั้นการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์จะลดลงจนหมดไปในที่สุด



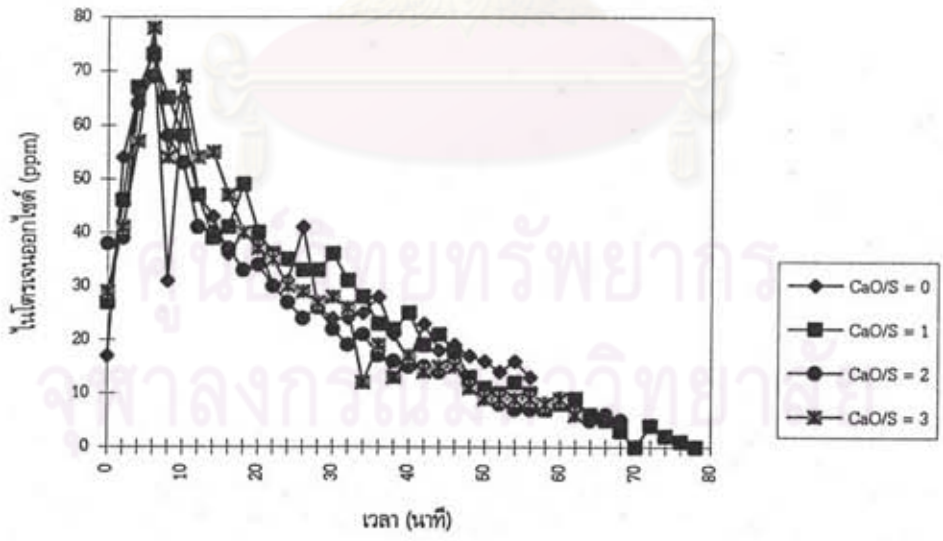
รูปที่ 4.15 ไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยออกมาที่เวลาต่าง ๆ ของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 1 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 0-4



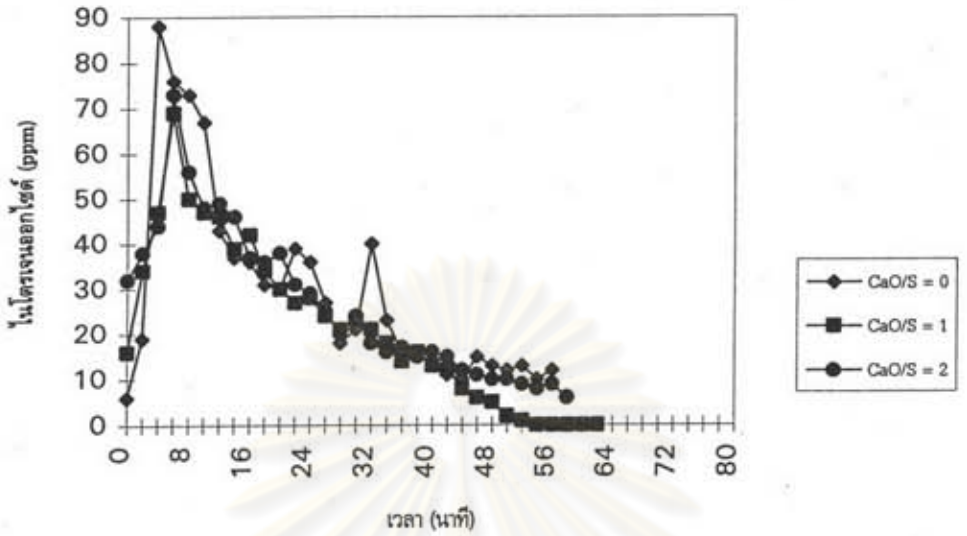
รูปที่ 4.16 ไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยออกมาที่เวลาต่าง ๆ ของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 2 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 0-4



รูปที่ 4.17 ไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยออกมาที่เวลาต่าง ๆ ของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 3 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 0-4



รูปที่ 4.18 ไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยออกมาที่เวลาต่าง ๆ ของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 4 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 0-3



รูปที่ 4.19 ไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยออกมาที่เวลาต่าง ๆ ของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 5 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 0-2

4.7.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S ที่มีต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์

จากการพิจารณารูปที่ 4.15-4.19 พบว่า ถ่านหินอัดก้อนที่มีปริมาณกำมะถันเท่ากันจะปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ในลักษณะเดียวกันและมีค่าใกล้เคียงกัน และพบว่าอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S ไม่มีผลต่อความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยออกมาระหว่างการเผาไหม้ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 1 โดยพบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยออกมาของถ่านหินอัดก้อนที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 0, 1, 2, 3 และ 4 จะมีค่าเท่ากับ 24, 34, 33, 26 และ 34 ppm ตามลำดับ สำหรับถ่านหินอัดก้อนที่มีปริมาณกำมะถันเท่ากับ 1 และเท่ากับ 48, 40, 42, 44 และ 39 ppm ตามลำดับ สำหรับถ่านหินอัดก้อนที่มีปริมาณกำมะถันเท่ากับ 2 สำหรับถ่านหินอัดก้อนที่มีปริมาณกำมะถันค่าอื่น ๆ พบว่ามีแนวโน้มเป็นไปในลักษณะเดียวกันนี้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.10 ทั้งนี้เนื่องจากถ่านหินอัดก้อนที่มีปริมาณกำมะถันเท่ากันเป็นถ่านหินอัดก้อนที่มีส่วนผสมแบบเดียวกัน จึงน่าจะรูปแบบของไนโตรเจนในถ่านหินอัดก้อนแบบเดียวกัน

ตารางที่ 4.10 ความเข้มข้น (ในหน่วย ppm) เฉลี่ยของไนโตรเจนออกไซด์ในช่วง 10-30 นาที ของการเผาไหม้ ของถ่านหินอัดก้อนชุดต่าง ๆ

ปริมาณกำมะถันในถ่านหินอัดก้อน	อัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S ในถ่านหินอัดก้อน				
	0	1	2	3	4
	ความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ (ppm)				
1	24	34	33	26	34
2	48	40	42	44	39
3	38	36	36	35	34
4	41	44	43	39	*
5	35	33	35	*	*

* ไม่ได้ทำการทดลอง

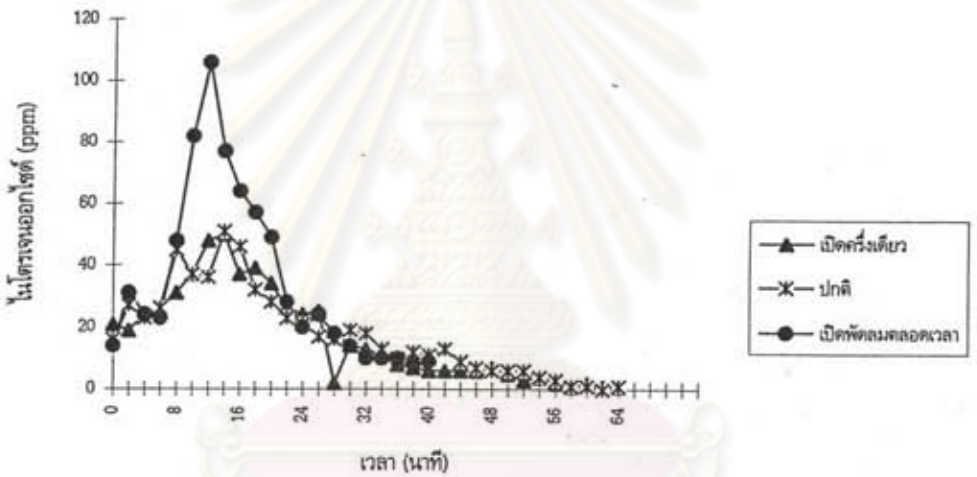
4.7.3 ผลของร้อยละอากาศเกินพอที่มีต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์

การศึกษาถึงผลของร้อยละอากาศเกินพอที่มีต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์นั้น ทำการศึกษาโดยทำการเผาไหม้ถ่านหินอัดก้อนที่มีปริมาณกำมะถันเท่ากับ 2 และอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 2 ที่ภาวะต่าง ๆ คือ 1) ทำการเผาไหม้โดยลดหน้าต่างที่ช่องลมให้เหลือครึ่งหนึ่ง 2) ทำการเผาไหม้ที่ภาวะปกติ และ 3) ทำการเผาไหม้โดยเปิดพัดลมพัดเข้าที่ช่องลมตลอดเวลา ซึ่งผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.20

การเผาไหม้ถ่านหินอัดก้อนที่ภาวะต่าง ๆ กันนี้ จะทำให้วัดปริมาณออกซิเจนใน flue gas ได้ต่างกัน ซึ่งสามารถเทียบได้เป็นร้อยละอากาศเกินพอ (ค่าเฉลี่ยในช่วง 10-30 นาทีของการเผาไหม้) ได้ประมาณ 297 สำหรับสภาวะการเผาไหม้ที่ลดหน้าต่างช่องลมให้เหลือครึ่งเดียว ประมาณ 472 สำหรับการเผาไหม้ที่ภาวะปกติ และประมาณ 612 สำหรับการเผาไหม้โดยเปิดพัดลมพัดเข้าที่ช่องลมตลอดเวลา และพบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยออกมาในช่วง 10-30 นาทีของการเผาไหม้มีค่าเท่ากับ 32 ppm สำหรับภาวะการเผาไหม้ที่ลด

หน้าต่างช่องลมลงเหลือครึ่งเดียว เท่ากับ 42 ppm สำหรับการเผาไหม้ที่ภาวะปกติ และเท่ากับ 56 ppm สำหรับภาวะการเผาไหม้โดยเปิดพัดลมพัดเข้าที่ช่องลมตลอดเวลา

จากการทดลองจะเห็นว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของไนโตรเจนออกไซด์มีค่าสูงขึ้นเมื่ออากาศเกินพอสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอากาศเกินพอที่สูงขึ้นทำให้อัตราการเผาไหม้ถ่านหินอัดก้อนสูงขึ้น ความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจึงมีค่าสูงขึ้น แต่ช่วงเวลาการเผาไหม้ทั้งหมดจะสั้นลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออัตราการเผาไหม้สูงขึ้น ปริมาณถ่านหินอัดก้อนก็จะถูกใช้ให้หมดไปเร็วขึ้น จึงทำให้ช่วงเวลาการเผาไหม้สั้นลง



รูปที่ 4.20 การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 2 และอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 2 ในสภาวะการเผาไหม้
1) เปิดหน้าต่างช่องลมครึ่งเดียว 2 ปกติ 3) เปิดพัดลมตลอดเวลา

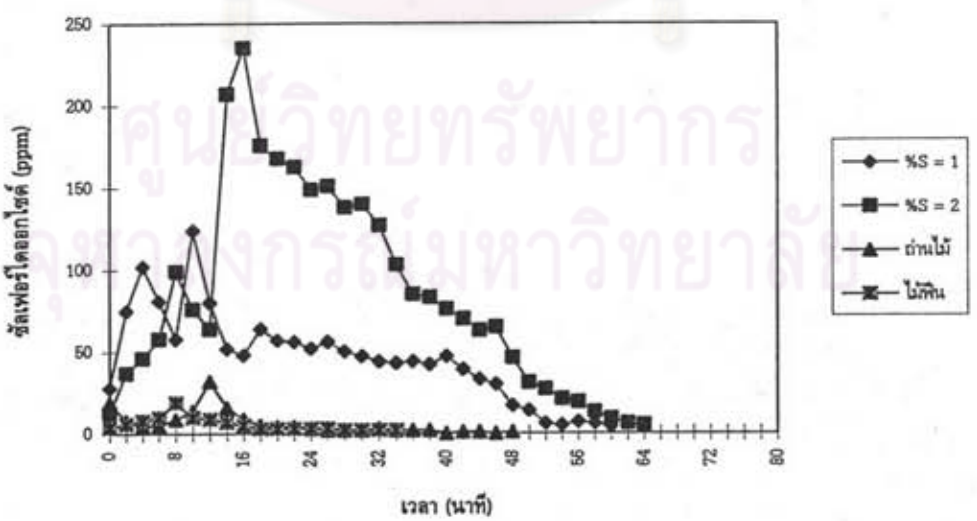
4.8 การเปรียบเทียบการใช้งานของถ่านหินอัดก้อนกับถ่านไม้และไม้ฟืน

จากการพิจารณาการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของถ่านหินอัดก้อนระหว่างการเผาไหม้ พบว่า เมื่อปริมาณกำมะถันในถ่านหินอัดก้อนมีปริมาณสูง ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจะมีปริมาณสูง ถึงแม้ว่าจะมีการกำจัดการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในระหว่างการเผาไหม้โดยการเติมปูนขาวลงไปแล้วก็ตาม ดังจะเห็นได้จากค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อย

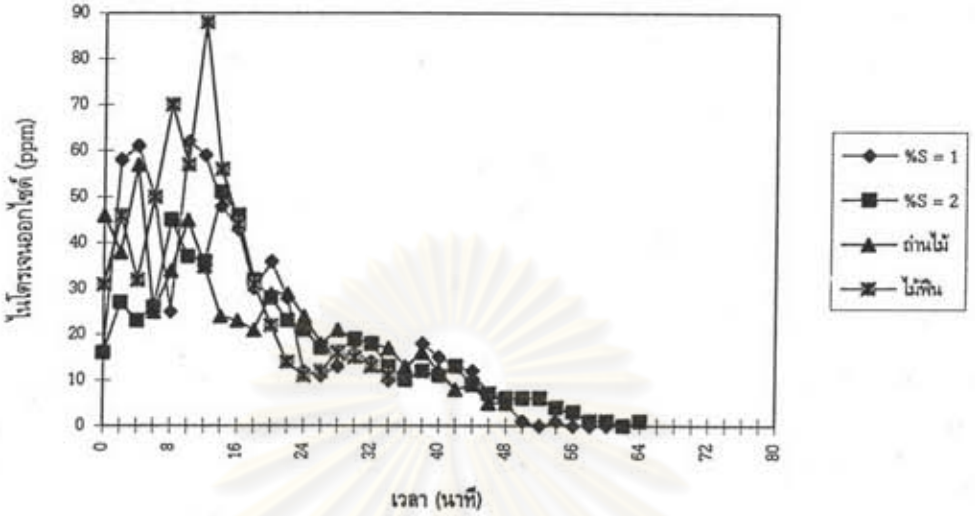
ออกมาในช่วง 10-30 นาทีของการเผาไหม้ สำหรับถ่านหินอัดก้อนที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 2 มีค่าเท่ากับ 65, 152, 182, 257 และ 323 ppm สำหรับถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากัน 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ :ซึ่งจะเห็นได้ว่าสำหรับถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันมากกว่า 2 การปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ยังคงอยู่ในระดับที่สูง ซึ่งจะก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้ได้ ดังนั้นจึงไม่ควรนำถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันสูงมาทำการอัดก้อนเป็นถ่านหินอัดก้อนเพื่อใช้ในการหุงต้มในครัวเรือน เพื่อเปรียบเทียบการใช้งานของถ่านหินอัดก้อนกับถ่านไม้และไม้ฟืน จึงเลือกถ่านหินอัดก้อนที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ (ร้อยละกำมะถันเท่ากับ 1 และ 2) และใช้อัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 2 เป็นชุดถ่านหินอัดก้อนที่จะนำมาเปรียบเทียบการใช้งานกับถ่านไม้และไม้ฟืน

4.8.1 <u>การปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ระหว่างการเผาไหม้</u>

ผลการเปรียบเทียบการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระหว่างการเผาไหม้ของถ่านหินอัดก้อนกับถ่านไม้และไม้ฟืน แสดงไว้ในรูปที่ 4.21 และผลการเปรียบเทียบการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ระหว่างการเผาไหม้ของถ่านหินอัดก้อนกับถ่านไม้และไม้ฟืน แสดงไว้ในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.21 การปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 1 และ 2 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 2 เปรียบเทียบกับถ่านไม้และไม้ฟืน



รูปที่ 4.22 การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 1 และ 2 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 2 เปรียบเทียบกับถ่านไม้และไม้ฟืน

จากรูปที่ 4.21 จะเห็นว่าถ่านไม้และไม้ฟืนจะปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมาต่ำมากเมื่อเทียบกับถ่านหินอัดก้อน โดยถ่านไม้และไม้ฟืนมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในช่วง 10-30 นาทีของการเผาไหม้ มีค่าเท่ากับ 9 และ 5 ppm ตามลำดับ ส่วนถ่านหินอัดก้อนมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยในช่วง 10-30 นาทีของการเผาไหม้ เท่ากับ 65 และ 152 ppm สำหรับถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 1 และ 2 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินอัดก้อนและปล่อยออกมานี้ อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าหรือใกล้เคียงกับมาตรฐานการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2.5 และจากการทดลองพบว่าก๊าซที่ปล่อยออกมามีกลิ่นเหม็นน้อยมาก ดังนั้นจึงถือได้ว่าการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระหว่างการเผาไหม้ของถ่านหินอัดก้อนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

และจากรูปที่ 4.22 จะเห็นว่าการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ของถ่านหินอัดก้อน ถ่านไม้และไม้ฟืนมีค่าใกล้เคียงกัน โดยพบว่าถ่านไม้และไม้ฟืนปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ออกมามีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยในช่วง 10-30 นาทีของการเผาไหม้ เท่ากับ 26 และ 33 ppm ส่วนถ่านหินอัดก้อนปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ออกมาด้วยความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 33 และ 42 ppm สำหรับ

ถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 1 และ 2 ตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่าการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ของถ่านหินอัดก้อนอยู่ในระดับเดียวกับกับถ่านไม้และไม้ฟืน

4.8.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านหินอัดก้อนกับถ่านไม้และไม้ฟืน

เพื่อศึกษาถึงการเปรียบเทียบการใช้งานของถ่านหินอัดก้อนกับถ่านไม้และไม้ฟืน จึงทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้วยวิธีการต้มน้ำระหว่างถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 2 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 2 กับถ่านไม้และไม้ฟืน โดยใช้ถ่านหินอัดก้อน ถ่านไม้ และไม้ฟืน ในปริมาณที่มีค่าความร้อนเทียบเท่าถ่านไม้ 400 กรัม ซึ่งผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้งาน แสดงไว้ในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละกำมะถันเท่ากับ 2 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เท่ากับ 2 เปรียบเทียบกับถ่านไม้และไม้ฟืน

เชื้อเพลิง	น้ำหนัก (กรัม)	ประสิทธิภาพการใช้งาน, η
ถ่านหินอัดก้อน	838	35.9
ถ่านไม้	400	32.9
ไม้ฟืน	634	25.2

จากตารางที่ 4.11 จะเห็นว่าถ่านหินอัดก้อนมีประสิทธิภาพการใช้งานสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากการเผาไหม้ของถ่านหินอัดก้อนนั้นจะเผาไหม้ด้วยอัตราที่ไม่สูงมากนักทำให้ความร้อนค่อย ๆ คายออกมาอย่างต่อเนื่อง และข้อได้เปรียบของถ่านหินอัดก้อนอีกประการหนึ่งคือ ถ่านหินอัดก้อนมีเวลาของการเผาไหม้ได้นานกว่าถ่านไม้และไม้ฟืนและเถ้าถ่านหินก็คงตัวทำให้สามารถกักเก็บความร้อนไว้ได้ สำหรับถ่านไม้นั้นจะเกิดการเผาไหม้สูงในช่วงแรกแต่หลังจากนั้นอัตราการเผาไหม้จะลดลงอย่างรวดเร็ว และเถ้าของถ่านไม้ไม่คงตัว ดังนั้นจึงไม่สามารถกักเก็บความร้อนไว้ได้ ส่วนไม้ฟืนนั้นจะเห็นว่าประสิทธิภาพการใช้งานมีค่าต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากไม้ฟืนเผาไหม้อย่างรวดเร็วในช่วงแรก และมีช่วงเวลาของการเผาไหม้สั้นมาก ประสิทธิภาพจึงต่ำมาก เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการศึกษาที่ผ่านมาทั้งหมดนี้จะเห็นว่าถ่านหินอัดก้อนที่มีร้อยละของกำมะถันประมาณ 1-2 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S ประมาณ 2 มีการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ในระดับที่ต่ำกว่าหรือใกล้เคียงกับมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา และมีประสิทธิภาพการใช้งานที่สูงกว่าถ่านไม้และไม้ฟืน ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะนำถ่านหินอัดก้อนมาใช้งานแทนถ่านไม้และไม้ฟืนในการหุงต้มในครัวเรือน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย