



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต(วิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย)

ปริญญา

วิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย สาขา วิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย
โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชา

เรื่อง ผลของความชื้นที่มีผลต่อการเกิดลุกไหม้ได้เองของถ่านหินซับบิทูมินัส

Effect of Moisture on Spontaneous Combustion of Subbituminous Coal

นามผู้วิจัย นายกานต์ สุภนิรันดร์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์เมตตา เจริญพานิช, D.Eng)

ประธานสาขาวิชา

(รองศาสตราจารย์สุรัชย์ รดาการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงทิว มทาวิตยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของความชื้นที่มีผลต่อการเกิดลูกไฟไหม้ได้เองของถ่านหินซับบิทูมินัส

Effect of Moisture on Spontaneous Combustion of Subbituminous Coal

โดย

นายกานต์ สุภนรินทร์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กานต์ สุภณรินทร์ 2553: ผลของความชื้นที่มีผลต่อการเกิดลูกไหม้ได้เองของถ่านหินซับ
บิทูมินัส ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย)
สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์เมตตา เจริญพานิช, D.Eng.
179 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความชื้น และขนาดของถ่านหินตลอดจน
ระยะเวลา และอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน โดยใช้ถ่านหินซับบิทู
มินัสจากประเทศอินโดนีเซีย 2 แหล่ง จำนวน 3 ตัวอย่าง และถ่านหินจากประเทศสาธารณรัฐ
แอฟริกาใต้ จำนวน 1 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 4 ตัวอย่าง การศึกษาการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน
ดำเนินการภายในชุดทดลองโดยใช้ 2 วิธี ได้แก่ การหาอุณหภูมิจุดตัด และการหาอุณหภูมิเริ่มต้น
จากการศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมกับการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน โดย
การหาอุณหภูมิจุดตัดที่ต่ำสุด พบว่า อัตราการไหลของอากาศ 1,200 มิลลิลิตรต่อนาที ให้อุณหภูมิ
จุดตัดต่ำสุด คือ 166 องศาเซลเซียส และเมื่อศึกษาอุณหภูมิเริ่มต้นของการลุกไหม้ได้เองของถ่าน
หิน พบว่า ถ่านหิน ADARO 266 จากประเทศอินโดนีเซีย ที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร
สามารถลุกไหม้ได้เองที่อุณหภูมิต่ำสุด คือ 148 องศาเซลเซียส และเมื่อศึกษาการลุกไหม้ได้เอง
ของถ่านหินขนาดต่างๆ พบว่า ถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เองที่
อุณหภูมิต่ำกว่าถ่านหินที่มีขนาด 75-106 ไมโครเมตร และถ่านหินที่มีขนาด 106-250 ไมโครเมตร
จากนั้นเมื่อนำถ่านหิน ADARO 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรไปทำการเพิ่มความชื้น แล้ว
นำมาศึกษาอุณหภูมิเริ่มต้นที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เอง พบว่าถ่านหินที่ความชื้นสูง จะมี
อุณหภูมิเริ่มต้นที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เองสูงกว่าถ่านหินที่มีความชื้นต่ำ นอกจากนี้ถ่านหินที่
มีค่าความชื้นสูงจะใช้เวลาในสัมผัสอุณหภูมิเริ่มต้นที่ทำให้ถ่านหินลุกไหม้ได้เองนานกว่าถ่านหิน
ที่มีค่าความชื้นต่ำ เมื่อใช้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้เท่ากัน

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Gan Suppanirun 2010: Effect of Moisture on Spontaneous Combustion of Subbituminous Coal. Master of Engineering (Fire Protection Engineering), Major Field: Fire Protection Engineering, Interdisciplinary Graduate Program. Thesis Advisor: Associate Professor Metta Chareonpanich, D.Eng. 179 pages.

This research aimed to study effects of the moisture and particle size, as well as heating period and temperature on the spontaneous combustion of 3 samples of subbituminous coal from 2 sources of Indonesia and 1 sample of subbituminous coal from South Africa (total of 4 samples). The experiment was performed in the in-house test set by using the cross point temperature method and the initial temperature method. It was found that the appropriate air flow rate for the spontaneous coal combustion obtained from the cross point temperature method was 1,200 ml/min with the minimum temperature of 166 °C. For the study of the initial spontaneous combustion temperature of coal sample, it was found that the Indonesian ADARO 266 coal of smaller than 75 µm revealed the lowest combustion temperature at 148 °C. In the case of the spontaneous combustion of each size of coal, the coal of smaller than 75 µm exhibited the lowest initial spontaneous combustion temperature than those of 75-106 µm and 106-250 µm. Subsequently, ADARO 266 coal of smaller than 75 µm was exposed to moist air to increase the moisture and tested for the spontaneous combustion. It was found that the coal sample with the highest moisture content had the highest initial spontaneous combustion temperature. Moreover, this coal sample also required the longest heating period for spontaneous combustion at the same temperature.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำปรึกษา และชี้แนะแนวทางในการจัดทำ ปรับปรุงข้อแก้ไขต่างๆ จาก รองศาสตราจารย์ ดร.เมตตา เจริญพานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร.สุรัชย์ รดาการ ประธานสาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันอวกาศ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เดชา พวงดาวเรือง ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของของคณาจารย์ทุกท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณกรณีย์ พิพิธสมบัติ รองผู้จัดการใหญ่อาวุโส(ผู้จัดการโรงงาน) บริษัททีพีโอ โพลีน จำกัด (มหาชน) ดร.ภูวรินทร์ นิลรัมย์ ผู้ช่วยผู้จัดการฝ่ายบริหารคุณภาพทั่วทั้งองค์กร คุณวิรัช บุรณศักดิ์ พนักงานฝ่ายควบคุมคุณภาพทุกท่าน และพนักงานแผนกความปลอดภัยทุกท่าน ที่ได้ให้ความสะดวกในการทำวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างดี ขอขอบคุณ บิดา-มารดา ซึ่งให้การสนับสนุนและให้กำลังใจ และขอบคุณเพื่อนๆและพี่ๆ นิสิตปริญญาโทวิศวกรรมป้องกันอวกาศ รุ่นที่ 4 ทุกท่านที่ให้กำลังใจ

ท้ายที่สุดนี้ ประโยชน์ได้อันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่บิดา-มารดา คณาจารย์และผู้ให้การสนับสนุนทุกท่านที่ได้เมตตาอบรมสั่งสอน ให้กำลังใจ กำลังทรัพย์ และช่วยเหลือสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอด

กานต์ สุภนิรันดร์
พฤษภาคม 2553

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(8)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(22)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	37
อุปกรณ์	37
วิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	44
สรุปและข้อเสนอแนะ	125
สรุป	125
ข้อเสนอแนะ	127
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	128
ภาคผนวก	131
ภาคผนวก ก ผลการทดลองการลูกไหม้ได้เองของถ่านหิน	132
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ถ่านหินลูกไหม้ได้เอง กับคุณสมบัติทางเคมีของถ่านหิน	155
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	179

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การจำแนกถ่านหินตามประเภท โดยใช้ ASTM D388	5
2	อัตราส่วนโดยน้ำหนักอะตอมของธาตุในถ่านหินประเภทต่างๆ	8
3	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับค่าความร้อนที่สูงสูญเสียไป	11
4	ผลการวิเคราะห์ถ่านหินในการศึกษาออกซิเดชันแบบเปียก Tarafdar and Guha (1989)	20
5	ผลการทดลองหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และอุณหภูมิสูงสุด	20
6	ผลความแตกต่างความร้อนในรูปของสัญญาณไฟฟ้าเป็นไมโครโวลต์ (μV) ที่อุณหภูมิเริ่มต้นต่างๆ	22
7	ค่า CPT, I_p , I_u และ heating rate	23
8	ผลค่าเฉลี่ยในการวิเคราะห์หองค์ประกอบของถ่านหินตัวอย่างที่ขนาดอนุภาคต่างๆ	25
9	กลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนของถ่านหินตัวอย่างที่ไม่ได้ทำให้แห้ง	26
10	กลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนของถ่านหินตัวอย่างที่ทำให้แห้ง 24 ชั่วโมง	27
11	กลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนของถ่านหินตัวอย่างที่ทำให้แห้ง 48 ชั่วโมง	28
12	ผลค่าเฉลี่ยในการวิเคราะห์หองค์ประกอบของถ่านหิน Askale ที่ขนาดอนุภาคต่างๆ	32
13	กลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนของถ่านหิน Askale ที่ไม่ได้ทำให้แห้ง	35
14	สรุปการวัดค่า CPT ของถ่านหินตัวอย่าง	36
15	ผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบโดยรวม (Proximate Analysis) และคุณสมบัติอื่นๆของถ่านหินตัวอย่าง (ไม่รวมความชื้น)	45
16	ผลการวิเคราะห์ค่าความชื้นและคุณสมบัติอื่นๆของถ่านหิน JORONG ขนาดต่างๆ	45
17	ผลการวิเคราะห์ค่าความชื้นและคุณสมบัติอื่นๆของถ่านหิน ADARO ขนาดต่างๆ	46

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
18	ผลการวิเคราะห์ค่าความชื้นและคุณสมบัติอื่นๆของถ่านหิน PHOENIX ขนาดต่างๆ	47
19	ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหิน (Ultimate Analysis)	49
20	ผลการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร	76
21	ผลการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร	85
22	ผลการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร	94
23	ผลการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร	102
24	สรุปผลการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร	103
25	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวมของถ่านหิน ADARO 266 ที่สัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ค่าต่างๆ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	117
26	ผลการทดลองอุณหภูมิที่ถ่านหิน ADARO 266 สามารถลุกไหม้ได้เอง หลังการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ค่าต่างๆ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	120
27	ข้อมูลผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวมของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างสามารถลุกไหม้ได้เอง	122
28	ข้อมูลผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง สามารถลุกไหม้ได้เอง	123
29	ข้อมูลทางสถิติและสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างสามารถลุกไหม้ได้เอง	123

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก1 ผลการทดลองการปลูกไหม้ได้เองของถ่านหิน Jorong 262 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร	133
ก2 ผลการทดลองการปลูกไหม้ได้เองของถ่านหิน Jorong 262 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร	135
ก3 ผลการทดลองการปลูกไหม้ได้เองของถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร	137
ก4 ผลการทดลองการปลูกไหม้ได้เองของถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร	139
ก5 ผลการทดลองการปลูกไหม้ได้เองของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร	141
ก6 ผลการทดลองการปลูกไหม้ได้เองของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร	143
ก7 ผลการทดลองการปลูกไหม้ได้เองของถ่านหิน Adaro 265 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร	145
ก8 ผลการทดลองการปลูกไหม้ได้เองของถ่านหิน Adaro 265 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร	147
ก9 ผลการทดลองการปลูกไหม้ได้เองของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 80% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	149
ก10 ผลการทดลองการปลูกไหม้ได้เองของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 75% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	151
ก11 ผลการทดลองการปลูกไหม้ได้เองของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 70% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	153

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข1	ข้อมูลผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง	156
ข2	ความสัมพันธ์ของผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ ถ่านหินตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง	157
ข3	ข้อมูลทางสถิติและสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบ ประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง	158
ข4	ข้อมูลผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาด 75-106 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง	159
ข5	ความสัมพันธ์ของผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ ถ่านหินตัวอย่าง ขนาด 75-106 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง	160
ข6	ข้อมูลทางสถิติและสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบ ประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาด 75-106 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง	161
ข7	ข้อมูลผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาด 106-250 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง	162
ข8	ความสัมพันธ์ของผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ ถ่านหินตัวอย่าง ขนาด 106-250 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง	163
ข9	ข้อมูลทางสถิติและสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบ ประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาด 106-250 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง	164
ข10	ข้อมูลผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหิน ตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง	165
ข11	ความสัมพันธ์ของผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ ถ่านหินตัวอย่างขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรสามารถลุกไหม้ได้เอง	166

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข12	ข้อมูลทางสถิติและสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง	167
ข13	ข้อมูลผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหิน ADARO 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่สัมพันธ์ความชื้นสัมพัทธ์ที่ค่าต่างๆ และสามารถลุกไหม้ได้เอง	168
ข14	ความสัมพันธ์ของผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหิน ADARO 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่สัมพันธ์ความชื้นสัมพัทธ์ที่ค่าต่างๆ และสามารถลุกไหม้ได้เอง	169
ข15	ข้อมูลทางสถิติและสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหิน ADARO 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่สัมพันธ์ความชื้นสัมพัทธ์ที่ค่าต่างๆ สามารถลุกไหม้ได้เอง	170
ข16	ข้อมูลผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินและวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับถ่านหินตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร กับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างสามารถลุกไหม้ได้เอง	172
ข17	ความสัมพันธ์ของผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินและวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรสามารถลุกไหม้ได้เอง	173
ข18	ข้อมูลทางสถิติและสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินและผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหิน ตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง	174
ข19	ข้อมูลผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างทั้งหมด สามารถลุกไหม้ได้เอง	175

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข20	ความสัมพันธ์ของผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างทั้งหมด สามารถลุกไหม้ได้เอง	178
ข21	ข้อมูลทางสถิติและสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างทั้งหมด สามารถลุกไหม้ได้เอง	178

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างโมเลกุลจำลองของถ่านหิน	7
2	ตัวอย่าง Thermogram ของ DTA (Chakravorty, 1986)	13
3	ตัวอย่าง Thermogram ของ CPT (Ogunsola, 1992)	14
4	ระบบในการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน	15
5	ค่า CPT ต่อความชื้นของถ่านหิน (A) ถ่านหิน Askale (B) ถ่านหิน Balkaya	30
6	ค่า CPT ต่อความชื้นของถ่านหิน (A) ถ่านหิน Askale coal (B) ถ่านหิน Balkaya (อากาศแห้ง 24 ชั่วโมง)	31
7	ผลกระทบจากอัตราการไหลของก๊าซ	34
8	ระบบในการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน	39
9	ภาชนะบรรจุถ่านหิน (A) เครื่องปฏิกรณ์ (B) สำหรับทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน	39
10	ร้อยละความชื้นของถ่านหินตัวอย่างเปรียบเทียบตามขนาดอนุภาคของถ่านหิน	48
11	อุณหภูมิของอากาศภายในชุดทดลอง (IN_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) ที่ระยะเวลาต่างๆ	50
12	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 50 ml/min	51
13	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 300 ml/min	51
14	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 400 ml/min	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
15	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp)เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลอง(Sur_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 500 ml/min	53
16	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp)เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลอง(Sur_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 600 ml/min	54
17	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp)เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลอง(Sur_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 1000 ml/min	55
18	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp)เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลอง(Sur_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 1200 ml/min	56
19	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp)เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลอง(Sur_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 1400 ml/min	57
20	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp)เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัส(Surf_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 50 ml/min	58
21	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp)เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัส(Surf_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 300 ml/min	59
22	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp)เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัส(Surf_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 400 ml/min	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp)เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัส(Surf_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 500 ml/min	61
24	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp)เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัส(Surf_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 600 ml/min	62
25	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp)เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัส(Surf_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 1000 ml/min	63
26	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp)เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัส(Surf_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 1200 ml/min	64
27	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp)เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัส(Surf_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 1400 ml/min	65
28	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรที่สามารถเกิดการลุกไหม้ได้เองที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ	66
29	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.9 °C	67
30	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 149.9 °C	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
31	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 151.7 °C	69
32	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 156.8 °C	70
33	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 154.8 °C	71
34	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 153.8 °C	72
35	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 154.9 °C	73
36	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 154.9 °C	74
37	อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 154.8 °C	75
38	อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 139.9 °C	77

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
39	อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 141.9 °C	77
40	อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 143.9 °C	78
41	อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 145.9 °C	79
42	อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.8 °C	80
43	อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 146.9 °C	81
44	อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.8 °C	82
45	อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.9 °C	83
46	อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.9 °C	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
47	อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการ ทดลอง (Sur_Temp) 144.9 °C	86
48	อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการ ทดลอง (Sur_Temp) 146.9 °C	86
49	อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการ ทดลอง (Sur_Temp) 147.8 °C	87
50	อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการ ทดลอง (Sur_Temp) 149.9 °C	88
51	อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการ ทดลอง (Sur_Temp) 151.8 °C	89
52	อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการ ทดลอง (Sur_Temp) 150.9 °C	90
53	อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการ ทดลอง (Sur_Temp) 151.9 °C	91
54	อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการ ทดลอง (Sur_Temp) 151.9 °C	92

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
55	อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการ ทดลอง (Sur_Temp) 151.9 °C	93
56	อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการ ทดลอง (Sur_Temp) 154.8 °C	95
57	อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการ ทดลอง (Sur_Temp) 156.8 °C	96
58	อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการ ทดลอง (Sur_Temp) 158.8 °C	97
59	อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการ ทดลอง (Sur_Temp) 157.9 °C	98
60	อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการ ทดลอง (Sur_Temp) 158.8 °C	99
61	อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการ ทดลอง (Sur_Temp) 158.9 °C	100
62	อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการ ทดลอง (Sur_Temp) 158.9 °C	101

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
63	อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)	104
64	อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)	105
65	อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)	106
66	อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)	107
67	อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)	108
68	อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)	109
69	อุณหภูมิของถ่านหิน JORONG 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)	110
70	อุณหภูมิของถ่านหิน JORONG 262 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)	111

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
71	อุณหภูมิของถ่านหิน JORONG 262 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)	112
72	อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)	113
73	อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 265 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)	114
74	อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 265 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)	115
75	อุณหภูมิของถ่านหินที่เกิดการลุกไหม้ได้เอง ของถ่านหินขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ขนาด 75-106 ไมโครเมตรและขนาด 106-250 ไมโครเมตร	116
76	อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 80% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)	118
77	อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 75% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)	119
78	อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 70% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)	120

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 157.9 °C	133
ก2 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 160.0 °C	134
ก3 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 158.8 °C	134
ก4 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 162.7 °C	135
ก5 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 164.9 °C	136
ก6 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 163.8 °C	136
ก7 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.9 °C	137
ก8 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 149.9 °C	138

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก9 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 148.8 °C	138
ก10 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 106-250 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 154.9 °C	139
ก11 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 106-250 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 156.9 °C	140
ก12 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 106-250 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 155.9 °C	140
ก13 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 151.0 °C	141
ก14 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 75-106 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 152.9 °C	142
ก15 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 75-106 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 151.8 °C	142
ก16 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 154.9 °C	143

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก17 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 156.9 °C	144
ก18 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 155.8 °C	144
ก19 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 158.8 °C	145
ก20 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 161.9 °C	146
ก21 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 159.9 °C	146
ก22 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 159.8 °C	147
ก23 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 161.9 °C	148
ก24 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 160.8 °C	148

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก25 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่าน การสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 80% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.8 ⁰ C	149
ก26 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่าน การสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 80% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 149.8 ⁰ C	150
ก27 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่าน การสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 80% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 148.7 ⁰ C	150
ก28 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่าน การสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 75% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 146.8 ⁰ C	151
ก29 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่าน การสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 75% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 148.8 ⁰ C	152
ก30 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่าน การสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 75% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.8 ⁰ C	152

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก31 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่าน การสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 70% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 145.0 ⁰ C	153
ก32 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่าน การสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 70% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.9 ⁰ C	154
ก33 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่าน การสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 70% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 146.8 ⁰ C	154

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

IM	=	Inherent Moisture (ความชื้น)
VM	=	Volatile Matter (สารระเหยได้)
FC	=	Fixed Carbon (คาร์บอนคงตัว)
ml/min	=	มิลลิลิตรต่อนาที
μm	=	ไมโครเมตร, ไมครอน
Cal/g	=	แคลอรี/กรัม
CPT	=	Cross Point Temperature, อุณหภูมิจุดตัด
db%	=	Dry Basis %
g	=	กรัม
$^{\circ}\text{C}/\text{min}$	=	องศาเซลเซียสต่อนาที

ผลของความชื้นที่มีผลต่อการเกิดลุกไหม้ได้เองของถ่านหินซับบิทูมินัส

Effect of Moisture on Spontaneous Combustion of Subbituminous Coal

คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยได้นำถ่านหินมาใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตอย่างแพร่หลาย ทั้งอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ อุตสาหกรรมโรงไฟฟ้า และอื่นๆ ที่ต้องอาศัยความร้อน ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ที่มีประสิทธิภาพในการให้ความร้อนใกล้เคียงกัน ถ่านหินที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตนั้นส่วนใหญ่ต้องถูกลดขนาดโดยวิธีการบดหรือการโม่ให้เป็นผง เพื่อให้ง่ายต่อการติดไฟ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากขึ้น อย่างไรก็ตามการทำให้ถ่านหินมีขนาดเล็กลง ส่งผลต่อการควบคุมถ่านหิน เนื่องจากสามารถทำให้ถ่านหินบางส่วนร่วงไหลจากกระบวนการผลิตระหว่างการลำเลียงผ่านสายพานหรือจากจุดกองเก็บ ซึ่งในกรณีที่ร่วงไหลก็ต้องทำการกำจัดออกจากพื้นที่หน้างาน เพื่อป้องกันการเกิดเพลิงไหม้จากสะเก็ดไฟที่อาจเกิดขึ้นจากงานที่ก่อให้เกิดประกายไฟต่างๆ โดยการใช้น้ำล้าง ซึ่งการใช้น้ำล้างนั้นมีผลทำให้ถ่านหินเปียกและค่าความชื้นสูงขึ้น และสิ่งที่สำคัญคือ หากมีถ่านหินตกค้างในพื้นที่หน้างาน เมื่ออุณหภูมิบรรยากาศในพื้นที่หน้างานสูงขึ้น อาจมีผลทำให้ถ่านหินเกิดการติดไฟได้เอง (Spontaneous combustion)

การที่ถ่านหินที่เปียกน้ำนั้น มีผลให้ปริมาณสารระเหยในถ่านหิน (Volatile mater) เพิ่มขึ้นกว่าปกติ ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องทำการควบคุม เนื่องจากหากจุดกองเก็บถ่านหิน หรือสายพานลำเลียงมีโอกาสที่จะสัมผัสกับน้ำหรือความชื้นแล้วนั้น ย่อมส่งผลต่อการเกิดการลุกติดไฟเองของถ่านหินได้ ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาโอกาสของถ่านหินที่จะติดไฟได้เองหลังจากที่ได้รับความชื้นที่ระดับต่างๆ และอุณหภูมิต่างๆ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถควบคุมการเกิดการลุกติดไฟได้เองของถ่านหินได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปัจจัยเกี่ยวกับความชื้นและขนาดของถ่านหิน ชับบิทูมินัส ที่มีผลต่อการเกิดการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน
2. เพื่อเปรียบเทียบระยะเวลาและอุณหภูมิในการเกิดการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินชับบิทูมินัสที่มีความชื้น

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบว่าปัจจัยเกี่ยวกับความชื้น, ขนาดของถ่านหินชับบิทูมินัสและความชื้นในอากาศที่มีผลต่อการเกิดการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน
2. ทราบคุณสมบัติของถ่านหินที่มีผลต่อการเกิดการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินชับบิทูมินัส

ขอบเขตของการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยเรื่อง ผลของความชื้นที่มีผลต่อการเกิดการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินชับบิทูมินัส มีขอบเขตการศึกษา คือ ถ่านหินที่ใช้ในการวิจัยนั้นเป็นถ่านหินชับบิทูมินัสที่ใช้ในบริษัทที่พีไอ โพลีน จำกัด (มหาชน) โดยมีแหล่งที่มาของถ่านหินจากประเทศอินโดนีเซียและประเทศสาธารณรัฐแอฟริกาใต้ และมีตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิการลุกไหม้และค่าความชื้น

สมมติฐานของการศึกษา

1. ความชื้นมีผลต่อการเกิดการลุกติดไฟได้เองของถ่านหิน โดยถ่านหินที่มีค่าความชื้นสูงมีผลทำให้เกิดการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินที่อุณหภูมิต่ำกว่าถ่านหินที่มีค่าความชื้นต่ำ
2. ขนาดของถ่านหินมีผลต่อการเกิดการลุกติดไฟได้เองของถ่านหิน โดยถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่ามีการเกิดการลุกติดไฟได้เองของถ่านหินที่อุณหภูมิต่ำกว่าถ่านหินที่มีขนาดใหญ่

การตรวจเอกสาร

จากการรวบรวมข้อมูลเอกสารสำรวจที่เกี่ยวข้องกับความชื้นที่มีผลต่อการเกิดลูกไหม้ได้เองของถ่านหินชนิดต่างๆ พบว่าตัวแปรหลักที่มีผลต่อการเกิดลูกไหม้ได้เองของถ่านหินประกอบด้วยชนิดของถ่านหินและปัจจัยอื่นๆ เนื่องจากการลุกไหม้ได้เอง (Spontaneous combustion) ของถ่านหิน ดังรายละเอียดที่น่าเสนอต่อไปนี้

1. ชนิดของถ่านหิน

อารยะ(2534) ถ่านหินมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ คือ คาร์บอนและไฮโดรเจน (สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง) อาจมีแร่ธาตุอื่นๆ เจือปนอยู่บ้างในโครงสร้าง เช่น กำมะถัน ไนโตรเจนและออกซิเจน เป็นต้น นักธรณีวิทยาได้จัดแบ่งถ่านหินโดยคำนึงถึงคุณภาพในการให้พลังงานออกเป็น 5 ชนิด ดังนี้

- พีท (Peat) พีทเป็นถ่านที่อายุน้อยที่สุด ประกอบด้วยซากพืชได้สลายตัวไปแล้วเพียงบางส่วน ซึ่งยังคงปรากฏเห็นสภาพหรือลักษณะของพืชดั้งเดิมหรือเนื้อไม้ไว้ให้เห็นบางส่วน ลักษณะมีรูพรุนคล้ายฟองน้ำ มีปริมาณน้ำและออกซิเจนค่อนข้างสูง ให้ค่าความร้อนได้น้อย แต่เมื่อติดไฟแล้วมีควันมาก

- ลิกไนต์ (Lignite) ถ่านลิกไนต์ เป็นถ่านหินที่มีลักษณะของถ่านที่ชัดเจน เพราะสะสมตัวอยู่นาน 2.5 - 65 ล้านปี มีสีน้ำตาลเข้มจึงมีชื่อเรียกว่า ถ่านหินสีน้ำตาล (brown coal) เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำสุด มีวิวัฒนาการมาจากพีทและยังพบร่องรอยของเนื้อไม้อยู่ มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างสูง(อาจถึง 30 %) ความชื้นสูง(30-70%) ให้ค่าความร้อนต่ำ ถ่านหินประเภทนี้มีโอกาสที่จะเกิดการติดไฟได้เอง (spontaneous combustion) ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะขนส่งเป็นระยะทางไกลๆหรือกองเก็บเป็นเวลานานได้ ซึ่งการตั้งทิ้งไว้ในอากาศนาน ๆ จะแตกกระแหงลุกไหม้ได้ง่ายเมื่อตั้งทิ้งไว้ในอากาศ มีปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ประมาณ 38% มีค่าความร้อนประมาณ 1,500 จนถึง 4,000 แคลอรีต่อกรัม

- ซับบิทูมินัส (Subbituminous) ถ่านหิน ซับบิทูมินัส เป็นถ่านหินที่มีอายุมากกว่าลิกไนต์ จึงมีความแข็งมากกว่า และมีสีดำ มีคุณภาพดีกว่า และมีค่าความร้อนสูงกว่าถ่านลิกไนต์ มีความชื้น

15 – 30 % ถ่านหินชนิดนี้ส่วนมากถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยการนำไปแปรสภาพเป็นเชื้อเพลิงเหลว หรือก๊าซ (liquid and gaseous fuels) และยังคงมีโอกาสที่จะติดไฟได้เองเช่นเดียวกับถิกไนต์

- บิทูมินัส (Bituminous) ถ่านหินบิทูมินัสมีอายุสูงขึ้นไปอีก และค่าความร้อนสูงขึ้น เนื้อถ่านค่อนข้างแน่น ไม่ปรากฏร่องรอยของเนื้อไม้ และแข็งมากขึ้นกว่า ซับบิทูมินัส มีสีดำเป็นมันวาว เยิ้มเกาะตัวเป็นก้อนเมื่อถูกความร้อน (caking) มีค่าต่ำ ให้ควันน้อย แต่ให้ค่าปริมาณความร้อนสูง มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง (69 – 86%) ความชื้นต่ำ ถ่านหินชนิดนี้ นอกจากใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมแล้วยังอาจนำไปผลิตเป็นถ่านโค้กสำหรับใช้ถลุงเหล็ก

- แอนทราไซต์ (Anthracite) ถ่านหินแอนทราไซต์ เป็นถ่านหินที่มีอายุมากที่สุด มีคุณภาพดีที่สุด มีเนื้อแน่นและมีความแข็งมาก สีค่อนข้างดำสนิทมีความวาวมาก ติดไฟยาก มีสารระเหยต่ำ มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งให้ค่าความร้อนสูง และให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ที่ยาวนาน

การจำแนกถ่านหินตามประเภท (rank) ซึ่งเป็นค่าวัดความสมบูรณ์ของการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาที่กลายเป็นถ่านหิน ตามมาตรฐาน ASTM (American Society for the Testing of Materials) ได้เป็น 4 ชั้นใหญ่ๆ คือ ถิกไนต์ ซับบิทูมินัส บิทูมินัส และแอนทราไซต์ เรียงคุณภาพจากต่ำถึงคุณภาพสูง และพิจารณาจากองค์ประกอบที่สำคัญของถ่านหิน คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก ได้แก่ ปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหย ความชื้น เถ้า กำมะถันและค่าความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 1

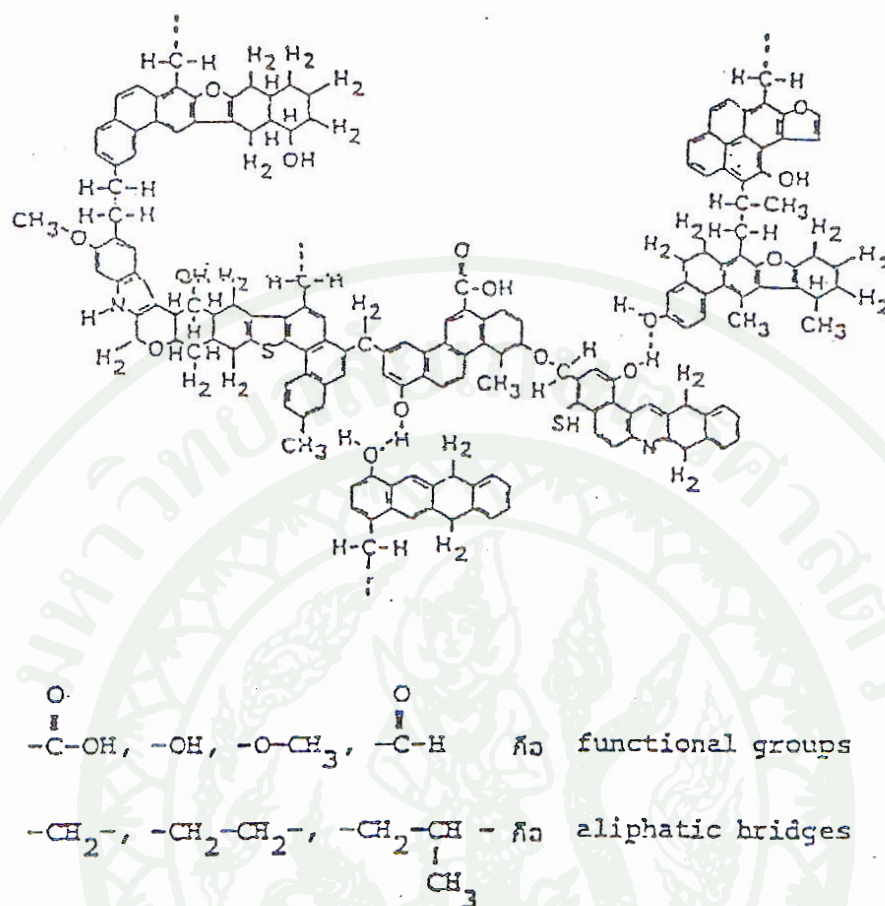
ตารางที่ 1 การจำแนกถ่านหินตามประเภท โดยใช้ ASTM D388

Class/Group		Fix Carbon Limits		Volatile Matter Limits		Gross Calorific Value Limits				Agglomerating Character
		(Dry, Mineral-Matter-Free Basis), %		(Dry, Mineral-Matter-Free Basis), %		Moist, Mineral-Matter-Free Basis)				
		Equal or Greater Than	Less Than	Greater Than	Equal or Less Than	Equal or Greater Than	Less Than	Equal or Greater Than	Less Than	
Anthracitic	Meta-anthracite	98	2	nonagglomerating
	Anthracite	92	98	2	8	...	...	...	...
	Semianthracite	86	92	8	14	...	...	...	...
Bituminous	Low volatile bituminous coal	78	86	14	22	Commonly agglomerating
	Medium volatile bituminous coal	69	78	22	31	...	...	...	...
	High volatile A bituminous coal	...	69	31	...	14,000	...	32.6	...	
	High volatile B bituminous coal	13,000	14,000	30.2	32.6	agglomerating
	High volatile C bituminous coal	...	...	...	...	11,500	13,000	26.7	30.2
Sub bituminous	Subbituminous A coal	10,500	11,500	24.4	26.7	nonagglomerating
	Subbituminous B coal	...	...	...	...	9,500	10,500	22.1	24.4
	Subbituminous C coal	...	...	...	...	8,300	9,500	19.3	22.1
Lignite	Lignite A	6,300	8,300	14.7	19.3	nonagglomerating
	Lignite B	...	...	...	...	...	6,300	...	14.7

ที่มา : ASTM Standard D 388 (1999)

Meyer (1981) คาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุดในโครงสร้างถ่านหิน โดยอยู่ในโครงสร้างของส่วนที่เป็นอินทรีย์ (organic matter) ซึ่งเป็นส่วนที่ให้พลังงานของถ่านหิน นอกจากนี้ส่วนที่เป็นอินทรีย์ยังประกอบด้วยธาตุอื่น ได้แก่ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และ กำมะถัน ซึ่งมีอยู่ในปริมาณที่น้อย สำหรับธาตุอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบอนินทรีย์ซึ่งอยู่กระจัดกระจายทั่วไปในเนื้อถ่านหิน เรียกว่า แร่ธาตุอื่นๆ (mineral matter)

ปริมาณธาตุต่างๆที่มีอยู่ในถ่านหินขึ้นอยู่กับกระบวนการเกิดถ่านหิน (coalification) โดยเริ่มจากซากพืชจนเป็นถ่านหินดังที่กล่าวมาแล้ว พบว่า เมื่อคุณภาพของถ่านหินสูงขึ้น จะมีปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) มากขึ้น เนื่องจากกระบวนการเกิดถ่านหินมีการขจัดไฮโดรเจน ออกซิเจนและไนโตรเจน ออกไปในรูปของก๊าซมีเทน (methane) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับกระบวนการ Pyrolysis จะมีการขจัดไฮโดรเจน และออกซิเจนอย่างสมบูรณ์ แต่คาร์บอนคงตัวยังคงอยู่ ส่วนไนโตรเจนกับกำมะถันเหลืออยู่ในปริมาณน้อยมาก แม้ว่าถ่านหินจะเป็นที่รู้จักและนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเป็นระยะเวลายาวนานแล้ว แต่โครงสร้างทางเคมี หรือสูตรโมเลกุลนั้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด ตามความเข้าใจของนักวิทยาศาสตร์ โครงสร้างทางเคมีของถ่านหินประกอบด้วย โมเลกุลของวงแหวนอะโรมาติก (aromatic ring) และไฮโดรอะโรมาติก (hydroaromatic) เกาะกันเป็นกลุ่มๆ อาจเชื่อมกันด้วยแขนของโมเลกุลอะลิฟาติก (aliphatic) ภายในกลุ่มแต่ละกลุ่มยังมีวงแหวนที่มีอะตอมของธาตุนอกออกซิเจน, กำมะถัน หรือไนโตรเจน ประกอบอยู่กับคาร์บอนรวมทั้งกลุ่มที่ทำหน้าที่เป็นกรด, ด่าง, อีเทอร์ หรือหมู่ที่ทำหน้าที่เฉพาะ (functional group) อื่นๆ ดังโครงสร้างโมเลกุลจำลองแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลจำลองของถ่านหิน

ที่มา: Solomon (1981)

กล่าวโดยสรุปแล้วสามารถแบ่งโครงสร้างโมเลกุลของถ่านหินได้เป็นสองส่วนตามสมบัติทางเคมีที่กล่าวมาแล้วข้างต้น คือส่วนโครงสร้างอินทรีย์ และส่วนที่เป็นแร่ธาตุอื่นๆ

Elliott (1981) โครงสร้างอินทรีย์ของถ่านหิน ประกอบด้วยคาร์บอนประมาณ 90 – 97 ส่วน ไฮโดรเจน 3 – 4 ส่วน ออกซิเจน 1 – 2 ส่วน กำมะถันและไนโตรเจน 1 – 2 ส่วน โดยน้ำหนักเมื่อไม่คิดความชื้น เมื่อคิดเทียบจากอัตราส่วนโดยน้ำหนักอะตอมของธาตุ (atomic ratio) ไฮโดรเจนจะเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของโครงสร้างถ่านหิน ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วนโดยน้ำหนักอะตอมของธาตุในถ่านหินประเภทต่างๆ

เกรดของถ่านหิน	อัตราส่วนโดยน้ำหนักอะตอม				
	C	H	O	N	S
แอนทราไซต์	100	50	2 - 5	1 - 2	½ - 1
บิทูมินัส	100	70	4 - 8	1 - 2	½ - 1
ซับบิทูมินัส	100	80	10 - 20	1 - 2	½ - 1
ลิกไนต์	100	80	20 - 25	1 - 2	½ - 1

ที่มา: Elliot (1981)

จะเห็นได้ว่าเมื่อเกรดของถ่านหินสูงขึ้น อัตราส่วนโดยน้ำหนักอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอนและออกซิเจนต่อคาร์บอนจะลดลงโดยลำดับ

Elliott (1981) แร่ธาตุอื่นๆที่พบบ่อยที่สุดในถ่านหิน คือ ซิลิกอน นอกจากนี้ในถ่านหินยังประกอบด้วยธาตุอื่นๆ ได้แก่ อลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียมและโปแตสเซียม เป็นต้น ธาตุต่างๆ เหล่านี้สามารถรวมตัวกับอะตอมของธาตุอื่นเกิดเป็นสารประกอบ ซึ่งสามารถจัดแบ่งเป็น 5 กลุ่ม ได้แก่

- กลุ่มอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicates) เป็นดินเหนียว (clay) จัดเป็นกลุ่มแร่ธาตุที่มีมากที่สุดในถ่านหิน ได้แก่ เคโอลิน (kaolinite) และอิลไลต์ (illite) เป็นต้น
- กลุ่มซัลไฟด์ (Sulfide) ได้แก่ ไพไรต์ (pyrite) มาร์คาร์ไซต์ (marcasite)
- กลุ่มคาร์บอเนต (Carbonates) ได้แก่ โดโลไมต์ (dolomite) แคลไซต์ (calcite) และแอนเกอร์ไรต์ (Ankerite) เป็นต้น
- กลุ่มซัลเฟต (Sulfate) เป็นแร่ธาตุที่พบหลังจากเกิดการออกซิไดซ์ (Oxidized) ของไพไรต์
- กลุ่มซิลิกา (Silica) ได้แก่ ควอตซ์ (quartz) เป็นต้น

2. การลุกไหม้ไฟตัวเอง (Spontaneous combustion)

Quintiere (1998) การลุกไหม้ไฟตัวเองเป็นกระบวนการลุกไหม้ที่เชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศอย่างช้าๆ เมื่อสัมผัสกับอากาศ ปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างช้าๆ ส่งผลให้ไม่สามารถสังเกตเห็นกระบวนการลุกไหม้ได้ พลังงานที่ปลดปล่อยจากปฏิกิริยาเคมีนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถของเชื้อเพลิงเองในการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาให้กับอากาศรอบๆ เชื้อเพลิงนั้นๆ ซึ่งถ้าความสามารถในการคายความร้อนมีน้อย จะแสดงถึงความร้อนสะสมอยู่ในตัวเชื้อเพลิงมากจนถึงจุดหนึ่งที่เรียกว่า Thermal runaway

2.1 การลุกไหม้ไฟตัวเองของถ่านหิน (Spontaneous combustion of coal)

จากการนำถ่านหินมาใช้แทนเชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก ทำให้มีการศึกษาการใช้งานถ่านหินให้คุ้มค่าและได้รับประโยชน์มากที่สุด ถ่านหินที่นำมาใช้งานมักต้องมีการเก็บรักษาและขนส่งไปยังผู้ใช้งาน และพบว่ามักประสบปัญหาจากการลุกไหม้ไฟตัวเองของถ่านหิน จึงทำให้มีการศึกษาถึงสาเหตุและปัญหาการลุกไหม้ของไฟ เพื่อลดการสูญเสียทรัพยากรโดยเปล่าประโยชน์ และป้องกันภัยอันตรายที่อาจส่งผลต่อชีวิตและทรัพย์สิน เนื่องมาจากการลุกไหม้ไฟตัวเองของถ่านหิน

2.2 ความหมายของการลุกไหม้ไฟตัวเองของถ่านหิน

ถ่านหินสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เองที่อุณหภูมิปกติ และเกิดการคายความร้อนขึ้น หากความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันไม่มีการกระจายออกไปสู่บรรยากาศ หรือมีการกระจายได้น้อย จะทำให้ถ่านหินมีอุณหภูมิสูงขึ้น และจะเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้เกิดขึ้นมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเมื่อถ่านหินมีความร้อนสะสมมากจนถึงจุดที่ถ่านหินเกิดการลุกไหม้ขึ้นได้เอง จะเกิดสถานะที่เรียกว่า spontaneous combustion

สำหรับการเกิด spontaneous combustion มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องอีกหลายปัจจัย ได้แก่ การถ่ายโอนความร้อน อัตราการเกิดปฏิกิริยา ทฤษฎีการเกิด spontaneous ignition เป็นต้น

3. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการเกิดลูกใหม่ได้เองของถ่านหิน

Kim (1977) การลูกใหม่ได้เองของถ่านหินขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

- อัตราการไหลของอากาศ อัตราการไหลของอากาศเป็นสาเหตุหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากอากาศประกอบด้วยออกซิเจน 21 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ ในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของถ่านหินและเกิดความร้อนแผ่กระจายขึ้น การให้อัตราการไหลของอากาศในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้มีปริมาณออกซิเจนมาก แต่ทว่าการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นก็มากขึ้น ทำให้การสะสมความร้อนของถ่านหินกลับน้อยลง ในทางกลับกัน หากให้อัตราการไหลของอากาศต่ำและออกซิเจนที่ได้แม้ไม่มีมากเกินไป แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นยังคงสะสมในถ่านหิน ดังนั้นการควบคุมการระบายอากาศระหว่างการเก็บรักษาจึงมีความจำเป็น ซึ่งทำได้โดยการกองถ่านหินให้ไม่สูงมากนัก หรือมีช่องทางการระบายออกของก๊าซ เป็นต้น

- ขนาดอนุภาคของถ่านหิน ขนาดอนุภาคจะแปรผกผันกับการเกิดการลูกใหม่ได้เองของถ่านหิน ถ่านหินที่มีขนาดอนุภาคเล็ก มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูง ส่งผลให้มีแนวโน้มของการลูกใหม่ได้เองสูงขึ้นไปด้วย จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ พบว่าถ่านหินที่มีอนุภาคขนาดเล็ก จะใช้ระยะเวลาในการเกิดการลูกใหม่ได้เองต่ำกว่าถ่านหินอนุภาคขนาดใหญ่ สำหรับในเหมืองพบว่า พื้นที่ที่มีการแตกหักของถ่านหินจะมีอันตรายจากการลูกใหม่ได้เองของถ่านหินสูง ตารางที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนที่สูญเสียไป (Loss of calorific value) กับขนาดของถ่านหินชนิด Forest of Dean พบว่า ค่าความร้อนที่สูญเสียไปจะแปรผกผันกับขนาดของอนุภาคของถ่านหิน

- เกรดของถ่านหิน ความสัมพันธ์ระหว่างเกรดของถ่านหินกับแนวโน้มการเกิดการลูกใหม่ได้เองของถ่านหินไม่สามารถระบุได้ชัดเจน แต่โดยทั่วไปพบว่าถ้าเปรียบเทียบระหว่างถ่านหินที่มีเกรดสูง(ถ่านหินบิทูมินัส)กับถ่านหินที่มีเกรดต่ำ(ถ่านหินลิกไนต์) พบว่าถ่านหินที่มีเกรดต่ำอย่างลิกไนต์จะมีความว่องไวในการลูกใหม่ได้เองสูงกว่าถ่านหินที่มีเกรดสูงอย่างถ่านหินบิทูมินัส แต่กรณีที่ถ่านหินมีเกรดใกล้เคียงกันจะไม่สามารถแบ่งแยกความสัมพันธ์ในการลูกติดใหม่ได้เองได้อย่างชัดเจน

- อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในถ่านหินเป็นฟังก์ชันโดยตรงกับอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

- ปริมาณไฟไรต์ และมาร์คาร์ไชต์ จะเป็นสาเหตุที่ทำให้ถ่านหินแตกออกเป็นเม็ดเล็กลง ซึ่งจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ถ้าไฟไรต์แตกละเอียดและสามารถ

เปลี่ยนไปเป็น Ferrous sulfate อย่างรวดเร็วก็จะยิ่งเพิ่มความว่องไวในการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินมากขึ้น

- ลักษณะทางธรณีวิทยา ลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นถ่านหินเป็นปัจจัยที่ยากต่อการควบคุมซึ่งขึ้นกับลักษณะของชั้น coal seam ถ้าชั้นของถ่านหินหนาเป็น multiple coal seam อัตราการเสี่ยงต่อการลุกไหม้ได้เองจะสูง โดยเฉพาะในเขตที่อากาศผ่านเข้าไปในเนื้อถ่านหินได้

- การปฏิบัติในเหมือง มีด้วยกันหลายสาเหตุที่จะทำให้เกิดการลุกไหม้ได้เอง เช่น ลักษณะการกองเก็บถ่านหิน, เงื่อนไขการจัดการในเหมือง, อากาศรอบรอยแยกของกองถ่านหินและวิธีการทำเหมือง เป็นต้น

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับค่าความร้อนที่สูญเสียไป

Size of coal (in.)	Loss of calorific value (%)	
	1 year	2 years
2-3	0.11	0.24
0.5 – 0.125	0.50	1.00
0.0125 – 0.0084	1.00	2.10
0.0025 - 0	1.80	3.00

ที่มา: Kim (1977)

คุณสมบัติของถ่านหินที่มีผลต่อการเกิดการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินที่สำคัญ ได้แก่ ปริมาณความชื้นของถ่านหิน ซึ่งพบว่าถ่านหินที่มีความชื้นมากจะมีแนวโน้มในการเกิดการลุกไหม้ได้เองสูง เนื่องจากเมื่อความชื้นในถ่านหินระเหยไปจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของถ่านหินซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่คายความร้อนออกมา

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า การเกิดความร้อนขึ้นอยู่กัเหตุผลหลักสองประการ คือ คุณสมบัติเฉพาะตัวของถ่านหิน และสภาพแวดล้อมภายนอก และนอกจากนี้พบว่าวิธีการทำเหมืองถ่านหินมีอิทธิพลต่อการเกิดความร้อนขึ้นได้เองมากกว่า สภาพการเก็บที่ทำให้เกิดการสะสมความร้อน โดยการเกิดความร้อนขึ้นได้เองสามารถเกิดขึ้นได้กับถ่านหินทุกชนิด และมีตัวอย่างหลายกรณีที่เกิดกับถ่านหินที่มีความชื้นต่ำรวมทั้งปริมาณไพไรต์และสารระเหย (volatile

matter) ต่ำ ซึ่งถ่านหินกลุ่มนี้ปกติแล้วมีความปลอดภัยในการลุกติดไฟสูง ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าวิธีการเก็บและการทำเหมืองจึงมีความสำคัญและมีอิทธิพลต่อการเกิดการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน

4. วิธีการพิจารณาแนวโน้มในการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน

นักวิจัยหลายท่านได้นำเสนอวิธีการทดสอบเพื่อที่จะอธิบายให้เห็นคุณสมบัติของถ่านหินที่ส่งผลต่อความว่องไวในการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน ดังนั้นการทดลองจึงถูกออกแบบมาให้ดำเนินการที่สภาวะอุณหภูมิต่ำที่สุดซึ่งปฏิกิริยาคายความร้อนสามารถเกิดได้เอง และวิเคราะห์ผลการทดลองได้ วิธีในห้องทดลองที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้ในการวิเคราะห์ที่นิยมใช้กันมาก คือ

- 1) การวิเคราะห์อุณหภูมิเริ่มต้น (Determination of initial temperature)
- 2) การวิเคราะห์ผลต่างความร้อน (Differential thermal analysis)
- 3) การหาอุณหภูมิจุดตัด (Crossing point temperature)
- 4) วิธีการดูดซึมออกซิเจน (Oxygen absorption method)
- 5) วิธีออกซิเดชันแบบเปียก (Wet oxidation method)

วิธีทั้ง 5 วิธีนี้สามารถทำนายการเกิดความร้อนขึ้นได้เองของถ่านหินได้อย่างถูกต้องเมื่อสามารถเลียนแบบสภาวะการทดลองได้ใกล้เคียงสภาพแวดล้อมในการทำเหมืองและการกองเก็บรายละเอียดของแต่ละวิธี มีดังนี้

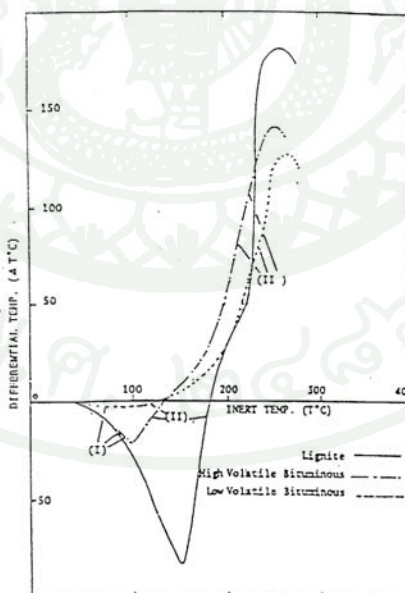
- 1) การวิเคราะห์อุณหภูมิเริ่มต้น (Determination of initial temperature)

วิเคราะห์โดยเก็บถ่านหินตัวอย่างไว้ในตู้อบที่ตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นและให้อุณหภูมิคงที่ วิธีการจากนั้นสังเกตการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และเมื่อเวลาผ่านไปอาจทำให้ติดไฟขึ้น เนื่องจากเกิดการลุกไหม้ได้เอง สำหรับถ่านหินแต่ละชนิดที่ใช้ทดลองจะใช้อุณหภูมิเริ่มต้นต่างกันในการทดลองหลายๆครั้ง ทั้งนี้เพื่อหาอุณหภูมิต่ำสุดที่สามารถเร่งให้เกิดการลุกไหม้ขึ้นเองและทำให้อุณหภูมิถ่านหินสูงขึ้น อุณหภูมิต่ำสุดนี้เรียกว่า อุณหภูมิเริ่มต้น (Initial temperature) คาดว่าถ่านหินที่มีความว่องไวในการลุกไหม้ได้เองจะมีอุณหภูมิเริ่มต้นต่ำ ส่วนถ่านหินที่ไม่ว่องไวต่อการลุกไหม้ได้เองจะ

มีอุณหภูมิเริ่มต้นสูง โดยทั่วไปการทดลองวิธีนี้ใช้เวลานานจึงไม่ค่อยนิยมใช้มากนัก Chakravorty and Kar (1986)

2) การวิเคราะห์ผลต่างความร้อน (Differential thermal analysis)

วิธีนี้ทำโดยการให้ความร้อนกับถ่านหินตัวอย่างด้วยอัตราคงที่โดยใช้ Differential thermal analyzer (DTA) ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ และบันทึกผลต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวอย่างกับวัสดุเฉื่อยที่ใช้อ้างอิงอย่างต่อเนื่อง โดยทำการทดลองในตุ๊กกลางเฉื่อย เทอร์โมแกรมที่ได้เรียกว่า DTA thermogram เป็นกราฟระหว่างอุณหภูมิ(T) กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง(ΔT) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุที่ใช้ทดลองแต่ละชนิด DTA Thermogram จะมีการเปลี่ยนแปลง 2 ขั้นตอนเมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่างถึง 300 °C คือช่วงแรกของการให้ความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อนเนื่องจากเกิดการปล่อยความชื้นออกจากถ่านหิน ต่อมาเกิดการคายความร้อนในปริมาณที่สูงมาก เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ถ้าขั้นที่ 2 เกิดขึ้นได้เร็ว แสดงว่าถ่านหินเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนได้ที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นการแบ่งแยกถ่านหินโดยวิธี DTA นี้สามารถทำได้โดยพิจารณาในขั้นตอนที่ 2 ของ DTA Thermogram โดยตัวอย่างของ Thermogram แสดงดังภาพที่ 2

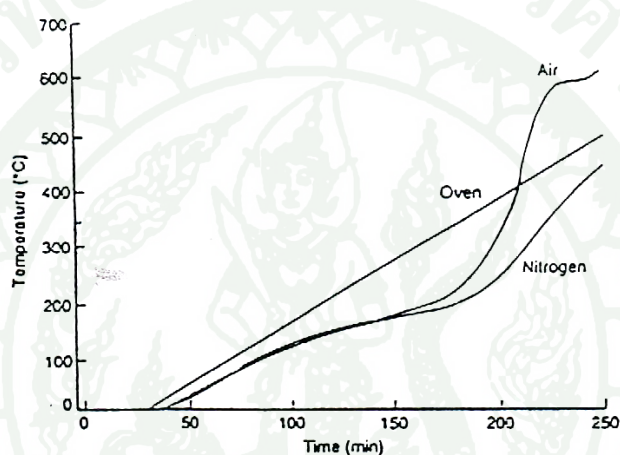


ภาพที่ 2 ตัวอย่าง Thermogram ของ DTA

ที่มา: Chakravorty (1986)

3) การหาอุณหภูมิจุดตัด (Crossing point temperature)

วิธีนี้ให้ความร้อนกับถ่านหินตัวอย่างและตู้อบ(Oven) ในอัตราคงที่และวัดอุณหภูมิแตกต่างระหว่างถ่านหินกับตู้อบ โดยขณะเริ่มต้นอุณหภูมิถ่านหินน้อยกว่าตู้อบ เมื่อถ่านหินเริ่มคายความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน อุณหภูมิของถ่านหินจะเพิ่มขึ้นเท่ากับอุณหภูมิของตู้อบและความร้อนที่เกิดขึ้นในถ่านหินมากขึ้น จนกระทั่งทำให้อุณหภูมิของถ่านหินมากกว่าอุณหภูมิของตู้อบ ดังแสดงตัวอย่าง Thermogram ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในภาพที่ 3

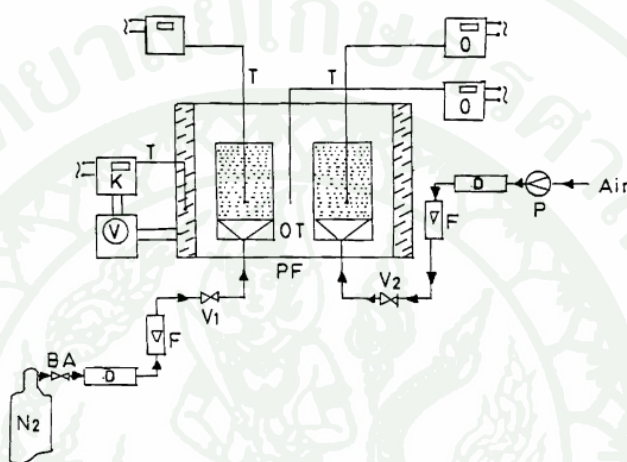


ภาพที่ 3 ตัวอย่าง Thermogram ของ CPT

ที่มา: Ogunsola (1992)

จากภาพที่ 3 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตู้อบ (Oven-curve), อุณหภูมิของถ่านหินในปฏิกรณ์ที่ผ่านอากาศเข้าไป (Air-curve) และอุณหภูมิของถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ที่ผ่านก๊าซไนโตรเจนเข้าไป (Nitrogen-curve) ซึ่งพบว่า Nitrogen-curve ไม่ตัดกับ Oven-curve เลย ส่วน Air-curve ตัดกับ Oven-curve ซึ่งจุดที่ตัดนี้เรียกว่า Crossing point temperature (CPT) และมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส จากค่า CPT ที่ได้สามารถนำไปหาค่าดัชนีที่เป็นตัวบอกระดับแนวโน้มในการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน หรือเรียกว่า Liability Index การที่ Air-curve ตัด Oven-curve นี้ เนื่องจากถ่านหินได้รับออกซิเจนจากอากาศเข้าไปออกซิไดซ์ทำให้เกิดความร้อนขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิถ่านหินสูงขึ้นและในที่สุดจะสูงกว่าอุณหภูมิของตู้อบ

ชุดทดลองแบบนี้ประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์สองตัวซึ่งภายในบรรจุถ่านหินตัวอย่างวางในตู้อบที่กำหนดอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิได้ และผ่านอากาศเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ตัวที่หนึ่ง ส่วนตัวที่สองผ่านก๊าซไนโตรเจนเข้าไปด้วยอัตราเร็วของอากาศและก๊าซไนโตรเจนเท่ากันและคงที่ ติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิ(Thermocouple) 3 จุด คือ อุณหภูมิของตู้อบ, อุณหภูมิผนังเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุถ่านหิน และอุณหภูมิของถ่านหินดังแสดงใน ภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ระบบในการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน, Kadioğlu and Varamaz (2003)

PF: Programmable oven; OT: reactor; P: pump; D: drier; T: thermocouple; K: control system; V: valve; O: recorder; F: flow meter

ที่มา: Kadioğlu and Varamaz (2003)

Liability Index แบ่งออกเป็นสองแบบ คือ Liability Index (I_t) และ Liability Index (I_a)

A) Liability Index (I_t) หาจากอัตราส่วนของ CPT กับอัตราการให้ความร้อน(Q , มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียสต่อนาที) ระหว่าง 10 นาที ก่อนจุด CPT และ 10 นาที หลังจุด CPT

$$L_t = Q/CPT$$

$$\text{โดยที่ } Q = (T_2 - T_1)/20$$

T_1 = อุณหภูมิของถ่านหินที่เวลา 10 นาที ก่อนจุด CPT

T_2 = อุณหภูมิของถ่านหินที่เวลา 10 นาที หลังจุด CPT

B) Liability Index (I_L) คือค่าความแตกต่างของพื้นที่ใต้กราฟระหว่าง Air-curve กับ Nitrogen-curve ที่ 10 นาทีก่อนจุด CPT และ 10 นาทีหลังจุด CPT

ค่า I_L และ I_u เป็นตัวบอกแนวโน้มในการเกิดการลุกลามได้เองของถ่านหิน โดยพิจารณา ถ้าค่า I_L สูงแสดงว่าถ่านหินมีความว่องไวในการลุกลามได้เองสูงและถ้าค่า I_L ลดลงถ่านหินจะมีแนวโน้มในการเกิดการลุกลามได้เองลดลง ส่วนค่า I_u นั้นพิจารณาเช่นเดียวกัน คือถ้าค่า I_u สูงแสดงว่าถ่านหินมีความว่องไวในการเกิดการลุกลามได้เองสูงและถ้าค่า I_u ลดลงถ่านหินจะมีแนวโน้มในการเกิดการลุกลามได้เองลดลง

ได้มีการใช้เทคนิคในการทดลองหลายๆ อย่างรวมทั้งการออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองหลายชนิดเพื่อใช้วิเคราะห์จุด CPT ซึ่งพบว่าค่า CPT สำหรับถ่านหินตัวอย่างที่ได้ขึ้นขึ้นกับขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลองด้วย

4) วิธีการดูดซึมออกซิเจน(Oxygen absorption method)

วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายซึ่งพัฒนามาใช้ในห้องทดลอง ทดลองโดยเก็บถ่านหินใส่ถังปฏิกรณ์ระบบปิดสภาวะการทดลองที่ความดันปกติและอุณหภูมิคงที่ บรรจุก๊าซที่ทราบองค์ประกอบเริ่มต้นเข้าไป ซึ่งประกอบด้วยก๊าซออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่และที่เหลือเป็นก๊าซไนโตรเจน ทั้งระยะเวลาในการทดลองไว้ให้เกิดปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์ แล้วทำการวิเคราะห์ก๊าซที่อยู่เหนือถ่านหินตามระยะเวลาที่กำหนด โดยวิเคราะห์หาก๊าซออกซิเจน, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซมีเทน ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซ จากนั้นทำการแปลผลในรูปของ CO index หรืออัตราการดูดซึมออกซิเจนของถ่านหินโดยที่ CO index คืออัตราส่วนของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กับออกซิเจนที่ใช้ไป

ค่า CO index เป็นตัวบอกถึงแนวโน้มในการเกิดการลุกลามได้เองของถ่านหิน (Kuchta, Rowe and Burgess, 1980) ถ้าค่า CO index สูงแสดงว่าแนวโน้มการลุกลามได้เองสูง ถ้าค่า CO index ลดลงแนวโน้มในการลุกลามได้เองจะลดลงด้วย ส่วนการพิจารณาอัตราการดูดซึมออกซิเจนของถ่านหินนั้นพบว่า ถ่าถ่านหินมีอัตราการดูดซึมออกซิเจนสูงถ่านหินจะมีแนวโน้มในการเกิดการลุกลามได้เองสูง ในทางตรงกันข้ามถ่าถ่านหินมีอัตราการดูดซึมออกซิเจนต่ำถ่านหินจะมีแนวโน้มใน

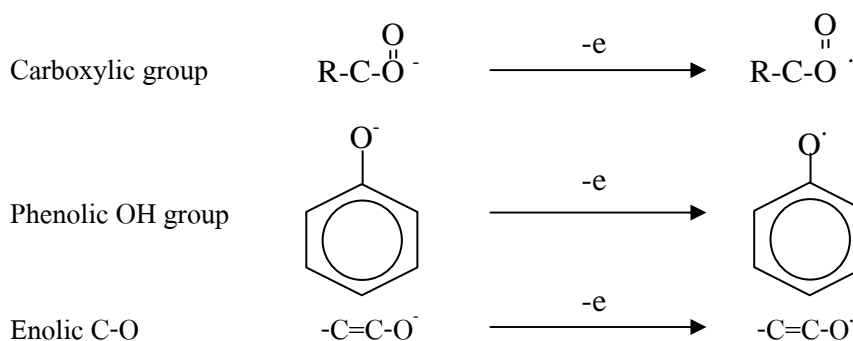
การเกิดการลุกไหม้ได้เองต่ำ โดยทั่วไปจะใช้อัตราการดูดซึ่มออกซิเจนของถ่านหินในการพิจารณาหาแนวโน้มในการเกิดการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินมากกว่าการใช้ค่า CO index

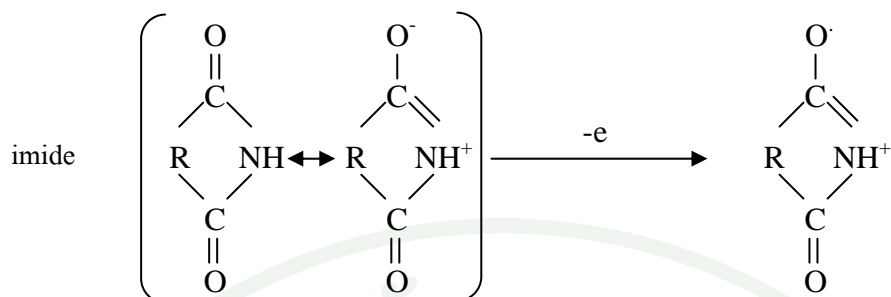
จากการศึกษาถ่านหินชนิด British Coal (Chakravorty and Kar, 1986) ด้วยวิธีการนี้พบว่า ถ่านหินที่ไม่ว่องไวต่อการเกิดการลุกไหม้ได้เองจะดูดซึ่มออกซิเจนน้อยกว่า 200 มิลลิลิตรต่อ 100 กรัมของถ่านหินในเวลา 96 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แต่ถ่านหินที่ไวต่อการเกิดการลุกไหม้ได้เองจะดูดซึ่มออกซิเจนมากกว่า 300 มิลลิลิตรในช่วงเวลาและอุณหภูมิเดียวกัน วิธีนี้ถูกปรับปรุงเพื่อให้การทดสอบดำเนินต่อไปได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นคือในช่วง 40 – 60 องศาเซลเซียส และใช้แปรผลการทดลองโดยดูจากการดูดซึ่มออกซิเจนและก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่างๆ วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถใช้งานได้ดีและมีประโยชน์ในการวิเคราะห์ความว่องไวในการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน

5) วิธีออกซิเดชันแบบเปียก (Wet oxidation method)

วิธีการออกซิเดชันแบบเปียกนี้ เป็นวิธีการทางเคมีวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการที่ว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นกับถ่านหินตัวอย่าง ถูกวัดออกมาในรูปการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ที่มีอิเล็กโทรดชนิดคาโทดล้อมตัวกับอิเล็กโทรดชนิดคาร์บอนจุ่มในการของผสมระหว่างถ่านหินตัวอย่างกับสารละลายอ็อกคาไลน์เปอร์แมงกานेट (coal-oxidant mixture) โดยสารละลายอ็อกคาไลน์เปอร์แมงกานेटทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างหมู่ฟังก์ชันซึ่งได้แก่ กลุ่ม carboxylic (-COOH), phenolic (-OH), enolic (C-O), imide (=NH) ซึ่งเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของถ่านหินที่ทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถเขียนในรูปครึ่งปฏิกิริยา (Half-reaction) ได้ดังนี้

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน(Oxidation reaction)





ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction)



แนวโน้มในการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินสามารถพิจารณาได้จากการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เนื่องจากกลุ่มฟังก์ชันต่างๆ ในถ่านหินแสดงถึงปริมาณออกซิเจนในถ่านหินซึ่งจากการศึกษาของ Ogunsols (1992) พบว่า ถ้าวถ่านหินมีความเข้มข้นของออกซิเจนมาก จะมีแนวโน้มในการลุกไหม้ได้เองสูงกว่าถ่านหินที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำ ดังนั้นถ่านหินที่มีกลุ่มฟังก์ชันมากจะเกิดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าในทางที่ลดลงเร็วกว่า เนื่องจากมีกลุ่มฟังก์ชันที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ได้มากกว่า จึงสรุปได้ว่าถ่านหินที่มีแนวโน้มในการเกิดการลุกไหม้ได้เองสูงจะมีการลดลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าได้เร็วกว่าถ่านหินที่มีแนวโน้มในการลุกไหม้ได้เองต่ำ

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kuchta *et al.* (1980) ได้ศึกษาแนวโน้มการเกิดการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินประเทศสหรัฐอเมริกา 29 ชนิด โดยวิธีการดูดซับออกซิเจน ซึ่งที่อุณหภูมิห้องถ่านหินจะปล่อยก๊าซต่างๆ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้นจึงต้องเก็บตัวอย่างในบรรยากาศที่มีไนโตรเจนจนกว่าจะนำถ่านหินมาใส่หลอด ในการเตรียมตัวอย่างนำถ่านหินที่ผ่านการบดและคัดแยกขนาดให้มีขนาด 850 – 2,000 ไมโครเมตร ประมาณ 50 กรัม ใส่ในภาชนะทรงกระบอกระบบปิดขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วผ่านก๊าซที่ทราบองค์ประกอบลงไป หลังจากนั้น 7 วันทำการเก็บตัวอย่างก๊าซด้วย hypodermic syringe เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซ CO, CO₂ และ CH₄ ที่ปล่อยออกมา และ O₂ ที่เหลือโดยใช้ Gas chromatography แล้วคำนวณผลออกมาในรูปของ CO index จากผลการทดลองพบว่า ถ่านหิน

เกรดต่ำ มีการปล่อยก๊าซ CO และมีการดูดซึม O_2 มากกว่าถ่านหินเกรดสูง โดยถ่านหินลิกไนต์ และชั้นบิทูมินัสมีการปล่อยก๊าซ CO และมีการดูดซึม O_2 ใกล้เคียงกัน แต่สรุปได้ว่าถ่านหินบิทูมินัสมีค่า CO index น้อยกว่าถ่านหินลิกไนต์และชั้นบิทูมินัส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ่านหินบิทูมินัส เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบออกซิเดชันน้อยกว่า

Ratanasthien (1984) ศึกษาการติดไฟเองของถ่านหินลิกไนต์ในภาคเหนือบริเวณหน้าเหมืองและในกองถ่าน พบว่าการติดไฟบริเวณหน้าเหมืองสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจาก โครงสร้างทางธรณีวิทยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่มีรอยแยก (fault zones) ซึ่งรอยแยกนี้เป็นทางให้อากาศผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับถ่านหินชั้นใน ความร้อนจากปฏิกิริยานี้ทำให้อุณหภูมิของถ่านหินสูงขึ้นและเมื่อความร้อนสะสมถึงจุดจุดหนึ่งถ่านหินจะเกิดการติดไฟขึ้น การติดไฟในกองถ่านหินจากการสะสมความร้อนจนอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดที่ถ่านหินสามารถติดไฟได้ ทำการทดลองโดยนำตัวอย่างถ่านหินขนาดต่ำกว่า 10 มิลลิเมตร บรรจุในถุงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 25x40 เซนติเมตร ใช้หลอดไฟขนาด 500 วัตต์เป็นตัวส่องให้ความร้อน โดยให้ระยะห่างระหว่างหลอดไฟกับถ่านหินเท่ากับ 30 เซนติเมตร บันทึกอุณหภูมิที่ผิวกองถ่านและในกองถ่านหินที่ความลึก 3 เซนติเมตร ผลการทดลองได้อุณหภูมิวิกฤติที่ถ่านหินเกิดติดไฟ ดังนี้ ถ่านหินลิกไนต์จากแหล่งแม่เกาะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 130 – 140 องศาเซลเซียส แหล่งปากา 150 – 172 องศาเซลเซียส แหล่งบ้านปู่ 166 – 170 องศาเซลเซียส แหล่งแม่ตึบ 245 – 250 องศาเซลเซียส แหล่งแม่ทูนและแหล่งแม่ระมัด 250 – 255 องศาเซลเซียส

Tarafdar and Guha (1989) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบเปียกของถ่านหิน โดยใช้สารละลายอัลคาไลน์เปอร์แมงกาเนต (alkaline permanganate solution) และแบ่งการทดลองออกเป็นสองชุดคือ ชุดที่หนึ่งทำการทดลองหาค่า Cross Point Temperature (CPT) และ ชุดที่สองทำการหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และอุณหภูมิสูงสุด โดยเลือกใช้ถ่านหินมีขนาดอนุภาค 212 ไมโครเมตร จำนวน 4 ตัวอย่าง คือ ตัวอย่าง No. 1, 2 และ 7 มีความไวในการเกิดการลุกไหม้ได้เองต่ำมีค่า CPT อยู่ระหว่าง 162 – 168 องศาเซลเซียส เซลเซียส เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพ คือ ค่าความชื้นของถ่านหินต่ำกว่า 5 % และปริมาณสารระเหยของถ่านหินต่ำกว่า 30 % ส่วนอีก 3 ตัวอย่างคือ ตัวอย่าง No. 3, 4, 5 และ 6 มีความไวในการเกิดการลุกไหม้ได้เองสูงมีค่า CPT อยู่ระหว่าง 132 – 137 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพ คือ ค่าความชื้นของถ่านหินสูงกว่า 5 % และปริมาณสารระเหยของถ่านหินสูงกว่า 30 % ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ถ่านหินในการศึกษาออกซิเดชันแบบเปียก Tarafdar and Guha (1989)

Sample No.	Proximate analysis (%)				VM(%daf)	CPT(°C)
	Moisture	Ash	VM	FC		
1	1.5	17.5	28	53	34.6	164
2	1.0	16.0	29	54	35.0	168
3	5.6	10.5	33	50.9	40.0	137
4	6.5	10.4	40	43.1	48.2	135
5	7.0	9.0	37	48	43.6	132
6	7.6	17	39	36.4	51.8	133
7	2.5	15	28	54.5	34.0	162

ที่มา: Tarafder and Guha (1989)

ตารางที่ 5 ผลการทดลองหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และอุณหภูมิสูงสุด

Sample No.	EMF before coal added(mV)	EMF after coal treated (after 10 min, mV)	ΔE (difference) (mV)	Area under peak	Peak temp. (°C)
1	344	327	17	62	55
2	357	346	11	79	57
3	342	173	169	46	38
4	340	160	180	48	38
5	352	190	162	67	43
6	342	177	165	56	38
7	354	340	14	60	56

ที่มา: Tarafder and Guha (1989)

จากผลการทดลองตารางที่ 5 พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกับความร้อนที่ปล่อยออกมา จากปฏิกิริยาคายความร้อน สามารถแบ่งผลการทดลองออกเป็นสองกลุ่มตามค่า CPT, ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า และอุณหภูมิสูงสุดของกราฟ (Peak temperature) ได้แก่

กลุ่มที่ 1 ถ่านหิน No. 1, 2 และ 7 ซึ่งมีความไวในการเกิดการลุกไหม้ได้เองสูงพบว่ามีค่า CPT อยู่ระหว่าง $162 - 168^{\circ}\text{C}$, ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าอยู่ระหว่าง $11 - 14\text{ mV}$ และความสูงของ กราฟอยู่ระหว่าง $55 - 57^{\circ}\text{C}$

กลุ่มที่ 2 ถ่านหิน No. 3, 4, 5 และ 6 ซึ่งมีความไวในการเกิดการลุกไหม้ได้เองต่ำกว่าพบว่ามี ค่า CPT อยู่ระหว่าง $132 - 137^{\circ}\text{C}$, ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าอยู่ระหว่าง $162 - 180\text{ mV}$ และความสูง ของกราฟอยู่ระหว่าง $38 - 43^{\circ}\text{C}$

Clemens *et al.* (1990) ได้นำเทคนิค Differential thermal analysis (DTA) มาใช้ประกอบใน การพิจารณาหาแนวโน้มน้ำที่จะเกิดการลุกไหม้ได้เอง เพราะความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาคายความร้อน สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ได้ Clemens *et al.* ได้ศึกษาถ่านหินลิกไนต์และซับบิทูมินัสของประเทศ นิวซีแลนด์อย่างละ 2 ตัวอย่าง โดยการเก็บถ่านหินตัวอย่างจากเหมืองไว้ในบรรยากาศในโตรเจน จากนั้นนำมาบดและร่อนให้ได้ขนาด 200 mesh โดยดำเนินการภายใต้บรรยากาศในโตรเจน และ ทดสอบ DTA โดยตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180°C และวัดความแตกต่างความ ร้อนในรูปของสัญญาณไฟฟ้าเป็นไมโครโวลต์(μV) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 6

พบว่าที่อุณหภูมิ 30°C เมื่อพิจารณาจากผลความแตกต่างความร้อนในรูปของ สัญญาณไฟฟ้าเป็นไมโครโวลต์นั้น ถ่านหินทุกชนิดมีแนวโน้มน้ำในการเกิดการลุกไหม้ได้เองน้อย แต่ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น พบว่าผลความแตกต่างความร้อนในรูปของสัญญาณไฟฟ้าเป็นไมโครโวลต์ที่ วัดได้เพิ่มขึ้น ซึ่งผลความแตกต่างความร้อนในรูปของสัญญาณไฟฟ้าเป็นไมโครโวลต์ที่วัดได้นี้เป็น ผลมาจากปฏิกิริยาคายความร้อนนั่นเอง ที่ค่าไมโครโวลต์ต่ำ จะมีแนวโน้มน้ำในการเกิดการลุกไหม้ได้เองต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นไมโครโวลต์จะเพิ่มสูงขึ้นแสดงถึงแนวโน้มน้ำในการเกิดการลุกไหม้ได้เอง สูง

ตารางที่ 6 ผลความแตกต่างความร้อนในรูปของสัญญาณไฟฟ้าเป็นไมโครโวลต์ (μV) ที่อุณหภูมิเริ่มต้นต่างๆ

Sample	ผลความแตกต่างความร้อนในรูปของสัญญาณไฟฟ้าเป็นไมโครโวลต์ (μV)					
	Starting temperature ($^{\circ}C$)					
	30	60	90	120	150	180
Newvale	0.7	1.2	6.0	16	60	335
Kai Point	0.8	1.3	5.0	9.0	52	130
Kopuku	0.8	2.0	3.5	25	55	260
Ohai	0.8	1.4	9.0	15	42	95

ที่มา: Clemens *et al* (1990)

Ogunsola and Mikula (1991) ศึกษาการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินจากประเทศในจีเรีย 4 ชนิด ได้แก่ ถ่านหินลิกไนต์, ถ่านหินซับบิทูมินัส, ถ่านหินบิทูมินัสที่มีสารระเหยสูงชนิดที่ C และชนิดที่ B โดยเก็บวัตถุดิบมาจากเหมืองไว้ในภาชนะที่บรรยากาศเป็นไนโตรเจนเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน จากนั้นทำการบดให้มีขนาด 60 ± 200 mesh และเก็บไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนจนกว่าจะใช้งาน ทำการวิเคราะห์ห่อหุ้มประกอบโดยรวมของถ่านหินและวิเคราะห์ธาตุ, CPT และ Liability index ซึ่งค่า Liability Index แบ่งออกเป็นสองแบบ คือ Liability Index (I_1) และ Liability Index (I_2) ตามรายละเอียด ดังนี้

- Liability Index (I_1) หาจากอัตราส่วนของ CPT กับอัตราการให้ความร้อน (Q , มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียสต่อนาที) ระหว่าง 10 นาที ก่อนจุด CPT และ 10 นาที หลังจุด CPT

$$I_1 = Q/CPT$$

โดยที่ $Q = (T_2 - T_1)/20$

T_1 = อุณหภูมิของถ่านหินที่เวลา 10 นาที ก่อนจุด CPT

T_2 = อุณหภูมิของถ่านหินที่เวลา 10 นาที หลังจุด CPT

- Liability Index (I_2) คือค่าความแตกต่างของพื้นที่ใต้กราฟระหว่าง Air-curve กับ Nitrogen-curve ที่ 10 นาทีก่อนจุด CPT และ 10 นาทีหลังจุด CPT

ค่า I_c และ I_a เป็นตัวบอกแนวโน้มในการเกิดการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน ถ้าค่า I_c สูง แสดงว่าถ่านหินมีความว่องไวในการลุกไหม้ได้เองสูงและถ้าค่า I_c ลดลงถ่านหินจะมีแนวโน้มในการเกิดการลุกไหม้ได้เองลดลง ส่วนค่า I_a นั้นพิจารณาเช่นเดียวกัน คือถ้าค่า I_a สูงแสดงว่าถ่านหินมีความว่องไวในการเกิดการลุกไหม้ได้เองสูงและถ้าค่า I_a ลดลงถ่านหินจะมีแนวโน้มในการเกิดการลุกไหม้ได้เองลดลง

จากผลการทดลองแสดงในตารางที่ 7 สามารถสรุปได้ว่า ในการศึกษาถ่านหินจากประเทศไนจีเรีย เมื่อพิจารณาจากค่า Liability index พบว่าถ่านหินบิทูมินัสที่มีสารระเหยสูงชนิด B มีแนวโน้มการลุกไหม้ได้เองน้อยที่สุดและ ถ่านหินลิกไนต์, ถ่านหินบิทูมินัสที่มีสารระเหยสูงชนิด C และถ่านหินซับบิทูมินัส ตามลำดับ

ตารางที่ 7 ค่า CPT, I_c , I_a และ heating rate

	ถ่านหิน ลิกไนต์	ถ่านหิน ซับบิทูมินัส	ถ่านหินบิทูมินัส ที่มีสารระเหย สูงชนิด C	ถ่านหินบิทูมินัส ที่มีสารระเหยสูง ชนิด B
CPT(°C)	163.5	146.5	145.0	140.0
Liability index (I_c) * 10^{-3}	10.3	15.9	13.8	8.5
Liability index (I_a)	1.1	2.7	1.7	1.2
Heating rate (°C/min)	1.7	2.3	2.0	1.2

ที่มา: Ogunsola and Mikula (1991)

Ogunsola and Mikula (1992) ได้ศึกษาการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน โดยใช้เครื่องมือทดลองเดิมที่เคยใช้ในการศึกษาการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินจากประเทศไนจีเรีย 4 ชนิด แต่เปลี่ยนมาใช้ถ่านหินเกรดต่ำจากแคนาดาตะวันตก (Western Canadian low rank coal) 2 ตัวอย่าง ได้แก่ ถ่านหินลิกไนต์และถ่านหินซับบิทูมินัส โดยเพิ่มเงื่อนไขการทดลองโดยการทำ thermal treatment โดยนำถ่านหิน 4 กิโลกรัม ใส่ลงในปฏิกรณ์สแตนเลสในบรรยากาศไนโตรเจน แล้วทำ thermal treating ด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 200, 300, 400 และ 500°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปบดให้ได้ขนาด 0.25 มิลลิเมตร แล้วเก็บในภาชนะที่บรรยากาศไนโตรเจนจนกว่าจะใช้งาน

จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิ thermal treatment ทำให้ค่า heating rate ลดลง และส่งผลให้ค่า CPT และค่า Liability index (I_p , I_u) ลดลง เหมือนกันทั้งถ่านหินลิกไนต์และถ่านหินซับบิทูมินัส กล่าวคือหากเพิ่มอุณหภูมิในการทำ thermal treatment จะส่งผลทำให้ถ่านหินมีความไวในการเกิดการลุกไหม้เองลดลง

Kadioğlu and Varamaz (2003) ได้ศึกษาผลกระทบของความชื้นและอากาศที่แห้งต่อการเกิดการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินลิกไนต์เตอร์คิสส์(Turkish) โดยเตรียมตัวอย่างที่มีขนาดอนุภาค 3 ขนาดได้แก่ 250-850, 125-250, -125 ไมโครเมตร ในภาชนะภายใต้ที่บรรยากาศไนโตรเจนและทำการวิเคราะห์ถ่านหินตามมาตรฐาน ASTM ดังแสดงในตารางที่ 8 เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวมของถ่านหินตัวอย่าง พบว่า เมื่อขนาดอนุภาคของถ่านหินเล็กลงส่งผลให้ค่าร้อยละความชื้น (Moisture) และค่าร้อยละของสารระเหยได้ (Volatile matter) ของถ่านหินจากทั้ง 2 แหล่งคือ Askale และ Balkaya เพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อพิจารณาค่าร้อยละของซัลเฟอร์รวมกลับมีค่าน้อยลงเมื่อขนาดของอนุภาคถ่านหินเล็กลง

เมื่อนำถ่านหินตัวอย่างที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ มาทำให้ชื้นขึ้นตามระยะเวลาต่างๆ คือ 1, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง และทำให้แห้งโดยเลียนแบบสภาวะอากาศที่แห้งที่ 24 และ 48 ชั่วโมง แล้วทำการวิเคราะห์ค่าออกซิเจนภายในกลุ่มฟังก์ชัน คาร์บอนิล(carbonyl), ไฮดรอกซิล(hydroxyl) และคาร์บอกซิล(carboxyl) ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 9 -11 พบว่าที่ระยะเวลาที่ทำถ่านหินให้แห้งเท่ากัน หากระยะเวลาทำให้ชื้นด้วยระยะเวลานาน 96 ชั่วโมง จะมีค่าร้อยละความชื้นของถ่านหินและค่าออกซิเจนภายในกลุ่มฟังก์ชัน คาร์บอนิล, ไฮดรอกซิล และคาร์บอกซิล สูงกว่าถ่านหินที่ถูกทำให้ชื้นในระยะเวลา 72 ชั่วโมง 48 ชั่วโมง 24 ชั่วโมง และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนกรณีที่ถ่านหินมีระยะเวลาทำให้แห้งนานกว่า คือ ที่ 48 ชั่วโมง จะมีค่าออกซิเจนภายในกลุ่มฟังก์ชัน คาร์บอนิล, ไฮดรอกซิล และคาร์บอกซิล ของถ่านหินที่มีระยะเวลาทำให้แห้ง 48 ชั่วโมง จะมีค่าสูงกว่าถ่านหินที่สัมผัสกับอากาศ 24 ชั่วโมงและไม่ได้สัมผัสตามลำดับ

ตารางที่ 8 ผลค่าเฉลี่ยในการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านหินตัวอย่างที่ขนาดอนุภาคต่างๆ

	ขนาดของอนุภาค (μm)					
	250 - 850		125 - 250		-125	
	แหล่งถ่านหิน		แหล่งถ่านหิน		แหล่งถ่านหิน	
	Askale	Balkaya	Askale	Balkaya	Askale	Balkaya
Proximate analysis (wt %)						
Ash	33.29	31.96	29.25	23.17	30.69	29.45
Volatile matter	23.87	20.62	26.24	25.24	28.27	26.17
Fixed carbon	42.89	47.99	42.93	46.53	40.14	44.96
Moisture	1.45	1.00	1.50	1.20	1.55	1.35
Sulfur distribution (wt %)						
Total	3.78	4.30	3.56	3.92	3.47	3.73
Sulfate	0.04	0.06	0.05	0.24	0.13	0.16
Pyritic	2.64	1.74	2.62	1.80	2.59	1.95
Organic	1.10	2.40	0.89	1.88	0.65	1.62
Fraction	41.23	40.60	24.67	28.65	34.10	36.24
Heating value (MJ kg)	23.58	38.79				

ตารางที่ 9 กลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนของถ่านหินตัวอย่างที่ไม่ได้ทำให้แห้ง

ขนาดอนุภาคของถ่านหิน (μm)	เวลาที่สัมผัสความชื้น (h)	ค่าความชื้นในถ่านหิน (%)		Carboxyl (COOH) (mmol g)		Hydroxyl(-OH) (mmol g)		Carbonyl (>C=O) (mmol g)	
		Askale	Balkaya	Askale	Balkaya	Askale	Balkaya	Askale	Balkaya
		250-850	Untreat	1.45	1.00	1.98	1.49	2.06	1.82
	1	1.50	1.30	1.98	1.48	2.06	1.84	1.05	0.77
	24	3.60	2.65	1.98	1.50	2.06	1.85	1.05	0.76
	48	5.00	4.05	1.98	1.49	2.06	1.84	1.05	0.76
	72	6.00	5.15	1.97	1.51	2.06	1.85	1.05	0.78
	96	7.20	6.00	1.97	1.50	2.07	1.86	1.05	0.79
125-250	Untreat	1.50	1.20	2.00	1.51	2.28	2.00	1.06	0.78
	1	1.55	1.40	2.00	1.51	2.28	1.99	1.06	0.78
	24	3.90	3.00	1.99	1.52	2.27	1.99	1.06	0.79
	48	5.60	4.95	2.00	1.54	2.28	1.99	1.05	0.79
	72	6.20	6.05	2.00	1.54	2.28	1.99	1.07	0.79
	96	7.40	7.10	2.00	1.55	2.27	1.98	1.06	0.79
-125	Untreat	1.55	1.35	2.10	1.66	2.80	2.06	1.07	0.89
	1	1.60	1.43	2.10	1.63	2.79	2.06	1.07	0.89
	24	4.40	3.50	2.10	1.67	2.80	2.07	1.08	0.90
	48	5.80	5.08	2.10	1.66	2.80	2.06	1.07	0.90
	72	6.40	6.85	2.10	1.70	2.81	2.06	1.08	0.89
	96	7.80	7.90	2.10	1.68	2.83	2.06	1.07	0.88

ตารางที่ 10 กลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนของถ่านหินตัวอย่างที่ทำให้แห้ง 24 ชั่วโมง

ขนาดอนุภาคของถ่านหิน(μm)	เวลาที่สัมผัสความชื้น (h)	ค่าความชื้นในถ่านหิน (%)		Carboxyl (COOH) (mmol g)		Hydroxyl(-OH) (mmol g)		Carbonyl (>C=O) (mmol g)	
		Askale	Balkaya	Askale	Balkaya	Askale	Balkaya	Askale	Balkaya
		250-850	Untreat	0.60	0.50	2.19	1.79	2.07	1.97
	1	0.65	0.50	2.20	1.88	2.24	2.00	1.06	0.88
	24	0.70	0.53	2.25	1.97	2.45	2.08	1.09	0.90
	48	0.75	0.61	2.46	2.18	2.70	2.24	1.09	0.94
	72	0.80	0.66	2.68	2.30	2.80	2.28	1.13	0.98
	96	0.85	0.67	2.79	2.37	2.82	2.38	1.13	0.99
125-250	Untreat	0.65	0.52	2.22	1.85	2.37	2.21	1.08	0.99
	1	0.65	0.52	2.49	1.98	2.43	2.35	1.10	1.00
	24	0.70	0.55	2.90	2.16	2.50	2.49	1.11	1.00
	48	0.75	0.65	2.98	2.18	2.80	2.60	1.14	1.06
	72	0.80	0.66	3.13	2.30	2.88	2.64	1.28	1.06
	96	0.85	0.67	3.25	2.37	2.94	2.73	1.29	1.10
-125	Untreat	0.65	0.55	2.29	1.91	2.87	2.39	1.10	0.99
	1	0.65	0.55	2.36	1.98	2.92	2.49	1.13	1.00
	24	0.70	0.60	2.99	2.05	2.08	2.70	1.27	1.15
	48	0.75	0.63	3.10	2.43	2.29	2.78	1.45	1.25
	72	0.80	0.66	3.40	2.55	2.42	2.87	1.57	1.26
	96	0.77	0.70	3.55	2.89	2.54	3.00	1.58	1.40

ตารางที่ 11 กลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนของถ่านหินตัวอย่างที่ทำให้แห้ง 48 ชั่วโมง

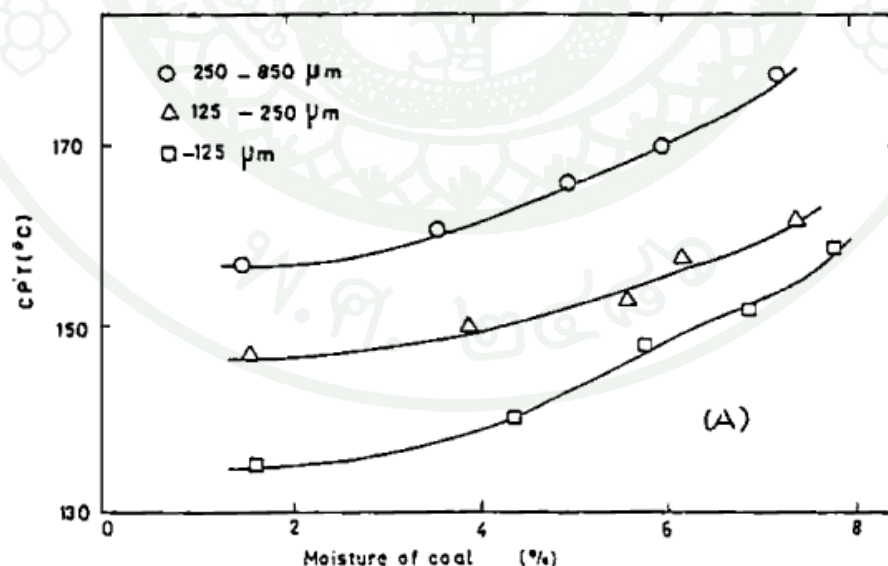
ขนาดอนุภาคของถ่านหิน(μm)	เวลาที่สัมผัสความชื้น (h)	ค่าความชื้นในถ่านหิน (%)		Carboxyl (COOH) (mmol g)		Hydroxyl(-OH) (mmol g)		Carbonyl (>C=O) (mmol g)	
		Askale	Balkaya	Askale	Balkaya	Askale	Balkaya	Askale	Balkaya
250-850	Untreat	0.54	0.38	3.30	1.89	2.79	2.20	1.06	0.91
	1	0.54	0.38	3.30	1.89	2.99	2.20	1.08	0.92
	24	0.55	0.42	3.61	2.00	3.00	2.47	1.09	0.98
	48	0.55	0.43	3.78	2.22	3.17	2.33	1.10	1.00
	72	0.60	0.50	3.91	2.34	3.33	2.46	1.11	1.02
	96	0.62	0.50	3.99	2.36	3.46	2.60	1.12	1.05
125-250	Untreat	0.57	0.40	3.43	2.00	2.88	2.39	1.08	0.99
	1	0.57	0.40	3.57	2.00	2.99	2.50	1.08	1.00
	24	0.57	0.43	3.95	2.17	3.23	2.48	1.10	1.12
	48	0.60	0.41	3.98	2.29	3.43	2.59	1.12	1.14
	72	0.66	0.45	4.09	2.53	3.99	2.75	1.17	1.17
	96	0.66	0.45	4.28	2.79	4.00	2.85	1.18	1.21
-125	Untreat	0.55	0.38	3.66	2.00	3.00	2.40	1.13	1.07
	1	0.55	0.38	3.78	2.00	3.00	2.65	1.18	1.10
	24	0.58	0.40	4.12	2.19	3.68	2.81	1.19	1.15
	48	0.58	0.40	4.21	2.44	3.79	2.97	1.28	1.18
	72	0.64	0.46	4.34	2.59	3.89	3.09	1.34	1.19
	96	0.65	0.46	4.70	3.00	4.10	2.90	1.32	1.20

สำหรับการศึกษาการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินเริ่มต้นจากการใช้ตัวอย่าง 60 กรัม ใส่ลงในถังปฏิกรณ์ที่อยู่ในตู้อบที่มีอัตราการความร้อน $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ และปล่อยอากาศเข้าถังปฏิกรณ์ถึงที่หนึ่งด้วยอัตราการไหล $50 \text{ mL}/\text{min}^{-1}$ โดยผ่านเครื่องอบแห้ง ส่วนถังปฏิกรณ์อีกถังปล่อยก๊าซไนโตรเจนด้วยอัตราการไหลเท่ากัน แล้วทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิของฟ้านอกถังปฏิกรณ์ และตรงกลางของถ่านหินที่อากาศและที่ก๊าซไนโตรเจนผ่านเพื่อทำการหาค่า CPT ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าความชื้นมี

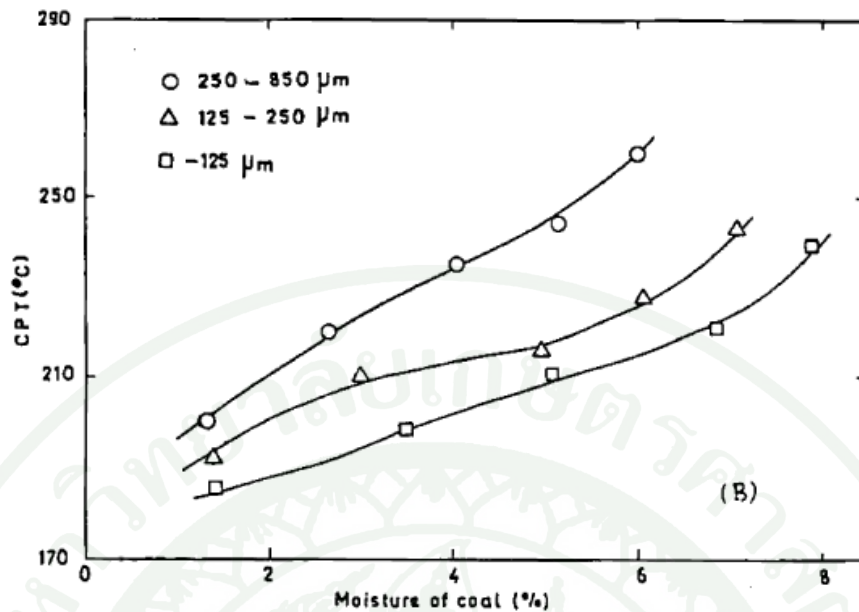
ผลต่อการเกิดการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินคือ เมื่อถ่านหินแต่ละขนาดของอนุภาคมีค่าความชื้นสูงขึ้นจะทำให้ค่าอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เอง Cross Point Temperature (CPT) มีค่าสูงขึ้น ส่งผลทำให้แนวโน้มการลุกไหม้ได้เองลดลง ดังแสดงใน ภาพที่ 5 พบว่า

ถ่านหิน Askale ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 125 ไมโครเมตรที่มีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 1.60 มีค่าอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เอง เท่ากับ 135 องศาเซลเซียส แต่เมื่อค่าร้อยละความชื้นของถ่านหินสูงขึ้นเป็น 4.40 ,5.80 ,6.40 และ 7.80 ทำให้ค่าอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เองสูงขึ้นเป็น 140 , 145 , 150 และ 155 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เช่นเดียวกับถ่านหิน Askale ที่มีขนาดอนุภาค 125-250 ไมโครเมตรและถ่านหิน Askale ที่มีขนาดอนุภาค 250-850 ไมโครเมตร

ส่วนถ่านหิน Balkaya ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 125 ไมโครเมตรที่มีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 1.43 มีค่าอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เอง เท่ากับ 188 องศาเซลเซียส แต่เมื่อค่าร้อยละความชื้นของถ่านหินสูงขึ้นเป็น 3.50, 5.08, 6.85 และ 7.90 ทำให้ค่าอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เองสูงขึ้นเป็น 196, 209, 219 และ 237 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เช่นเดียวกับถ่านหิน Balkaya ที่มีขนาดอนุภาค 125-250 ไมโครเมตรและถ่านหิน Balkaya ที่มีขนาดอนุภาค 250-850 ไมโครเมตร



ภาพที่ 5 ค่า CPT ต่อความชื้นของถ่านหิน (A) ถ่านหิน Askale (B) ถ่านหิน Balkaya

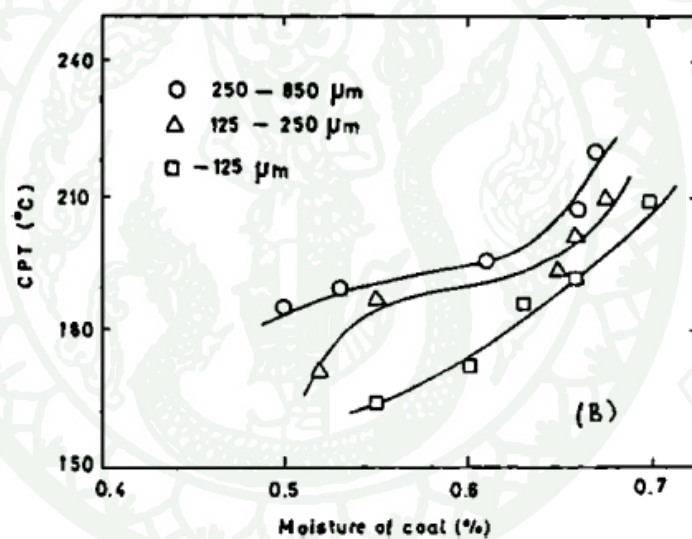
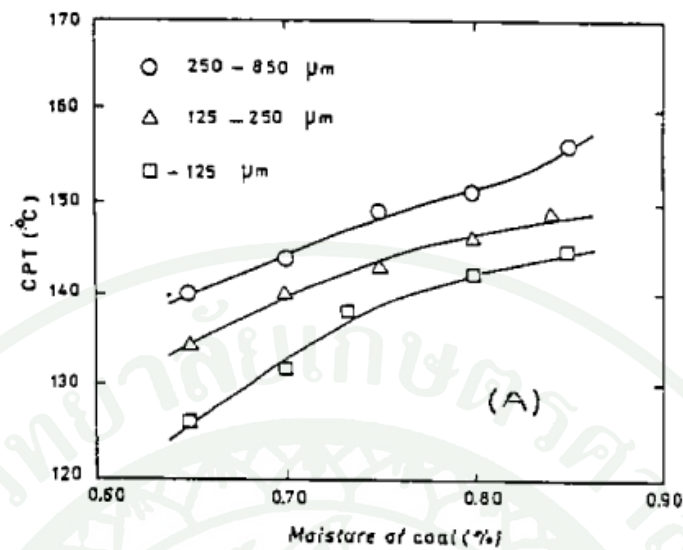


ภาพที่ 5 (ต่อ)

ส่วนถ่านหินที่สัมผัสอากาศแห่ง 24 ชั่วโมงนั้นพบว่าเมื่อถ่านหินแต่ละขนาดของอนุภาคมีค่าความชื้นสูงขึ้นจะทำให้ค่าอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เอง Cross Point Temperature (CPT) มีค่าสูงขึ้น ส่งผลทำให้แนวโน้มการลุกไหม้ได้เองลดลง ดังแสดงใน ภาพที่ 6 พบว่า

ถ่านหิน Askale ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 125 ไมโครเมตรที่มีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 0.65 มีค่าอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เอง เท่ากับ 125 องศาเซลเซียส แต่เมื่อค่าร้อยละความชื้นของถ่านหินสูงขึ้นเป็น 0.70, 0.75, 0.77 และ 0.80 ทำให้ค่าอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เองสูงขึ้นเป็น 131, 137, 141 และ 144 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เช่นเดียวกับถ่านหิน Askale ที่มีขนาดอนุภาค 125-250 ไมโครเมตรและถ่านหิน Askale ที่มีขนาดอนุภาค 250-850 ไมโครเมตร

ส่วนถ่านหิน Balkaya ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 125 ไมโครเมตรที่มีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 0.55 มีค่าอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เอง เท่ากับ 165 องศาเซลเซียส แต่เมื่อค่าร้อยละความชื้นของถ่านหินสูงขึ้นเป็น 0.60, 0.63, 0.66 และ 0.70 ทำให้ค่าอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เองสูงขึ้นเป็น 172, 185, 190 และ 210 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เช่นเดียวกับถ่านหิน Balkaya ที่มีขนาดอนุภาค 125-250 ไมโครเมตรและถ่านหิน Balkaya ที่มีขนาดอนุภาค 250-850 ไมโครเมตร



ภาพที่ 6 ค่า CPT ต่อความชื้นของถ่านหิน (A) ถ่านหิน Askale coal (B) ถ่านหิน Balkaya (อากาศแห้ง 24 ชั่วโมง)

ส่วนผลกระทบจากการสัมผัสอากาศแห้งนั้นเห็นได้ชัดเจน จากภาพที่ 5 และ 2.5 ว่า เมื่อค่าความชื้นของถ่านหินลดลง จะส่งผลให้ค่า CPT ของถ่านหินมีค่าลดลง กล่าวคืออากาศแห้งส่งผลทำให้ถ่านหินมีแนวโน้มการลุกไหม้ได้เองสูงขึ้น โดยดูได้จากค่า CPT ของถ่านหินที่ผ่านอากาศแห้ง 24 ชั่วโมงมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับถ่านหินที่ไม่ได้สัมผัสอากาศที่แห้ง ในกรณีขนาดอนุภาคของถ่านหินนั้นพบว่าเมื่อขนาดอนุภาคเล็กลงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและอัตราการระเหยเป็นไอสูงขึ้นและมีแนวโน้มที่จะเกิดการลุกไหม้ได้เองสูงขึ้น

Küçük *et al.* (2003) ศึกษาคุณลักษณะการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินลิกไนต์โดยพิจารณาขนาดของถ่านหิน ความชื้นของถ่านหินและความชื้นของอากาศ โดยการเก็บตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์มาจากกองเก็บถ่านหินแล้วแยกขนาดถ่านหิน 3 ขนาดคือ เล็กกว่า 125 ไมโครเมตร 125 – 250 ไมโครเมตร ใหญ่กว่า 250 ไมโครเมตรแต่เล็กกว่า 850 ไมโครเมตร เพื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านหิน Askale ดังแสดงในตารางที่ 12 เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวมของถ่านหินตัวอย่าง พบว่า เมื่อขนาดอนุภาคของถ่านหินเล็กลงส่งผลให้ค่าร้อยละความชื้น (Moisture) และค่าร้อยละของสารระเหยได้ ของถ่านหิน Askale เพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อพิจารณาค่าร้อยละของซัลเฟอร์รวมกลับมีค่าน้อยลงเมื่อขนาดของอนุภาคถ่านหินเล็กลง

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวมของถ่านหิน Askale ที่ขนาดอนุภาคต่างๆ

	ขนาดของอนุภาค (μm)		
	250 - 850	125 - 250	-125
Proximate analysis (wt %)			
Ash	33.29	29.25	30.69
Volatile matter	22.62	26.24	27.27
Fixed carbon	42.89	42.93	40.14
Moisture	1.20	1.58	1.90
Sulfur distribution (wt %)			
Total	3.78	3.56	3.37
Sulfate	0.04	0.05	0.13
Pyritic	2.64	2.62	2.59
Organic	1.10	0.89	0.65
Heating value (MJ kg)		23.58	

การทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินโดยการใส่ตัวอย่าง 60 กรัม ใสลงในถังปฏิกรณ์ที่อยู่ในตู้อบโดยมีอัตราการให้ความร้อน $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ และปล่อยอากาศเข้าถังปฏิกรณ์ถึงที่หนึ่งด้วยอัตราการไหล 25 ml/min โดยผ่านเครื่องอบแห้ง ส่วนถังปฏิกรณ์อีกถังปล่อยก๊าซไนโตรเจนด้วยอัตราการไหลเท่ากัน จากนั้นทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิของบรรยากาศนอกถังปฏิกรณ์ และอุณหภูมิถ่านหินภายในถังปฏิกรณ์ที่อากาศ และที่ก๊าซไนโตรเจนผ่านเพื่อทำการหาค่า CPT แล้วทำการ

เปลี่ยนอัตราการไหลเป็น 50 และ 100 ml/min ตามลำดับเพื่อเปรียบเทียบค่า CPT พบว่า อัตราการไหลมีผลต่อการลุกลามของถ่านหิน โดยที่อัตราการไหล 25 และ 100 ml/min ไม่สามารถหาค่า CPT ได้ แต่ที่อัตราการไหล 50 ml/min นั้นค่า CPT เท่ากับ 160 °C ดังแสดงในภาพที่ 7 จากการวิจัยพบว่าหากอัตราการไหลของอากาศไม่เหมาะสม คือ มากหรือน้อยเกินไปจะส่งผลทำให้ไม่เกิดการลุกลามได้เองของถ่านหิน เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของอากาศสูงจะทำให้สามารถระบายความร้อนที่สะสมของถ่านหินได้ แต่ในทางกลับกันเมื่ออัตราการไหลของอากาศต่ำก็จะทำให้มีปริมาณออกซิเจนน้อยทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันน้อยเกิดความร้อนสะสมมีปริมาณน้อยไม่เพียงพอต่อการลุกลามได้เอง

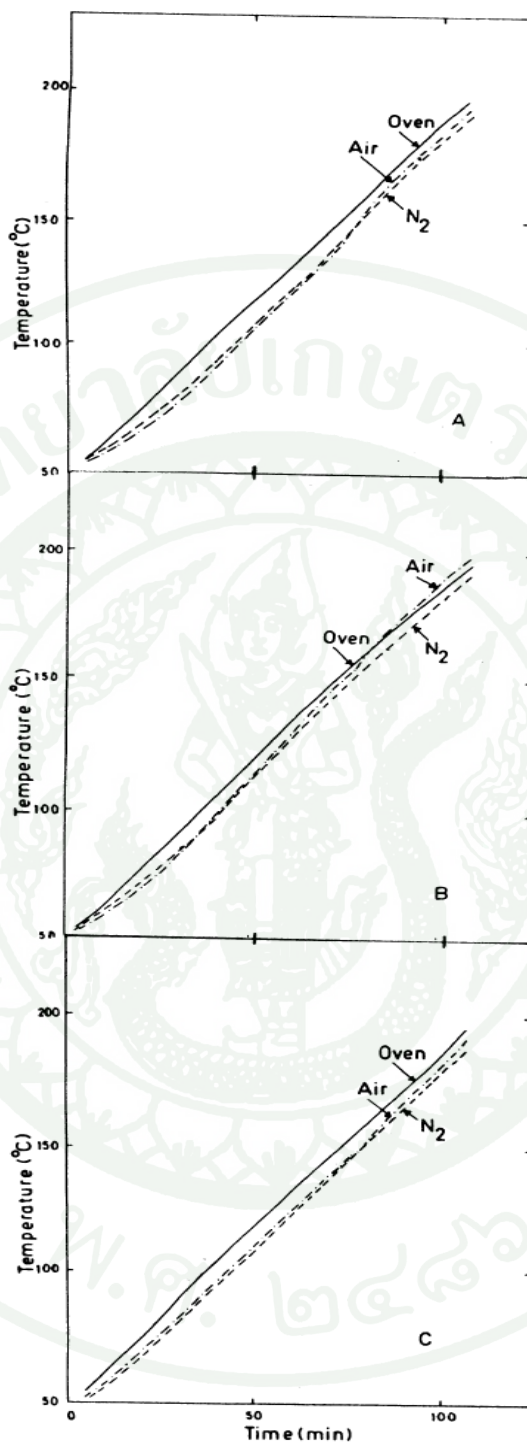
การศึกษาผลของอุณหภูมิของถ่านหินที่มีต่อการลุกลามได้เองของถ่านหิน ทำโดยการทำถ่านหินให้ขึ้นในสุญญากาศ แล้วทำการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิของถ่านหิน และกลุ่มฟังก์ชันของออกซิเจนดังแสดงในตารางที่ 13 พบว่า

ถ่านหินที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 125 ไมโครเมตร ที่ถูกทำให้ขึ้นด้วยระยะเวลา 96 ชั่วโมง จะมีค่าร้อยละความชื้นของถ่านหินและค่าออกซิเจนภายในกลุ่มฟังก์ชัน (คาร์บอนิล, ไฮดรอกซิล) สูงกว่าถ่านหินที่ไม่ได้สัมผัสความชื้น แต่มีค่าออกซิเจนภายในกลุ่มฟังก์ชัน (คาร์บอกซิล) ต่ำกว่าถ่านหินที่ไม่ได้สัมผัสความชื้น

ถ่านหินที่มีขนาดอนุภาค 125-250 ไมโครเมตร ที่ถูกทำให้ขึ้นด้วยระยะเวลา 96 ชั่วโมง จะมีค่าร้อยละความชื้นของถ่านหินและค่าออกซิเจนภายในกลุ่มฟังก์ชัน (คาร์บอนิล) สูงกว่าถ่านหินที่ไม่ได้สัมผัสความชื้น แต่มีค่าออกซิเจนภายในกลุ่มฟังก์ชัน (ไฮดรอกซิล, คาร์บอกซิล) ต่ำกว่าถ่านหินที่ไม่ได้สัมผัสความชื้น

ถ่านหินที่มีขนาดอนุภาค 250-850 ไมโครเมตร ที่ถูกทำให้ขึ้นด้วยระยะเวลา 96 ชั่วโมง จะมีค่าร้อยละความชื้นของถ่านหินและค่าออกซิเจนภายในกลุ่มฟังก์ชัน (คาร์บอนิล, ไฮดรอกซิล และคาร์บอกซิล) สูงกว่าถ่านหินที่ไม่ได้สัมผัสความชื้น

จากภาพรวมถ่านหินทุกขนาดที่ถูกทำให้ขึ้นด้วยระยะเวลา 96 ชั่วโมง จะมีค่าร้อยละความชื้นของถ่านหินและค่าออกซิเจนภายในกลุ่มฟังก์ชัน คาร์บอนิล, ไฮดรอกซิล และคาร์บอกซิล สูงกว่าถ่านหินที่ไม่ถูกทำให้ขึ้น



ภาพที่ 7 ผลกระทบจากอัตราการไหลของก๊าซ (อัตราการร้อน: $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, ขนาดอนุภาคถ่านหิน: $250\text{--}850\ \mu\text{m}$, A: $25\ \text{ml}/\text{min}$, B: $50\ \text{ml}/\text{min}$, C: $100\ \text{ml}/\text{min}$)

ตารางที่ 13 กลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนของถ่านหิน Askale ที่ไม่ได้ทำให้แห้ง

ขนาด อนุภาค ของถ่าน หิน(μm)	เวลาที่ สัมผัส ความชื้น (h)	ความชื้นของ ถ่านหิน (%)	Carboxyl (COOH) (mmol g)	Hydroxyl(-OH) (mmol g)	Carbonyl ($>\text{C}=\text{O}$) (mmol g)
250-850	Untreated	1.20	1.9750	2.0599	1.0480
	96	2.50	1.9768	2.0640	1.0489
125-250	Untreated	1.58	1.9960	2.2780	1.0589
	96	3.00	1.9921	2.2701	1.0596
-125	Untreated	1.90	2.0982	2.7970	1.0701
	96	4.00	2.0978	2.7980	1.0773

เมื่อนำถ่านหินใส่ถังปฏิกรณ์เพื่อหาค่า CPT พบว่าเมื่อถ่านหินมีค่าความชื้นสูงขึ้นทำให้ค่า CPT ของถ่านหินมีค่าสูงขึ้น ซึ่งทำให้แนวโน้มการลุกไหม้ได้เองลดลง ดังตารางที่ 14 ถ่านหินที่อนุภาคขนาด 125-250 ที่มีค่าร้อยละความชื้นของถ่านหินเท่ากับ 1.58 สามารถลุกไหม้ได้เองที่อุณหภูมิ 143 องศาเซลเซียส แต่เมื่อถูกทำให้มีค่าร้อยละความชื้นของถ่านหินเท่ากับ 3.00 อุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เองได้เพิ่มขึ้นเป็น 145 องศาเซลเซียส

สำหรับผลของความชื้นของอากาศที่มีต่อการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินนั้น เมื่อใช้อากาศที่มีความชื้น 2.5, 5.0, 10.0% เทียบกับอากาศแห้ง กับถ่านหินขนาดเล็กกว่า 850 ไมโครเมตร มาทำการทดลองในตู้อบ โดยนำถ่านหินใส่ในถังปฏิกรณ์ที่อยู่ในตู้อบที่ปล่อยอากาศแห้งอัตราการไหล 50 ml/min เพื่อหาค่าอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เองพบว่าอากาศที่มีความชื้น 10% นั้นไม่สามารถหาค่าอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เอง(CPT)ได้ แต่สามารถหาค่าอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เอง(CPT)เท่ากับ 156 และ 159°C ที่ความชื้นของอากาศเท่ากับ 2.5, 5.0% ตามลำดับ ส่วนที่เป็นอากาศแห้งนั้นค่าอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เอง(CPT) เท่ากับ 140 °C ซึ่งสรุปได้ว่าความชื้นของอากาศที่มีค่ามากจะส่งผลให้มีแนวโน้มการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินน้อยลงโดยที่หากความชื้นของอากาศมากกว่า 10% จะยังมีแนวโน้มน้อยมาก

นอกจากนี้เมื่อศึกษาผลกระทบจากขนาดของอนุภาคถ่านหินต่อการถูกไหม้ได้เอง พบว่า ถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 125 ไมโครเมตร มีค่าอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถถูกไหม้ได้เอง (CPT) น้อย กล่าวคือมีแนวโน้มการถูกไหม้ได้เองมากกว่าถ่านหินขนาด 125 – 250 ไมโครเมตร และ ขนาด 250 – 850 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงผลการทดลองในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 สรุปการวัดค่า CPT ของถ่านหินตัวอย่าง

	ขนาดถ่าน หิน (μm)	ความชื้น ของถ่านหิน (%)	ความชื้น สัมพัทธ์ของ อากาศ (%)	อัตราการไหล ของก๊าซ (ml/min)	ค่า CPT ($^{\circ}\text{C}$)
ถ่านหินที่ไม่ได้ ทำให้ชื้น				25.0	-
	250-850	1.20	dry	50.0	160
				100.0	-
ถ่านหินที่ไม่ได้ ทำให้ชื้น	250-850	1.20			160
	125-250	1.58			143
	-125	1.90	dry	50.0	142
	-250	1.88			140
	-850	1.89			138
ถ่านหินที่ทำให้ ชื้น	250-850	2.50			160
	125-250	3.00	dry	50.0	145
	-125	4.00			139
ความชื้นของ อากาศ			dry		140
	-850	1.90	2.5	50.0	156
			5.0		159
			10.0		-

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ถ่านหินซบับิทูมินัสจากแหล่งต่างๆ จำนวน 3 แหล่ง ได้แก่ South Africa, PT.Jorong, และ PT.Adaro.
2. สารเคมีและก๊าซที่จำเป็นในการวิเคราะห์ถ่านหิน ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ร้อยละ 99.995 และก๊าซออกซิเจน บริสุทธิ์ร้อยละ 99.9999 ก๊าซฮีเลียมบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9995 Benzoic Acid
3. ภาชนะที่ใช้บรรจุและเก็บรักษาตัวอย่าง
4. อากาศ ใช้ในกระบวนการทดสอบหาค่า Crossing point temperature (CPT)

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชั้นทดสอบ (Medium) ได้แก่ ถ่านหินที่ผ่านการบด 3 ขนาด ได้แก่ ถ่านหินอนุภาคขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร, ขนาดอนุภาค 75-106 ไมโครเมตร และขนาดอนุภาค 106-250 ไมโครเมตร
2. 485-USB converter port ใช้แปลงสัญญาณค่าอุณหภูมิที่อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple type K) วัดค่าได้ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกผลของค่าอุณหภูมิ
3. ตู้อบ (Oven)
4. Computer Notebook ยี่ห้อ ASUS รุ่น A6000U ใช้บันทึกผลของค่าอุณหภูมิ
5. เครื่องบดถ่านหินชนิด Cup mill ยี่ห้อ Siebtechnik รุ่น TS-1000
6. ตะแกรงร่อนขนาด 60, 140 และ 200 mesh
7. เครื่องวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบโดยรวมของถ่านหิน ชนิด Proximate analysis (Thermo gravimetric Analyzer ยี่ห้อ LECO รุ่น TGA 601) เพื่อวิเคราะห์ค่าความชื้น, ปริมาณสารระเหย, ปริมาณเถ้า, ปริมาณคาร์บอนคงตัว
8. เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน (Bomb Calorimeter ยี่ห้อ LECO รุ่น AC-350)

9. เครื่องวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหิน Ultimate Analysis (Elemental Analyzer ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น 2400 CHN) ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน

10. เครื่องวิเคราะห์ซัลเฟอร์ในถ่านหิน (Sulfur-carbon analyzer ยี่ห้อ LECO รุ่น SC632) ใช้วิเคราะห์ปริมาณธาตุซัลเฟอร์

11. เครื่องวิเคราะห์ค่า Crossing point temperature (CPT) ของถ่านหิน ประกอบด้วยถังสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 เซนติเมตร ความสูง 14 เซนติเมตร จำนวน 1 ถังมีช่องผ่านอากาศเข้าและออก

12. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple type K) โดยวัดอุณหภูมิ 2 จุด ดังนี้

12.1 อุณหภูมิของตู้อบ 1 จุด

12.2 อุณหภูมิของถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุถ่านหิน 1 จุด

13. เครื่องแก้วและอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ถ่านหินตามมาตรฐาน ASTM

วิธีการ

1. การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์และการทดลอง

1) เก็บตัวอย่างจากแหล่งต่างๆ ไว้ในถุงพลาสติกหนาไม่มีรูรั่ว ผ่านก๊าซไนโตรเจนเข้าไปเพื่อไล่อากาศออกให้หมด จากนั้นปิดปากถุงให้แน่นป้องกันอากาศเข้า (พร้อมทั้งเขียนหมายเลขแสดงตัวอย่างและแหล่งที่มาแล้วนำมาเก็บไว้เพื่อนำไปใช้ทดลอง)

2) บดถ่านหินจากแหล่งต่างๆ ให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 250 ไมโครเมตร และนำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60 mesh 140 mesh และ 200 mesh) แยกแต่ละขนาดจำนวน 600 กรัมใส่ถุงพลาสติก จากนั้นไล่อากาศให้หมดเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน

2. การวิเคราะห์ถ่านหินและการทดลอง

1) นำถ่านหินมาผ่านกระบวนการเตรียมตัวอย่างถ่านหินตามมาตรฐาน ASTM D 2013 (ASTM Standards, 2007) จากนั้นดำเนินการต่อไปดังนี้

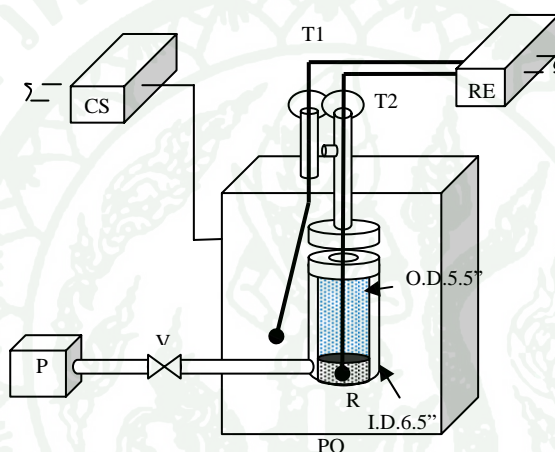
1.1. ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวมของถ่านหิน (Proximate analysis) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 5142-09 (ASTM Standards, 2009) ซึ่งประกอบด้วยการวิเคราะห์ความชื้น, เถ้า, สารระเหยและคาร์บอนคงตัว โดยใช้เครื่อง Thermo gravimetric Analyzer ยี่ห้อ LECO รุ่น TGA

601

1.2. ทำการวิเคราะห์ค่าความร้อนตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 240 (ASTM Standards, 2009) โดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter ยี่ห้อ LECO รุ่น AC-350

1.3. ทำการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในด้านหิน (Ultimate analysis) ด้วยเครื่อง Elemental analyzer และเครื่อง Sulfur-carbon analyzer

2) การทดลองหาค่าอุณหภูมิจุดตัด (Crossing Point Temperature) โดยใช้ตู้ควบคุมความร้อนที่ชุดทดลอง คือ เครื่องปฏิกรณ์ถังสแตนเลสทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตรความสูง 14 เซนติเมตรมีช่องผ่านอากาศเข้าและออก ดังแสดงในภาพที่ 8 และภาพที่ 9



ภาพที่ 8 ระบบในการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน PO: Programmable oven; R: reactor; P: pump; D: drier; T: thermocouple; CS: control system; V: valve; RE: recorder



ภาพที่ 9 ภาพขณะบรรจุถ่านหิน (A) เครื่องปฏิกรณ์ (B) สำหรับทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน

2.1 ทดลองหาค่าอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมในการไหลผ่านสัมผัสกับถ่านหิน Jorong 262 ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในเครื่องปฏิกรณ์เพื่อให้ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เองในบรรยากาศที่อุณหภูมิต่ำที่สุด (ค่า CPT ต่ำสุด) ดำเนินการโดย

- 1) นำถ่านหิน Jorong 262 ปริมาณ 25 g ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์
- 2) ใช้เครื่อง Ultra Flow Meter Calibration สอบเทียบอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการทดลอง คือ 50, 300, 400, 500, 600, 1000, 1200, 1400 ml/min
- 3) เตรียมตู้อบให้ทำงานที่อุณหภูมิและการพาความร้อนในตู้อบที่เหมาะสมโดยวิธีการ Trial and Error
- 4) ใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ วัดค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในตู้อบกับอุณหภูมิที่ศูนย์กลางขึ้นทดสอบ โดยการปรับอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในตู้อบในอัตรา 1 °C/min
- 5) เก็บบันทึกค่าอุณหภูมิที่อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ วัดค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในตู้อบกับอุณหภูมิที่ศูนย์กลางขึ้นทดสอบ ลงในเครื่องคอมพิวเตอร์โดยผ่านสาย 485-USB converter port
- 6) วิเคราะห์ผลการทดลองค่าอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมในการไหลผ่านสัมผัสกับถ่านหิน Jorong 262 ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร แล้วทำให้ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เองที่อุณหภูมิบรรยากาศต่ำที่สุด เพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการทดลองหัวข้ออื่นต่อไป

2.2 ทดลองหาค่า Cross Point Temperature (CPT) ของถ่านหินขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร จากแหล่งต่างๆ โดยใช้อัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมในการไหลผ่านสัมผัสกับถ่านหิน Jorong 262 ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้จากทดลองที่ 2.1 เป็นเกณฑ์ ดำเนินการโดย

- 1) นำถ่านหิน Jorong 262, ถ่านหิน Phoenix 18, ถ่านหิน Adaro 265 และถ่านหิน Adaro 266 ปริมาณ 25 g ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์
- 2) ใช้เครื่อง Ultra Flow Meter Calibration สอบเทียบอัตราการไหลของอากาศโดยอัตราใช้ในการทดลอง คือ 1,200 ml/min
- 3) เตรียมตู้อบให้ทำงานที่อุณหภูมิและการพาความร้อนในตู้อบที่เหมาะสมโดยวิธีการ Trial and Error
- 4) ใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ วัดค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในตู้อบกับอุณหภูมิที่ศูนย์กลางขึ้นทดสอบ โดยการปรับอุณหภูมิเฉลี่ยในตู้อบให้คงที่

5) เก็บบันทึกค่าอุณหภูมิที่อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ วัดค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในตู้อบกับอุณหภูมิที่ศูนย์กลางชั้นทดสอบ ลงในเครื่องคอมพิวเตอร์โดยผ่านสาย 485-USB converter port

6) ทำการทดลองข้อ 1-4 ใหม่ โดยการเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ยคงที่ จนกระทั่งอุณหภูมิที่ส่งผลให้ถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์เกิดการลุกไหม้ได้เอง

7) วิเคราะห์ผลการทดลอง Cross Point Temperature ของถ่านหินขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร จากแหล่งทั้ง 4 แหล่ง เพื่อตรวจสอบหาถ่านหินที่มีความสามารถในการลุกไหม้ได้เองที่อุณหภูมิบรรยากาศต่ำสุด (ค่า CPT น้อยที่สุด)

2.3 ทดลองขนาดของอนุภาคที่ส่งผลต่อการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน

1) นำถ่านหิน ปริมาณ 25 g ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ โดยแบ่งขนาดอนุภาคเป็น 3 ขนาด คือ อนุภาคขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร อนุภาคขนาด 75-106 ไมโครเมตร และอนุภาคขนาด 106-250 ไมโครเมตร

2) ใช้เครื่อง Ultra Flow Meter Calibration สอบเทียบอัตราการไหลของอากาศโดยอัตราใช้ในการทดลอง คือ 1,200 ml/min

3) เตรียมตู้อบให้ทำงานที่อุณหภูมิและการพาความร้อนในตู้อบที่เหมาะสมโดยวิธีการ Trial and Error

4) ใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ วัดค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในตู้อบกับอุณหภูมิที่ศูนย์กลางชั้นทดสอบ โดยการปรับอุณหภูมิเฉลี่ยในตู้อบให้คงที่

5) เก็บบันทึกค่าอุณหภูมิที่อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ วัดค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในตู้อบกับอุณหภูมิที่ศูนย์กลางชั้นทดสอบ ลงในเครื่องคอมพิวเตอร์โดยผ่านสาย 485-USB converter port

6) ทำการทดลองข้อ 1-4 ใหม่ โดยการเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ยคงที่ จนกระทั่งอุณหภูมิที่ส่งผลให้ถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์เกิดการลุกไหม้ได้เอง

7) วิเคราะห์ผลการทดลอง Cross Point Temperature ของถ่านหินขนาดอนุภาคต่างๆ จากแหล่งทั้ง 3 แหล่ง เพื่อตรวจสอบหาถ่านหินที่มีความสามารถในการลุกไหม้ได้เองที่อุณหภูมิบรรยากาศต่ำสุด (ค่า CPT น้อยที่สุด)

2.4 ทดลองความชื้นสัมพัทธ์และความชื้นที่ส่งผลต่อการลุกลามใหม่ได้เองของถ่านหิน

1) นำถ่านหินที่สามารถลุกลามใหม่ได้เองที่อุณหภูมิต่างๆ 1 แหล่งจากการทดลอง 2.2 ปริมาณ 25 g แล้วนำถ่านหินขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง ไปสัมผัสกับอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 70%, 75% และ 80% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วปิดปากถุงให้สนิทแล้ว

2) นำถ่านหินตัวอย่างไปทำการทดสอบค่าความชื้นก่อนนำไปทำการทดลอง โดยใส่ไปใส่ในเครื่องปฏิกรณ์

3) ใช้เครื่อง Ultra Flow Meter Calibration สอบเทียบอัตราการไหลของอากาศโดยอัตราใช้ในการทดลอง คือ 1,200 ml/min

4) เตรียมตู้อบให้ทำงานที่อุณหภูมิและการพาความร้อนในตู้อบที่เหมาะสมโดยวิธีการ Trial and Error

5) ใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ วัดค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในตู้อบกับอุณหภูมิที่ศูนย์กลางขึ้นทดสอบ โดยการปรับอุณหภูมิเฉลี่ยในตู้อบให้คงที่

6) เก็บบันทึกค่าอุณหภูมิที่อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ วัดค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในตู้อบกับอุณหภูมิที่ศูนย์กลางขึ้นทดสอบ ลงในเครื่องคอมพิวเตอร์โดยผ่านสาย 485-USB converter port

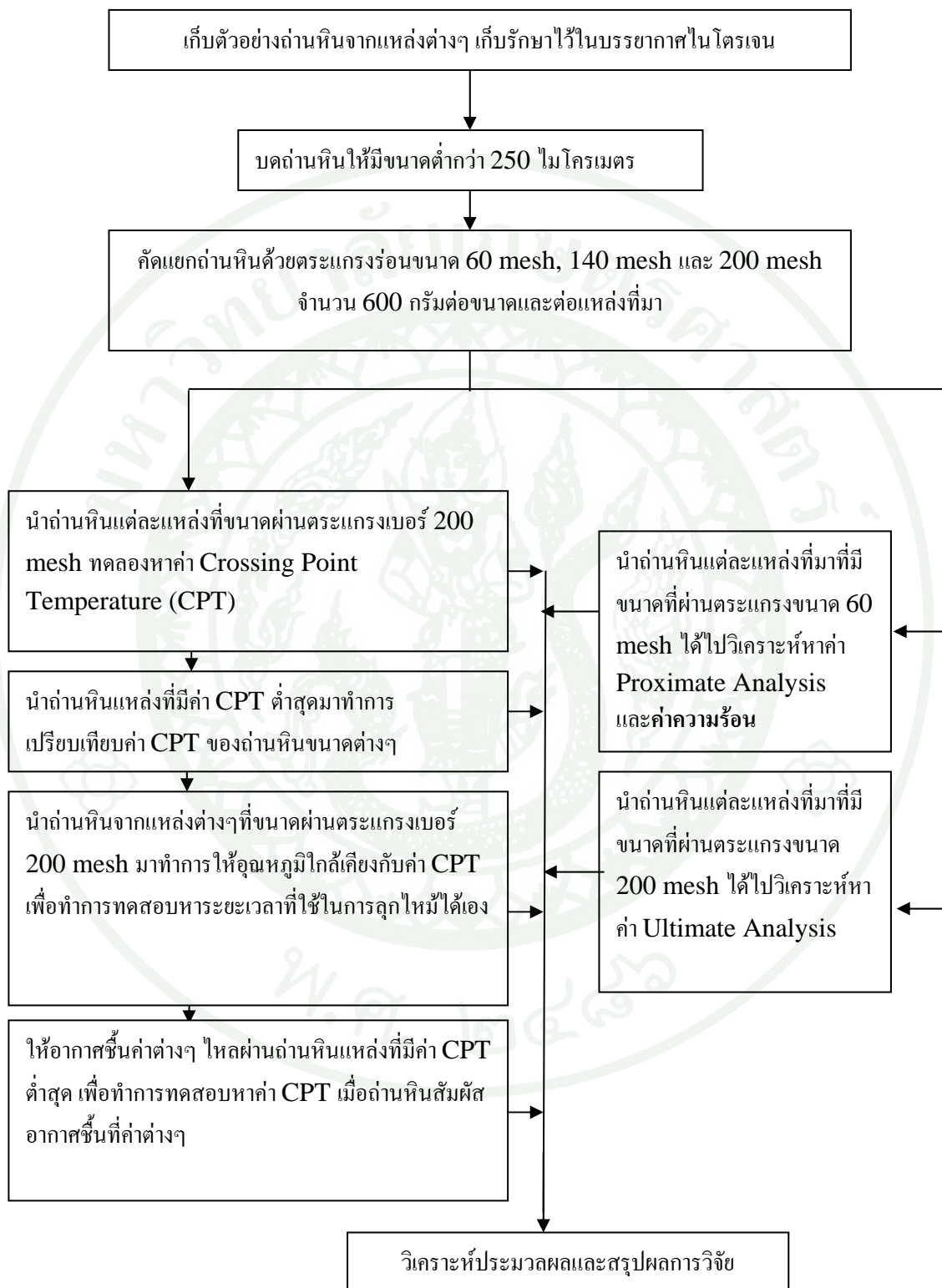
7) ทำการทดลองข้อ 1-5 ใหม่ โดยการเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ยคงที่ จนกระทั่งอุณหภูมิที่ส่งผลให้ถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์เกิดการลุกลามใหม่ได้เอง

8) วิเคราะห์ผลการทดลอง Cross Point Temperature ของถ่านหินที่สัมผัสกับความชื้นสัมพัทธ์ค่าต่างๆ เพื่อตรวจสอบหาถ่านหินที่มีความสามารถเกิดการลุกลามใหม่ได้เองที่อุณหภูมิมิบรรยากาศต่ำสุด (ค่า CPT น้อยที่สุด)

3. การจัดการข้อมูลวิเคราะห์ผลทำโดยการแปรผลการทดลองและผลวิเคราะห์คุณภาพของถ่านหินนำมาประมวลผลการทดลองทั้งหมดเข้าด้วยกัน เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ที่มีอิทธิพลต่อการลุกลามใหม่ได้เองของถ่านหินซับบิทูมินัส

4. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองโดยนำทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องมาช่วยอธิบายผลการทดลอง และเสนอแนวทางที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน ซึ่งขั้นตอนในงานวิจัยสามารถสรุปให้เห็นชัดเจนดังแสดงในแผนภูมิการวิจัย

แผนภูมิแสดงขั้นตอนการวิจัย



ผลและวิจารณ์

1. ผลการวิเคราะห์ทางเคมีของตัวอย่างถ่านหิน

1) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวมของถ่านหินและค่าความร้อนของถ่านหิน

จากตัวอย่างถ่านหินทั้งหมด 3 แหล่ง จำนวน 4 ตัวอย่าง คือ แหล่งเหมือง JORONG ประเทศอินโดนีเซีย จำนวน 1 ตัวอย่าง (JORONG 262) แหล่งเหมือง ADARO ประเทศอินโดนีเซีย จำนวน 2 ตัวอย่าง (ADARO 265, ADARO 266) และแหล่งเหมือง PHOENIX ประเทศสาธารณรัฐแอฟริกาใต้ จำนวน 1 ตัวอย่าง (PHOENIX 18) เมื่อนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวมของถ่านหินและค่าความร้อน ได้ผลตามตารางที่ 15 พบว่า ถ่านหินทั้ง 4 ตัวอย่าง มีผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวมของถ่านหินโดยไม่รวมค่าความชื้น ดังนี้ มีร้อยละของสารระเหย อยู่ในช่วง 48.25-49.73 ร้อยละคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วง 41.96-48.33 ร้อยละเถ้าอยู่ในช่วง 3.42-8.32 และมีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 9,511 – 10,997 Btu/lb จากข้อมูลร้อยละคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนของถ่านหินนั้น พบว่าค่าความร้อนแปรผันตรงกับค่าร้อยละคาร์บอนคงตัวของถ่านหิน กล่าวคือเมื่อค่าร้อยละคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นค่าความร้อนของถ่านหินจะเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาเกรดของถ่านหินตามมาตรฐาน ASTM D388 พบว่าถ่านหินทั้งหมดเป็นถ่านหินซับบิทูมินัส บี ทั้ง 4 ตัวอย่าง

2) ผลการวิเคราะห์ค่าความชื้นและคุณสมบัติอื่นๆของถ่านหินตัวอย่างที่ขนาดต่างๆ

2.1) ผลการวิเคราะห์ค่าความชื้นและคุณสมบัติอื่นๆของถ่านหินตัวอย่างจากเหมือง JORONG ที่ขนาดต่างๆ

จากตัวอย่างถ่านหินจากเหมือง JORONG 262 เมื่อนำบดและทำการคัดแยกขนาดของถ่านหินเป็น 3 ขนาด คือ ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาค 75-106 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาค 106-250 ไมโครเมตร เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าความชื้นและค่าความร้อนของถ่านหิน ได้ผลตามตารางที่ 16 ดังนี้ เมื่อถ่านหินมีขนาดอนุภาคเล็กจะมีค่าร้อยละความชื้นของถ่านหินเพิ่มขึ้น ซึ่งดูได้จาก ถ่านหิน JORONG 262 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร มีค่าร้อยละ

ความชื้นเท่ากับ 5.58 ซึ่งเป็นค่ามากกว่าถ่านหิน JORONG 262 ขนาดอนุภาคเท่ากับ 75 – 106 ไมโครเมตร ที่มีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 5.54 และถ่านหิน JORONG 262 ขนาดอนุภาคเท่ากับ 106-250 ไมโครเมตร ที่มีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 5.37 ตามลำดับ

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวม (Proximate Analysis) และคุณสมบัติอื่นๆของ ถ่านหินตัวอย่าง (ไม่รวมความชื้น)

ตัวอย่าง ถ่านหิน*	ความชื้น (Wet basis %)	วิเคราะห์องค์ประกอบ โดยรวม(dry basis,db)			คุณสมบัติอื่นๆ		เกรดถ่านหิน
		สาร ระเหย ได้(%)	เถ้า (%)	คาร์บอน คงตัว(%)	ค่าความร้อน		
					(Cal/g)	(Btu/lb)	
JORONG 262	5.58	48.25	3.42	48.33	6,006	10,810	ซับบิทูมินัส เอ
ADARO 265	4.29	48.47	4.58	46.95	6,109	10,997	ซับบิทูมินัส เอ
ADARO 266	7.96	49.10	6.03	44.87	5,543	9,977	ซับบิทูมินัส บี
PHOENIX 18	8.86	49.73	8.32	41.96	5,284	9,511	ซับบิทูมินัส บี

ตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์ค่าความชื้นและคุณสมบัติอื่นๆของถ่านหิน JORONG ขนาดต่างๆ

ถ่านหิน JORONG 262 ขนาด(μm)	วิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวม(wt %)		คุณสมบัติอื่นๆ	
	ความชื้น(%)		ค่าความร้อน (Cal/g)	(Btu/lb)
<75	5.58		6,006	10,810
75-106	5.54		5,727	10,308
106-250	5.37		5,703	10,264

2.2) ผลการวิเคราะห์ค่าความชื้นและคุณสมบัติอื่นๆของถ่านหินตัวอย่างจากเหมือง ADARO ที่ขนาดต่างๆ

จากตัวอย่างถ่านหินจากเหมือง ADARO เมื่อนำมาบดและทำการคัดแยกขนาดของถ่านหินเป็น 3 ขนาด คือ ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาค 75-106 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาค 106-250 ไมโครเมตร เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าความชื้นและค่าความร้อนของถ่านหินได้ผลตามตารางที่ 17 ดังนี้ เมื่อถ่านหินมีขนาดอนุภาคเล็กจะมีค่าร้อยละความชื้นของถ่านหินเพิ่มขึ้น ซึ่งดูได้จาก ถ่านหิน ADARO 265 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร มีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 4.29 ซึ่งเป็นค่ามากกว่าถ่านหิน ADARO 265 ขนาดอนุภาคเท่ากับ 75 – 106 ไมโครเมตร ที่มีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 4.20 และถ่านหิน ADARO 265 ขนาดอนุภาคเท่ากับ 106-250 ไมโครเมตร ที่มีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 4.04 ตามลำดับ ซึ่งเป็นเมื่อดูจากถ่านหิน ADARO 266 ก็ได้ผลไปในทิศทางเดียวกันคือถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร มีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 7.96 ซึ่งเป็นค่ามากกว่าถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเท่ากับ 75 – 106 ไมโครเมตร ที่มีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 7.48 และถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเท่ากับ 106-250 ไมโครเมตร ที่มีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 7.17 ตามลำดับ

ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์ค่าความชื้นและคุณสมบัติอื่นๆของถ่านหินADARO ขนาดต่างๆ

NO.	ถ่านหิน ADARO ขนาด(μm)	วิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวม(wt %)	คุณสมบัติอื่นๆ	
		ความชื้น(%)	ค่าความร้อน (Cal/g)	(Btu/lb)
265	<75	4.29	6,109	10,997
	75-106	4.20	6,190	11,142
	106-250	4.04	6,204	11,167
266	<75	7.96	5,543	9,977
	75-106	7.48	6,102	10,984
	106-250	7.17	5,983	10,769

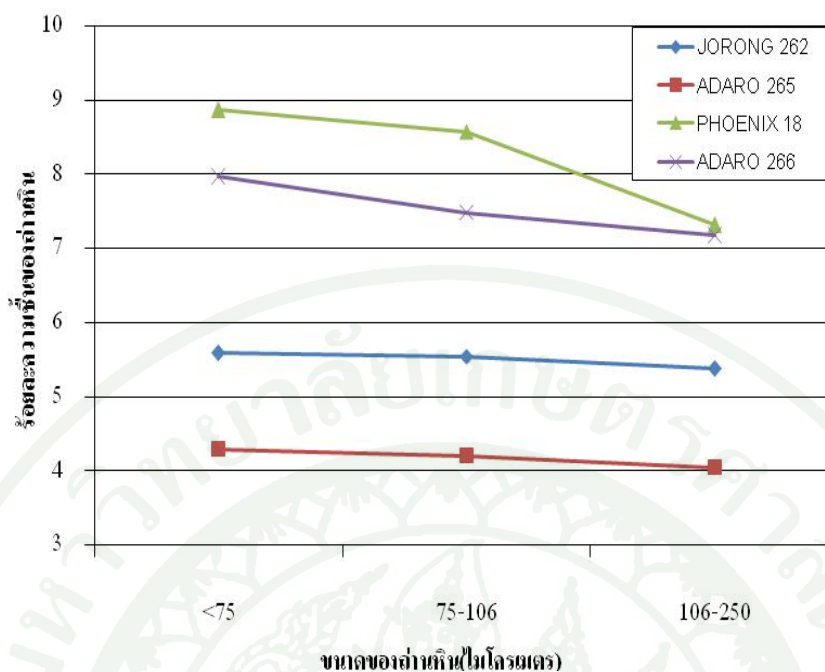
2.3) ผลการวิเคราะห์ค่าความชื้นและคุณสมบัติอื่นๆของถ่านหินตัวอย่างจากเหมือง PHOENIX ที่ขนาดต่างๆ

จากตัวอย่างถ่านหินจากเหมือง PHOENIX 18 เมื่อนำมาบดและทำการคัดแยกขนาดของถ่านหินเป็น 3 ขนาด คือ ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาค 75-106 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาค 106-250 ไมโครเมตร เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าความชื้นและค่าความร้อนของถ่านหิน ได้ผลตามตารางที่ 18 ดังนี้ เมื่อถ่านหินมีขนาดอนุภาคเล็กจะมีค่าร้อยละความชื้นของถ่านหินเพิ่มขึ้น ซึ่งดูได้จาก ถ่านหิน PHOENIX 18 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร มีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 8.86 ซึ่งเป็นค่ามากกว่าถ่านหิน PHOENIX 18 ขนาดอนุภาคเท่ากับ 75 – 106 ไมโครเมตร ที่มีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 8.57 ถ่านหิน PHOENIX 18 ขนาดอนุภาคเท่ากับ 106-250 ไมโครเมตร ที่มีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 7.31 ตามลำดับ

ตารางที่ 18 ผลการวิเคราะห์ค่าความชื้นและคุณสมบัติอื่นๆของถ่านหิน PHOENIX ขนาดต่างๆ

ถ่านหิน PHOENIX 18 ขนาด(μm)	วิเคราะห์หึ่งค์ประกอบโดยรวม(wt %) ความชื้น(%)	คุณสมบัติอื่นๆ ค่าความร้อน	
		(Cal/g)	(Btu/lb)
<75	8.86	5,284	9,511
75-106	8.57	5,380	9,684
106-250	7.31	5,418	9,752

สรุปผลตัวอย่างถ่านหินจากเหมืองทั้ง 3 เหมือง เมื่อนำมาบดและทำการคัดแยกขนาดของถ่านหินเป็น 3 ขนาด คือ ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาค 75-106 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาค 106-250 ไมโครเมตร แล้วนำมาวิเคราะห์ค่าความชื้นและค่าความร้อนของถ่านหิน พบว่า เมื่อถ่านหินมีขนาดอนุภาคเล็กจะมีค่าร้อยละความชื้นเพิ่มขึ้น โดยถ่านหิน PHOENIX 18 มีค่าร้อยละความชื้นของถ่านหินมากที่สุด รองลงมาเป็น ถ่านหิน ADARO 266 ถ่านหิน JORONG 262 จะและถ่านหิน ADARO 265 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ร้อยละความชื้นของถ่านหินตัวอย่างเปรียบเทียบตามขนาดอนุภาคของถ่านหิน

3) ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหิน

จากตัวอย่างถ่านหินทั้งหมด 3 แหล่ง จำนวน 4 ตัวอย่าง คือ แหล่งเหมือง JORONG ประเทศอินโดนีเซีย จำนวน 1 ตัวอย่าง (JORONG 262) แหล่งเหมือง ADARO ประเทศอินโดนีเซีย จำนวน 2 ตัวอย่าง (ADARO 265, ADARO 266) และแหล่งเหมือง PHOENIX ประเทศสาธารณรัฐแอฟริกาใต้ จำนวน 1 ตัวอย่าง (PHOENIX 18) เมื่อนำมาวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหิน ได้ผลตามตารางที่ 19 พบว่า ถ่านหินทั้ง 4 ตัวอย่าง มีผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหิน ดังนี้ มีร้อยละของคาร์บอนอยู่ในช่วง 54.83-65.20 ร้อยละของไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 4.86-5.34 ร้อยละของไนโตรเจนอยู่ในช่วง 0.82-0.98 และมีค่าร้อยละของซัลเฟอร์อยู่ในช่วง 0.09-0.73 และร้อยละของออกซิเจนอยู่ในช่วง 28.87-38.38 ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ่านหินที่มีคาร์บอนเป็นธาตุองค์ประกอบมากที่สุดคือ JORONG 262 ถ่านหินที่มีไฮโดรเจนเป็นธาตุองค์ประกอบมากที่สุด คือ ADARO 265 ถ่านหินที่มีไนโตรเจน, ซัลเฟอร์และออกซิเจนเป็นเป็นธาตุองค์ประกอบมากที่สุด คือ PHOENIX 18 จากข้อมูลโดยรวมแสดงให้เห็นว่าถ่านหินตัวอย่างทั้งหมดอยู่ในช่วงถ่านหินซับบิทูนิมัส

ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหิน (Ultimate Analysis)

ตัวอย่างถ่านหิน	ธาตุองค์ประกอบ, (wt% dry ,ash-free)				
	C	H	N	S	O(diff.)
JORONG 262	65.20	4.86	0.93	0.14	28.87
ADARO 265	61.72	5.34	0.96	0.58	31.41
ADARO 266	63.47	5.14	0.82	0.09	30.48
PHOENIX 18	54.83	5.08	0.98	0.73	38.38

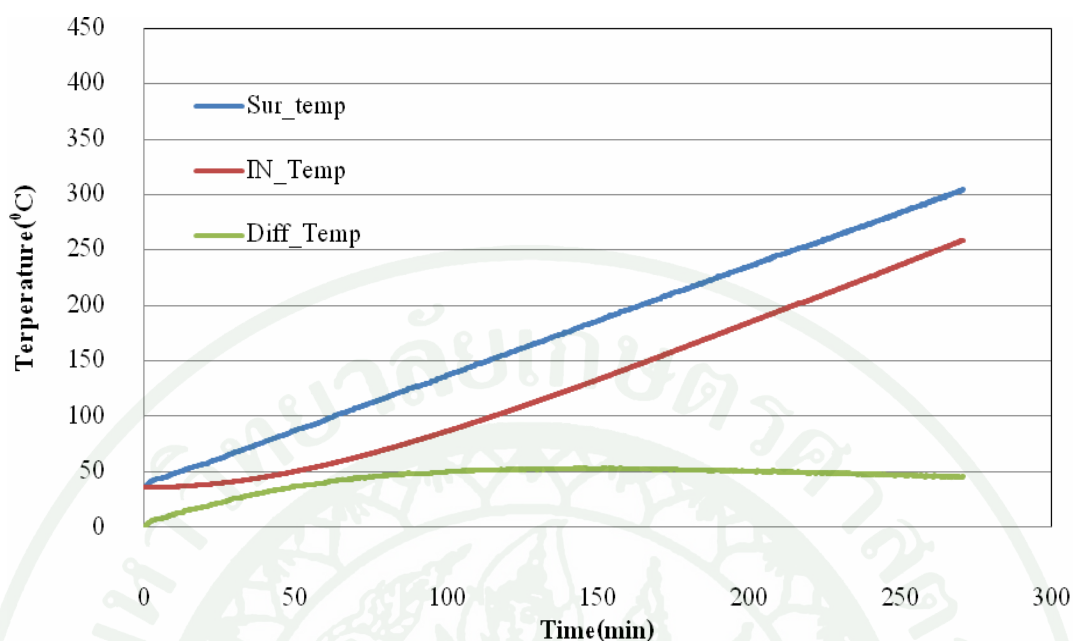
* หมายเหตุขนาดอนุภาคของถ่านหินตัวอย่างเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร

2. ผลการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน

เมื่อทำการให้ความร้อนกับถ่านหินตัวอย่างในตู้อบ ด้วยอัตราการที่ 1 °C/min วัดอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างถ่านหินกับตู้อบ โดยถ่านหินตัวอย่างถูกบรรจุอยู่ในชุดเครื่องปฏิกรณ์ถังสแตนเลสทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 เซนติเมตร ความสูง 14 เซนติเมตร ซึ่งเป็นภาชนะปิดที่มีการควบคุมการไหลของอากาศเข้าและออก ซึ่งในการทดลองนี้ อุณหภูมิเริ่มต้นของถ่านหินน้อยกว่าตู้อบ เมื่อถ่านหินเริ่มคายความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน อุณหภูมิของถ่านหินจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิของตู้อบ และความร้อนที่เกิดขึ้นในถ่านหินจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งทำให้อุณหภูมิของถ่านหินสูงกว่าอุณหภูมิของตู้อบ ซึ่งจุดที่อุณหภูมิของถ่านหินเท่ากับอุณหภูมิภายในตู้อบ (ก่อนที่ถ่านหินจะมีอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิของตู้อบ) เรียกอุณหภูมินั้นว่า อุณหภูมิจุดตัด (Crossing point temperature) และถือว่าเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ถ่านหินเกิดการลุกไหม้ได้เอง มีรายละเอียดผลการทดลอง ดังนี้

1) ผลของอัตราการไหลของอากาศที่มีต่อการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน

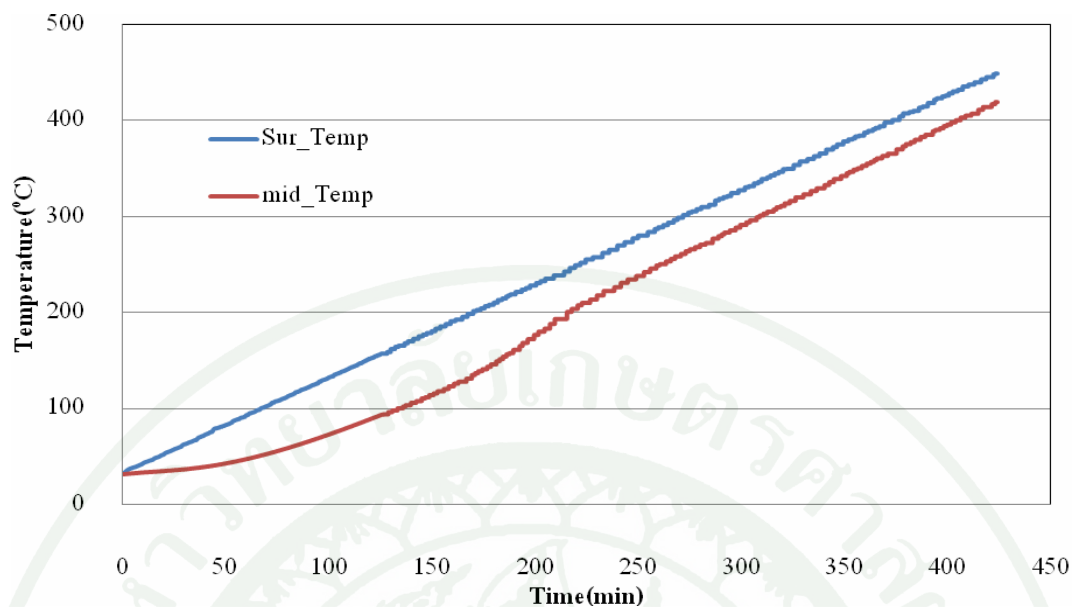
เมื่อทำการศึกษาอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมกับการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน โดยการทดสอบหาอัตราการไหลของอากาศที่ทำให้ถ่านหินสามารถเกิดการลุกไหม้ได้เองที่อุณหภูมิต่ำที่สุดของถ่านหินตัวอย่าง



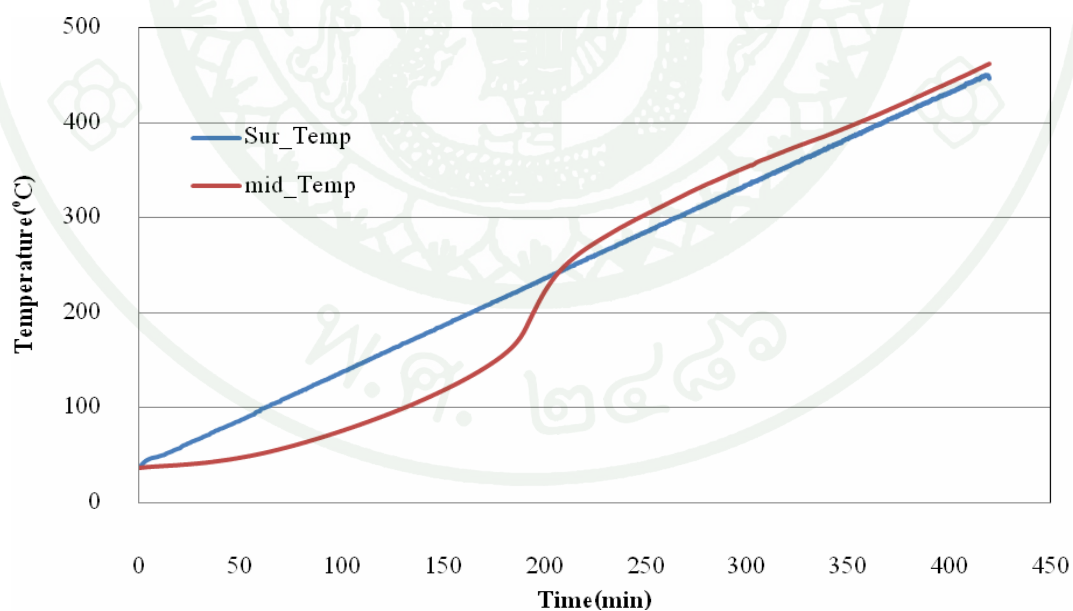
ภาพที่ 11 อุณหภูมิของอากาศภายในชุดทดลอง (IN_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายนอกชุดทดลอง (Sur_Temp) ที่ระยะเวลาต่างๆ

ผลการทดลองการเกิดการลุกไหม้ด้วยตัวเองของถ่านหินที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกองที่ $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ได้ผลการทดลอง ภาพที่ 12 -18

ภาพที่ 11 แสดงให้เห็นความแตกต่างของอุณหภูมิภายนอกชุดทดลองและภายในชุดทดลองที่ไม่ได้ใส่ถ่านหินตัวอย่าง ซึ่งหมายถึง อุณหภูมิความแตกต่างของภายในและภายนอกชุดทดลองเริ่มต้นจะมีความแตกต่างกันเป็นศูนย์ และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นความแตกต่างของอุณหภูมิสูงขึ้นจนเวลาผ่านไป 154 นาที อุณหภูมิแตกต่างสูงสุดเท่ากับ 53.9 องศาเซลเซียส และจากนั้น อุณหภูมิความแตกต่างภายในและภายนอกชุดทดลองจะลดลงเล็กน้อย (ค่อนข้างคงที่) ซึ่งค่าความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกชุดทดลองจะใช้เป็นค่าเปรียบเทียบเพื่อหาอุณหภูมิภายในชุดทดลองเมื่อทราบค่าอุณหภูมิภายนอกชุดทดลองเมื่อทำการใส่ถ่านหินเพื่อทำการทดลองหาอุณหภูมิจุดตัด ต่อไป



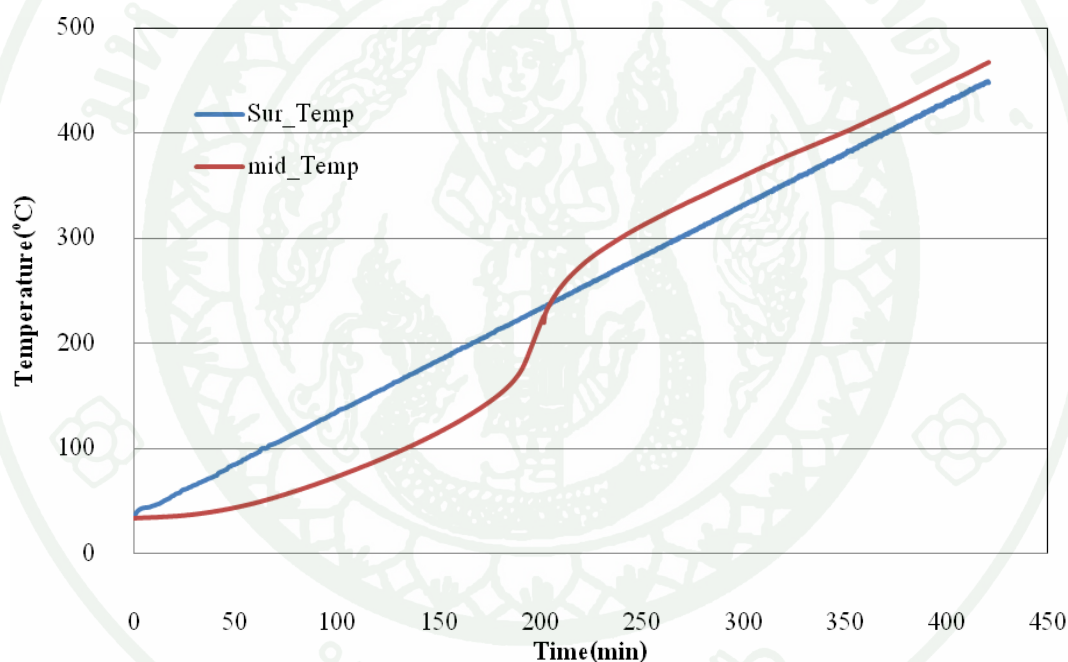
ภาพที่ 12 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 50 ml/min



ภาพที่ 13 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 300 ml/min

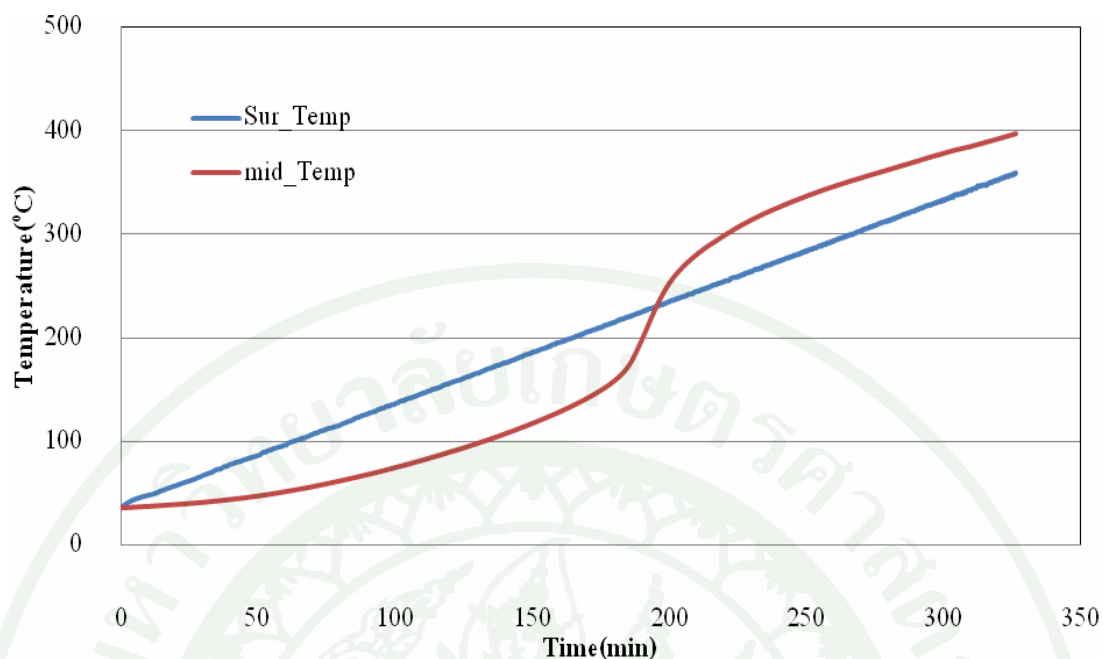
จากภาพที่ 12 เห็นได้ชัดเจนว่าที่อัตราการไหลของอากาศ 50 ml/min นั้น ถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรไม่สามารถเกิดลูกใหม่ขึ้นได้เอง เพราะอุณหภูมิภายในชุดทดลองต่ำกว่าอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลอง

จากภาพที่ 13 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อัตราการไหลของอากาศ 300 ml/min ถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรสามารถเกิดลูกใหม่ขึ้นได้เองที่อุณหภูมิภายนอกชุดการทดลองเท่ากับ 242.9°C ดังจะเห็นได้จากอุณหภูมิภายในชุดทดลองสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลองที่อุณหภูมิดังกล่าว



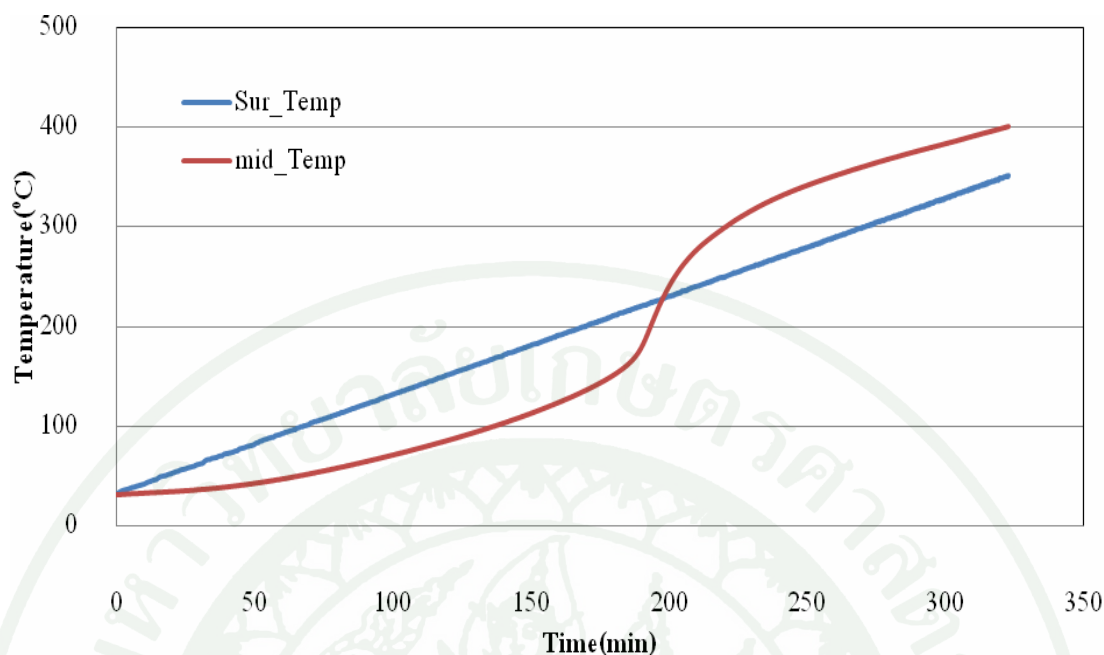
ภาพที่ 14 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 400 ml/min

จากภาพที่ 14 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อัตราการไหลของอากาศ 400 ml/min ถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรสามารถเกิดลูกใหม่ขึ้นได้เองที่อุณหภูมิภายนอกชุดการทดลองเท่ากับ 238.0°C ซึ่งเห็นได้จากอุณหภูมิภายในชุดทดลองสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลองที่อุณหภูมิดังกล่าว



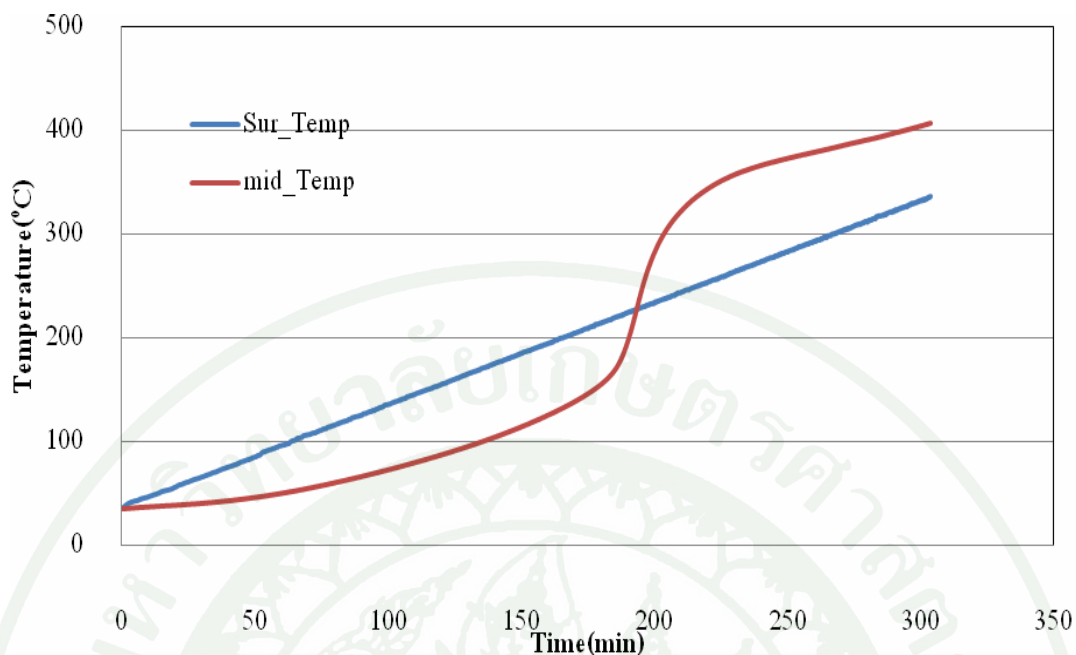
ภาพที่ 15 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 500 ml/min

จากภาพที่ 15 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อัตราการไหลของอากาศ 500 ml/min ถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรสามารถเกิดลุกไหม้ขึ้นได้เองที่อุณหภูมิภายนอกชุดการทดลองเท่ากับ 230.6 °C ดังเห็นได้จากอุณหภูมิภายในชุดทดลองสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลองที่อุณหภูมิดังกล่าว



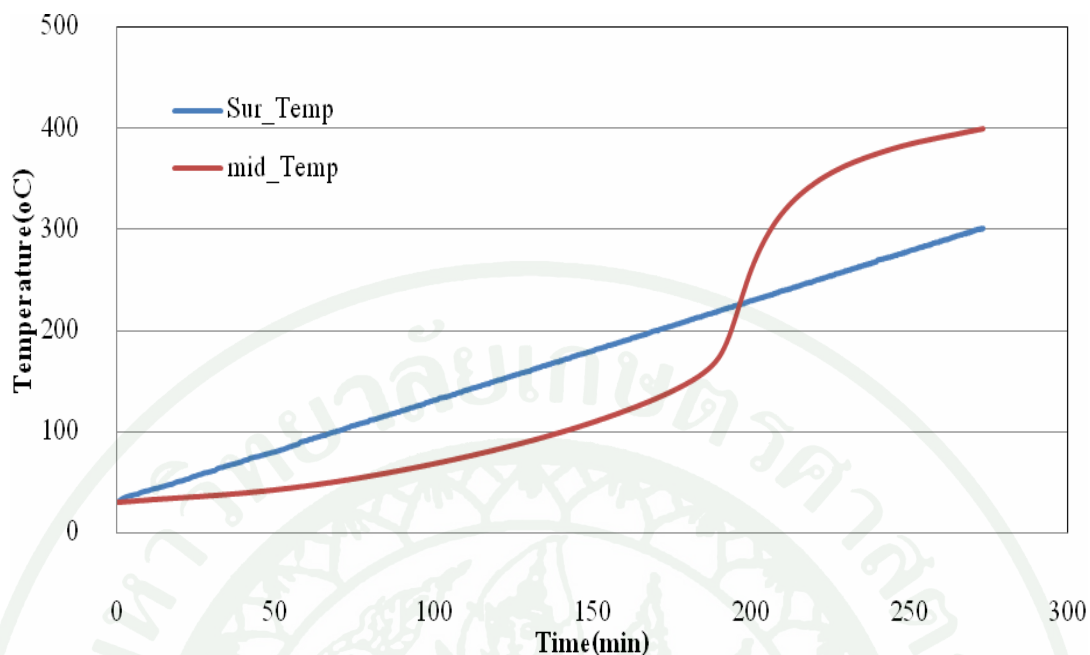
ภาพที่ 16 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 600 ml/min

จากภาพที่ 16 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อัตราการไหลของอากาศ 600 ml/min ถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรสามารถเกิดลุกไหม้ขึ้นได้เองที่อุณหภูมิภายนอกชุดการทดลองเท่ากับ 228.9 °C ดังเห็นได้จากอุณหภูมิภายในชุดทดลองสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลองที่อุณหภูมิดังกล่าว



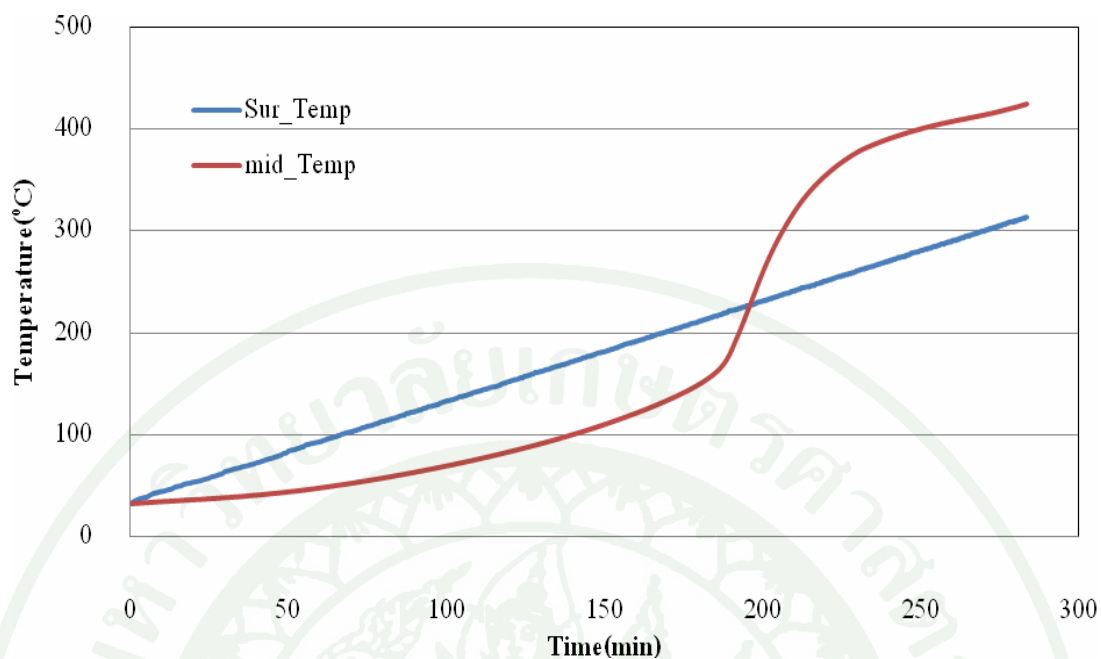
ภาพที่ 17 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 1,000 ml/min

จากภาพที่ 17 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อัตราการไหลของอากาศ 1,000 ml/min ถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรสามารถเกิดลุกไหม้ขึ้นได้เองที่อุณหภูมิภายนอกชุดการทดลองเท่ากับ 227.5 °C ดังเห็นได้จากอุณหภูมิภายในชุดทดลองสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลองที่อุณหภูมิดังกล่าว



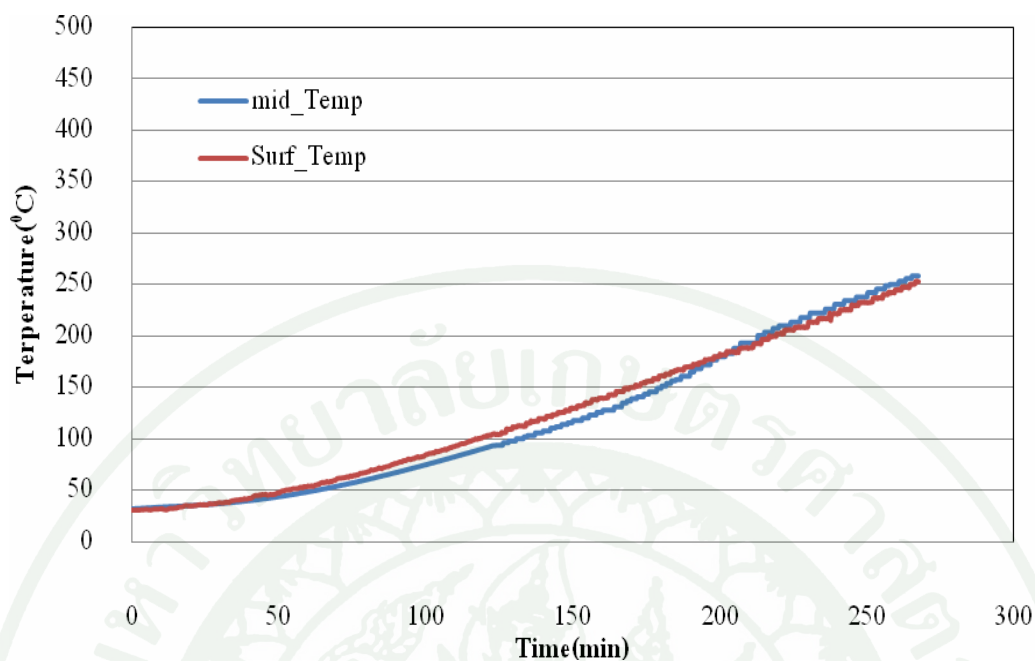
ภาพที่ 18 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 1,200 ml/min

จากภาพที่ 18 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อัตราการไหลของอากาศ 1,200 ml/min ถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรสามารถเกิดลุกไหม้ขึ้นได้เองที่อุณหภูมิภายนอกชุดการทดลองเท่ากับ 226.3 °C ดังเห็นได้จากอุณหภูมิภายในชุดทดลองสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลองที่อุณหภูมิดังกล่าว



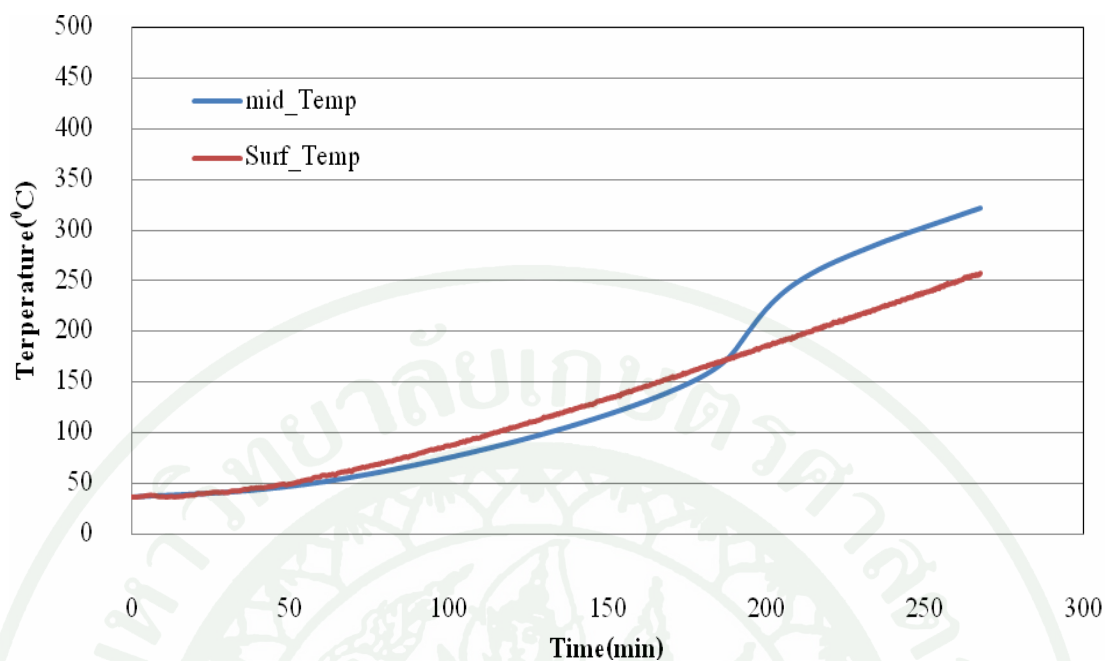
ภาพที่ 19 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 1,400 ml/min

จากภาพที่ 19 ที่อัตราการไหลของอากาศ 1,400 ml/min ถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรสามารถเกิดลุกไหม้ขึ้นได้เองที่อุณหภูมิภายนอกชุดการทดลองเท่ากับ 227.3 °C ดังเห็นได้จากอุณหภูมิภายในชุดทดลองสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกชุดการทดลองที่อุณหภูมิดังกล่าว



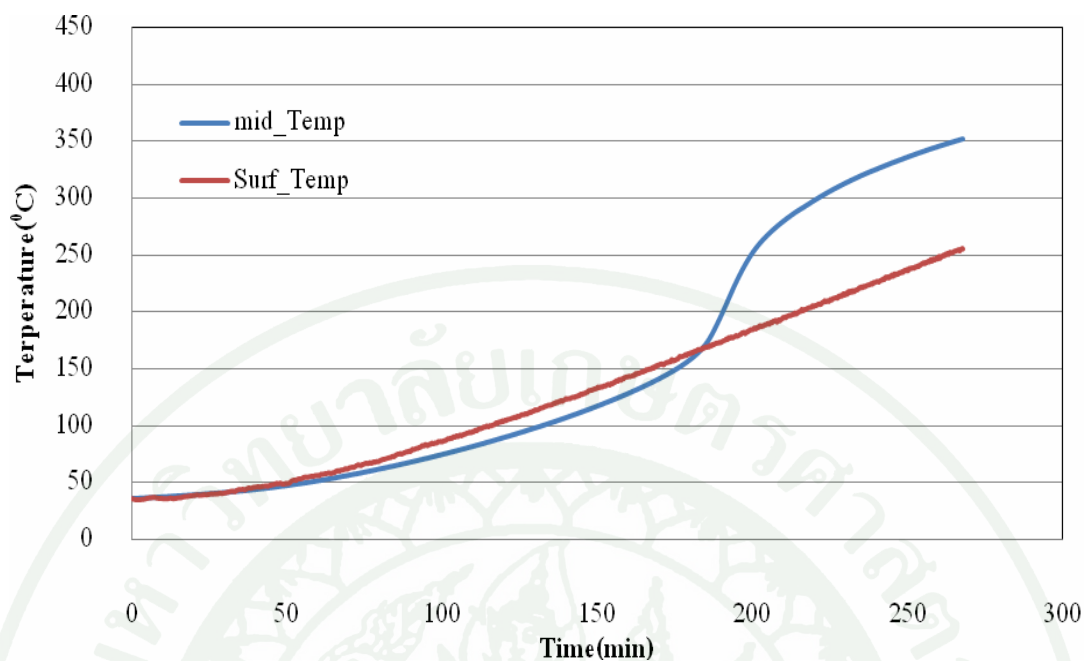
ภาพที่ 20 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัส (Surf_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 50 ml/min

จากภาพที่ 20 ที่อัตราการไหลของอากาศ 50 ml/min ถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรสามารถเกิดลุกไหม้ขึ้นได้เองที่อุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัสเท่ากับ 184.6 °C ดังเห็นได้จากอุณหภูมิภายในชุดทดลองสูงกว่าอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัสที่อุณหภูมิดังกล่าว



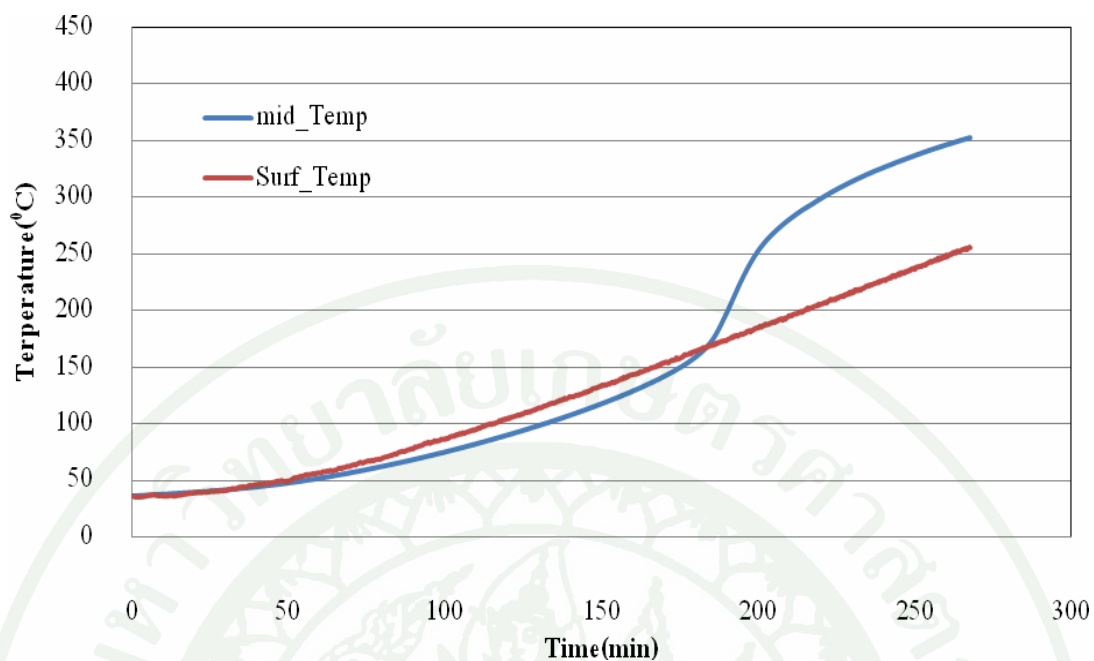
ภาพที่ 21 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัส (Surf_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 300 ml/min

จากภาพที่ 21 ที่อัตราการไหลของอากาศ 300 ml/min ถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองที่อุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัสเท่ากับ 172.3 °C ดังเห็นได้จากอุณหภูมิภายในชุดทดลองสูงกว่าอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัสที่อุณหภูมิดังกล่าว



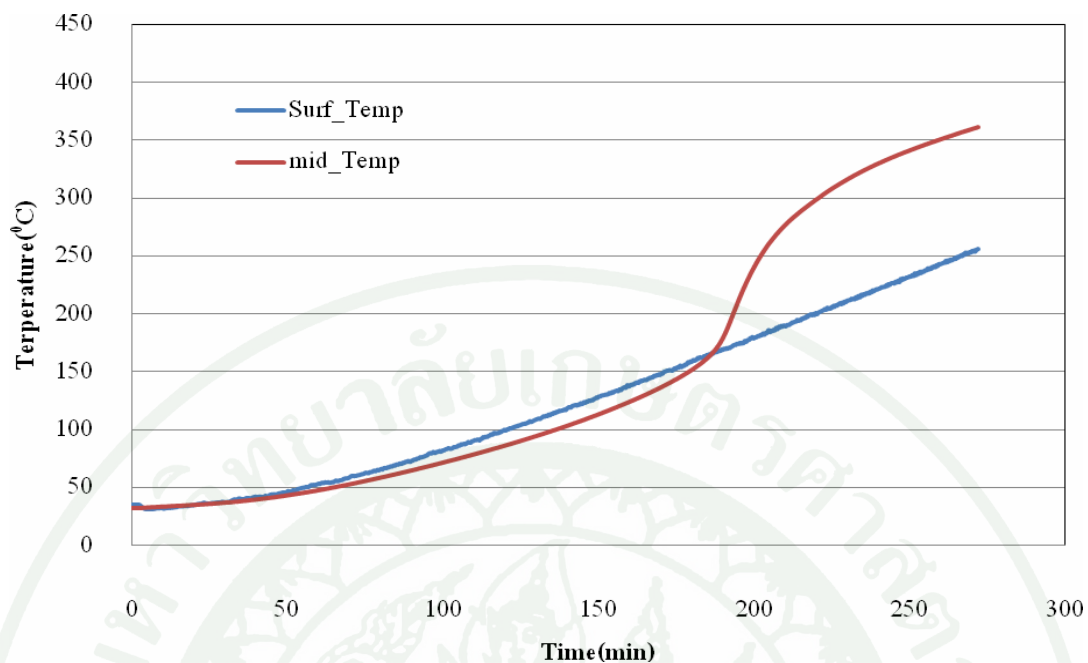
ภาพที่ 22 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัส (Surf_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 400 ml/min

จากภาพที่ 22 ที่อัตราการไหลของอากาศ 400 ml/min ถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองที่อุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัสเท่ากับ 171.3 °C



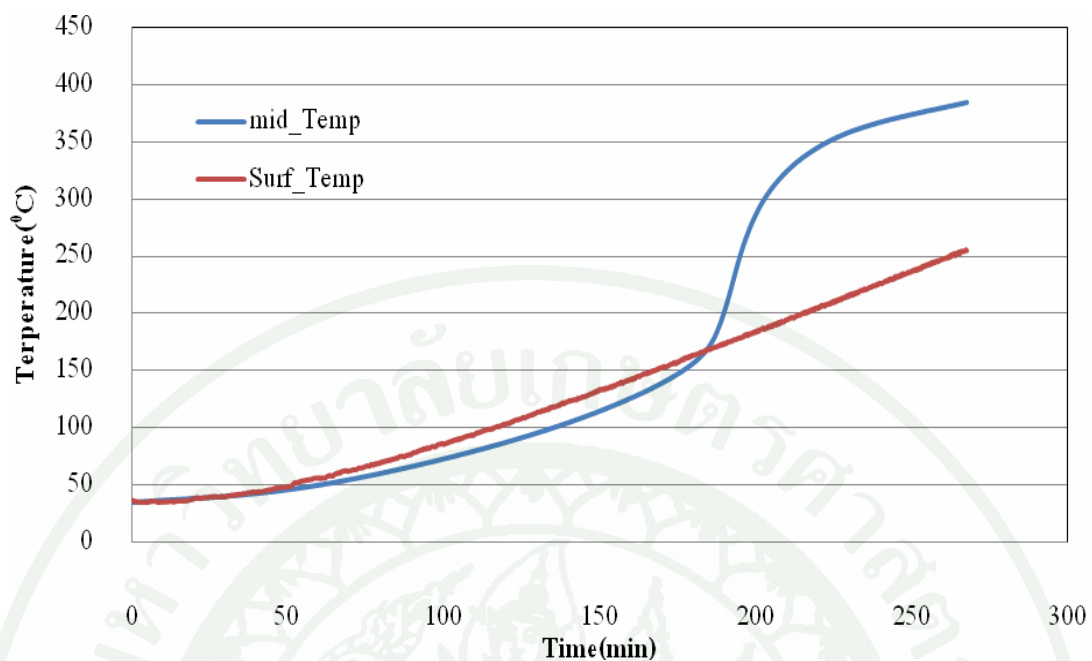
ภาพที่ 23 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัส (Surf_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 500 ml/min

จากภาพที่ 23 ที่อัตราการไหลของอากาศ 500 ml/min ถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองที่อุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัสเท่ากับ 168.6 °C



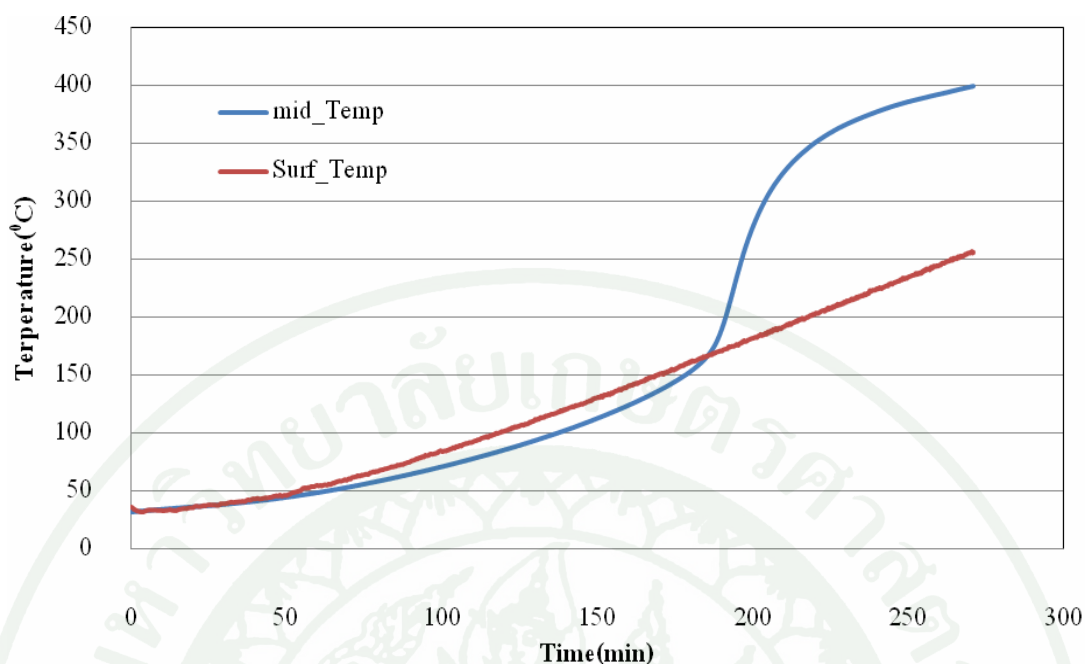
ภาพที่ 24 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัส (Surf_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 600 ml/min

จากภาพที่ 24 ที่อัตราการไหลของอากาศ 600 ml/min ถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองที่อุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัสเท่ากับ 168.3 °C



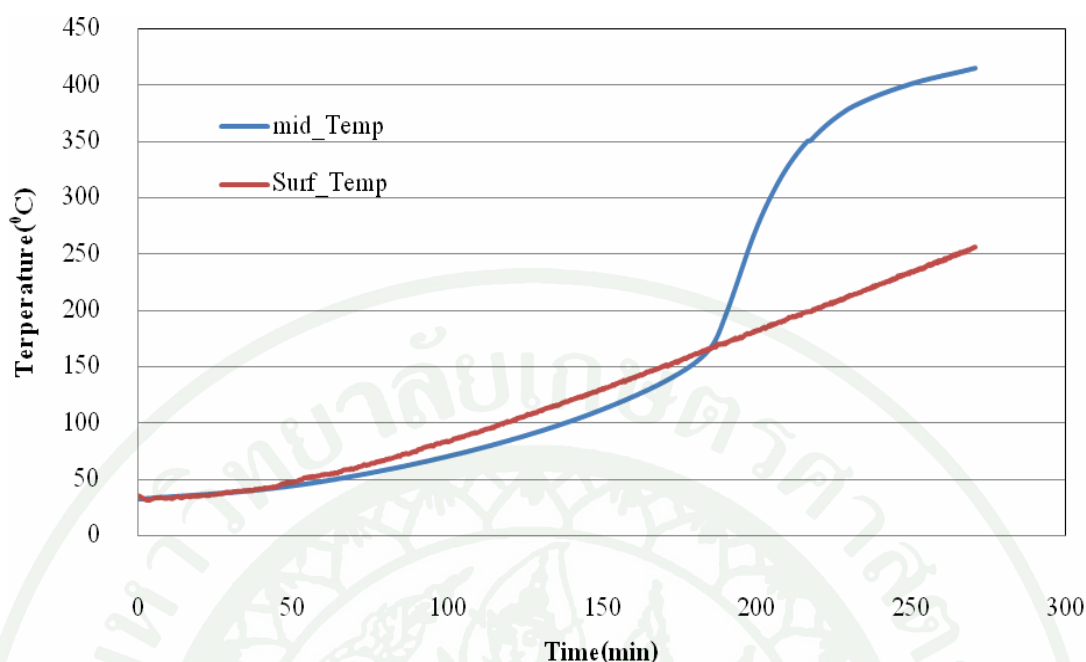
ภาพที่ 25 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัส (Surf_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 1,000 ml/min

จากภาพที่ 25 ที่อัตราการไหลของอากาศ 1,000 ml/min ถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองที่อุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัสเท่ากับ 167.5 °C



ภาพที่ 26 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัส (Surf_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 1,200 ml/min

จากภาพที่ 26 ที่อัตราการไหลของอากาศ 1,200 ml/min ถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองที่อุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัสเท่ากับ 166.1 °C



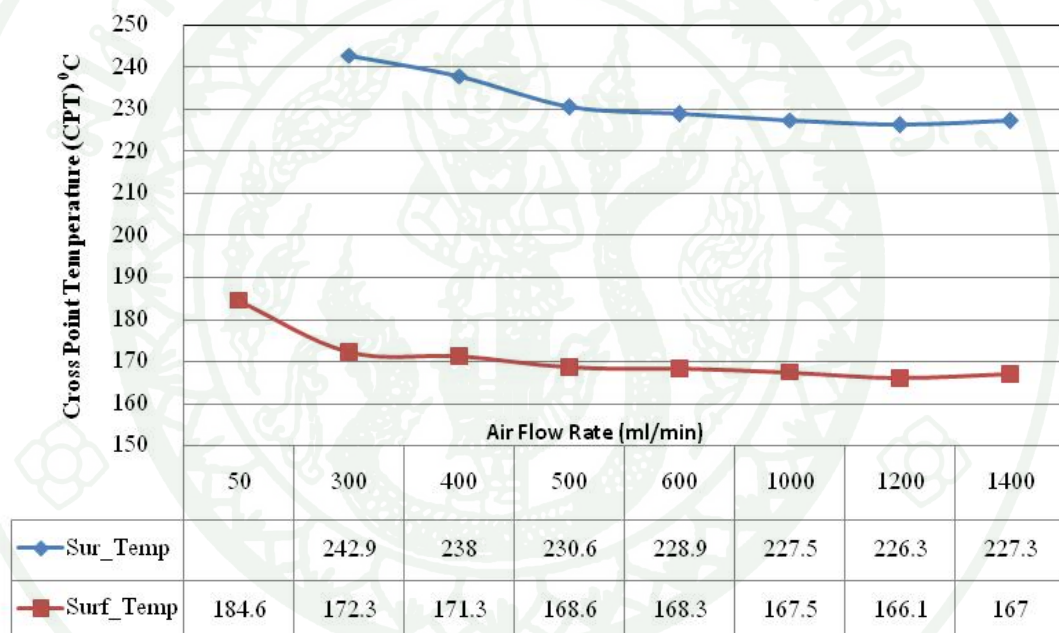
ภาพที่ 27 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัส (Surf_Temp) โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 1,400 ml/min

จากภาพที่ 27 ที่อัตราการไหลของอากาศ 1,400 ml/min ถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดการลุกไหม้ขึ้นได้เองที่อุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัสเท่ากับ 167.0 °C

เมื่อนำข้อมูลอุณหภูมิจุดตัด (อุณหภูมิที่ถ่านหินเกิดการลุกไหม้ได้เอง) ดังได้แสดงในภาพที่ 12-27 มาเทียบกับอัตราการไหลของอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 28 พบว่าอัตราการไหลของอากาศที่ 1,200 ml/min มีการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินที่อุณหภูมิต่ำสุด คือ 166.1 °C เมื่อเทียบกับอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านถ่านหินที่ 50, 300, 400, 500, 600, 1,000 และ 1,400 ml/min ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าที่อัตราการไหลของอากาศ เท่ากับ 1,200 ml/min มีค่าปริมาณออกซิเจนเหมาะสมกับการเกิดออกซิเดชันของถ่านหินขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นผลให้ถ่านหินที่สัมผัสอัตราการไหลของอากาศต่ำกว่าและสูงกว่า 1,200 ml/min สามารถเกิดการลุกไหม้ได้เองที่อุณหภูมิที่สูงกว่าหรือไม่ทำให้เกิดการลุกไหม้ได้เอง และอีกประการหนึ่งเมื่ออัตราการไหลมากขึ้นก็จะทำให้สูญเสียความร้อนมากขึ้น เนื่องจากความร้อนจะลดลงตามสัดส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศ นั่นคือทำให้การระบายความร้อนได้ดี ส่งผลให้ปริมาณความร้อนที่สะสมของถ่านหินน้อยและไม่เพียงพอต่อการทำให้เกิดการลุกไหม้ได้

เองของถ่านหิน ด้วยเหตุนี้จึงควบคุมค่าอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 1200 ml/min ในการทดลอง หัวข้อถัดไป

จากผลการทดลองหาอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมกับการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินชั้นบิทูมินัส พบว่ามีความสอดคล้องกับข้อมูลการลุกไหม้ได้เองถ่านหินลิกไนต์ที่ Küçük et al. (2003) ได้ศึกษาคุณลักษณะการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน และพบว่าหากอัตราการไหลมากหรือน้อยเกินไปจะส่งผลทำให้เกิดการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินที่อุณหภูมิสูงหรือไม่เกิดการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน



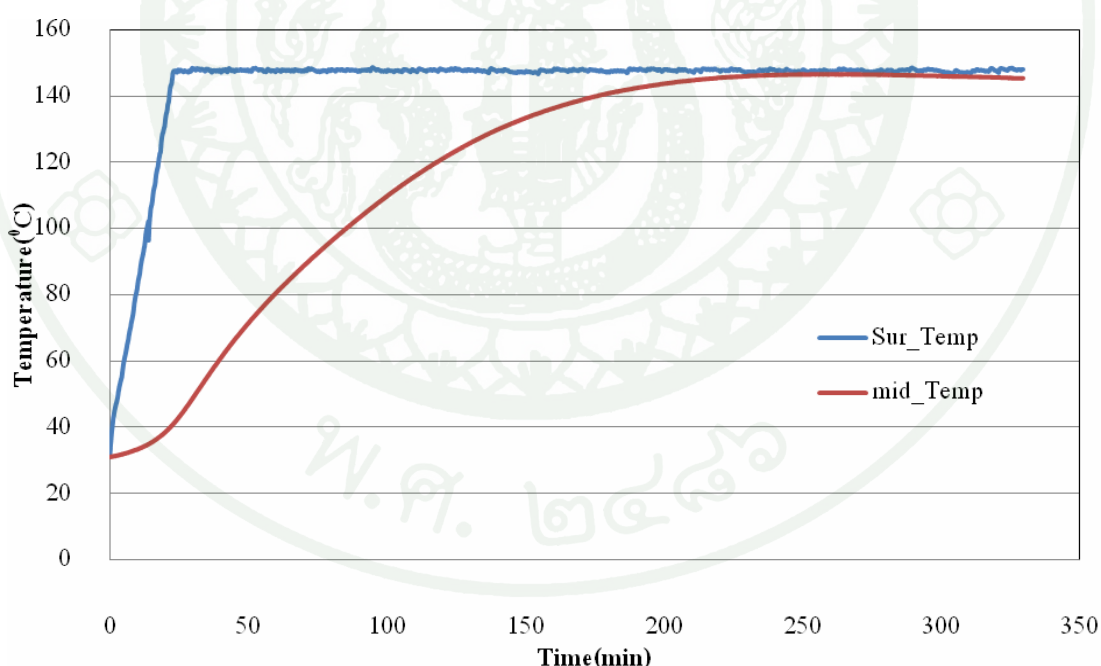
ภาพที่ 28 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรที่สามารถเกิดการลุกไหม้ได้เองที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ

2) ผลการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินเนื่องจากแหล่งที่มาของถ่านหิน

การทดลองนี้ได้นำถ่านหิน 4 ตัวอย่าง จาก 3 แหล่งมาทำการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิเริ่มต้นที่ถ่านหินเกิดการลุกไหม้ได้เอง โดยการกำหนดค่าอุณหภูมิคงที่ของตู้อบ แล้วสังเกตอุณหภูมิของถ่านหินที่เพิ่มขึ้นหากอุณหภูมิของถ่านหินสูงกว่าอุณหภูมิตู้อบแสดงว่าอุณหภูมิดังกล่าวเป็นอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เอง ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนค่าอุณหภูมิจนกว่าจะได้อุณหภูมิต่ำที่สุดที่ส่งผลให้อุณหภูมิถ่านหินสูงกว่าตู้อบอย่างต่อเนื่อง ผลการทดลองมีดังนี้

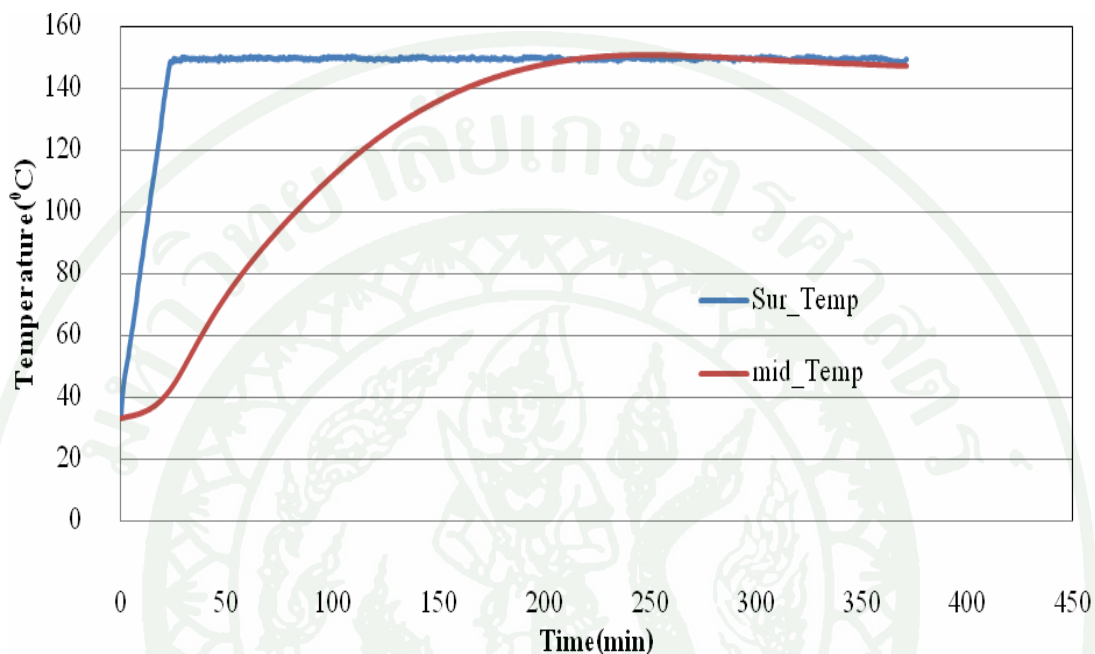
2.1) การเกิดการลุกไหม้ด้วยตัวเองของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร

ผลการทดลองการเกิดการลุกไหม้ด้วยตัวเองของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร แสดงดังภาพที่ 29-37



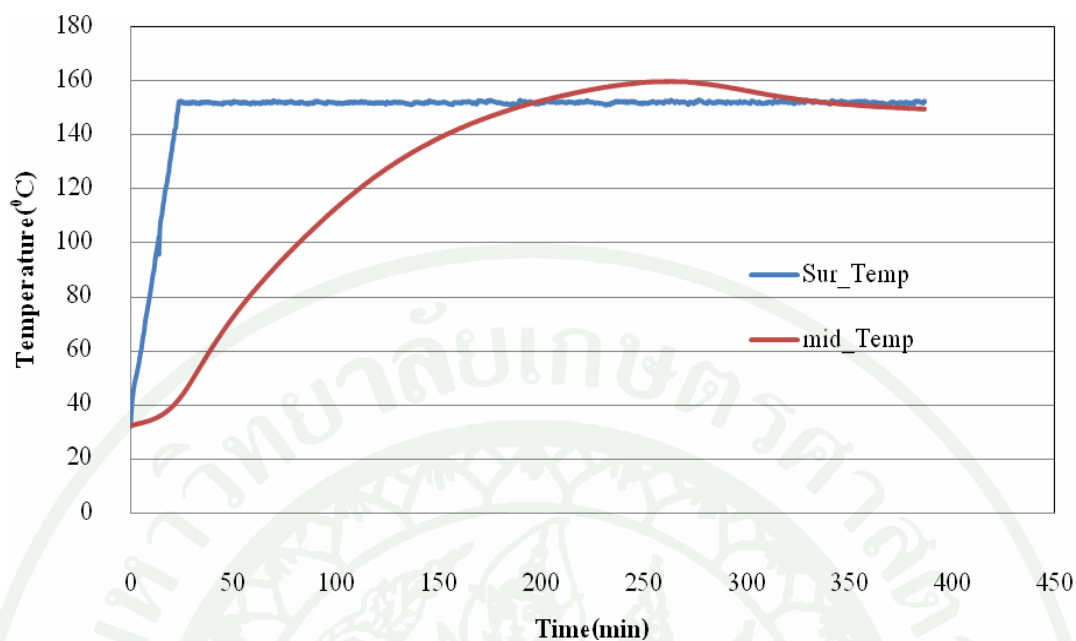
ภาพที่ 29 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.9 °C

จากภาพที่ 29 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.9°C นั้นพบว่าถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ไม่สามารถเกิดลุกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 300 นาที และถ่านหินมีค่าอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยเท่ากับ 145.9°C



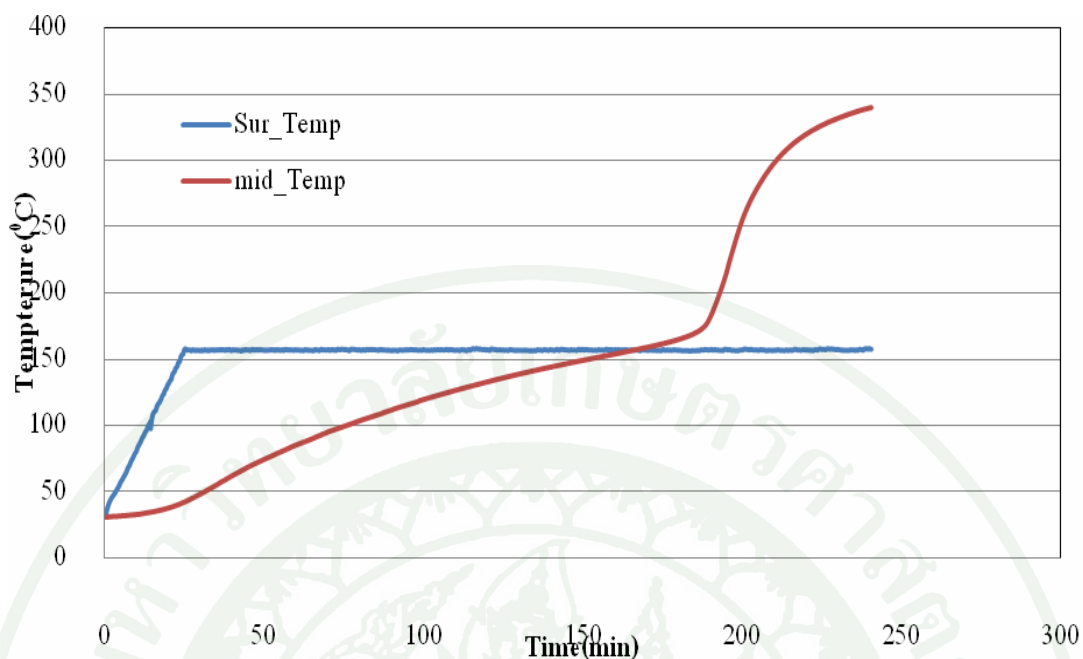
ภาพที่ 30 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 149.9°C

จากภาพที่ 30 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 149.9°C นั้นพบว่าถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลุกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 222 นาที



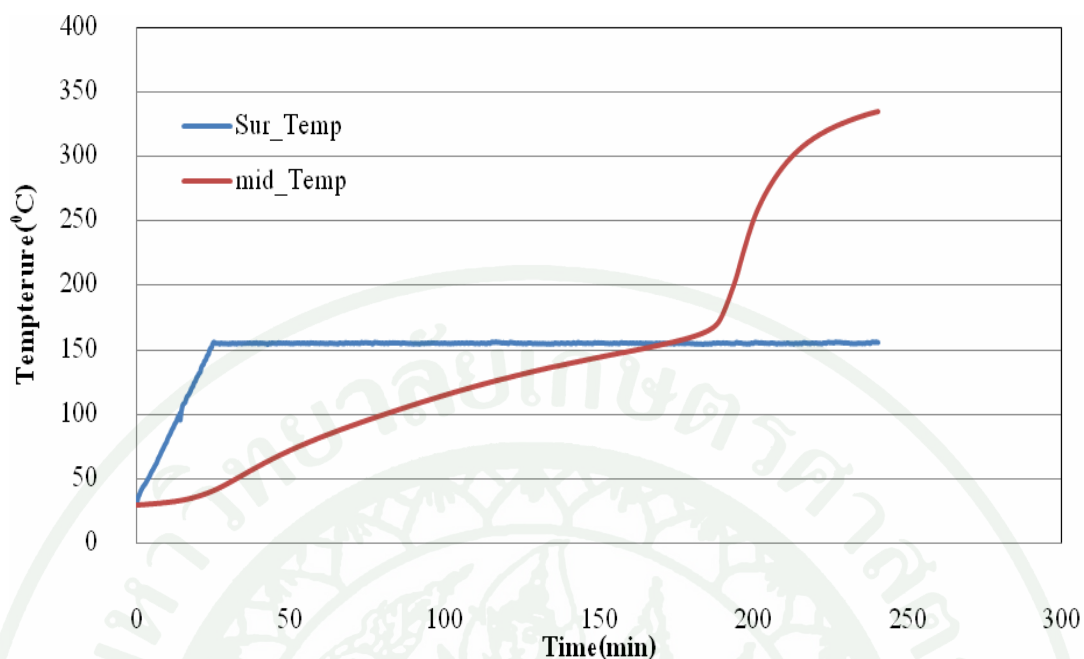
ภาพที่ 31 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 151.7°C

จากภาพที่ 31 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 151.7°C นั้นพบว่าถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 197 นาที



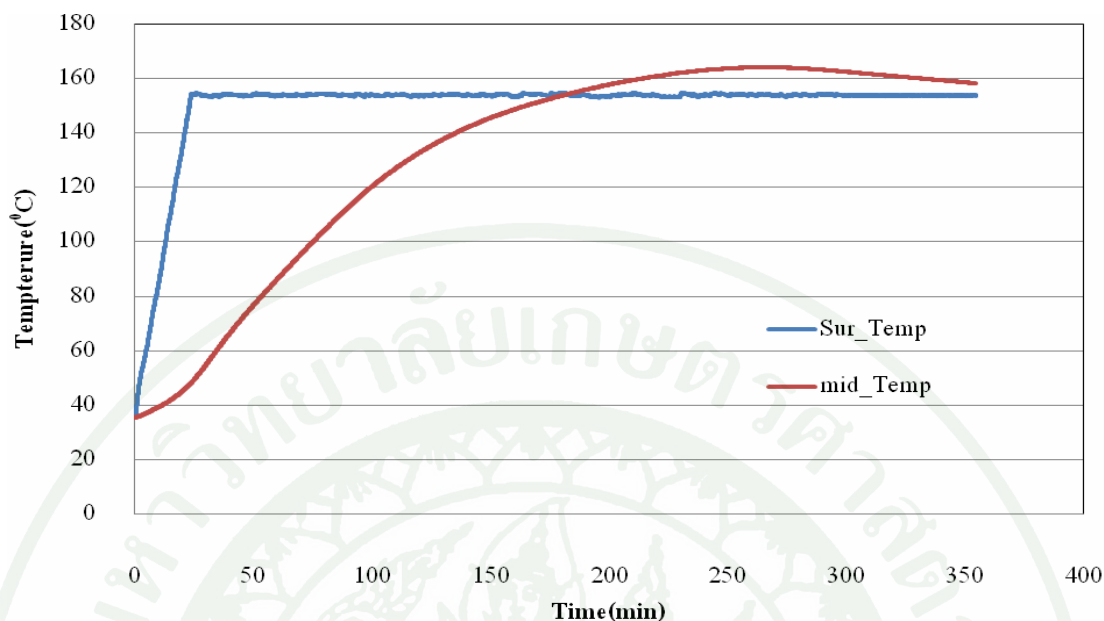
ภาพที่ 32 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 156.8 °C

จากภาพที่ 32 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 156.8 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 166 นาที



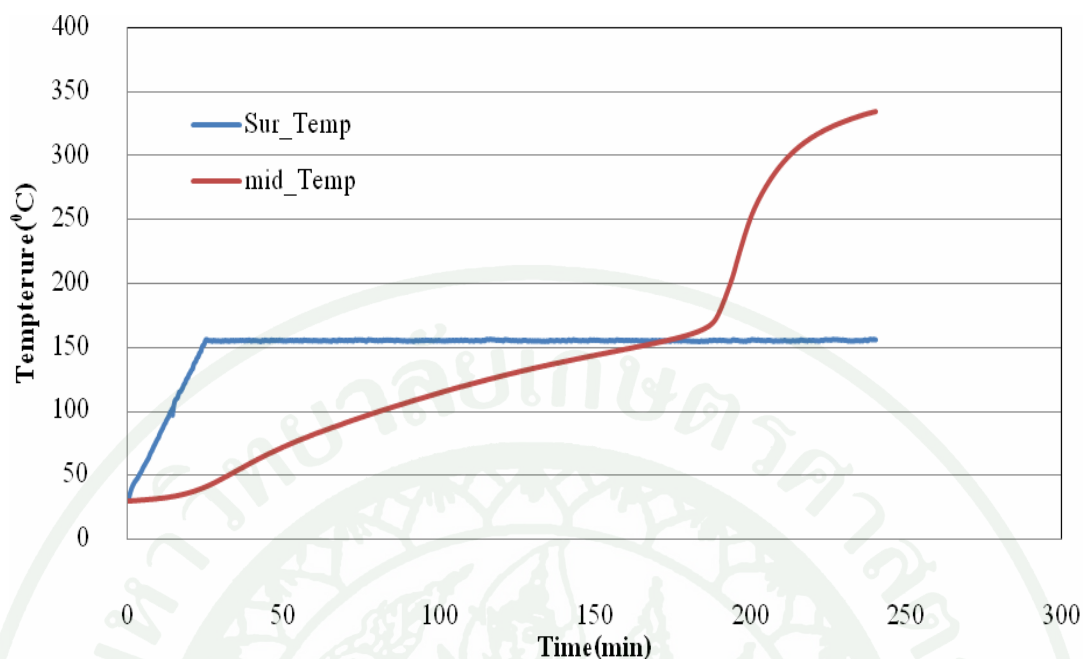
ภาพที่ 33 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 154.8 °C

จากภาพที่ 33 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 154.8 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 171 นาที



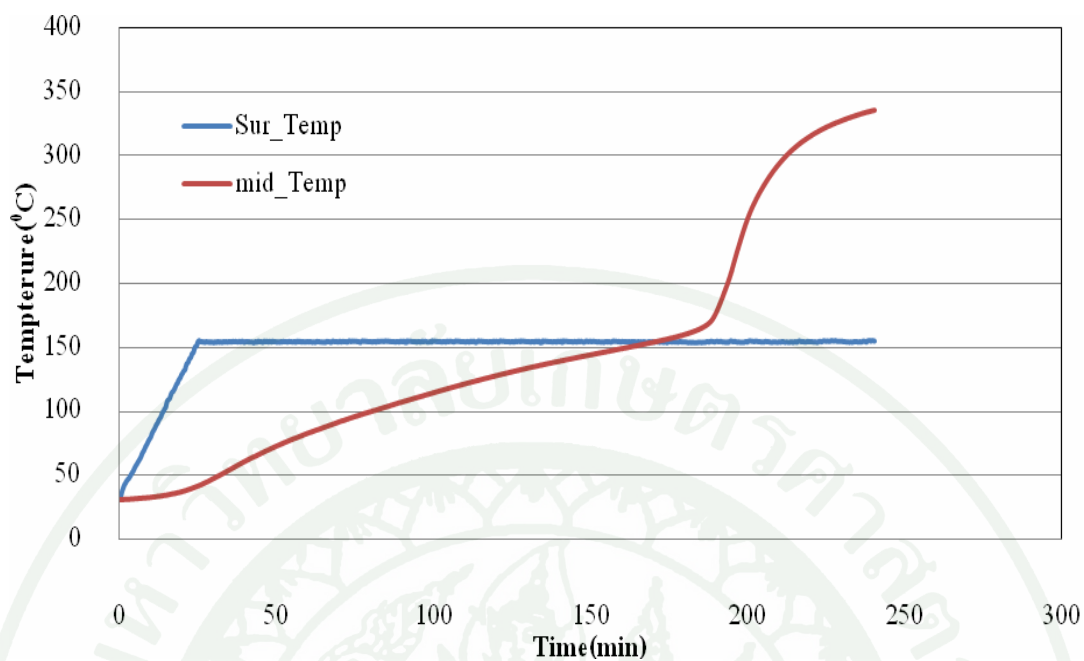
ภาพที่ 34 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 153.8 °C

จากภาพที่ 34 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 153.8 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 181 นาที



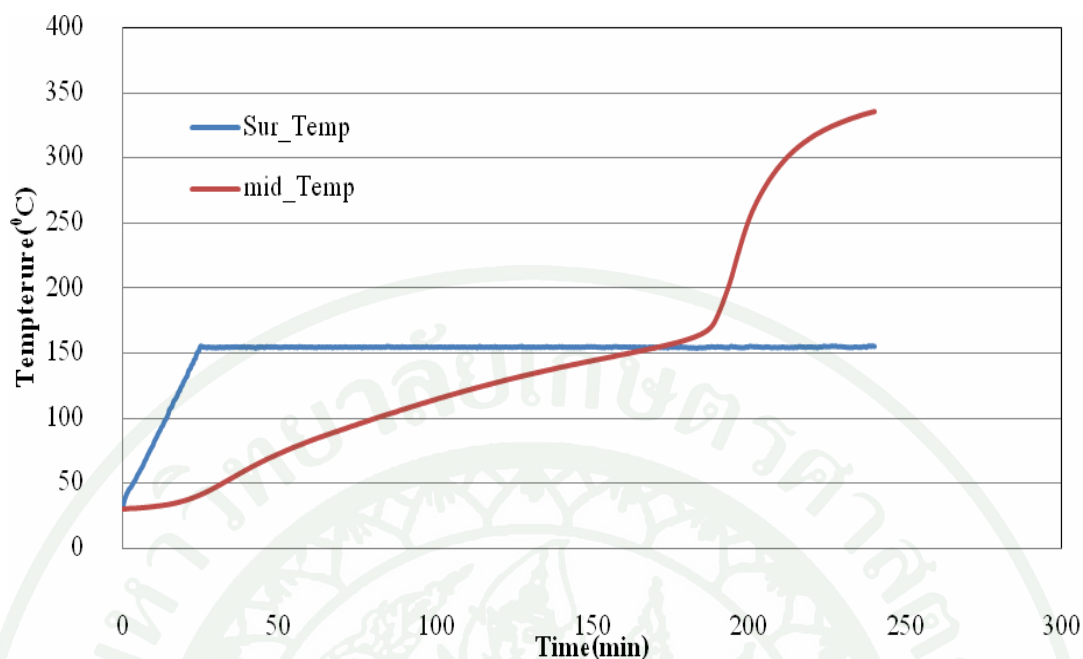
ภาพที่ 35 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 154.9 °C

จากภาพที่ 35 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 154.9 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 174 นาที



ภาพที่ 36 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 154.9 °C

จากภาพที่ 36 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 154.9 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 172 นาที



ภาพที่ 37 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 154.8 °C

จากภาพที่ 37 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 154.8 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกใหม่ขึ้นได้เองภายในเวลา 171 นาที

อุณหภูมิน้อยที่สุดที่ส่งผลให้อุณหภูมิถ่านหินสูงกว่าตู้บ่ออย่างต่อเนื่อง หรือ อุณหภูมิเริ่มต้นที่ถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถลูกใหม่ได้เองอย่างต่อเนื่อง แสดงดัง ตารางที่ 20 คือ อุณหภูมิเท่ากับ 154.8 °C และได้ทำการทดลองซ้ำอีก 3 ครั้งได้ผล ดังนี้ คือ 154.9 °C, 154.9 °C และ 154.8 °C ส่วนอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิ 154.8 °C นั้นได้แก่ อุณหภูมิ 149.9 – 153.8 °C นั้น ถึงเกิดการลูกใหม่ได้แต่ก็ไม่ลูกใหม่อย่างต่อเนื่อง และอุณหภูมิที่ เท่ากับและต่ำกว่า 147.9 °C นั้นไม่เกิดการลูกใหม่

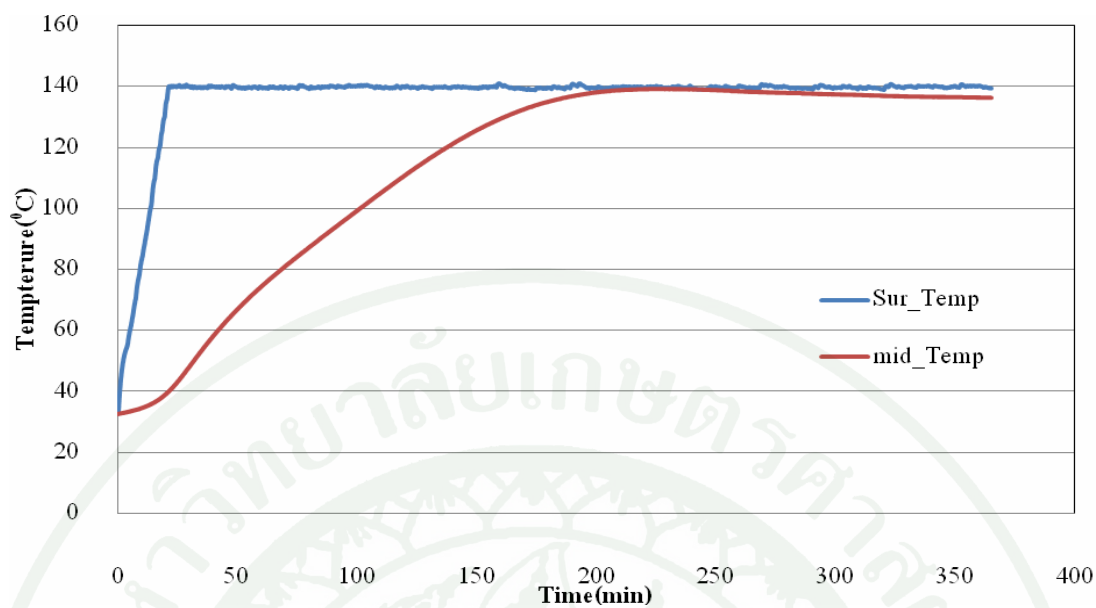
ตารางที่ 20 ผลการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน Jorong 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร

ครั้งที่	อุณหภูมิห้อง (°C)	เวลาที่เกิดการลุกไหม้ (min)	ผลการลุกไหม้
1	147.9	-	ไม่เกิดการลุกไหม้
2	149.9	222	เกิดการลุกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
3	151.7	197	เกิดการลุกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
4	156.8	166	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
5	154.8	171	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
6	153.8	181	เกิดการลุกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
7	154.9	174	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
8	154.9	172	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
9	154.8	171	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง

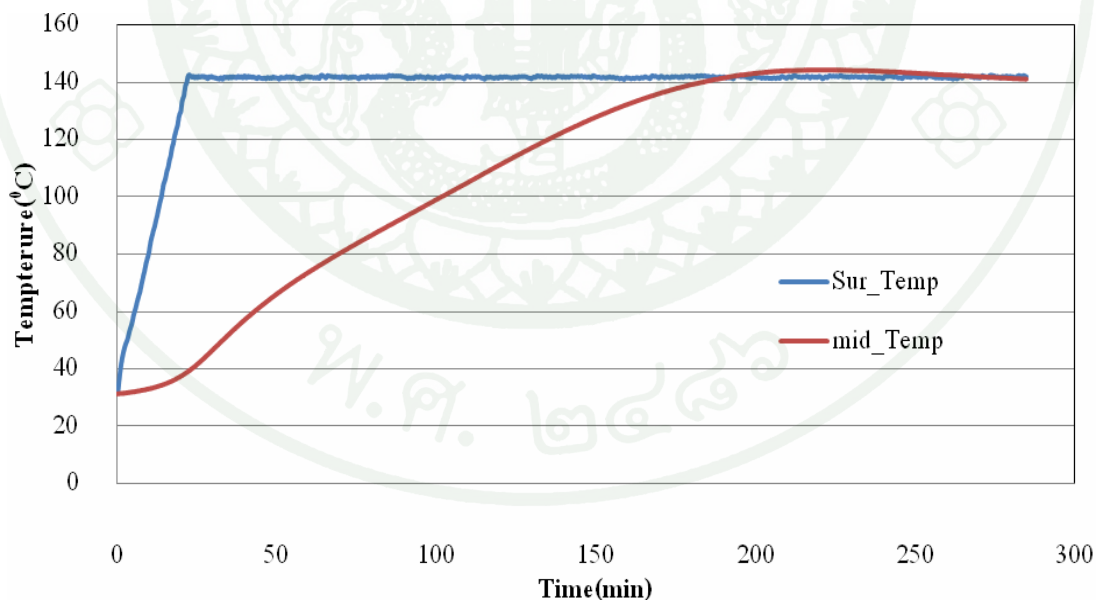
2.2) การเกิดการลุกไหม้ด้วยตัวเองของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร

ผลการทดลองการเกิดการลุกไหม้ด้วยตัวเองของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร แสดงดังภาพที่ 38-46

จากภาพที่ 38 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 139.9 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ไม่สามารถเกิดการลุกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 300 นาที และถ่านหินมีค่าอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยเท่ากับ 137.7 °C

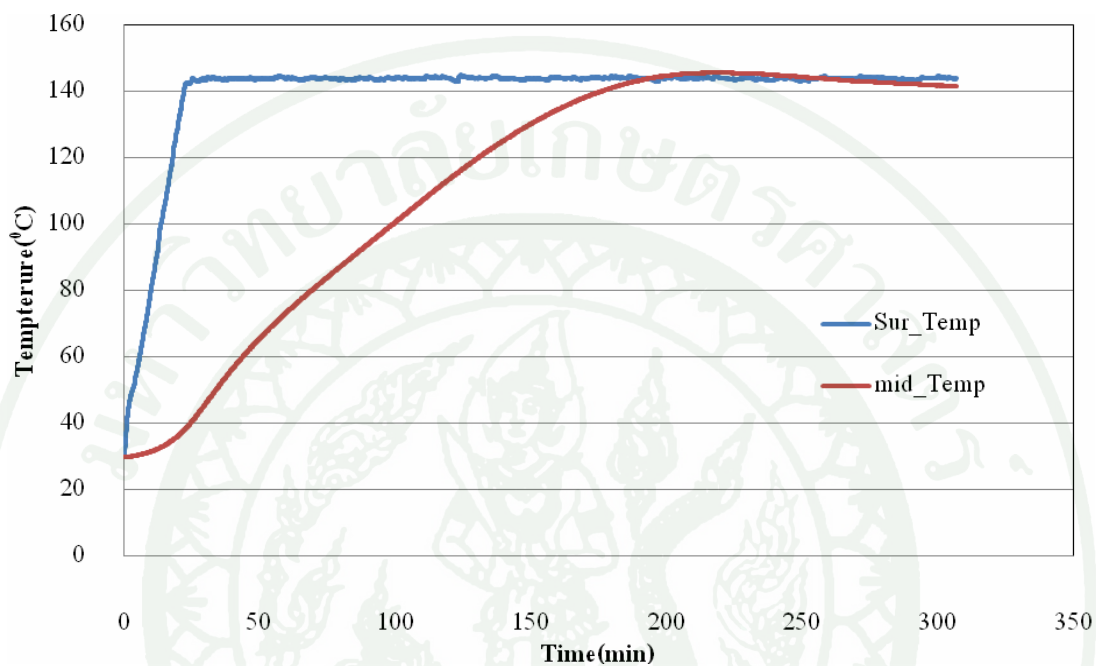


ภาพที่ 38 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 139.9°C



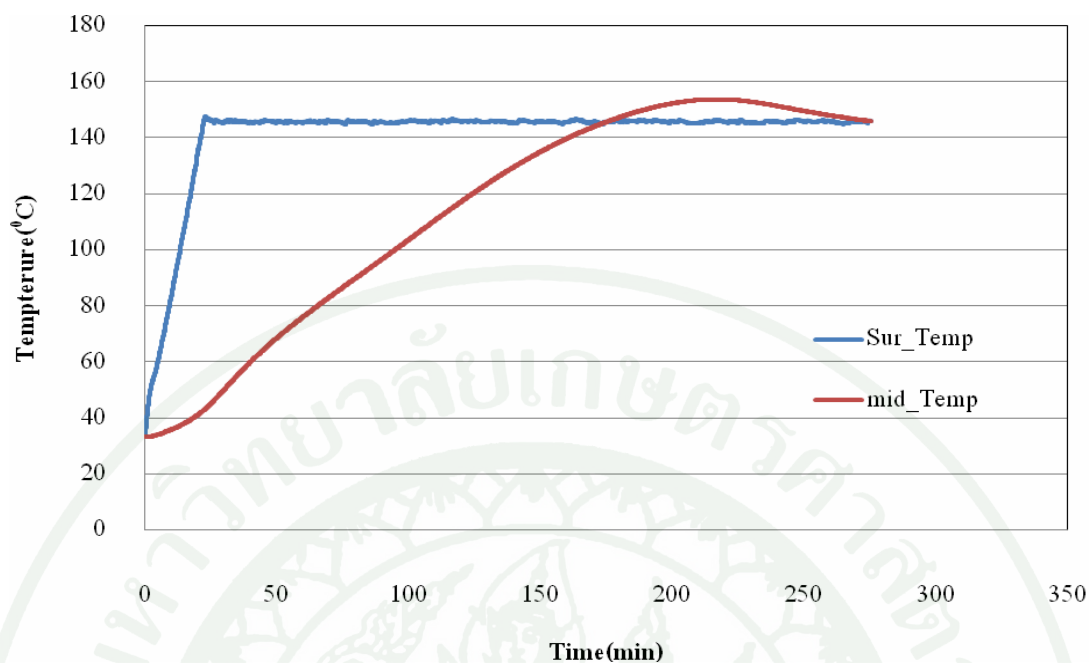
ภาพที่ 39 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 141.9°C

จากภาพที่ 39 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 141.9°C นั้นพบว่าถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 192 นาที



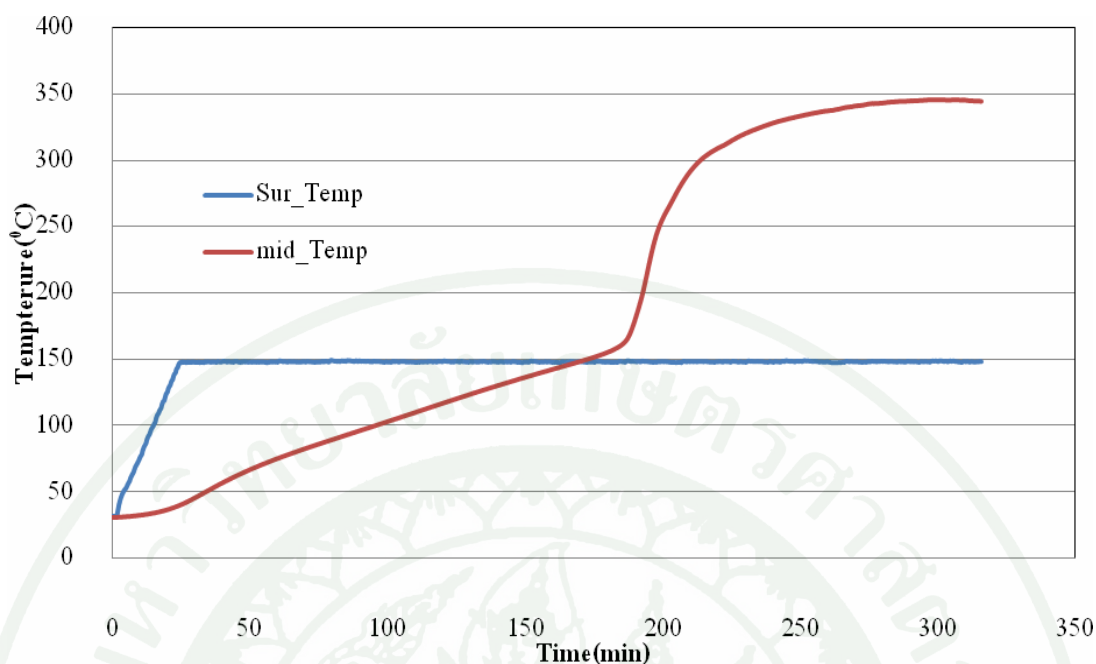
ภาพที่ 40 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 143.9°C

จากภาพที่ 40 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 143.9°C นั้นพบว่าถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 194 นาที



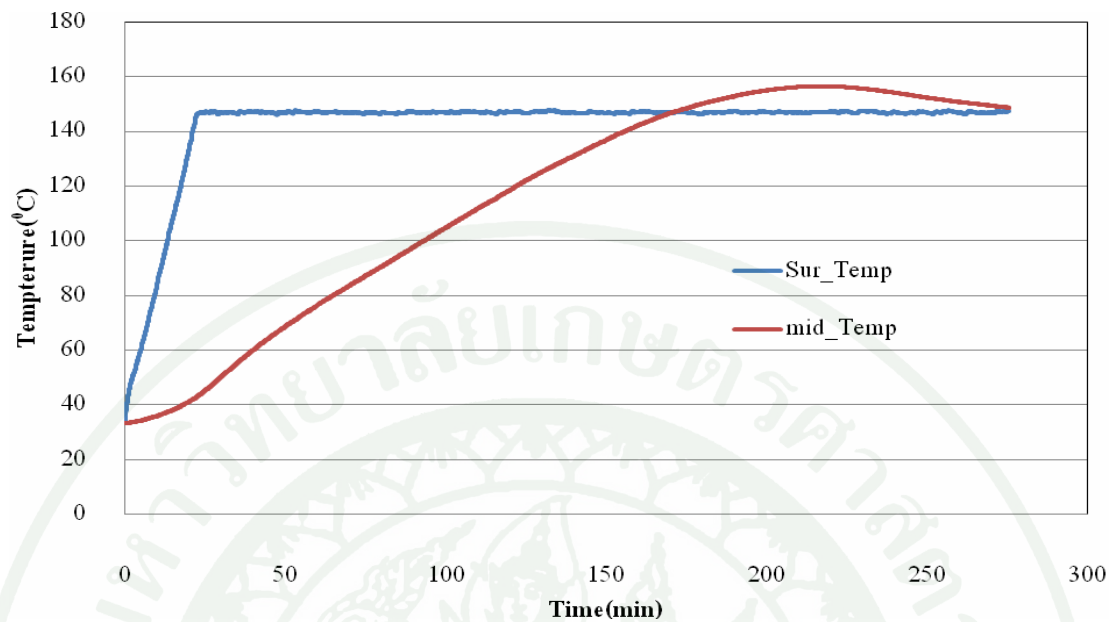
ภาพที่ 41 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 145.9 °C

จากภาพที่ 41 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 145.9 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 176 นาที



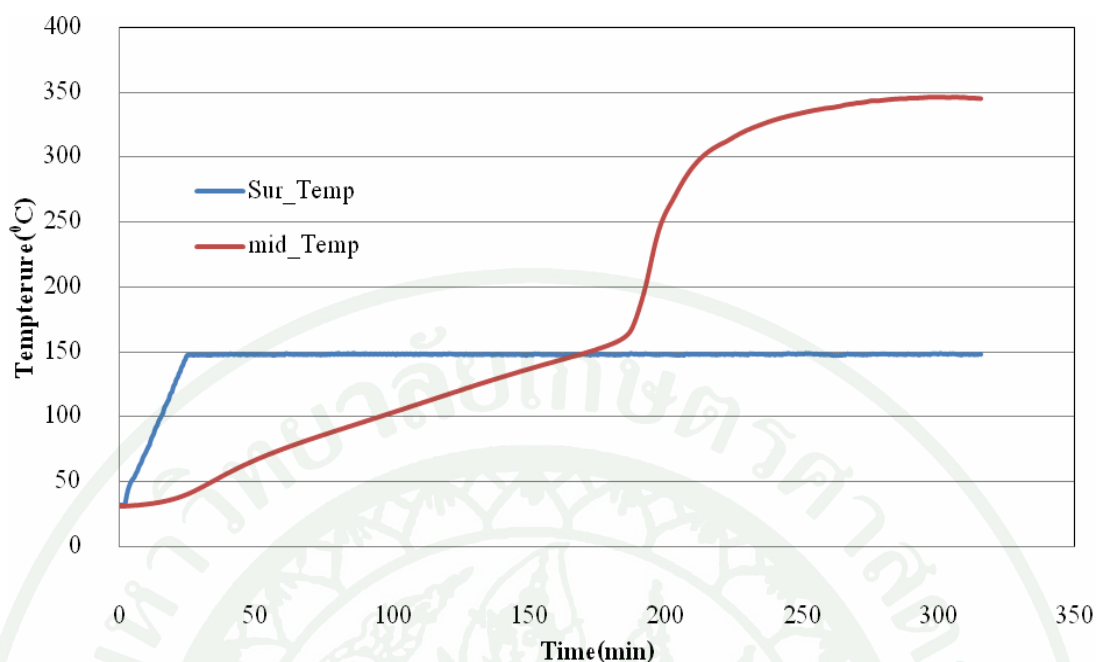
ภาพที่ 42 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.8 °C

จากภาพที่ 42 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.8 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 168 นาที



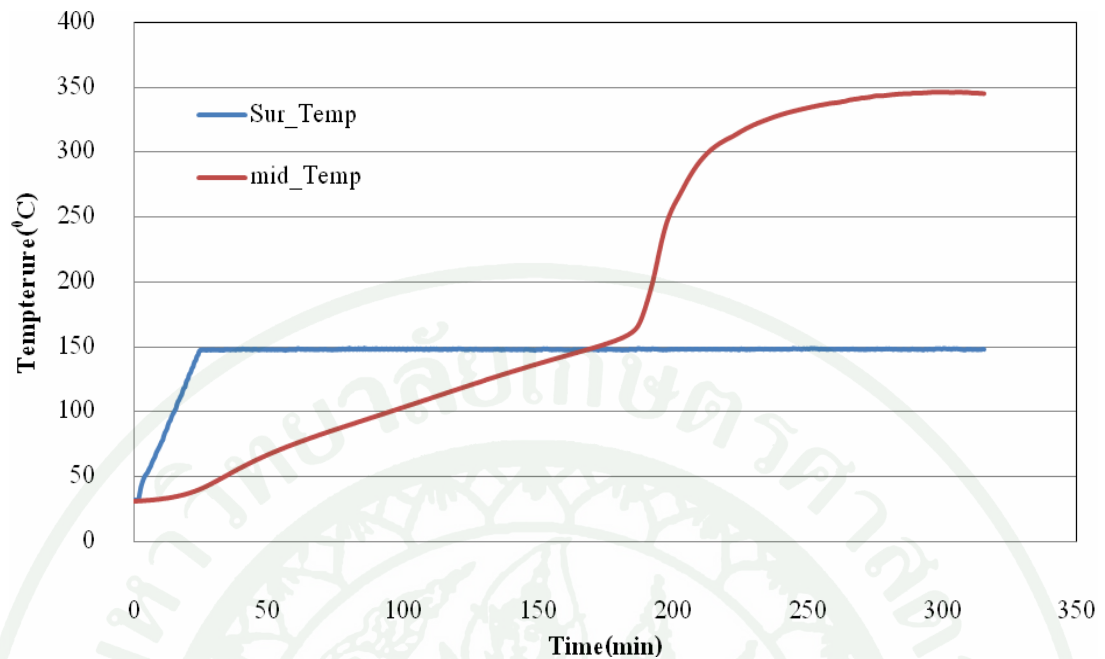
ภาพที่ 43 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 146.9°C

จากภาพที่ 43 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 146.9°C นั้นพบว่าถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 171 นาที



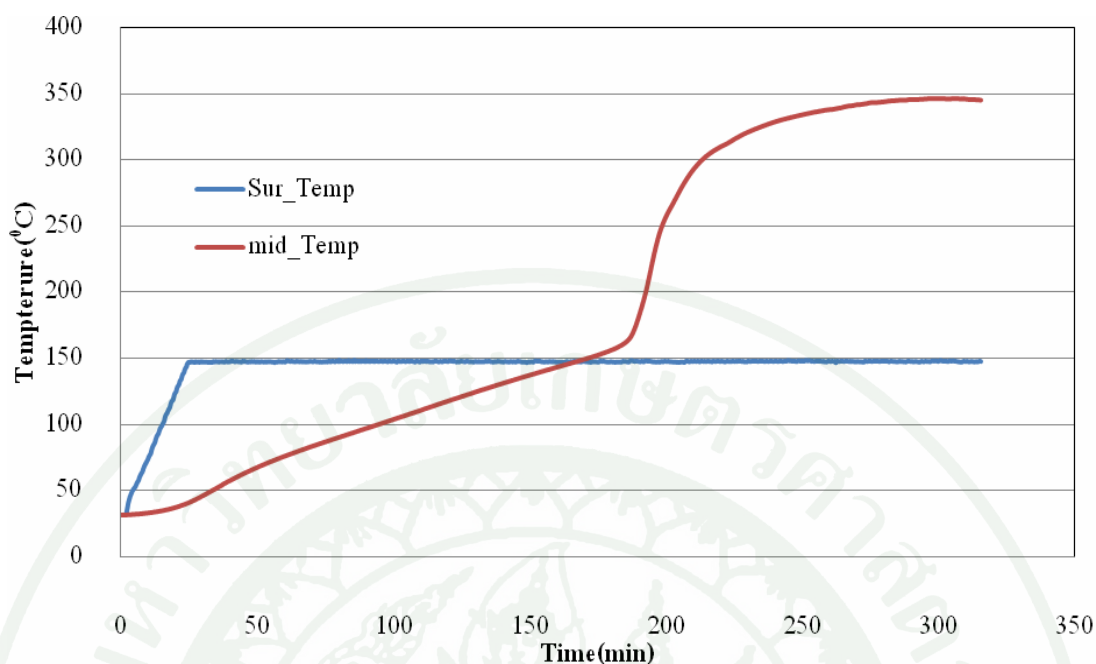
ภาพที่ 44 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.8°C

จากภาพที่ 44 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.8°C นั้นพบว่าถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 168 นาที



ภาพที่ 45 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.9 °C

จากภาพที่ 45 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.9 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 168 นาที



ภาพที่ 46 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.9 °C

จากภาพที่ 46 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.9 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกใหม่ขึ้นได้เองภายในเวลา 168 นาที

พบว่าอุณหภูมิที่น้อยที่สุดที่ส่งผลให้อุณหภูมิถ่านหินสูงกว่าตู้อบอย่างต่อเนื่อง หรือ อุณหภูมิเริ่มต้นที่ถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถลูกใหม่ได้เองอย่างต่อเนื่อง แสดงดัง ตารางที่ 21 คือ อุณหภูมิเท่ากับ 147.8 °C และได้ทำการทดลองซ้ำอีก 3 ครั้งได้ผล ดังนี้ คือ 147.8 °C, 147.9 °C และ 147.9 °C ส่วนอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิ 147.8 °C นั้นได้แก่ อุณหภูมิ 141.9 – 146.9 °C นั้น ถึงเกิดการลูกใหม่ได้แต่ก็ไม่ลูกใหม่อย่างต่อเนื่อง และอุณหภูมิที่เท่ากับและต่ำกว่า 139.9 °C นั้นไม่เกิดการลูกใหม่

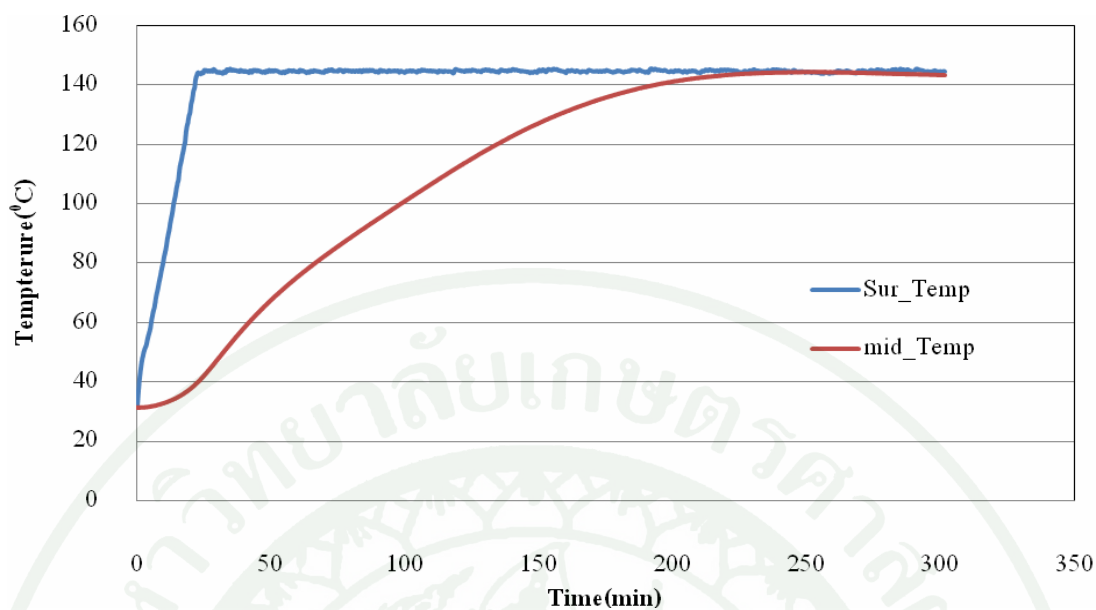
ตารางที่ 21 ผลการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร

ครั้งที่	อุณหภูมิห้อง (°C)	เวลาที่เกิดการลุกไหม้ (min)	ผลการลุกไหม้
1	139.9	-	ไม่เกิดการลุกไหม้
2	141.9	192	เกิดการลุกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
3	143.9	194	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
4	145.9	176	เกิดการลุกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
5	147.8	168	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
6	146.9	171	เกิดการลุกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
7	147.8	168	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
8	147.9	168	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
9	147.9	168	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง

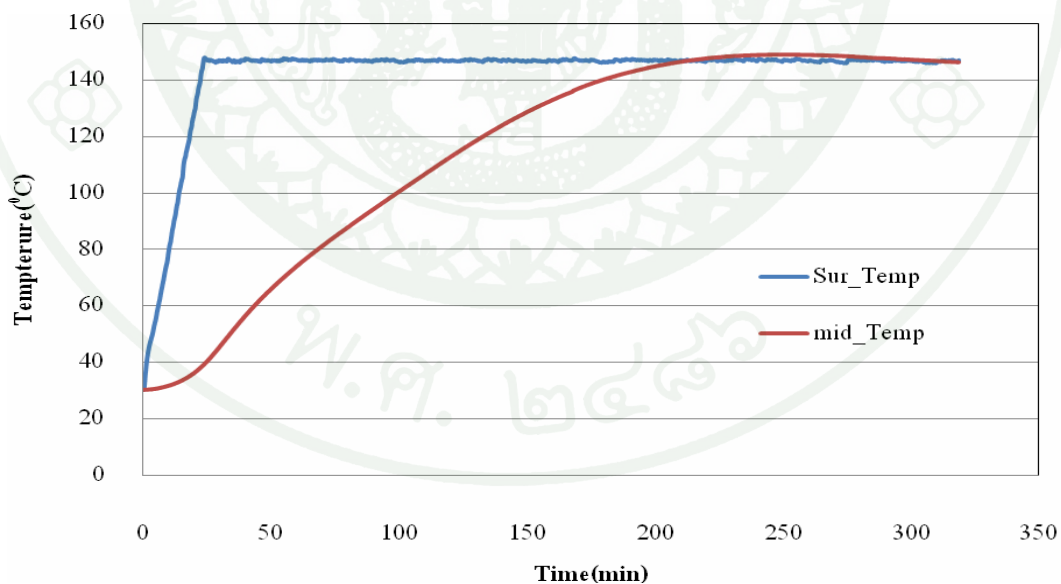
2.3) การเกิดการลุกไหม้ด้วยตัวเองของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร

ผลการทดลองการเกิดการลุกไหม้ด้วยตัวเองของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร แสดงดังภาพที่ 47-55

จากภาพที่ 47 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 144.9 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ไม่สามารถเกิดลุกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 300 นาที และถ่านหินมีค่าอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยเท่ากับ 143.9 °C

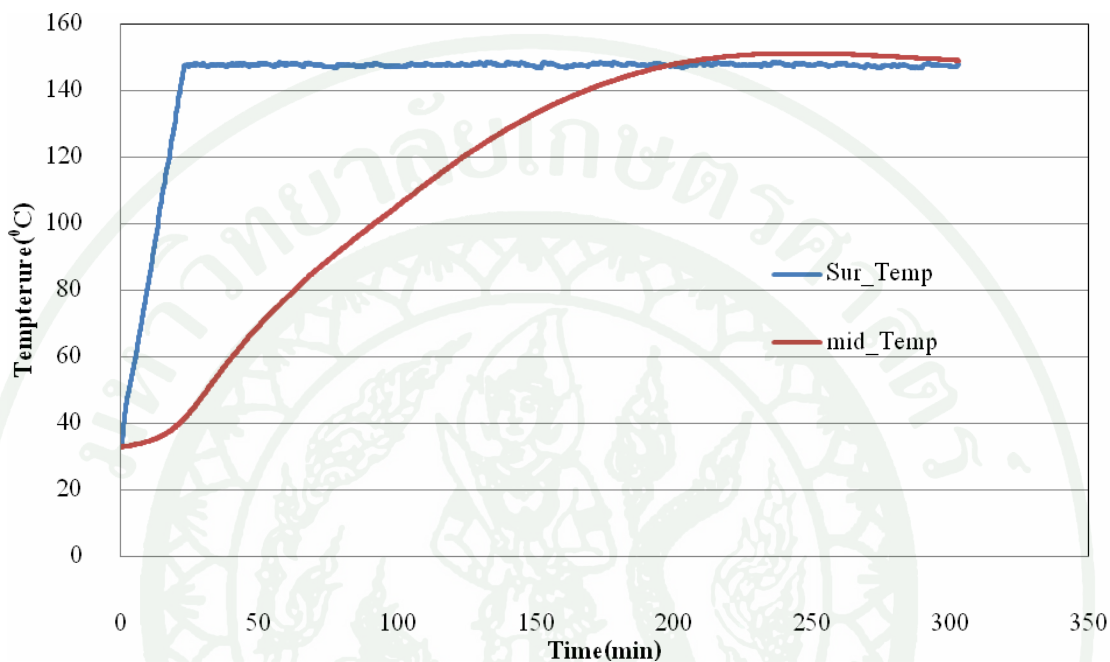


ภาพที่ 47 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 144.9 °C



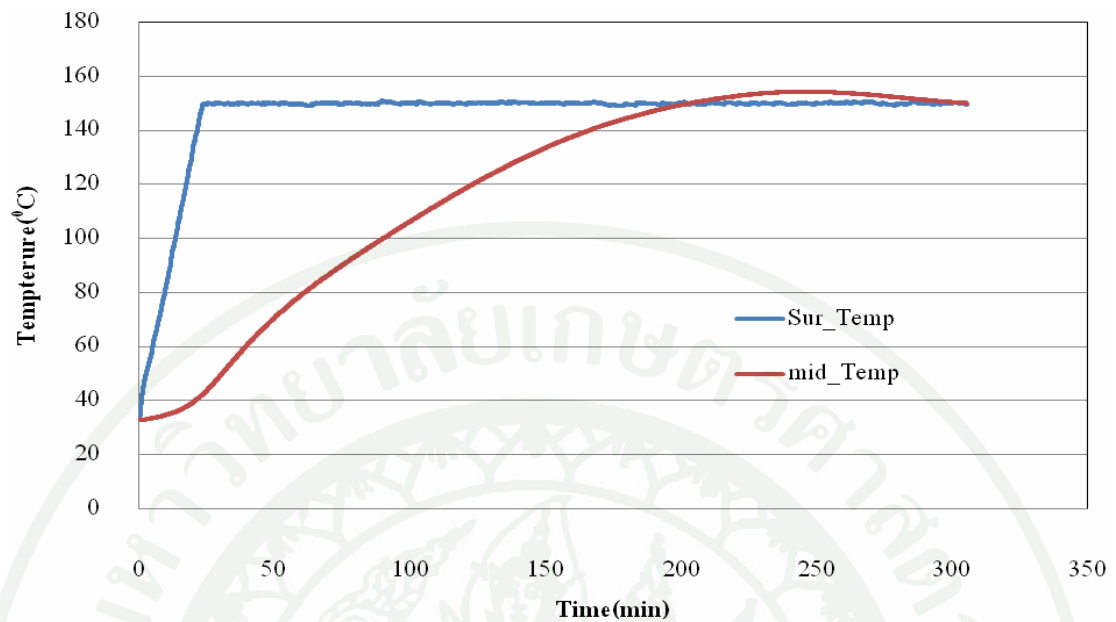
ภาพที่ 48 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 146.9 °C

จากภาพที่ 48 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 146.9°C นั้นพบว่าถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกใหม่ขึ้นได้เองภายในเวลา 183 นาที



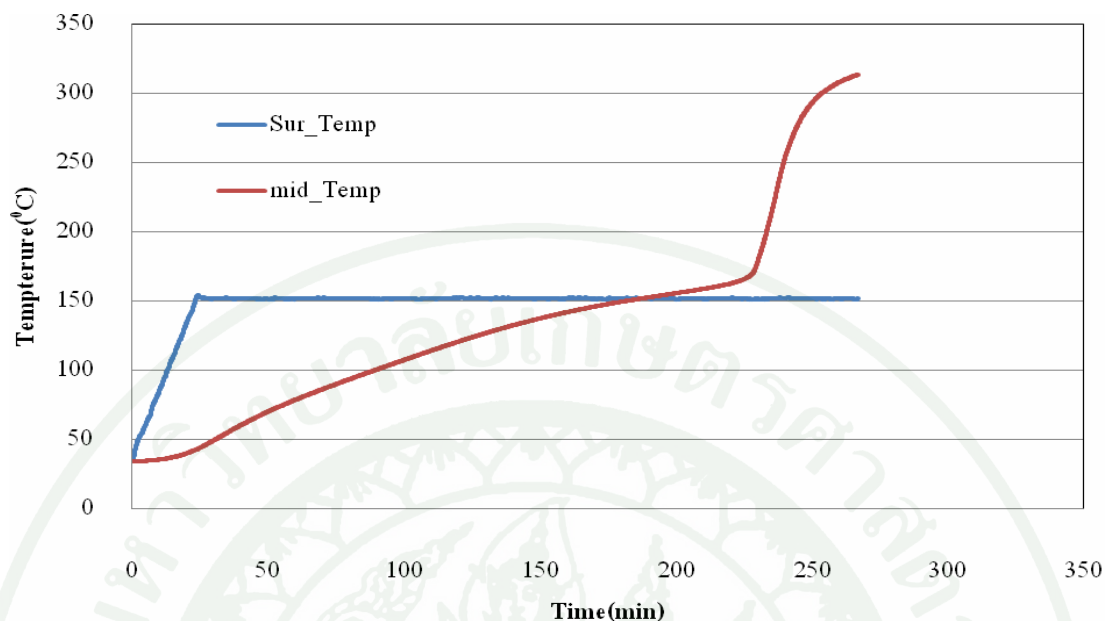
ภาพที่ 49 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.8°C

จากภาพที่ 49 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.8°C นั้นพบว่าถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกใหม่ขึ้นได้เองภายในเวลา 199 นาที



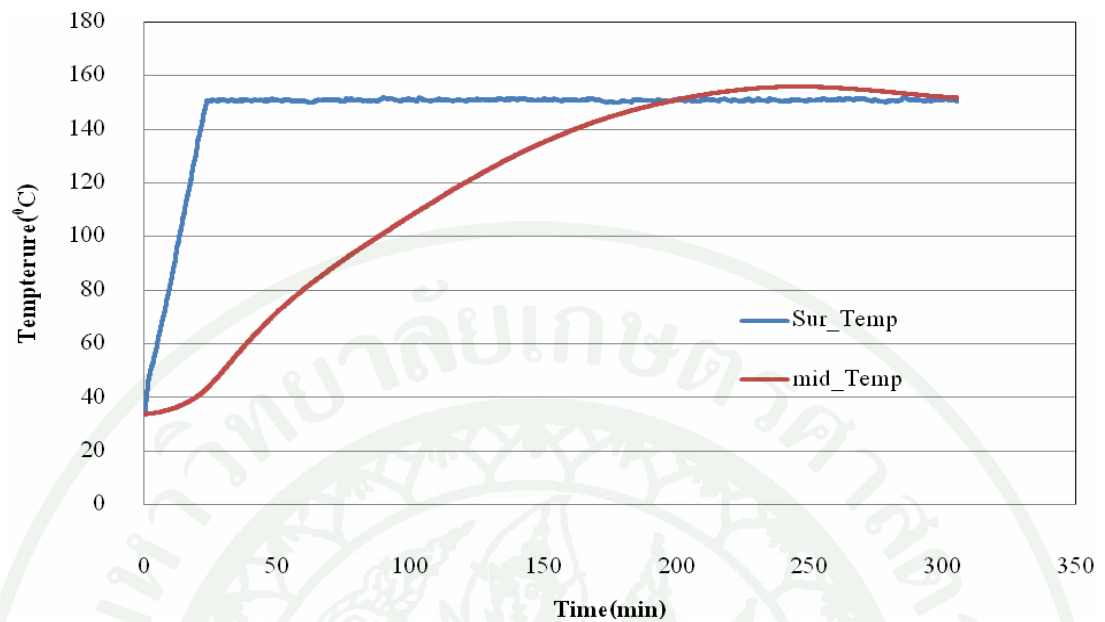
ภาพที่ 50 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 149.9 °C

จากภาพที่ 50 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 149.9 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 203 นาที



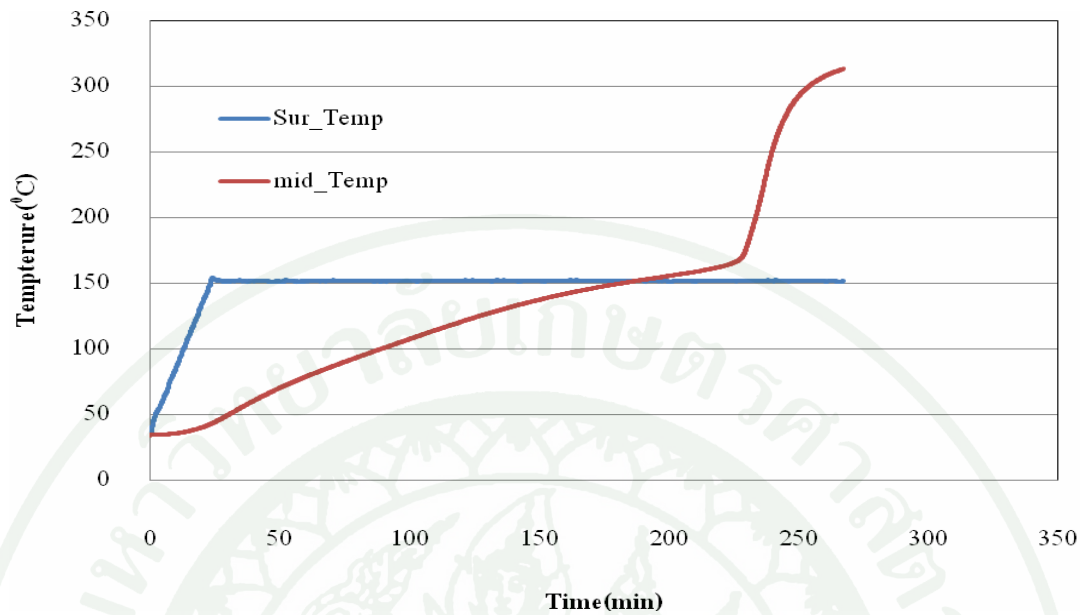
ภาพที่ 51 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 151.8 °C

จากภาพที่ 51 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 151.8 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 188 นาที



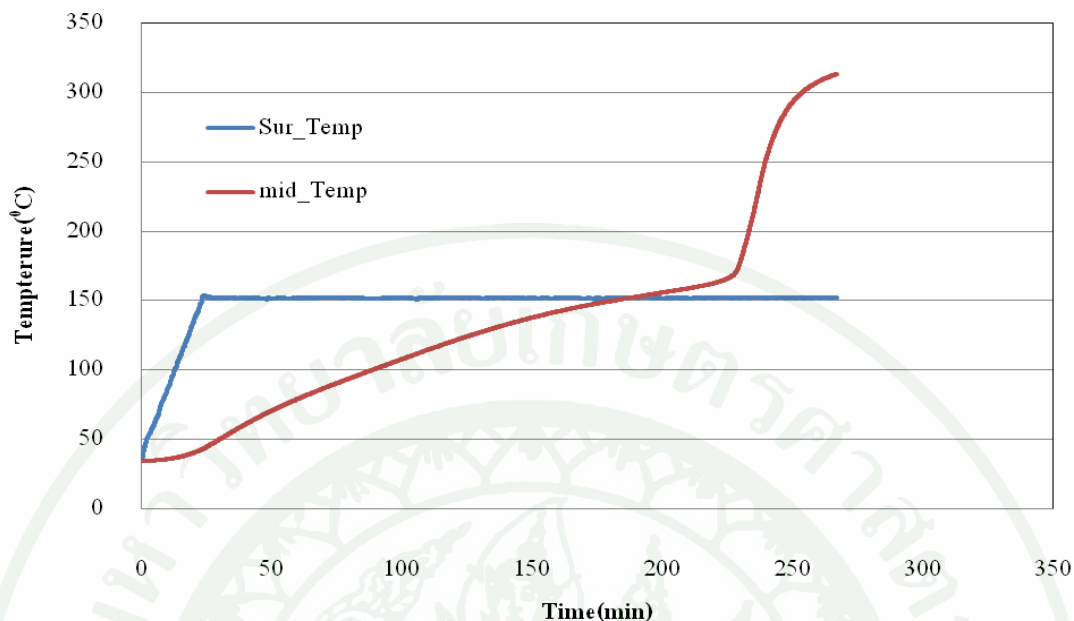
ภาพที่ 52 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 150.9 °C

จากภาพที่ 52 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 150.9 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 200 นาที



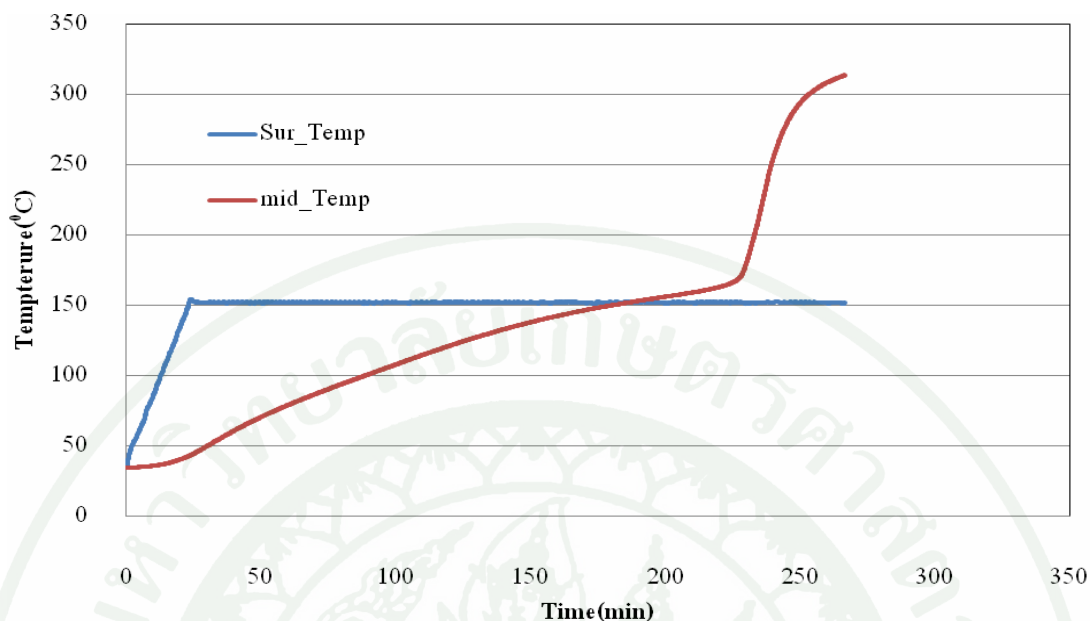
ภาพที่ 53 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 151.9 °C

จากภาพที่ 53 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 151.9 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 188 นาที



ภาพที่ 54 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 151.9 °C

จากภาพที่ 54 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 151.9 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 18.7 นาที



ภาพที่ 55 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 151.9 °C

จากภาพที่ 55 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 151.9 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกใหม่ขึ้นได้เองภายในเวลา 187 นาที

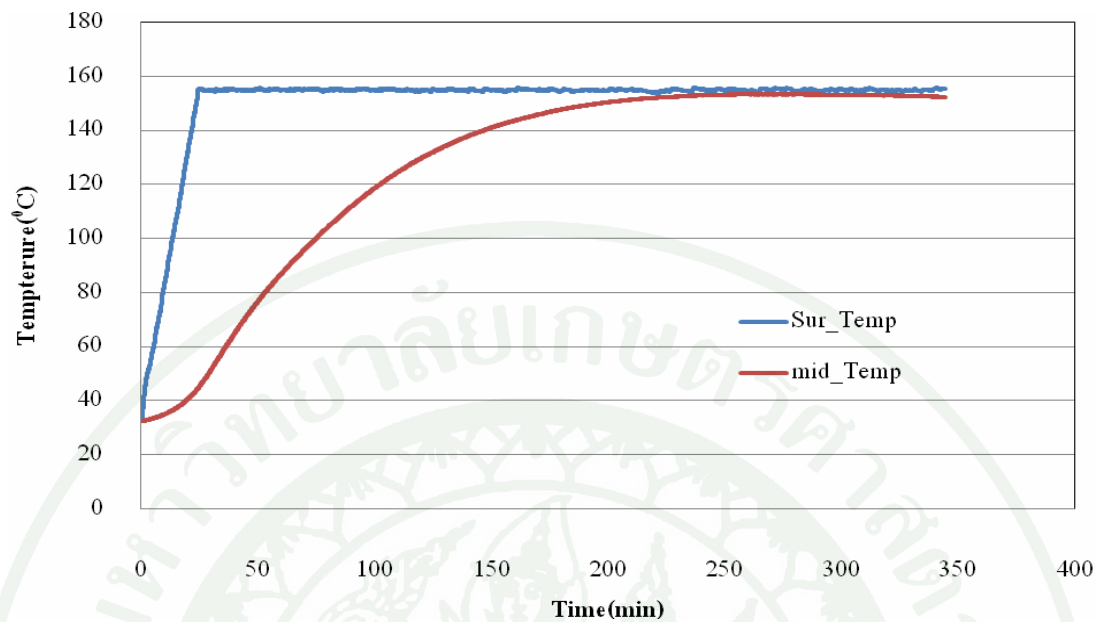
พบว่าอุณหภูมิที่น้อยที่สุดที่ส่งผลให้อุณหภูมิถ่านหินสูงกว่าตู้บ่ออย่างต่อเนื่อง หรือ อุณหภูมิเริ่มต้นที่ถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถลูกใหม่ได้เองอย่างต่อเนื่อง แสดงดัง ตารางที่ 22 คือ อุณหภูมิเท่ากับ 151.8 °C และได้ทำการทดลองซ้ำอีก 3 ครั้งได้ผล ดังนี้ คือ 151.9 °C, 151.9 °C และ 151.9 °C ส่วนอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิ 151.8 °C นั้นได้แก่ อุณหภูมิ 146.9 – 150.9 °C นั้น ถึงเกิดการลูกใหม่ได้แต่ก็ไม่ลูกใหม่อย่างต่อเนื่อง และอุณหภูมิที่ เท่ากับและต่ำกว่า 144.9 °C นั้นไม่เกิดการลูกใหม่

ตารางที่ 22 ผลการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร

ครั้งที่	อุณหภูมิห้อง (°C)	เวลาที่เกิดการลุกไหม้ (min)	ผลการลุกไหม้
1	144.9	-	ไม่เกิดการลุกไหม้
2	146.9	183	เกิดการลุกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
3	147.8	199	เกิดการลุกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
4	149.9	203	เกิดการลุกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
5	151.8	188	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
6	150.9	200	เกิดการลุกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
7	151.9	188	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
8	151.9	187	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
9	151.9	187	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง

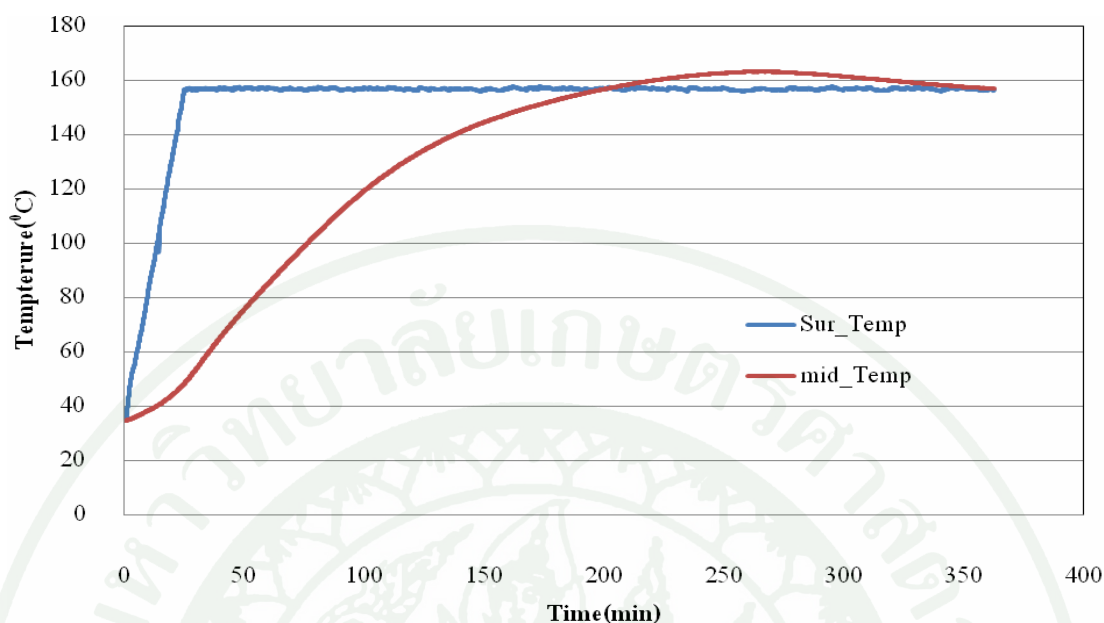
2.4) การเกิดการลุกไหม้ด้วยตัวเองของถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร

ผลการทดลองการเกิดการลุกไหม้ด้วยตัวเองของถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร แสดงดังภาพที่ 56-62



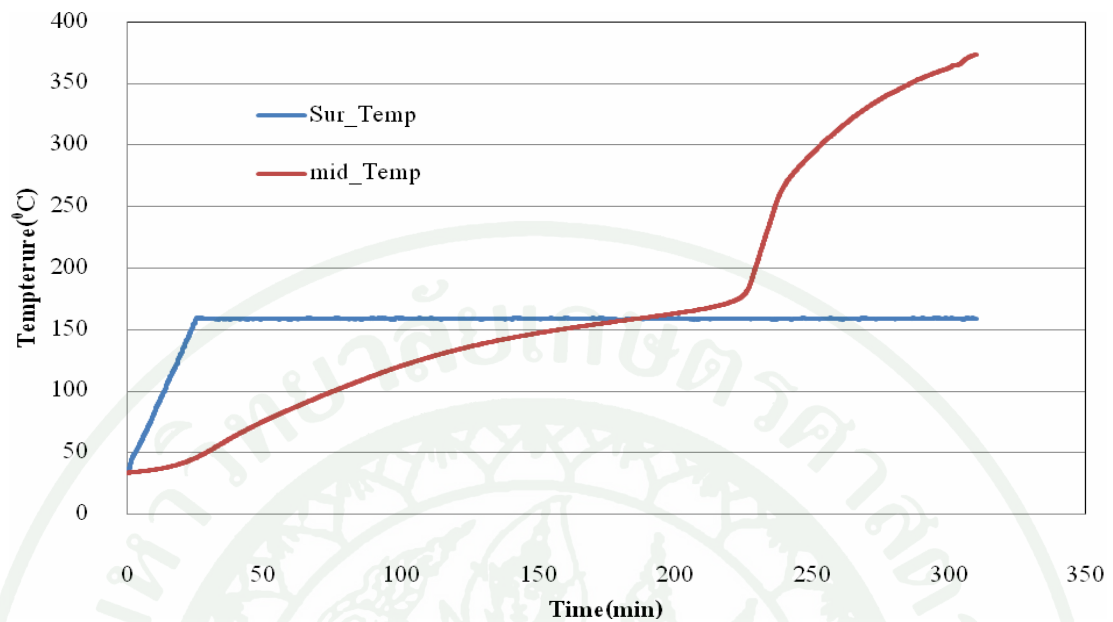
ภาพที่ 56 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 154.8 °C

จากภาพที่ 56 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 154.8 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ไม่สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 300 นาที และถ่านหินมีค่าอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยเท่ากับ 152.8 °C



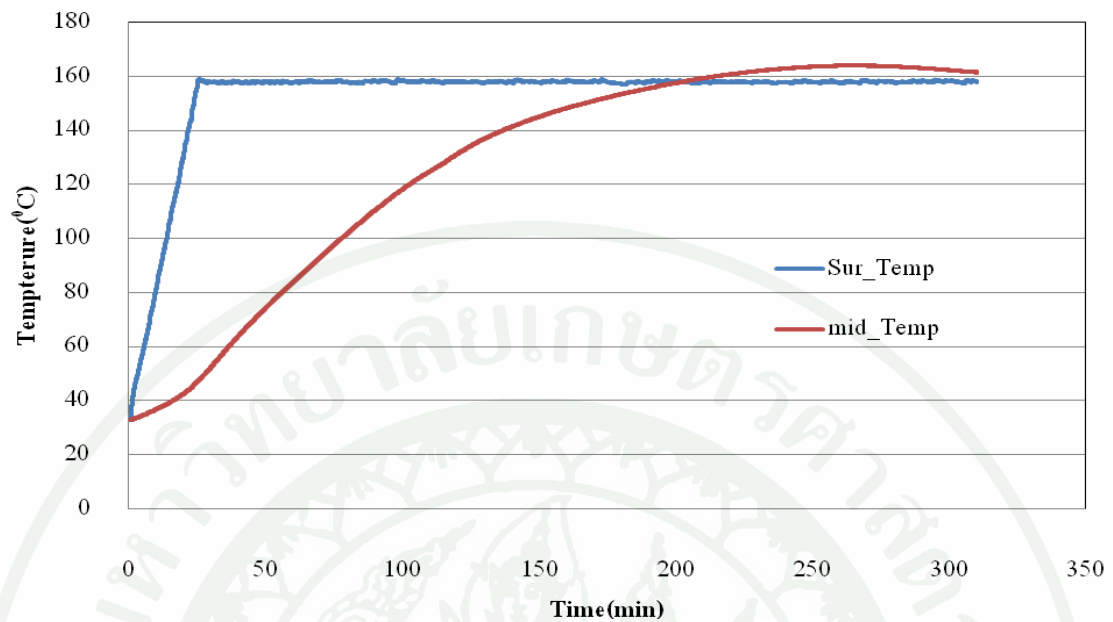
ภาพที่ 57 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 156.8°C

จากภาพที่ 57 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 156.8°C นั้นพบว่าถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 201 นาที



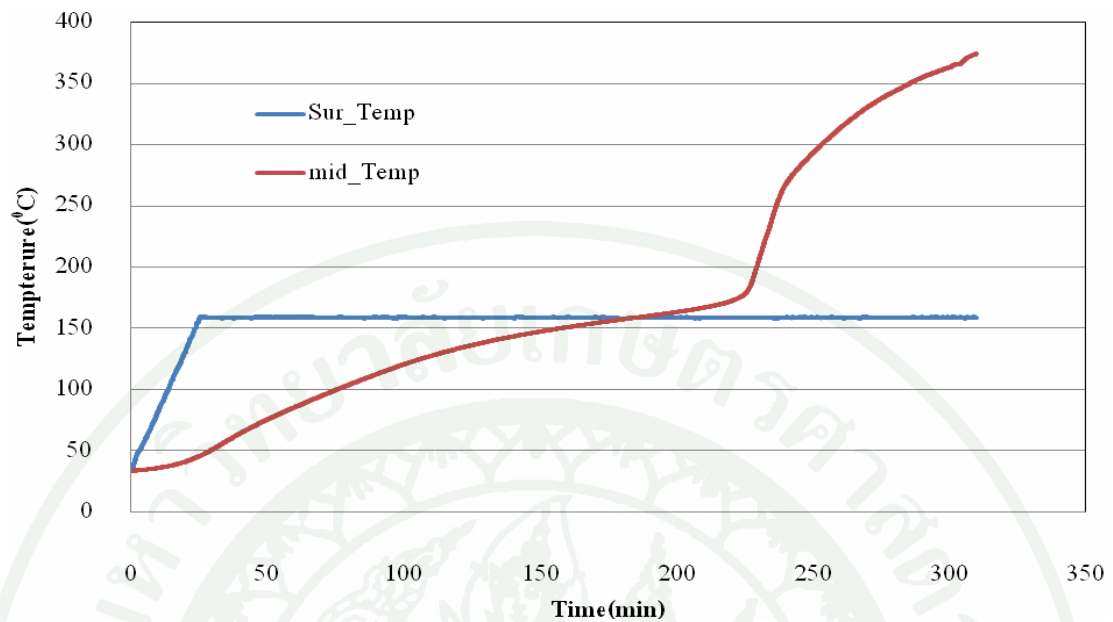
ภาพที่ 58 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 158.8 °C

จากภาพที่ 58 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 158.8 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 186 นาที



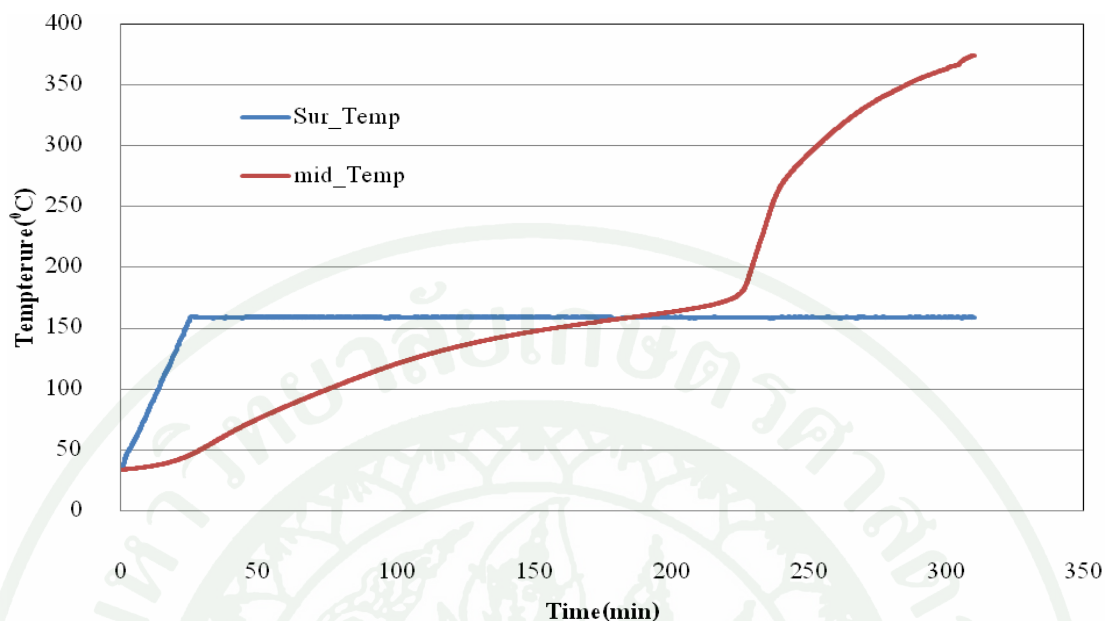
ภาพที่ 59 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 157.9°C

จากภาพที่ 59 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 157.9°C นั้นพบว่าถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 203 นาที



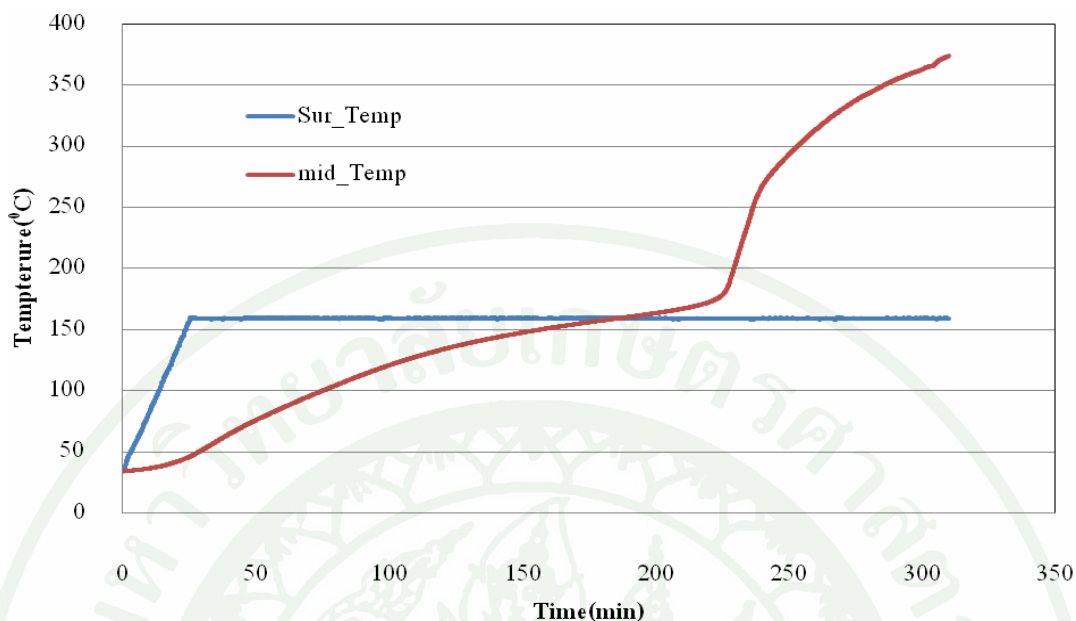
ภาพที่ 60 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 158.8 °C

จากภาพที่ 60 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 158.8 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 186 นาที



ภาพที่ 61 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 158.9 °C

จากภาพที่ 61 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 158.9 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 186 นาที



ภาพที่ 62 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 158.9 °C

จากภาพที่ 62 จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 158.9 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกใหม่ขึ้นได้เองภายในเวลา 186 นาที

พบว่าอุณหภูมิที่น้อยที่สุดที่ส่งผลให้อุณหภูมิถ่านหินสูงกว่าตู้อบอย่างต่อเนื่อง หรือ อุณหภูมิเริ่มต้นที่ถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถลูกใหม่ได้เองอย่างต่อเนื่อง แสดงดัง ตารางที่ 23 คือ อุณหภูมิเท่ากับ 158.8 °C และได้ทำการทดลองซ้ำอีก 3 ครั้งได้ผล ดังนี้ คือ 158.8 °C, 158.9 °C และ 158.9 °C ส่วนอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิ 158.8 °C นั้นได้แก่ อุณหภูมิ 156.8 – 157.9 °C นั้น ถึงเกิดการลูกใหม่ได้แต่ก็ไม่ลูกใหม่อย่างต่อเนื่อง และอุณหภูมิที่ เท่ากับและต่ำกว่า 154.8 °C นั้นไม่เกิดการลูกใหม่

ตารางที่ 23 ผลการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน Adaro 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร

ครั้งที่	อุณหภูมิห้อง(°C)	เวลาที่เกิดการลุกไหม้ (min)	ผลการลุกไหม้
1	154.8	-	ไม่เกิดการลุกไหม้
2	156.8	201	เกิดการลุกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
3	158.8	186	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
4	157.9	203	เกิดการลุกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
5	158.8	186	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
6	158.9	186	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
7	158.9	186	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง

จากตารางที่ 24 จะเห็นได้ชัดเจนว่าถ่านหิน ADARO 266 สามารถลุกไหม้ได้เองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุด คือ อุณหภูมิเท่ากับ 147.9 °C ลำดับที่สอง คือ ถ่านหิน PHOENIX 18 อุณหภูมิเท่ากับ 151.9 °C ลำดับที่ 3 คือ ถ่านหิน JORONG 262 อุณหภูมิเท่ากับ 154.9 °C และลำดับสุดท้าย คือ ถ่านหิน ADARO 265 อุณหภูมิเท่ากับ 158.9 °C โดยเวลาเฉลี่ยที่ถ่านหินสัมผัสกับอุณหภูมิของห้องแล้วเกิดการลุกไหม้ได้เอง นั้นอยู่ที่ 168 – 188 นาที ซึ่งถ่านหินที่ลุกไหม้ในเวลาเร็วที่สุดคือถ่านหิน ADARO 266 ซึ่งสัมผัสกับอุณหภูมิเฉลี่ยของห้อง เป็น 168 นาที

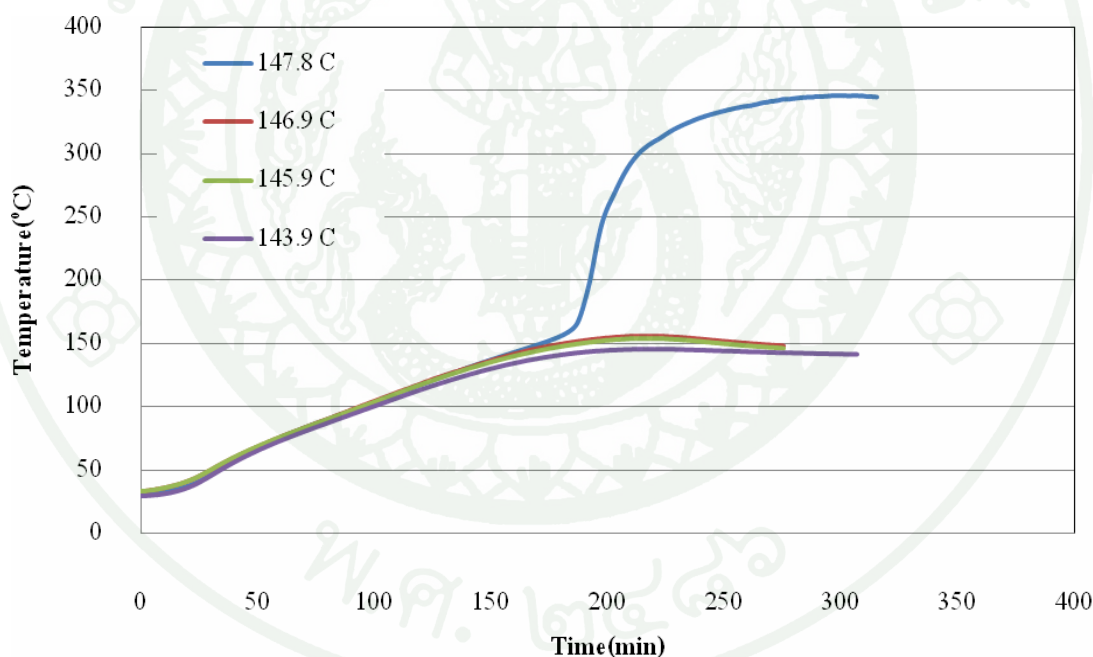
ตารางที่ 24 สรุปผลการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร

ถ่านหินตัวอย่าง	ครั้งที่	อุณหภูมิที่จุดที่ ถ่านหินลุกไหม้ (°C)	เวลาที่เกิด การลุกไหม้ (min)	อุณหภูมิเฉลี่ยที่ ถ่านหินเกิดการ ลุกไหม้ได้เอง (°C)	เวลาเฉลี่ยที่ ถ่านหินเกิด การลุกไหม้ได้ เอง (min)
JORONG 262	1	154.8	171	154.9	172
	2	154.9	174		
	3	154.9	172		
	4	154.8	171		
ADARO 266	1	147.8	168	147.9	168
	2	147.8	168		
	3	147.9	168		
	4	147.9	168		
PHOENIX 18	1	151.8	188	151.9	188
	2	151.9	188		
	3	151.9	187		
	4	151.9	187		
ADARO 265	1	158.8	186	158.9	186
	2	158.8	186		
	3	158.9	186		
	4	158.9	186		

3) ผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน

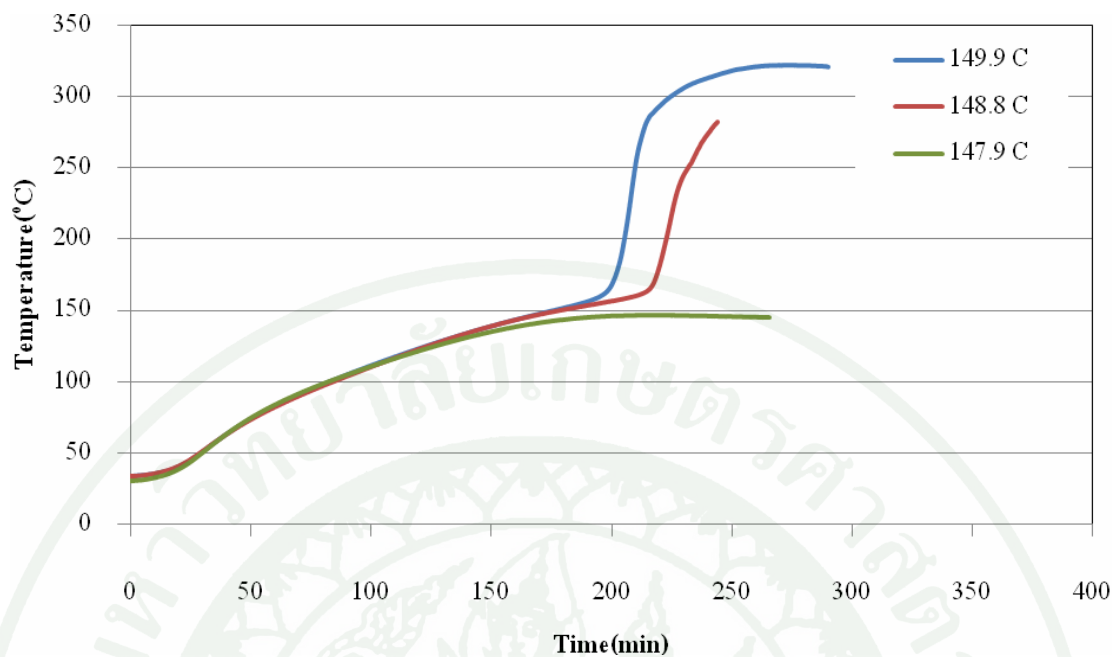
การทดลองนี้ได้นำถ่านหิน 4 ตัวอย่าง จาก 3 แหล่งมาทำการบดและคัดแยกขนาด เป็น 3 ขนาด คือ ถ่านหินขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาค 75 – 106 ไมโครเมตร และขนาดอนุภาค 106 – 250 ไมโครเมตร แล้วทดลองเพื่อหาอุณหภูมิเริ่มต้นที่ถ่านหินเกิดการลุกไหม้ได้เอง โดยการกำหนดค่าอุณหภูมิกึ่งที่ของตู้อบ แล้วสังเกตอุณหภูมิของถ่านหินที่เพิ่มขึ้นหากอุณหภูมิของถ่านหินสูงกว่าอุณหภูมิตู้อบ แสดงว่าอุณหภูมิดังกล่าวเป็นอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เองที่ถ่านหินขนาดอนุภาคนั้นๆ โดยมีผลการทดลอง ดังนี้

3.1) ผลการทดลองการเกิดการลุกไหม้ได้เองถ่านหิน Adaro 266 ขนาดต่างๆ โดยวิธีการกำหนดอุณหภูมิกึ่งที่ในการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 1,200 ml/min ได้ผลการทดลองดังนี้



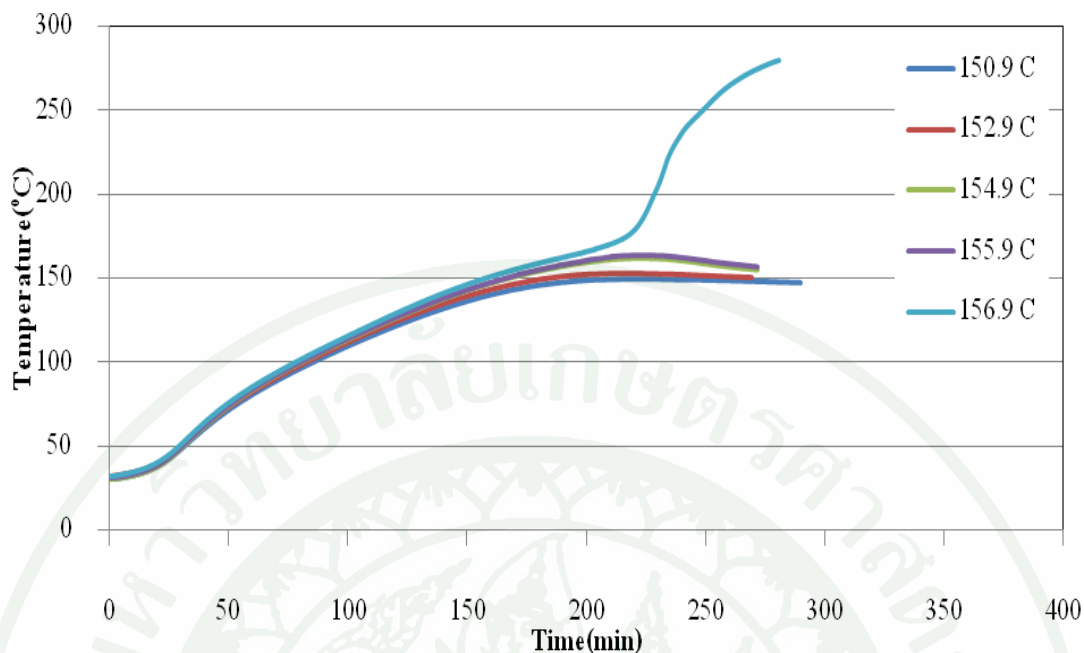
ภาพที่ 63 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)

จากภาพที่ 63 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิกึ่งที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.8 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Adaro 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดลุกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 168 นาที



ภาพที่ 64 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)

จากภาพที่ 64 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 148.8°C นั้นพบว่าถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร สามารถเกิดลุกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 175 นาที

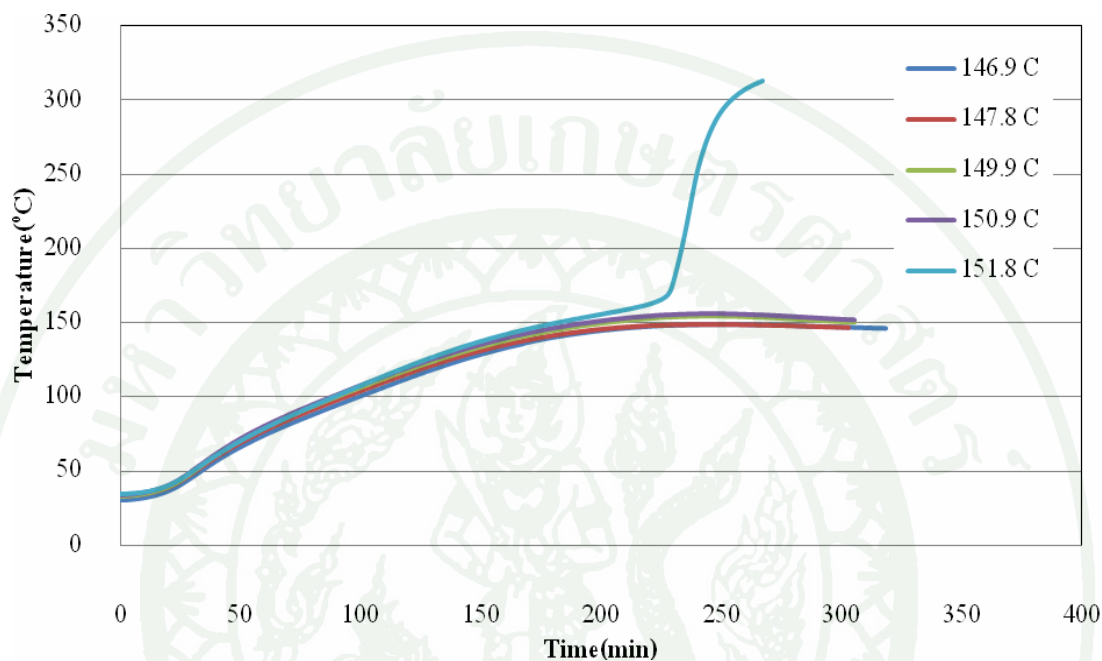


ภาพที่ 65 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)

จากภาพที่ 65 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 156.9°C นั้นพบว่าถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร สามารถเกิดลุกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 174 นาที

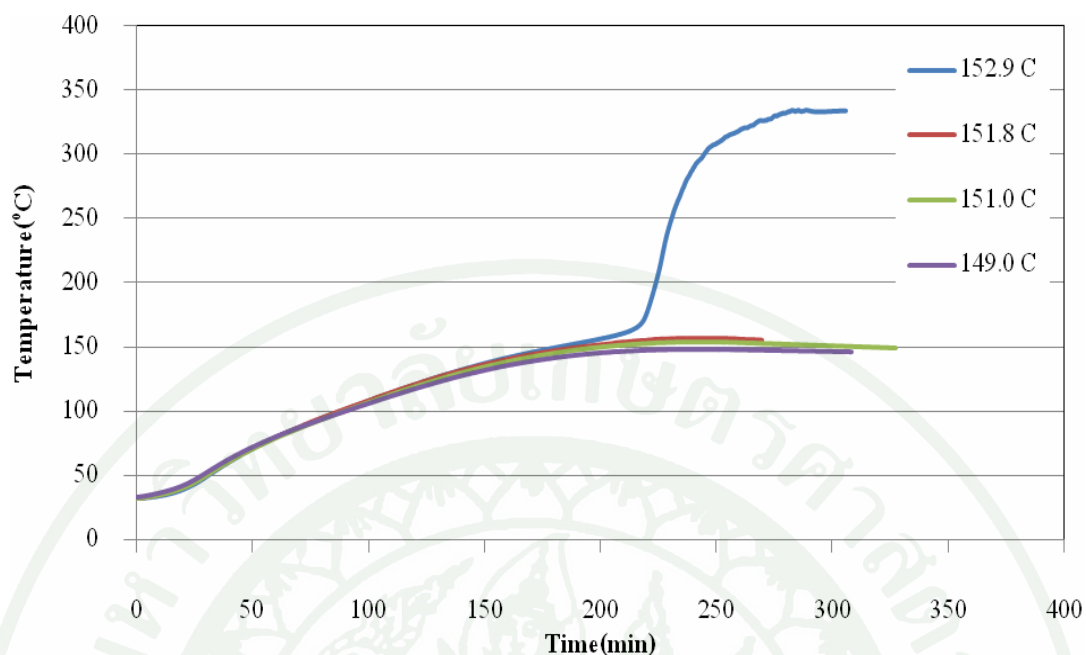
จากภาพที่ 63 ภาพที่ 64 และภาพที่ 65 สามารถสรุปได้ว่าขนาดอนุภาคของถ่านหิน Adaro 266 ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกลงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและอัตราการระเหยเป็นไอสูงขึ้น และมีแนวโน้มการลุกไหม้ได้เองสูงขึ้น เห็นได้จากการทดลองถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร มีค่า CPT น้อยที่สุดคือ 147.8°C กล่าวคือมีแนวโน้มการลุกไหม้ได้เองมากกว่าถ่านหินขนาด 75-106 ไมโครเมตร และขนาด 106-250 ไมโครเมตร ที่มีค่า CPT เท่ากับ 148.8°C และ 156.9°C ตามลำดับ

3.2) ผลการทดลองการเกิดการลุกไหม้ได้เองถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดต่างๆ โดยวิธีการกำหนดอุณหภูมิคงที่ในการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 1,200 ml/min ได้ผลการทดลองดังนี้



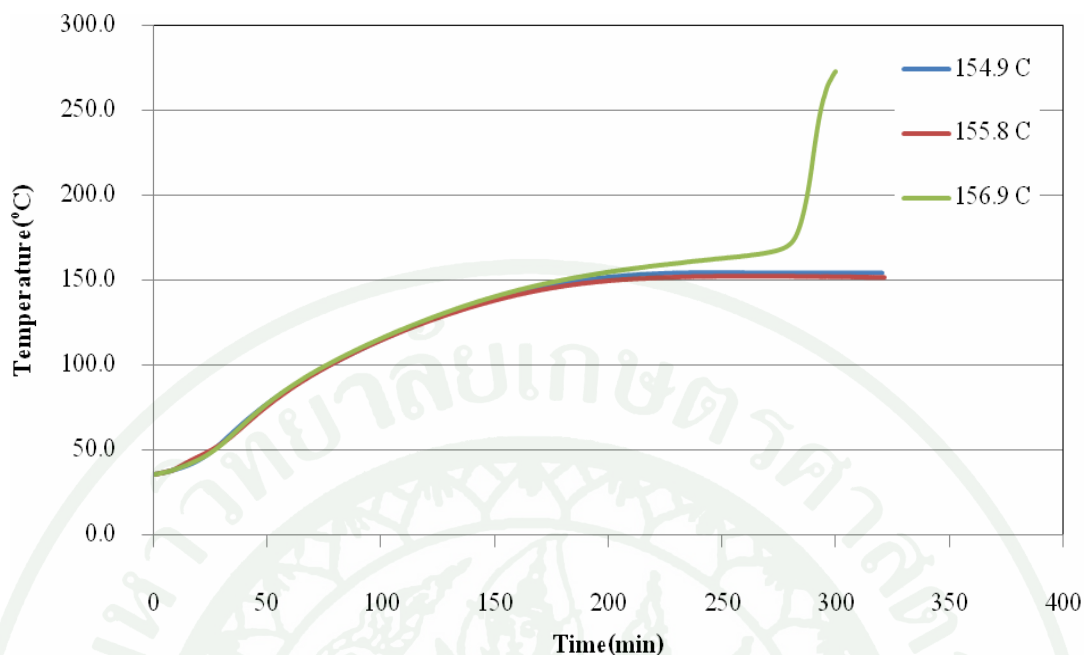
ภาพที่ 66 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)

จากภาพที่ 66 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 151.8 °C นั้นพบว่าถ่านหิน Phoenix 18 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดการลุกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 188 นาที



ภาพที่ 67 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)

จากภาพที่ 67 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 152.9°C นั้นพบว่าถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร สามารถเกิดลุกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 190 นาที

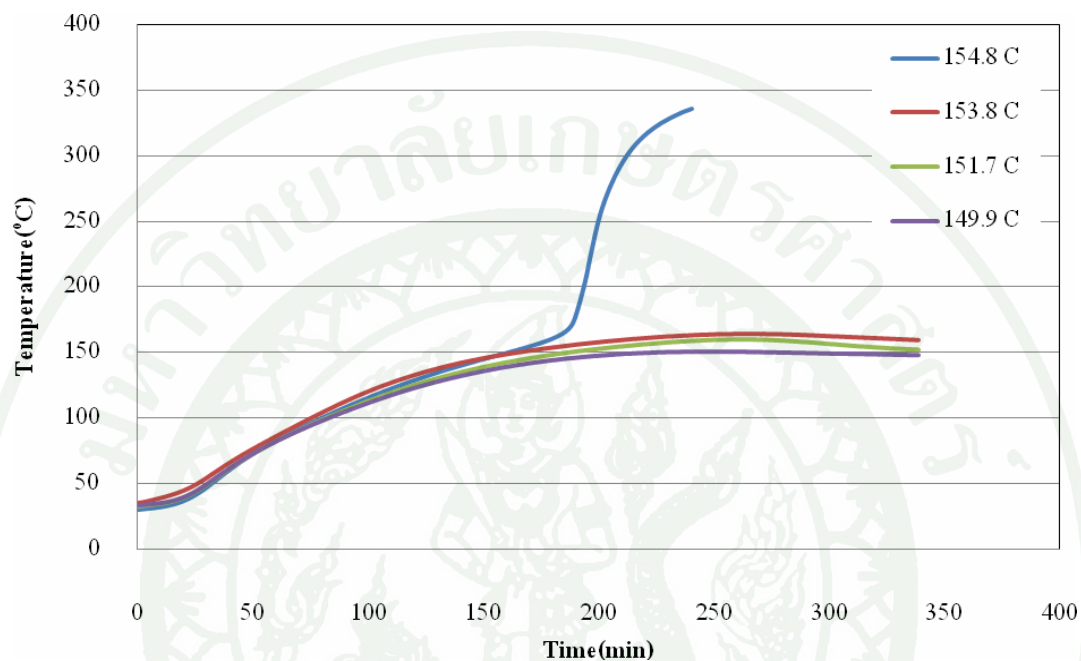


ภาพที่ 68 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)

จากภาพที่ 68 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 156.9°C นั้นพบว่าถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร สามารถเกิดลุกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 210 นาที

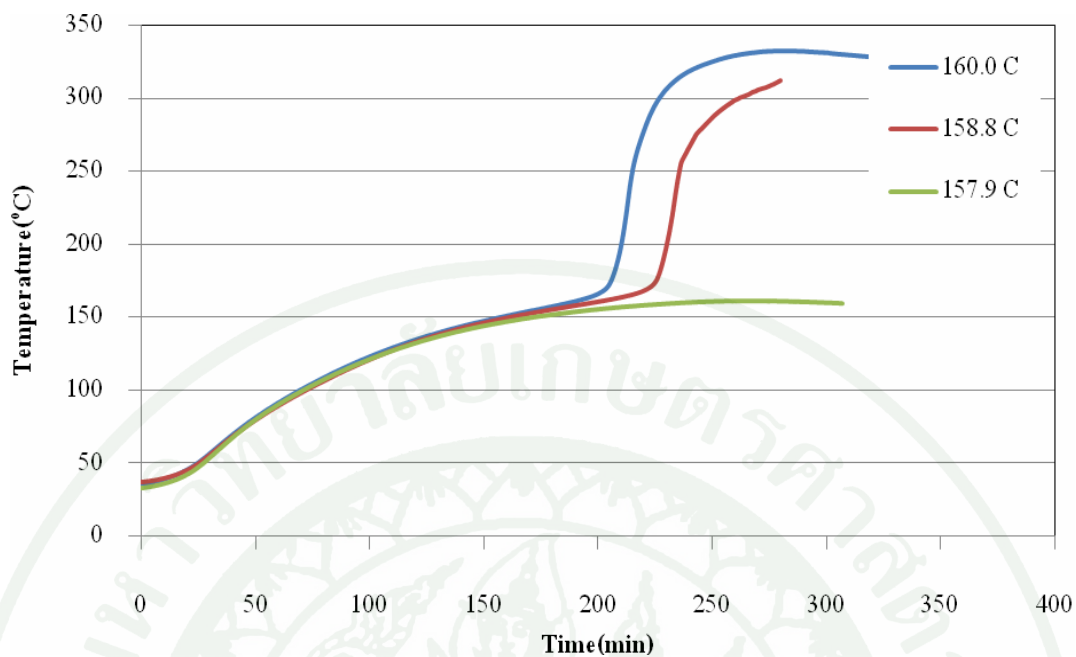
จากภาพที่ 66 ภาพที่ 67 และภาพที่ 68 สามารถสรุปได้ว่าขนาดอนุภาคของถ่านหิน Phoenix 18 ที่มีขนาดอนุภาคเล็กลงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและอัตราการระเหยเป็นไอสูงขึ้น และมีแนวโน้มการลุกไหม้ได้เองสูงขึ้น เห็นได้จากการทดลองถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร มีค่า CPT น้อยที่สุดคือ 151.8°C กล่าวคือมีแนวโน้มการลุกไหม้ได้เองมากกว่าถ่านหินขนาด 75-106 ไมโครเมตร และขนาด 106-250 ไมโครเมตร ที่มีค่า CPT เท่ากับ 152.9°C และ 156.9°C ตามลำดับ

3.3) ผลการทดลองการเกิดการลุกไหม้ได้เองถ่านหิน JORONG 262 ขนาดต่างๆ โดยวิธีการกำหนดอุณหภูมิคงที่ในการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 1,200 ml/min ได้ผลการทดลองดังนี้



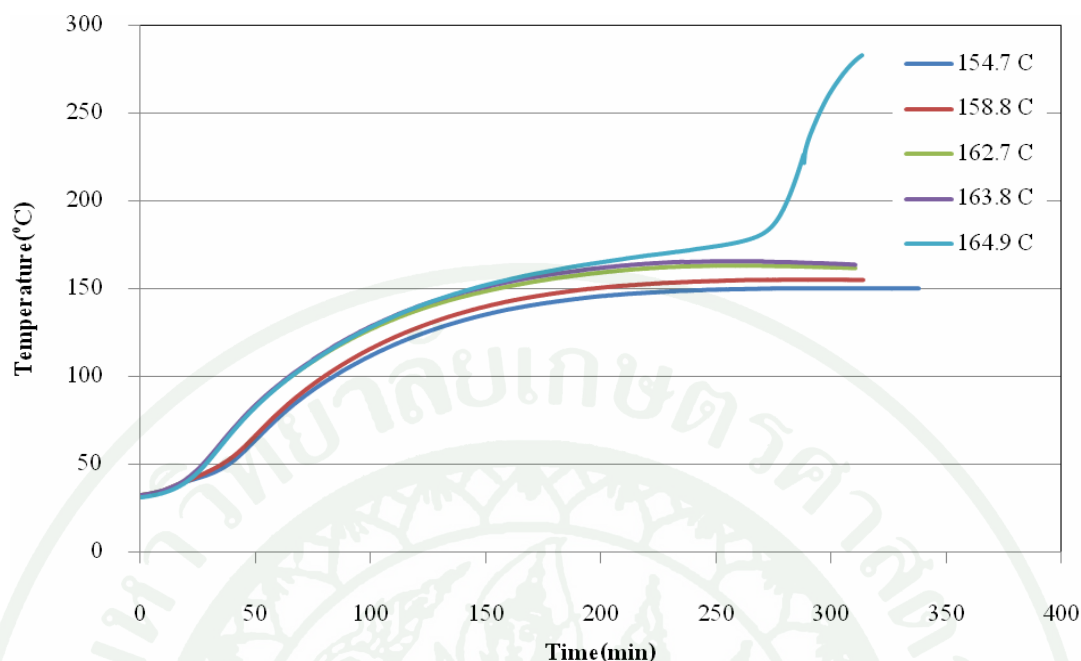
ภาพที่ 69 อุณหภูมิของถ่านหิน JORONG 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)

จากภาพที่ 69 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 154.8°C นั้นพบว่าถ่านหิน JORONG 262 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดการลุกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 171 นาที



ภาพที่ 70 อุณหภูมิของถ่านหิน JORONG 262 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)

จากภาพที่ 70 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 158.8°C นั้นพบว่าถ่านหิน JORONG 262 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร สามารถเกิดลุกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 193 นาที

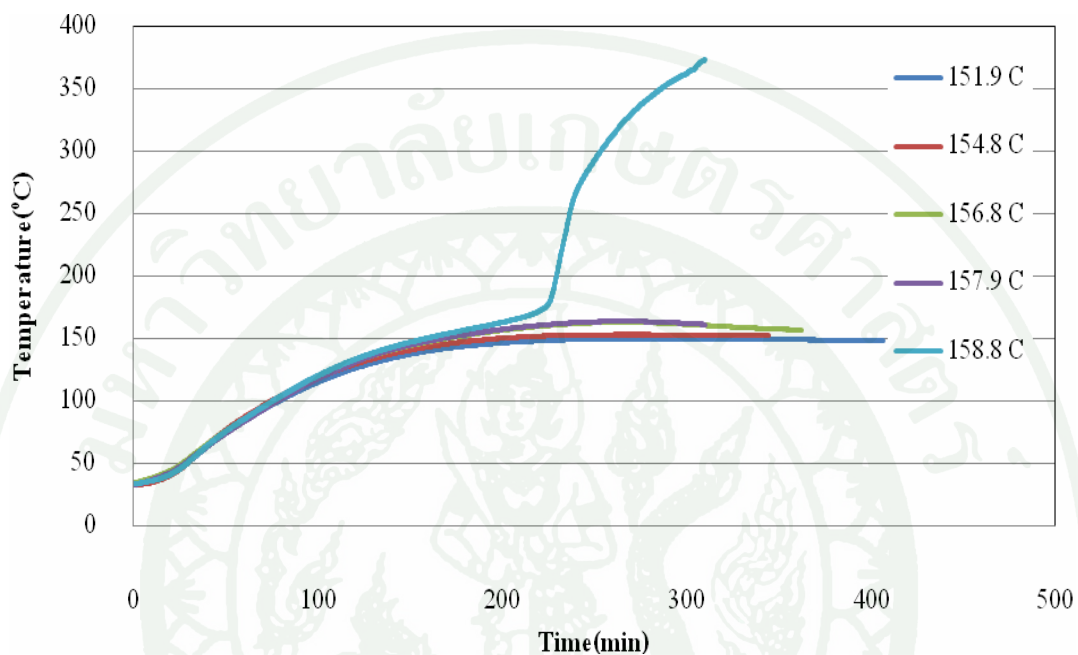


ภาพที่ 71 อุณหภูมิของถ่านหิน JORONG 262 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)

จากภาพที่ 71 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 164.9°C นั้นพบว่าถ่านหิน JORONG 262 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร สามารถเกิดลุกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 199 นาที

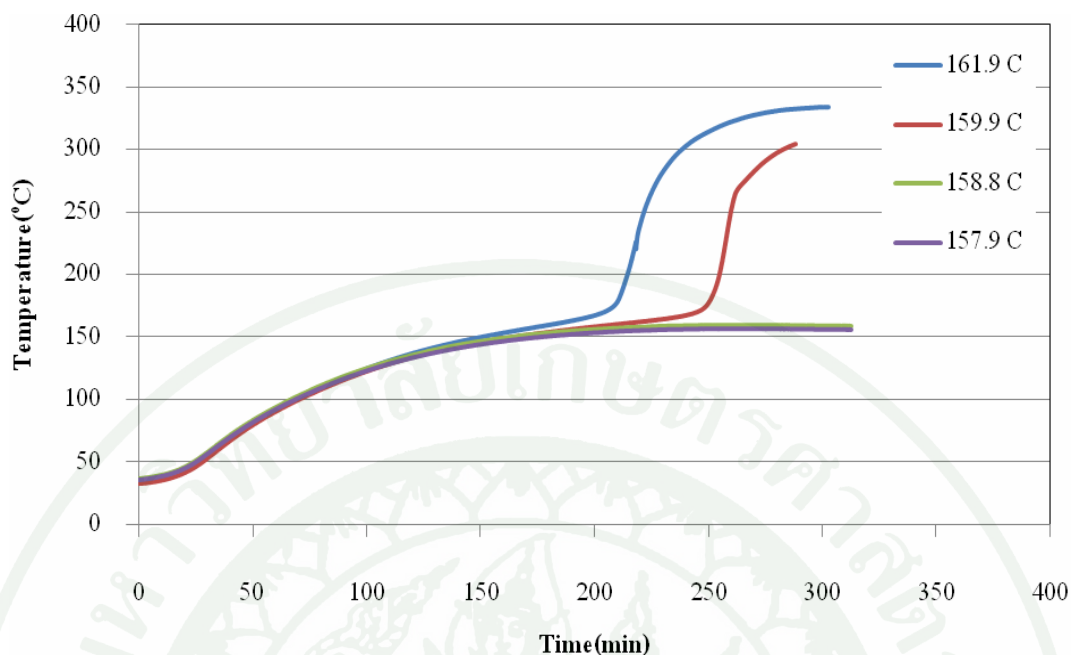
จากภาพที่ 69 ภาพที่ 70 และภาพที่ 71 สามารถสรุปได้ว่าขนาดอนุภาคของถ่านหิน JORONG 262 ที่มีขนาดอนุภาคเล็กลงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและอัตราการระเหยเป็นไอสูงขึ้นและมีแนวโน้มการลุกไหม้ได้เองสูงขึ้น เห็นได้จากการทดลองถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร มีค่า CPT น้อยที่สุดคือ 154.8°C กล่าวคือมีแนวโน้มการลุกไหม้ได้เองมากกว่าถ่านหินขนาด 75-106 ไมโครเมตร และขนาด 106-250 ไมโครเมตร ที่มีค่า CPT เท่ากับ 158.8°C และ 164.9°C ตามลำดับ

3.4) ผลการทดลองการเกิดการลุกไหม้ได้เองถ่านหิน ADARO 265 ขนาดต่างๆ โดยวิธีการกำหนดอุณหภูมิคงที่ในการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 1,200 ml/min ได้ผลการทดลองดังนี้



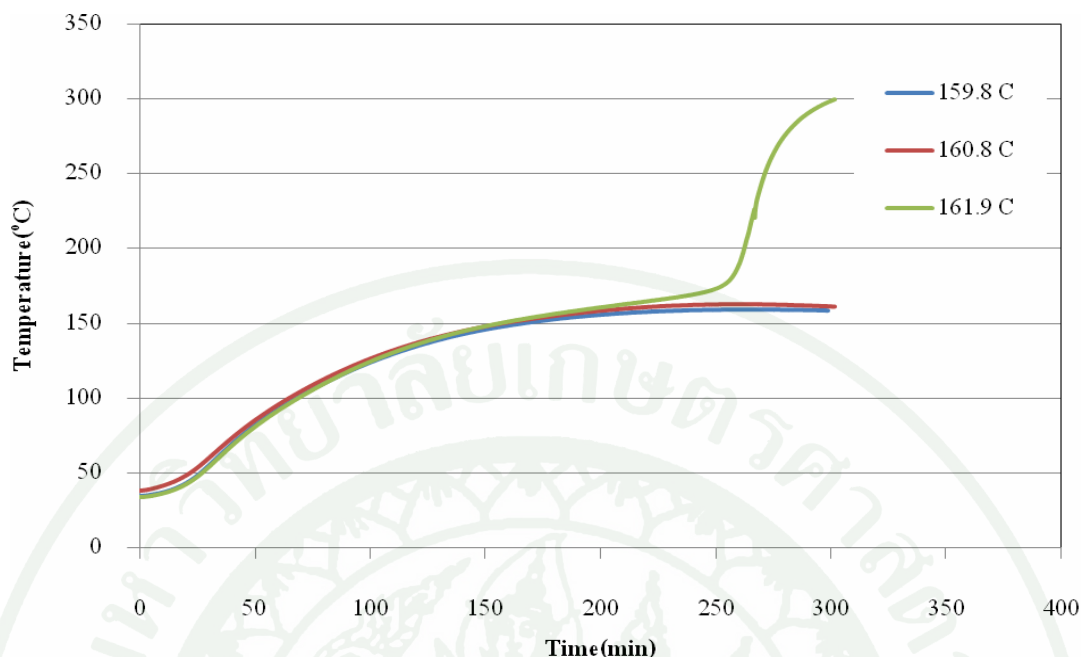
ภาพที่ 72 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)

จากภาพที่ 72 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 158.8°C นั้นพบว่าถ่านหิน ADARO 265 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเกิดการลุกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 186 นาที



ภาพที่ 73 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 265 ขนาด 75-106 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)

จากภาพที่ 73 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 159.9°C นั้นพบว่าถ่านหิน ADARO 265 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร สามารถเกิดลุกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 208 นาที



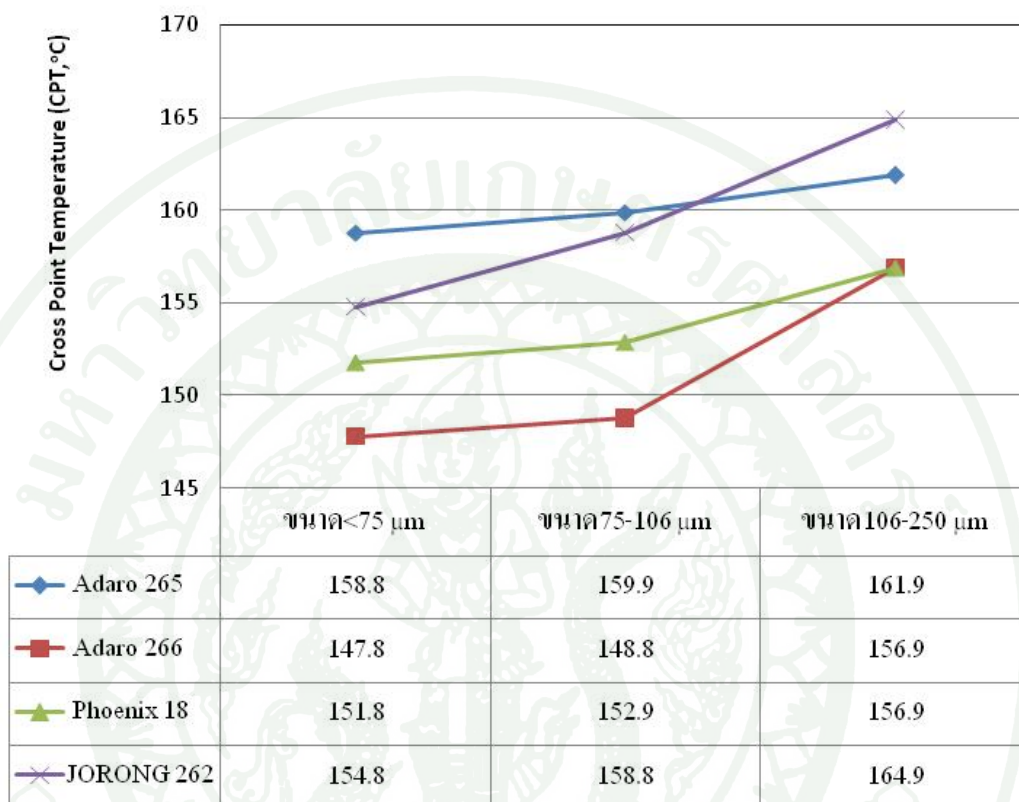
ภาพที่ 74 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 265 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)

จากภาพที่ 74 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 161.9°C นั้นพบว่าถ่านหิน ADARO 265 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร สามารถเกิดลูกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 206 นาที

จากภาพที่ 72 ภาพที่ 73 และภาพที่ 74 สามารถสรุปได้ว่าขนาดอนุภาคของถ่านหิน ADARO 265 ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกลงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและอัตราการระเหยเป็นไอสูงขึ้นและมีแนวโน้มการลุกไหม้ได้เองสูงขึ้น เห็นได้จากการทดลองถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร มีค่า CPT น้อยที่สุดคือ 158.8°C กล่าวคือมีแนวโน้มการลุกไหม้ได้เองมากกว่าถ่านหินขนาด 75-106 ไมโครเมตร และขนาด 106-250 ไมโครเมตร ที่มีค่า CPT เท่ากับ 159.9°C และ 161.9°C ตามลำดับ

จากการทดลองพบว่าเมื่อขนาดอนุภาคเล็กกลงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและอัตราการระเหยเป็นไอสูงขึ้น และมีแนวโน้มการลุกไหม้ได้เองสูงขึ้น ซึ่งสามารถดูได้จากภาพที่ 75 ว่าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร มีค่า CPT น้อยที่สุด กล่าวคือมีแนวโน้มการลุกไหม้ได้

เองมากกว่าถ่านหินขนาด 75-106 ไมโครเมตร และขนาด 106-250 ไมโครเมตร ที่มีค่า CPT สูงกว่า ตามลำดับ



ภาพที่ 75 อุณหภูมิของถ่านหินที่เกิดการลุกไหม้ได้เอง ของถ่านหินขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ขนาด 75-106 ไมโครเมตร และขนาด 106-250 ไมโครเมตร

นอกจากนี้ จะเห็นได้ชัดเจนว่าถ่านหิน Adaro 266 และ Phoenix 18 ที่มีขนาดอนุภาคเล็ก สามารถเกิดการลุกไหม้ได้เองที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าถ่านหินที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ คือ ถ่านหิน Adaro 266 และ Phoenix 18 ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร จะสามารถลุกไหม้ได้เองที่อุณหภูมิ 147.8 °C และ 151.8 °C ส่วนถ่านหิน Adaro 266 และ Phoenix 18 ที่มีขนาดอนุภาค 75-106 ไมโครเมตร นั้นสามารถลุกไหม้ได้เอง ที่อุณหภูมิ 148.8 °C และ 152.8 °C และขนาดอนุภาค 106-250 ไมโครเมตร นั้นสามารถลุกไหม้ได้เอง ที่อุณหภูมิ 156.9 °C และ 156.9 °C

4) ผลของความชื้นของถ่านหินที่มีต่อการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน

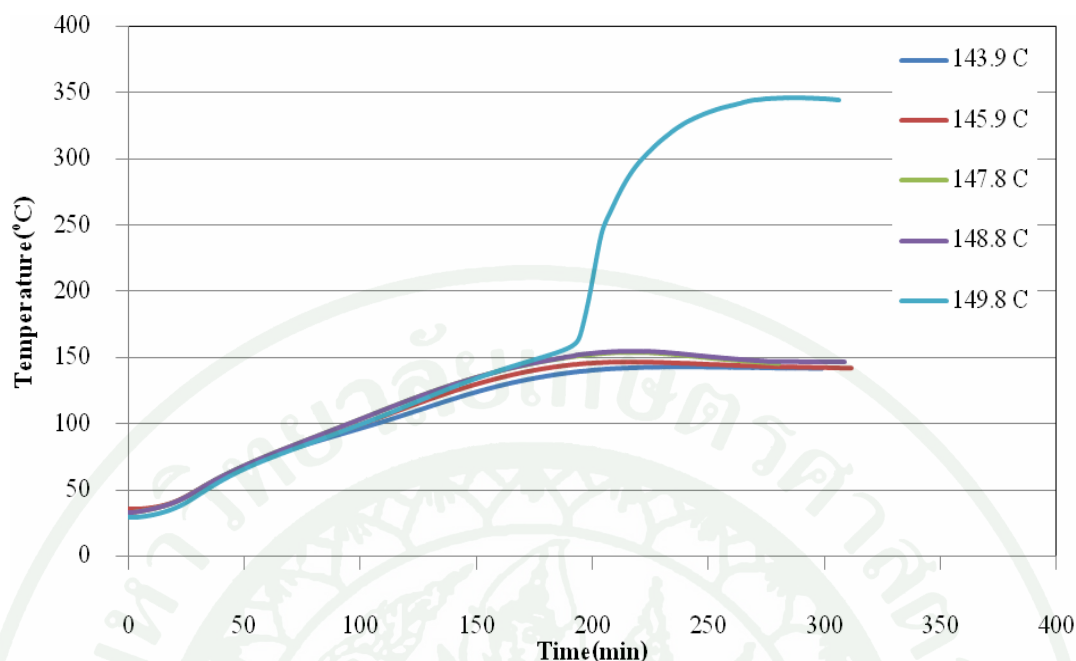
จากการศึกษาความชื้นที่มีต่อการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน โดยการนำถ่านหิน ADARO 266 อนุภาคขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ RH 70 %, 75% และ 80% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำถ่านหินดังกล่าวไปวิเคราะห์หองค์ประกอบโดยรวม และค่าความชื้น ดังแสดงในตารางที่ 25 ซึ่งพบว่า ถ่านหินที่สัมผัสอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ RH 80% มีค่าร้อยละความชื้นสูงสุด คือ 10.64 ร่องลงมาเป็นถ่านหินที่สัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 75% คือ มีค่าร้อยละความชื้น เท่ากับ 10.05 และ RH 70% มีค่าร้อยละความชื้น เท่ากับ 8.14 และเมื่อเทียบกับ ถ่านหินที่ไม่ได้ทำการ Treated แล้วพบว่าถ่านหินที่ไม่ได้ทำการ Treated มีค่าร้อยละความชื้นน้อยที่สุด คือมี 7.96

ตารางที่ 25 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวมของถ่านหิน ADARO 266 ที่สัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ค่าต่างๆ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%)	อุณหภูมิ (°C)		องค์ประกอบโดยรวมของถ่านหิน (wt%)			
	db Temp	wb Temp	ความชื้น	สารระเหยได้	เถ้า	คาร์บอนคงตัว
RH 80%	20	17.78	10.64	43.87	3.94	41.55
RH 75%	22	18.89	10.05	43.77	4.07	42.11
RH 70%	24	20	8.14	44.71	3.82	43.33
Untreated	-	-	7.96	45.19	5.55	41.3

4.1) การเกิดการลุกไหม้ได้เองถ่านหิน ADARO 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 80% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อัตราการไหลของอากาศ 1,200 ml/min

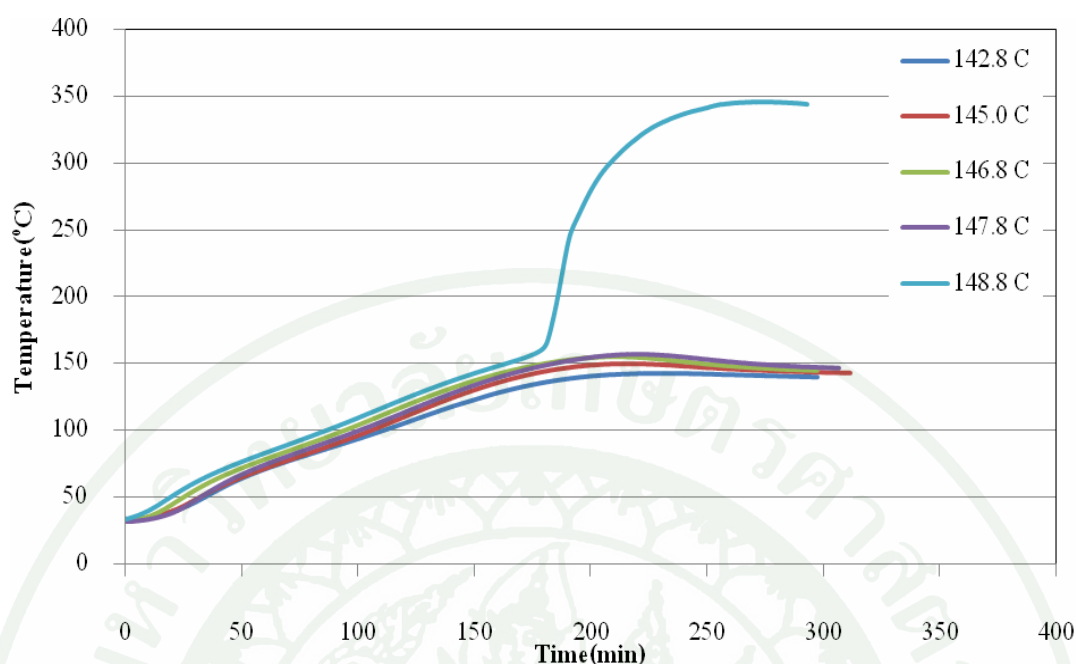
จากภาพที่ 76 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 149.8 °C นั้น พบว่าถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 80% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สามารถเกิดการลุกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 177 นาที



ภาพที่ 76 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 80% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)

4.2) การเกิดการลุกไหม้ได้เองถ่านหิน ADARO 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 75% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อัตราการไหลของอากาศ 1,200 ml/min

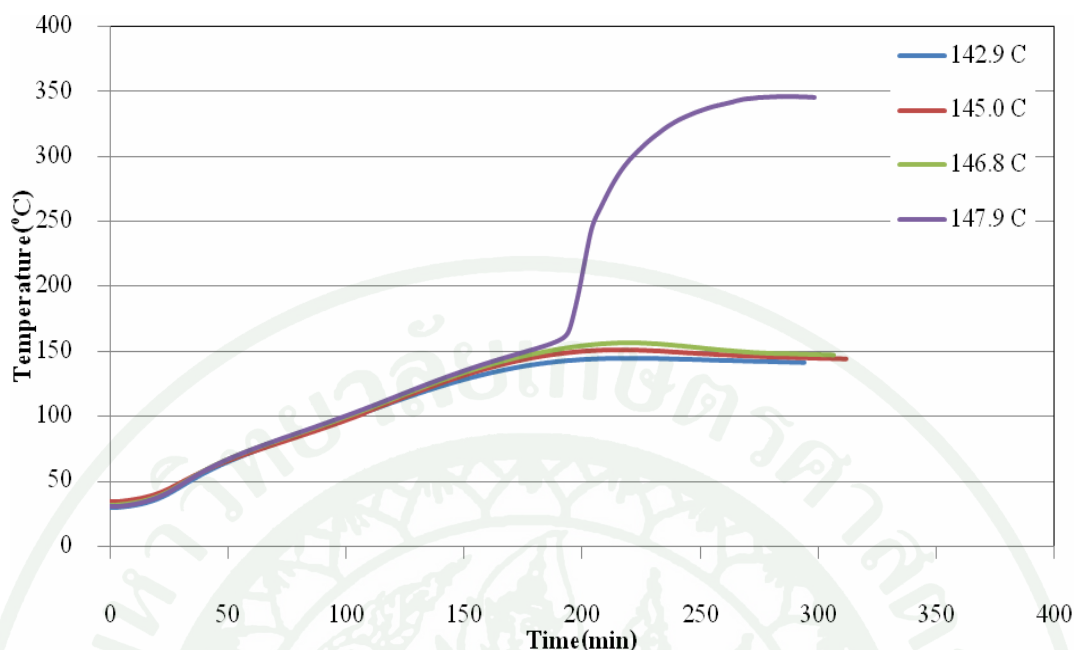
จากภาพที่ 77 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 148.8 °C นั้นพบว่าถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 75% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สามารถเกิดการลุกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 161 นาที



ภาพที่ 77 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 75% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)

4.3) การเกิดการลุกไหม้ได้เองถ่านหิน ADARO 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 70% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อัตราการไหลของอากาศ 1,200 ml/min

จากภาพที่ 78 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.9°C นั้นพบว่าถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 70% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สามารถเกิดการลุกไหม้ขึ้นได้เองภายในเวลา 173 นาที



ภาพที่ 78 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 70% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp)

เมื่อนำถ่านหินตัวอย่างดังกล่าวไปทดลองหาอุณหภูมิจุดเริ่มต้นของการลุกไหม้ของถ่านหิน พบว่าถ่านหินที่มีค่าร้อยละความชื้นสูงจะมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เองสูงกว่าถ่านหินที่มีค่าร้อยละความชื้นต่ำดังแสดงในตารางที่ 26

ตารางที่ 26 ผลการทดลองอุณหภูมิที่ถ่านหิน ADARO 266 สามารถลุกไหม้ได้เอง หลังการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ค่าต่างๆ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%)	องค์ประกอบโดยรวมของถ่านหิน (wt%)		เวลาที่ลุกไหม้จากเริ่มต้น (นาที)	CPT(°C)
	ความชื้น			
RH 80%	10.64		177	149.8
RH 75%	10.05		161	148.8
RH 70%	8.14		173	147.9
Untreated	7.96		168	147.8

จากตารางที่ 26 พบว่าได้ชัดเจนจากถ่านหิน Adaro 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร นั้นเมื่อได้รับความชื้นจะส่งผลให้ค่าร้อยละความชื้นของถ่านหินเพิ่มขึ้น และเมื่อนำมาทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินตัวอย่าง ได้ผลชัดเจนว่าถ่านหินที่มีค่าร้อยละความชื้นสูง คือถ่านหินที่สัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 80% สามารถลุกไหม้ได้เองที่อุณหภูมิสูงที่สุดคือ 149.8 °C และในทางกลับกันถ่านหินที่ไม่ได้ทำการ Treated ที่มีค่าร้อยละความชื้นน้อย แต่สามารถลุกไหม้ได้เองที่อุณหภูมิ 147.8 °C

ส่วนระยะเวลาที่ถ่านหินสัมผัสอุณหภูมิที่สามารถลุกไหม้ได้เองนั้น พบว่าที่อุณหภูมิต่างกันถ่านหินตัวอย่างสัมผัสใกล้เคียงกัน คือมีอุณหภูมิต่างกัน ± 0.25 °C แล้วถ่านหินที่มีค่าร้อยละความชื้นมากกว่า จะมีระยะเวลาในการที่สัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิดังกล่าวแล้วเกิดการลุกไหม้ได้เองนานกว่าถ่านหินที่มีค่าร้อยละความชื้นต่ำ คือ ถ่านหิน Adaro 266 ที่สัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 70% มีค่าร้อยละความชื้น 8.14 ซึ่งมากกว่าถ่านหิน Adaro 266 ที่ไม่ได้สัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ ที่มีค่าร้อยละความชื้น 7.96 จึงทำให้ถ่านหิน Adaro 266 ที่สัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 70% ใช้ระยะเวลาในการสัมผัสอุณหภูมิก่อนการลุกไหม้นานกว่าถ่านหิน Adaro 266 ที่ไม่ได้สัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ โดยใช้ระยะเวลาเท่ากับ 173 นาที และ 168 นาที

เมื่อพิจารณาผลของความชื้นของถ่านหินมีผลต่อการลุกไหม้ของถ่านหินแหล่งเดียวกันและขนาดอนุภาคเท่ากันแล้วนั้น พบว่า เมื่อความชื้นของถ่านหินเพิ่มขึ้นทำให้ต้องใช้ปริมาณความร้อนมากขึ้นในการทำให้ถ่านหินนั้นลุกไหม้ ซึ่งก็คืออุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เองนั้นจะสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดลองของ Kadioğlu and Varamaz (2003) ที่ได้ศึกษาผลกระทบของความชื้นและอากาศที่แห้งต่อการเกิดการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินลิกไนต์เตอร์คิสต์ (Turkish) กล่าวคือ ความชื้นมีผลต่อการเกิดการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน เมื่อถ่านหินแต่ละขนาดมีค่าความชื้นสูงขึ้นจะทำให้ค่าอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เอง Cross Point Temperature (CPT) มีค่าสูงขึ้น ส่งผลทำให้แนวโน้มการลุกไหม้ได้เองลดลง

5) ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ปัจจัยทางเคมีของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน

5.1) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวมของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างสามารถลุกไหม้ได้เอง ได้ผลดังข้อมูลในตารางที่ 27 เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวมของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง PHOENIX 18, JORONG 262 และ ADARO 265 สามารถลุกไหม้ได้เอง พบว่า ปริมาณของสารระเหยได้แปรผกผันกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เอง กล่าวคือ เมื่อถ่านหินมีปริมาณสารระเหยได้มากส่งผลให้อุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างสามารถลุกไหม้ได้เองต่ำ ในทางกลับกันพบว่าปริมาณคาร์บอนคงตัวกลับแปรผันตรงกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เอง กล่าวคือ เมื่อถ่านหินมีปริมาณคาร์บอนคงตัวมากก็จะส่งผลให้อุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างสามารถลุกไหม้ได้เองสูง

ตารางที่ 27 ข้อมูลผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวมของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างสามารถลุกไหม้ได้เอง

ตัวอย่าง	วิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวมของถ่านหิน, (wt% dry, ash-free)		CPT (°C)
	สารระเหยได้	คาร์บอนคงตัว	
ADARO 266	50.09	49.91	151.2
PHOENIX 18	52.62	47.38	153.9
JORONG 262	50.42	49.58	159.5
ADARO 265	49.51	50.49	160.2

ผลจากข้อมูลในตารางที่ 27 สอดคล้องกับการแบ่งเกรดของถ่านหินตามมาตรฐาน ASTM D388 ที่ว่าปริมาณของค่าสารระเหยได้และค่าคาร์บอนคงตัวเป็นปัจจัยหลักในการแบ่งเกรดของถ่านหิน ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าถ่านหินที่มีค่าสารระเหยได้มากแต่ค่าคาร์บอนคงตัวน้อยจะเป็นถ่านหินเกรดต่ำที่มีโอกาสในการลุกไหม้ได้เองที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนถ่านหินที่มีค่าสารระเหยได้น้อยแต่ค่าคาร์บอนคงตัวมากจะเป็นถ่านหินเกรดสูงที่มีโอกาสในการลุกไหม้ได้เองที่อุณหภูมิสูงกว่า

5.2) ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับอุณหภูมิของถ่านหินตัวอย่างที่สามารถลุกไหม้ได้เอง จากข้อมูลในตารางที่ 28 โดยให้อุณหภูมิที่ถ่านหินลุกไหม้ได้เอง (CPT) เป็นตัวแปรตาม และให้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินเป็นตัวแปรอิสระ แล้วนำมาหาความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ซึ่งได้ความสัมพันธ์ของ CPT และผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินดังเป็นสมการความสัมพันธ์เชิงเส้น ในตารางที่ 29

ตารางที่ 28 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างสามารถลุกไหม้ได้เอง

ตัวอย่าง	ธาตุองค์ประกอบ wt%(dry, ash-free)				อัตราส่วนโดยน้ำหนัก			CPT(°C)
	C	H	S	O (Diff.)	H/C	O/C	S/C	
ADARO 266	63.47	5.14	0.09	30.48	0.08	0.48	0.00	151.2
PHOENIX 18	54.83	5.08	0.73	38.38	0.09	0.70	0.01	153.9
JORONG 262	65.20	4.86	0.14	28.87	0.07	0.44	0.00	159.5
ADARO 265	61.72	5.34	0.58	31.41	0.09	0.51	0.01	160.2

ตารางที่ 29 ข้อมูลทางสถิติและสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างสามารถลุกไหม้ได้เอง

ตัวแปรตาม	สมการ	Correlation coefficients (R)	coefficients of determination (R ²)	Std. Error
CPT	CPT=237.303-835.634(H/C) - 43.972(O/C)+ 1867.694(S/C)	1.000	1.000	0.0000

จากข้อมูลในตารางที่ 28 และตารางที่ 29 พบว่า เมื่อนำปริมาณคาร์บอน, ออกซิเจน, ซัลเฟอร์ และไฮโดรเจนมาพิจารณาหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างสามารถลุกไหม้ได้เอง ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ได้ชัดเจน อย่างไรก็ตามเมื่อนำอัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุ

องค์ประกอบต่อคาร์บอน มาพิจารณาพบว่าอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และอัตราส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างสามารถลุกไหม้ได้เอง กล่าวคือ เมื่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และอัตราส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เองต่ำลง ตรงกันข้ามกับอัตราส่วนของซัลเฟอร์ต่อคาร์บอนเมื่อเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เองสูงขึ้น

ผลจากข้อมูลในตารางที่ 28 และตารางที่ 29 สอดคล้องกับการแบ่งเกรดของถ่านหินตามโดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอม (Elliot, 1981) ที่ว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอนจะลดลงเมื่อถ่านหินมีเกรดสูงขึ้น นั่นคือ ถ่านหินที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอนสูงจะมีอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เองต่ำลง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยเกี่ยวกับความชื้นและขนาดของถ่านหินซับบิทูมินัส ที่มีผลต่อการเกิดการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน พร้อมทั้งเปรียบเทียบระยะเวลาและอุณหภูมิในการเกิดการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินซับบิทูมินัสที่มีความชื้น

1. การศึกษาอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมกับการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินตัวอย่างที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร พบว่าการให้อัตราการไหลของอากาศน้อยจะส่งผลให้ถ่านหินได้รับปริมาณออกซิเจนน้อยทำให้การลุกไหม้ของถ่านหินเกิดที่อุณหภูมิสูง ส่วนอัตราการไหลของอากาศที่สูงถึงแม้ว่าปริมาณออกซิเจนมากเพียงพอแต่ความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การระบายความร้อนได้ดีขึ้นและส่งผลให้การลุกไหม้ได้เองของถ่านหินเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ด้วยเหตุนี้อัตราการไหลที่เหมาะสม คือ อัตราการไหลของอากาศที่มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอและความเร็วลมสมดุล ซึ่งจากการทดลองพบว่าอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสม คือ 1,200 ml/min

2. การศึกษาอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการลุกไหม้ได้เองของถ่านหินขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรจากแหล่งที่มาของถ่านหินต่าง ๆ พบว่า ถ่านหิน ADARO 266 ที่นำมาจากประเทศอินโดนีเซีย มีอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัสแล้วสามารถลุกไหม้ได้เองต่ำสุด คือ 147.8 °C รองลงมาเป็นถ่านหินจากประเทศสาธารณรัฐแอฟริกาใต้ คือ ถ่านหิน PHOENIX 18 มีอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัสแล้วสามารถลุกไหม้ได้เอง คือ 151.8 °C ลำดับที่ 3 และ 4 เป็นถ่านหินจากประเทศอินโดนีเซีย คือ ถ่านหิน JORONG 262 และถ่านหิน ADARO 265 ซึ่งมีอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เอง คือ 154.8 °C และ 158.8 °C ตามลำดับ

3. การศึกษาขนาดของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถลุกไหม้ได้เอง พบว่าถ่านหินขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรทุกชนิด มีอุณหภูมิที่ถ่านหินลุกไหม้ได้เอง ต่ำกว่าถ่านหินขนาด 75-106 ไมโครเมตร และถ่านหินขนาด 106-250 ไมโครเมตร ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่าถ่านหินที่มีขนาดเล็กจะสามารถลุกไหม้ได้เองที่อุณหภูมิต่ำกว่าถ่านหินที่มีขนาดใหญ่

4. การศึกษาผลของความชื้นของถ่านหินที่มีต่ออุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างสามารถกลุ่กใหม่ได้เอง พบว่า ถ่านหินที่สัมผัสอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ RH 80% มีค่าร้อยละความชื้นสูงสุด คือ 10.64 ร่องลงมาเป็นถ่านหินที่สัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 75% และ RH 70% และถ่านหินที่มีร้อยละความชื้นต่ำสุด คือ ถ่านหินที่ไม่ได้สัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ เมื่อทดลองหาอุณหภูมิจุดเริ่มต้นของการกลุ่กใหม่ของถ่านหิน พบว่าถ่านหินที่มีค่าร้อยละความชื้นสูง คือ ถ่านหิน ADARO 266 อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร ที่สัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 80% จะมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ถ่านหินสามารถกลุ่กใหม่ได้เอง เท่ากับ 149.8°C ซึ่งสูงกว่าถ่านหินที่มีค่าร้อยละความชื้นต่ำที่ไม่ได้สัมผัสความชื้น ที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ถ่านหินสามารถกลุ่กใหม่ได้เอง 147.8°C ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่าถ่านหินที่มีธาตุองค์ประกอบเหมือนกันหรือเป็นถ่านหินจากแหล่งเดียวกันที่ชั้นดินเดียวกันที่ขนาดเท่ากันแล้วถ่านหินที่มีค่าร้อยละความชื้นสูงกว่าจะสามารถกลุ่กใหม่ได้เองที่อุณหภูมิสูงกว่าถ่านหินที่มีค่าร้อยละของความชื้นต่ำกว่า

5. การศึกษาผลของความชื้นของถ่านหินที่มีต่อระยะเวลาที่ถ่านหินตัวอย่างสัมผัสอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถกลุ่กใหม่ได้เอง พบว่ากรณีถ่านหินที่มีขนาดและธาตุองค์ประกอบเหมือนกันแล้วถ่านหินที่มีค่าร้อยละความชื้นมากกว่า จะมีระยะเวลาในการที่สัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิดังกล่าวแล้วเกิดการกลุ่กใหม่ได้เองนานกว่าถ่านหินที่มีค่าร้อยละความชื้นต่ำ

6. ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ปัจจัยทางเคมีของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถกลุ่กใหม่ได้เองของถ่านหิน

6.1 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวมของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างสามารถกลุ่กใหม่ได้เอง พบว่า ถ่านหินที่มีค่าสารระเหยได้มากแต่ค่าคาร์บอนคงตัวน้อยมีโอกาสในการกลุ่กใหม่ได้เองที่อุณหภูมิต่ำกว่าถ่านหินที่มีค่าสารระเหยได้น้อยแต่ค่าคาร์บอนคงตัวมาก

6.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับอุณหภูมิของถ่านหินตัวอย่างที่สามารถกลุ่กใหม่ได้เอง ถ่านหินที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอนและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอนมากก็จะมีอุณหภูมิที่ถ่านหินสามารถกลุ่กใหม่ได้เองต่ำกว่าถ่านหินที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอนและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอนน้อย

ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาความชื้นที่มีผลต่อการลวกไหม้ได้เองของถ่านหินนั้นเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ มีสภาวะการทดลองแตกต่างจากพื้นที่ปฏิบัติงานหรือพื้นที่ในการกองเก็บถ่านหิน แต่น่าจะเป็นวิธีการที่สามารถบ่งชี้ถึงอุณหภูมิที่ถ่านหินสัมผัสแล้วสามารถลวกไหม้ได้เองได้อย่างถูกต้อง

ในการทดลองได้ใช้ตัวอย่างถ่านหินในจำนวน 25 กรัม ซึ่งมีความสูงเมื่อบรรจุในถังปฏิกรณ์เท่ากับ 3 เซนติเมตร ในขณะที่ในโรงงานหรือเหมืองไม่มีการคัดแยกขนาดในการกองเก็บหรือบรรจุในไซโล ดังนั้น

ในการศึกษาต่อไปควรทำการเพิ่มขนาดของถังปฏิกรณ์ให้มีขนาดขยายเป็นเท่าตัวกับของถังปฏิกรณ์เดิม หลายขนาด เพื่อจะได้สามารถวิเคราะห์ถึงอุณหภูมิที่สามารถทำให้ถ่านหินลวกไหม้ได้เองภายในภาวะบรรจุได้

และควรทำการเพิ่มปริมาณความสูงของถ่านหินทดลองที่บรรจุในถังปฏิกรณ์ให้มีหลายความสูง เพื่อจะได้สามารถวิเคราะห์ถึงอุณหภูมิที่สามารถทำให้ถ่านหินลวกไหม้ได้เองภายในภาวะบรรจุได้ เมื่อปริมาณในการบรรจุเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- อารยะ นาคะนาค. 2534. สภาพพื้นฐานทางธรณีวิทยาของการเกิดถ่านหิน. กรมทรัพยากร
ธรณี, กรุงเทพมหานคร
- Clemens, A.H., T.W. Matheson and D.E. Rogers. 1990. DTA studies of the low temperature
oxidation of low rank coals. **Fuel.** 69: 255-256.
- Chakravorty, R.H. and K. Kar. 1986. Characterization of Western Canadian coals with respect to
their susceptibility combustion. **Canada Centre for Mineral and Energy Technology.**
1986: 1-26
- Elliott, M.A. 1981. **Chemistry of coal utilization.** John Wiley & Sons Ltd, New York.
- James G. Quintiere. 1998. **Principles of fire behavior.** Delmar Publishers, United States of
America.
- Kadioğlu and Varamaz. 2003. The effect of moisture content and air-drying on spontaneous
combustion characteristics of two Turkish lignites. **Fuel.** 82: 1685-1693.
- Kim, A.G. 1977. Laboratory studies on spontaneous heating of coal: A summary of information
in the literature. , **U.S. Dept. of the Interior Bureau of Mine.** IC-8765: 1-13.
- Kuchta, J.M., V.R. Rowe and D.S. Burgess. 1980. Spontaneous combustion susceptibility of U.S.
Coal. **U.S. Dept. of the Interior Bureau of Mines.** RI-8474: 1-29.

Küçük, Kadioğlu and Gülaboğlu. 2003. A study of spontaneous combustion characteristics of a Turkish lignite: particle size, moisture of coal, humidity of air. **Combustion and Flame**. 133: 255-261.

Meyer, R.F. 1981. **Long-term energy resources**. Pitman, U.S.A.

Ogunsola, O.I. and R.J. Mikula. 1991. A study of spontaneous combustion characteristics of Nigerian coal. **Fuel**. 70: 258-261.

Ogunsola, O.I. and R.J. Mikula. 1992. Effect of thermal upgrading on spontaneous combustion characteristic of Western Canadian coal. **Fuel**. 71: 3-8.

Ratanasthien, B. 1984. Factors concerning with spontaneous fires in northern Thailand coal. **Proc. GEOSEA V Congress**. April 9-13: 1-9.

Solomon, P.R. 1981. Coal Structure and Thermal Decomposition. **New Approaches in Coal Chemistry**. Chapter 4 (1981): 61-71.

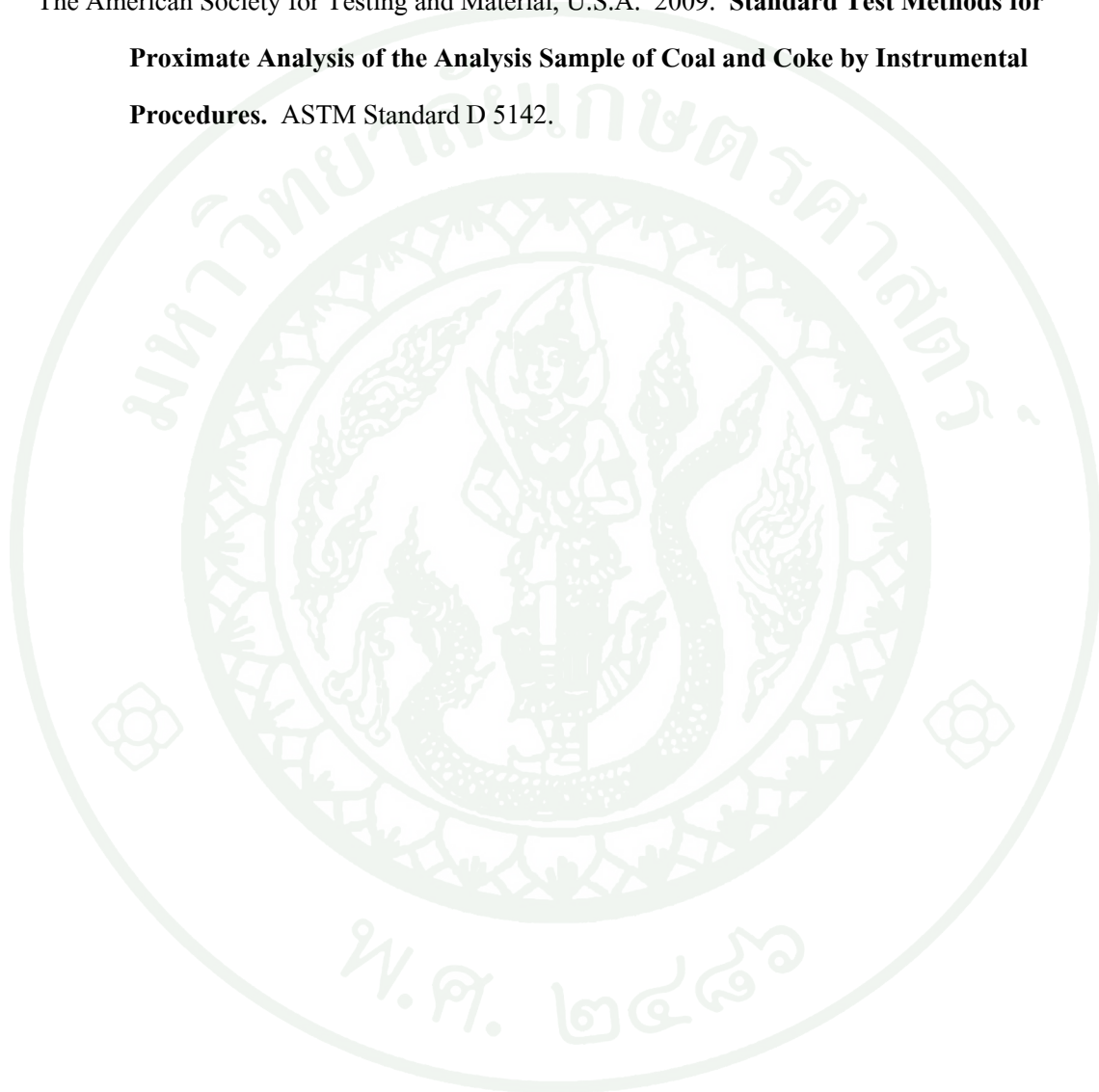
Tarafdar, M.N. and D. Guda. 1989. Application of wet oxidation processes for the assessment of the spontaneous heating of coal. **Fuel**. 68: 315-317.

The American Society for Testing and Material, U.S.A. 1999. **Standard Classification of Coals by Rank**. ASTM Standard D 388.

The American Society for Testing and Material, U.S.A. 2007. **Standard Practice for Preparing Coal Samples for Analysis**. ASTM Standard D 2013.

The American Society for Testing and Material, U.S.A. 2009. **Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter.**
ASTM Standard D 240.

The American Society for Testing and Material, U.S.A. 2009. **Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures.** ASTM Standard D 5142.

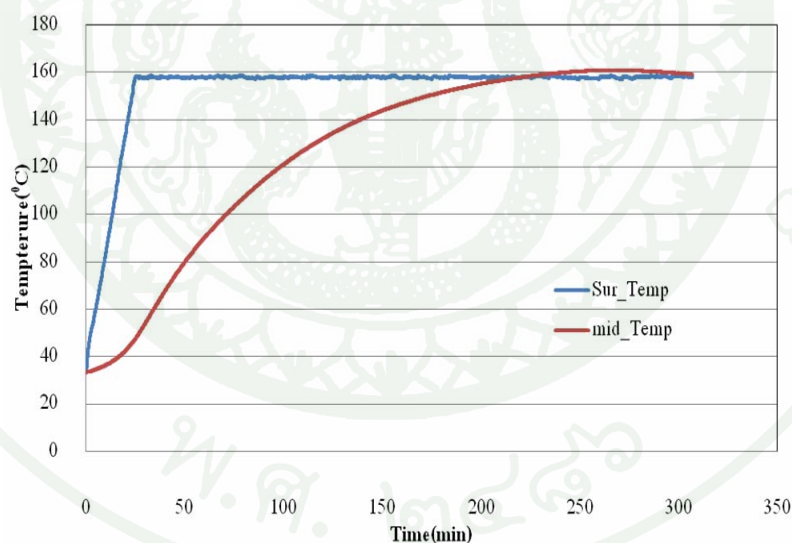




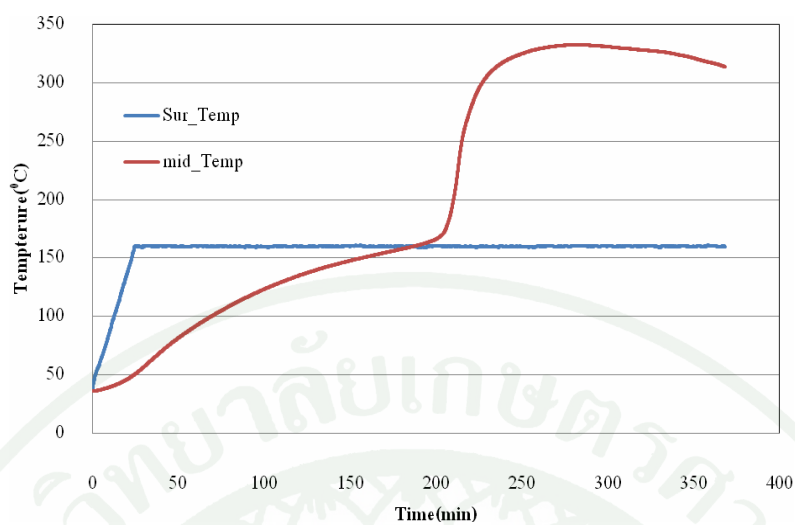


ตารางผนวกที่ ก1 ผลการทดลองการลวกใหม่ได้เองของถ่านหิน Jorong 262 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร

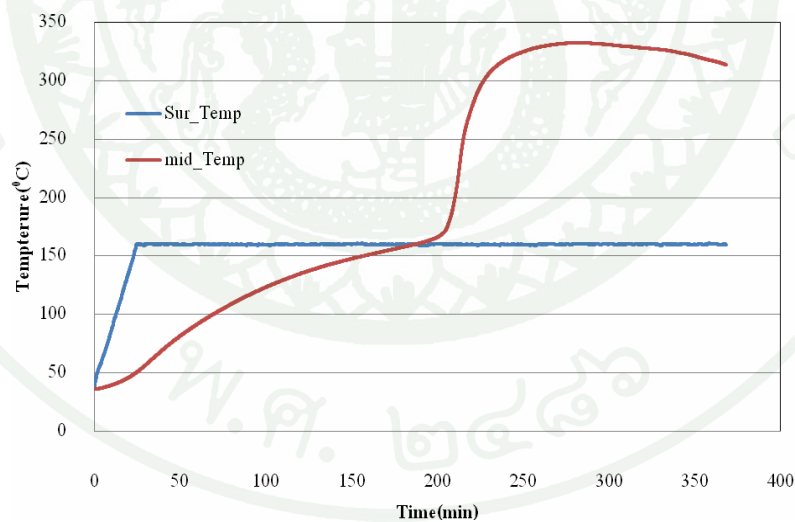
ครั้งที่	อุณหภูมิห้อง (°C)	เวลาที่เกิดการลวกใหม่ (min)	ผลการลวกใหม่
1	157.9	221	เกิดการลวกใหม่ไม่ต่อเนื่อง
2	160.0	187	เกิดการลวกใหม่ต่อเนื่อง
3	158.8	193	เกิดการลวกใหม่ต่อเนื่อง
4	158.9	193	เกิดการลวกใหม่ต่อเนื่อง
5	158.9	193	เกิดการลวกใหม่ต่อเนื่อง
6	158.8	193	เกิดการลวกใหม่ต่อเนื่อง



ภาพผนวกที่ ก1 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาด 75-106 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 157.9 °C



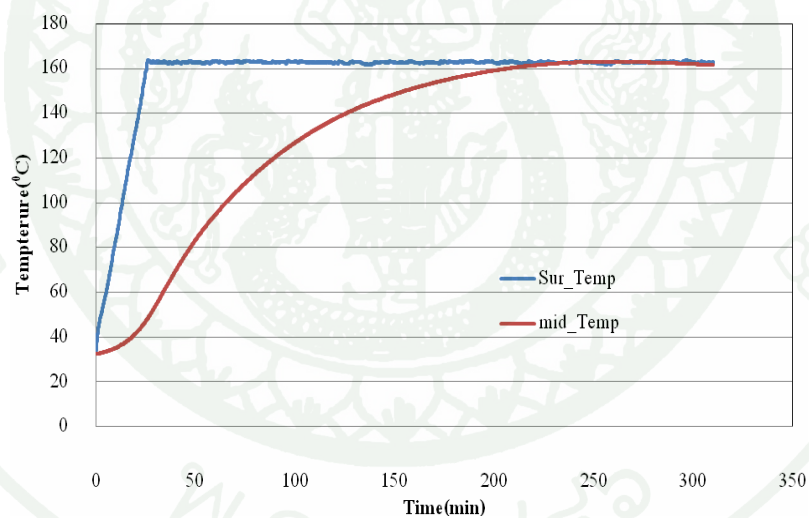
ภาพผนวกที่ ก2 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาด 75-106 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 160.0°C



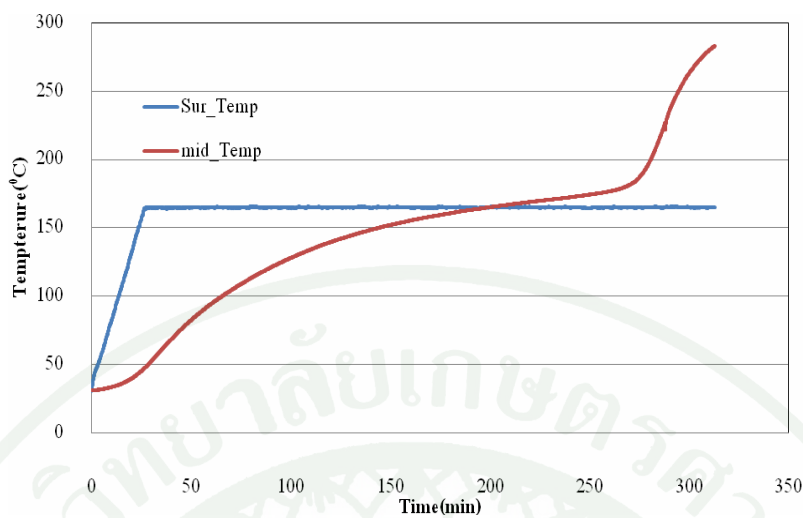
ภาพผนวกที่ ก3 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาด 75-106 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 158.8°C

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการทดลองการลวกไหม้ได้เองของถ่านหิน Jorong 262 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร

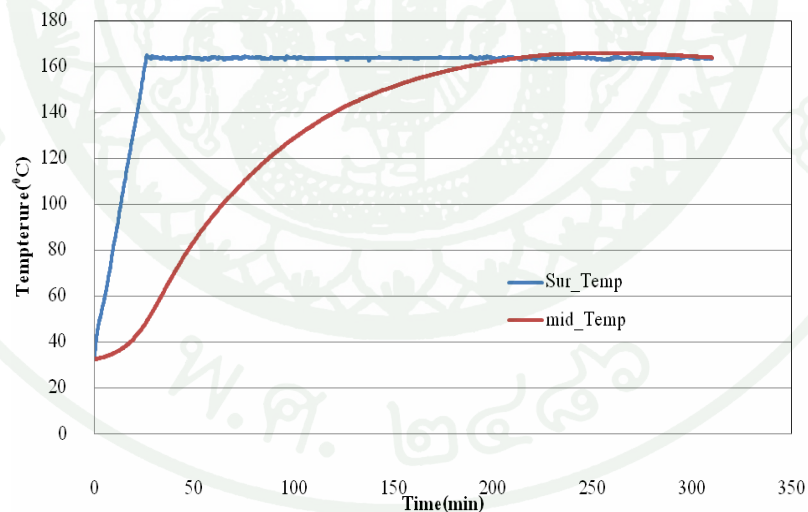
ครั้งที่	อุณหภูมิห้อง (°C)	เวลาที่เกิดการลวกไหม้ (min)	ผลการลวกไหม้
1	162.7	-	ไม่เกิดการลวกไหม้
2	164.9	199	เกิดการลวกไหม้ต่อเนื่อง
3	163.8	213	เกิดการลวกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
4	165.0	200	เกิดการลวกไหม้ต่อเนื่อง
5	164.9	199	เกิดการลวกไหม้ต่อเนื่อง
6	165.0	200	เกิดการลวกไหม้ต่อเนื่อง



ภาพผนวกที่ ก4 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 162.7 °C



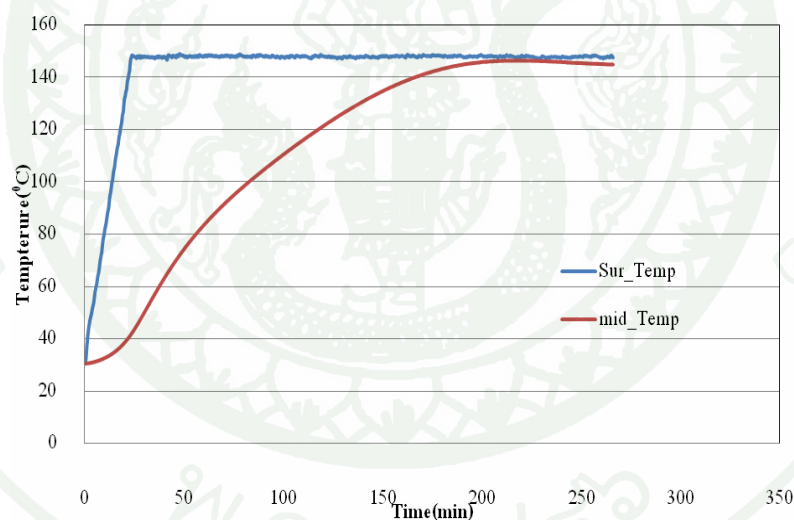
ภาพผนวกที่ ก5 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 164.9 °C



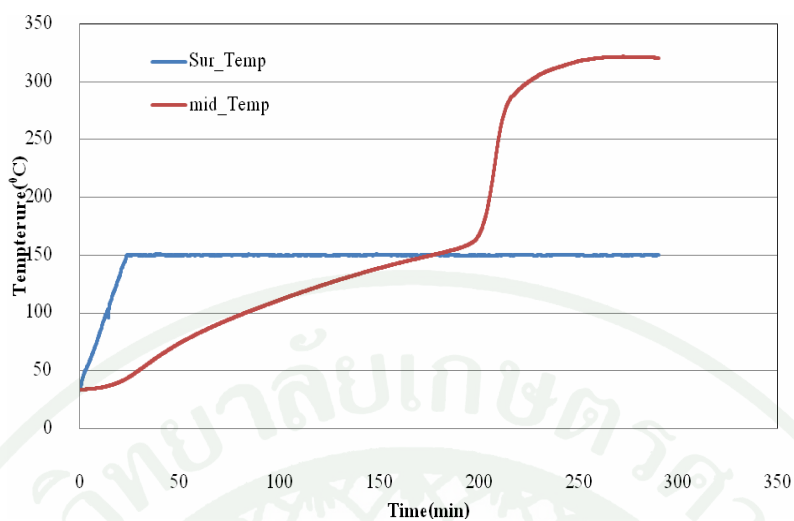
ภาพผนวกที่ ก6 อุณหภูมิของถ่านหิน Jorong 262 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 163.8 °C

ตารางผนวกที่ ก3 ผลการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร

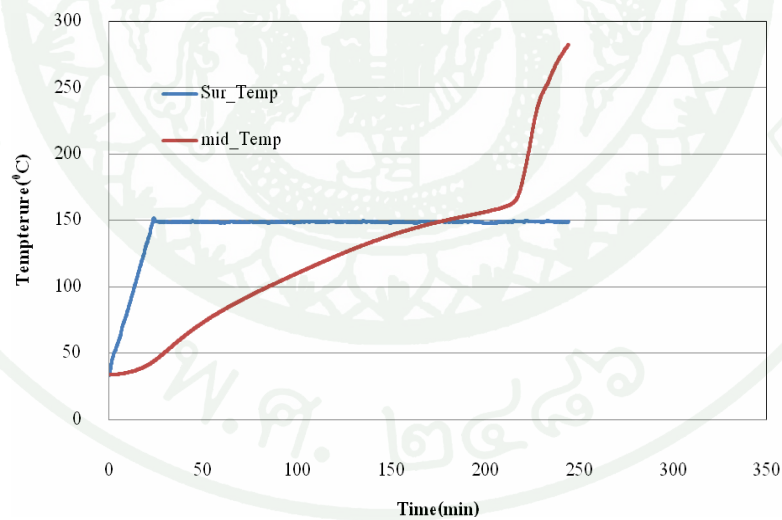
ครั้งที่	อุณหภูมิห้อง (°C)	เวลาที่เกิดการลุกไหม้ (min)	ผลการลุกไหม้
1	147.9	-	ไม่เกิดการลุกไหม้
2	149.9	177	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
3	148.8	175	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
4	148.9	175	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
5	148.9	174	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
6	149.1	176	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง



ภาพผนวกที่ ก7 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.9 °C



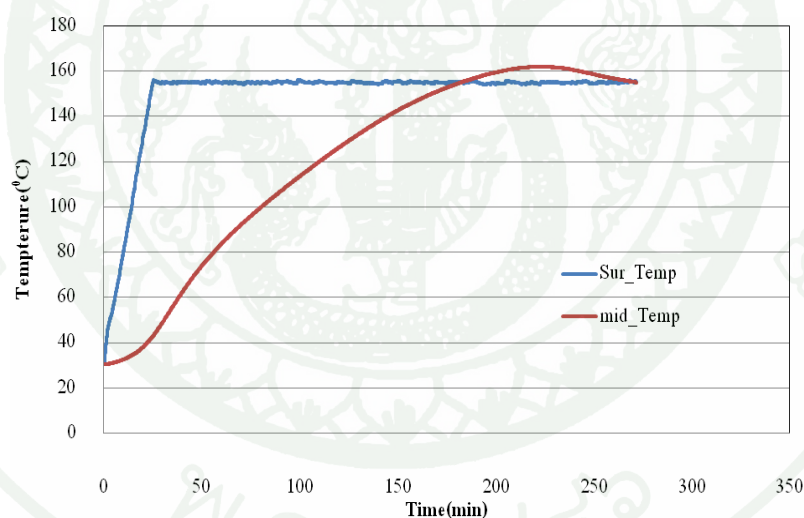
ภาพผนวกที่ ๘ อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 149.9 °C



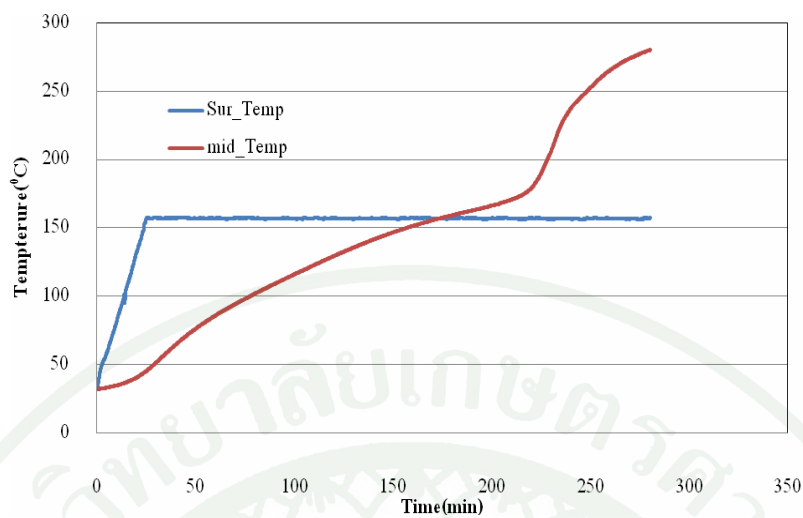
ภาพผนวกที่ ๙ อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 148.8 °C

ตารางผนวกที่ ก4 ผลการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร

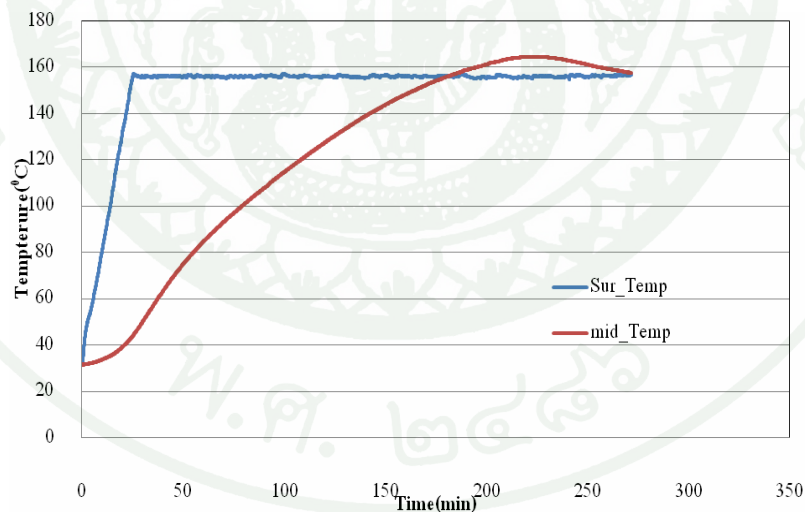
ครั้งที่	อุณหภูมิห้อง (°C)	เวลาที่เกิดการลุกไหม้ (min)	ผลการลุกไหม้
1	154.9	182	เกิดการลุกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
2	156.9	174	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
3	155.9	184	เกิดการลุกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
4	156.9	173	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
5	156.9	173	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
6	156.9	173	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง



ภาพผนวกที่ ก10 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 106-250 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 154.9 °C



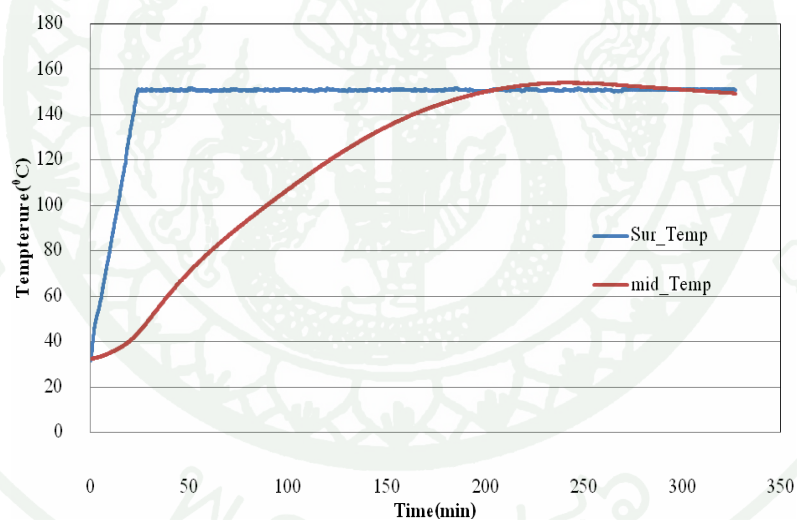
ภาพผนวกที่ ก11 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 106-250 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 156.9 °C



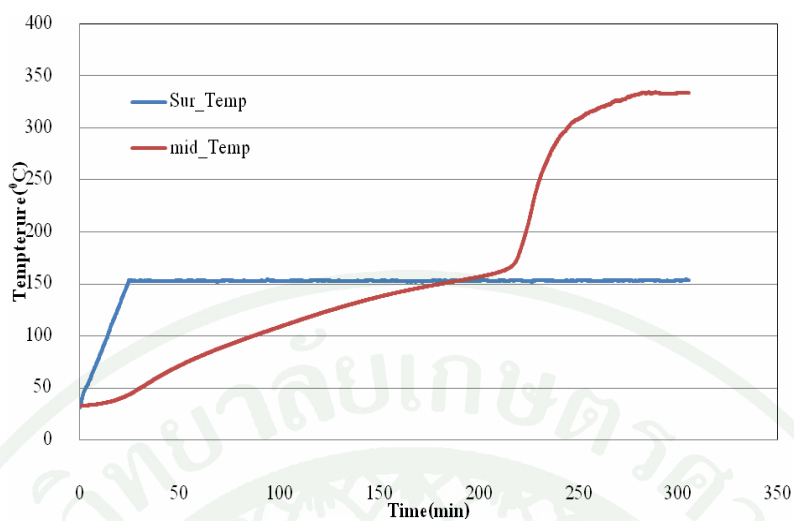
ภาพผนวกที่ ก12 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 266 ขนาด 106-250 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 155.9 °C

ตารางผนวกที่ ก5 ผลการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร

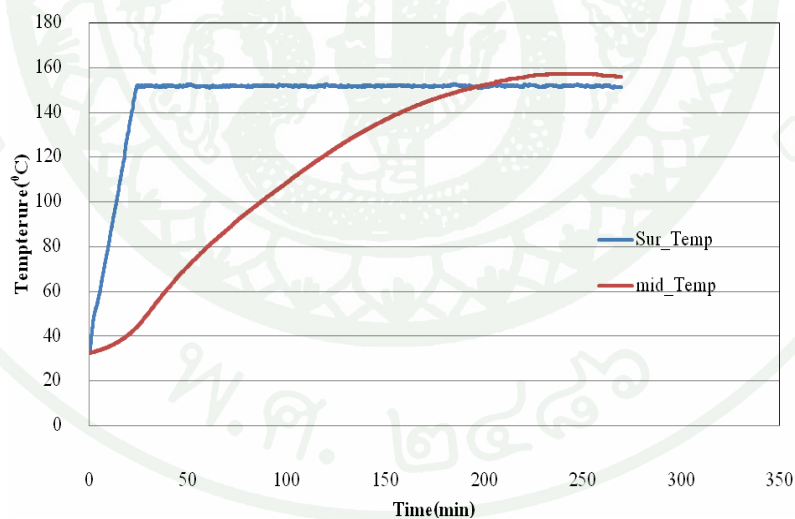
ครั้งที่	อุณหภูมิห้อง (°C)	เวลาที่เกิดการลุกไหม้ (min)	ผลการลุกไหม้
1	151.0	205	เกิดการลุกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
2	152.9	190	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
3	151.8	198	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
4	153.0	189	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
5	152.9	189	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
6	153.0	190	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง



ภาพผนวกที่ ก13 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 151.0 °C



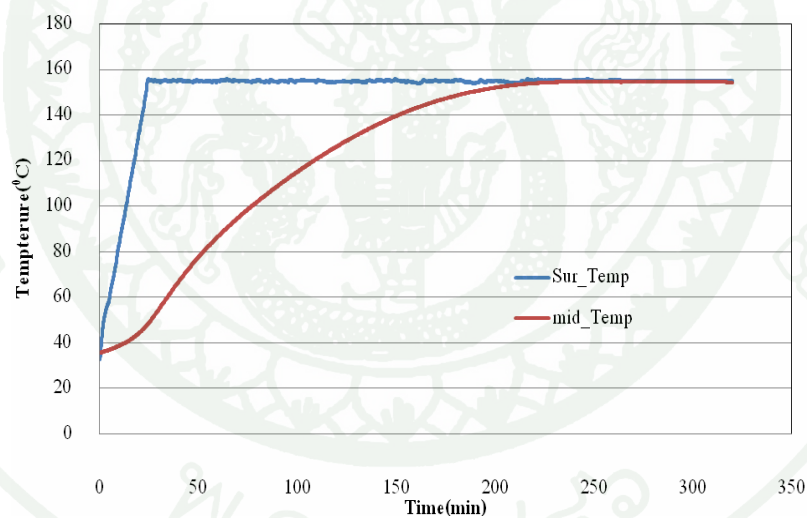
ภาพผนวกที่ ก14 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 75-106 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 152.9 °C



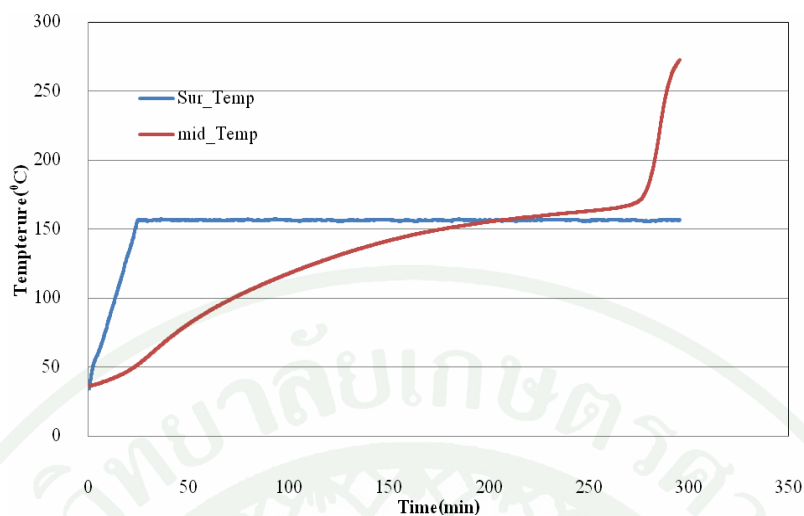
ภาพผนวกที่ ก15 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 75-106 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 151.8 °C

ตารางผนวกที่ ก6 ผลการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร

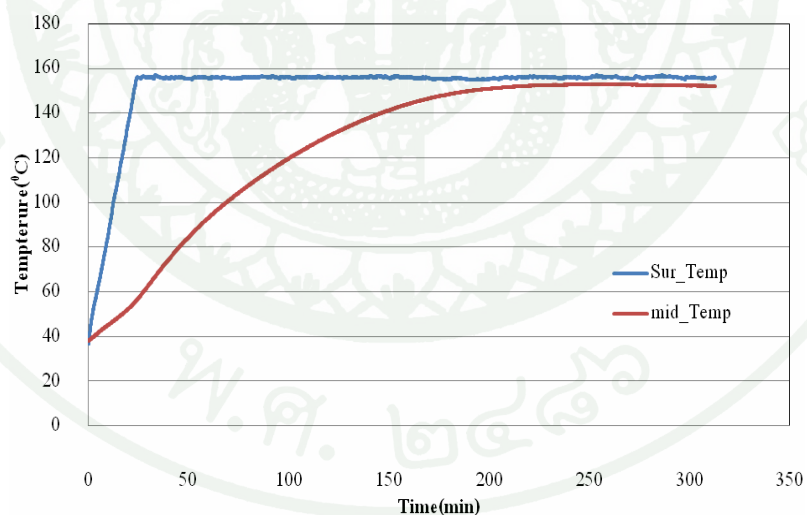
ครั้งที่	อุณหภูมิห้อง (°C)	เวลาที่เกิดการลุกไหม้ (min)	ผลการลุกไหม้
1	154.9	-	ไม่เกิดการลุกไหม้
2	156.9	206	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
3	155.8	-	ไม่เกิดการลุกไหม้
4	157.0	206	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
5	157.0	205	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
6	157.0	205	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง



ภาพผนวกที่ ก16 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 154.9 °C



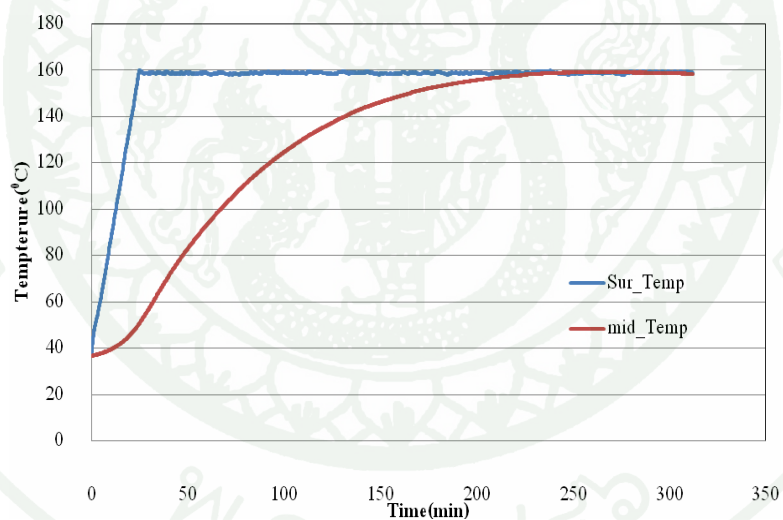
ภาพผนวกที่ ก17 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 156.9 °C



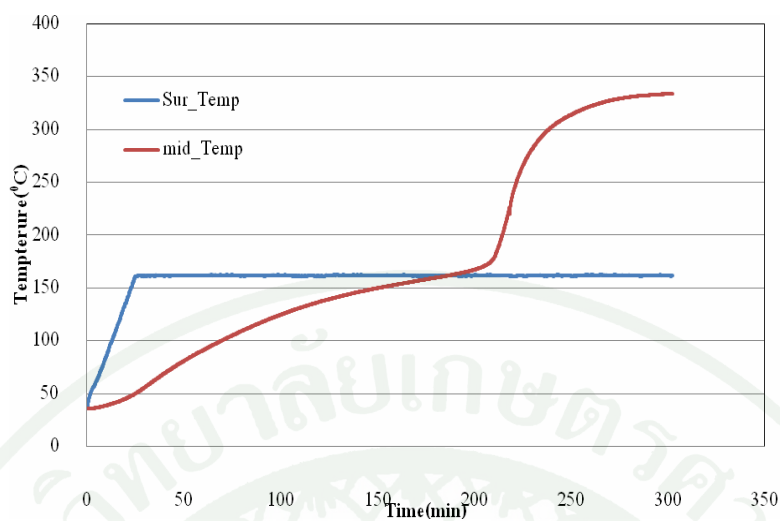
ภาพผนวกที่ ก18 อุณหภูมิของถ่านหิน Phoenix 18 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 155.8 °C

ตารางผนวกที่ ก7 ผลการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน Adaro 265 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร

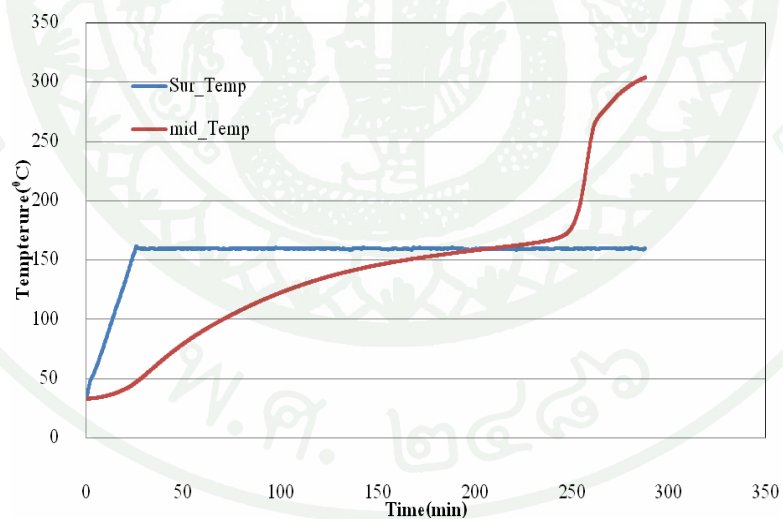
ครั้งที่	อุณหภูมิห้อง (°C)	เวลาที่เกิดการลุกไหม้ (min)	ผลการลุกไหม้
1	158.8	-	ไม่เกิดการลุกไหม้
2	161.9	187	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
3	159.9	208	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
4	160.0	208	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
5	159.9	208	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
6	159.9	208	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง



ภาพผนวกที่ ก19 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 158.8 °C



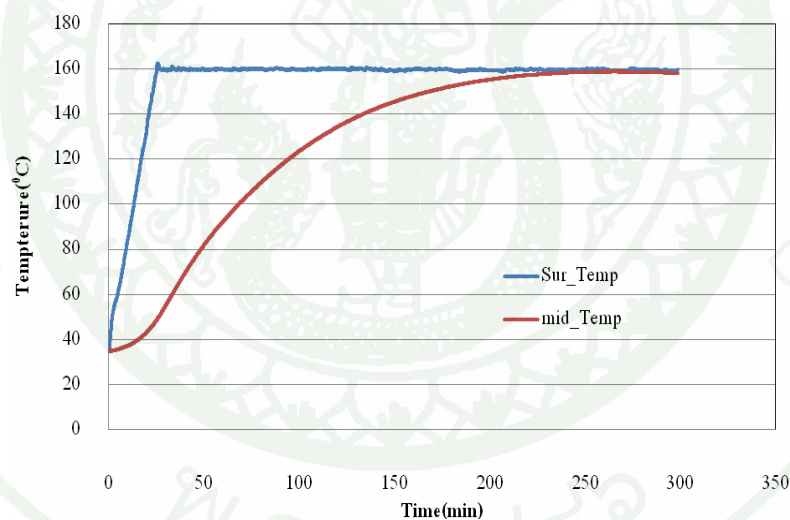
ภาพผนวกที่ ก20 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาด 75-106 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 161.9 °C



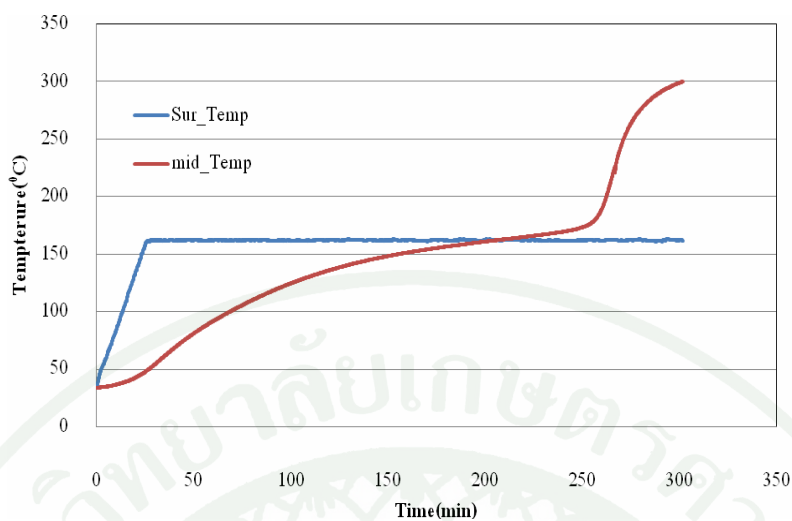
ภาพผนวกที่ ก21 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาด 75-106 ไมโครเมตรในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 159.9 °C

ตารางผนวกที่ ก8 ผลการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน Adaro 265 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร

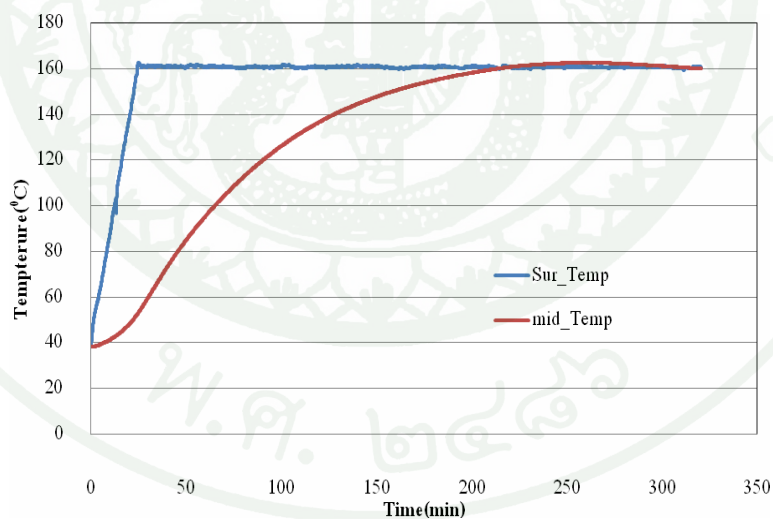
ครั้งที่	อุณหภูมิห้อง ($^{\circ}\text{C}$)	เวลาที่เกิดการลุกไหม้ (min)	ผลการลุกไหม้
1	159.8	-	ไม่เกิดการลุกไหม้
2	161.9	206	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
3	160.8	222	เกิดการลุกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
4	161.9	205	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
5	161.9	205	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
6	161.8	204	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง



ภาพผนวกที่ ก22 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 159.8°C



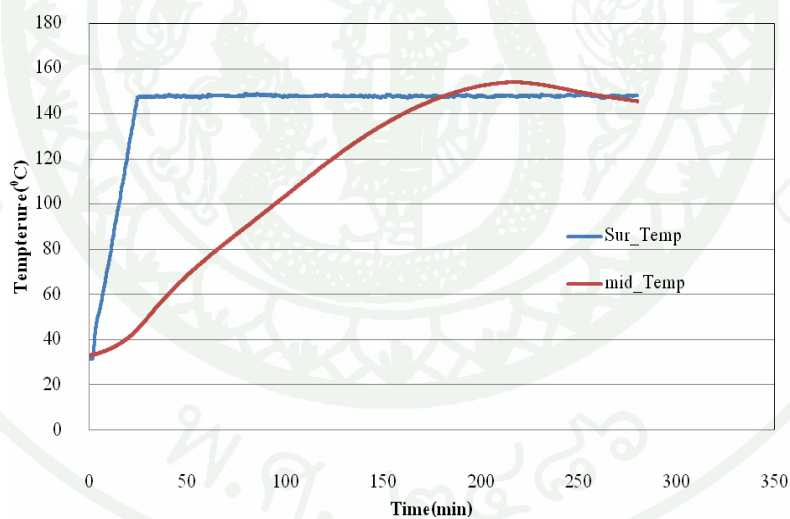
ภาพผนวกที่ ก23 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 161.9 °C



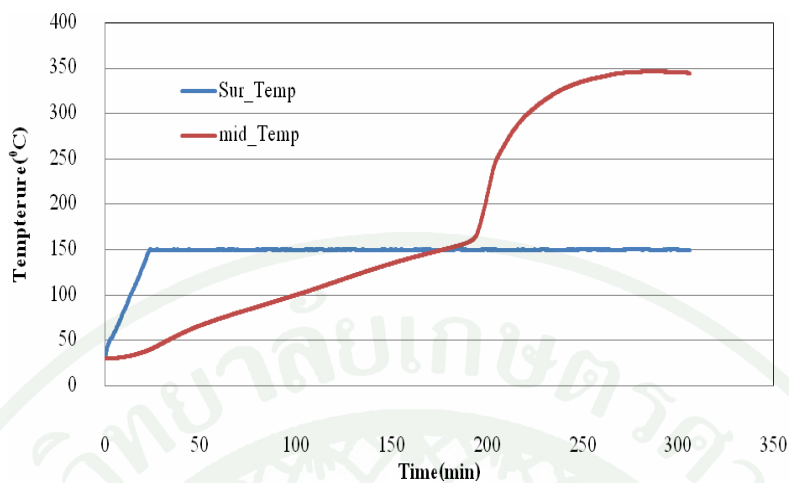
ภาพผนวกที่ ก24 อุณหภูมิของถ่านหิน Adaro 265 ขนาด 106-250 ไมโครเมตร ในชุดทดลอง (mid_Temp) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 160.8 °C

ตารางผนวกที่ ก9 ผลการทดลองการลวกไหม้ได้เองของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 80% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

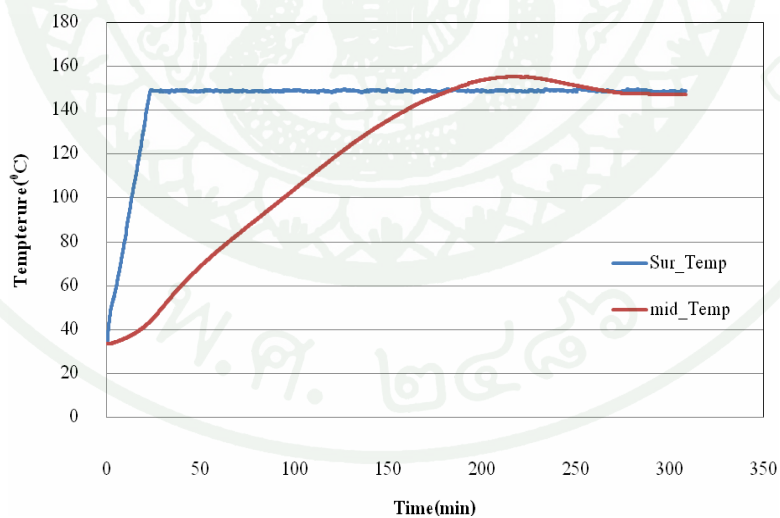
ครั้งที่	อุณหภูมิห้อง (°C)	เวลาที่เกิดการลวกไหม้ (min)	ผลการลวกไหม้
1	147.8	181	เกิดการลวกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
2	149.8	177	เกิดการลวกไหม้ต่อเนื่อง
3	148.7	183	เกิดการลวกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
4	149.8	177	เกิดการลวกไหม้ต่อเนื่อง
5	149.8	176	เกิดการลวกไหม้ต่อเนื่อง
6	149.8	175	เกิดการลวกไหม้ต่อเนื่อง



ภาพผนวกที่ ก25 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 80% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.8°C



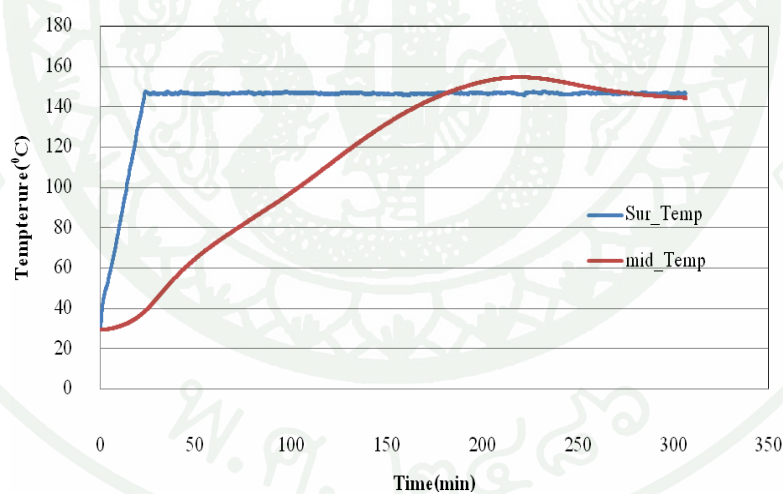
ภาพผนวกที่ ก26 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 80% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 149.8°C



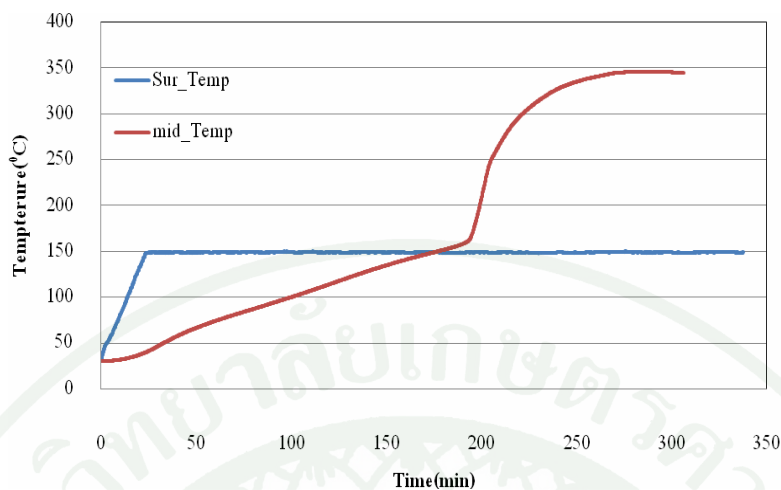
ภาพผนวกที่ ก27 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 80% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 148.7°C

ตารางผนวกที่ ก10 ผลการทดลองการลวกไหม้ได้เองของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 75% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

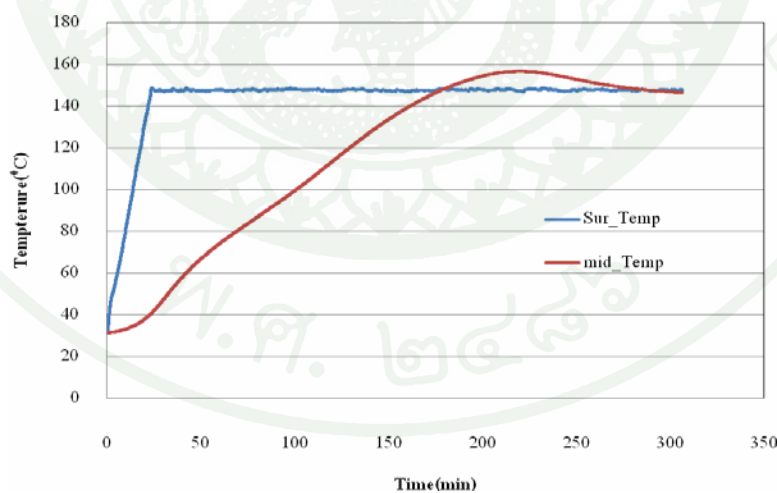
ครั้งที่	อุณหภูมิห้อง (°C)	เวลาที่เกิดการลวกไหม้ (min)	ผลการลวกไหม้
1	146.8	181	เกิดการลวกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
2	148.8	175	เกิดการลวกไหม้ต่อเนื่อง
3	147.8	178	เกิดการลวกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
4	148.8	174	เกิดการลวกไหม้ต่อเนื่อง
5	148.9	174	เกิดการลวกไหม้ต่อเนื่อง
6	148.8	174	เกิดการลวกไหม้ต่อเนื่อง



ภาพผนวกที่ ก28 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 75% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 146.8°C



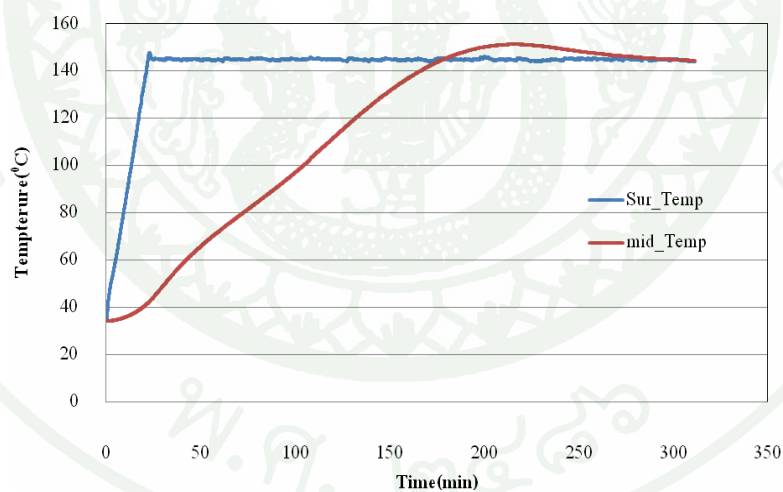
ภาพผนวกที่ ก29 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 75% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 148.8⁰C



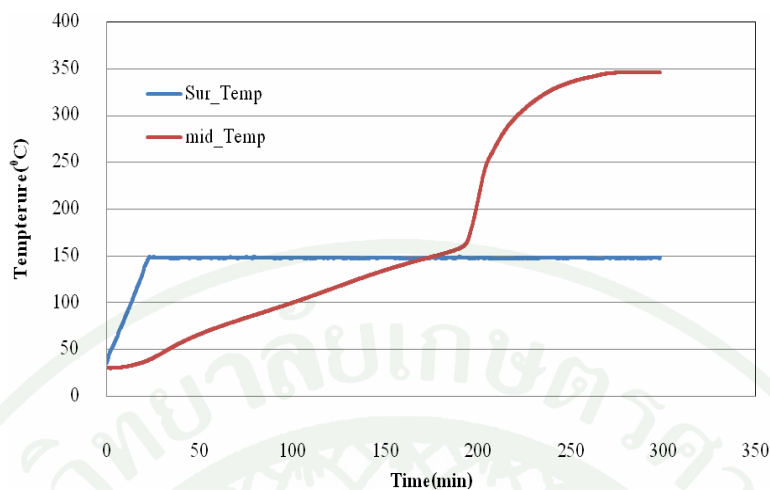
ภาพผนวกที่ ก30 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 75% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.8⁰C

ตารางผนวกที่ ก11 ผลการทดลองการลุกไหม้ได้เองของถ่านหิน Adaro 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 70% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

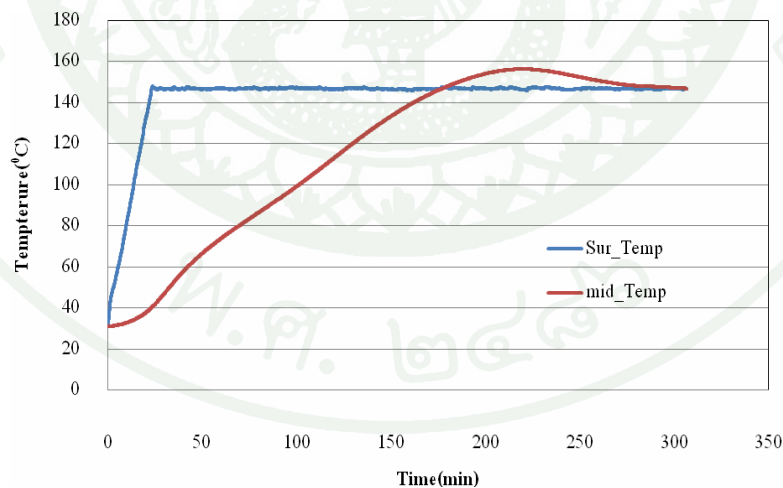
ครั้งที่	อุณหภูมิห้อง (°C)	เวลาที่เกิดการลุกไหม้ (min)	ผลการลุกไหม้
1	145.0	198	เกิดการลุกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
2	147.9	173	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
3	146.8	177	เกิดการลุกไหม้ไม่ต่อเนื่อง
4	148.0	173	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
5	148.0	173	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง
6	148.0	173	เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง



ภาพผนวกที่ ก31 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 70% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 145.0°C



ภาพผนวกที่ ก32 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 70% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 147.9°C



ภาพผนวกที่ ก33 อุณหภูมิของถ่านหิน ADARO 266 ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่ได้ผ่านการสัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ RH 70% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดทดลอง (mid_Temp) เมื่อสัมผัสอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยภายนอกชุดการทดลอง (Sur_Temp) 146.8°C



ภาคผนวก ข
ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ถ่านหินลู่กใหม่ได้เอง
กับคุณสมบัติทางเคมีของถ่านหิน

1 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับ อุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง จากข้อมูลใน ตารางผนวกที่ ข1 โดยให้อุณหภูมิที่ถ่านหินลุกไหม้ได้เอง (CPT) เป็นตัวแปรตาม และให้ผลการ วิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินเป็นตัวแปรอิสระ แล้วนำมาหาความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression)

ซึ่งได้ความสัมพันธ์ของ CPT และผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหิน ดังตารางผนวกที่ ข2

ตารางผนวกที่ ข1 ข้อมูลผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง

ตัวอย่าง	ครั้งที่	วิเคราะห์แบบประมาณ(wt%)				CPT(°C)
		ความชื้น	สารระเหยได้	เถ้า	คาร์บอนคงตัว	
ADARO 266	1	7.96	45.19	5.55	41.3	147.79
ADARO 266	2	7.96	45.19	5.55	41.3	147.8
ADARO 266	3	7.96	45.19	5.55	41.3	147.85
ADARO 266	4	7.96	45.19	5.55	41.3	147.87
PHOENIX 18	1	8.86	45.32	7.58	38.24	151.83
PHOENIX 18	2	8.86	45.32	7.58	38.24	151.88
PHOENIX 18	3	8.86	45.32	7.58	38.24	151.89
PHOENIX 18	4	8.86	45.32	7.58	38.24	151.92
JORONG 262	1	5.58	45.56	3.23	45.63	154.75
JORONG 262	2	5.58	45.56	3.23	45.63	154.85
JORONG 262	3	5.58	45.56	3.23	45.63	154.91
JORONG 262	4	5.58	45.56	3.23	45.63	154.84
ADARO 265	1	4.29	46.39	4.38	44.94	158.75
ADARO 265	2	4.29	46.39	4.38	44.94	158.8
ADARO 265	3	4.29	46.39	4.38	44.94	158.88
ADARO 265	4	4.29	46.39	4.38	44.94	158.91

ตารางผนวกที่ ข2 ความสัมพันธ์ของผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่
ถ่านหินตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง

	CPT	IM	VM	ASH	FC	
Pearson Correlation	CPT	1.000				
	IM	-.851	1.000			
	VM	.924	-.875	1.000		
	ASH	-.496	.832	-.459	1.000	
	FC	.646	-.927	.628	-.980	1.000
Sig. (1- tailed)	CPT	.				
	IM	.000	.			
	VM	.000	.000	.		
	ASH	.025	.000	.037	.	
	FC	.003	.000	.005	.000	.

หมายเหตุ* IM= ความชื้น, VM=สารระเหยได้, ASH =เถ้า, FC=คาร์บอนคงตัว

จากตารางผนวกที่ ข2 จะเห็นว่าค่า Sig มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า CPT มีความสัมพันธ์กับค่าผลวิเคราะห์แบบประมาณอย่างมีนัยสำคัญที่ 95 % และเมื่อทดสอบหาสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นพบว่าได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง ดัง ตารางผนวกที่ ข3

ตารางผนวกที่ ข3 ข้อมูลทางสถิติและสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบ
ประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75
ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง

ตัวแปร ควบคุม	สมการ	Correlation coefficients of determination (R ²)		Std. Error	F VALUE	Sig
		(R)	(R ²)			
CPT	CPT= -210.495+ 7.976VM	0.924	0.843	1.65032	81.414	0.000

2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิ
ที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาด 75-106 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง จากข้อมูลในตารางผนวกที่ ข4
โดยให้อุณหภูมิที่ถ่านหินลุกไหม้ได้เอง (CPT) เป็นตัวแปรตาม และให้ผลการวิเคราะห์แบบ
ประมาณของถ่านหินเป็นตัวแปรอิสระ แล้วนำมาหาความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ซึ่ง
ได้ความสัมพันธ์ของ CPT และผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหิน ดังตารางผนวกที่ ข5

ตารางผนวกที่ ข4 ข้อมูลผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอนุกรมที่ถ่านหิน
ตัวอย่าง ขนาด 75-106 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง

ตัวอย่าง	ครั้งที่	วิเคราะห์แบบประมาณ(wt%)				CPT(°C)
		ความชื้น	สารระเหยได้	เถ้า	คาร์บอนคงตัว	
ADARO 266	1	7.48	44.03	3.29	45.2	148.82
ADARO 266	2	7.48	44.03	3.29	45.2	148.88
ADARO 266	3	7.48	44.03	3.29	45.2	148.92
ADARO 266	4	7.48	44.03	3.29	45.2	149.14
PHOENIX 18	1	8.57	44.37	7.00	40.06	152.86
PHOENIX 18	2	8.57	44.37	7.00	40.06	152.93
PHOENIX 18	3	8.57	44.37	7.00	40.06	152.96
PHOENIX 18	4	8.57	44.37	7.00	40.06	153.05
JORONG 262	1	5.54	45.09	6.18	43.19	158.82
JORONG 262	2	5.54	45.09	6.18	43.19	158.88
JORONG 262	3	5.54	45.09	6.18	43.19	158.89
JORONG 262	4	5.54	45.09	6.18	43.19	158.79
ADARO 265	1	4.20	45.87	3.82	46.11	159.85
ADARO 265	2	4.20	45.87	3.82	46.11	159.95
ADARO 265	3	4.20	45.87	3.82	46.11	159.92
ADARO 265	4	4.20	45.87	3.82	46.11	159.86

ตารางผนวกที่ ข5 ความสัมพันธ์ของผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่
ถ่านหินตัวอย่าง ขนาด 75-106 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง

		CPT	IM	VM	ASH	FC
Pearson Correlation	CPT	1.000				
	IM	-0.832	1.000			
	VM	0.941	-0.914	1.000		
	ASH	0.179	0.386	-0.108	1.000	
	FC	0.199	-0.709	0.434	-0.919	1.000
Sig. (1- tailed)	CPT	.				
	IM	0.00	.			
	VM	0.00	0.00	.		
	ASH	0.25	0.07	0.35	.	
	FC	0.23	0.00	0.05	0.00	.

หมายเหตุ* IM= ความชื้น, VM=สารระเหยได้, ASH =เถ้า, FC=คาร์บอนคงตัว

จากตารางผนวกที่ ข5 จะเห็นว่าค่า Sig มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า CPT มีความสัมพันธ์กับค่าผลวิเคราะห์แบบประมาณอย่างมีนัยสำคัญที่ 95 % และเมื่อทดสอบหาสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นพบว่าได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาด 75 -106 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง ดัง ตารางผนวกที่ ข6

ตารางผนวกที่ ๖ ข้อมูลทางสถิติและสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบ
 ประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาด 75-106
 ไมโครเมตร สามารถถูกไหม้ได้เอง

ตัวแปร ควบคุม	สมการ	Correlation coefficients (R)	coefficients of determination (R ²)	Std. Error	F VALUE	Sig
	CPT= -124.582					
CPT	+4.218VM+ 3.076 ASH+1.719FC	1.000	1.000	0.08699	14021.48	0.000

3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับ อุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาด 106-250 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง จากข้อมูลใน ตารางผนวกที่ ข7 โดยให้อุณหภูมิที่ถ่านหินลุกไหม้ได้เอง (CPT) เป็นตัวแปรตาม และให้ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินเป็นตัวแปรอิสระ แล้วนำมาหาความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ซึ่งได้ความสัมพันธ์ของ CPT และผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหิน ดังตาราง ผนวกที่ ข8

ตารางผนวกที่ ข7 ข้อมูลผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาด 106-250 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง

ตัวอย่าง	ครั้งที่	วิเคราะห์แบบประมาณ(wt%)				CPT(°C)
		ความชื้น	สารระเหยได้	เถ้า	คาร์บอนคงตัว	
ADARO 266	1	7.17	43.49	3.59	45.75	156.85
ADARO 266	2	7.17	43.49	3.59	45.75	156.86
ADARO 266	3	7.17	43.49	3.59	45.75	156.88
ADARO 266	4	7.17	43.49	3.59	45.75	156.9
PHOENIX 18	1	7.31	44.31	5.98	42.4	156.87
PHOENIX 18	2	7.31	44.31	5.98	42.4	156.95
PHOENIX 18	3	7.31	44.31	5.98	42.4	156.95
PHOENIX 18	4	7.31	44.31	5.98	42.4	156.97
JORONG 262	1	5.37	44.08	5.47	45.08	164.85
JORONG 262	2	5.37	44.08	5.47	45.08	164.95
JORONG 262	3	5.37	44.08	5.47	45.08	164.93
JORONG 262	4	5.37	44.08	5.47	45.08	164.97
ADARO 265	1	4.04	44.83	2.37	48.76	161.93
ADARO 265	2	4.04	44.83	2.37	48.76	161.86
ADARO 265	3	4.04	44.83	2.37	48.76	161.91
ADARO 265	4	4.04	44.83	2.37	48.76	161.82

ตารางผนวกที่ ข8 ความสัมพันธ์ของผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่
ถ่านหินตัวอย่าง ขนาด 106-250 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง

	CPT	IM	VM	ASH	FC	
Pearson Correlation	CPT	1.000				
	IM	-.780	1.000			
	VM	.378	-.710	1.000		
	ASH	-.042	.564	-.238	1.000	
	FC	.413	-.808	.364	-.927	1.000
Sig. (1- tailed)	CPT	.				
	IM	.000	.			
	VM	.074	.001	.		
	ASH	.439	.012	.188	.	
	FC	.056	.000	.083	.000	.

หมายเหตุ* IM= ความชื้น, VM=สารระเหยได้, ASH =เถ้า, FC=คาร์บอนคงตัว

จากตารางผนวกที่ ข8 จะเห็นว่าค่า Sig มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า CPT มีความสัมพันธ์กับ
ค่าผลวิเคราะห์แบบประมาณอย่างมีนัยสำคัญที่ 95 % และเมื่อทดสอบหาสมการความสัมพันธ์เชิง
เส้นพบว่าได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่
ถ่านหินตัวอย่าง ขนาด 106-250 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง ดัง ตารางผนวกที่ ข9

ตารางผนวกที่ ข9 ข้อมูลทางสถิติและสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบ
ประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาด 106-250
ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง

ตัวแปร ควบคุม	สมการ	Correlation coefficients		Std. Error	F VALUE	Sig
		(R)	of determination (R ²)			
	CPT= 533.944					
CPT	-5.778IM-5.920VM -1.709FC	1.000	1.000	0.0438 5	32500.432	0.000

4 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับ
อุณหภูมิของถ่านหินตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรที่สามารถลุกไหม้ได้เอง จากข้อมูลใน
ตารางผนวกที่ ข10 โดยให้อุณหภูมิที่ถ่านหินลุกไหม้ได้เอง (CPT) เป็นตัวแปรตาม และให้ผลการ
วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินเป็นตัวแปรอิสระ แล้วนำมาหาความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear
regression) ซึ่งได้ความสัมพันธ์ของ CPT และผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินดัง
ตารางผนวกที่ ข11

ตารางผนวกที่ ข10 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหิน
ตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง

ตัวอย่าง	ครั้งที่	วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหิน(wt%)					CPT(°C)
		C	H	N	S	O(Diff)	
ADARO 266	1	63.47	5.14	0.82	0.09	30.48	147.79
ADARO 266	2	63.47	5.14	0.82	0.09	30.48	147.8
ADARO 266	3	63.47	5.14	0.82	0.09	30.48	147.85
ADARO 266	4	63.47	5.14	0.82	0.09	30.48	147.87
PHOENIX 18	1	54.83	5.08	0.98	0.73	38.38	151.83
PHOENIX 18	2	54.83	5.08	0.98	0.73	38.38	151.88
PHOENIX 18	3	54.83	5.08	0.98	0.73	38.38	151.89
PHOENIX 18	4	54.83	5.08	0.98	0.73	38.38	151.92
JORONG 262	1	65.20	4.86	0.93	0.14	28.87	154.75
JORONG 262	2	65.20	4.86	0.93	0.14	28.87	154.85
JORONG 262	3	65.20	4.86	0.93	0.14	28.87	154.91
JORONG 262	4	65.20	4.86	0.93	0.14	28.87	154.84
ADARO 265	1	61.72	5.34	0.96	0.58	31.41	158.75
ADARO 265	2	61.72	5.34	0.96	0.58	31.41	158.8
ADARO 265	3	61.72	5.34	0.96	0.58	31.41	158.88
ADARO 265	4	61.72	5.34	0.96	0.58	31.41	158.91

จากตารางผนวกที่ ข11 จะเห็นว่าค่า Sig มีค่าน้อยกว่า 0.05 ระหว่างไนโตรเจนกับค่า CPT แสดงว่า CPT มีความสัมพันธ์กับค่าผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินคือ ไนโตรเจน อย่างมีนัยสำคัญที่ 95 % และเมื่อทดสอบหาสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นพบว่าได้สมการ ความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง ดัง ตารางผนวกที่ ข12

ตารางผนวกที่ ข11 ความสัมพันธ์ของผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับ
 อุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรสามารถลุกไหม้ได้
 เอง

	CPT	C	H	N	S	O(Diff)
Pearson Correlation	CPT	1.000				
	C	.089	1.000			
	H	.278	-.230	1.000		
	N	.701	-.565	.046	1.000	
	S	.411	-.863	.461	.815	1.000
	O(Diff)	-.151	-.997	.167	.531	.824	1.000
Sig. (1- tailed)	CPT	.				
	C	.372	.			
	H	.148	.196	.		
	N	.001	.011	.433	.	
	S	.057	.000	.036	.000	.
	O(Diff)	.288	.000	.268	.017	.000

หมายเหตุ* C= คาร์บอน, H=ไฮโดรเจน, N =ไนโตรเจน, S=ซัลเฟอร์, O=ออกซิเจน

ตารางผนวกที่ ข12 ข้อมูลทางสถิติและสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์ธาตุ
องค์ประกอบของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75
ไมโครเมตร สามารถถูกไหม้ได้เอง

ตัวแปร ควบคุม	สมการ	Correlation coefficients (R)	coefficients of determination (R ²)	Std. Error	F VALUE	Sig
CPT	CPT=651.789+ 53.763N-6.569O -5.480C	1.000	1.000	0.05616	10415.128	0.000

5 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับ อุณหภูมิที่ถ่านหิน ADARO 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ลูกไหม้ได้เอง หลังจากสัมผัส ความชื้นสัมพัทธ์ที่ค่าต่างๆ จากข้อมูลในตารางผนวกที่ ข13 โดยให้อุณหภูมิที่ถ่านหินลูกไหม้ ได้เอง (CPT) เป็นตัวแปรตาม และให้ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินเป็นตัวแปรอิสระ แล้วนำมาหาความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ซึ่งได้ความสัมพันธ์ของ CPT และผลการ วิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหิน ดังตารางผนวกที่ ข14

ตารางผนวกที่ ข13 ข้อมูลผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหิน ADARO 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่สัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ที่ค่า ต่างๆ และสามารถลูกไหม้ได้เอง

ตัวอย่าง	ครั้งที่	วิเคราะห์แบบประมาณ(wt%)				CPT(°C)
		ความชื้น	สารระเหยได้	เถ้า	คาร์บอนคงตัว	
ADARO 266	1	7.96	45.19	5.55	41.3	147.79
ADARO 266	2	7.96	45.19	5.55	41.3	147.8
ADARO 266	3	7.96	45.19	5.55	41.3	147.85
ADARO 266	4	7.96	45.19	5.55	41.3	147.87
ADARO 266M80	1	10.64	43.87	3.94	41.55	149.79
ADARO 266M80	2	10.64	43.87	3.94	41.55	149.84
ADARO 266M80	3	10.64	43.87	3.94	41.55	149.78
ADARO 266M80	4	10.64	43.87	3.94	41.55	149.77
ADARO 266M75	1	10.05	43.77	4.07	42.11	148.81
ADARO 266M75	2	10.05	43.77	4.07	42.11	148.83
ADARO 266M75	3	10.05	43.77	4.07	42.11	148.86
ADARO 266M75	4	10.05	43.77	4.07	42.11	148.84
ADARO 266M70	1	8.14	44.71	3.82	43.33	147.93
ADARO 266M70	2	8.14	44.71	3.82	43.33	147.95
ADARO 266M70	3	8.14	44.71	3.82	43.33	148.02
ADARO 266M70	4	8.14	44.71	3.82	43.33	147.97

ตารางผนวกที่ ข14 ความสัมพันธ์ของผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหิน ADARO 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่สัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ที่ค่าต่างๆ และสามารถถูกไหม้ได้เอง

	CPT	IM	VM	ASH	FC	
Pearson Correlation	CPT	1.000				
	IM	.964	1.000			
	VM	-.852	-.944	1.000		
	ASH	-.519	-.536	.710	1.000	
	FC	-.330	-.299	.018	-.633	1.000
Sig. (1- tailed)	CPT	.				
	IM	.000	.			
	VM	.000	.000	.		
	ASH	.020	.016	.001	.	
	FC	.106	.130	.474	.004	.

หมายเหตุ* IM= ความชื้น, VM=สารระเหยได้, ASH =เถ้า, FC=คาร์บอนคงตัว

จากตารางผนวกที่ ข14 จะเห็นว่าค่า Sig มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า CPT มีความสัมพันธ์กับค่าผลวิเคราะห์แบบประมาณอย่างมีนัยสำคัญที่ 95 % และเมื่อทดสอบหาสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นพบว่าได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหิน ADARO 266 ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ที่สัมผัสความชื้นสัมพัทธ์ที่ค่าต่างๆ และสามารถถูกไหม้ได้เอง ดัง ตารางผนวกที่ ข15

ตารางผนวกที่ ข15 ข้อมูลทางสถิติและสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบ
 ประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหิน ADARO 266 ขนาดเล็กกว่า
 75 ไมโครเมตร ที่สัมพันธ์ความชื้นสัมพัทธ์ที่ค่าต่างๆ สามารถถูกไหม้ได้เอง

ตัวแปร ควบคุม	สมการ	coefficients		Std. Error	F VALUE	Sig
		Correlation coefficients (R)	of determination (R ²)			
CPT	CPT= 68.882+1.277IM +1.569VM-0.383ASH	0.999	0.998	0.0331	346.743	0.000

6 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินและวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง จากข้อมูลในตารางผนวกที่ ข16 โดยให้อุณหภูมิที่ถ่านหินลุกไหม้ได้เอง (CPT) เป็นตัวแปรตาม และให้ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินและวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินเป็นตัวแปรอิสระ แล้วนำมาหาความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ซึ่งได้ความสัมพันธ์ของ CPT กับผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินและวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหิน ดังตารางผนวกที่ ข17

จากตารางผนวกที่ ข17 จะเห็นว่าค่า Sig มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า CPT มีความสัมพันธ์กับค่าผลวิเคราะห์แบบประมาณอย่างมีนัยสำคัญที่ 95 % และเมื่อทดสอบหาสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นพบว่าได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินและผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง ดังตารางผนวกที่ ข18

ตารางผนวกที่ ข16 ข้อมูลผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินและวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับถ่านหินตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร กับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างสามารถลุกไหม้ได้เอง

ตัวอย่าง	ครั้งที่	วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหิน(wt%)					วิเคราะห์แบบประมาณ(wt%)					CPT(°C)
		C	H	N	S	O(Diff)	ความชื้น	สารระเหยได้	เถ้า	คาร์บอนคงตัว		
ADARO 266	1	63.47	5.14	0.82	0.09	30.48	7.96	45.19	5.55	41.3	147.79	
ADARO 266	2	63.47	5.14	0.82	0.09	30.48	7.96	45.19	5.55	41.3	147.8	
ADARO 266	3	63.47	5.14	0.82	0.09	30.48	7.96	45.19	5.55	41.3	147.85	
ADARO 266	4	63.47	5.14	0.82	0.09	30.48	7.96	45.19	5.55	41.3	147.87	
PHOENIX 18	1	54.83	5.08	0.98	0.73	38.38	8.86	45.32	7.58	38.24	151.83	
PHOENIX 18	2	54.83	5.08	0.98	0.73	38.38	8.86	45.32	7.58	38.24	151.88	
PHOENIX 18	3	54.83	5.08	0.98	0.73	38.38	8.86	45.32	7.58	38.24	151.89	
PHOENIX 18	4	54.83	5.08	0.98	0.73	38.38	8.86	45.32	7.58	38.24	151.92	
JORONG 262	1	65.20	4.86	0.93	0.14	28.87	5.58	45.56	3.23	45.63	154.75	
JORONG 262	2	65.20	4.86	0.93	0.14	28.87	5.58	45.56	3.23	45.63	154.85	
JORONG 262	3	65.20	4.86	0.93	0.14	28.87	5.58	45.56	3.23	45.63	154.91	
JORONG 262	4	65.20	4.86	0.93	0.14	28.87	5.58	45.56	3.23	45.63	154.84	
ADARO 265	1	61.72	5.34	0.96	0.58	31.41	4.29	46.39	4.38	44.94	158.75	
ADARO 265	2	61.72	5.34	0.96	0.58	31.41	4.29	46.39	4.38	44.94	158.8	
ADARO 265	3	61.72	5.34	0.96	0.58	31.41	4.29	46.39	4.38	44.94	158.88	
ADARO 265	4	61.72	5.34	0.96	0.58	31.41	4.29	46.39	4.38	44.94	158.91	

ตารางผนวกที่ ข17 ความสัมพันธ์ของผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินและวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่าง
ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรสามารถลุกไหม้ได้เอง

		CPT	C	H	N	S	O	IM	VM	ASH	FC
Pearson Correlation	CPT	1.000									
	C	0.089	1.000								
	H	0.278	-0.230	1.000							
	N	0.701	-0.565	0.046	1.000						
	S	0.411	-0.863	0.461	0.815	1.000					
	O	-0.151	-0.997	0.167	0.531	0.824	1.000				
	IM	-0.851	-0.579	-0.242	-0.230	0.088	0.634	1.000			
	VM	0.924	0.149	0.589	0.479	0.366	-0.224	-0.875	1.000		
	ASH	-0.496	-0.896	0.221	0.140	0.587	0.912	0.832	-0.459	1.000	
	FC	0.646	0.816	-0.063	-0.009	-0.429	-0.848	-0.927	0.628	-0.980	1.000
	Sig. (1-tailed)	CPT	.								
C		0.372	.								
H		0.148	0.196	.							
N		0.001	0.011	0.433	.						
S		0.057	0.000	0.036	0.000	.					
O		0.288	0.000	0.268	0.017	0.000	.				
IM		0.000	0.009	0.184	0.196	0.372	0.004	.			
VM		0.000	0.290	0.008	0.030	0.082	0.202	0.000	.		
ASH		0.025	0.000	0.206	0.303	0.008	0.000	0.000	0.037	.	
FC		0.003	0.000	0.408	0.486	0.049	0.000	0.000	0.005	0.000	.

หมายเหตุ* IM= ความชื้น, VM=สารระเหยได้, ASH =เถ้า, FC=คาร์บอนคงตัว, C= คาร์บอน, H=ไฮโดรเจน, N=ไนโตรเจน, S=ซัลเฟอร์, O=ออกซิเจน

ตารางผนวกที่ ข18 ข้อมูลทางสถิติและสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินและผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหิน ตัวอย่าง ขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถลุกไหม้ได้เอง

ตัวแปรควบคุม	สมการ	Correlation coefficients (R)	coefficients of determination (R ²)	Std. Error	F VALUE	Sig
	CPT= -485.710					
CPT	+ 15.523VM-15.153H +1.250IM	1.000	1.000	0.05616	3184.861	0.000

7 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างทั้งหมด (ทุกขนาด, ทุกชนิด) สามารถลุกไหม้ได้เอง จากข้อมูลในตารางผนวกที่ ข19 โดยให้อุณหภูมิที่ถ่านหินลุกไหม้ได้เอง (CPT) เป็นตัวแปรตาม และให้ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินเป็นตัวแปรอิสระ แล้วนำมาหาความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ซึ่งได้ความสัมพันธ์ของ CPT และผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหิน ดังตารางผนวกที่ ข20

จากผนวกที่ ข20 จะเห็นว่าค่า Sig มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า CPT มีความสัมพันธ์กับค่าผลการวิเคราะห์แบบประมาณอย่างมีนัยสำคัญที่ 95 % และเมื่อทดสอบหาสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นพบว่าได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างทั้งหมด สามารถลุกไหม้ได้เอง ดังตารางผนวกที่ ข21

ตารางผนวกที่ ข19 ข้อมูลผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอนุภาคน้ำมันที่ถ่านตัวอย่าง
ทั้งหมด สามารถลุกไหม้ได้เอง

ตัวอย่าง	รายละเอียด	ครั้งที่	วิเคราะห์แบบประมาณ(wt%)				CPT(°C)
			ความชื้น	สารระเหยได้	เถ้า	คาร์บอนคงตัว	
	< 75 μm	1	7.96	45.19	5.55	41.3	147.79
	< 75 μm	2	7.96	45.19	5.55	41.3	147.8
	< 75 μm	3	7.96	45.19	5.55	41.3	147.85
	< 75 μm	4	7.96	45.19	5.55	41.3	147.87
	75-106 μm	1	7.48	44.03	3.29	45.2	148.82
	75-106 μm	2	7.48	44.03	3.29	45.2	148.88
	75-106 μm	3	7.48	44.03	3.29	45.2	148.92
	75-106 μm	4	7.48	44.03	3.29	45.2	149.14
	106-250 μm	1	7.17	43.49	3.59	45.75	156.85
	106-250 μm	2	7.17	43.49	3.59	45.75	156.86
	106-250 μm	3	7.17	43.49	3.59	45.75	156.88
	106-250 μm	4	7.17	43.49	3.59	45.75	156.90
ADARO	< 75 μm RH 80%	1	10.64	43.87	3.94	41.55	149.79
266	< 75 μm RH 80%	2	10.64	43.87	3.94	41.55	149.84
	< 75 μm RH 80%	3	10.64	43.87	3.94	41.55	149.78
	< 75 μm RH 80%	4	10.64	43.87	3.94	41.55	149.77
	< 75 μm RH 75%	1	10.05	43.77	4.07	42.11	148.81
	< 75 μm RH 75%	2	10.05	43.77	4.07	42.11	148.83
	< 75 μm RH 75%	3	10.05	43.77	4.07	42.11	148.86
	< 75 μm RH 75%	4	10.05	43.77	4.07	42.11	148.84
	< 75 μm RH 70%	1	8.14	44.71	3.82	43.33	147.93
	< 75 μm RH 70%	2	8.14	44.71	3.82	43.33	147.95
	< 75 μm RH 70%	3	8.14	44.71	3.82	43.33	148.02
	< 75 μm RH 70%	4	8.14	44.71	3.82	43.33	147.97

ตารางผนวกที่ ข19 ข้อมูลผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอนุหภูมิที่ถ่านตัวอย่าง
ทั้งหมด สามารถดูใหม่ได้เอง(ต่อ)

ตัวอย่าง	รายละเอียด	ครั้งที่	วิเคราะห์แบบประมาณ(wt%)				CPT(°C)	
			ความชื้น	สารระเหยได้	เถ้า	คาร์บอนคงตัว		
PHOXNIX 18	< 75 μm	1	8.86	45.32	7.58	38.24	151.83	
	< 75 μm	2	8.86	45.32	7.58	38.24	151.88	
	< 75 μm	3	8.86	45.32	7.58	38.24	151.89	
	< 75 μm	4	8.86	45.32	7.58	38.24	151.92	
	75-106 μm	1	8.57	44.37	7.00	40.06	152.86	
	75-106 μm	2	8.57	44.37	7.00	40.06	152.93	
	75-106 μm	3	8.57	44.37	7.00	40.06	152.96	
	75-106 μm	4	8.57	44.37	7.00	40.06	153.05	
	106-250 μm	1	7.31	44.31	5.98	42.4	156.87	
	106-250 μm	2	7.31	44.31	5.98	42.4	156.95	
	106-250 μm	3	7.31	44.31	5.98	42.4	156.95	
	106-250 μm	4	7.31	44.31	5.98	42.4	156.97	
	JORONG 262	< 75 μm	1	5.58	45.56	3.23	45.63	154.75
		< 75 μm	2	5.58	45.56	3.23	45.63	154.85
		< 75 μm	3	5.58	45.56	3.23	45.63	154.91
		< 75 μm	4	5.58	45.56	3.23	45.63	154.84
75-106 μm		1	5.54	45.09	6.18	43.19	158.82	
75-106 μm		2	5.54	45.09	6.18	43.19	158.88	
75-106 μm		3	5.54	45.09	6.18	43.19	158.89	
75-106 μm		4	5.54	45.09	6.18	43.19	158.79	
106-250 μm		1	5.37	44.08	5.47	45.08	164.85	
106-250 μm		2	5.37	44.08	5.47	45.08	164.95	
106-250 μm		3	5.37	44.08	5.47	45.08	164.93	
106-250 μm		4	5.37	44.08	5.47	45.08	164.97	

ตารางผนวกที่ ข19 ข้อมูลผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอนุหภูมิที่ถ่านตัวอย่าง
ทั้งหมด สามารถถูกไหม้ได้เอง(ต่อ)

ตัวอย่าง	รายละเอียด	ครั้งที่	วิเคราะห์แบบประมาณ(wt%)				CPT(°C)
			ความชื้น	สารระเหยได้	เถ้า	คาร์บอนคงตัว	
ADARO 265	< 75 μm	1	4.29	46.39	4.38	44.94	158.75
	< 75 μm	2	4.29	46.39	4.38	44.94	158.8
	< 75 μm	3	4.29	46.39	4.38	44.94	158.88
	< 75 μm	4	4.29	46.39	4.38	44.94	158.91
	75-106 μm	1	4.20	45.87	3.82	46.11	159.85
	75-106 μm	2	4.20	45.87	3.82	46.11	159.95
	75-106 μm	3	4.20	45.87	3.82	46.11	159.92
	75-106 μm	4	4.20	45.87	3.82	46.11	159.86
	106-250 μm	1	4.04	44.83	2.37	48.76	161.93
	106-250 μm	2	4.04	44.83	2.37	48.76	161.86
	106-250 μm	3	4.04	44.83	2.37	48.76	161.91
	106-250 μm	4	4.04	44.83	2.37	48.76	161.82

ตารางผนวกที่ ข20 ความสัมพันธ์ของผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างทั้งหมด สามารถลุกไหม้ได้เอง

	CPT	IM	VM	ASH	FC	
Pearson Correlation	CPT	1.000				
	IM	-.802	1.000			
	VM	.227	-.584	1.000		
	ASH	-.042	.281	.079	1.000	
	FC	.575	-.751	.099	-.801	1.000
Sig. (1- tailed)	CPT	.				
	IM	.000	.			
	VM	.040	.000	.		
	ASH	.375	.015	.274	.	
	FC	.000	.000	.226	.000	.

หมายเหตุ* IM= ความชื้น, VM=สารระเหยได้, ASH =เถ้า, FC=คาร์บอนคงตัว

ตารางผนวกที่ ข21 ข้อมูลทางสถิติและสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินกับอุณหภูมิที่ถ่านหินตัวอย่างทั้งหมด สามารถลุกไหม้ได้เอง

ตัวแปร ควบคุม	สมการ	coefficients		Std. Error	F VALUE	Sig
		Correlation coefficients (R)	of determination (R ²)			
	CPT= 313.455-					
CPT	3.083IM-3.190VM+ 1.189ASH	0.907	0.812	2.3183	28.114	0.000

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายกานต์ สุภนิรันดร์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	24 กันยายน 2524
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
ประวัติการศึกษา	วท.บ.(สาธารณสุขศาสตร์) มหาวิทยาลัยมหิดล (2546) บธ.ม.การตลาด มหาวิทยาลัยรามคำแหง (2550)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกรความปลอดภัย
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท ทีพีไอ โพลีน จำกัด (มหาชน)