ฟลูแก๊สดีซัลเฟอไรเซชันโดยใช้หินปูนระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน

นายภาคภูมิ ยินดีสิทธิ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FLUE GAS DESULFURIZATION USING LIMESTONE DURING COAL COMBUSTION

Mr. Phakpoom Yindeesit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ฟลูแก๊สดีซัลเฟอไรเซชันโดยใช้หินปูนระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน
โดย	นายภาคภูมิ ยินดีสิทธิ์
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร ชวศิริ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นวลพรรณ จันทรศิริ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ประดิพัทธ์ บำรุงศรี)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคภูมิ ยินดีสิทธิ์ : ฟลูแก๊สดีซัลเฟอไรเซชันโดยใช้หินปูนระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน (FLUE GAS DESULFURIZATION USING LIMESTONE DURING COAL COMBUSTION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ, 106 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาดีซัลเฟอไรเซชันของถ่านหินระหว่างการเผาไหม้โดยใช้หินปูนที่ภาวะปฏิกริยาต่าง ๆ ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันในตัวอย่างถ่านหินผสมหินปูน อุณหภูมิการเผาไหม้ ขนาดถ่านหิน ปริมาณกำมะถันเริ่มต้นในถ่านหิน ต่อร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชัน และศึกษาเปรียบเทียบการใช้ชีวมวลในการเผาไหม้พร้อมกับถ่านหินและหินปูนในการขจัดกำมะถัน เทคนิค X-Ray fluorescence ถูกใช้ในการติดตามปริมาณกำมะถันในถ่านหินและเถ้า ผลวิจัยพบว่า อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อดีซัลเฟอไรเซชัน ที่ภาวะเหมาะสมให้ร้อยละการกำจัดกำมะถัน 89.3 ที่อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส และขนาดของถ่านหิน 0.5 - 2.0 มิลลิเมตร เมื่อปริมาณกำมะถันเริ่มต้นในถ่านหินเพิ่มขึ้นร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันลดลงเล็กน้อยและสูงกว่าร้อยละ 90 อีกทั้งการใช้ชีวมวล (ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก) เผาไหม้พร้อมกับถ่านหินและหินปูนยังให้ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันเพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2558 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

5672406023 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE
KEYWORDS: DESULFERIZATION, LIMESTONE, COAL

PHAKPOOM YINDEESIT: FLUE GAS DESULFURIZATION USING LIMESTONE DURING COAL COMBUSTION. ADVISOR: PROF. DR.PATTARAPAN PRASASSARAKICH, 106 pp.

Coal desulfurization during combustion using limestone has been studied under various reaction conditions. The effects of calcium per sulfur mole ratio in mixed sample of coal and limestone, combustion temperature, coal size and initial sulfur content in coal on percent sulfur content in ash and desulfurization efficeincy were investigated and the consumption of the mixed fuel of biomass fuel, coal and limestone was also compaired. The X-Ray fluorescence technique was used to monitor the sulfur content in coals and ashes. The results showed that the mole ratio of calcium and sulfur had a significant effect. At optimum condition, the percent sulfur content in ash reached 89.3 % at calcium per sulfur mole ratio of 1.93 : 1 , temperature of 850 ºC and coal size of 0.5 - 2.0 mm. The percent sulfur content in ash slightly decreased with increasing initial sulfur in coal and was above 90 %. In addition, the percent sulfur content in ash and desulfurization efficeincy were increased when the biomass (at 10 % wt) was mixed with coal and limestone in combustion.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study: Petrochemistry and Polymer Science Student's Signature .....
Advisor's Signature .....
Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. วรินทร ชวศิริ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.นวลพรรณ จันทรศิริ และ ดร.ประดิพัทธ์ บำรุงศรี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านของบริษัท ดี.เอ. รีเซิร์ช เซ็นเตอร์ จำกัด และบริษัท แนชั่นแนล เพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความช่วยเหลือในการอำนวยความสะดวกการใช้เครื่องมือในการทดลอง ห้องปฏิบัติการและตัวอย่างสำหรับการทดลอง

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ในการประสานงานต่าง ๆ ที่ทำให้การนำเสนองานวิทยานิพนธ์นี้เป็นไปอย่างราบรื่น

สุดท้ายนี้กราบขอบคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจอย่างดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้วยดีเสมอมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญรูปภาพ 1
สารบัญตาราง 3
บทที่ 1 9
บทนำ 9
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 9
1.2 วัตถุประสงค์ในงานวิจัย 10
1.3 ขอบเขตงานวิจัย 10
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย 11
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 12
บทที่ 2 13
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 13
2.1 ถ่านหิน 13
2.1.1 การจำแนกชนิดของถ่านหิน 14
2.1.2 กำมะถันในถ่านหิน 15
2.2 หินปูน 16
2.3 กระบวนการเผาไหม้ถ่านหิน 20
2.4 กระบวนการขจัดกำมะถันในถ่านหิน 21
2.4.1 การขจัดกำมะถันก่อนการเผาไหม้ 22

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.4.2 การขจัดกำมะถันระหว่างการเผาไหม้ 23
2.4.3 การขจัดกำมะถันหลังการเผาไหม้ 25
2.4.4 เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดโดยการแปรสภาพถ่านหิน (coal conversion) 26
2.5 อันตรายของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อสุขภาพอนามัย 27
2.6 อันตรายของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อการเกิดสารกรดในบรรยากาศ 27
2.7 กฎหมายควบคุมการปลดปล่อยก๊าซมลพิษ 29
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 29
บทที่ 3 33
เครื่องมือและวิธีการทดลอง 33
3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง 33
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 34
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง 35
3.4 วิธีการทดสอบสมบัติของถ่านหิน 35
3.4.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบและทดลอง 35
3.4.2 การทดสอบสมบัติของตัวอย่าง 36
3.5 การศึกษาผลของอัตราส่วนถ่านหินและหินปูนต่อการขจัดกำมะถัน 38
3.6 การศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาไหม้ต่อการขจัดกำมะถัน 39
3.7 การศึกษาผลของปริมาณกำมะถันในถ่านหินเริ่มต้นต่อการขจัดกำมะถัน 39
3.8 การศึกษาผลของขนาดของถ่านหินในการเผาไหม้ต่อการขจัดกำมะถัน 40
3.9 การศึกษาผลของชีวมวลและหินปูนในการเผาไหม้ถ่านหินต่อการขจัดกำมะถัน 41
3.10 การคำนวณประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชัน 42
บทที่ 4 43
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 43

หน้า

4.1 สมบัติของถ่านหินและหินปูน 43
4.2 การใช้หินปูนและถ่านหินในเตาเผา 45
4.3 ผลของอัตราส่วนของแคลเซียมและกำมะถัน 47
4.4 ผลของอุณหภูมิการเผาไหม้ 52
4.5 ผลของปริมาณกำมะถันเริ่มต้น 56
4.6 ผลของขนาดของถ่านหิน 58
4.7 ผลของปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวลและหินปูนผสมกับถ่านหิน 62
บทที่ 5 67
สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ 67
5.1 สรุปผลการทดลอง 67
5.2 ข้อเสนอแนะ 69
รายการอ้างอิง 70
ภาคผนวก 73
ภาคผนวก ก 74
การคำนวณที่เกี่ยวข้องในการทดลอง 74
ภาคผนวก ข 76
ข้อมูลการใช้หินปูนในเตาเผาแบบ Circulation fluidize bed 76
ภาคผนวก ค 78
ข้อมูลการทดสอบถ่านหินและหินปูน 78
ภาคผนวก ง 79
ข้อมูลการทดสอบเถ้าและเถ้าของถ่านหินที่ผสมหินปูนในอัตราส่วนต่าง ๆ 79
ภาคผนวก จ 89
ข้อมูลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ผสมหินปูนเผาด้วยอุณหภูมิต่าง ๆ 89

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

ภาคผนวก ฉ 92
ข้อมูลการทดสอบถ่านหินและเถ้าของถ่านหินที่มีประมาณกำมะถันต่าง ๆ 92
ภาคผนวก ช 95
ข้อมูลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่มีขนาดต่าง ๆ ผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียม และกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 95
ภาคผนวก ซ 99
ข้อมูลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ 99
ภาคผนวก ฌ 103
ข้อมูลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถัน เท่ากับ 1.93 : 1 และชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ 103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 106

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 ถ่านหินลำดับขั้นต่าง ๆ (ก) พีต, (ข) ลิกไนต์, (ค) ซับบิทูมินัส, (ง) บิทูมินัส, (จ) แอนทราไซต์..... 15
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างกำมะถันอินทรีย์ที่เสนอโดย Hill และ Lyon..... 17
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างกำมะถันอินทรีย์ที่เสนอโดย Wiser..... 18
ภาพที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงของแร่ธาตุในถ่านหินระหว่างการเผาไหม้..... 21
ภาพที่ 3.1 ตัวอย่างถ่านหิน..... 33
ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างหินปูน..... 34
ภาพที่ 3.3 ตัวอย่างชีวมวลชนิดไม้ชิพ..... 34
ภาพที่ 3.4 ตัวอย่างถ่านหินก่อนการอบลมร้อน..... 36
ภาพที่ 4.1 การกระจายตัวชนิด sieve passing ของถ่านหิน (ก) และหินปูน (ข)..... 44
ภาพที่ 4.2 การจับตัวเป็นก้อนแข็งขนาดใหญ่ของเถ้าที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์และสัมผัสความชื้น และจับตัวเป็นก้อนแข็งติดกระบะรถบรรทุก..... 46
ภาพที่ 4.3 การปลดปล่อยความร้อนเมื่อเถ้าที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์หลงเหลือสัมผัสความชื้นขณะการบรรจุลงรถขนส่ง..... 47
ภาพที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันต่อปริมาณธาตุของ (ก) กำมะถัน และ (ข) แคลเซียมออกไซด์..... 49
ภาพที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิ ในการเผาไหม้ต่อ (ก) ปริมาณกำมะถันในเถ้า และ (ข) ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันที่อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1..... 55
ภาพที่ 4.6 ผลของปริมาณกำมะถันเริ่มต้นต่อปริมาณกำมะถันในเถ้าจากการเผาไหม้ที่อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1..... 57
ภาพที่ 4.7 ผลของขนาดของถ่านหินในการเผาไหม้ต่อ (ก) ปริมาณกำมะถันในเถ้า และ (ข) ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันที่อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1..... 61

Chulalongkorn University

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.8 ผลของปริมาณชีวมวลต่อ (ก) ปริมาณกำมะถัน และ (ข) ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันในเถ้าหลังการเผาไหม้ถ่านหินและชีวมวล และถ่านหิน, ชีวมวลและหินปูนที่อัตราส่วนโดยโมล
ของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1..... 66

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของถ่านหินชนิดต่าง ๆ 15
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของเถ้าถ่านหิน 21
ตารางที่ 2.3 ปฏิกิริยาเคมีของการขจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยวิธี gas scrubbing 26
ตารางที่ 3.1 สภาวะเครื่อง X-Ray fluorescence 38
ตารางที่ 3.2 น้ำหนักของถ่านหินและหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลต่าง ๆ ของแคลเซียมและกำมะถัน 39
ตารางที่ 3.3 น้ำหนักของถ่านหินและหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 40
ตารางที่ 3.4 น้ำหนักของถ่านหิน, หินปูน และชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ 42
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบทางกายภาพของถ่านหินและหินปูน 44
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบสมบัติถ่านหินและหินปูนทางเคมี 45
ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเฉลี่ยที่ใช้ในการเผาไหม้ของเตาเผาชนิด Circulation fluidized bed 46
ตารางที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันต่อปริมาณธาตุของเถ้าหลังการเผาไหม้ถ่านหินและหินปูน 48
ตารางที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันต่อร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันในการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส 52
ตารางที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อปริมาณธาตุของเถ้าหลังการเผาไหม้ถ่านหินและหินปูน 54
ตารางที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชัน 54
ตารางที่ 4.8 ผลของปริมาณกำมะถันเริ่มต้นต่อปริมาณธาตุของเถ้าหลังการเผาไหม้ถ่านหินและหินปูนที่อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 57

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.9 ผลของปริมาณกำมะถันเริ่มต้นต่อร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันที่อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 58
ตารางที่ 4.10 ผลของขนาดของถ่านหินต่อปริมาณธาตุของเถ้าหลังการเผาไหม้ถ่านหินและหินปูนที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส 59
ตารางที่ 4.11 ผลของขนาดของถ่านหินต่อร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันที่อัตราส่วนโดยของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 60
ตารางที่ 4.12 ผลของปริมาณชีวมวลต่อปริมาณธาตุของเถ้าถ่านหินหลังการเผาไหม้ (ก) ถ่านหินและชีวมวล และ (ข) ถ่านหิน, หินปูนและชีวมวลที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส 64
ตารางที่ 4.13 ผลของปริมาณชีวมวลต่อร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชัน 65
ตารางที่ ข.1 ข้อมูลการใช้ถ่านหิน ปริมาณกำมะถันและการใช้หินปูนในหน่วยเตาเผาที่ 1 76
ตารางที่ ข.2 ข้อมูลการใช้ถ่านหิน ปริมาณกำมะถันและการใช้หินปูนในหน่วยเตาเผาที่ 2 77
ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบหินปูนที่ใช้สำหรับการทดลอง 78
ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบถ่านหินที่ใช้สำหรับการทดลอง 78
ตารางที่ ง.1 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 1 79
ตารางที่ ง.2 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 2 79
ตารางที่ ง.3 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.64 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 1 80
ตารางที่ ง.4 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.64 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 2 80
ตารางที่ ง.5 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.64 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 3 81

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ง.6 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.64 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลอง ตัวอย่างที่ 4..... 81
ตารางที่ ง.7 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.64 : 1 ที่ใช้สำหรับการ ตัวอย่างที่ 5..... 82
ตารางที่ ง.8 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.64 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 6..... 82
ตารางที่ ง.9 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.28 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลอง ตัวอย่างที่ 1..... 83
ตารางที่ ง.10 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.28 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 2..... 83
ตารางที่ ง.11 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.28 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 3..... 84
ตารางที่ ง.12 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.28 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 4..... 84
ตารางที่ ง.13 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.60 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 1..... 85
ตารางที่ ง.14 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.60 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 2..... 85
ตัวอย่าง ง.15 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.93 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 1..... 86
ตัวอย่าง ง.16 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.93 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 2..... 86
ตารางที่ ง.17 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 2.57 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 1..... 87

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ง.18 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 2.57 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 2..... 87
ตารางที่ ง.19 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 3.21 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลอง..... 88
ตารางที่ จ.1 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.93 : 1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่ 1..... 89
ตารางที่ จ.2 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.93 : 1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่ 2..... 90
ตารางที่ จ.3 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.93 : 1 อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่ 1..... 90
ตารางที่ จ.4 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.93 : 1 อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่ 2..... 91
ตารางที่ ฉ.1 ผลการทดสอบถ่านหินกำมะถันต่ำที่ใช้สำหรับการทดลอง..... 92
ตารางที่ ฉ.2 ผลการทดสอบถ่านหินกำมะถันสูงที่ใช้สำหรับการทดลอง..... 92
ตารางที่ ฉ.3 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินกำมะถันต่ำผสมถ่านหินในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 ตัวอย่างที่ 1..... 93
ตารางที่ ฉ.4 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินกำมะถันต่ำผสมถ่านหินในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 ตัวอย่างที่ 2..... 93
ตารางที่ ฉ.5 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินกำมะถันสูงผสมถ่านหินในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 ตัวอย่างที่ 1..... 94
ตารางที่ ฉ.6 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินกำมะถันสูงผสมถ่านหินในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 ตัวอย่างที่ 2..... 94
ตารางที่ ช.1 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินขนาด 0.125 มิลลิเมตร ผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 ตัวอย่างที่ 1..... 95

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ช.2 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินขนาด 0.125 มิลลิเมตร ผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 ตัวอย่างที่ 2..... 95
ตารางที่ ช.3 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินขนาด 0.250 มิลลิเมตร ผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 ตัวอย่างที่ 1..... 96
ตารางที่ ช.4 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินขนาด 0.250 มิลลิเมตร ผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1ตัวอย่างที่ 2..... 96
ตารางที่ ช.5 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินขนาด 0.50 มิลลิเมตร ผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1ตัวอย่างที่ 1..... 97
ตารางที่ ช.6 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินขนาด 0.50 มิลลิเมตร ผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 ตัวอย่างที่ 2..... 97
ตารางที่ ช.7 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินขนาด 2.00 มิลลิเมตร ผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1..... 98
ตารางที่ ช.8 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินขนาด 8.00 มิลลิเมตร ผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1..... 98
ตารางที่ ซ.1 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ผสมชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 5 ตัวอย่างที่ 1..... 99
ตารางที่ ซ.2 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ผสมชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 5 ตัวอย่างที่ 2..... 99
ตารางที่ ซ.3 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ผสมชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 8 ตัวอย่างที่ 1..... 100
ตารางที่ ซ.4 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ผสมชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 8 ตัวอย่างที่ 2..... 100
ตารางที่ ซ.5 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ผสมชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 10 ตัวอย่างที่ 1..... 101

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ซ.6 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ผสมชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 10 ตัวอย่างที่ 2..... 101
ตารางที่ ซ.7 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ผสมชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 15 ตัวอย่างที่ 1..... 102
ตารางที่ ซ.8 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ผสมชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 15 ตัวอย่างที่ 2..... 102
ตารางที่ ฌ.1 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 และชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 5 ตัวอย่างที่ 1..... 103
ตารางที่ ฌ.2 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 และชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 5 ตัวอย่างที่ 2..... 103
ตารางที่ ฌ.3 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 และชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 8 ตัวอย่างที่ 1..... 104
ตารางที่ ฌ.4 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 และชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 8 ตัวอย่างที่ 2..... 104
ตารางที่ ฌ.5 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 และชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 10..... 105
ตารางที่ ฌ.6 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 และชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 15..... 105

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา [1, 2]

กำมะถันเป็นธาตุองค์ประกอบที่ปนเปื้อนอยู่ในเชื้อเพลิงฟอสซิล (fossil fuel) ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ, น้ำมันดิบ และถ่านหิน เป็นต้น เมื่อนำเอาเชื้อเพลิงเหล่านั้นมาใช้ด้านต่าง ๆ จะเกิดผลกระทบจากกำมะถันอย่างมากมาย เช่น การกัดกร่อนในกระบวนการผลิต, การเกิดก๊าซไข่เน่าหรือก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ การเกิดก๊าซซัลเฟอร์มอนอกไซด์ และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น หากเป็นเชื้อเพลิงที่มีการปนเปื้อนกำมะถันเป็นจำนวนมากมาเผาไหม้ในกระบวนการผลิตต่าง ๆ จะเกิดก๊าซพิษที่มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ส่งผลกระทบโดยตรงหากสูดดม และหากสัมผัสกับความชื้นสามารถเปลี่ยนเป็นกรดกำมะถันหรือกรดซัลฟิวริกทำความเสียหายแก่ระบบสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้จึงมีการประกาศจากกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้หน่วยงานการผลิตที่ปลดปล่อยก๊าซออกสู่สิ่งแวดล้อมต้องควบคุมปริมาณก๊าซ SOx (ก๊าซซัลเฟอร์มอนอกไซด์และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์) ไม่ให้เกินเกณฑ์ที่กำหนดไว้ที่ 640 ส่วนในล้านส่วน สำหรับโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงถ่านหินที่ได้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานลำดับที่ 88 (โรงงานผลิตพลังงานไฟฟ้า) หลังวันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2557 และกำลังการผลิตน้อยกว่า 300 เมกะวัตต์ และสำหรับในหน่วยงานการผลิตมีการกำหนดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมให้ไม่เกินตามที่กฎหมายและตามเกณฑ์กำหนดของการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมหรือ EIA ของแต่ละหน่วยการผลิตกำหนด แต่ในบางครั้งจากกระบวนการผลิตมีการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สู่สิ่งแวดล้อมเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดของการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมเนื่องด้วยสาเหตุของปริมาณของกำมะถันในเชื้อเพลิงถ่านหินที่ใช้ การผสมถ่านหินตามสัดส่วนและแหล่งการขุดพบเพื่อให้ได้ปริมาณความร้อนเพียงพอต่อการใช้งานและควบคุมปริมาณของกำมะถันให้มีปริมาณน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้สำหรับการควบคุมการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากปล่องระบาย แต่ในบางกรณีไม่สามารถควบคุมการปลดปล่อยก๊าซได้เนื่องจากปริมาณกำมะถันในถ่านหินมีปริมาณที่มากและไม่สามารถผสมถ่านหินจากแหล่งต่าง ๆ ให้เหมาะสมเพื่อควบคุมการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้จึงมีการใช้หินปูนหรือ limestone ซึ่งมีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตช่วยในการขจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ใน

ปล่องระบายได้ การดำเนินการนี้สามารถช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ในระดับหนึ่ง แต่ยังคงพบปัญหาข้างเคียงบางประการหลังจากการใช้หินปูน คือ

1. การใช้หินปูนในปริมาณมากแต่ยังไม่ช่วยลดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ดีเท่าที่ควร
2. มีหินปูนเหลือจากการเผาไหม้แล้วเปลี่ยนไปเป็นปูนขาวไลม์ ซึ่งมีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ซึ่งมีสมบัติคล้ายปูน เมื่อสัมผัสกับความชื้นทำให้จับตัวและแข็งตัวติดอุปกรณ์ในระบบการทำงานของเตาและการขนส่ง

จากปัญหาบางประการที่เกิดขึ้นทำให้มีแนวการศึกษาวิจัยนี้คือ ศึกษาปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และหินปูน ขีดจำกัดในการเกิดปฏิกิริยา และหาอัตราส่วนหินปูนต่อถ่านหินที่เหมาะสมในการเติมหินปูนเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยคำนึงถึงค่าการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ภาวะปกติอุณหภูมิเท่ากับเตาเผา ดังนั้นจึงนำมาสู่การจำลองในห้องปฏิบัติการ และการคำนวณการใช้หินปูนที่เหมาะสมโดยไม่ส่งผลกระทบต่อการดำเนินการผลิตปัจจุบันของระบบเตาเผา

1.2 วัตถุประสงค์ในงานวิจัย

1. ศึกษาการลดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในฟลูก๊าซระหว่างกระบวนการเผาไหม้ถ่านหิน
2. ศึกษาผลของปริมาณและสัดส่วนของหินปูนต่อถ่านหินต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตของการศึกษาคือ การใช้หินปูนที่เหมาะสมตามขีดจำกัดของปฏิกิริยาและรูปแบบการดำเนินงานเดิมของเตาเผาและรวมถึงอุณหภูมิที่ใช้จะต้องเหมือนกันกับในเตาเผา โดยการศึกษาทั้งหมดอยู่ในขอบเขตของการศึกษาด้านเคมีของการเกิดปฏิกิริยาไม่รวมถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงวิศวกรรม โดยการวิจัยจะศึกษาถึงสถานการณ์ปัจจุบันของการใช้หินปูนในเตาเผาแบบ circulation fluidized bed เพื่อช่วยลดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยสู่บรรยากาศ, ผลของขีดจำกัดในการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมและกำมะถัน, ผลของอุณหภูมิในการเผาไหม้, ผลของปริมาณกำมะถัน

ในถ่านหินก่อนการเผาไหม้, ผลของขนาดของถ่านหินที่ใช้ในการเผาไหม้ และการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลในการเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินต่อการเกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชัน

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมตัวอย่างในการทดลอง ได้แก่ ถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันในปริมาณต่าง ๆ เช่น ร้อยละ 0.2, ร้อยละ 0.4 และมากกว่าร้อยละ 1.0 เป็นต้น หินปูน เชื้อเพลิงชีวะมวล และเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
3. วิเคราะห์สมบัติของถ่านหินและหินปูน
   - ทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความชื้นและการกระจายตัวของขนาด (size distribution)
   - ทดสอบองค์ประกอบต่าง ๆ ได้แก่ กำมะถัน ซิลิกอน แคลเซียม เป็นต้น ด้วยเทคนิค X-Ray fluorescence
   - ทดสอบ Proximate analysis และปริมาณเถ้าของถ่านหิน
4. ศึกษาการเผาไหม้ระหว่างถ่านหินและหินปูนและการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างถ่านหินและหินปูนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชัน
   - ผสมถ่านหินและหินปูนในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยโมล เช่น Ca:S เท่ากับ 0.64 : 1, 1.28 : 1, 1.60 : 1, 1.93 : 1, 2.57 : 1 และ 3.21 : 1 เป็นต้น โดยใช้ถ่านหินเริ่มต้นสำหรับการทดลอง 20 กรัม
   - นำตัวอย่างถ่านหินและถ่านหินที่ผสมหินปูนแล้วเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ในแต่ละการทดลองนาน 2 ชั่วโมง เพื่อให้เป็นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์
5. ศึกษาอุณหภูมิในการเผาไหม้ระหว่างถ่านหินและหินปูน (อุณหภูมิ 800, 850 และ 950 องศาเซลเซียส) ต่อการเกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชัน
6. ศึกษาปริมาณกำมะถันในถ่านหินเริ่มต้นก่อนการเผาไหม้มีปริมาณกำมะถันในปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ ร้อยละ 0.2, ร้อยละ 0.4 และมากกว่าร้อยละ 1.0 ต่อการเกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

7. ศึกษาการเผาไหม้ระหว่างถ่านหินและชีวมวลอัตราส่วนต่าง ๆ โดยมวล ได้แก่ ร้อยละ 5, ร้อยละ 8, ร้อยละ 10 และร้อยละ 15 ต่อการเกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชัน
8. ศึกษาการเผาไหม้ระหว่างถ่านหิน, ชีวมวลและหินปูนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชัน โดยการผสมถ่านหิน, , หินปูนในอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง Ca : S เท่ากับ 1.93 : 1 และชีวมวลในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยมวล ได้แก่ ร้อยละ 5, ร้อยละ 8, ร้อยละ 10 และร้อยละ 15
9. ทดสอบองค์ประกอบของเถ้าหลังจากการทำปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องมือ X-Ray fluorescence ในการหาองค์ประกอบ
10. นำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบโดยการคำนวณหาขีดจำกัดและประสิทธิภาพของการทำปฏิกิริยาระหว่างหินปูนและถ่านหินโดยการคำนวณร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชัน
11. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้สัดส่วนผสมที่เหมาะสมของถ่านหินและหินปูนเพื่อสามารถควบคุมการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถ่านหิน [3]

ถ่านหิน คือ หินตะกอนชนิดหนึ่งและเป็นแร่เชื้อเพลิงสามารถติดไฟได้ มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีดำ มีทั้งชนิดผิวมันและผิวด้าน น้ำหนักเบา ถ่านหินประกอบด้วยธาตุที่สำคัญ 4 อย่าง ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและออกซิเจน นอกจากนั้นมีธาตุหรือสารอื่น เช่น กำมะถัน เจือปนเล็กน้อย ถ่านหินที่มีจำนวนคาร์บอนสูงและมีธาตุอื่น ๆ ต่ำ เมื่อนำมาเผาจะให้ความร้อนมากถือว่าเป็นถ่านหินคุณภาพดี

ถ่านหินเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในอดีตจนถึงปัจจุบัน อุตสาหกรรมถ่านหินซึ่งรวมทั้งการสำรวจ การผลิตและการใช้นั้นได้มีการพัฒนากันมาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในประเทศที่เป็นผู้นำทางด้านเศรษฐกิจอุตสาหกรรม เช่น สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่นและกลุ่มประเทศในยุโรป สำหรับภายในประเทศไทยนั้นถึงแม้จะมีปริมาณสำรองถ่านหินอยู่มากกว่า 2,000 ล้านตัน แต่ส่วนใหญ่เป็นถ่านหินที่มีชั้นคุณภาพต่ำตั้งแต่ลิกไนต์ (Lignite) จนถึง ซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) อีกทั้งภาพลักษณ์ที่ไม่ดีด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอดีตทำให้การใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงมีปริมาณไม่มากหาก
เปรียบเทียบกับประเทศอื่นๆ อย่างไรก็ตามในอนาคตคาดว่าจะมีการใช้ถ่านหินเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่มีราคาถูกและมีปริมาณสำรองมากเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น แต่ทั้งนี้การนำถ่านหินมาใช้ผลิตพลังงานจะต้องใช้ควบคู่กับเทคโนโลยีถ่านหินสะอาดเพื่อขจัดสารพิษที่ปลดปล่อยออกมาในกระบวนการผลิตและการใช้ถ่านหิน

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่มีความสำคัญ ข้อเด่นของถ่านหิน คือ มีราคาถูก มีเสถียรภาพ การขนส่งปลอดภัยและมีปริมาณสำรองมาก เมื่อเทียบกับก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมัน กล่าวคือ มีปริมาณสำรองถ่านหินในโลกมีถึง 900 พันล้านตัน และพบแหล่งถ่านหินในทุกทวีป กระจายอยู่กว่า 70 ประเทศทั่วโลก ดังนั้นถ้ามีวิธีการนำมาใช้ที่เหมาะสมก็สามารถใช้ได้นานไม่น้อยกว่า 200 ปี เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติ ซึ่งจะหมดไปในระยะเวลา 40-60 ปี ประเทศที่มีปริมาณสำรองถ่านหิน (proven reserve) มากที่สุด 5 อันดับแรกของโลก (สถิติปี 2536) ได้แก่

1. สหภาพโซเวียด	241,000	ล้านตัน
2. สหรัฐอเมริกา	240,560	ล้านตัน
3. จีน	114,500	ล้านตัน
4. ออสเตรเลีย	90,940	ล้านตัน
5. เยอรมัน(ตะวันตก)	80,069	ล้านตัน

2.1.1 การจำแนกชนิดของถ่านหิน [3]

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงที่ใช้เวลานานนับล้านปีของการสะสมตัวของซากพืชภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมของกระบวนการทางธรณีวิทยา โดยได้รับอิทธิพลจากความดันและความร้อนของผิวโลก แล้วกลายเป็นพีต (peat) ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในทั้งทางเคมีและกายภาพ แล้วค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นถ่านหินชนิดต่าง ๆ สามารถแยกประเภทตามลำดับชั้นได้เป็น 5 ประเภท คือ

- พีต (peat) เป็นขั้นแรกในกระบวนการเกิดถ่านหิน ประกอบด้วยซากพืชซึ่งบางส่วนได้สลายตัวไปแล้วสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้
- ลิกไนต์ (lignite) มีซากพืชหลงเหลืออยู่เล็กน้อย มีความชื้นมาก เป็นถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง
- ซับบิทูมินัส (subbituminous) มีสีดำ เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพเหมาะสมในการผลิตกระแสไฟฟ้า
- บิทูมินัส (bituminous) เป็นถ่านหินเนื้อแน่น แข็ง ประกอบด้วยชั้นถ่านหินสีดำมันวาว ใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อการถลุงโลหะ
- แอนทราไซต์ (anthracite) เป็นถ่านหินที่มีลักษณะดำเป็นเงา มันวาวมาก มีรอยแตกเว้าแบบก้นหอย ติดไฟยาก

ภาพและสมบัติทางกายภาพของถ่านหินชนิดต่าง ๆ แสดงตามภาพที่ 2.1 และตารางที่ 2.1

(ก) (ข) (ค) (ง) (จ)

ภาพที่ 2.1 ถ่านหินลำดับขั้นต่าง ๆ (ก) พีต, (ข) ลิกไนต์, (ค) ซับบิทูมินัส, (ง) บิทูมินัส, (จ) แอนทราไซต์ [3]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของถ่านหินชนิดต่าง ๆ

ถ่านหิน	ปริมาณความร้อน	ปริมาณความชื้น	ปริมาณเถ้า	ปริมาณกำมะถัน
1. แอนทราไซต์	สูง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
2. บิทูมินัส	สูง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
3. ซับบิทูมินัส	ปานกลาง - สูง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
4. ลิกไนต์	ต่ำ - ปานกลาง	สูง	สูง	ต่ำ - สูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.2 กำมะถันในถ่านหิน [4]

กำมะถันในถ่านหินมี 3 รูปแบบ คือ

- กำมะถันไพไรต์ (pyritic sulfur) หรือ metallic sulfide

กำมะถันไพไรต์ในถ่านหินพบในลักษณะของสารประกอบโลหะซัลไฟด์ คือ แร่ไพไรต์ (mineral pyrite) และแร่มาร์คาไซด์ (marcasite) ซึ่งมีองค์ประกอบและสูตรเคมีคล้ายกัน คือ FeS_2 แต่มีโครงสร้างของผลึกที่ต่างกัน

- กำมะถันซัลเฟต (sulfate sulfur) หรือ metallic sulfate

กำมะถันซัลเฟตพบในลักษณะของโลหะซัลเฟต เช่น แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$), สารประกอบซัลเฟตของเหล็ก ($FeSO_4$), สารประกอบซัลเฟตของทองแดง ($CuSO_4$), แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) หรืออาจพบในลักษณะของแร่ยิบซั่ม

- กำมะถันอินทรีย์ (organic sulfur)

กำมะถันอินทรีย์พบประมาณ 30 – 70 % ของปริมาณกำมะถันรวมในถ่านหินและกระจัดกระจายทั่วไปในโครงสร้างของถ่านหินในลักษณะโครงสร้างทางเคมีหลายรูปแบบที่ซับซ้อนและเสถียรมาก ไม่สามารถขจัดได้ด้วยวิธีทางกายภาพต้องใช้วิธีการทางเคมีในการขจัดด้วยการทำลายพันธะเคมีระหว่างกำมะถันกับคาร์บอน โดยทั่วไปจะพบกำมะถันอินทรีย์สูงกว่ากำมะถันในรูปแบบอื่น อย่างไรก็ตามหากพบปริมาณกำมะถันรวมในถ่านหินสูงจะพบทั้งกำมะถันอินทรีย์และกำมะถันไพไรต์สูงด้วย แต่ไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์หรือสัดส่วนที่แน่นอนของรูปแบบของกำมะถันได้

ลักษณะโครงสร้างของกำมะถันอินทรีย์ส่วนมากเป็นสารประกอบ heterocyclic (=CH-S-CH=), thioether (R-S-R'), mercaptan (R-S-H) และ disulfide (R-S-S-R') ตัวอย่างลักษณะโครงสร้างของกำมะถันอินทรีย์ที่ประกอบด้วย heterocyclic, thioether, mercaptan และ disulfide ที่เสนอโดย Hill และ Lyon [4] แสดงในรูปที่ 2.2 และตัวอย่างโครงสร้างกำมะถันอินทรีย์ที่เสนอโดย Wiser [4] ที่ประกอบด้วยแสดงในรูปที่ 2.3

2.2 หินปูน [5]

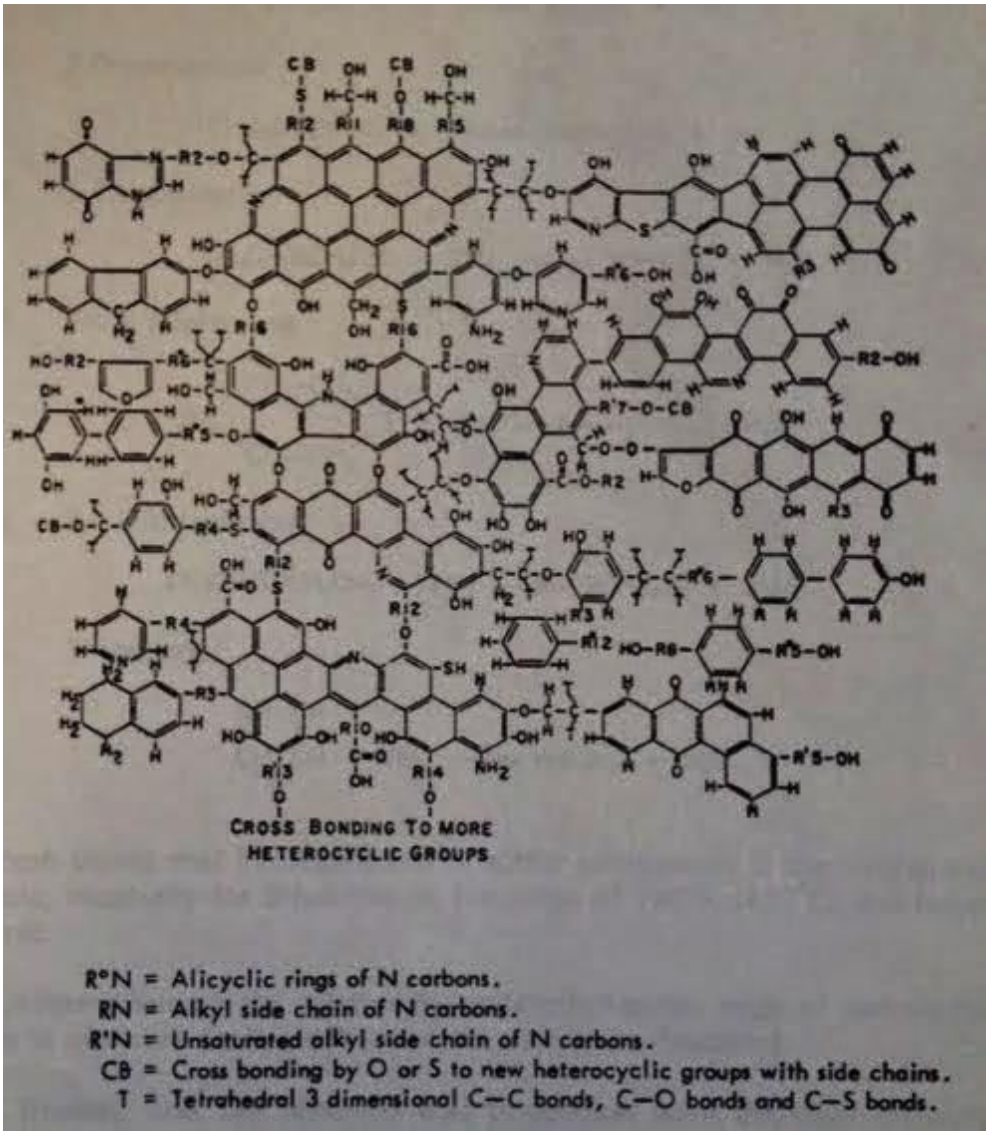
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) หรือหินปูน เป็นสารธรรมชาติที่เกิดจากการตกตะกอน และสะสมตัวของหินในทะเล เปลือกหอย ปะการัง กระดูกสัตว์กลายเป็นหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนต ถือเป็นสารตั้งต้นสำคัญในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต่างๆ รวมถึงการนำมาใช้ในภาคครัวเรือนและการเกษตร รวมถึงประโยชน์ในด้านต่างๆมากมาย

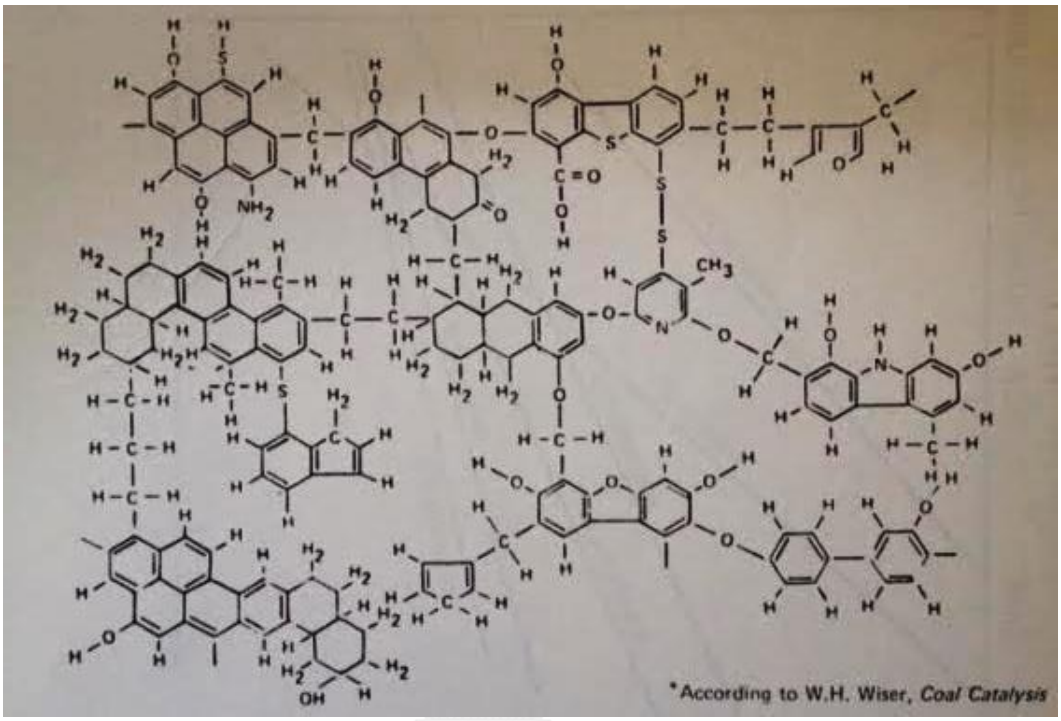
<u>การจำแนกชนิดของหินปูน</u>

แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ พบในสัตว์ เช่น เปลือกหอย กระดูก พบมากตามธรรมชาติในรูปของหินปูน และ แร่แคลไซต์ (calcite) หรือ แคลสปาร์ (calspar) แคลเซียมคาร์บอเนตที่พบในหินหรือสินแร่ธรรมชาติ แบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

- หินคาร์บอเนต (carbonate rock) ถือเป็นหินที่พบในธรรมชาติที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่ แบ่งเป็น 3 ชนิด คือ



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างกำมะถันอินทรีย์ที่เสนอโดย Hill และ Lyon [4]



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างกำมะถันอินทรีย์ที่เสนอโดย Wiser [4]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ก. หินตะกอนคาร์บอเนต (sedimentary carbonate rocks)

– หินปูน (limestone) เป็นหินตะกอนที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่ มักพบในรูปแคลไซต์หรืออราโกไนต์ ซึ่งมีสูตรเหมือนกัน แต่มีโครงสร้างต่างกัน

– โดโลไมต์ ($CaMg(CO_3)_2$) เป็นแร่ที่พบมากในหินปูนที่เกิดจากการแทนที่จากปฏิกิริยาของแมกนีเซียมในรูปของสารละลายในหินปูน

- ซอล์ก (chalk) จัดเป็นหินปูนร่วน มีลักษณะเนื้อละเอียด จากการทับถมซากพืชซากสัตว์

– ทราเวอร์ทีน (travertine) เป็นหินปูนที่มีลักษณะเนื้อหินได้หลายรูปแบบ อาจเป็นเส้นๆ เป็นชั้นหรือมีรูพรุน มักพบในแหล่งน้ำพุร้อน

ข. หินอัคนีคาร์บอเนต (igneouse carbonate rocks) เป็นหินอัคนีที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่

ค. หินแปรคาร์บอเนต (metamorphic carbonate rocks) จัดเป็นหินปูนหรือหินโดโลไมต์ที่จัดเรียงตัวใหม่จากความร้อน และแรงกดจากใต้พิภพ ซึ่งมักเรียกทั่วไปว่า หินอ่อน (marble)

- แร่แคลไซต์ (calcite) เป็นแร่ที่พบในธรรมชาติมีองค์ประกอบหลักของแคลเซียมคาร์บอเนต มีสูตรทั่วไปเหมือนหินปูน คือ $CaCO_3$ ประกอบด้วย CaO 56% และ CO_2 44% อยู่ในรูปผลึกต่างๆที่มีชื่อเรียกต่างกัน เช่น ด๊อกทูธสปาร์ (Dogtoothspar), ไอซแลนด์สปาร์ (Iceland spar), เนลเฮดสปาร์ (Nailhead spar) และซาตินสปาร์ (Satin spar)

หินปูนใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมพลาสติก พีวีซี อุตสาหกรรมยาง ใช้เป็นส่วนผสมของแป้ง ยาสีฟัน ผงซักฟอก ยา และเวชภัณฑ์ต่าง ๆ รวมถึงใช้ในการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น คอมพิวเตอร์ ฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า กระจก ปากกา ยางลบ ถุงมือ แว่นตา เป็นต้น ในอุตสาหกรรมกระดาษมักใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมเพื่อลดปริมาณเยื่อกระดาษและเพื่อเพิ่มสมบัติกระดาษ เช่น ความขาวสว่าง เคลือบผิวกระดาษให้เรียบ เป็นต้น

2.3 กระบวนการเผาไหม้ถ่านหิน [6]

การเผาไหม้ถ่านหินเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน เนื่องจากถ่านหินมีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่หลากหลาย การเผาไหม้ไม่เพียงแต่ให้พลังงานความร้อนยังปลดปล่อยผลกระทบอื่น ๆ เช่น เถ้า การแพร่และปัญหาสิ่งแวดล้อม ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบของเถ้าหลังการเผาไหม้ถ่านหินพบมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ปฏิกิริยาเคมีในการเผาไหม้ถ่านหินอย่างง่ายกับองค์ประกอบในถ่านหินสามารถแสดงได้ ดังนี้

$C + O_2 \longrightarrow CO_2$

$2H + O_2 \longrightarrow H_2O$

$S + O_2 \longrightarrow SO_2$

$2SO_2 + O_2 \longrightarrow 2SO_3$

$2N + O_2 \longrightarrow 2NO$

นอกจากองค์ประกอบหลักในถ่านหินที่เกิดการเผาไหม้ องค์ประกอบรองได้แก่ แร่ธาตุต่าง ๆ สามารถถูกเผาไหม้และปลดปล่อยสู่บรรยากาศได้เช่นกัน รูปที่ 2.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแร่ธาตุในถ่านหินเมื่อถูกเผาไหม้ ผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเผาไหม้และเกิดปัญหาตะกรันและการกัดกร่อนของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้

ก๊าซพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยการปลดปล่อยกำมะถันและไนโตรเจนในรูปของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ตามลำดับ เกิดปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศเกิดเป็นกรดกำมะถันและกรดไนตริก แสดงสมการในการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้

$SO_2 + H_2O \longrightarrow H_2SO_3$

$2SO_2 + O_2 \longrightarrow 2SO_3$

$SO_3 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4$

หรือ $2SO_2 + O_2 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4$

และ $NO + H_2O \longrightarrow H_2NO_2$

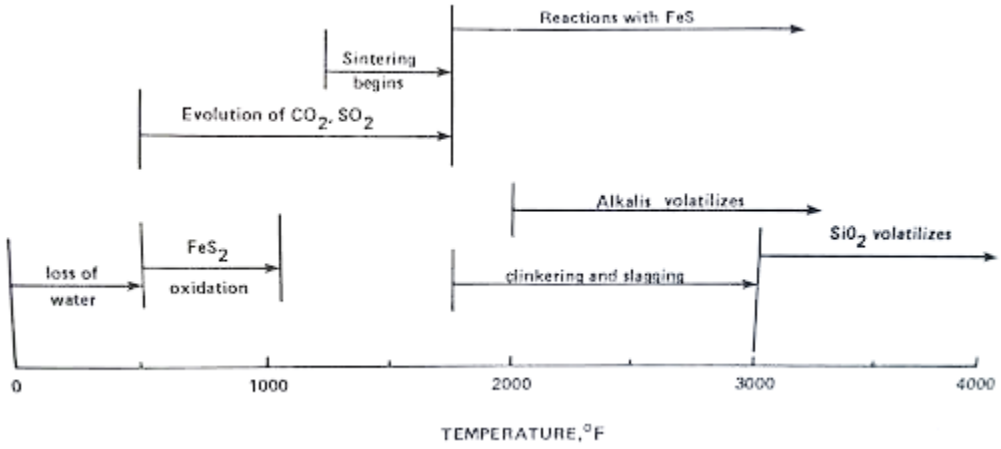
$2NO + O_2 \longrightarrow 2NO_2$

$NO_2 + H_2O \longrightarrow HNO_3$

หรือ $2NO + O_2 + H_2O \longrightarrow 2HNO_3$

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของเถ้าถ่านหิน

Content	%
Silica (SiO_2)	40 – 90
Aluminum oxide (Al_2O_3)	20 – 60
Iron (ferric) oxide (Fe_2O_3)	5 – 25
Calcium oxide (CaO)	1 – 15
Magnesium oxide (MgO)	0.5 – 4
Sodium oxide (Na_2O) + potassium oxide (K_2O)	1 - 4



ภาพที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงของแร่ธาตุในถ่านหินระหว่างการเผาไหม้ **[6]**

2.4 กระบวนการขจัดกำมะถันในถ่านหิน [6-8]

กำมะถันในถ่านหินเป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเมื่อนำถ่านหินมาใช้งาน ผลที่เกิดจากการใช้ถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันสูงคือ ปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นทั้งก่อนก่อนการเผาไหม้ ระหว่างการเผาไหม้ และหลังจากการเผาไหม้ กระบวนการขจัดกำมะถันในถ่านหินแบ่งเป็นกระบวนการทางกายภาพและกระบวนการทางเคมี หรือในบางครั้งพบการใช้วิธีทางชีววิทยาเข้ามาช่วยขจัดกำมะถันในถ่านหิน เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดเป็นกระบวนการที่ใช้ในการลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากกำมะถันและธาตุอื่น ๆ โดยส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ปัญหามลพิษที่เกิดจากการ

เผาไหม้ของถ่านหิน ได้แก่ ฝุ่นละออง ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ปัจจุบันเทคโนโลยีถ่านหินสะอาดได้รับการพัฒนาและสามารถขจัดปัญหามลพิษซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินได้อย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการขจัดกำมะถันของเทคโนโลยีถ่านหินสะอาดแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่

2.4.1 การขจัดกำมะถันก่อนการเผาไหม้ [6-8]

การขจัดกำมะถันก่อนการเผาไหม้เป็นการขจัดสิ่งเจือปนต่างๆ ออกจากถ่านหินก่อนเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ เช่น ฝุ่นละออง เศษดิน เศษหิน และกำมะถันไพไรต์ โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการทางกายภาพและกระบวนการทางเคมี และมีแนวทางทางชีววิทยาได้ถูกนำมาใช้เป็นแนวทางใหม่ที่กำลังเป็นที่สนใจ

- กระบวนการทางกายภาพ

  วิธีทางกายภาพเป็นวิธีที่ใช้มานานแล้วเพื่อใช้ในการแยกสิ่งแปลกปลอมและสิ่งเจือปนในถ่านหิน เช่น หิน และกำมะถันไพไรต์ โดยอาศัยวิธีทางค่าความถ่วงจำเพาะ สมบัติทางพื้นผิว วิธีนี้ไม่สามารถขจัดกำมะถันอินทรีย์รวมถึงสารประกอบของไนโตรเจนได้ ปัจจุบันวิธีการนี้สามารถช่วยขจัดกำมะถันไพไรต์ได้ 30 – 50 % และเถ้าของแร่ธาตุได้ประมาณ 60 %

  กระบวนการทางกายภาพจะให้ผลดีเมื่อมีการบดถ่านหินให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งกำมะถันไพไรต์และเถ้าแร่ธาตุจะถูกแยกออกจากถ่านหินได้ดี โดยเทคโนโลยีในการแยกทางกายภาพใหม่สามารถช่วยลดกำมะถันไพไรต์และเถ้าแร่ธาตุได้มากกว่า 90 %

- กระบวนการทางเคมี

  กระบวนการทางเคมีใช้เพื่อขจัดกำมะถันอินทรีย์ซึ่งอยู่ในพันธะเคมีของถ่านหิน ขจัดได้ยากกว่ากำมะถันไพไรต์ ปัจจุบันวิธีทางเคมีได้ถูกนำมาใช้เพื่อขจัดกำมะถันอินทรีย์ เช่น กระบวนการขจัดด้วยการล้างด้วยสารประกอบด่าง (molten caustic leaching) โดยใช้สารประกอบโซเดียมหรือโพแทสเซียมในการล้างกำมะถันและแร่ธาตุในถ่านหิน

- กระบวนการทางชีววิทยา

  กระบวนการทางชีววิทยาอาศัยแบคทีเรียหรือสาหร่ายในการกินกำมะถันอินทรีย์ในถ่านหิน การฉีดเอ็นไซม์ sulfur-digesting เป็นกระบวนการทางชีววิทยาวิธีหนึ่งเพื่อขจัด

กำมะถัน กระบวนการทางเคมีและชีววิทยาสามารถขจัดกำมะถันได้มากกว่า 90 % (กำมะถันไพไรต์และกำมะถันอินทรีย์)

2.4.2 การขจัดกำมะถันระหว่างการเผาไหม้ **[6-8]**

การขจัดกำมะถันระหว่างการเผาไหม้สามารถควบคุมได้จากการควบคุมภาวะการเผาไหม้ เช่น เชื้อเพลิง อากาศ และอุณหภูมิ เพื่อให้ไม่เกิดสารมลพิษจากการเผาไหม้

- Advanced combustion

เป็นเทคนิคในการควบคุมหรือขจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ฝุ่นละอองจากไอเสียก่อนเข้าสู่กังหันไอร้อน (steam generator) หรือให้ความร้อน มลพิษที่เกิดขึ้นสามารถควบคุมได้ด้วยการควบคุมการเผาไหม้และ/หรือการใช้ตัวดูดซับขณะเผาไหม้ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์สามารถควบคุมด้วยการนำถ่านหินมาเผาซ้ำ (coal reburning) หรือการควบคุมอุณหภูมิของเปลวไฟในขณะเผาไหม้ ก๊าซซัลเฟอร์ไดดอกไซด์ควบคุมได้ด้วยการใช้ตัวดูดซับขณะการเผาไหม้ เถ้าควบคุมด้วยการเผาที่อุณหภูมิสูงและเปลี่ยนรูปเป็นกากหลอมละลาย แต่การเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ได้

เทคโนโลยีบางวิธีได้ถูกออกแบบมาเพื่อขจัดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เท่านั้น ในขณะที่บางวิธีออกแบบเพื่อลดหรือจับมลพิษทั้งหมด (ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ ฝุ่นละออง) โดยทั่วไปแล้วสามารถลดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ได้ 50 – 70 % ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 50 – 95 % เถ้า 50 – 90 % ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่ถูกออกแบบ

- การเผาไหม้แบบฟลูอิไดซ์เบด

เทคนิคฟลูอิไดซ์เบด (fluidized bed) ถูกนำมาใช้เพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซมลพิษด้วยการควบคุมการเผาไหม้และการใช้สารดูดซับขณะเผาไหม้ เช่น หินปูน โดยการผสมถ่านหินและสารดูดซับเผาไหม้พร้อมกัน เกิดการจับกำมะถันที่อุณหภูมิ 760 – 870 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำกว่าการเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ กระบวนการนี้ใช้หินปูนในการช่วยดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกิดเป็นยิปซัมหรือสารประกอบแคลเซียมซัลเฟตมีสมบัติเป็นของแข็งสีขาวขนาดเล็ก สามารถถูกดักจับได้ที่อุปกรณ์ดักจับฝุ่นและปะปนมา

กับเถ้าลอย (fly ash) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) หรือแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เนื่องด้วยข้อจำกัดของเตาเผาแบบ circulation fluidized bed (CFB) ด้านขนาดของอนุภาคของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ที่ต้องมีความเหมาะสมกับประสิทธิภาพและการออกแบบของเตาเผา ดังนั้นจึงมีการศึกษาเกี่ยวกับขนาดอนุภาคของหินปูนที่ใช้ในเตาเผาต่อประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยา sulfation ของหินปูนกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และมีการศึกษาด้านขนาดของอนุภาคของหินแล้วยังมีการศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาด้วย โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาในขณะเกิดการเผาไหม้ประมาณ 850 – 900 องศาเซลเซียส [9, 10] ปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันระหว่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับแคลเซียมในหินปูนเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซัลเฟตได้ดังสมการ

$$Ca(OH)_2 + SO_2 \longrightarrow CaSO_3 + H_2O \quad (1)$$

$$CaSO_3 + 1/2O_2 \longrightarrow CaSO_4 \quad (2)$$

นอกจากแคลเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้ว ยังสามารถทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ได้อีกด้วย เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซัลเฟตตามสมการ ดังนี้

$$Ca(OH)_2 + SO_3 \longrightarrow CaSO_4 + H_2O \quad (3)$$

นอกจากการใช้หินปูนที่มีองค์ประกอบของ CaO ในการขจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้วยังมีการศึกษาที่ใช้สารประกอบอื่นที่มีสมบัติใกล้เคียงกับ CaO มาใช้ในการขจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพื่อให้เกิดสารประกอบซัลเฟต เช่น MgO เกิดเป็น $MgSO_4$ [11, 12] และ MnO_2 เกิดเป็น $MnSO_4$ ซึ่งมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการใช้ CaO [13] แต่เนื่องจากราคาของหินปูนมีราคาที่ถูกกว่าและของเสียที่เกิดขึ้นเป็นยิปซัมสามารถนำไปใช้ในด้านการก่อสร้างและซีเมนต์ได้จึงมีการใช้หินปูนมากกว่าการใช้องค์ประกอบอื่น ๆ

เทคนิคพัลเวอร์ไรซ์ (pulverized) ใช้การหินปูนบดพ่นในเตาขณะการเผาไหม้ถ่านหิน ในระหว่างการเผาไหม้จะปลดปล่อยกำมะถันและถูกจับด้วยหินปูนเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซัลไฟด์และแคลเซียมซัลเฟต

เทคนิคทั้งสองนี้ทำให้เกิดของเสียชนิดแข็งทำให้เกิดปัญหาด้านการกำจัด โดยนำออกจากเตาเผาที่ใต้เตาเผา อนุภาคที่มีขนาดเล็กและเบาจะถูกดักจับด้วยอุปกรณ์ดักจับฝุ่น วิธีการเผาไหม้แบบฟลูอิไดซ์เบดนี้สามารถช่วยลดการปลดปล่อยกำมะถันได้มากกว่า 90 %

2.4.3 การขจัดกำมะถันหลังการเผาไหม้ [6-8]

การขจัดกำมะถันหลังการเผาไหม้เป็นการขจัดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้และป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการที่เกิดขึ้นหลังจากถ่านหินเผาไหม้แล้ว

- Electrostatic precipitator คือ การดักจับฝุ่นด้วยการใช้ไฟฟ้าสถิตดักจับเถ้าลอยหรือใช้ไซโคลน (cyclone) ในการแยกฝุ่นโดยใช้หลักของแรงเหวี่ยงเพื่อให้ก๊าซเกิดการหมุนตัว ฝุ่นจะถูกแยกออกมา สามารถใช้ร่วมกับหม้อไอน้ำแบบ fluidized bed หรือกับหม้อไอน้ำแบบ pulverized coal
- Wet scrubber คือ กระบวนการขจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ฝุ่นละอองที่ออกมาพร้อมฟลูก๊าซโดยการใช้หินปูนหรือปูนไลม์ในการจับกำมะถันก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ สามารถขจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้มากกว่า 90 % เทคโนโลยีขั้นสูงดังกล่าวมี 2 วิธี คือ การพ่นฟลูก๊าซลงบนตัวดูดซับ และการสอดตัวดูดซับในขณะการปล่อยฟลูก๊าซ สามารถนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้ เพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของสารดูดซับ
- Dry scrubber หรือ In-duct sorbent โดยการใช้ปูนไลม์พ่นสวนทางกับฟลูก๊าซที่ปล่องระบาย สามารถลดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 50 – 70 % และเกิดของเสียที่เป็นของแข็งแห้ง ง่ายต่อการขจัด
- Alkaline agent เป็นวิธีการทำปฏิกิริยาระหว่างฟลูก๊าซและสารละลายแอลคาไลน์ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม โดยอาศัยวิธีทาง gas scrubbing ดังตารางที่ 2.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.3 ปฏิกิริยาเคมีของการขจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยวิธี gas scrubbing [6]

process	Chemical reaction
Lime slurry scrubbing	$Ca(OH)_2 + SO_2 \rightarrow CaSO_3 + H_2O$
Limestone slurry scrubbing	$CaCO_3 + SO_2 \rightarrow CaSO_3 + CO_2(g)$
Magnesium oxide scrubbing	$Mg(OH)_2(slurry) + SO_2 \rightarrow MgSO_3 + 2H_2O$
Sodium-base scrubbing	$Na_2SO_3 + H_2O + SO_2 \rightarrow 2NaHSO_3$
	$2NaHSO_3 + heat \rightarrow Na_2SO_4 + H_2O + SO_2$
Double alkaline	$2NaOH + SO_2 \rightarrow H_2O + Na_2SO_3$
	$Ca(OH)_2 + Na_2SO_3 \rightarrow CaSO_3(s) + 2NaOH$

2.4.4 เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดโดยการแปรสภาพถ่านหิน (coal conversion)

เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดโดยการแปรสภาพถ่านหินให้เป็นเชื้อเพลิงชนิดอื่น ส่วนใหญ่แปรสภาพเป็นก๊าซ

- Gasification combined cycle คือ การผสมผสานระหว่างเทคโนโลยีที่เปลี่ยนสถานะถ่านหินให้เป็นก๊าซ (coal gasification) กับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมกังหันก๊าซ (gas fired combined cycle plant) เข้าด้วยกัน โดยกระบวนการเริ่มจากการนำถ่านหินไปผสมกับไอน้ำและออกซิเจนโดยใช้แรงดันและอุณหภูมิสูงจนเกิดปฏิกิริยาทางเคมีจะได้ก๊าซที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ก๊าซนี้จะผ่านขั้นตอนในการทำให้สะอาด โดยการสกัดฝุ่นละออง กำมะถัน และไนโตรเจนออกไปก่อนจะถูกเผาที่เตาเผา ไอก๊าซที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง ไม่เพียงแต่หลีกเลี่ยงปัญหามลพิษแล้วยังช่วยป้องกันการสึกหรอของอุปกรณ์กังหันก๊าซด้วย
- Coal liquefaction technology คือ การแปรรูปถ่านหินให้อยู่ในสภาพของเหลวเป็นการแปรรูปถ่านหินให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงเหลว (liquid fuel)
- Mild gasification เป็นวิธีการดัดแปลง coal gasification ด้วยการให้ความร้อนแก่ถ่านหินในเตาปฏิกรณ์ที่ภาวะไร้ออกซิเจนเกิดเป็นเชื้อเพลิงก๊าซ ของเหลวและของแข็ง ซึ่งวิธีการนี้เป็นกระบวนการที่มีการทำความสะอาดถ่านหินน้อยมาก เนื่องจากการเกิดกระบวนการ pyrolysis ซึ่งเป็นกระบวนการขจัดสารระเหยง่ายกลั่นตัวเหลือเพียงถ่านคาร์บอนและเกิดการขจัดเถ้าและกำมะถันในถ่านหินแล้ว

2.5 อันตรายของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อสุขภาพอนามัย [14]

สัมผัสทางหายใจ	การหายใจเข้าไป จะก่อให้เป็นพิษ เกิดอาการบวมน้ำ (Edema) ในทางเดินหายใจ ไอของสารจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ ทำให้เกิดอาการน้ำท่วมปอด ซึ่งอาการนี้สามารถเกิดได้ตั้งแต่สัมผัสกับสาร 1 – 2 ชั่วโมง และอาจทำให้ตายได้
สัมผัสทางผิวหนัง	การสัมผัสถูกผิวหนัง การสัมผัสกับไอระเหยของสารที่มีความเข้มข้นสูง จะทำให้เกิดแผลไหม้
กินหรือกลืนเข้าไป	การกินหรือกลืนเข้าไป จะทำให้เกิดแผลไหม้ในหลอดอาหารและกระเพาะอาหาร
สัมผัสถูกตา	การสัมผัสถูกตา ทำให้เกิดการระคายเคือง เกิดแผลไหม้และอาจทำลายดวงตาได้
ความผิดปกติ	จะมีผลกระทบต่อระบบในร่างกาย ทำให้การหายใจถูกกด กระสับกระส่าย อึดอัด

2.6 อันตรายของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อการเกิดสารกรดในบรรยากาศ [15]

Chulalongkorn University

สารมลพิษที่เป็นตัวการทำให้เกิดสารกรดในบรรยากาศ (Acid precursors) ที่สำคัญๆ มีอยู่ 2 ชนิด ชนิดแรก คือ ก๊าซออกไซด์ของซัลเฟอร์ ซึ่งรวมถึงก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และชนิดที่สอง คือ ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ซึ่งรวมถึงก๊าซไนตริคออกไซด์ (NO) และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) แหล่งที่มาของสารมลพิษเหล่านี้ มีทั้งที่เป็นแหล่งธรรมชาติ (Natural sources) และแหล่งมนุษย์สร้าง (Man-made sources) หรือที่เป็นกิจกรรมของมนุษย์ แหล่งธรรมชาติที่ทำให้เกิดสารกรดในบรรยากาศ ได้แก่ การคุและการระเบิดของภูเขาไฟ ไฟไหม้ป่าตามธรรมชาติ ทะเลและมหาสมุทร การเน่าเปื่อยและการย่อยสลายของซากพืชสัตว์ และสารอินทรีย์ประเภทต่างๆ เป็นต้น แหล่งธรรมชาติมีบทบาทความสำคัญต่อการตกสะสมของกรดน้อยกว่าแหล่งมนุษย์สร้าง

ก๊าซออกไซด์ของซัลเฟอร์และก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน ส่วนใหญ่ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเผาเชื้อเพลิงฟอสซิลประเภทต่าง ๆ เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าและพลังงานมาให้มนุษย์เราใช้อยู่ทุกวันนี้ กิจกรรมดังกล่าวได้แก่ การเผาถ่านหินและน้ำมันเตาในโรงไฟฟ้าและโรงงาน อุตสาหกรรม การเผาขยะ และการเผาน้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล และน้ำมันเจต ในยานพาหนะประเภทต่างๆ เช่น รถยนต์ รถบรรทุก รถโดยสารประจำทาง รถไฟ เรือ และเครื่องบิน เป็นต้น ก๊าซออกไซด์ของซัลเฟอร์เกิดจากการรวมตัวของสารกำมะถันในเชื้อเพลิงฟอสซิลกับก๊าซออกซิเจนในอากาศขณะเผาไหม้ โดยปริมาณก๊าซออกไซด์ของกำมะถันที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณ เชื้อเพลิงที่เผาและปริมาณสารกำมะถันที่เจือปนอยู่ในเชื้อเพลิงนั้น

นอกจากนี้ก๊าซออกไซด์ของกำมะถันยังเกิดจากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม อุตสาหกรรมผลิตกรดกำมะถัน และอุตสาหกรรมถลุงสินแร่โลหะที่มีสารกำมะถันเจือปนอยู่ เช่น ทองแดง สังกะสี และตะกั่ว เป็นต้น ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนเกิดขึ้นในระหว่างการเผาเชื้อเพลิงประเภทต่าง ๆ เช่นเดียวกับก๊าซออกไซด์ของกำมะถัน โดยเกิดจากการรวมตัวของก๊าซไนโตรเจนในอากาศและสารไนโตรเจนในเชื้อเพลิงกับก๊าซออกซิเจนในอากาศในระหว่างการเผาไหม้ ยิ่งอุณหภูมิการเผาไหม้สูง ๆ และมีปริมาณก๊าซออกซิเจนในการเผาไหม้มากๆ จะยิ่งเกิดก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนมาก นอกจากนี้ ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนยังเกิดจากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมผลิตกรดดินประสิวและสารประกอบ อุตสาหกรรมผลิตปุ๋ย และอุตสาหกรรมผลิตวัตถุระเบิด เป็นต้น จากการคาดประมาณพบว่าบนโลกของเรามีปริมาณก๊าซออกไซด์ของซัลเฟอร์ที่เกิดจากธรรมชาติน้อยกว่าร้อยละสิบของปริมาณก๊าซออกไซด์ของซัลเฟอร์ที่เกิดจากการเผาเชื้อเพลิงฟอสซิลและเช่นเดียวกันปริมาณก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนที่เกิดจากการเผาเชื้อเพลิงฟอสซิลมีเป็นสองเท่าของปริมาณก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนที่เกิดจากธรรมชาติ สำหรับประเทศไทยของเรา ในปี พ.ศ. 2541 จากการคาดประมาณพบว่าการปล่อยก๊าซออกไซด์ของซัลเฟอร์และก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนจากการเผาเชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อผลิตพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ มีปริมาณรวมกันทั่วประเทศ 0.884 ล้านตัน และ 0.904 ล้านตัน ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.7 กฎหมายควบคุมการปลดปล่อยก๊าซมลพิษ [1]

จากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงานผลิต ส่ง หรือจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า กำหนดให้หน่วยงานการผลิตที่ปลดปล่อยก๊าซออกสู่สิ่งแวดล้อมจะต้องควบคุมปริมาณก๊าซ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ออกไซด์ของไนโตรเจนไดออกไซด์ และฝุ่นละอองของโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงไม่ให้เกินเกณฑ์ที่กำหนดไว้ดังนี้

ประเภทและขนาดของโรงไฟฟ้า	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	ออกไซด์ของไนโตรเจนไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	ฝุ่นละออง (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
โรงไฟฟ้าเก่าทุกขนาดที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง	700	400	320
โรงไฟฟ้าใหม่ที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง			
(1) ที่มีกำลังผลิตไม่เกิน 300 เมกะวัตต์	640	350	120
(2) ที่มีกำลังผลิตเกิน 300 เมกะวัตต์ แต่ไม่เกิน 500 เมกะวัตต์	450	350	120
(3) ที่มีกำลังผลิตเกิน 500 เมกะวัตต์	320	350	120

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Cordoba [16] รายงานการรวบรวมกระบวนการลดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในโรงไฟฟ้าถ่านหินด้วยการใช้หินปูนโดยวิธี wet flue gas desulfurization, spray dry flue gas desulfurization, furnace sorbent injection และ circulating fluidized bed dry scrubber พบว่า สมบัติของหินปูนมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันและหินปูน ปัจจัยดังกล่าวคือ การกระจายของขนาดอนุภาคของหินปูน, ความเป็นรูพรุนและสารปนเปื้อนในหินปูน ทั้งนี้หินปูนที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีที่สุดนั้นจะต้องมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตอย่างน้อยร้อยละ 95 นอกจากนี้ความเป็นกรด-ด่างในการทำปฏิกิริยาต้องควบคุมอยู่ระหว่าง 5.0 – 6.0 เพื่อควบคุมการเกิดแคลเซียมซัลเฟตที่สมบูรณ์

Jun และคณะ [17] รายงานการรวบรวมกระบวนการที่สามารถช่วยลดปริมาณกำมะถันที่ปลดปล่อยสู่บรรยากาศในขณะที่เกิดการเผาไหม้ได้หลายวิธี ได้แก่

1. การผสมถ่านหินในอัตราส่วนที่ทำให้ปริมาณกำมะถันอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด เป็นการผสมระหว่างถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันสูงกับถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันต่ำเพื่อควบคุมการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่องระบาย

2. การเกิด self-desulfurization ในระหว่างการเผาไหม้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบแอลคาไลน์ เช่น CaO, MgO, Al_2O_3, Fe_2O_3, K_2O, Na_2O เกิดเป็นสารประกอบแอลคาไลน์-ซัลเฟตภายใต้ภาวะออกซิเดชันและอุณหภูมิต่ำ การเกิด self-desulfurization สามารถเกิดขึ้นได้ขึ้นอยู่กับรูปร่างของเตาเผา อุณหภูมิของเตาเผา ระยะเวลาในการเผาไหม้และอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแอลคาไลน์กับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แต่ละชนิดและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาคือ 800 – 900 องศาเซลเซียส ในเตาเผาแบบ fluidized bed combustion จะเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ industrial grate furnace และ pulverized coal fire boiler

3. การใช้สารประกอบแอลคาไลน์เอิร์ธเพื่อให้เกิดสารประกอบซัลเฟต

Ogenga และคณะ [18] ได้ศึกษาการใช้หินปูนใน south african ในการช่วยขจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยศึกษาถึงการใช้เถ้าลอย (fly ash) และหินปูนที่ผ่านการเผาแล้วซึ่งมี CaO เป็นองค์ประกอบหลัก นำมาผสมและทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่อุณหภูมิ 55 – 75 องศาเซลเซียส นาน 4 – 10 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้ในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในเตาปฏิกรณ์แบบนิ่งที่อุณหภูมิ 87 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า ตัวดูดซับมีค่า specific surface area มากกว่า CaO และเถ้าลอยทำให้สามารถดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ดีกว่าและจะเพิ่มการดูดซับได้ดีเมื่อผสมเถ้าลอยและ CaO ในอัตราส่วน 2:1 ซึ่งสามารถดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้สูงถึง 0.3336 โมลต่อโมลของตัวดูดซับ

Tomas และคณะ [19] ได้ศึกษาการใช้หินปูนในการขจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ขณะเผาไหม้ brown coal พบว่า หินปูนสามารถช่วยขจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้และปริมาณของ CaO ที่มีอยู่ในหินปูนไม่สำคัญเท่ากับปริมาณของสารประกอบออกไซด์อื่น เพราะสารประกอบออกไซด์อื่นจะแย่งการทำปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แทน CaO ทำให้หินปูนที่มีปริมาณ CaO และสารประกอบออกไซด์อื่นน้อยจะสามารถเกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันได้ดีกว่าหินปูนที่มี CaO มาก

และมีสารประกอบออกไซด์อื่นมากเช่นกัน อีกทั้งปริมาณของสารประกอบออกไซด์อื่นจะสัมพันธ์กับขนาดของเม็ดหินปูนด้วย

Fabrizio และคณะ [20] ได้ศึกษาการทำ pre-treatment ของหินปูนด้วยวิธี slow calcination ในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในฟลูอิไดซ์เบดแบบจำลองเปรียบเทียบกับการใช้หินปูนที่ไม่ผ่านการ pre-treatment และศึกษาถึงขนาดของช่วงอนุภาคของหินปูนในการทำปฏิกิริยาด้วย พบว่า หินปูนที่ผ่านการทำ pre-treatment จะช่วยทำให้เกิดดีซัลเฟอไรเซชันได้ดีกว่า อีกทั้งขนาดอนุภาคของหินปูนที่มีขนาด 200 – 300 ไมโครเมตรสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าหินปูนที่มีขนาดใหญ่กว่า

Osuwan และคณะ [21] ศึกษาการลดมลภาวะจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งเป็นผลมาจากการเผาไหม้กำมะถันในถ่านหินด้วยการเติมปูนขาว (CaO) ในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อให้จับกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกิดเป็น $CaSO_4$ หลังจากการเผาไหม้และเติมดินเหนียวเพื่อใช้เป็นตัวประสานในการอัดก้อนเม็ดถ่านหิน ผลการทดลองพบว่า ปูนขาวสามารถทำหน้าที่ขจัดกำมะถันในถ่านหินอัดก้อนได้ดีมาก กำมะถันจะถูกจับให้อยู่ในรูปสารประกอบซัลเฟตในเถ้าประมาณร้อยละ 90 – 95 เทียบกับกำมะถันในถ่านหินเริ่มต้น โดยอัตราส่วนของ CaO / S ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 2.0 – 2.5 และดินเหนียวร้อยละ 20

Chen และคณะ [9] ศึกษาการเสื่อมสภาพของหินปูนในเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบดที่อุณหภูมิ 25 – 850 องศาเซลเซียส โดยใช้หินปูนใหม่พบว่า ปฏิกิริยา sulfation ไม่เกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 580 องศาเซลเซียส แต่เกิดปฏิกิริยาได้ดีที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส การเผาหินปูนก่อนการทำปฏิกิริยา sulfation ช่วยลดการสึกกร่อนของหินปูนในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นได้ หินปูนมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดพื้นที่ผิวของหินปูนเป็นไปตามสมการ exponential กับอุณหภูมิ และเป็นสัดส่วนกับพลังงานจลน์ที่ใช้และเวลาในการทำปฏิกิริยา

Montagnaro และคณะ [10] ศึกษาอุณหภูมิของการเสื่อมสภาพของหินปูนในขณะเกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันในเตาปฏิกรณ์พลูอิไดซ์เบดของหินปูนที่มีโครงสร้างต่างกัน โครงสร้างหินปูนมีผลต่อความหนาของชั้นซัลเฟตที่เกิดขึ้นหลังเกิดปฏิกิริยาและขึ้นกับปริมาณของแคลเซียมในการทำปฏิกิริยา การสึกกร่อนและการแตกตัวของหินปูนสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้ภาวะของฟลูอิไดซ์เบด ปฏิกิริยา sulfation เกิดขึ้นที่รอบพื้นผิวของหินปูนทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของหินปูน การเพิ่มอุณหภูมิจาก 850 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียส ทำให้อัตราการเสื่อมสภาพเพิ่มขึ้น

เนื่องจากอนุภาคมีความเปราะบางที่เกิดจากการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างรวดเร็วขณะเผาแต่ไม่ส่งผลกระทบร้ายแรงมากนัก

Valle – zermeno และคณะ [11] ศึกษาการใช้แมกนีเซียมออกไซด์ในการขจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันแบบเปียก (wet flue gas desulfurization) พบว่า การใช้แคลเซียมช่วยในการตกตะกอนร่วมกับแมกนีเซียมจะให้ผลในการขจัดที่ดีกว่า การเกิดสารประกอบซัลเฟตจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของของแข็งต่อน้ำ น้ำ ซึ่งเป็นไปตามธรรมชาติของการถ่ายเทมวลของปฏิกิริยา ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดีที่ช่วง pH ที่เป็นด่าง โดยที่อัตราส่วนของของแข็งต่อน้ำต่ำเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดดีซัลเฟอร์ไรเซชัน และศึกษาการนำแมกนีเซียมออกไซด์กลับมาใช้ใหม่ พบว่า ใช้แมกนีเซียมออกไซด์เกรดต่ำ (มีแมกนีเซียมออกไซด์ประมาณ 68 %) เพียง 2.9 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งน้อยกว่าการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ 3 เท่า ที่ pH 5.1 – 6.3 สามารถเกิด $CaSO_4.2H_2O$ และ $MgSO_4.6H_2O$ ได้ดี [12]

Ye และคณะ [13] ศึกษาการใช้แมงกานีสออกไซด์ในการขจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบว่าแมงกานีสมีช่องว่างที่พื้นผิวขนาดใหญ่ทำให้เกิดปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ดี ผลิตภัณฑ์ที่ได้เกิดเป็นแมงกานีสซัลเฟตที่มีโครงสร้างที่เสถียร ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่รุนแรงและทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 600 – 800 เคลวิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
เครื่องมือและวิธีการทดลอง

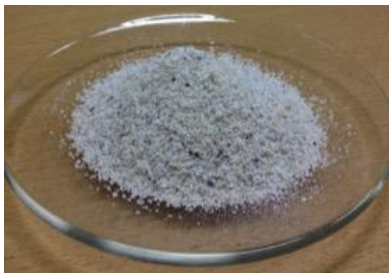
งานวิจัยนี้เป็นการทดลองการใช้หินปูนผสมกับถ่านหินก่อนการเผาไหม้ในเตาเผาสำหรับห้องปฏิบัติการในอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมในหินปูนและกำมะถันในถ่านหินในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันในระหว่างการเผาไหม้ของแคลเซียมและกำมะถันเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซัลเฟตทดสอบด้วยเครื่องมือ X-Ray fluorescence เป็นหลัก ทั้งนี้งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านหินและหินปูนที่ใช้เพื่อนำมาเปรียบเทียบและเป็นแนวทางในการวิจัยด้วย

3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

1. ตัวอย่างถ่านหินชนิด bituminous โดยเก็บตัวอย่างถ่านหินจากสายพานลำเลียงก่อนเข้าสู่เตาเผาช่วงวันที่ 18 ถึง 21 มกราคม 2558, 20 พฤษภาคม 2558 และถ่านหินที่มีปริมาณซัลเฟอร์สูงจากแหล่งภายนอกวันที่ 22 กรกฎาคม 2558 ดังภาพที่ 3.1

ภาพที่ 3.1 ตัวอย่างถ่านหิน

2. ตัวอย่างหินปูน เก็บตัวอย่างหินปูนที่ใช้ในกระบวนการผลิตจากรถบรรทุกขนส่งหินปูนช่วงระหว่างวันที่ 18 ถึง 21 มกราคม 2558 จากบริษัท แคลเซียมคุณภาพ จำกัด จังหวัดสระบุรี ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างหินปูน

3. ตัวอย่างชีวมวล เก็บตัวอย่างชีวมวลที่ใช้ในการเผาไหม้ซึ่งเป็นประเภทไม้ชิพ (Wood chip) ขนาดประมาณ 1 นิ้ว x 1 นิ้ว จากสายพานลำเลียงก่อนเข้าสู่เตาเผา ดังภาพที่ 3.3

ภาพที่ 3.3 ตัวอย่างชีวมวลชนิดไม้ชิพ

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

Chemical	Grade	Company
Magnesium oxide (MgO)	AR	Ajax Finechem
Sodium carbonate (Na_2CO_3)	AR	Ajax Finechem
Sodium hydroxide (NaOH)	AR	CARLO ERBA
Hydrochloric acid (HCl)	AR	Loba Chemie
Barium chloride ($BaCl_2$)	AR	Loba Chemie
Methyl orange indicator	AR	CARLO ERBA
Silver nitrate	AR	RCI Labscan

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

1. เครื่องบดหยาบถ่านหิน (coal crusher) ยี่ห้อ Pulverisette
2. เครื่องบดละเอียดถ่านหิน (coal pulverizer) ยี่ห้อ Pulverisette
3. เครื่องอบลมร้อน (air dry oven) ยี่ห้อ PAT Instrument
4. เตาอบ (hot air oven) ยี่ห้อ Binder
5. เครื่องวัดความชื้น (moisture balance) รุ่น FD – 610 ยี่ห้อ Kett
6. เครื่อง sieve shaker รุ่น AS 200 digit ยี่ห้อ Retz
7. ตะแกรงร่อน (sieve mesh) ขนาด 8.00, 2.00, 0.50, 0.25 และ 0.125 มิลลิเมตร สำหรับตัวอย่างถ่านหินและขนาด 0.85, 0.71, 0.60, 0.50 และ 0.25 มิลลิเมตร สำหรับตัวอย่างหินปูน ยี่ห้อ Retz
8. เตาเผา (muffle furnace) รุ่น CWF 1100 ยี่ห้อ CARBOLITE
9. ชุดการทดสอบค่า Loss on Ignition
10. เครื่องมือ X-Ray fluorescence รุ่น XGT-1000WR ยี่ห้อ Holiba

3.4 วิธีการทดสอบสมบัติของถ่านหิน

3.4.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบและทดลอง

หลังจากเก็บตัวอย่างจากสายพานการผลิตหรือจากกองถ่านหินจากแหล่งภายนอกด้วยวิธีการสุ่มเก็บใส่ในถุงปิดสนิทเพื่อป้องกันความชื้นแล้ว ก่อนการทดลองจะต้องเตรียมตัวอย่างถ่านหินเพื่อให้เหมาะสมกับการทดสอบสมบัติต่างๆ ของถ่านหินและการทดลอง โดยมีขั้นตอนในการเตรียม ดังนี้

1. นำตัวอย่างถ่านหินบดหยาบเพื่อลดขนาดของถ่านหินให้เหมาะสมด้วยเครื่องมือบดหยาบถ่านหิน (หากตัวอย่างถ่านหินผ่านการบดหยาบมาแล้วสามารถข้ามขั้นตอนนี้ได้)
2. ผสมและคลุกเคล้าถ่านหินให้เข้ากันดีในแต่ละตัวอย่างแล้วใส่ตัวอย่างลงบนถาดสำหรับอบลมร้อนให้มีความสูงไม่เกิน 20 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.4
3. นำตัวอย่างอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสนาน 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นที่ผิวของถ่านหินออก

4. นำตัวอย่างออกจากเครื่องอบลมร้อนแล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นสักครู่จึงเก็บตัวอย่างใส่ถุงเก็บตัวอย่างที่ป้องกันความชื้น
5. นำตัวอย่างไปทดสอบสมบัติและใช้ในการทดลองต่อไป

ภาพที่ 3.4 ตัวอย่างถ่านหินก่อนการอบลมร้อน

3.4.2 การทดสอบสมบัติของตัวอย่าง

1. การทดสอบค่าความชื้นตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 3173-03 [22] เป็นการหาปริมาณความชื้นที่อยู่ในตัวอย่างทั้งตัวอย่างถ่านหิน เชื้อเพลิงชีวมวลและตัวอย่างหินปูน โดยการทดสอบจะใช้ตัวอย่างประมาณ 20 กรัม ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยความชื้นออกจากตัวอย่าง ชั่งน้ำหนักจนน้ำหนักของตัวอย่างคงที่ นำน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณหาค่าความชื้นในตัวอย่าง การคำนวณแสดงดังภาคผนวก ก

2. การทดสอบการกระจายตัวของขนาด โดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงร่อน (sieve) ขนาดต่าง ๆ ใช้ตัวอย่าง 300 – 400 กรัม อบให้แห้งด้วยเตาอบประมาณ 20 – 30 นาที ตั้งทิ้งตัวอย่างที่อบไว้ให้เย็นแล้วนำตัวอย่างใส่ตะแกรงร่อนที่จัดเรียงตามขนาดที่กำหนดไว้ โดยชุดขนาดของตะแกรงร่อนถ่านหินประกอบด้วยตะแกรงขนาด 8.00, 2.00, 0.50, 0.25 และ 0.125 มิลลิเมตร และชุดขนาดของตะแกรงร่อนหินปูนประกอบด้วยตะแกรงขนาด 0.85, 0.71, 0.60, 0.50 และ 0.25 มิลลิเมตร ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่ร่อนได้แต่ละขนาดและสร้างกราฟการกระจายของขนาด

3. การทดสอบ Volatile matter ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 3175 – 07 [23] เป็นการหาปริมาณของแข็งระเหยที่อยู่ในตัวอย่างถ่านหินและตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวล โดยการทดสอบจะใช้

ตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ในภาชนะปิดฝาสนิทและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 7 นาที เพื่อขจัดสารระเหยออกจากตัวอย่าง ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างแล้วนำไปคำนวณหาค่าปริมาณของแข็งระเหยในตัวอย่าง การคำนวณแสดงดังภาคผนวก ก

4. การทดสอบ Fixed carbon ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 3172 – 07a [24] ได้จากการคำนวณจากค่าความชื้น, ของแข็งระเหย และปริมาณเถ้าภายใต้พื้นฐานตัวอย่างเดียวกัน

5. การทดสอบปริมาณเถ้า (ash) โดยวิธีการเผาในเตาเผาตามวิธีมาตรฐาน ASTM เลขที่ D 3174-04 [25] ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ใน ถ้วย crucible แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 750 °C ในเตาเผานาน 3 ชั่วโมง หลังจากครบกำหนดแล้ว นำตัวอย่างออกจากเตาเผาแล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นใน Desicator ชั่งน้ำหนักที่หลงเหลือหลังจากเผาแล้วเพื่อคำนวณค่าปริมาณเถ้า โดยการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ก

6. การทดสอบปริมาณกำมะถันในถ่านหินโดยวิธี Eschka method ตามวิธีมาตรฐาน ASTM เลขที่ D 3177 – 02 [26] ผสมแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) 2 ส่วน กับโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) 1 ส่วน แล้วชั่งมา 3 กรัม ผสมกับถ่านหินหนัก 1 กรัม ผสมให้เข้ากันดีในถ้วย crucible ที่มีฝาปิด นำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 ± 25 องศาเซลเซียส นาน 1.5 ชั่วโมง หลังจากเผาและตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้ว ละลายเถ้าที่เหลือด้วยน้ำร้อนปริมาณ 100 มิลลิลิตร และต้มให้ความร้อนนาน 30 – 45 นาที กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 และล้างตะกอนด้วยน้ำร้อน 5 ครั้งแล้วปรับปริมาตรเป็น 250 มิลลิลิตร ปรับ pH ของสารละลายตัวอย่างให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตโดยใช้เมททิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์ เติมสารละลาย 1 + 9 ไฮโดรคลอริก ปริมาณ 1 มิลลิลิตร ต้มให้เดือดแล้วเติมสารละลาย 100 กรัม/ลิตร แบเรียมคลอไรด์ ปริมาณ 10 มิลลิลิตรแล้วต้มให้เดือดนาน 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือด 2 ชั่วโมงขึ้นไปหรือตั้งทิ้งข้ามคืน กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 และล้างตะกอนด้วยน้ำที่ผสมซิลเวอร์ไนเตรท พับกระดาษกรองและเผาที่อุณหภูมิ 800 ± 50 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่แล้วคำนวณปริมาณกำมะถันในถ่านหินโดยการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ก

7. การทดสอบปริมาณธาตุด้วยวิธี X-Ray fluorescence เป็นการทดสอบปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ โดยตัวอย่างจะต้องบดให้ละเอียดก่อนการทดสอบ นำตัวอย่างใส่ลงใน sample holder สำหรับการทดสอบปริมาณธาตุในตัวอย่าง โดยภาวะของเครื่อง X-Ray fluorescence ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สภาวะเครื่อง X-Ray fluorescence

Condition	Value
X-Ray tube vol.	Auto (15kV, 50kV)
Processing Time	P3
Preset Time	100 s
Extend Time	100 s
X-Ray filter	4

3.5 การศึกษาผลของอัตราส่วนถ่านหินและหินปูนต่อการขจัดกำมะถัน

ดำเนินการทดลองผสมถ่านหิน (ขนาด 0.125 มิลลิเมตร ถึง 2.00 มิลลิเมตร) และหินปูนในอัตราส่วนคำนวณปริมาณแคลเซียมต่อกำมะถันในถ่านหินอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อศึกษาอัตราส่วนของปฏิกิริยาที่เหมาะสมของการทดลองแล้วเปรียบเทียบผลของปริมาณกำมะถันที่หลงเหลือในเถ้าระหว่างตัวอย่างถ่านหินที่ผสมหินปูนกับไม่ผสมหินปูน โดยขั้นตอนการทดลองเป็นดังนี้

1. ชั่งถ่านหินและหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมในหินปูนและกำมะถันในถ่านหินเท่ากับ 0.64 : 1, 1.28 : 1, 1.60 : 1, 1.93 : 1, 2.57 : 1 และ 3.21 : 1 ในแต่ละตัวอย่างการทดลองชั่งน้ำหนักของถ่านหินและหินปูนตามตารางที่ 3.2 การคำนวณน้ำหนักของถ่านหินและหินปูนที่ใช้ในการเผาไหม้แสดงตามภาคผนวก ก
2. ผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันดีโดยที่หินปูนจะต้องกระจายตัวอยู่ในถ่านหิน
3. นำไปเผาด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. เมื่อครบเวลาตามที่กำหนดให้ปิดเตาเผาและทิ้งไว้ให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนักและบันทึกผลการเผาไหม้ของถ่านหินและหินปูน
5. นำเถ้าไปทดสอบองค์ประกอบในเถ้าด้วยเครื่องมือ X-Ray fluorescence โดยการทดสอบจะทดสอบซ้ำจำนวน 10 ซ้ำต่อ 1 ตัวอย่าง แล้วรายงานเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
6. นำผลการทดสอบกำมะถันในถ่านหินและเถ้าไปคำนวณแล้วรายงานเป็นร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชัน

ตารางที่ 3.2 น้ำหนักของถ่านหินและหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลต่าง ๆ ของแคลเซียมและกำมะถัน

Ca : S mole ratio	Coal weight (g)	Limestone weight (g)
1 : 0.64	20	0.2714
1 : 1.28	20	0.5428
1 : 1.60	20	0.6785
1 : 1.93	20	0.8142
1 : 2.57	20	1.0856
1 : 3.21	20	1.357

3.6 การศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาไหม้ต่อการขจัดกำมะถัน

ทดลองผสมถ่านหิน (ขนาด 0.125 มิลลิเมตร ถึง 2.00 มิลลิเมตร) และหินปูนในอัตราส่วนปริมาณแคลเซียมในหินปูนต่อกำมะถันในถ่านหินอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.93 : 1 แล้วนำตัวอย่างเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ นำผลการทดสอบกำมะถันในถ่านหินและเถ้าไปคำนวณแล้วรายงานเป็นร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อปฏิกิริยาระหว่างถ่านหินและหินปูน

- ผสมถ่านหินและหินปูนให้มีอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมในหินปูนและกำมะถันในถ่านหินเท่ากับ 1.93 : 1
- นำไปเผาด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 800, 850 และ 900 องศาเซลเซียส ในแต่ละตัวอย่างที่ใช้ทดลองนาน 2 ชั่วโมง

3.7 การศึกษาผลของปริมาณกำมะถันในถ่านหินเริ่มต้นต่อการขจัดกำมะถัน

ทดลองผสมถ่านหิน (ขนาด 0.125 มิลลิเมตร ถึง 2.00 มิลลิเมตร) ที่มีปริมาณกำมะถันต่าง ๆ และหินปูนในอัตราส่วนปริมาณแคลเซียมในหินปูนต่อกำมะถันอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.93 : 1 แล้วนำตัวอย่างเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส นำผลการทดสอบกำมะถันในถ่านหินและเถ้าไป

คำนวณแล้วรายงานเป็นร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันเพื่อศึกษาผลของปริมาณกำมะถันในถ่านหินก่อนการเผาไหม้ต่อปฏิกิริยาระหว่างถ่านหินและหินปูน

- ผสมถ่านหินตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 ที่มีปริมาณกำมะถันแตกต่างกันกับหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมในหินปูนและกำมะถันในถ่านหินเท่ากับ 1.93 : 1 ในแต่ละตัวอย่างถ่านหินที่ใช้ การทดลองชั่งน้ำหนักของถ่านหินและหินปูนตามตารางที่ 3.3 การคำนวณน้ำหนักของถ่านหินและหินปูนที่ใช้ในการเผาไหม้แสดงตามภาคผนวก ก
- นำไปเผาด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.3 น้ำหนักของถ่านหินและหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1

Coal type	S content (%)	Coal weight (g)	Limestone weight (g)
Coal 1	0.65	20	0.8142
Coal 2	0.56	20	0.7038
Coal 3	0.28	20	0.3519

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.8 การศึกษาผลของขนาดของถ่านหินในการเผาไหม้ต่อการขจัดกำมะถัน

ทดลองผสมถ่านหินที่มีขนาดต่าง ๆ และหินปูนในอัตราส่วนปริมาณแคลเซียมในหินปูนต่อกำมะถันในถ่านหินโดยโมลเท่ากับ 1.93 : 1 แล้วนำตัวอย่างเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส นำผลการทดสอบกำมะถันในถ่านหินและเถ้าไปคำนวณแล้วรายงานเป็นร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันเพื่อศึกษาผลของขนาดของถ่านหินที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อปฏิกิริยาระหว่างถ่านหินและหินปูน

- นำตัวอย่างถ่านหินที่ได้เตรียมตัวอย่างไว้แล้วมาแยกขนาดต่าง ๆ ได้แก่ 0.125, 0.25, 0.50, 2.00 และ 8.00 มิลลิเมตร ด้วยอุปกรณ์ sieve และเครื่องมือ sieve shaker

- ผสมถ่านหินขนาดต่าง ๆ และหินปูนให้มีอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมในหินปูนและกำมะถันในถ่านหินเท่ากับ 1.93 : 1 โดยใช้ถ่านหิน 20 กรัม

3.9 การศึกษาผลของชีวมวลและหินปูนในการเผาไหม้ถ่านหินต่อการขจัดกำมะถัน

ทดลองผสมถ่านหินและชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ และถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนปริมาณแคลเซียมในหินปูนต่อกำมะถันในถ่านหินอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.93 : 1 และชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ แล้วนำตัวอย่างเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส นำผลการทดสอบกำมะถันในถ่านหินและเถ้าไปคำนวณแล้วรายงานเป็นร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันเพื่อศึกษาผลของการใช้ชีวมวลและหินปูนต่อร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชัน

- เตรียมตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวลเช่นเดียวกับการเตรียมตัวอย่างถ่านหินและบดให้มีขนาดน้อยกว่า 0.25 มิลลิเมตร เพื่อใช้ผสมกับถ่านหินในการเผาไหม้
- ผสมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดลอง ดังนี้

  ก. ผสมถ่านหินและชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ ได้แก่ ร้อยละ 5, ร้อยละ 8, ร้อยละ 10 และร้อยละ 15

  ข. ผสมถ่านหิน, หินปูนในอัตราส่วนปริมาณแคลเซียมในหินปูนต่อกำมะถันในถ่านหินอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.93 : 1 และชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ ได้แก่ ร้อยละ 5, ร้อยละ 8, ร้อยละ 10 และร้อยละ 15

  โดยการทดลองชั่งน้ำหนักของถ่านหิน, หินปูน และชีวมวลตามตารางที่ 3.4 การคำนวณน้ำหนักของถ่านหิน, หินปูน และชีวมวลที่ใช้ในการเผาไหม้แสดงตามภาคผนวก ก

ตารางที่ 3.4 น้ำหนักของถ่านหิน, หินปูน และชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ

Weight ratio (%)	Coal weight (g)	Limestone weight (g)	Biomass weight (g)
5	20	0	1.0
8	20	0	1.6
10	20	0	2.0
15	20	0	3.0
5	20	0.8142	1.0
8	20	0.8142	1.6
10	20	0.8142	2.0
15	20	0.8142	3.0

3.10 การคำนวณประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชัน

จากผลการทดลองปริมาณธาตุด้วยเครื่องมือ X – Ray fluorescence นำปริมาณกำมะถันที่ได้มาคำนวณร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชัน ดังนี้

ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหิน =

$$\frac{\text{ปริมาณกำมะถันในเถ้า}}{\text{ปริมาณกำมะถันในถ่านหินเริ่มต้น}} \times 100 \qquad (3.1)$$

ประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชัน (%) =

$$\frac{(\text{ปริมาณกำมะถันในเถ้าที่ผสมหินปูน} - \text{ปริมาณกำมะถันในเถ้าที่ไม่ผสมหินปูน})}{\text{ปริมาณกำมะถันในเถ้าที่ไม่ผสมหินปูน}} \times 100 \qquad (3.2)$$

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

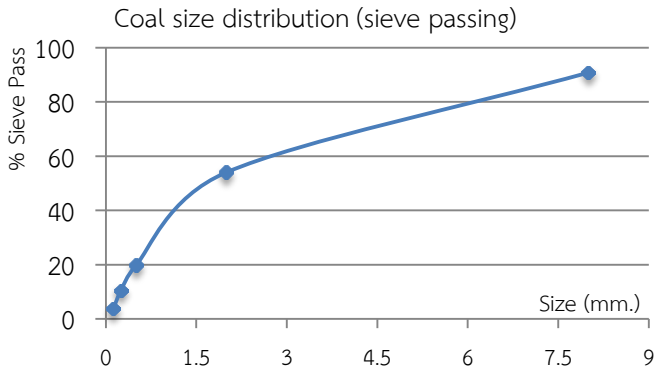
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการใช้หินปูนที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตผสมกับถ่านหินที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ การเกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันในระหว่างการเผาไหม้ของแคลเซียมและกำมะถันเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซัลเฟต โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อต่อปฏิกิริยา ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมและกำมะถัน, อุณหภูมิการเผาไหม้, ปริมาณของกำมะถันในถ่านหินก่อนการเผาไหม้, ขนาดของถ่านหินที่ใช้ในการเผาไหม้, อัตราส่วนของถ่านหินและชีวมวล และการใช้ชีวมวลและหินปูนผสมกับถ่านหินในการเผาไหม้ และได้ศึกษาเกี่ยวกับข้อมูลการใช้หินปูนของเตาเผา, สมบัติของถ่านหินและหินปูนที่ใช้เพื่อนำมาเปรียบเทียบและเป็นแนวทางในการวิจัยด้วย

4.1 สมบัติของถ่านหินและหินปูน

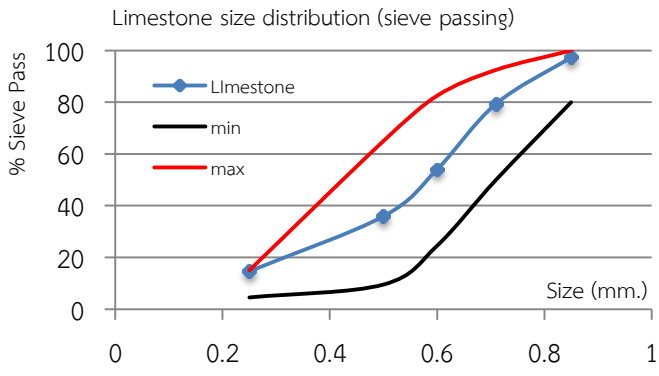
การทดสอบสมบัติของถ่านหินและหินปูนตามวิธีมาตรฐาน proximate analysis ได้แก่ ค่าความชื้น, volatile matter, fixed carbon และปริมาณเถ้า, ค่าความร้อน, การกระจายตัวของขนาดและปริมาณกำมะถัน ของถ่านหิน, หินปูน และชีวมวลแสดงดังตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.1 (ก) และ (ข) เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติที่กำหนดด้วยระบบของเตาเผาที่กำหนดไว้พบว่า หินปูนมีการกระจายตัวของขนาดตามเกณฑ์ที่กำหนด แต่ถ่านหินที่ใช้ในกระบวนการผลิตมีขนาดไม่เป็นไปตามที่กำหนด โดยยังพบถ่านหินที่มีขนาดมากกว่า 2.0 และ 8.00 มิลลิเมตร อยู่มาก ซึ่งอาจจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของถ่านหินในเตาเผาได้ และจากการทดสอบองค์ประกอบด้านเคมีของถ่านหินและหินปูนที่ใช้ด้วยเทคนิคทาง X-Ray fluorescence ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตในหินปูนและกำมะถันในถ่านหิน จึงนำมาใช้ในการทดสอบถ่านหินและเถ้าที่เกิดขึ้นหลังจากการทดลอง และใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันระหว่างกำมะถันในถ่านหินและแคลเซียมในหินปูน

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของถ่านหินและหินปูน

Sample	Proximate analysis				Sulfur (%)	Heating value (kcal / kg)
	Moisture (%)	Volatile matter (%)	Fixed carbon (%)	Ash (%)		
Coal 1	14.38	37.01	39.38	9.22	0.65	5,030
Coal 2	1.82	41.49	42.51	14.18	0.56	5,901
Coal 3	10.18	41.22	45.81	2.79	0.28	5,868
Limestone	0.10	-	-	-	0.02	-
Biomass	2.93	75.39	19.62	2.06	-	4,529



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.1 การกระจายตัวชนิด sieve passing (ก) ถ่านหิน และ (ข) หินปูน

ตารางที่ 4.2 สมบัติถ่านหินและหินปูน

element	% by X-Ray fluorescence			element	% by X-Ray fluorescence
	Coal1	Coal2	Coal3		Limestone
Al_2O_3	5.30	4.92	2.25	Al_2O_3	0.27
SiO_2	41.92	46.13	46.37	SiO_2	3.63
S	8.66	5.85	7.01	S	0.02
CaO	4.52	5.84	19.77	$CaCO_3$	95.77
Fe_2O_3	37.02	33.70	23.20	Fe_2O_3	0.23
TiO_2	1.34	1.07	0.40	Sr	0.05
K_2O	0.75	0.61	0.20		
MgO	0.16	0.00	0.00		
Na_2O	0.00	1.56	0.00		

4.2 การใช้หินปูนและถ่านหินในเตาเผา

หินปูนได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินเพื่อช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่องระบายของเตาเผา จากการเก็บข้อมูลการใช้หินปูนในเตาเผาในช่วงการใช้ถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันสูงจำนวนสองเตาเผา และคำนวณเป็นอัตราส่วนในการเติมหินปูนในเตาเผาดังแสดงในภาคผนวก ค และแสดงอัตราส่วนเป็นค่าเฉลี่ยตามตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นสัดส่วนการเติมหินปูนในเตาเผาชนิดฟลูอิไดซ์เบดว่า สัดส่วนการเติมหินปูนเพื่อช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันสูงมากในบางครั้ง จึงทำให้เกิดผลกระทบภายหลังจากการเผาไหม้ โดยปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กลายเป็นยิปซัมมีปริมาณมาก เมื่อสัมผัสกับน้ำหรือความชื้นทำให้เกิดการจับตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ซึ่งยากต่อการจัดการขจัดหรือการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตต่อไปได้ดังภาพที่ 4.2 นอกจากนี้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมออกไซด์ยังปลดปล่อยความร้อนออกมามากซึ่งจะเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานดังภาพที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเฉลี่ยที่ใช้ในการเผาไหม้ของเตาเผาชนิด Circulation fluidized bed

	อัตราส่วนโดยโมลเฉลี่ยของ $CaCO_3$: S และ Ca : S
เตาเผาที่ 1	1.73 : 1
เตาเผาที่ 2	1.57 : 1

ภาพที่ 4.2 การจับตัวเป็นก้อนแข็งขนาดใหญ่ของเถ้าที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์และสัมผัสความชื้นและจับตัวเป็นก้อนแข็งติดกระบะรถบรรทุก

ภาพที่ 4.3 การปลดปล่อยความร้อนเมื่อเถ้าที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์หลงเหลือสัมผัสความชื้นขณะการบรรจุลงรถขนส่ง

4.3 ผลของอัตราส่วนของแคลเซียมและกำมะถัน

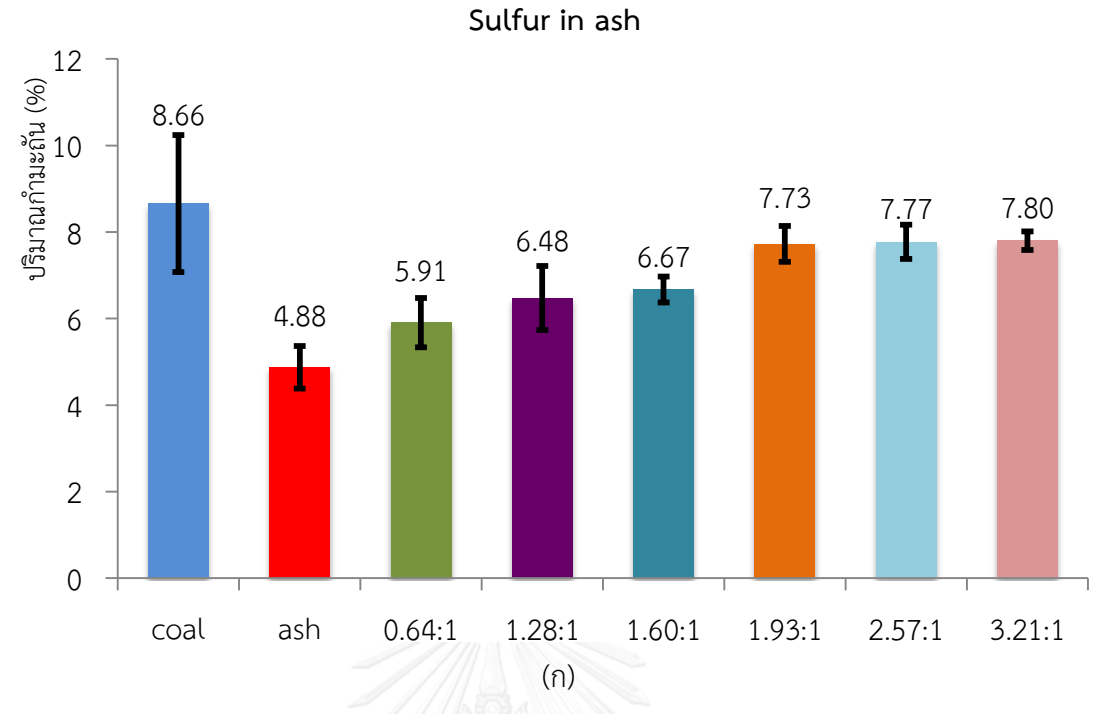
จากการศึกษาทดลองเผาไหม้ถ่านหินและหินปูนในเตาเผาห้องปฏิบัติการที่อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ผลการทดสอบองค์ประกอบเถ้าหลังจากเผาถ่านหินและหินปูนที่อัตราส่วนต่าง ๆ ได้แก่ 0.64 : 1, 1.28 : 1, 1.60 : 1, 1.93 : 1, 2.57 : 1 และ 3.21 : 1 เปรียบเทียบกับองค์ประกอบของถ่านหินเริ่มต้นก่อนการผสมหินปูนและเถ้าถ่านหินหลังจากเผาไหม้โดยไม่ผ่านการผสมหินปูนแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าการใช้หินปูนสามารถช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ โดยสังเกตได้จากสมมุติฐานที่หากปริมาณกำมะถันในเถ้าหลังจากการทดลองเผาถ่านหินและหินปูนมีมากกว่าปริมาณกำมะถันในเถ้าที่ไม่มีการผสมหินปูน แสดงว่าหินปูนสามารถทำหน้าที่ในการทำปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันกับกำมะถันในถ่านหินเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ในเถ้า ทำให้ลดการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยทางอากาศเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ได้ จากตารางที่ 4.4 ปริมาณของแคลเซียมและกำมะถันในเถ้าในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันอัตราส่วนต่าง ๆ นำมาเปรียบเทียบปริมาณกำมะถันได้ดังภาพที่ 4.4 (ก) และเปรียบเทียบปริมาณแคลเซียมได้ดังภาพที่ 4.4 (ข)

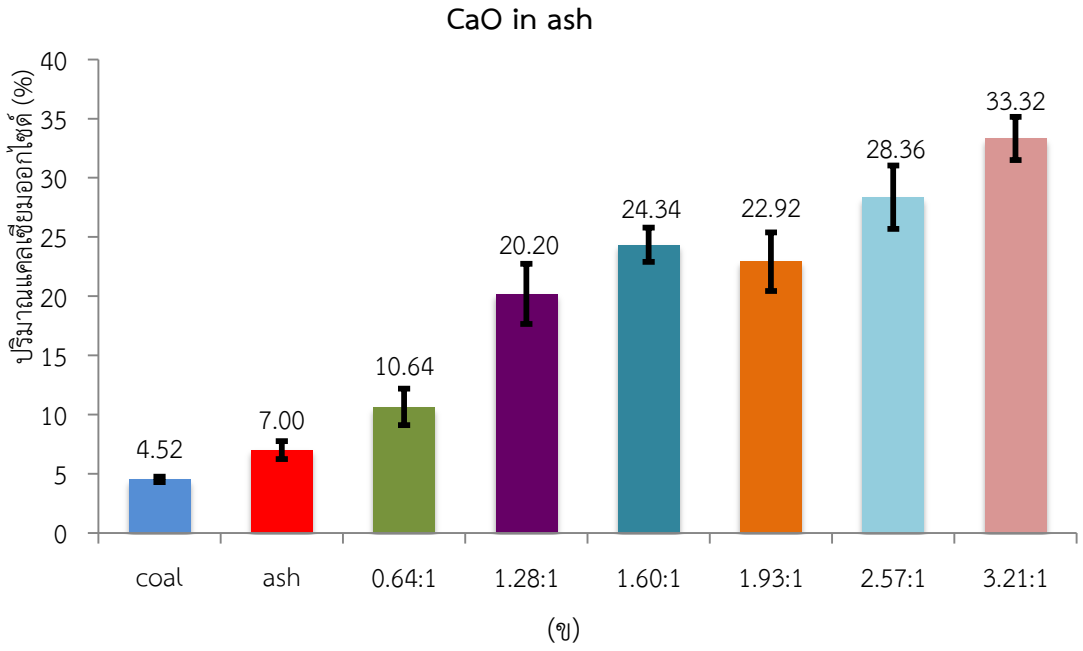
ตารางที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันต่อปริมาณธาตุของเถ้าหลังการเผาไหม้ถ่านหินและหินปูน

Coal1		Calcium : Sulfur (mole/mole)						
Ca : S mole ratio	-	0 : 1	0.64 : 1	1.28 : 1	1.60 : 1	1.93 : 1	2.57 : 1	3.21 : 1
Element		% by X-Ray fluorescence						
Na_2O	0.00	1.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
MgO	0.16	0.86	0.81	0.78	0.83	0.46	0.55	0.66
Al_2O_3	5.30	9.48	9.52	7.38	5.71	6.39	6.49	5.51
SiO_2	41.92	32.44	31.36	29.65	30.41	28.40	26.47	24.24
S	8.66	4.88	5.91	6.48	6.67	7.73	7.77	7.80
K_2O	0.75	0.74	0.82	0.60	0.37	0.54	0.45	0.38
CaO	4.52	7.00	10.64	20.20	24.34	22.92	28.36	31.70
TiO_2	1.34	1.70	1.66	1.60	1.29	1.45	1.39	1.34
Fe_2O_3	37.02	40.74	38.17	32.48	29.45	31.35	27.78	28.18

สภาวะการเผาไหม้ : อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University





ภาพที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันต่อปริมาณธาตุของ (ก) กำมะถัน และ (ข) แคลเซียมออกไซด์

ตารางที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณกำมะถันในถ่านหินและเถ้า การเผาไหม้ถ่านหินในภาวะที่ไม่ผสมหินปูน เถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้มีปริมาณกำมะถันลดลงเนื่องมาจากกระบวนการปลดปล่อยกำมะถันด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยมีปริมาณการปลดปล่อยกำมะถันได้เท่ากับ 3.78 % ซึ่งคำนวณจากผลต่างของปริมาณกำมะถันในถ่านหินและเถ้าหลังการเผาไหม้ถ่านหินในภาวะไม่ผสมหินปูน (8.66 % - 4.88%) เป็นสาเหตุของปัญหา sulfur dioxide emission ที่จะต้องควบคุมไม่ให้ปลดปล่อยที่ปล่องระบายเกินกว่าที่กฎหมายสิ่งแวดล้อมกำหนด และจากภาพที่ 4.4 (ก) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณกำมะถันในเถ้าเพิ่มขึ้น (5.91 % ถึง 7.73 %) เมื่อเพิ่มปริมาณของหินปูนด้วยอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันที่เพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.63 : 1 ถึง 1.93 : 1 และจะมีปริมาณกำมะถันค่อนข้างคงที่ (7.73 % ถึง 7.80 %) เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของหินปูนจากอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.93 : 1 ถึง 3.21 : 1 และจากภาพที่ 4.4 (ข) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคลเซียมในถ่านหินที่ไม่ผสมหินปูนก่อนการเผาไหม้แสดงให้เห็นว่า ปริมาณแคลเซียมจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันที่เพิ่มขึ้นจาก 4.52 % ในถ่านหินถึง 31.70 % ในเถ้าที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 3.21 : 1 และยังแสดงให้เห็นว่าแคลเซียมที่ใช้ในการเผาไหม้ไม่เกิดการสูญเสียไปในระหว่างการเผาไหม้ ปริมาณที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการเติมเข้าไปในการเผาไหม้ซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถให้เกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันได้ดีขึ้น

การคำนวณประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันและร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินจากปริมาณกำมะถันในเถ้าของถ่านหินที่ผสมหินปูนในอัตราส่วนต่าง ๆ หลังผ่านการเผาไหม้และปริมาณกำมะถันในถ่านหินก่อนการเผาไหม้ด้วยเทคนิค X-Ray fluorescence ตามสมการคำนวณประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันและร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินดังแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ 4.5 แสดงร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันที่อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันอัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมและกำมะถันร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันในการขจัดกำมะถันเพิ่มขึ้น เกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันได้ดีขึ้นและลดการปลดปล่อยของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สู่ปล่องระบายได้ดีขึ้น ทั้งนี้ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินในการเกิดปฏิกิริยาจะไม่เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ยังคงมีการปลดปล่อยกำมะถันอยู่บ้างโดยร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินใน

การเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเท่ากับประมาณร้อยละ 90 และประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันในการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเท่ากับประมาณร้อยละ 58 ที่อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 เมื่อเทียบกับการไม่ใช้หินปูนในปฏิกิริยาร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินสูงขึ้นร้อยละ 34 จากเดิมที่มีร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินร้อยละ 56 ดังนั้นอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันที่เหมาะสมสำหรับการใช้หินปูนผสมถ่านหินเพื่อช่วยลดปัญหา sulfur dioxide emission อยู่ในช่วงอัตราส่วน 1.60 : 1 ถึง 1.93 : 1

ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Osuwan และคณะ [16] โดยอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการเกิดดีซัลเฟอไรเซชันคืออัตราส่วนโดยโมลของ CaO / S เท่ากับ 2 / 1 ซึ่งใกล้เคียงกับผลของการศึกษานี้ที่ใช้หินปูนที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลัก ทั้งนี้ Osuwan ได้สันนิษฐานว่าหินปูนทำให้เกิดถ่านหินมีรูพรุนมากขึ้น ทำให้เกิดการแพร่ของอากาศในก้อนของถ่านหิน กำมะถันในถ่านหินจึงเกิดการออกซิไดซ์เกิดเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และทำปฏิกิริยากับแคลเซียมในหินปูนเกิดเป็นแคลเซียมซัลเฟต แต่ปฏิกิริยาเกิดประสิทธิภาพสูงสุดเพียงร้อยละ 90 – 95 เท่านั้น เพราะถ่านหินที่อยู่ด้านนอกและไม่ได้สัมผัสกับหินปูนได้ถูกเผาไหม้ก่อน กำมะถันจึงเกิดการออกซิไดซ์เกิดเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไม่ทำปฏิกิริยากับหินปูน และถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศ และในทำนองเดียวกับกับ Cordoba [9] ที่ได้อธิบายดีซัลเฟอร์ไรเซชันในเตาเผาแบบ circulating fluidized bed (CFB) ว่า CFB ช่วยให้เกิดดีซัลเฟอร์ไรเซชันได้ดีขึ้นด้วยเวลาในการเผาไหม้ที่นานขึ้นและการหมุนเวียนของอากาศที่ดี ทำให้ขจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้สูงสุดร้อยละ 98 ใน CFB แบบจำลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันต่อแสดงร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันในการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส

อัตราส่วยโดยโมลของ Ca : S	ปริมาณกำมะถัน[1]		ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหิน	ประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชัน (%)
	ถ่านหิน	เถ้าหลังเผาไหม้		
เถ้าที่ไม่ผ่านการผสมหินปูน	8.66	4.88	56.3	0.0
0.64:1	8.66	5.91	68.2	21.1
1.28:1	8.66	6.48	74.8	32.8
1.60:1	8.66	6.67	77.1	36.7
1.93:1	8.66	7.73	89.2	58.4
2.57:1	8.66	7.77	89.8	59.2
3.21:1	8.66	7.80	90.1	59.8

[1] % by X-Ray fluorescence

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4 ผลของอุณหภูมิการเผาไหม้

จากการศึกษาทดลองเผาไหม้ถ่านหินและหินปูนในอัตราส่วนปริมาณแคลเซียมในหินปูนต่อกำมะถันในถ่านหินอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.93 : 1 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้แก่ 800, 850 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาไหม้ต่อปฏิกิริยาระหว่างถ่านหินและหินปูน ตารางที่ 4.6 แสดงผลการเปรียบเทียบกับองค์ประกอบของถ่านหินเริ่มต้นก่อนการผสมหินปูนและเถ้าถ่านหินหลังจากเผาไหม้โดยไม่ผ่านการผสมหินปูน และภาพที่ 4.5 (ก) แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกำมะถันในเถ้าที่หลงเหลือจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าอุณหภูมิในการเผาไหม้นั้นมีความสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงหากต้องการให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ โดยปริมาณกำมะถันในเถ้าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาไหม้จาก 6.90 % ถึง 7.73 % ที่อุณหภูมิเผาไหม้จาก 800 ถึง 850 องศาเซลเซียส และลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 900 องศาเซลเซียส

พบปริมาณกำมะถันในเถ้า 7.17 % และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคลเซียมในถ่านหินและถ่านหินที่ผสมหินปูนหลังการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า ปริมาณของแคลเซียมในเถ้าเพิ่มขึ้นเป็น 18.50 % ถึง 23.38 % จาก 4.52 % ที่พบในถ่านหิน ซึ่งเกิดจากผลของการเติมแคลเซียมเข้าไปในการเผาไหม้

จากตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.5 (ข) แสดงร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันในแต่ละอุณหภูมิในการเผาไหม้ พบว่าที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส มีร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินสูงสุดโดยทำปฏิกิริยาให้เกิดสารประกอบซัลเฟตหลงเหลือในเถ้าได้สูงสุดเฉลี่ยร้อยละ 89.3 และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันสูงสุดที่ร้อยละ 60.0 แต่อย่างไรก็ตามการเผาไหม้ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่า 850 องศาเซลเซียส เพียงเล็กน้อยก็ไม่ส่งผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยามากนักโดยอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ที่ 800 หรือ 900 องศาเซลเซียส ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาให้เกิดสารประกอบซัลเฟตในเถ้าได้ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินมากกว่าร้อยละ 80 และประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันร้อยละ 60 เช่นกัน

ผลการทดลองนี้สอดคล้องและใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Fabrizio และคณะ [15] ที่พบว่าปฏิกิริยา sulfation ของ limestone กับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพกว่าที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส สันนิษฐานว่าเกิดจากลักษณะการเกิดปฏิกิริยาทางจลพลศาสตร์ (Interplay of kinetics) และความต้านทานการแพร่ของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระหว่างแคลเซียมออกไซด์และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาไม่แตกต่างกันมากนักทั้งสองอุณหภูมิ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิในการเผาไหม้ต่อปริมาณธาตุของเถ้าหลังการเผาไหม้ถ่านหินและหินปูน

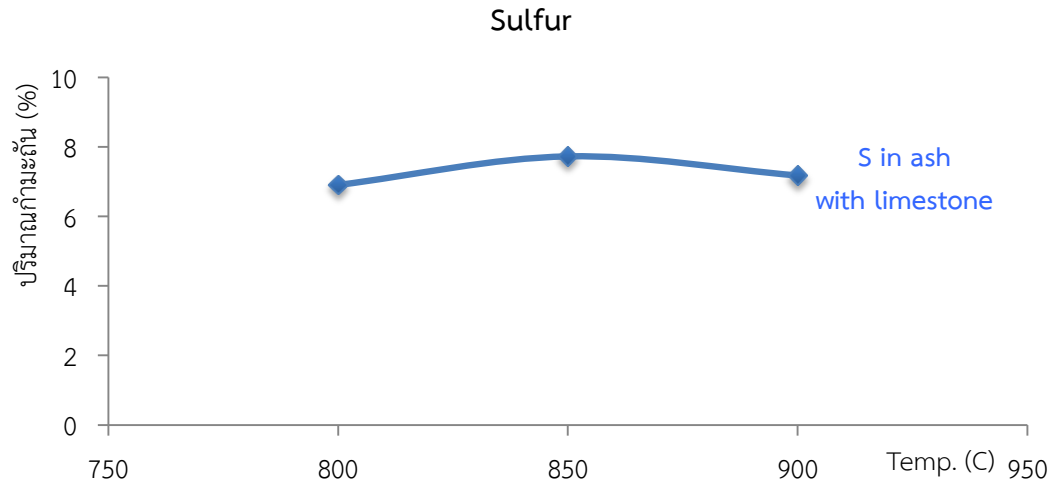
element	ถ่านหิน	เถ้าหลังจากเผาถ่านหินที่ไม่ผสมหินปูนที่อุณหภูมิต่าง ๆ			เถ้าหลังจากเผาถ่านหินและหินปูนในอัตราส่วน 1.93 : 1 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ		
		800 ℃	850 ℃	900 ℃	800 ℃	850 ℃	900 ℃
	% by X-Ray fluorescence						
Na_2O	0.00	0.27	1.04	0.57	0.00	0.00	0.00
MgO	0.16	0.56	0.86	0.95	1.07	0.46	1.43
Al_2O_3	5.30	9.79	9.48	9.83	6.01	6.39	7.41
SiO_2	41.92	32.11	32.44	32.06	30.64	28.40	33.00
S	8.66	4.75	4.88	4.48	6.90	7.73	7.17
K_2O	0.75	0.81	0.74	0.80	0.48	0.54	0.60
CaO	4.52	6.34	7.00	6.37	23.38	22.92	18.50
TiO_2	1.34	1.70	1.70	1.60	1.42	1.45	1.45
Fe_2O_3	37.02	41.29	40.74	41.08	29.31	31.35	29.74

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิในการเผาไหม้ต่อร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชัน

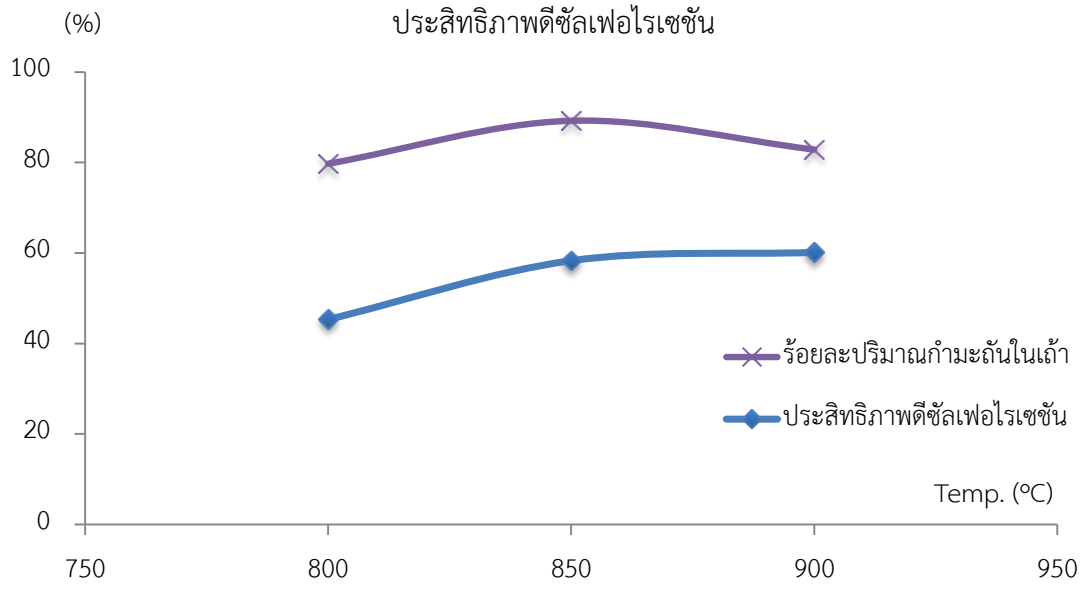
อุณหภูมิการเผาไหม้ (° C)	ปริมาณกำมะถัน[1]			ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหิน	ประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชัน (%)
	ถ่านหิน	เถ้าหลังเผาไหม้			
		ไม่ผสมหินปูน	ผสมหินปูน[2]		
800	8.66	4.75	6.90	79.7	45.3
850	8.66	4.88	7.73	89.2	58.4
900	8.66	4.48	7.17	82.9	60.0

[1] % by X-Ray fluorescence, [2] ถ่านหินและหินปูนในอัตราส่วน 1.93 : 1



(ก)

ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชัน



(ข)

ภาพที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิ ในการเผาไหม้ต่อ (ก) ปริมาณกำมะถันในเถ้า และ (ข) ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันที่อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1

4.5 ผลของปริมาณกำมะถันเริ่มต้น

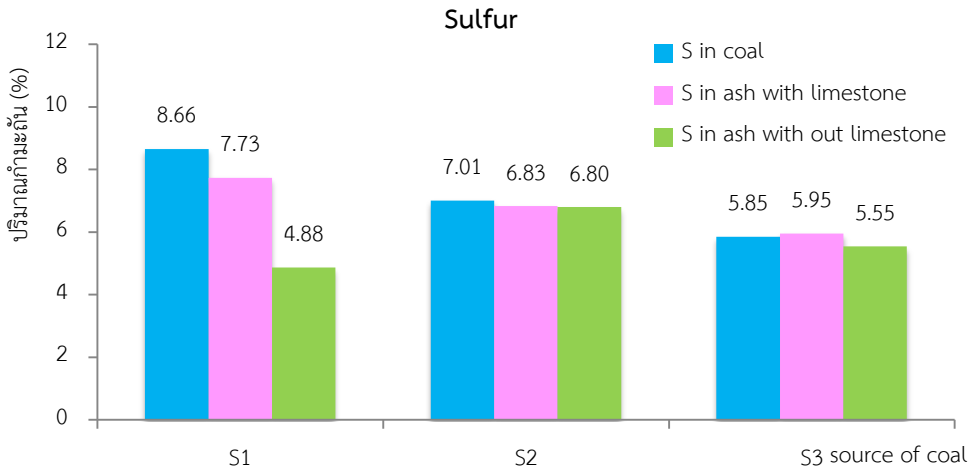
การศึกษาการเผาไหม้ถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันต่าง ๆ และหินปูนที่อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมในหินปูนและกำมะถันในถ่านหินเท่ากับ 1.93 : 1 อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในการศึกษาผลของปริมาณกำมะถันในถ่านหินก่อนการเผาไหม้ต่อปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชัน ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบในเถ้าหลังจากเผาถ่านหินตัวอย่างต่าง ๆ และหินปูน เปรียบเทียบกับองค์ประกอบของถ่านหินเริ่มต้นก่อนการผสมหินปูน

ตารางที่ 4.8 แสดงปริมาณกำมะถันในถ่านหินก่อนการเผาไหม้และปริมาณกำมะถันในเถ้าหลังจากผสมถ่านหินและหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ของถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันแตกต่างกันจำนวน 3 ตัวอย่าง และภาพที่ 4.6 แสดงปริมาณกำมะถันเปรียบเทียบระหว่างถ่านหินและเถ้าของถ่านหินหลังจากการผสมหินปูนที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เรียงลำดับตามปริมาณกำมะถันในถ่านหิน พบว่า เมื่อปริมาณกำมะถันเริ่มต้นในถ่านหินมีปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 5.85 % ถึง 8.66 % การใช้หินปูนช่วยในการเกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันจะลดประสิทธิภาพลงเล็กน้อย และในเถ้ามีปริมาณของแคลเซียมเพิ่มขึ้นจากการเติมแคลเซียมเข้าไปในการเผาไหม้ ตารางที่ 4.9 แสดงร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันของการเผาไหม้ถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันเริ่มต้นต่าง ๆ พบว่า ปริมาณกำมะถันเริ่มต้นในถ่านหินเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาลดลงแต่ยังมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งคำนวณจากปริมาณกำมะถันในถ่านหินกับปริมาณกำมะถันในเถ้าหลังจากการเผาไหม้ แต่ประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันไม่มีแนวโน้มตามร้อยละปริมาณกำมะถันเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินเนื่องจากองค์ประกอบของถ่านหินทั้งสามตัวอย่างมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ในถ่านหิน 2 (S2) มีปริมาณแคลเซียมสูง (ร้อยละ 20.77) เมื่อเทียบกับถ่านหินตัวอย่างอื่นที่มีปริมาณแคลเซียมร้อยละ 4.52 ถึง 8.84 ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไร-เซชันได้ดีเกิดเป็นสารประกอบซัลเฟตในเถ้าสูงแม้มิได้ผสมหินปูนในการเผาไหม้ถ่านหิน

ตารางที่ 4.8 ผลของปริมาณกำมะถันเริ่มต้นต่อปริมาณธาตุของเถ้าหลังการเผาไหม้ถ่านหินและหินปูนที่อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1

ตัวอย่างถ่านหิน	ถ่านหิน 1 (S1)			ถ่านหิน 2 (S2)			ถ่านหิน 3 (S3)		
	ถ่านหิน	เถ้า		ถ่านหิน	เถ้า		ถ่านหิน	เถ้า	
		ไม่ผสมหินปูน	ผสมหินปูน		ไม่ผสมหินปูน	ผสมหินปูน		ไม่ผสมหินปูน	ผสมหินปูน
element	% by X-Ray fluorescence								
Na_2O	0.00	1.04	0.00	0.00	0.00	0.03	1.56	0.00	0.96
MgO	0.16	0.86	0.46	0.00	0.63	0.14	0.00	0.30	0.91
Al_2O_3	5.30	9.48	6.39	2.25	5.13	1.78	4.92	8.55	7.40
SiO_2	41.92	32.44	28.40	46.37	27.82	18.35	46.13	37.45	34.95
S	8.66	4.88	7.73	7.01	6.80	6.83	5.85	5.55	5.95
K_2O	0.75	0.74	0.54	0.20	0.82	0.17	0.61	0.74	0.61
CaO	4.52	7.00	22.92	19.77	20.77	47.38	5.84	7.49	17.72
TiO_2	1.34	1.70	1.45	0.40	1.59	0.74	1.07	2.24	2.03
Fe_2O_3	37.02	40.74	31.35	23.20	35.27	23.29	33.70	36.60	28.75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 4.6 ผลของปริมาณกำมะถันเริ่มต้นต่อปริมาณกำมะถันในเถ้าจากการเผาไหม้ที่อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1

ตารางที่ 4.9 ผลของปริมาณกำมะถันเริ่มต้นต่อร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันจากการเผาไหม้ที่อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1

ถ่านหิน	ปริมาณกำมะถัน (%)				ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้า[2]	ประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชัน (%)
	ถ่านหิน		เถ้า			
	Echka's method	X-Ray Fluorescence	ไม่ผสมหินปูน[1]	ผสมหินปูน[1]		
S1 (Coal 1)	0.65	8.66	4.88	7.73	89.3	58.4
S2 (Coal 2)	0.28	7.01	6.80	6.83	97.4	0.4
S3 (Coal 3)	0.56	5.85	5.55	5.95	101.7	7.2

[1] % by X-Ray fluorescence, [2] เทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหิน

4.6 ผลของขนาดของถ่านหิน

การศึกษาการเผาไหม้ถ่านหินที่มีขนาดต่าง ๆ และหินปูนที่อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันอัตราส่วน 1.93 : 1 ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ศึกษาผลของขนาดของถ่านหินที่ใช้เผาไหม้ต่อปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชัน ตารางที่ 4.10 แสดงองค์ประกอบในเถ้าหลังจากเผาถ่านหินตัวอย่างที่มีขนาดต่าง ๆ และหินปูนเปรียบเทียบกับองค์ประกอบของถ่านหินเริ่มต้นก่อนการผสมหินปูน

ตารางที่ 4.10 แสดงปริมาณกำมะถันในถ่านหินก่อนการเผาไหม้และปริมาณกำมะถันในเถ้าหลังจากผสมถ่านหินขนาดต่าง ๆ และหินปูนที่อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อขนาดของถ่านหินมีขนาดใหญ่ขึ้น (0.125 มิลลิเมตร ถึง 0.500 มิลลิเมตร) ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันได้ดีขึ้นมีปริมาณกำมะถันในเถ้าหลังเผาไหม้ 5.99 % ถึง 7.41 % ตามลำดับของขนาดถ่านหินที่เพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดได้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันเมื่อขนาดของถ่านหินมีขนาด 0.25 มิลลิเมตร ถึง 2.00 มิลลิเมตร หากพิจารณาที่ปริมาณของแคลเซียมในเถ้า พบว่า ขนาดของถ่านหินในการเผาไหม้ขนาด 0.50 มิลลิเมตร ถึง 2.00 มิลลิเมตร ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันได้ดี โดยมีปริมาณแคลเซียมในเถ้าสูงเท่ากับ

36.97 % และ 42.07 % ตามลำดับ ในภาพที่ 4.7 (ก) แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกำมะถันในเถ้าของถ่านหินที่มีขนาดต่าง ๆ หลังจากผสมหินปูนในอัตราส่วนเดียวกัน ดังนั้นขนาดของถ่านหินที่ใช้ในการเผาไหม้เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันได้ดีและช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกสู่ปล่องระบายได้ จากตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.7 (ข) ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันของถ่านหินขนาดต่าง ๆ ซึ่งคำนวณจากปริมาณกำมะถันในถ่านหินกับปริมาณกำมะถันในเถ้าหลังจากการเผาไหม้โดยถ่านหินที่มีขนาด 0.25 – 2.00 มิลลิเมตร เมื่อผสมหินปูนในอัตราส่วนที่เท่ากับขนาดอื่น ๆ และเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินได้สูงสุดใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 85.3, 84.4 และ ร้อยละ 86.5 ตามลำดับ) และประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันใกล้เคียงกันร้อยละ 50.4 ถึง 53.1 ที่ถ่านหินมีขนาด 0.50 – 2.00 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.10 ผลของขนาดของถ่านหินต่อปริมาณธาตุของเถ้าหลังการเผาไหม้ถ่านหินและหินปูนที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส

element	ถ่านหิน	เถ้าหลังจากเผาถ่านหินที่ขนาดของถ่านหินต่าง ๆ							
		0.125 mm		0.250 mm		0.500 mm		2.00 mm	
		ไม่ผสมหินปูน	ผสมหินปูน[1]	ไม่ผสมหินปูน	ผสมหินปูน[1]	ไม่ผสมหินปูน	ผสมหินปูน[1]	ไม่ผสมหินปูน	ผสมหินปูน[1]
	% by X-Ray fluorescence								
Na_2O	0.00	1.36	1.67	2.45	1.77	1.08	0.94	0.02	0.01
MgO	0.16	0.80	0.50	0.68	0.11	0.62	0.52	0.06	0.45
Al_2O_3	5.30	7.68	7.63	8.37	8.25	7.53	6.18	6.29	5.30
SiO_2	41.92	32.22	30.71	34.30	30.52	33.20	21.61	39.72	17.00
S	8.66	4.77	5.99	4.50	6.22	4.84	7.41	4.72	7.10
K_2O	0.75	2.05	2.10	2.25	2.07	1.74	1.35	0.67	0.69
CaO	4.52	4.91	26.54	4.17	22.66	5.19	36.97	5.01	42.07
TiO_2	1.34	1.55	1.49	1.90	1.70	1.53	1.39	1.93	1.79
Fe_2O_3	37.02	42.91	22.98	38.64	26.22	42.48	23.00	38.30	24.80

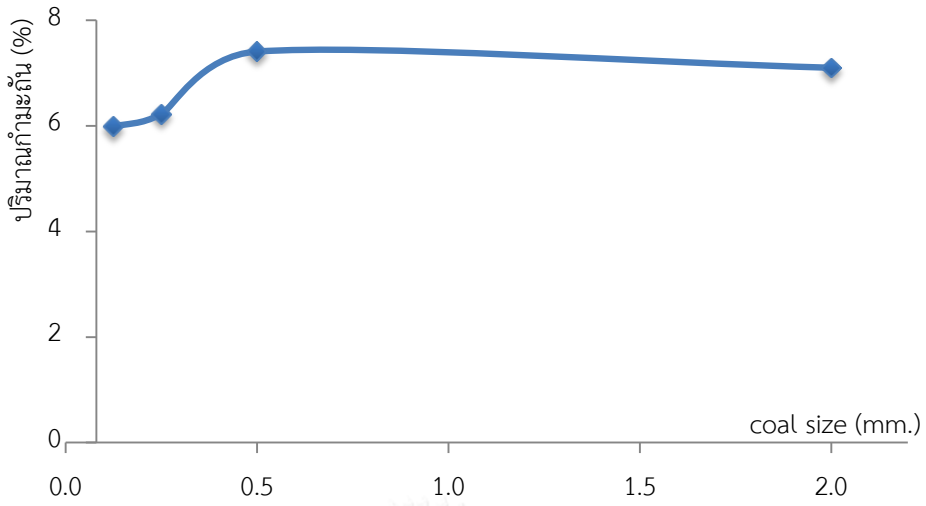
[1] ถ่านหินและหินปูนในอัตราส่วน 1.93 : 1

ตารางที่ 4.11 ผลของขนาดของถ่านหินต่อร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันจากการเผาไหม้ที่อัตราส่วนโดยของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1

ขนาดถ่านหิน (mm)	ปริมาณกำมะถัน[1]			ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหิน	ประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชัน (%)
	ถ่านหิน	เถ้าหลังเผาไหม้			
		ไม่ผสมหินปูน	ผสมหินปูน		
0.125	7.74	4.77	5.99	77.4	25.6
0.250	7.30	4.50	6.22	85.3	38.2
0.500	8.78	4.84	7.41	84.4	53.1
2.000	8.21	4.72	7.10	86.5	50.4

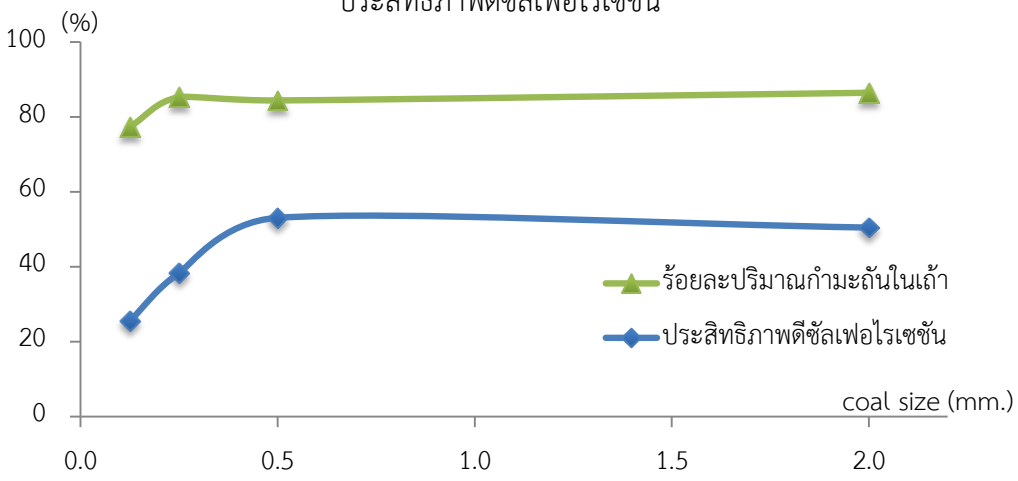
[1] % by X-Ray fluorescence

ถ่านหินขนาดเล็กให้ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันที่น้อยกว่าเกิดจากลักษณะของถ่านหินที่สามารถถูกเผาได้ง่าย จึงเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มากแล้วทำปฏิกิริยากับ CaO เกิดเป็นแคลเซียมซัลเฟตจนเกิดความต้านทานการแพร่ของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระหว่าง CaO และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จึงทำให้ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันลดลง ตามการศึกษาของ Fabrizio [15] และ Osuwan [16] ในทำนองเดียวกัน ถ่านหินขนาดเล็กสามารถเกิดการเผาไหม้ได้ดีและเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ขึ้นมามาก เมื่อทำปฏิกิริยากับ CaO แล้วจึงเกิดความต้านทานการแพร่ของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เช่นกัน จึงทำให้ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันลดลง



(ก)

ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชัน



(ข)

ภาพที่ 4.7 ผลของขนาดของถ่านหินในการเผาไหม้ต่อ (ก) ปริมาณกำมะถันในเถ้า และ (ข) ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันที่อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1

4.7 ผลของปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวลและหินปูนผสมกับถ่านหิน

การศึกษาการเผาไหม้ถ่านหิน, หินปูนที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมและกำมะถัน อัตราส่วน 1.93 : 1 และชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อศึกษาผลของปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวลผสมกับถ่านหินและหินปูนต่อปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันของถ่านหินและหินปูน ตารางที่ 4.12 (ก) และ (ข) แสดงองค์ประกอบในเถ้าหลังจากเผาถ่านหิน หินปูนและเชื้อเพลิงชีวะมวลเปรียบเทียบกับองค์ประกอบของถ่านหินเริ่มต้นก่อนการผสมหินปูนและเชื้อเพลิงชีวมวล

ตารางที่ 4.12 (ก) แสดงปริมาณกำมะถันและแคลเซียมในถ่านหินก่อนการเผาไหม้และปริมาณกำมะถันในเถ้าหลังจากผสมถ่านหินและชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส พบว่า การใช้ชีวมวลผสมกับถ่านหินเพื่อช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไม่เกิดผลดีมากนัก มีปริมาณกำมะถันในเถ้าระหว่าง 4.85 % ถึง 6.02 % ตามลำดับของปริมาณชีวมวลที่เพิ่มขึ้นในการเผาไหม้ (5 % ถึง 15 %) และปริมาณของแคลเซียมในเถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลง (7.27 % ถึง 8.98 %) ตามปริมาณของชีวมวลที่เพิ่มขึ้น ภาพที่ 4.8 (ก) แสดงปริมาณกำมะถันในเถ้าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณของชีวมวลในการเผาไหม้ผสมกับถ่านหิน และน้อยกว่าการใช้หินปูนผสมกับถ่านหินในการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามการใช้ชีวมวลในการเผาไหม้ผสมกับถ่านหินยังช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้บ้างเล็กน้อย จากตารางที่ 4.13 ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันของการเผาไหม้ถ่านหินที่ผสมชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ พบว่า เมื่อใช้ชีวมวลผสมกับถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 10 เผาไหม้ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินเพียงร้อยละ 67.7 และประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันร้อยละ 20.1 เท่านั้น ซึ่งน้อยกว่าการใช้หินปูนผสมถ่านหินในอัตราส่วน 0.64 : 1 ที่ให้ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินเท่ากับร้อยละ 68.2 และประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันร้อยละ 21.1 และภาพที่ 4.8 (ข) แสดงการเปรียบเทียบร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันของอัตราส่วนผสมของชีวมวล อัตราส่วนของชีวมวลร้อยละ 10 ถึง ร้อยละ 15 ในการเผาไหม้ถ่านหินที่ให้ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับ

ปริมาณกำมะถันในถ่านหินได้ดีที่สุด (ร้อยละ 67.7 ถึง ร้อยละ 69.5 ตามลำดับ) และให้ประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันดีที่สุดเช่นกันที่ร้อยละ 20.1 ถึง 23.4

จากตารางที่ 4.12 (ข) พบว่า การใช้ชีวมวลผสมกับถ่านหินและหินปูนสามารถช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ดีกว่าการเผาไหม้ที่ใช้เฉพาะถ่านหินและชีวมวล มีปริมาณกำมะถันในเถ้า 7.11 % ถึง 8.36 % ตามอัตราส่วนของชีวมวลที่เพิ่มขึ้น และปริมาณของแคลเซียมในเถ้ามีปริมาณเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงระหว่าง 18.99 % และ 26.15 % เกิดจากการผสมหินปูนในการเผาไหม้ ภาพที่ 4.8 (ก) แสดงปริมาณกำมะถันในเถ้าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการผสมหินปูนในถ่านหินและชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบปริมาณกำมะถันในเถ้าระหว่างเถ้าที่ผสมชีวมวลที่มีหินปูนและไม่มีหินปูน จากตารางที่ 4.13 และภาพที่ 4.8 (ข) ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันของการเผาไหม้ถ่านหินที่ผสมหินปูนและชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ พบว่า ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างชีวมวลและถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15 ให้ผลร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันมากที่สุด อย่างไรก็ตามการใช้ชีวมวลและหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันที่อัตราส่วน 1.93 : 1 ในการเผาไหม้ผสมกับถ่านหินยังมีประสิทธิภาพน้อยกว่าการผสมถ่านหินและหินปูนในอัตราส่วนเดียวกัน อีกทั้งในการเผาไหม้อาจไม่สามารถใช้อัตราส่วนของชีวมวลได้เกินร้อยละ 10 เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ชีวมวลมีปริมาณน้อยกว่าถ่านหินมากส่งผลกระทบต่อกำลังการผลิต ทั้งนี้การทดลองนี้สามารถแสดงให้เห็นว่าการใช้ชีวมวลในการเผาไหม้ผสมกับถ่านหินเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหาการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้บ้างเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้หินปูนเพียงอย่างเดียว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.12 ผลของปริมาณชีวมวลต่อปริมาณธาตุของเถ้าถ่านหินหลังการเผาไหม้ (ก) ถ่านหินและชีวมวล และ (ข) ถ่านหิน, หินปูนและชีวมวล ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส

(ก)

Element	ถ่านหิน	เถ้าหลังจากเผาถ่านหินและชีวมวล			
		5%	8%	10%	15%
	% by X-Ray fluorescence				
Na_2O	0.00	0.00	0.82	0.07	0.13
MgO	0.16	0.60	0.64	0.34	0.72
Al_2O_3	5.30	9.56	8.92	9.42	9.16
SiO_2	41.92	29.31	26.27	29.02	28.71
S	8.66	4.85	5.31	5.86	6.02
K_2O	0.75	0.91	0.90	1.06	1.19
CaO	4.52	7.27	7.74	8.43	8.98
TiO_2	1.34	1.68	1.46	1.77	1.67
Fe_2O_3	37.02	44.62	46.43	42.78	42.21

(ข)

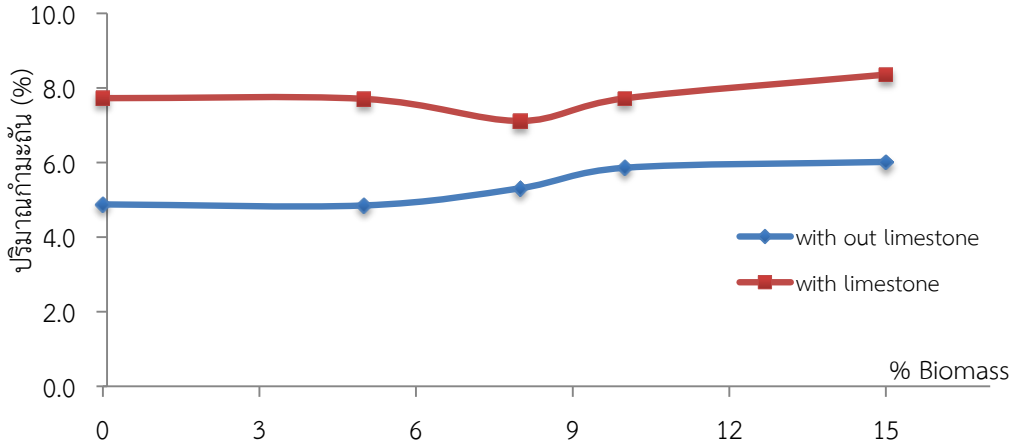
Element	ถ่านหิน	เถ้าหลังจากเผาถ่านหินและหินปูนในอัตราส่วน 1.93 : 1 ที่เชื้อเพลิงชีวะมวลในอัตราส่วนต่าง ๆ			
		5%	8%	10%	15%
	% by X-Ray fluorescence				
Na_2O	0.00	1.10	1.51	0.85	0.00
MgO	0.16	1.30	0.56	0.97	0.57
Al_2O_3	5.30	7.23	6.56	7.86	7.33
SiO_2	41.92	24.08	23.57	23.74	24.55
S	8.66	7.71	7.11	7.72	8.36
K_2O	0.75	0.68	0.71	0.70	0.95
CaO	4.52	18.99	26.15	24.46	21.44
TiO_2	1.34	1.55	1.46	1.60	1.67
Fe_2O_3	37.02	36.62	31.58	31.28	34.28

ตารางที่ 4.13 ผลของปริมาณชีวมวลต่อร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชัน

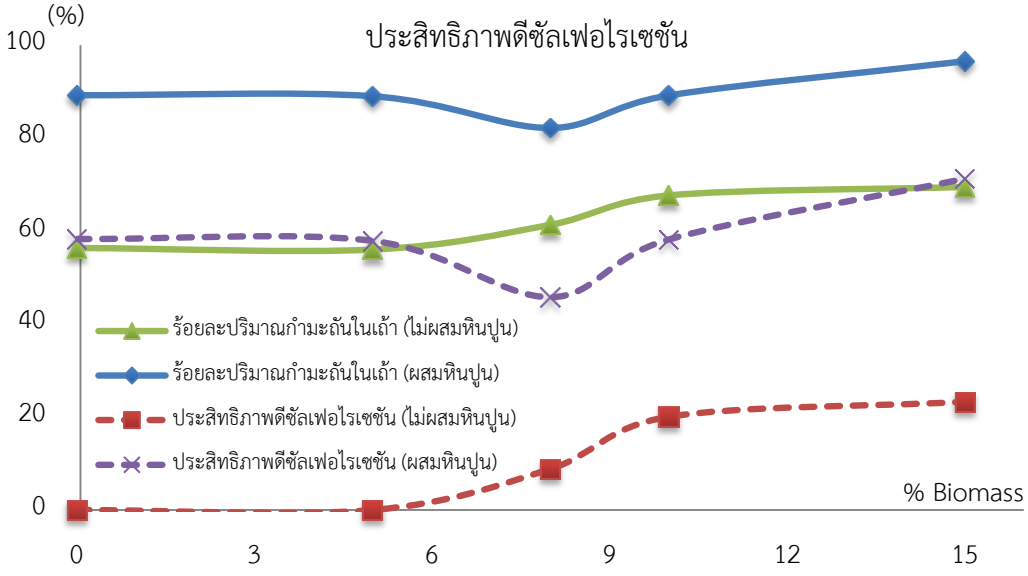
อัตราส่วนของชีวมวล (%)	ปริมาณกำมะถัน[1]				ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้า[2]		ประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชัน (%)	
	ถ่านหิน	เถ้าที่ไม่ผสมชีวมวล	เถ้าที่ผสมชีวมวล		ไม่ผสมหินปูน	ผสมหินปูน	ไม่ผสมหินปูน	ผสมหินปูน
			ไม่ผสมหินปูน	ผสมหินปูน				
0	8.66	4.88	4.88	7.73	56.3	89.2	0.0	58.4
5	8.66	4.88	4.85	7.71	56.0	89.0	-	58.0
8	8.66	4.88	5.31	7.11	61.3	82.2	8.8	45.7
10	8.66	4.88	5.86	7.72	67.7	89.2	20.1	58.2
15	8.66	4.88	6.02	8.36	69.5	96.5	23.4	71.3

[1] % by X-Ray fluorescence, [2] เทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.8 ผลของปริมาณชีวมวลต่อ (ก) ปริมาณกำมะถัน และ (ข) ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันหลังการเผาไหม้ถ่านหินและชีวมวล และถ่านหิน, ชีวมวลและหินปูนที่อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1

บทที่ 5
สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาเกี่ยวกับข้อมูลการใช้หินปูนของเตาเผา, สมบัติถ่านหินและหินปูนที่ใช้ในเตาเผาการศึกษาหาอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถัน, อุณหภูมิการเผาไหม้, ปริมาณกำมะถันในถ่านหินก่อนการเผาไหม้, ขนาดของถ่านหินที่ใช้ในการเผาไหม้และปริมาณชีวมวลที่ใช้เผาไหม้ผสมกับถ่านหินแล้วเปรียบเทียบปริมาณกำมะถันในเถ้าด้วยวิธี X-Ray fluorescence และการเปรียบเทียบกับการใช้งานจริงในเตาเผาชนิด circulation fluidize bed

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ผลของสมบัติและสถานะของถ่านหินและหินปูนที่ใช้ในการเผาไหม้

การกระจายตัวของขนาดของถ่านหินยังมีถ่านหินที่มีขนาดใหญ่ในการเผาไหม้จึงอาจจะส่งผลกระทบต่อการเผาไหม้ของเตาเผา แต่การกระจายตัวของหินปูนมีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในเตาเผาชนิด circulation fluidize bed และอัตราการใช้หินปูนในการช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เฉลี่ยของเตาเผาถือว่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง เมื่อสังเกตการณ์ใช้งานที่ส่วนมากมีการใช้หินปูนที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมและกำมะถันสูงกว่าการทดลองค่อนข้างมาก ซึ่งจะส่งผลกระทบในการเผาไหม้ ได้แก่ การเพิ่มขึ้นของแคลเซียมออกไซด์ในเถ้าทำให้เกิดความร้อนและการจับตัวกันเป็นก้อนของเถ้าเมื่อสัมผัสความชื้นเนื่องจากการขนส่งและการลดลงของค่าพลังงานจากการเผาไหม้ถ่านหิน เนื่องจากต้องเสียพลังงานในการเผาหินปูนเพื่อให้ทำปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันที่เกินความจำเป็น

2. ผลของอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถัน

อัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมระหว่างแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 หรืออยู่ในช่วง 1.60 : 1 ถึง 1.93 :1 จากการศึกษาปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันในถ่านหินโดยการผสมถ่านหินและหินปูนในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาและใช้เทคนิค X-Ray fluorescence มาใช้ในการติดตามปริมาณกำมะถันในถ่านหินและเถ้าหลังจากการทำปฏิกิริยาโดย

การเผาไหม้ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม อัตราส่วนนี้คำนวณจากปริมาณกำมะถันในถ่านหินและปริมาณแคลเซียมในหินปูนที่ผสมในถ่านหินก่อนการเผาไหม้โดยประสิทธิภาพของปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันเท่ากับร้อยละ 89.3

3. ผลของอุณหภูมิในการเผาไหม้

อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 850 องศาเซลเซียส แต่สามารถเพิ่มหรือลดอุณหภูมิในการเผาไหม้ให้เหมาะสมได้ตามการออกแบบของเตาเผาที่ใช้จริงในอุตสาหกรรมในช่วงอุณหภูมิ 800 – 900 องศาเซลเซียส เพราะประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันไม่ได้ลดลงจนแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส

4. ผลของปริมาณกำมะถันในถ่านหินเริ่มต้น

เมื่อปริมาณกำมะถันในถ่านหินมีน้อยการใช้หินปูนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีและประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อปริมาณกำมะถันในถ่านหินเพิ่มขึ้น แต่ยังคงมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 90 ในการเกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชัน

5. ผลของขนาดของถ่านหินที่ใช้ในการเผาไหม้

ขนาดที่เหมาะสมของถ่านหินในการเผาไหม้และเกิดดีซัลเฟอไรเซชันได้ดีเท่ากับขนาด 0.50 – 2.00 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่มีสัดส่วนมากที่สุดของขนาดต่าง ๆ ในถ่านหินที่ใช้ในการเผาไหม้โดยให้ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินสูงกว่าร้อยละ 80

6. ผลของปริมาณชีวมวลที่ใช้ในการเผาไหม้ผสมกับถ่านหิน

ชีวมวลที่เผาไหม้ผสมกับถ่านหินในอัตราส่วนโดยน้ำหนักน้อยกว่าร้อยละ 10 สามารถช่วยให้เกิดดีซัลเฟอไรเซชันได้เพียงเล็กน้อย แต่ถ้าใช้ร่วมกับหินปูนทำให้ประสิทธิภาพของดีซัลเฟอรไรเซชันดีขึ้น ทั้งนี้การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลผสมกับถ่านหินในการเผาไหม้ให้ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินและประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชันน้อยกว่าการผสมหินปูนเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมและกำมะถันเดียวกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ขนาดของอนุภาคของถ่านหินและหินปูนในการเผาไหม้มีส่วนสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชัน โดยขนาดของถ่านหินและหินปูนจะต้องมีความเหมาะสมกับการออกแบบเชิงวิศวกรรมของเตาเผา อีกทั้งตำแหน่งในการเผาไหม้และเกิดปฏิกิริยาในเตาเผาก็มีความสำคัญเช่นกัน
2. หากใช้สารประกอบของแคลเซียมชนิดอื่น ๆ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์ในการเกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันโดยไม่มีการผสมตัวประสานและการอัดเป็นก้อนของถ่านหิน สามารถนำเอาแนวทางที่ได้ศึกษานี้ไปคำนวณปริมาณการเติมสารประกอบแคลเซียมเพื่อช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่องระบายของกระบวนการเผาไหม้ได้
3. ผลการทดลองในการใช้สารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตในการเกิดปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันจะใกล้เคียงกับการใช้สารประกอบแคลเซียมออกไซด์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง CaO : S เท่ากับ 2.0 – 2.5 และใช้ดินเป็นตัวประสานร้อยละ 20 ให้ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหินร้อยละ 90 – 95

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

1. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงานผลิต ส่งหรือจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า พ.ศ. 2547 : กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547
2. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. บัญชีประเภทโรงงานอุตสาหกรรม จำแนกตามกฎกระทรวง (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 : กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535
3. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. ความรู้ทั่วไปของถ่านหิน. [ออนไลน์]. 2558. สืบค้นจาก : http://projects-pdp2010.egat.co.th/projects1/index.php?option=com_content&view=article&id=1&Itemid=8 [13 พฤษจิกายน 2558]
4. Eliot, R, C., Coal Desulfurization Prior to Combustion. 1st ed. New Jersy : Noyes Data Corporation, 1978
5. แคลเซียมคาร์บอเนต/หินปูน. [ออนไลน์]. 2558. สืบค้นจาก : http://www.siamchemi.com [13 พฤษจิกายน 2558]
6. Speight, J, G. The chemistry and technology of coal. 2nd ed. New York : Marcel Dekker Inc, 1994
7. กระทรวงพลังงาน. เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด. [ออนไลน์]. 2558. สืบค้นจาก : http://www.eppo.go.th/coal/tech.html [25 มกราคม 2558]
8. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. เทคโนโลยีถ่านหิน. [ออนไลน์]. 2558. สืบค้นจาก : http://projects-pdp2010.egat.co.th/projects1/index.php?option=com_content&view=article&id=3%3Acoal-technology&catid=1%3Aintroduction-of-coal&Itemid=8 [13 พฤศจิกายน 2558]
9. Chen, Z., Grace, J.R., Lim, C.J. Limestone particle attrition and size distribution in a small circulating fluidized bed. Fuel 87 (2008) : 1360 - 1371
10. Montagnaro, F., Salatino, P., Scala, F. The influence of temperature on limestone sulfation and attrition under fluidized bed combustion condition. Experimental Thermal and Fluid Science 34 (2010) : 352 - 358

11. Valle-Zermeno, R.D., Niubo, M., Formosa, J., Guembe, M., Aparicio, J.A., Chimenos, J.M. Synergistic effect of the parameters affecting wet flue gas desulfurization using magnesium oxides by-products. Chemical Engineering Journal 262 (2015) : 268 - 277
12. Valle-Zermeno, R.D., Formosa, J., Aparicio, J.A., Chimenos, J.M. Reutilization of low-grade magnesium oxide for flue gas desulfurization during calcination of natural magnesite: A closed-loop process. Chemical Engineering Journal 254 (2014) : 63 - 72
13. Ye, W., Li, Y., Ren, M., Han, Q. Feasibility of flue-gas desulfurization by manganese oxides. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 23 (2013) : 3089 - 3094
14. กรมควบคุมมลพิษ. ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์. [ออนไลน์]. 2558. สืบค้นจาก : http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=208 [13 พฤศจิกายน 2558]
15. กรมควบคุมมลพิษ. สารกรดในบรรยากาศ. [ออนไลน์]. 2558. สืบค้นจาก : http://www.pcd.go.th/info_serv/air_aciddeposition.html [13 พฤศจิกายน 2558]
16. Córdoba, P. Status of flue gas desulphurisation (FGD) system from coal-fire power plant : overview of the physic-chemical control process of wet limestone FGDs. Fuel 144 (2015) : 274 - 286
17. Cheng, J., Zhou, J., Liu, J., Zhou, Z., Huang, Z., Cao, X., Zhao, X., Cen, K. Sulfur removal at high temperature during coal combustion in furnace: a review. Progress in energy and combustion science 29 (2003) : 381 - 405
18. Ogenga, D.O., Mbarawa, M.M., Lee, K.T., Mohamed, A.R., Dahlan, I. Sulphur dioxide removal using South African limestone/siliceous materials. Fuel 89 (2010) : 2549 - 2555
19. Hlincik, T., Buryan, P. Evaluation of limestones for the purposes of desulphurization during the fluid combustion of brown coal. Fuel 104 (2013) : 208 - 215
20. Scala, F., Chirone, R., Meloni, P., Carcangiu, G., Manca, M., Mulas, G., Mulas, A. Fluidized bed desulfurization using lime obtained after slow calcination of limestone particles. Fuel 114 (2013) : 99 - 105

21. Osuwan, S., Bunyakiat K., Theerapabpisit, D. In-situ desulfurization of coal briquettes by lime. Journal of Science Society 15 (1989) : 17 - 37

22. ASTM Standard, D 3173. Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. U.S.A., 2013

23. ASTM Standard, D 3175. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. U.S.A., 2007

24. ASTM Standard, D 3172. Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. U.S.A., 2007

25. ASTM Standard, D 3174. Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke. U.S.A., 2014

26. ASTM Standard, D 3177. Standard Test Method for Total Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke. U.S.A., 2002

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก
การคำนวณที่เกี่ยวข้องในการทดลอง

1. การคำนวณค่าความชื้น [22]

ความชื้นในตัวอย่าง (%) = [(A – B) / A] x 100

เมื่อ A = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

B = น้ำหนักตัวอย่างหลังให้ความร้อน (กรัม)

2. การคำนวณค่า volatile matter [23]

Weight Loss (%) = [(A – B) / A] x 100

เมื่อ A = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

B = น้ำหนักตัวอย่างหลังให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส (กรัม)

Volatile matter in analysis sample (%) = C - D

เมื่อ C = Weight Loss (%)

D = ค่าความชื้น (%)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3. การคำนวณค่า fixed carbon [24]

Fixed carbon (%) = 100 – [ค่าความชื้น (%) + ปริมาณเถ้า (%) + Volatile matter (%)]

4. การคำนวณปริมาณเถ้า (ash) [25]

ปริมาณเถ้าในตัวอย่าง (%) = [(A – B) / C] x 100

เมื่อ A = น้ำหนักภาชนะและตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

B = น้ำหนักภาชนะ (กรัม)

C = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

5. การคำนวณปริมาณกำมะถันในถ่านหิน [26]

$$\text{ปริมาณกำมะถันในตัวอย่าง (\%)} = \frac{(A - B) \times 13.738}{C}$$

เมื่อ A = น้ำหนักของ $BaSO_4$ ที่ตกตะกอนก่อนเผา

B = น้ำหนักของ $BaSO_4$ ที่เหลือหลังเผา

C = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

6. การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมและกำมะถัน

$$\text{อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมและกำมะถัน} = \frac{\text{น้ำหนักหินปูนที่ใช้ (กรัม)} \times 95 \times 100 \times 32 \times 40}{\text{ปริมาณถ่านหินที่ใช้ (กรัม)} \times \text{ความเข้มข้นของกำมะถัน(\%)} \times 10000 \times 40}$$

7. การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและกำมะถัน

$$\text{อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและกำมะถัน} = \frac{\text{น้ำหนักหินปูนที่ใช้ (กรัม)} \times 95 \times 100 \times 32}{\text{ปริมาณถ่านหินที่ใช้ (กรัม)} \times \text{ความเข้มข้นของกำมะถัน (\%)} \times 10000}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

8. การคำนวณร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหิน

$$\text{ร้อยละปริมาณกำมะถันในเถ้าเทียบกับปริมาณกำมะถันในถ่านหิน} = \frac{\text{ปริมาณกำมะถันในเถ้า}}{\text{ปริมาณกำมะถันในถ่านหินเริ่มต้น}} \times 100$$

9. การคำนวณประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชัน

$$\text{ประสิทธิภาพดีซัลเฟอไรเซชัน (\%)} = \frac{(\text{ปริมาณกำมะถันในเถ้าที่ผสมหินปูน} - \text{ปริมาณกำมะถันในเถ้าที่ไม่ผสมหินปูน}) \times 100}{\text{ปริมาณกำมะถันในเถ้าที่ไม่ผสมหินปูน}}$$

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการใช้หินปูนในเตาเผาแบบ Circulation fluidize bed

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลการใช้ถ่านหิน ปริมาณกำมะถันและการใช้หินปูนในหน่วยเตาเผาที่ 1

ครั้งที่	การใช้ถ่านหิน		ปริมาณหินปูน (95 % as $CaCO_3$) (ตัน)	อัตราส่วนโดยโมล ของ $CaCO_3$: S และ Ca : S
	ปริมาณถ่านหิน (ตัน)	ปริมาณกำมะถันในถ่านหิน (%)		
1	1,601	0.72	72	1.90
2	1,559	0.73	75	2.01
3	1,467	0.74	90	2.54
4	1,536	0.74	99	2.67
5	1,643	0.76	51	1.24
6	1,633	0.75	96	2.39
7	1,661	0.75	88	2.16
8	1,733	0.75	35	0.82
9	1,588	0.81	29	0.69
10	1,672	0.84	30	0.65
11	1,852	0.81	11	0.22
12	1,931	0.81	51	1.00
13	1,959	0.81	71	1.37
14	1,964	0.81	83	1.60
15	1,927	0.81	91	1.78
16	2,118	0.76	94	1.77
17	1,663	0.76	52	1.25
18	1,698	0.77	70	1.63
19	1,698	0.78	95	2.19
20	1,677	0.75	92	2.22
21	1,602	0.70	103	2.78
22	1,530	0.70	73	2.06
23	2,128	0.80	59	1.05
24	1,525	0.81	89	2.19
25	1,484	0.81	86	2.18
26	1,595	0.64	57	1.70
27	1,510	0.71	69	1.96
28	1,493	0.72	83	2.34
29	1,628	0.80	89	2.08
30	1,639	0.70	57	1.51
			เฉลี่ย	1.73

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลการใช้ถ่านหิน ปริมาณกำมะถันและการใช้หินปูนในหน่วยเตาเผาที่ 2

ครั้งที่	การใช้ถ่านหิน		ปริมาณหินปูน (95 % as $CaCO_3$) (ตัน)	อัตราส่วนโดยโมลของ $CaCO_3$: S และ Ca : S
	ปริมาณถ่านหิน (ตัน)	ปริมาณกำมะถันในถ่านหิน (%)		
1	1,750	0.73	100	2.39
2	1,770	0.73	110	2.60
3	1,752	0.73	82	1.96
4	1,835	0.73	88	2.01
5	1,693	0.69	72	1.87
6	1,731	0.69	89	2.26
7	1,684	0.69	70	1.83
8	1,690	0.78	41	0.95
9	1,700	0.79	58	1.31
10	1,717	0.74	58	1.38
11	1,849	0.74	66	1.46
12	1,753	0.75	65	1.50
13	1,758	0.75	65	1.50
14	1,766	0.78	50	1.11
15	1,696	0.83	60	1.31
16	2,117	0.81	50	0.88
17	2,139	0.81	54	0.95
			เฉลี่ย	1.57

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดสอบถ่านหินและหินปูน

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบหินปูนที่ใช้สำหรับการทดลอง

Sample	limestone				
Element	1	2	3	Avg.	SD
Na	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000
$MgCO_3$	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000
Al_2O_3	0.352	0.000	0.455	0.269	0.239
SiO_2	3.315	4.170	3.404	3.630	0.470
S	0.019	0.006	0.020	0.015	0.008
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$CaCO_3$	95.925	95.459	95.92	95.768	0.268
Ti	0.046	0.009	0.000	0.018	0.024
Fe_2O_3	0.277	0.283	0.139	0.233	0.081
Cu	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001
Sr	0.046	0.051	0.048	0.048	0.003

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบถ่านหินที่ใช้สำหรับการทดลอง

Sample	Mixed coal # 1				
Element	1	2	3	Avg.	SD
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$MgCO_3$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al_2O_3	7.195	7.248	7.534	7.326	0.182
SiO_2	36.428	37.754	38.962	37.715	1.267
S	7.682	6.705	7.756	7.381	0.587
K	0.871	0.768	0.931	0.857	0.082
$CaCO_3$	9.757	8.448	8.693	8.966	0.696
Ti	0.980	1.203	1.122	1.102	0.113
Fe_2O_3	37.069	37.366	34.571	36.335	1.535
Cu	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sr	0.000	0.444	0.384	0.276	0.241
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Rb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการทดสอบเถ้าและเถ้าของถ่านหินที่ผสมหินปูนในอัตราส่วนต่าง ๆ

ตารางที่ ง.1 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 1

Sample	Coal # 1_1									
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na_2O	8.420	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	0.534	0.000	1.174	1.270	0.000	1.352	1.257	1.340	0.000	1.283
Al_2O_3	8.737	9.134	9.415	9.214	8.079	8.369	10.322	9.780	9.357	9.377
SiO_2	28.773	31.937	34.919	34.190	32.930	31.893	32.669	31.541	35.663	32.320
S	5.160	5.497	4.929	5.263	5.562	5.524	5.093	5.658	5.165	5.180
K_2O	0.601	0.689	0.690	0.724	0.604	0.662	0.757	0.698	0.703	0.673
CaO	7.505	7.943	7.109	7.663	8.021	7.945	7.523	8.070	7.326	7.514
TiO_2	1.536	1.876	1.551	1.834	1.634	1.637	1.896	1.780	1.686	1.631
Fe_2O_3	37.537	41.570	39.185	38.635	41.684	41.423	39.396	39.877	38.832	40.826
CuO	0.071	0.000	0.000	0.000	0.078	0.000	0.000	0.000	0.081	0.000
SrO	0.501	0.644	0.471	0.546	0.710	0.623	0.590	0.634	0.505	0.604
NiO	0.076	0.000	0.025	0.000	0.000	0.046	0.000	0.000	0.073	0.000
RbO	0.029	0.000	0.000	0.052	0.000	0.000	0.045	0.000	0.000	0.037

ตารางที่ ง.2 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 2

Sample	Mixed coal # 1_2										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	6.858	0.000	0.000	0.000	2.340	0.000	3.098	0.000	0.000	1.036	2.423
MgO	1.066	0.000	0.000	1.158	1.146	1.137	1.057	1.206	1.108	1.063	0.858	0.535
Al_2O_3	9.056	9.252	9.982	10.504	10.287	10.627	9.515	9.359	9.349	9.917	9.482	0.669
SiO_2	33.759	31.295	35.424	32.476	31.764	32.265	29.366	30.025	31.571	34.067	32.442	1.861
S	4.437	4.295	4.164	4.477	4.405	4.721	4.393	4.871	4.246	4.476	4.876	0.491
K_2O	0.813	0.757	0.935	0.901	0.877	0.761	0.725	0.718	0.730	0.766	0.739	0.088
CaO	6.221	6.033	5.804	6.709	6.626	6.668	5.777	6.830	6.126	6.605	7.001	0.763
TiO_2	1.689	1.633	1.683	1.923	1.745	1.630	1.488	1.593	1.515	2.112	1.704	0.159
Fe_2O_3	42.022	38.698	40.997	40.802	42.034	38.926	46.496	41.159	44.552	40.071	40.736	2.109
CuO	0.000	0.084	0.013	0.000	0.000	0.000	0.088	0.072	0.000	0.063	0.028	0.037
SrO	0.451	0.466	0.479	0.508	0.550	0.409	0.496	0.524	0.389	0.333	0.522	0.093
NiO	0.000	0.051	0.000	0.060	0.070	0.039	0.071	0.000	0.000	0.035	0.027	0.031
RbO	0.043	0.032	0.000	0.042	0.049	0.037	0.046	0.036	0.027	0.000	0.024	0.021

ตารางที่ ง.3 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.64 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 1

Sample	Mixed coal 0.64:1 # 1_1									
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	0.000	0.000	1.789	1.973	1.945	2.127	0.000	1.883	1.772	1.966
Al_2O_3	9.900	8.737	9.329	9.048	8.583	9.587	9.656	9.954	9.501	8.843
SiO_2	28.785	28.741	26.935	27.320	30.185	25.946	27.411	27.963	30.063	28.556
S	6.805	6.792	6.120	6.243	6.461	6.128	6.694	6.079	6.156	6.200
K_2O	0.066	0.699	0.621	0.710	0.673	0.558	0.559	0.576	0.697	0.636
CaO	12.985	12.327	10.420	11.726	11.999	12.555	13.237	11.273	10.856	12.076
TiO_2	2.101	1.703	1.647	1.625	1.609	1.527	1.581	1.527	1.795	1.602
Fe_2O_3	37.757	40.091	41.088	40.396	37.600	40.486	39.754	39.678	38.096	39.189
CuO	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.073	0.000	0.000	0.000	0.000
SrO	0.474	0.470	0.537	0.429	0.479	0.442	0.528	0.462	0.516	0.436
NiO	0.000	0.000	0.000	0.030	0.000	0.056	0.025	0.039	0.000	0.000
RbO	0.036	0.000	0.033	0.033	0.000	0.017	0.033	0.041	0.000	0.000

ตารางที่ ง.4 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.64 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 2

Sample	Mixed coal 0.64:1 # 1_2									
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na_2O	0.000	0.005	0.000	0.000	0.132	0.000	0.000	0.000	0.329	0.000
MgO	0.000	0.026	1.855	0.000	0.000	1.562	0.000	0.000	0.000	0.000
Al_2O_3	9.846	9.055	7.623	9.320	9.330	9.291	10.568	9.617	9.973	10.223
SiO_2	31.978	32.690	36.829	32.686	33.516	34.114	34.523	33.317	37.773	31.924
S	6.656	6.235	6.322	7.722	6.055	6.191	6.156	5.955	6.012	6.341
K_2O	1.234	1.207	1.308	1.233	1.350	1.339	1.226	1.232	1.484	1.480
CaO	12.317	10.753	10.989	16.503	10.102	9.892	12.030	10.578	10.026	11.928
TiO_2	1.500	1.369	1.371	1.421	1.537	1.492	1.498	1.318	1.551	1.609
Fe_2O_3	35.687	37.733	33.037	30.408	37.052	35.313	33.220	37.169	32.019	35.522
CuO	0.000	0.044	0.000	0.000	0.061	0.000	0.000	0.050	0.059	0.058
SrO	0.304	0.360	0.297	0.284	0.331	0.313	0.324	0.284	0.253	0.368
NiO	0.084	0.040	0.000	0.026	0.000	0.022	0.000	0.000	0.022	0.000
RbO	0.026	0.031	0.028	0.000	0.032	0.031	0.021	0.022	0.019	0.031

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ง.5 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.64 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 3

Sample	Mixed coal 0.64:1 # 1_3									
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	0.000	0.000	0.000	1.667	1.645	0.000	1.466	0.000	0.000	1.669
Al_2O_3	9.887	9.000	9.515	10.205	9.825	9.511	8.808	9.906	8.933	9.936
SiO_2	31.417	32.926	32.347	30.088	29.393	30.640	32.122	32.941	33.215	31.000
S	6.428	6.154	6.191	5.851	5.957	6.419	5.775	5.508	5.461	6.412
K_2O	0.774	0.800	0.726	0.758	0.719	0.747	0.661	0.788	0.824	0.779
CaO	10.524	10.832	10.076	10.126	10.251	10.854	8.828	9.483	8.953	10.371
TiO_2	1.686	1.610	1.687	1.636	1.553	1.662	1.356	0.788	1.593	1.657
Fe_2O_3	38.244	37.720	38.431	38.527	39.528	39.045	40.053	38.822	39.917	37.057
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.048	0.000	0.000	0.000	0.000	0.023
SrO	0.508	0.493	0.547	0.573	0.547	0.607	0.499	0.465	0.512	0.489
NiO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.080
RbO	0.027	0.000	0.000	0.037	0.047	0.035	0.000	0.000	0.000	0.036

ตารางที่ ง.6 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.64 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลอง ตัวอย่างที่ 4

Sample	Mixed coal 0.64:1 # 1_4									
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	0.000	2.162	0.000	1.675	1.760	1.743	0.000	1.835	1.908	1.639
Al_2O_3	9.876	10.428	9.091	10.744	10.424	10.062	9.942	9.979	8.757	10.239
SiO_2	31.948	30.196	30.900	28.546	31.212	28.785	32.111	29.344	30.547	31.224
S	5.376	7.080	5.552	5.686	5.971	5.883	5.679	5.806	6.482	5.748
K_2O	0.732	0.720	0.717	0.686	0.729	0.637	0.689	0.577	0.700	0.815
CaO	9.428	15.524	10.459	10.481	11.715	10.915	11.237	11.871	12.068	10.151
TiO_2	1.921	2.236	1.800	1.786	1.814	1.806	2.114	1.650	1.650	1.831
Fe_2O_3	39.195	30.320	39.991	38.388	34.847	38.614	36.678	37.475	36.357	37.002
CuO	0.000	0.000	0.037	0.062	0.000	0.038	0.000	0.000	0.000	0.000
SrO	1.019	0.771	0.903	1.147	0.951	0.974	0.953	1.061	1.014	0.856
NiO	0.017	0.000	0.058	0.000	0.046	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
RbO	0.000	0.000	0.000	0.038	0.036	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ง.7 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.64 : 1 ที่ใช้สำหรับการ ตัวอย่างที่ 5

Sample	Mixed coal 0.64:1 # 1_5									
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	1.477	1.583	1.570	0.000	0.000	0.000	0.000	1.566	0.000	0.000
Al_2O_3	10.359	9.416	9.752	9.435	9.126	9.228	8.801	10.548	9.599	8.732
SiO_2	34.848	29.285	32.446	31.948	31.795	32.892	31.178	30.231	33.359	29.647
S	5.295	5.900	5.484	5.392	5.661	5.361	5.840	5.315	5.438	6.382
K_2O	0.764	0.829	0.722	0.796	0.812	0.848	0.725	0.812	0.763	0.738
CaO	9.287	9.415	9.562	9.421	9.599	9.921	11.049	9.377	8.844	10.149
TiO_2	1.703	1.645	1.664	2.148	1.759	1.762	1.559	1.681	1.820	1.642
Fe_2O_3	35.307	40.795	37.870	39.777	40.120	38.749	39.822	39.279	39.211	41.805
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SrO	0.447	0.533	0.459	0.507	0.523	0.521	0.499	0.575	0.493	0.422
NiO	0.058	0.046	0.000	0.000	0.061	0.077	0.000	0.000	0.000	0.000
RbO	0.000	0.038	0.041	0.041	0.038	0.044	0.000	0.036	0.000	0.029

ตารางที่ ง.8 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.64 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 6

Sample	Mixed coal 0.64:1 # 1_6										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.045
MgO	0.000	1.500	0.000	0.000	0.000	1.570	0.000	1.515	1.584	0.000	0.807	0.879
Al_2O_3	10.008	9.481	9.858	9.902	8.592	8.695	9.014	9.058	9.114	9.220	9.517	0.608
SiO_2	31.262	28.985	31.515	34.061	29.604	32.313	33.553	33.449	32.831	34.073	31.357	2.330
S	5.238	4.979	5.092	4.956	5.442	5.497	4.900	4.913	5.741	4.911	5.908	0.571
K_2O	0.864	0.722	0.730	0.846	0.660	0.743	0.893	0.805	0.740	0.874	0.819	0.251
CaO	9.600	8.513	9.690	9.217	10.483	9.426	8.825	9.093	9.731	8.413	10.639	1.540
TiO_2	1.736	1.583	1.636	1.826	1.423	1.665	1.683	1.618	1.794	1.725	1.655	0.215
Fe_2O_3	40.306	42.987	40.656	38.272	42.928	39.088	40.019	38.568	37.440	39.737	38.171	2.609
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.020
SrO	0.375	0.523	0.391	0.335	0.462	0.511	0.568	0.555	0.450	0.511	0.541	0.212
NiO	0.000	0.000	0.000	0.071	0.000	0.000	0.000	0.000	0.059	0.000	0.015	0.025
RbO	0.035	0.038	0.035	0.029	0.000	0.000	0.000	0.000	0.048	0.000	0.020	0.018

ตารางที่ ง.9 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.28 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลอง ตัวอย่างที่ 1

Sample	Mixed coal 1.28 : 1 # 1_1									
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	0.000	3.311	0.000	0.000	0.000	2.627	1.705	0.000	0.000	1.995
Al_2O_3	8.106	8.701	7.009	8.457	8.183	8.990	9.201	8.992	9.708	8.957
SiO_2	29.847	29.836	29.903	31.113	32.525	30.038	30.985	31.160	29.936	28.855
S	7.854	6.936	7.739	6.509	6.662	6.673	6.314	6.515	6.369	6.491
K_2O	1.115	1.102	1.084	0.657	0.714	0.628	0.689	0.710	0.730	0.776
CaO	22.028	20.243	24.643	17.737	16.956	17.435	16.845	16.598	16.617	16.526
TiO_2	1.429	1.372	1.367	1.650	1.579	1.618	1.623	1.811	1.820	1.672
Fe_2O_3	28.889	27.855	27.425	32.937	32.480	31.030	31.784	33.587	33.869	33.846
CuO	0.000	0.037	0.035	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SrO	0.322	0.284	0.369	0.499	0.421	0.454	0.412	0.477	0.478	0.445
NiO	0.040	0.000	0.035	0.000	0.029	0.056	0.000	0.000	0.000	0.000
RbO	0.021	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.040	0.030

ตารางที่ ง.10 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.28 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 2

Sample	Mixed coal 1.28 : 1 # 1_2									
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	2.845	0.034	1.334	1.516	0.000	0.000	0.000	0.000	3.059	2.887
Al_2O_3	7.368	7.354	8.180	8.345	8.430	7.881	7.480	8.737	8.148	7.907
SiO_2	25.823	26.449	27.605	27.608	25.940	25.386	27.919	27.781	26.356	25.811
S	5.523	5.948	5.791	5.825	5.458	6.855	5.209	5.992	6.109	5.664
K_2O	0.446	0.512	0.582	0.547	0.638	0.567	0.554	0.629	0.481	0.506
CaO	16.858	22.862	18.395	17.192	18.351	20.464	16.635	19.803	19.283	18.548
TiO_2	1.340	1.477	1.489	1.453	1.468	1.295	1.586	1.539	1.363	1.363
Fe_2O_3	38.895	34.501	35.635	36.538	38.809	36.688	39.740	34.692	34.378	36.476
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.047	0.000	0.000	0.000
SrO	0.385	0.419	0.457	0.445	0.443	0.347	0.321	0.369	0.387	0.362
NiO	0.000	0.000	0.000	0.016	0.000	0.000	0.041	0.000	0.000	0.000
RbO	0.000	0.000	0.024	0.040	0.029	0.000	0.024	0.026	0.000	0.000

ตารางที่ ง.11 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.28 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 3

Sample	Mixed coal 1.28 : 1 # 1_3									
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	3.302	0.000	2.904	0.000	0.000	0.693	0.000	0.000	0.000	0.000
Al_2O_3	5.917	7.370	6.949	7.115	6.451	6.369	6.135	6.531	6.794	7.160
SiO_2	26.915	29.393	30.239	28.547	26.585	28.367	27.208	26.696	30.588	28.243
S	7.621	6.515	6.783	6.733	7.810	7.963	8.127	6.660	6.755	7.059
K_2O	0.494	0.680	0.523	0.603	0.541	0.464	0.501	0.530	0.560	0.566
CaO	22.426	18.685	19.344	19.192	21.383	24.075	23.428	19.120	20.925	19.701
TiO_2	1.564	1.514	1.623	1.613	1.559	1.508	1.391	1.381	1.569	1.441
Fe_2O_3	30.901	34.879	30.701	35.593	34.799	29.884	32.404	38.068	31.971	34.856
CuO	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SrO	0.438	0.501	0.477	0.448	0.436	0.271	0.433	0.544	0.411	0.480
NiO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
RbO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ง.12 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.28 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 4

Sample	Mixed coal 1.28 : 1 # 1_4										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.842	0.000	0.776	1.224
Al_2O_3	6.160	6.624	6.656	6.501	5.742	5.913	6.370	5.915	6.825	5.736	7.384	1.105
SiO_2	31.376	32.770	32.743	35.104	32.510	33.311	33.431	32.695	34.878	33.700	29.654	2.733
S	6.098	5.796	5.790	5.979	6.245	6.315	5.884	5.830	5.706	7.030	6.478	0.741
K_2O	0.489	0.501	0.480	0.530	0.481	0.408	0.555	0.470	0.507	0.459	0.600	0.168
CaO	23.337	22.798	22.982	22.372	23.222	23.563	21.707	22.127	20.228	23.175	20.195	2.534
TiO_2	1.963	1.908	1.772	1.837	1.953	1.872	2.005	1.731	1.713	1.880	1.603	0.196
Fe_2O_3	29.804	28.825	28.817	26.955	29.080	27.813	29.183	30.602	26.587	27.209	32.475	3.649
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.003	0.011
SrO	0.339	0.347	0.346	0.300	0.339	0.346	0.347	0.239	0.291	0.328	0.394	0.072
NiO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.053	0.007	0.016
RbO	0.041	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.013

ตารางที่ ง.13 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.60 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 1

Sample	Mixed coal 1.60 : 1 # 1_1									
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	0.000	0.000	0.000	4.790	0.000	0.000	0.000	3.976	0.000	0.000
Al_2O_3	5.387	5.910	4.354	4.673	4.497	6.957	4.590	5.511	5.498	4.404
SiO_2	29.375	31.450	30.119	30.726	29.703	31.132	29.644	30.947	29.465	30.179
S	6.976	6.652	6.970	6.505	6.993	6.927	7.028	6.794	7.297	6.744
K_2O	0.275	0.331	0.307	0.254	0.262	0.237	0.299	0.336	0.342	0.307
CaO	25.944	23.287	25.564	23.154	24.937	23.452	25.296	23.643	25.302	25.300
TiO_2	1.232	1.113	1.188	0.999	1.047	0.924	1.171	1.282	1.066	1.054
Fe_2O_3	29.798	30.218	30.575	28.158	31.677	29.445	31.056	26.637	30.133	31.048
CuO	0.000	0.043	0.000	0.000	0.000	0.000	0.051	0.000	0.000	0.000
SrO	0.400	0.391	0.383	0.319	0.402	0.355	0.329	0.377	0.358	0.390
NiO	0.058	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
RbO	0.000	0.024	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ง.14 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.60 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 2

Sample	Mixed coal 1.60 : 1 # 1_2										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
MgO	0.000	0.000	3.991	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.885	0.832	1.71
Al_2O_3	6.447	4.988	6.321	6.945	6.124	6.165	5.147	6.077	6.876	7.405	5.714	0.95
SiO_2	30.196	31.055	30.689	30.640	30.116	30.060	28.880	30.438	32.237	31.153	30.410	0.80
S	6.599	6.499	6.502	6.455	6.286	6.547	6.515	6.758	6.113	6.291	6.673	0.29
K_2O	0.472	0.432	0.395	0.427	0.410	0.485	0.415	0.493	0.412	0.486	0.369	0.08
CaO	23.106	27.049	22.432	24.441	24.611	25.807	26.057	21.721	22.693	23.077	24.344	1.44
TiO_2	1.490	1.542	1.430	1.348	1.372	1.667	1.341	1.606	1.512	1.446	1.292	0.21
Fe_2O_3	30.838	27.533	27.408	28.833	30.084	28.487	30.599	31.858	29.332	25.316	29.452	1.74
CuO	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.01
SrO	0.388	0.423	0.405	0.389	0.422	0.284	0.344	0.410	0.328	0.357	0.373	0.03
NiO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.040	0.014	0.006	0.01
RbO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.048	0.000	0.000	0.025	0.005	0.01

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตัวอย่าง ง.15 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.93 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 1

Sample	Mixed coal 1.93 : 1 # 1_1									
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000
MgO	0.000	0.000	0.000	0.000	3.346	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al_2O_3	7.287	6.672	7.307	7.769	5.828	6.426	5.833	6.555	6.584	5.897
SiO_2	29.469	25.764	27.912	26.348	27.904	26.134	27.496	23.925	26.631	25.631
S	7.249	7.510	7.063	7.538	7.738	7.277	7.970	7.540	7.273	7.506
K_2O	0.731	0.559	0.504	0.500	0.544	0.474	0.577	0.469	0.393	0.443
CaO	21.969	25.646	20.826	22.847	23.320	23.072	22.313	23.607	28.679	23.702
TiO_2	1.576	1.582	1.229	1.253	1.376	1.189	1.540	1.163	1.182	1.194
Fe_2O_3	31.048	31.384	34.239	32.941	29.269	34.620	33.401	35.906	28.632	34.964
CuO	0.001	0.000	0.000	0.000	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SrO	0.281	0.360	0.389	0.345	0.256	0.351	0.386	0.286	0.189	0.256
NiO	0.000	0.054	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.019	0.038	0.000
RbO	0.000	0.019	0.029	0.029	0.000	0.000	0.000	0.022	0.000	0.000

ตัวอย่าง ง.16 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.93 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 2

Sample	Mixed coal 1.93 : 1 # 1_2										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
MgO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.194	2.728	0.000	0.463	1.137
Al_2O_3	6.136	6.017	6.422	5.100	5.964	6.930	5.817	7.141	7.190	4.841	6.386	0.755
SiO_2	31.080	31.248	29.372	29.832	31.481	30.566	27.663	28.974	29.684	30.960	28.404	2.190
S	7.812	7.884	8.165	8.367	7.827	7.677	8.824	7.936	7.849	7.485	7.725	0.415
K_2O	0.516	0.701	0.521	0.439	0.631	0.529	0.497	0.530	0.675	0.596	0.541	0.089
CaO	21.455	22.368	22.675	24.459	22.116	20.544	28.291	21.903	18.264	20.337	22.920	2.481
TiO_2	1.417	1.569	1.505	2.019	1.688	1.588	1.452	1.361	1.564	1.590	1.452	0.215
Fe_2O_3	30.757	29.711	30.436	28.661	29.822	31.302	26.608	28.584	31.385	33.361	31.352	2.503
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003
SrO	0.364	0.323	0.384	0.313	0.295	0.401	0.340	0.289	0.292	0.348	0.322	0.054
NiO	0.000	0.000	0.050	0.000	0.000	0.000	0.032	0.000	0.000	0.000	0.010	0.018
RbO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.030	0.006	0.012

ตารางที่ ง.17 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 2.57 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 1

Sample	Mixed coal 2.57 : 1 # 1_1									
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	0.000	4.133	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	2.412	0.000	0.000
Al_2O_3	6.623	5.981	7.040	6.863	6.778	6.132	5.673	7.322	6.385	5.507
SiO_2	26.824	23.623	27.503	25.377	27.156	26.477	24.458	27.465	25.900	28.421
S	8.528	8.022	7.769	7.936	7.852	8.193	8.365	7.616	8.070	7.711
K_2O	0.455	0.435	0.466	0.463	0.482	0.384	0.331	0.633	0.415	0.423
CaO	32.324	28.619	27.764	26.772	27.053	33.350	29.596	29.007	30.474	29.962
TiO_2	1.512	1.420	1.337	1.473	1.425	1.302	1.224	1.752	1.353	1.555
Fe_2O_3	23.314	27.034	27.480	30.234	28.456	23.783	29.616	23.327	26.646	25.757
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020	0.000	0.000	0.015
SrO	0.111	0.271	0.223	0.266	0.347	0.250	0.283	0.315	0.346	0.268
NiO	0.000	0.000	0.000	0.044	0.053	0.000	0.000	0.024	0.000	0.000
RbO	0.000	0.027	0.018	0.028	0.000	0.014	0.000	0.029	0.000	0.000

ตารางที่ ง.18 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 2.57 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลองตัวอย่างที่ 2

Sample	Mixed coal 2.57 : 1 # 1_2										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
MgO	0.000	0.000	0.000	4.172	0.003	0.000	0.007	0.000	0.325	0.000	0.553	1.34
Al_2O_3	5.024	6.531	7.003	6.807	7.756	6.684	6.094	7.036	6.375	6.263	6.494	0.64
SiO_2	25.735	25.030	26.405	23.298	29.229	27.391	25.217	29.460	27.955	26.493	26.471	1.68
S	7.558	7.583	7.375	7.569	7.379	7.459	8.503	7.310	7.403	7.261	7.773	0.39
K_2O	0.415	0.479	0.439	0.369	0.461	0.518	0.376	0.541	0.477	0.464	0.451	0.06
CaO	30.195	26.651	26.755	29.711	22.735	26.776	31.951	25.218	27.592	24.688	28.360	2.67
TiO_2	1.210	1.431	1.300	1.228	1.374	1.372	1.190	1.775	1.301	1.334	1.393	0.16
Fe_2O_3	29.071	31.328	29.745	26.162	30.250	29.060	26.155	27.685	27.775	32.653	27.777	2.58
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.00
SrO	0.387	0.474	0.442	0.299	0.380	0.330	0.344	0.455	0.350	0.411	0.328	0.08
NiO	0.036	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.01
RbO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.01

ตารางที่ ง.19 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 3.21 : 1 ที่ใช้สำหรับการทดลอง

Sample	Mixed coal # 1_1										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.962	0.000	0.000	3.196	0.000	0.516	1.126
Al_2O_3	4.729	3.901	5.812	4.906	5.139	4.780	4.746	5.747	4.717	5.886	5.036	0.623
SiO_2	22.948	21.034	23.042	22.508	21.238	24.348	22.865	23.476	21.979	22.920	22.636	1.000
S	7.580	7.854	8.039	7.892	7.617	7.748	7.532	8.213	7.862	7.677	7.801	0.215
K_2O	0.282	0.334	0.308	0.320	0.257	0.321	0.344	0.343	0.322	0.331	0.316	0.028
CaO	34.513	34.401	36.304	33.644	33.728	32.391	31.109	34.103	33.067	29.885	33.315	1.826
TiO_2	1.332	1.355	1.317	1.290	1.141	1.463	1.332	1.431	1.411	1.279	1.335	0.091
Fe_2O_3	28.044	30.624	24.663	28.840	30.283	26.416	31.554	26.179	27.021	31.517	28.514	2.429
CuO	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021	0.000	0.003	0.007
SrO	0.414	0.379	0.407	0.432	0.399	0.442	0.359	0.360	0.259	0.355	0.381	0.053
NiO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
RbO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก จ
ข้อมูลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ผสมหินปูนเผาด้วยอุณหภูมิต่าง ๆ

ตารางที่ จ.1 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.93 : 1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่ 1

Sample	Mixed coal 1.93 : 1_800 # 1_1									
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007
MgO	3.498	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.363	3.016	0.003
Al_2O_3	5.619	5.559	5.601	5.687	4.606	5.482	6.467	5.557	5.342	6.958
SiO_2	30.048	31.135	28.331	30.113	29.684	29.883	30.323	29.567	28.257	31.694
S	6.867	6.881	7.488	7.637	6.790	7.202	6.629	6.810	7.154	6.927
K_2O	0.382	0.423	0.434	0.551	0.373	0.420	0.519	0.394	0.433	0.424
CaO	23.859	23.902	26.461	24.863	25.891	26.625	21.845	23.354	20.513	23.973
TiO_2	1.419	1.687	1.409	1.491	1.322	1.609	1.598	1.340	1.407	1.436
Fe_2O_3	27.530	29.482	29.444	28.838	30.570	27.929	31.660	28.808	33.087	27.874
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.061	0.000	0.000	0.000
SrO	0.301	0.405	0.382	0.333	0.356	0.338	0.349	0.366	0.372	0.319
NiO	0.000	0.061	0.000	0.000	0.000	0.000	0.064	0.000	0.000	0.000
RbO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.039	0.000	0.000	0.000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ จ.2 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.93 : 1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่ 2

Sample	Mixed coal 1.93 : 1_800 # 1_2										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002
MgO	3.071	2.378	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.014	2.982	0.000	1.066	1.504
Al_2O_3	7.145	5.878	5.192	5.871	6.542	6.066	7.414	6.782	6.402	6.089	6.013	0.712
SiO_2	32.085	30.148	28.329	31.633	33.497	31.919	31.346	33.107	31.139	30.646	30.644	1.469
S	6.653	6.679	7.092	6.860	6.238	6.904	6.792	6.875	7.097	6.461	6.902	0.322
K_2O	0.491	0.532	0.463	0.528	0.607	0.519	0.536	0.454	0.561	0.516	0.478	0.066
CaO	21.110	23.157	26.498	23.805	20.337	23.922	20.866	22.139	20.817	23.727	23.383	2.041
TiO_2	1.318	1.396	1.422	1.459	1.389	1.356	1.254	1.307	1.362	1.384	1.418	0.108
Fe_2O_3	27.519	28.881	30.098	29.362	30.713	28.820	31.053	25.373	28.836	30.287	29.308	1.701
CuO	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.059	0.000	0.000	0.000	0.007	0.018
SrO	0.296	0.539	0.369	0.321	0.304	0.394	0.407	0.633	0.446	0.428	0.383	0.083
NiO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.037	0.000	0.000	0.000	0.008	0.020
RbO	0.000	0.041	0.015	0.000	0.000	0.000	0.018	0.000	0.000	0.034	0.007	0.014

ตารางที่ จ.3 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.93 : 1 อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่ 1

Sample	Mixed coal 1.93 : 1_900 # 1_1									
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	0.000	0.000	2.820	2.862	2.689	2.428	2.794	0.000	2.978	0.000
Al_2O_3	6.460	6.556	6.872	6.965	7.018	7.806	6.913	7.959	7.117	7.635
SiO_2	33.039	33.801	31.473	30.927	32.205	35.456	31.057	33.071	31.667	31.806
S	8.120	7.676	7.599	7.388	7.345	7.314	7.635	7.084	7.911	6.727
K_2O	0.621	0.589	0.560	0.469	0.636	0.587	0.533	0.609	0.564	0.601
CaO	21.899	18.905	19.466	19.298	18.384	17.210	18.939	17.723	21.187	16.091
TiO_2	1.494	1.456	1.453	1.266	1.546	1.341	1.285	1.498	1.560	1.500
Fe_2O_3	27.606	30.202	28.716	30.188	29.303	27.179	31.173	31.089	26.261	34.863
CuO	0.000	0.000	0.000	0.033	0.000	0.000	0.000	0.035	0.000	0.000
SrO	0.461	0.392	0.546	0.425	0.453	0.363	0.387	0.460	0.301	0.293
NiO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
RbO	0.000	0.000	0.037	0.034	0.000	0.000	0.000	0.000	0.026	0.054

ตารางที่ จ.4 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.93 : 1 อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่ 2

Sample	Mixed coal 1.93 : 1_900 # 1_2									Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	2.652	2.503	2.508	0.010	0.000	0.000	2.690	0.369	0.000	1.437	1.368
Al_2O_3	8.024	8.052	8.204	7.985	7.191	6.718	8.093	6.305	8.633	7.395	0.690
SiO_2	31.875	32.732	34.537	35.834	34.419	33.981	31.572	33.241	33.727	32.969	1.457
S	6.798	6.844	6.708	6.794	7.178	7.184	6.450	6.999	6.852	7.190	0.450
K_2O	0.547	0.656	0.716	0.623	0.592	0.623	0.611	0.580	0.652	0.598	0.053
CaO	17.741	17.360	17.317	18.789	17.934	18.867	17.847	19.003	17.978	18.523	1.365
TiO_2	1.402	1.498	1.422	1.311	1.725	1.464	1.375	1.356	1.539	1.447	0.112
Fe_2O_3	30.253	29.520	28.136	27.991	30.190	30.275	30.500	31.668	29.854	29.735	1.911
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021	0.000	0.000	0.000	0.005	0.011
SrO	0.267	0.337	0.356	0.315	0.334	0.403	0.343	0.336	0.403	0.378	0.070
NiO	0.037	0.045	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.013
RbO	0.000	0.042	0.000	0.000	0.000	0.000	0.031	0.000	0.018	0.013	0.018

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ฉ

ข้อมูลการทดสอบถ่านหินและเถ้าของถ่านหินที่มีประมาณกำมะถันต่าง ๆ

ตารางที่ ฉ.1 ผลการทดสอบถ่านหินกำมะถันต่ำที่ใช้สำหรับการทดลอง

Sample	Mixed coal high S 3										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na	0.000	4.815	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.018	0.000	5.782	1.562	2.526
$MgCO_3$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al_2O_3	5.163	4.944	5.988	5.162	4.590	5.790	5.337	3.826	4.958	3.445	4.920	0.794
SiO_2	46.378	46.825	49.002	46.462	45.734	49.920	50.469	42.963	46.909	36.676	46.134	3.976
S	6.111	5.403	5.749	6.103	7.456	5.803	5.361	5.530	5.724	5.268	5.851	0.634
K	0.665	0.657	0.617	0.641	0.439	0.775	0.694	0.538	0.706	0.352	0.608	0.129
$CaCO_3$	5.796	5.109	6.059	6.001	6.888	6.529	5.824	6.454	5.440	4.323	5.842	0.747
Ti	1.046	1.457	1.114	1.220	0.935	1.280	1.049	0.838	1.036	0.728	1.070	0.213
Fe_2O_3	34.576	30.545	31.148	34.359	33.352	29.362	31.238	34.832	34.724	42.840	33.698	3.779
Cu	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sr	0.244	0.241	0.214	0.000	0.331	0.000	0.000	0.000	0.268	0.216	0.151	0.134

ตารางที่ ฉ.2 ผลการทดสอบถ่านหินกำมะถันสูงที่ใช้สำหรับการทดลอง

Sample	Mixed coal high S 2										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$MgCO_3$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al_2O_3	2.042	1.862	1.892	1.086	2.157	2.922	1.885	3.725	1.926	3.043	2.254	0.759
SiO_2	46.672	45.130	48.090	47.200	47.135	45.883	45.202	47.377	45.445	45.564	46.370	1.053
S	6.900	7.793	7.701	6.364	6.473	6.986	7.003	5.948	7.807	7.076	7.005	0.630
K	0.271	0.033	0.129	0.382	0.185	0.221	0.196	0.281	0.189	0.138	0.203	0.096
$CaCO_3$	18.782	19.222	21.973	21.197	23.068	19.238	18.310	19.899	18.076	17.956	19.772	1.752
Ti	0.437	0.427	0.395	0.506	0.413	0.363	0.221	0.627	0.419	0.226	0.403	0.120
Fe_2O_3	24.131	24.871	18.784	22.475	19.606	23.484	26.663	21.444	25.328	25.247	23.203	2.592
Cu	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sr	0.725	0.644	0.769	0.710	0.800	0.656	0.428	0.574	0.725	0.591	0.662	0.110

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ฉ.3 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินกำมะถันต่ำผสมถ่านหินในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 ตัวอย่างที่ 1

Sample	Ash mixed coal high S 3_1									
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.519
Al_2O_3	7.351	6.448	6.441	7.185	6.498	7.167	6.816	6.705	7.379	7.149
SiO_2	34.247	34.245	35.707	34.709	37.925	37.572	35.562	33.369	33.780	36.857
S	5.608	6.343	6.366	5.688	6.057	6.152	5.859	6.328	5.723	6.217
K_2O	0.675	0.588	0.634	0.575	0.638	0.652	0.575	0.607	0.600	0.612
CaO	17.476	21.361	18.249	14.954	17.767	16.646	19.492	22.803	16.208	17.427
TiO_2	2.668	2.025	2.379	1.837	2.215	2.487	2.095	2.322	1.767	2.143
Fe_2O_3	31.139	27.985	29.453	34.172	28.163	28.602	28.890	27.033	33.981	26.506
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SrO	0.262	0.230	0.299	0.268	0.252	0.254	0.253	0.257	0.353	0.170
NiO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
RbO	0.034	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ฉ.4 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินกำมะถันต่ำผสมถ่านหินในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 ตัวอย่างที่ 2

Sample	Ash mixed coal high S 3_2										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	5.691	0.000	0.000	0.000	13.595	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.964	3.233
MgO	0.000	0.000	0.000	2.215	2.384	2.630	2.530	2.839	2.214	0.945	0.914	1.201
Al_2O_3	8.370	6.490	7.592	8.986	7.030	8.511	8.092	8.391	7.415	7.923	7.397	0.763
SiO_2	36.206	34.549	33.880	36.792	31.864	33.125	36.599	33.266	33.717	35.039	34.951	1.645
S	5.419	6.281	6.644	5.660	5.457	6.274	6.101	5.560	5.141	6.181	5.953	0.399
K_2O	0.638	0.652	0.552	0.727	0.491	0.653	0.593	0.475	0.631	0.584	0.608	0.059
CaO	14.470	18.240	21.911	15.171	14.684	17.857	17.677	19.321	13.828	18.862	17.720	2.480
TiO_2	2.055	1.873	1.614	2.144	1.702	2.036	1.953	1.628	1.784	1.867	2.030	0.286
Fe_2O_3	26.380	31.078	27.313	27.544	22.226	28.179	26.006	27.900	34.425	28.019	28.750	2.994
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.032	0.000	0.000	0.017	0.000	0.002	0.008
SrO	0.293	0.356	0.317	0.306	0.230	0.317	0.331	0.280	0.299	0.355	0.284	0.048
NiO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.037	0.000	0.042	0.004	0.012
RbO	0.000	0.000	0.020	0.000	0.000	0.036	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.011

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ฉ.5 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินกำมะถันสูงผสมถ่านหินในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 ตัวอย่างที่ 1

Sample	Mixed coal high S 2_1									
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na_2O	3.420	3.186	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000
MgO	5.809	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.846	5.852	0.791
Al_2O_3	3.687	3.989	4.021	0.763	1.321	1.610	1.594	1.087	4.098	1.124
SiO_2	18.181	18.596	18.360	17.214	17.354	16.559	16.814	17.712	18.590	17.313
S	5.825	5.993	6.141	6.090	6.708	6.411	6.179	6.166	5.835	6.652
K_2O	0.180	0.141	0.131	0.202	0.135	0.184	0.168	0.174	0.163	0.198
CaO	42.432	47.037	47.154	48.696	50.840	49.489	48.654	50.002	43.887	47.837
TiO_2	0.654	0.559	0.725	0.684	0.754	0.670	0.697	0.556	0.617	0.671
Fe_2O_3	18.974	19.622	22.383	25.295	21.855	23.958	24.769	22.134	20.009	24.344
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.034	0.000	0.000	0.027	0.000
SrO	0.804	0.806	0.880	0.917	0.898	0.965	0.990	0.921	0.803	0.974
NiO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
RbO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ฉ.6 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินกำมะถันสูงผสมถ่านหินในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 ตัวอย่างที่ 2

Sample	Mixed coal high S 2_2										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.332	1.017
MgO	0.000	0.000	0.000	0.000	5.958	0.680	0.000	0.000	0.633	0.000	1.028	2.109
Al_2O_3	4.288	3.306	2.971	1.806	3.441	4.973	1.660	1.238	1.295	1.511	2.489	1.351
SiO_2	23.079	18.807	18.331	19.813	18.333	26.842	20.443	19.109	17.852	18.201	18.875	2.362
S	5.875	6.755	6.890	6.630	6.389	5.506	6.638	6.729	6.511	6.949	6.344	0.407
K_2O	0.290	0.163	0.160	0.133	0.156	0.529	0.284	0.160	0.118	0.125	0.190	0.092
CaO	41.446	46.479	46.372	47.896	43.376	40.350	45.733	46.577	48.143	47.264	46.483	2.850
TiO_2	1.123	0.719	0.816	0.541	0.674	1.159	0.935	0.844	0.669	0.803	0.744	0.168
Fe_2O_3	22.666	22.575	23.346	21.996	20.867	18.721	23.136	24.059	23.687	23.963	22.418	1.922
CuO	0.000	0.000	0.028	0.065	0.040	0.000	0.046	0.026	0.000	0.000	0.013	0.020
SrO	0.868	0.996	0.962	0.984	0.654	0.863	0.992	1.068	0.934	0.956	0.912	0.094
NiO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
RbO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ภาคผนวก ช

ข้อมูลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่มีขนาดต่าง ๆ ผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1

ตารางที่ ช.1 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินขนาด 0.125 มิลลิเมตร ผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 ตัวอย่างที่ 1

Sample	1.25 mm._1										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	7.789	0.000	0.006	0.000	0.000	0.079	0.000	0.000	0.787	2.460
MgO	1.028	0.778	0.000	0.000	0.000	0.000	2.162	0.001	0.000	0.000	0.397	0.727
Al_2O_3	10.034	0.000	9.982	11.470	10.034	8.500	6.742	2.493	9.789	6.651	7.570	3.705
SiO_2	37.598	9.443	34.534	39.918	28.593	34.382	25.999	13.545	36.175	34.267	29.445	10.330
S	3.064	16.623	3.777	3.602	8.065	5.528	7.053	7.798	5.118	4.792	6.542	3.948
K_2O	2.603	0.417	3.154	3.480	2.127	2.365	1.866	0.494	2.888	2.795	2.219	1.042
CaO	14.072	57.918	18.306	14.738	26.881	18.229	31.710	64.067	19.476	24.638	29.004	17.777
TiO_2	1.399	0.803	1.826	1.882	1.215	1.716	1.536	0.831	1.678	1.817	1.470	0.401
Fe_2O_3	29.804	13.551	20.322	24.474	22.633	28.881	22.704	10.488	24.533	24.643	22.203	6.101
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SrO	0.314	0.319	0.205	0.285	0.310	0.307	0.163	0.201	0.287	0.281	0.267	0.056

ตารางที่ ช.2 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินขนาด 0.125 มิลลิเมตร ผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 ตัวอย่างที่ 2

Sample	1.25 mm._2										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	8.527	0.004	0.000	6.399	0.000	10.682	0.000	0.000	2.561	4.245
MgO	0.000	0.000	0.000	0.192	1.513	0.000	0.000	2.528	1.727	0.000	0.596	0.951
Al_2O_3	6.414	9.678	9.320	3.462	7.853	6.664	8.414	6.766	8.554	9.728	7.685	1.928
SiO_2	24.427	31.421	32.236	29.503	28.028	47.523	37.178	23.917	27.998	37.497	31.973	7.142
S	6.268	6.407	4.734	7.016	6.001	3.823	6.271	4.010	6.422	3.367	5.432	1.314
K_2O	1.406	2.151	2.119	2.019	1.581	1.795	2.398	1.360	1.542	3.534	1.991	0.644
CaO	43.676	20.279	18.932	23.330	19.802	15.565	22.393	35.641	24.158	17.047	24.082	8.834
TiO_2	1.341	1.732	1.444	1.703	1.544	1.150	1.456	1.067	1.613	2.029	1.508	0.285
Fe_2O_3	16.146	27.872	22.380	32.100	32.895	16.804	21.443	13.790	27.675	26.446	23.755	6.712
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SrO	0.228	0.296	0.222	0.297	0.244	0.203	0.228	0.157	0.259	0.321	0.246	0.049

ตารางที่ ช.3 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินขนาด 0.250 มิลลิเมตร ผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 ตัวอย่างที่ 1

Sample	0.25 mm._1										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	6.878	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	8.614	0.000	0.000	0.000	1.549	3.292
MgO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.374	0.000	0.137	0.434
Al_2O_3	8.512	7.136	8.734	8.281	10.398	8.210	7.257	6.493	9.699	8.275	8.300	1.169
SiO_2	36.731	24.965	26.496	27.446	33.132	34.624	28.642	48.346	32.502	24.244	31.713	7.220
S	4.204	5.524	7.348	6.770	6.319	5.736	5.350	7.676	7.394	7.922	6.424	1.207
K_2O	2.780	1.677	2.096	2.016	2.246	2.640	1.660	1.939	2.064	1.311	2.043	0.444
CaO	15.527	23.941	21.342	24.980	16.343	18.697	18.463	20.726	20.076	26.799	20.689	3.675
TiO_2	1.700	1.344	2.410	1.629	2.143	1.858	1.484	0.968	2.196	1.254	1.699	0.458
Fe_2O_3	23.158	35.069	31.155	28.188	28.897	27.853	28.126	13.515	24.216	29.445	26.962	5.771
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SrO	0.280	0.275	0.290	0.332	0.327	0.307	0.268	0.259	0.288	0.513	0.314	0.074

ตารางที่ ช.4 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินขนาด 0.250 มิลลิเมตร ผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1ตัวอย่างที่ 2

Sample	0.25 mm._2										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.002	0.000	0.000	3.532	0.000	13.237	0.000	3.226	0.000	2.000	4.191
MgO	0.880	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.088	0.278
Al_2O_3	9.390	7.875	9.442	0.650	8.839	10.266	9.724	8.508	7.137	10.090	8.192	2.826
SiO_2	43.883	30.530	28.339	3.985	27.666	37.405	31.945	29.307	28.771	31.352	29.318	10.197
S	3.234	7.165	5.718	11.705	4.624	5.612	5.344	6.430	6.299	4.120	6.025	2.307
K_2O	3.353	1.760	2.270	0.046	1.395	2.885	2.198	2.805	2.323	1.941	2.098	0.921
CaO	12.941	30.109	16.460	79.421	18.424	16.237	17.967	20.131	21.134	13.501	24.633	19.847
TiO_2	1.581	1.507	1.686	0.287	1.174	2.182	1.703	2.394	1.843	2.657	1.701	0.665
Fe_2O_3	24.301	20.707	35.511	3.702	33.846	24.836	17.549	29.715	28.857	35.656	25.468	9.805
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SrO	0.293	0.280	0.416	0.165	0.332	0.281	0.232	0.369	0.305	0.637	0.331	0.128

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ช.5 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินขนาด 0.50 มิลลิเมตร ผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1ตัวอย่างที่ 1

Sample	0.50 mm._1											
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg.	SD
Na_2O	0.000	0.000	0.140	0.048	0.428	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.062	0.136
MgO	0.000	2.137	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.283	3.649	0.907	1.507
Al_2O_3	7.179	7.151	10.102	3.451	5.400	11.311	0.000	6.209	5.298	2.822	5.892	3.352
SiO_2	18.877	21.221	34.207	10.016	24.906	35.265	24.304	12.672	12.225	10.289	20.398	9.350
S	8.837	8.406	4.826	8.820	7.178	4.786	9.169	8.305	8.666	7.877	7.687	1.618
K_2O	1.562	1.476	2.741	0.535	1.867	2.455	1.856	0.607	0.679	0.549	1.433	0.815
CaO	34.489	33.246	18.137	51.628	25.676	17.023	29.268	47.755	45.686	52.709	35.562	13.310
TiO_2	1.437	1.593	1.819	1.025	2.275	2.161	1.695	1.063	1.234	1.143	1.545	0.445
Fe_2O_3	26.947	23.940	27.558	23.967	31.509	26.582	32.341	22.734	22.283	20.401	25.826	3.918
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.030	0.000	0.003	0.009
SrO	0.342	0.345	0.355	0.366	0.364	0.296	0.004	0.350	0.322	0.375	0.312	0.111

ตารางที่ ช.6 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินขนาด 0.50 มิลลิเมตร ผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 ตัวอย่างที่ 2

Sample	0.50 mm._2										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	6.124	0.226	0.798	0.000	0.000	0.000	0.000	0.686	10.306	0.000	1.814	3.527
MgO	0.000	0.000	0.671	0.000	0.000	0.000	0.000	0.718	0.000	0.000	0.139	0.293
Al_2O_3	10.283	5.376	2.212	6.020	7.216	8.125	7.961	4.486	6.932	6.118	6.473	2.208
SiO_2	34.649	22.722	6.529	18.933	29.706	32.584	21.358	13.890	26.706	21.185	22.826	8.582
S	5.283	8.015	9.450	6.243	7.568	5.802	7.338	9.237	5.532	6.839	7.131	1.470
K_2O	3.073	1.039	0.159	0.859	1.380	1.843	1.595	0.189	1.495	1.026	1.266	0.845
CaO	14.251	38.059	75.169	44.553	24.266	23.756	36.853	59.358	23.229	44.286	38.378	18.541
TiO_2	1.668	1.319	0.316	1.173	1.302	1.670	1.495	0.672	1.482	1.314	1.241	0.433
Fe_2O_3	24.276	22.481	4.449	21.765	27.603	25.532	22.749	10.483	23.683	18.769	20.179	7.232
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.022	0.000	0.000	0.000	0.002	0.007
SrO	0.283	0.387	0.207	0.327	0.505	0.314	0.283	0.221	0.263	0.265	0.306	0.087

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ช.7 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินขนาด 2.00 มิลลิเมตร ผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1

Sample	2.00 mm.										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.050
MgO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.078	0.000	0.000	0.478	1.275
Al_2O_3	5.312	3.003	6.383	5.478	4.896	5.213	6.809	5.181	2.939	4.644	5.305	1.349
SiO_2	19.138	12.740	23.286	16.954	22.016	24.487	18.634	14.327	10.726	11.401	16.830	5.079
S	9.183	7.962	7.182	5.505	6.664	7.138	5.487	7.346	5.801	7.856	7.108	1.544
K_2O	0.595	0.397	1.152	0.684	0.411	0.697	0.522	0.849	0.740	0.809	0.691	0.332
CaO	33.607	47.302	26.900	32.660	27.256	29.997	51.639	42.667	58.105	46.721	42.501	11.428
TiO_2	1.713	1.685	1.929	1.629	4.360	3.942	1.054	1.300	1.117	1.562	1.755	1.015
Fe_2O_3	29.361	26.114	32.231	35.945	33.436	27.994	15.345	24.795	19.887	26.072	24.545	6.902
CuO	0.000	0.000	0.000	0.065	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.017
SrO	0.482	0.303	0.359	0.369	0.396	0.299	0.171	0.388	0.479	0.490	0.375	0.146

ตารางที่ ช.8 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินขนาด 8.00 มิลลิเมตร ผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1

Sample	8.00 mm.										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	2.121	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.236	0.707
MgO	0.071	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.049	3.501	3.501	0.736	1.444
Al_2O_3	7.424	5.934	6.604	5.291	6.130	5.770	5.213	6.003	7.747	7.747	6.235	0.876
SiO_2	26.581	25.254	26.093	25.376	24.598	23.839	24.299	25.164	25.832	25.832	25.226	0.877
S	6.104	6.327	6.369	6.231	6.250	6.706	6.064	6.125	6.145	6.145	6.258	0.197
K_2O	0.288	0.177	0.346	0.199	0.303	0.250	0.205	0.301	0.212	0.212	0.253	0.058
CaO	24.181	31.084	20.888	25.688	25.350	25.833	31.257	24.838	23.655	23.655	25.864	3.357
TiO_2	2.252	2.241	2.402	2.753	2.418	2.519	2.253	2.271	2.306	2.306	2.379	0.169
Fe_2O_3	30.129	28.031	36.318	33.183	33.938	34.045	29.772	31.395	29.651	29.651	31.829	2.688
CuO	0.000	0.000	0.000	0.065	0.000	0.000	0.058	0.000	0.052	0.052	0.019	0.029
SrO	0.316	0.309	0.441	0.367	0.428	0.385	0.287	0.338	0.312	0.312	0.354	0.055

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ซ

ข้อมูลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ

ตารางที่ ซ.1 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ผสมชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 5 ตัวอย่างที่ 1

Sample	5 % Biomass_1							Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	1.191	0.000	1.155	0.000	0.000	1.221	1.277	0.692	0.648
Al_2O_3	9.454	9.124	11.036	8.762	9.558	9.305	10.306	9.649	0.773
SiO_2	26.255	31.190	28.306	27.534	24.746	28.813	25.794	27.520	2.162
S	4.551	4.359	4.580	4.499	4.666	4.506	4.618	4.540	0.099
K_2O	0.821	0.854	0.996	0.843	0.787	0.831	0.900	0.862	0.068
CaO	6.425	6.597	6.531	6.674	6.872	6.716	6.953	6.681	0.186
TiO_2	1.648	1.630	1.916	1.677	1.449	1.464	1.674	1.637	0.156
Fe_2O_3	48.528	45.187	44.184	48.979	50.712	45.969	47.303	47.266	2.306
CuO	0.000	0.076	0.069	0.000	0.000	0.070	0.000	0.031	0.038
SrO	0.623	0.574	0.569	0.602	0.515	0.578	0.611	0.582	0.036

ตารางที่ ซ.2 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ผสมชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 5 ตัวอย่างที่ 2

Sample	5 % Biomass_2								Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	0.000	0.000	0.000	1.357	1.334	0.000	0.000	1.368	0.507	0.700
Al_2O_3	8.875	8.975	9.722	9.149	9.950	9.852	9.037	10.182	9.468	0.512
SiO_2	35.403	30.702	30.888	31.315	28.523	34.001	28.594	29.414	31.105	2.477
S	5.173	4.925	5.435	5.280	4.960	4.777	5.323	5.374	5.156	0.240
K_2O	0.940	0.939	0.957	0.939	0.979	1.048	0.824	1.009	0.954	0.066
CaO	7.252	7.805	8.420	8.132	7.695	7.491	7.956	8.114	7.858	0.377
TiO_2	1.688	1.695	1.723	1.763	1.752	1.715	1.667	1.824	1.728	0.050
Fe_2O_3	39.397	43.712	41.593	40.904	43.513	40.039	45.309	41.326	41.974	2.022
CuO	0.074	0.066	0.000	0.056	0.000	0.071	0.069	0.000	0.042	0.035
SrO	0.640	0.704	0.658	0.618	0.718	0.629	0.730	0.689	0.673	0.043

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ซ.3 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ผสมชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 8 ตัวอย่างที่ 1

Sample	8 % Biomass_1										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	1.369	1.430	0.000	0.000	0.000	1.508	0.000	1.420	1.480	1.405	0.861	0.742
Al_2O_3	7.519	8.250	10.362	9.516	9.004	8.839	8.011	8.927	8.716	7.728	8.687	0.857
SiO_2	22.798	25.026	27.921	25.156	27.279	28.386	27.676	28.104	26.687	25.716	26.475	1.778
S	4.930	5.662	5.702	5.203	5.992	6.597	5.484	5.746	5.951	5.699	5.697	0.453
K_2O	0.985	0.942	0.976	0.890	1.070	0.818	1.071	1.196	0.990	0.886	0.982	0.109
CaO	9.077	7.877	8.547	7.565	8.671	8.752	8.040	8.504	8.475	7.712	8.322	0.495
TiO_2	1.461	1.563	1.595	1.396	1.741	1.656	1.469	1.811	1.505	1.290	1.549	0.158
Fe_2O_3	42.425	48.081	43.693	49.134	45.096	42.066	46.890	43.021	44.934	48.533	45.387	2.625
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SrO	0.000	0.508	0.538	0.539	0.642	0.626	0.663	0.567	0.568	0.463	0.511	0.190

ตารางที่ ซ.4 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ผสมชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 8 ตัวอย่างที่ 2

Sample	8 % Biomass_2										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	8.504	0.000	0.000	7.962	1.647	3.474
MgO	1.468	0.000	1.385	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.268	0.412	0.665
Al_2O_3	9.336	9.961	9.599	8.360	9.165	7.548	9.183	8.884	9.362	10.101	9.150	0.753
SiO_2	25.685	28.912	25.747	27.112	26.521	24.726	25.266	24.997	26.772	24.906	26.064	1.294
S	5.896	4.969	5.423	4.712	4.750	5.300	4.346	4.348	5.127	4.366	4.924	0.520
K_2O	0.655	0.949	0.812	0.853	0.786	0.812	0.816	0.836	0.819	0.791	0.813	0.072
CaO	8.338	7.196	7.912	6.809	7.011	7.316	6.127	6.329	7.754	6.688	7.148	0.704
TiO_2	1.223	1.501	1.342	1.167	1.426	1.309	1.216	1.475	1.535	1.489	1.368	0.135
Fe_2O_3	46.171	45.220	46.856	50.232	49.172	52.250	43.645	51.973	47.494	41.639	47.465	3.487
CuO	0.000	0.000	0.048	0.000	0.000	0.000	0.057	0.000	0.000	0.000	0.011	0.022
SrO	0.689	0.773	0.714	0.643	0.665	0.586	0.696	0.698	0.647	0.387	0.650	0.105

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ซ.5 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ผสมชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 10 ตัวอย่างที่ 1

Sample	10 % Biomass_1										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.359	0.000	0.000	0.000	0.136	0.430
MgO	0.000	0.000	1.390	0.000	0.000	0.000	1.298	0.000	0.000	0.000	0.269	0.567
Al_2O_3	9.979	9.758	9.057	10.656	10.719	8.854	11.592	9.868	8.368	9.020	9.787	0.996
SiO_2	30.340	26.996	29.808	29.950	30.859	28.024	30.691	29.184	27.971	27.257	29.108	1.439
S	5.940	6.492	5.863	5.964	4.950	5.682	5.357	6.164	6.329	6.350	5.909	0.478
K_2O	1.130	1.021	0.998	1.064	1.197	1.014	1.005	1.103	1.008	0.984	1.052	0.070
CaO	9.215	8.888	8.511	8.904	7.221	8.146	8.074	8.708	9.627	8.973	8.627	0.679
TiO_2	1.876	1.851	1.627	1.823	1.771	1.806	1.861	1.923	1.872	2.038	1.845	0.106
Fe_2O_3	40.291	43.675	40.461	40.209	42.080	45.170	37.578	41.881	43.502	44.054	41.890	2.292
CuO	0.000	0.000	0.000	0.086	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.027
SrO	0.631	0.596	1.517	0.614	0.617	0.728	0.650	0.667	0.706	0.650	0.738	0.277

ตารางที่ ซ.6 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ผสมชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 10 ตัวอย่างที่ 2

Sample	10 % Biomass_2										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	1.361	0.000	0.000	1.327	1.343	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.403	0.649
Al_2O_3	9.129	9.676	7.823	9.053	9.871	7.842	8.832	9.671	8.757	9.836	9.049	0.758
SiO_2	27.559	29.657	27.962	28.757	31.345	27.501	28.845	29.991	28.199	29.539	28.936	1.215
S	5.624	5.614	5.715	5.537	5.608	5.996	5.678	5.816	6.207	6.276	5.807	0.263
K_2O	1.052	1.121	0.968	1.101	1.167	1.051	1.112	1.024	1.006	1.100	1.070	0.060
CaO	7.793	7.889	7.928	7.628	8.313	8.258	8.476	8.429	8.554	8.992	8.226	0.416
TiO_2	1.533	1.825	1.575	1.545	1.852	1.753	1.611	1.724	1.662	1.786	1.687	0.118
Fe_2O_3	44.884	43.104	47.012	43.914	39.338	46.311	44.346	42.190	44.466	41.176	43.674	2.316
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SrO	0.478	0.582	0.497	0.515	0.492	0.642	0.564	0.535	0.609	0.593	0.551	0.056

ตารางที่ ซ.7 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ผสมชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 15 ตัวอย่างที่ 1

Sample	15 % Biomass_1										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	1.349	0.000	0.000	0.000	1.394	0.000	1.406	1.436	1.379	1.421	0.839	0.722
Al_2O_3	11.102	9.696	9.381	8.957	10.923	9.211	9.632	11.175	9.080	10.219	9.938	0.858
SiO_2	30.588	30.358	31.933	30.084	30.240	30.475	32.011	30.235	30.929	28.573	30.543	0.975
S	5.783	6.115	5.590	5.320	5.365	6.276	6.171	5.542	5.531	5.535	5.723	0.346
K_2O	1.382	1.459	1.266	1.168	1.456	1.195	1.215	1.031	1.281	1.133	1.259	0.140
CaO	8.328	8.827	8.725	8.921	8.551	9.461	8.915	8.863	8.350	8.478	8.742	0.339
TiO_2	1.677	1.869	1.788	1.671	1.859	1.837	1.995	1.453	1.625	1.614	1.739	0.159
Fe_2O_3	38.614	40.543	40.081	42.898	38.935	40.529	37.293	39.244	40.690	41.383	40.021	1.575
CuO	0.000	0.000	0.020	0.000	0.000	0.000	0.054	0.000	0.000	0.041	0.012	0.020
SrO	0.540	0.560	0.585	0.489	0.609	0.689	0.629	0.543	0.609	0.610	0.586	0.056

ตารางที่ ซ.8 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินที่ผสมชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 15 ตัวอย่างที่ 2

Sample	15 % Biomass_2										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.575	0.000	0.000	0.000	0.258	0.814
MgO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.636	1.462	1.521	0.000	1.377	0.600	0.777
Al_2O_3	7.779	9.213	8.032	8.501	7.628	9.280	9.091	8.486	8.003	7.730	8.374	0.637
SiO_2	27.563	27.005	27.038	26.224	25.541	23.521	27.898	29.691	27.120	27.246	26.885	1.604
S	6.187	5.725	6.989	6.210	6.486	6.258	5.566	7.182	6.731	5.738	6.307	0.546
K_2O	1.114	1.074	1.000	1.115	1.045	1.066	1.134	1.401	1.097	1.221	1.127	0.113
CaO	9.220	8.082	9.888	9.785	9.646	9.504	8.450	9.444	10.192	8.047	9.226	0.766
TiO_2	1.638	1.584	1.459	1.825	1.465	1.581	1.486	1.878	1.573	1.555	1.604	0.143
Fe_2O_3	45.415	46.120	44.343	45.031	47.018	45.794	40.999	39.388	44.158	45.736	44.400	2.397
CuO	0.000	0.075	0.000	0.063	0.000	0.000	0.117	0.000	0.000	0.069	0.032	0.044
SrO	0.556	0.511	0.546	0.557	0.585	0.496	0.449	0.503	0.509	0.522	0.523	0.039

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ฌ

ข้อมูลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 และชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ

ตารางที่ ฌ.1 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 และชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 5 ตัวอย่างที่ 1

Sample	5 % Biomass_Limestone_1										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.558	0.000	2.652	3.548	0.000	0.976	1.590
Al_2O_3	7.798	7.927	7.273	6.703	7.658	6.845	7.306	8.817	6.262	9.108	7.570	0.898
SiO_2	26.169	24.608	25.792	22.714	24.261	22.513	24.659	24.305	21.581	26.557	24.316	1.638
S	8.092	8.004	8.094	7.698	8.015	8.045	8.438	7.423	8.082	7.937	7.983	0.267
K_2O	0.776	0.750	0.838	0.728	0.705	0.644	0.682	0.535	0.570	0.751	0.698	0.093
CaO	17.881	18.944	16.580	17.739	19.853	23.540	20.028	16.766	22.719	18.014	19.206	2.368
TiO_2	1.502	1.396	1.681	1.714	1.904	1.486	1.553	1.475	1.502	1.517	1.573	0.150
Fe_2O_3	36.765	37.796	39.229	42.099	37.150	32.627	36.734	37.633	34.816	35.235	37.008	2.564
CuO	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002
SrO	0.419	0.441	0.403	0.422	0.356	0.358	0.433	0.355	0.434	0.460	0.408	0.039

ตารางที่ ฌ.2 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 และชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 5 ตัวอย่างที่ 2

Sample	5 % Biomass_Limestone_2										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	5.262	0.000	0.000	0.000	0.000	16.802	0.000	0.000	0.000	0.000	2.206	5.388
MgO	1.257	3.127	3.156	2.838	0.000	3.040	0.000	0.000	0.000	2.810	1.623	1.497
Al_2O_3	5.987	6.986	6.599	8.154	6.181	6.347	5.893	7.917	7.448	7.460	6.897	0.816
SiO_2	22.233	24.008	23.418	24.149	25.089	21.745	23.872	23.084	25.281	25.473	23.835	1.254
S	7.731	7.410	8.035	6.649	7.679	7.012	8.403	7.204	6.577	7.572	7.427	0.582
K_2O	0.675	0.684	0.588	0.646	0.752	0.669	0.672	0.697	0.626	0.600	0.661	0.048
CaO	17.438	20.154	20.267	17.153	18.552	18.022	24.595	17.823	15.363	18.358	18.773	2.489
TiO_2	1.424	1.846	1.786	1.284	1.739	1.232	1.520	1.481	1.393	1.485	1.519	0.209
Fe_2O_3	37.064	34.694	35.353	38.278	39.525	24.480	34.364	40.807	42.313	35.343	36.222	4.935
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SrO	0.325	0.399	0.231	0.278	0.336	0.235	0.451	0.481	0.442	0.399	0.358	0.090

ตารางที่ ฌ.3 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 และชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 8 ตัวอย่างที่ 1

Sample	8 % Biomass_Limestone_1										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	3.924	10.750	0.000	6.776	0.000	10.750	6.776	2.681	4.129
MgO	0.495	0.000	0.000	0.000	0.000	1.184	3.307	0.000	0.000	3.307	0.623	1.163
Al_2O_3	7.574	6.427	6.910	5.309	5.683	5.433	7.986	6.313	5.683	7.986	6.454	0.984
SiO_2	24.141	24.100	24.306	20.805	22.638	23.096	24.736	24.184	22.638	24.736	23.501	1.286
S	7.042	7.489	6.546	7.361	6.847	7.138	6.859	7.143	6.847	6.859	7.053	0.302
K_2O	0.619	0.557	0.772	0.703	0.715	0.676	0.769	0.619	0.715	0.769	0.679	0.076
CaO	27.253	29.339	24.060	24.870	24.449	25.327	21.664	25.972	24.449	21.664	25.367	2.274
TiO_2	1.484	1.306	1.458	1.313	1.240	1.403	1.608	1.591	1.240	1.608	1.425	0.135
Fe_2O_3	30.464	30.228	34.906	35.129	26.952	34.603	25.538	33.467	26.952	25.538	31.411	3.725
CuO	0.000	0.058	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.021
SrO	0.476	0.484	0.521	0.484	0.376	0.510	0.386	0.518	0.376	0.386	0.469	0.057

ตารางที่ ฌ.4 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 และชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 8 ตัวอย่างที่ 2

Sample	8 % Biomass_Limestone_2										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.334	1.002
MgO	0.000	0.000	0.000	3.837	0.000	0.002	0.552	0.000	0.000	3.837	0.488	1.269
Al_2O_3	5.557	6.735	5.488	6.871	7.342	7.401	7.044	6.386	7.140	6.871	6.663	0.717
SiO_2	24.921	25.636	19.848	25.074	22.560	24.882	24.974	21.320	23.512	25.074	23.636	1.998
S	7.311	7.340	6.630	6.917	7.152	7.454	6.507	7.388	7.869	6.917	7.174	0.427
K_2O	0.829	0.795	0.549	0.682	0.751	0.708	0.848	0.690	0.812	0.682	0.740	0.094
CaO	29.219	26.129	29.742	26.194	25.379	26.904	21.343	29.760	27.681	26.194	26.928	2.658
TiO_2	1.905	1.353	1.525	1.474	1.397	1.299	1.666	1.386	1.461	1.474	1.496	0.187
Fe_2O_3	29.766	31.049	35.634	28.121	34.352	27.779	36.012	32.165	30.897	28.121	31.753	3.047
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SrO	0.383	0.382	0.439	0.380	0.613	0.439	0.447	0.438	0.399	0.380	0.436	0.072

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ฌ.5 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 และชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 10

Sample	10 % Biomass_Limestone_1										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.000	1.343	0.016	6.273	0.000	0.000	0.000	0.848	2.082
MgO	0.000	0.000	0.000	0.000	2.732	3.287	0.332	2.364	0.000	0.000	0.968	1.393
Al_2O_3	9.178	6.355	8.472	8.783	6.794	8.322	7.345	7.881	7.637	9.178	7.863	0.928
SiO_2	22.263	21.581	23.762	28.021	24.597	26.718	21.821	23.888	21.018	22.263	23.741	2.395
S	7.858	9.118	7.821	7.440	7.529	7.334	7.045	7.916	7.413	7.858	7.719	0.595
K_2O	0.661	0.641	0.648	0.932	0.665	0.667	0.634	0.754	0.657	0.661	0.695	0.095
CaO	25.538	30.735	23.352	21.032	23.861	22.983	22.603	23.113	26.882	25.538	24.455	2.898
TiO_2	1.550	1.502	1.811	2.087	1.367	1.417	1.524	1.542	1.585	1.550	1.598	0.221
Fe_2O_3	32.015	29.501	32.946	30.907	30.359	28.628	31.413	31.914	33.809	32.015	31.277	1.632
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SrO	0.453	0.366	0.599	0.407	0.347	0.522	0.447	0.478	0.423	0.453	0.449	0.078

ตารางที่ ฌ.6 ผลการทดสอบเถ้าของถ่านหินผสมหินปูนในอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและกำมะถันเท่ากับ 1.93 : 1 และชีวมวลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 15

Sample	15 % Biomass_Limestone_1										Avg.	SD
Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Na_2O	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.867	2.857	0.572	1.207
Al_2O_3	7.448	7.597	7.640	7.646	7.531	6.277	7.636	6.452	7.671	7.430	7.333	0.519
SiO_2	25.003	22.192	23.797	29.678	23.461	27.499	20.739	24.033	23.417	25.695	24.551	2.580
S	8.510	7.946	7.956	7.974	8.836	8.530	8.451	8.239	8.261	8.862	8.357	0.341
K_2O	1.081	1.031	0.935	1.093	0.880	0.898	0.920	0.937	0.820	0.940	0.954	0.088
CaO	20.504	20.699	22.812	23.007	23.625	20.463	22.195	22.213	18.601	20.231	21.435	1.570
TiO_2	1.996	1.553	1.568	1.692	1.513	1.837	1.591	1.348	1.535	2.020	1.665	0.220
Fe_2O_3	34.625	37.961	34.399	28.504	33.287	33.557	37.413	35.769	36.307	31.004	34.283	2.895
CuO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SrO	0.354	0.429	0.321	0.286	0.342	0.444	0.431	0.392	0.405	0.422	0.383	0.054

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภาคภูมิ ยินดีสิทธิ์ เกิดวันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2528 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2556 เข้าร่วมงานการประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยบัณฑิตศึกษาระดับชาติและนานาชาติ 2559 (The National and International Graduate Research Conference 2016 (NIGRC2016)) ชื่อบทความ "ฟลูแก๊สดีซัลเฟอไรเซชันโดยใช้หินปูนระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน (Flue Gas Desulfurization using limestone during coal combustion) มหาวิทยาลัยของแก่น วันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2559

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University