



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การประยุกต์ใช้ฟองขนาดเล็กสำหรับล้างทำความสะอาดผงถ่านหิน

Application of Microbubbles for Cleaning Coal Powder

ประไพพิศ ทาวอนศรี สมชาย แซ่เอ็ง มักตาร์ แวหะยี่ และ ชยุต นันทดุสิต*

Prapaipis Tawonsri Somchai Saeung Makatar Wae-hayee and Chayut Nuntadusit*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,

Hatyai, Songkhla, 90110, Thailand

Received: 10 พ.ย.61

Accepted: 21 ธ.ค.61

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการล้างและแยกผงถ่านหินในคอลัมน์ลอยแร่แบบไหลวน โดยใช้ผงถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะที่มีขนาดเล็กกว่า 250 ไมครอน ล้างและแยกโดยใช้ฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอนที่สร้างจากหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ ซึ่งในการทดลองฟองอากาศที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ในช่วง 54-57 ไมครอน และในการศึกษาล้างและแยกถ่านหิน พบว่าฟองอากาศขนาดเล็กสามารถจับกับผงถ่านหินและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ โดยที่เมื่อเทียบกับถ่านหินก่อนล้าง สามารถลดปริมาณถ่านหินได้ 20.5% และสามารถเพิ่มค่าความร้อนในถ่านหินให้สูงขึ้น 21.7%

คำสำคัญ : ฟองอากาศขนาดเล็ก การล้างถ่านหิน คอลัมน์ลอยแร่ หัวฉีดอีเจ็คเตอร์

Abstract

The purpose of the research is to study the cleaning and separation of coal powder in circulation flotation column. The lignite coal from Mae Moh Mine with sizing smaller than 250 microns was studied and then cleaned and separated coal powder using the microbubbles, which generated by ejector nozzle. The average microbubble size was about 54-57 microns. In the cleaning process

for coal powder, small air bubbles can catch the coal powder and float to the water surface in the column. When compared to the coal powder before washing, the amount of ash can be decrease about 20.5% and the heating value of coal can be increased to 21.7%.

Keywords : Microbubble Cleaning coal Column flotation Ejector nozzle

*ติดต่อ: chayut.n@psu.ac.th, โทรศัพท์ 0-7428-7035, โทรสาร 0-7455-8830

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงหลักสำหรับการผลิตไฟฟ้า ซึ่งในอนาคตปริมาณเชื้อเพลิงสำรองของก๊าซธรรมชาติเหล่านี้นี้มีแนวโน้มที่ลดลงไม่เพียงพอต่อการใช้งานในประเทศ อาจจำเป็นต้องใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงแทน เนื่องจากมีต้นทุนราคาถูกเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น ถึงแม้ว่าถ่านหินยังไม่เป็นที่ยอมรับจากสังคม เนื่องจากส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น แต่ปัจจุบันได้มีการพัฒนาโดยนำถ่านหินมาใช้ควบคู่กับเทคโนโลยีถ่านหินสะอาด (Clean coal technology) เพื่อทำให้มลพิษที่เกิดจากการใช้ถ่านหินลดลง

เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด คือ เทคโนโลยีเพิ่มประสิทธิภาพในการทำเหมืองถ่านหิน การจัดการถ่านหินก่อนนำมาใช้ และการใช้ประโยชน์ถ่านหินให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด เทคโนโลยีเหล่านี้เกี่ยวข้องกับการลดหรือกำจัดมลพิษที่เกิดขึ้นจากการนำถ่านหินมาใช้ประโยชน์ รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งโดยทั่วไปเทคโนโลยีถ่านหินสะอาดสามารถนำมาใช้ได้ 3 ลักษณะ ได้แก่ เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดก่อนการเผาไหม้, ขณะเผาไหม้หรือเมื่อนำมาใช้ประโยชน์ และหลังการเผาไหม้ หรือเทคโนโลยีการป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [1-2] สำหรับเทคโนโลยีถ่านหินสะอาดก่อนการเผาไหม้ เป็นการนำถ่านหินมา

ผ่าน กระบวนการเพื่อลดปริมาณกำมะถันและซีเถ้า แบ่งออกเป็น 3 วิธี ได้แก่

(1) การทำความสะอาดโดยวิธีทางกายภาพ (Physical cleaning or Washing) เป็นการแยกสารที่ไม่ต้องการ เช่น ผุพังของ ดิน หิน และสารประกอบอนินทรีย์ออกจากเนื้อถ่านหิน โดยใช้ความแตกต่างของความหนาแน่นของถ่านหินกับสารเหล่านี้ นอกจากนี้คอลัมน์สำหรับลอยแร่ (Flotation column) ยังเป็นวิธีทำความสะอาดถ่านหินอีกวิธี ซึ่งอาศัยหลักการที่ผงถ่านหินมีคุณสมบัติทางเคมี คือ ความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และสามารถยึดติดกับฟองอากาศได้ โดยเมื่อให้ฟองอากาศเคลื่อนที่ผ่านผงถ่านหินและน้ำที่บรรจุในคอลัมน์ ผงถ่านหินจะติดขึ้นไปกับฟองอากาศ ทำให้สารประกอบอนินทรีย์และแร่ธาตุต่างๆ จมอยู่ชั้นล่าง

(2) การทำความสะอาดโดยวิธีทางชีวภาพ (Biological cleaning) ใช้สิ่งมีชีวิต เช่น แบคทีเรียและเชื้อรา ในการกำจัดกำมะถันในถ่านหิน

(3) การทำความสะอาดโดยวิธีทางเคมี (Chemical cleaning) เป็นการใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติชะล้างแร่ธาตุและกำมะถันอินทรีย์ ซึ่งไม่สามารถกำจัดได้โดยวิธีทางกายภาพ ในการทำปฏิกิริยากับผงถ่านหินเพื่อกำจัดกำมะถันและซีเถ้า

สำหรับอุปกรณ์ในการล้างถ่านหินที่เรียกว่าคอลัมน์ลอยแร่ (Flotation column) มีลักษณะเป็น

หอยจะกลืนลอย แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนล่าง ติดตั้งตัวกำเนิดฟองและท่อระบายน้ำทิ้ง ส่วนกลาง เป็นคอลัมน์ทำหน้าที่ล้างผิวด้านหินและฟองอากาศ จะลอยสู่ด้านบนพร้อมกับดักจับอนุภาคผิวด้านหิน ส่วนบนสุดผิวด้านหินขนาดเล็กที่สะอาดจะรวมตัวกัน ก่อนที่จะล้นไหลออกนอกหอยจะกลืนลอย โดยด้านบน จะมีการป้อนผิวด้านส่งคอลัมน์ ซึ่งขนาดและจำนวน ของฟองอากาศจะมีผลต่อความสามารถดักจับผิวด้าน ขนาดต่างๆ โดยฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่จะสามารถ ดักจับอนุภาคผิวด้านที่มีขนาดใหญ่ได้ แต่ไม่สามารถ ดักจับผิวด้านที่มีขนาดเล็กได้

ฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน (Microbubbles) คือ ฟองอากาศขนาดเล็กที่ถูกสร้างขึ้นผสมอยู่ใน ของเหลว โดยฟองอากาศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เล็กกว่า 1,000 ไมครอน (1 มิลลิเมตร) ทำให้มีพื้นที่ ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของฟองที่ค่อนข้างสูง และมีแรง ลอยตัวที่ต่ำทำให้สามารถไหลไปกับของเหลวที่อยู่ รอบได้นานกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ นอกจากนี้ผิว ของฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอนจะไม่รวมตัว กันเป็นฟองขนาดใหญ่ จึงทำให้ฟองอยู่ในของเหลวได้นานกว่าปกติ และผิวของฟองที่มีประจุเป็นลบยังมี คุณสมบัติติดกับอนุภาคของแข็งได้ สำหรับ หลักการในการสร้างฟองอากาศมีหลายรูปแบบ เช่น แบบใช้การไหลหมุนควงของน้ำตัดย่อยฟองอากาศ (Swirl liquid flow) แบบใช้การไหลผ่านตัวกำเนิด ฟองอากาศแบบหัวฉีดเวนทิวรี (Venturi nozzle) แบบใช้ตัวกำเนิดฟองอากาศแบบหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ (Ejector nozzle) และแบบใช้การอัดแก๊สด้วยความดันสูง และลดความดันกะทันหัน (Pressurized dissolution) เป็นต้น [3-7]

ปัจจุบันถ่านหินที่ได้จากการขุดเหมืองต้องผ่าน การล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเพื่อล้างสิ่งสกปรก ออกจากถ่านก่อนเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ ใน การบำบัดน้ำทิ้ง ถ่านหินที่ผสมอยู่ในน้ำทิ้งที่มีขนาด ค่อนข้างหยาบจะสามารถกรองแยกออกจากน้ำได้ง่าย แต่ผิวด้านหินที่มีขนาดเล็กในช่วง 30-40 ไมครอน ไม่สามารถแยกออกจากน้ำทิ้งได้ จึงก่อให้เกิดปัญหา สิ่งแวดล้อม และการสูญเสียถ่านหินที่ผสมอยู่ในน้ำทิ้ง

ดังนั้นในงานวิจัยจึงสนใจการทำทำความสะอาด โดยวิธีทางกายภาพ ซึ่งวิธีนี้สามารถทำความสะอาด ถ่านหินได้ในปริมาณมาก และใช้ระยะเวลาใน การกำจัดกัมมะถันหรือสิ่งสกปรกน้อยกว่าการทำ ความสะอาดโดยวิธีทางเคมีและวิธีทางชีวภาพ รวมทั้ง ยังสามารถลดต้นทุนการใช้สารเคมีสำหรับกำจัด กัมมะถันได้อีกด้วย นอกจากนี้ในงานวิจัยมีแนวคิดที่ จะประยุกต์ใช้ฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน โดยอาศัยการไหลของน้ำผ่านหัวฉีด อีเจ็คเตอร์ (Ejector nozzle) ซึ่งเป็นหัวฉีดที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อน และยังสามารถควบคุมขนาดและปริมาณของ ฟองอากาศได้ สำหรับการทำความสะอาดผิวด้านหิน และแยกผิวด้านหินในคอลัมน์ลอยแร่ (Flotation column) นอกจากนี้ยังออกแบบให้คอลัมน์เป็นระบบ น้ำไหลวน เพื่อเพิ่มระยะเวลาให้ฟองอากาศขนาดเล็ก สามารถอยู่ในน้ำได้นานขึ้น และเพิ่มความสามารถใน การล้างและแยกผิวด้านหินที่มีขนาดอนุภาคเล็กได้ อย่างมีประสิทธิภาพ

2. วิธีการวิจัย

2.1 รายละเอียดตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก

รูปที่ 1 แสดงตัวกำเนิดฟองอากาศที่ใช้ในงานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ วัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน (Porous stones) หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ (Ejector nozzle) และใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน (Pressure tank) โดยหัวทรายแบบจานจะมีลักษณะเป็นวัสดุพูน เมื่ออัดอากาศผ่านวัสดุพูนจะทำให้อากาศเกิดการแตกตัวเป็นฟองที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ส่วนหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์มีลักษณะเป็นท่อที่มีการลดและขยายหน้าตัด ทำจากข้อลดพีวีซีขนาด 1 นิ้ว x 1/2 นิ้ว เจาะรูขนาด 1/4 นิ้ว ไว้ตรงตำแหน่งที่มีการลดขนาดของพีวีซี (คอคออด) สำหรับให้ดูดอากาศเข้ามายังหัวฉีด โดยฟองอากาศที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่าที่ได้จากแบบวัสดุพูน นอกจากนี้เมื่อนำหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์มาใช้คู่กับถังความดัน โดยการปรับเพิ่มความดันในถังทำให้อากาศละลายในน้ำได้มากขึ้น และเมื่อน้ำไหลออกจากท่อความดันน้ำจะลดลงส่งผลให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก



(ก) วัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน

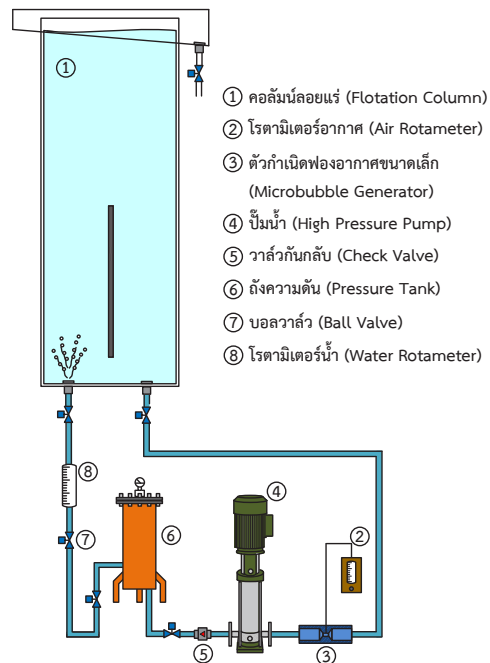


(ข) หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์

รูปที่ 1 รูปแบบตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก

2.2 รายละเอียดชุดทดลองสำหรับการล้างถ่านหิน

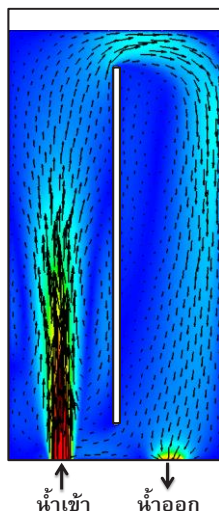
รูปที่ 2 แสดงแผนภาพชุดทดลองสำหรับการล้างและแยกผงถ่านหิน ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ คอลัมน์ลอยแร่แบบไหลวนและชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก สำหรับคอลัมน์ลอยแร่เป็นตู้สี่เหลี่ยมทำจากกระจกใส ขนาดความกว้าง 12.5 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร และสูง 75 เซนติเมตร ตรงกลางติดแผ่นกั้นขนาดความกว้าง 12.5 เซนติเมตร ใต้เหนือฐานของคอลัมน์ 5 เซนติเมตร ด้านล่างของฐานคอลัมน์จะเจาะรูขนาด 1 นิ้ว จำนวน 2 รู ต่อเข้ากับสำหรับทางเข้าและออกของน้ำที่เชื่อมต่อกับชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมโครนอน เพื่อให้เกิดการไหลวนช่วยเพิ่มโอกาสที่ฟองอากาศสามารถจับกับผงถ่านหินได้นานขึ้น



รูปที่ 2 แผนภาพชุดทดลองสำหรับการล้างและแยกผงถ่านหิน

สำหรับชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กประกอบด้วย หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ซึ่งทำหน้าที่ดึงอากาศเข้าในระบบ โดยอัตราการไหลของอากาศสามารถควบคุมโดยโรตาริเตอร์ที่มีวาล์วปรับอัตราการไหล บั๊มน้ำทำหน้าที่เพิ่มความดันน้ำสะสมในถังความดัน ก่อนที่จะไหลผ่านโรตาริเตอร์สำหรับวัดและควบคุมอัตราการไหลของน้ำ

รูปที่ 3 แสดงเวกเตอร์ความเร็วและการกระจายความเร็วของน้ำภายในคอลัมน์ลอยแร่ที่ใช้ในการศึกษา พบว่าเกิดการหมุนเวียนของน้ำในคอลัมน์ น้ำบางส่วนจะไหลสู่ทางออกของคอลัมน์ แต่บางส่วนจะถูกดึงโดยการไหลของน้ำจากท่อทางเข้าเกิดการไหลเวียนในคอลัมน์ต่อไป



รูปที่ 3 ลักษณะการไหลวนของน้ำในคอลัมน์ลอยแร่

2.3 ขั้นตอนสำหรับล้างถ่านหิน

ในการทดลองล้างถ่านหินจะใช้คอลัมน์ลอยแร่แบบไหลวน ซึ่งถ่านหินจะถูกป้อนจากตำแหน่งบนสุดของคอลัมน์ เมื่อล้างได้ตามเวลาที่กำหนดแล้ว จะเก็บถ่านหินส่วนที่ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำด้านบนหรือหัวแร่

(Concentrate) และถ่านหินส่วนที่จมหรือหางแร่ (Tailings) ซึ่งอยู่ด้านล่างของคอลัมน์ โดยใส่ภาชนะที่เตรียมไว้ จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้น ถ่านหินที่อบแห้งเสร็จแล้วไปชั่งน้ำหนักด้วยตาชั่งดิจิทัล สำหรับรายละเอียดในการทดลองล้างถ่านหิน จะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ

(1) การลดขนาดหรือการบดถ่านหิน

ถ่านหินที่ใช้ทดสอบเป็นถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ถ่านหินที่ได้มาเป็นใหญ่และละเอียดปะปนกัน ต้องบดถ่านหินเพื่อให้มีขนาดเล็กลงเหมาะสำหรับการล้าง ซึ่งขั้นตอนการบดเริ่มจากการป้อนถ่านหินขนาดใหญ่เข้าเครื่องย่อย (Crushing) และเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) เพื่อได้ถ่านหินเป็นก้อนขนาดเล็ก จากนั้นป้อนถ่านหินเข้าเครื่องบดแบบบอลมิลล์ (Ball mill) ขั้นตอนนี้ถ่านหินที่ได้จะมีขนาดละเอียดมาก (ผงแป้ง) นำถ่านหินละเอียดใส่ในตะแกรงคัดแยกขนาด (Standard sieve) และใช้เครื่องเขย่า (Sieve shaker) จนได้ถ่านหินขนาดเล็กกว่า 250 ไมครอน [8-11] ซึ่งถ่านหินที่มีขนาดใหญ่กว่าที่ต้องการ จะนำไปบดละเอียดอีกครั้ง

(2) การเตรียมสภาพถ่านหิน

เริ่มจากนำถ่านหินที่บดแล้วไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นในการเตรียมของผสมโดยใช้ตัวอย่างถ่านหินที่ผ่านการอบแล้วหนัก 1 กิโลกรัม ผสมกับน้ำ 2 ลิตร เทรวมกันในถังปรับสภาพ (Conditioning tank) เปิดเครื่องกวนโดยใช้ความเร็วในการปั่นผสม 620 รอบต่อนาที ซึ่งใช้เวลาในการกวน 1 นาที จากนั้นเติม

น้ำมันก๊าดซึ่งเป็นสารเคลือบผิวแร่ปริมาณ 30 กรัม แล้วกวาดต่ออีก 2 นาที

สำหรับคอลัมน์สำหรับการล้างถ่าน จะเติมน้ำในระบบ 22.5 ลิตร จากนั้นเปิดเครื่องสำหรับสร้างฟองอากาศขนาดเล็กให้ประมาณ 2 นาที โดยควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ 20 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ 0.7 ลิตรต่อนาทีและความดันที่ถึงความดันที่ 6 บาร์ จากนั้นเติมน้ำมันสนซึ่งเป็นสารเคลือบฟองปริมาณ 18 กรัม ลงไปในคอลัมน์ซึ่งมีน้ำที่มีฟองอากาศขนาดเล็ก เพื่อให้ฟองเหนียวไม่แตกง่าย

(3) การล้างและแยกถ่านหิน

รูปที่ 4 แสดงขั้นตอนการล้างและแยกผงถ่านหิน เริ่มจากการนำถ่านหินที่ถูกปรับสภาพไว้แล้ว เทลงไป

ในคอลัมน์ที่มีฟองอากาศขนาดเล็กผสมอยู่ โดยจะเทของผสมผ่านท่อขนาด 1 นิ้ว โดยตำแหน่งปากทางออกของของผสมจะอยู่ต่ำกว่าระดับผิวน้ำ 40 เซนติเมตร ส่วนระยะเวลาที่จะใช้ในการล้างถ่านหินจะเก็บตัวอย่างถ่านหินที่เวลา 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที รูปที่ 5 แสดงลักษณะถ่านหินที่ลอยหรือหัวแร่ (Concentrate) ที่ลอยด้านบนของคอลัมน์ลอยแร่ และนำหัวแร่ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณกำมะถัน (Sulfur) ปริมาณเถ้า (Ash) ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) ปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) และค่าความร้อน (Gross calorific value)



(ก) ฟองอากาศขนาดเล็กในคอลัมน์ลอยแร่



(ข) เริ่มบ่อนถ่านหิน



(ค) ฟองอากาศจับกับถ่านหิน



(ง) ฟองอากาศจับกับถ่านหินเริ่มไหลวนภายในคอลัมน์

รูปที่ 4 ขั้นตอนการล้างและแยกถ่านหิน



(ก) หัวแร่ที่ลอยขึ้นมากับฟองอากาศ



(ข) การสเปรย์น้ำมันหัวแร่เพื่อชะล้างมลทิน



(ค) กวาดหัวแร่ใส่ภาชนะ

รูปที่ 5 ลักษณะการลอยและการเก็บหัวแร่

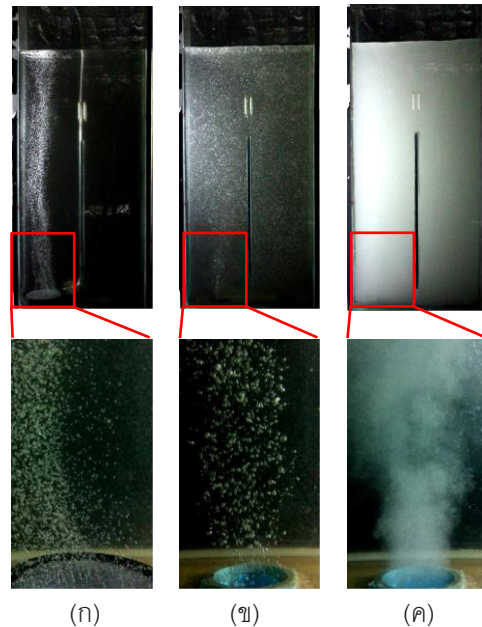
3. ผลการทดลอง

3.1 ภาพถ่ายเปรียบเทียบลักษณะฟองอากาศที่เกิดจากตัวกำเนิดฟอง

ในการทดลองเปรียบเทียบลักษณะฟองอากาศที่เกิดจากตัวกำเนิดฟองอากาศ 3 รูปแบบ ได้แก่ หัวทรายแบบจาน, หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ และใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ร่วมกับการเพิ่มความดันในถังความดัน โดยการทดลองจะควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ 20 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ 0.7 ลิตรต่อนาที รูปที่ 6 แสดงภาพถ่ายเปรียบเทียบลักษณะของฟองอากาศในคอลัมน์ พบว่าตัวกำเนิดฟองอากาศแต่ละรูปแบบ สามารถสร้างฟองอากาศให้มีขนาดเล็กได้ แต่จะมีความแตกต่างกันในแง่ของขนาดและปริมาณฟองอากาศ โดยการอัดอากาศผ่านวัสดุพูนหรือหัวทราย จะเกิดฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่และจะมีอยู่เฉพาะบริเวณที่ใกล้กับตัวกำเนิดฟองอากาศเท่านั้น ฟองอากาศจะไม่สามารถไหลวนหรือสะสมอยู่ในน้ำเป็นเวลานานได้ ส่วนฟองอากาศที่ได้จากหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ จะมีขนาดเล็กและสามารถคงอยู่ในน้ำได้นานกว่าเมื่อเทียบกับการอัดอากาศผ่านหัวทราย นอกจากนี้การใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับการเพิ่มความดันภายในถังความดันที่ 6 บาร์ จะช่วยให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กลงและมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเห็นเป็นลักษณะพุ่งคล้ายกับฟองน้ำนม

ส่วนการวัดขนาดของฟองอากาศที่ได้จากตัวกำเนิดรูปแบบต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ พบว่าการอัดอากาศผ่านวัสดุพูนหรือหัวทราย ฟองอากาศที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 385 ไมครอน ส่วนฟองอากาศที่ได้จากหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์และการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน มีขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ที่ 54 ไมครอน และ 57 ไมครอน ตามลำดับ



รูปที่ 6 ลักษณะการเกิดฟองจากตัวกำเนิดฟองอากาศ

(ก) วัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน,

(ข) หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์

และ (ค) หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังอัดความดัน

3.2 การศึกษาลักษณะการลอยของถ่านหินที่เงื่อนไขการปรับสภาพผิวต่างๆ

ในส่วนนี้จะทดลองเปรียบเทียบลักษณะการลอยของถ่านหินที่เงื่อนไขการปรับสภาพที่แตกต่างกัน โดยใช้ผงถ่านหินขนาด 250 ไมครอน ลอยในน้ำปริมาตร 200 มิลลิลิตร ที่เงื่อนไขการปรับสภาพผิวถ่านตามรายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดและเงื่อนไขที่ใช้เปรียบเทียบการลอยของถ่านหิน

ตัวอย่าง	การปรับสภาพผิวถ่าน	น้ำที่ใช้ลอยถ่าน
ก	ไม่ปรับสภาพ	น้ำเปล่า
ข	ปรับสภาพด้วยสารเคลือบผิวแร่	น้ำเปล่า
ค	ปรับสภาพด้วยสารเคลือบผิวแร่	น้ำที่มีฟองอากาศขนาดเล็กและเพิ่มสารเคลือบฟอง

จากการทดลองพบว่า เมื่อเทถ่านหินที่ไม่ผ่านการปรับสภาพลงไปในน้ำเปล่า รูปที่ 7(ก) ถ่านจะลอยอยู่บนผิวน้ำ เนื่องจากผิวถ่านหินมีคุณสมบัติไม่เปียกน้ำหรือความตึงผิวที่สูง ดังนั้นถ่านหินจึงไม่สามารถจมและผสมกับน้ำได้ ส่งผลให้จับกลุ่มกันลอยอยู่เหนือผิวน้ำ ส่วนในรูปที่ 7(ข) แสดงให้เห็นว่าถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยสารเคลือบผิวแร่ (น้ำมันก๊าด) จากนั้นนำไปลอยในน้ำเปล่าที่ไม่มีฟองอากาศขนาดเล็ก พบว่าถ่านหินจะจมลงด้านล่างภาชนะ เนื่องจากไม่มีฟองอากาศเป็นตัวจับและพยุงถ่านหินให้ลอยขึ้นบนผิวน้ำ ส่วนถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคลือบผิวแร่ นำไปลอยในน้ำที่มีฟองอากาศขนาดเล็กและเพิ่มสารเคลือบฟอง (น้ำมันสน) เพื่อช่วยให้ฟองอากาศมีความเหนียวและไม่แตกง่าย แสดงในรูปที่ 7(ค) พบว่าถ่านหินลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ เป็นผลมาจากฟองอากาศขนาดเล็กสามารถจับกับถ่านหินและช่วยพยุงถ่านหินให้ลอยขึ้นบนผิวน้ำ

ดังนั้นในการทดลองล้างและแยกถ่านหินควรจะปรับสภาพของผิวแร่ก่อน นำไปลอยในน้ำที่มีฟองอากาศขนาดเล็ก ถ่านหินซึ่งมีคุณสมบัติไม่เปียกน้ำจะถูก ฟองอากาศขนาดเล็กจับและพยุงตัวให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ นอกจากนี้มันดินหรือซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติเปียกน้ำจะถูกแยกและจมอยู่ด้านล่าง



(ก) ถ่านหินไม่ได้ปรับสภาพลอยในน้ำเปล่า



(ข) ถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพลอยในน้ำเปล่า



(ค) ถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพลอยในน้ำที่มีฟองอากาศขนาดเล็ก

รูปที่ 7 เปรียบเทียบลักษณะการลอยของถ่านหินที่เงื่อนไขสภาพผิวต่างๆ

3.3 เปรียบเทียบผลการล้างและแยกผงถ่านหินโดยใช้ตัวกำเนิดฟองอากาศรูปแบบต่างๆ

การทดลองล้างและแยกผงถ่านหิน โดยใช้ตัวกำเนิดฟองอากาศ 3 รูปแบบ ได้แก่ วัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน, หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ และใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน พบว่าฟองอากาศที่ได้จากหัวทรายมีขนาดใหญ่ และมีปริมาณฟองอากาศน้อยเมื่อเทียบกับการใช้หัวฉีดอีเจ็คเตอร์ซึ่งฟองที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่า นอกจากนี้การใช้

หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน จะช่วยให้ฟองอากาศมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ฟองอากาศขนาดเล็กสามารถล้างสิ่งสกปรกออกจากถ่านหินและพองถ่านหินให้ลอยขึ้นผิวน้ำได้มากกว่า โดยปริมาณหัวแร่ที่ได้จากหัวทรายแบบจาน, หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ และการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน คือ 83.7 กรัม, 197.8 กรัม และ 244.5 กรัม ตามลำดับ จากนั้นนำหัวแร่ไปวิเคราะห์หาปริมาณส่วนประกอบที่เหลืออยู่หลังจากผ่านการล้าง โดยตารางที่ 2 แสดงปริมาณองค์ประกอบหลักที่อยู่ในถ่านหิน ก่อน-หลัง

ตารางที่ 2 ปริมาณองค์ประกอบในถ่านหิน ก่อน-หลัง การล้างด้วยฟองอากาศขนาดเล็กจากตัวกำเนิดรูปแบบต่างๆ

ถ่านหิน	เถ้า (wt.% db)	สารระเหย (wt.% db)	คาร์บอนคงที่ (wt.% db)
ผงถ่านหินก่อนล้าง (Raw coal)	30.65	44.66	24.69
วัสดุพรุนหรือหัวทรายแบบจาน (Porous stone)	26.29	41.63	32.08
หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ (Ejector nozzle)	24.36	41.71	33.93
หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน (Pressure tank)	25.22	41.83	32.95

*dry basis (db) หมายถึง ความชื้นมาตรฐานแห้ง

3.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหิน

ในการทดลองล้างและแยกผงถ่านหิน ซึ่งใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดันสำหรับสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก โดยการทดลองได้เพิ่มระยะเวลาในการล้างถ่านหิน ดังนี้ 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที พบว่าปริมาณของหัวแร่ที่ซังได้เมื่อผ่านการล้างและแยกมีแนวโน้มลดลง โดยที่เวลาในการล้าง 30 นาที จะได้ปริมาณหัวแร่ที่มากที่สุด คือ 495.6 กรัม โดยที่เวลาในการล้างยิ่งเพิ่มขึ้นจาก 60 ถึง 150 นาที ปริมาณถ่านหินลดลง ได้แก่ 432.4, 375.2, 325.8 และ 242.8 กรัม ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของการไหล โดยน้ำและฟองอากาศ

การล้างด้วยฟองอากาศที่ได้จากตัวกำเนิดฟองอากาศทั้ง 3 รูปแบบ

จากผลการวิเคราะห์ พบว่าฟองอากาศที่ได้จากตัวกำเนิดทั้ง 3 รูปแบบ สามารถลดปริมาณเถ้าและสารระเหยในถ่านหินลงได้ โดยหลังจากการล้างมีปริมาณเถ้าลดลงจากเดิมประมาณ 20% และสารระเหยลดลงประมาณ 6.7% นอกจากนี้ปริมาณคาร์บอนคงที่หลังจากการล้างมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 37.4%

จะพาให้ถ่านหินที่ลอยอยู่บนผิวน้ำเกิดการวกกลับลงด้านล่างของคอลัมน์ นอกจากนี้ยิ่งเวลาในการล้างถ่านหินเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ถ่านหินที่ลอยค่อยๆ จมลงมากขึ้นเช่นกัน

จากนั้นนำหัวแร่ไปวิเคราะห์หาปริมาณส่วนประกอบที่เหลืออยู่หลังจากผ่านการล้าง ประกอบไปด้วยปริมาณกำมะถัน (Sulfur), ปริมาณเถ้า (Ash), ปริมาณสารระเหย (Volatile matter), ปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) และค่าความร้อน (Gross calorific value) ที่อยู่ในถ่านหิน ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณองค์ประกอบในถ่านหิน ก่อน-หลัง การล้างด้วยฟองอากาศขนาดเล็กที่เวลาต่างๆ

ถ่านหิน	เวลา (นาทีก)	กำมะถัน (wt.% db)	เถ้า (wt.% db)	สารระเหย (wt.% db)	คาร์บอนคงที่ (wt.% db)	ค่าความร้อน (MJ/kg)
Raw Coal	-	7.91	42.11	43.00	14.89	15.09
Concentrate	30	7.54	36.30	44.45	19.25	17.25
(หัวแร่)	60	7.50	37.26	43.06	19.66	17.02
	90	7.68	37.82	43.78	18.40	16.72
	120	7.35	34.79	43.98	21.23	17.59
	150	7.73	33.49	44.47	22.04	18.37

* dry basis (db) หมายถึง ความชื้นมาตรฐานแห้ง

ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบหลักที่อยู่ในถ่านหินตามเปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ซึ่งผลการวิเคราะห์ปริมาณกำมะถัน พบว่าระยะเวลาในการล้างถ่านหินที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณกำมะถันมีค่าลดลงในทุกกรณีและมีค่าที่ใกล้เคียงกัน อาจกล่าวได้ว่ากำมะถันอาจอยู่ในรูปของสารประกอบที่ฝังอยู่ในเนื้อถ่านหิน ทำให้ฟองอากาศขนาดเล็กไม่สามารถแยกกำมะถันออกจากถ่านหินได้ โดยปริมาณมีค่าลดลง 7.1%

ส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าที่อยู่ในถ่านหิน พบว่าระยะเวลาในการล้างถ่านหินที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เถ้าลดลง ประมาณ 20.5% เนื่องจากระยะเวลาที่ถ่านหินอยู่ในน้ำมีมากขึ้น ทำให้ฟองอากาศขนาดเล็กสามารถแยกมลทินหรือสิ่งเจือปนออกจากถ่านหินได้มากขึ้นเช่นเดียวกัน

สำหรับปริมาณสารระเหย พบว่าระยะเวลาในการล้างถ่านหินที่เพิ่มขึ้น มีผลให้ปริมาณสารระเหยในหัวแร่เพิ่มขึ้นจากเดิม 3.4%

นอกจากนี้เมื่อเวลาในการล้างถ่านหินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ฟองอากาศขนาดเล็กสามารถกำจัดมลทินหรือสิ่งเจือปนออกจากถ่านหินได้มาก จึงได้หัวแร่ที่สะอาดขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณคาร์บอนคงที่เพิ่มขึ้นประมาณ 48% นอกจากนี้ยังส่งผลต่อค่าความร้อนใน

ถ่านหินที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากเดิมถึง 21.7%

4. สรุปผลการทดลอง

- (1) ขนาดของฟองอากาศที่เกิดจากการอัดอากาศผ่านวัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจานจะมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดฟองอากาศที่ได้จากหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ นอกจากนี้การใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับการเพิ่มความดันในถังความดัน จะช่วยให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กลง
- (2) จำเป็นต้องมีการปรับสภาพถ่านหินก่อนการล้าง ช่วยให้ฟองอากาศขนาดเล็กสามารถจับกับถ่านหินได้ง่ายขึ้น เหมาะแก่การลอย
- (3) เนื่องจากการอัดเพิ่มความดันในถัง ช่วยให้ปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กมีมากขึ้น ทำให้โอกาสที่ฟองอากาศขนาดเล็กจะจับกับผงถ่านหินมีมากขึ้น ดังนั้นหัวแร่ที่ได้จากการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับการเพิ่มความดันในถังความดัน จะได้ปริมาณหัวแร่มากที่สุด เมื่อเทียบกับการใช้วัสดุพูนหรือหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ในการสร้างฟองอากาศ
- (4) ระยะเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหินด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก พบว่ามีผลต่อการลดปริมาณ

สิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการออกได้ เช่น เถ้า เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความร้อนในถ่านหินให้สูงขึ้น โดยที่เมื่อเทียบกับถ่านหินก่อนล้าง สามารถลดปริมาณเถ้าลงได้ 20.5% และสามารถเพิ่มความร้อนในถ่านหินให้สูงขึ้น 21.7%

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนทุนการวิจัยและเชื้อเพลิงสถานที่ทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณบุคลากรและเจ้าหน้าที่ เหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จ.ลำปาง ที่ให้การอนุเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ ตลอดจนกระบวนการวิเคราะห์และผลวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Paulina P. Clean Coal Technologies in every stage of coal production in polish industry. Mining Science. 2015; 22: 113-124.
- [2] Blaschke W. Clean Coal Technologies start to beneficiation. Energy Policy. 2008; 11(2): 7-13.
- [3] Terasaka K, Hirabayashi A, Nishino T, Fujioka S, Kobayashi D. Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge. Chemical Engineering Science. 2011; 66: 3172-3179.
- [4] Parmar R, Majumder SK. Microbubble generation and microbubble-aided transport process intensification-A state-of-the-art report. Chemical Engineering and Processing. 2013; 64: 79-97.
- [5] Mori Y. Micro-Bubble Generator. United States Patent US 9061256 B2. 2015.
- [6] Maeda Y, Hosokawa S, Baba Y, Tomiyama A, Ito Y. Generation mechanism of micro-bubbles in a pressurized dissolution method. Experimental Thermal and Fluid Science. 2015; 60: 201-207.
- [7] Iwaki C, Aoki K, Komita H. Microbubble generating apparatus and method. United States Patent US 8678356 B2. 2010.
- [8] Black and Veatch. Power Plant Engineering book.
- [9] Qian Z. Coal sampling and analysis standards. 2014.
- [10] ASTM D2013: Standard Method of Preparing Coal Sample for Analysis.
- [11] Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal.