



การศึกษาใช้ฟองอากาศระดับไมครอนสำหรับล้างทำความสะอาดผงถ่านหิน  
Study of Microbubble for Cleaning Coal Powder

ประไพพิศ ถาวรศรี  
Prapaipis Tawonsri

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering  
Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การศึกษาใช้ฟองอากาศระดับไมครอนสำหรับล้างทำความสะอาดผงถ่านหิน  
Study of Microbubble for Cleaning Coal Powder

ประไพพิศ ถาวรศรี  
Prapaipis Tawonsri

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์      การศึกษาใช้ฟองอากาศระดับไมครอนสำหรับล้างทำความสะอาดผง่านหิน  
ผู้เขียน                นางสาวประไพพิศ ถาวรศรี  
สาขาวิชา              วิศวกรรมเครื่องกล

---

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทคุสิต)

.....ประธานกรรมการ  
(ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทคุสิต)

.....กรรมการ  
(ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประसान สถิตย์เรืองศักดิ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา  
วิศวกรรมเครื่องกล

.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้างู่งสง)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นางสาวประไพพิศ ถาวรศรี)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวประไพพิศ ถาวรศรี)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาใช้ฟองอากาศระดับไมครอนสำหรับล้างทำความสะอาดผงถ่านหิน
ผู้เขียน	นางสาวประไพพิศ ถาวรศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2561

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันประเทศไทยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงหลักสำหรับการผลิตไฟฟ้า ซึ่งในอนาคตปริมาณก๊าซธรรมชาติมีแนวโน้มลดลง แต่ยังคงมีแหล่งเชื้อเพลิงสำรองจากถ่านหิน ซึ่งเป็นถ่านหินลิกไนต์อยู่เป็นจำนวนมากและมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น แม้ว่าเชื้อเพลิงถ่านหินยังไม่เป็นที่ยอมรับ อีกทั้งมีสภาพลักษณะที่ไม่ดีด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ได้มีการพัฒนาการนำถ่านหินมาใช้ควบคู่กับเทคโนโลยีถ่านหินสะอาด เพื่อทำให้มลพิษที่เกิดจากการใช้ถ่านหินลดลง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ฟองอากาศระดับไมครอนสำหรับล้างทำความสะอาดผงถ่านหิน ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวกำเนิดฟองอากาศ 3 รูปแบบ ได้แก่ วัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ และการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน ในการสร้างฟองอากาศระดับไมครอน ซึ่งพบว่าขนาดของฟองอากาศที่เกิดจากการอัดอากาศผ่านวัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน มีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ในการสร้างฟองอากาศ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองอากาศจากหัวทรายแบบจานและหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ประมาณ 385 ไมครอน และ 85 ไมครอน ตามลำดับ ส่วนการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน นอกจากฟองอากาศที่ได้มีขนาดเล็กแล้ว ยังสามารถเพิ่มปริมาณฟองอากาศในระบบได้โดยการเพิ่มความดันในถังอัด ช่วยให้อากาศสามารถละลายในน้ำได้มากขึ้น พบว่าที่ความดันอากาศในถังอัด 6 บาร์ ขนาดของฟองอากาศมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 38-40 ไมครอน นอกจากนี้ยังศึกษาลักษณะการไหลของไหลภายในคอลัมน์ลอยแร่ ซึ่งมีการติดตั้งแผ่นกั้นกลางสำหรับแบ่งช่องการไหล จากการทดลองพบว่าความสูงของแผ่นกั้น 50 เซนติเมตร ช่วยให้ของไหลไหลได้ทั่วทั้งคอลัมน์มากกว่าแผ่นกั้น 35 เซนติเมตร เนื่องจากของไหลสามารถเคลื่อนที่ในช่องการไหลฝั่งเดียวกับทางเข้าได้นานกว่า ก่อนการวนกลับมาอีกฝั่งของช่องการไหล สำหรับการศึกษผลของการล้างและแยกผงถ่านหินด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก จะใช้ถ่านหินลิกไนต์ขนาดเล็กกว่า 250 ไมครอน ปริมาณ 1 กิโลกรัมผสมกับน้ำ 2 ลิตร เติมน้ำมันดีเซลปริมาณ 8 กิโลกรัมต่อตันของถ่านหิน เพื่อปรับสภาพผิวถ่านหินและเติมน้ำมันสนปริมาณ 0.15 กิโลกรัมต่อตันของถ่านหินเพื่อปรับสภาพผิวฟองอากาศลงในคอลัมน์ลอยแร่ที่มีน้ำ 22.5 ลิตร กำหนดให้อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 20 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.7 ลิตรต่อนาที โดยเปรียบเทียบผลการล้างและแยกผงถ่านหินด้วย

ฟองอากาศที่เกิดจากตัวกำเนิดฟองทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าหัวแร่ที่เก็บได้มีปริมาณที่แตกต่างกัน โดยการ  
ใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน มีผลทำให้หัวแร่ที่ได้มีปริมาณมากที่สุด รองลงมา คือ  
ฟองอากาศจากหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์และวัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน ตามลำดับ นอกจากนี้ยัง  
พบว่าฟองอากาศขนาดเล็กสามารถจับกับผงถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 150 ไมครอน ได้มากถึงร้อยละ  
93.1 ของปริมาณถ่านหินทั้งหมด ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบในถ่านหิน พบว่า  
ปริมาณซัลเฟอร์และปริมาณสารระเหยมีค่าลดลงใกล้เคียงกันประมาณ 20.5% และ 14.4% ตามลำดับ  
ในขณะที่เดียวกันช่วยให้ปริมาณคาร์บอนคงที่ในถ่านหินมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 26.0% ส่วนการศึกษา  
การล้างและแยกผงถ่านหินกรณีความดันภายในถังอัดความดันเพิ่มขึ้นจาก 3 บาร์ เป็น 6 บาร์ พบว่า  
หัวแร่ที่เก็บได้มีปริมาณมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังสามารถลดปริมาณซัลเฟอร์และสารระเหย  
ในถ่านหินลงได้ประมาณ 45.5% และ 21.5% ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันช่วยให้ปริมาณคาร์บอน  
คงที่ในถ่านหินมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 38.8% อย่างไรก็ตามการเพิ่มระยะเวลาที่ใช้ในการล้างและแยก  
ผงถ่านหิน จากการทดลองพบว่าหัวแร่ที่ได้มีปริมาณลดลง ในขณะที่ปริมาณองค์ประกอบมีอยู่ในถ่าน  
หิน ได้แก่ ปริมาณซัลเฟอร์ ปริมาณซัลเฟอร์ และปริมาณสารระเหยมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน คือ 20.3%,  
13.9% และ 11.5% ตามลำดับ ในทางกลับกันระยะเวลาในการล้างและแยกผงถ่านหินเพิ่มขึ้น  
สามารถเพิ่มปริมาณคาร์บอนคงที่ให้เพิ่มขึ้นประมาณ 33.1% และค่าความร้อนในถ่านหินเพิ่มขึ้น  
9.3%

<b>Thesis Title</b>	Study of Microbubble for Cleaning Coal Powder
<b>Author</b>	Miss Prapaipis Tawonsri
<b>Major Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Academic Year</b>	2018

### ABSTRACT

At this time, Thailand has been using natural gas as its main fuel in electricity generation at the present time. A number of these reserved natural gases are likely to be dramatically decreased in the future. However, Thailand also has abundance of another fuel resource, which the lignite coals that are considered lower quality but cheaper compared to other fuel resources. Even though the coals is not fully accepted and bad reputation for its harmful impact on environment, it is being developed and used with Clean Coal Technology in order to lower the pollution from the coal combustion. The objective of this research is to apply microbubble for coal cleaning. In this study, the microbubble was produced by three different bubble generators: porous stones, ejector nozzle and ejector nozzle combine with pressure tank. The result shows that the size of bubbles produced by porous stones are appeared larger compares to the bubbles produced by the ejector nozzle are smallest. The average diameter of the bubbles from the porous stones and the ejector nozzle is about 385  $\mu\text{m}$  and 85  $\mu\text{m}$ , respectively. In addition, the bubbles from using the ejector nozzle combine with pressure tank are the smallest. The water becomes milky due to the presence of a lot of fine microbubbles. It was found that for case of pressure at 6 bar in compressed tank, the average diameter of the bubbles was 38-40  $\mu\text{m}$ . In addition, the flow characteristics within the flotation column was studied, which the glass plate was installed at the central for dividing the flow channel. From the experiment, it was found that the height of the 50 cm glass plate allows the fluid to flow across the column longer than the 35 cm glass plate. Because the fluid can move in the first flow channel as the entrance is longer before recirculating back to the other side of the flow channel. For the study of cleaning and separating coal powder, the lignite coal samples were crushed to



smaller than 250  $\mu\text{m}$ . The 1 kg of coal powder mixed with 2 litre of water was added with diesel oil as collector for 8 kg/tons of coal and pine oil was added as frother for 0.15 kg/tons of coal. After that, the coal slurry was fed into the flotation column containing water of 22.5 liters. The water flow rate and air flow rate were kept constant at 20 litre/min and 0.7 litre/min, respectively. Moreover, the result of cleaning and separating coal powder was also investigated by using 3 bubble generators in order to carry the coal to the water surface or coals concentrate. For the coal cleaning, it is found that the bubbles from the ejector nozzle combined with pressure tank can carry largest amount of coal powder to the water surface. The ejector nozzle and porous stones can separate lesser coal. In addition, microbubbles can be caught with the coal powder smaller than 150  $\mu\text{m}$ , up to 93.1 percent of the total coal volume. While the proximate analysis of components in separated coal, it was found that the ash content and volatile matter content were decreased about 20.5% and 14.4%, respectively. On the other hand, the fixed carbon was increasing about 26.0%. In case of increasing pressure in the pressure tank from 3 bar to 6 bar, it was found that the coals concentrate was significantly increased. In addition, the ash content and volatile matter content were decreased about 45.5% and 21.5%, respectively. On the other hand, the fixed carbon was increasing about 38.8%. However, increasing the flotation time for cleaning and separating coal powder, the results show that the coals concentrate had decreased. While the ash content, sulfur content and volatile matter content were also decreased about 20.3%, 13.9% and 11.5%, respectively. On the other hand, the fixed carbon was increasing about 33.1% and the gross calorific value in coal was increases to 9.3%.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยเสนอแนะแนวทางและเสียสละเวลาในการดำเนินการทำวิจัยอย่างใกล้ชิด รวมถึงการช่วยตรวจสอบ แก้ไขวิทยานิพนธ์จนถูกต้องสมบูรณ์ ขอขอบคุณ ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ และ รองศาสตราจารย์ ดร. ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์ ที่ให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ บุคลากรภายในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้การทำวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วย

ขอขอบพระคุณบุคลากรและเจ้าหน้าที่เหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จังหวัดลำปาง ที่ให้การอนุเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ ผลวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการทดสอบ ตลอดจนการถ่ายทอดความรู้ในกระบวนการวิเคราะห์ผลที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนทุนการทำวิจัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้เอื้อเฟื้อทุนการศึกษา และสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ประไพพิศ ถาวรศรี

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(10)
บทคัดย่อ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
รายการตาราง	(13)
รายการภาพประกอบ	(14)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(19)
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ</b>	<b>6</b>
2.1 เชื้อเพลิงถ่านหิน	6
2.2 เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด (Clean Coal Technology)	7
2.2.1 เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดก่อนการเผาไหม้ (Pre-Combustion)	7
2.2.2 เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดขณะเผาไหม้หรือเมื่อนำไปใช้ประโยชน์ (Combustion)	8
2.2.3 เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดหลังการเผาไหม้ (Post-Combustion) หรือเทคโนโลยีการป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	9
2.3 หลักการทำงานของเครื่องล้อยแร่แบบคอลัมน์	10
2.4 หลักการสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก	11
2.5 การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง	14
2.5.1 การสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก	14
2.5.2 การแยกอนุภาคด้วยการล้อยแร่	16
2.6 การสืบค้นจากฐานข้อมูลสิทธิบัตร	20
2.6.1 การสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก	20
2.6.2 การแยกอนุภาคด้วยการล้อยแร่	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย</b>	29
3.1 รายละเอียดตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก	29
3.2 รายละเอียดชุดทดลอง	31
3.3 การศึกษาลักษณะการไหลภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent)	33
3.3.1 การกำหนดโมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล	33
3.3.2 การสร้างกริด (Meshing)	34
3.3.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)	35
3.3.4 วิธีการคำนวณ	36
3.3.5 การหาค่าจำนวนกริดที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลอง	37
3.4 รายละเอียดชุดทดลองและขั้นตอนสำหรับการวัดขนาดฟองอากาศ	38
3.5 รายละเอียดชุดทดลองและขั้นตอนสำหรับการศึกษาลักษณะการไหล ของของไหลในคอลัมน์	40
3.5.1 การศึกษาการเคลื่อนที่ โดยใช้โปรแกรมคำนวณ ทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent)	40
3.5.2 การศึกษาการเคลื่อนที่ โดยใช้การถ่ายภาพและวิเคราะห์ภาพ อนุภาคแบบ Particle Image Velocimetry (PIV)	46
3.6 รายละเอียดชุดทดลองและขั้นตอนสำหรับล้างถ่านหิน	48
3.6.1 การลดขนาดหรือการบดถ่านหิน	48
3.6.2 การเตรียมสภาพถ่านหินและระบบการสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก	50
3.6.3 ขั้นตอนการล้างและแยกผงถ่านหิน	51
<b>บทที่ 4 ผลการศึกษา</b>	56
4.1 การศึกษาลักษณะการไหลภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก โดยใช้ โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent)	56
4.1.1 การกระจายความเร็วและความดันภายในตัวกำเนิดฟองอากาศ ขนาดเล็ก	56
4.1.2 ผลของพลังงานจลน์ความปั่นป่วนภายในตัวกำเนิดฟองอากาศ ขนาดเล็ก	59
4.1.3 ผลของความเค้นเฉือนภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก	60

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.4 ผลของเส้นทางความเร็วภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก	61
4.2 การวัดขนาดฟองอากาศ	66
4.2.1 การศึกษาลักษณะของฟองอากาศที่ได้จากตัวกำเนิดฟอง รูปแบบต่างๆ	66
4.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะฟองอากาศที่ได้จากหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ คู่กับถังความดัน	68
4.3 การศึกษาลักษณะการไหลของของไหลและฟองอากาศขนาดเล็กที่เกิดขึ้น ในคอลัมน์	71
4.4 การศึกษาการล้างและแยกอนุภาคผงถ่านหิน	73
4.4.1 การเตรียมตัวอย่างถ่านหิน	73
4.4.2 การศึกษาลักษณะการลอยของถ่านหินที่เงื่อนไขสภาพผิว แตกต่างกัน	73
4.4.3 การศึกษาผลของตัวกำเนิดฟองอากาศรูปแบบต่างๆ ต่อการล้าง และแยกผงถ่านหิน	76
4.4.4 การศึกษาผลของความดันและความสูงของแผ่นกั้น ต่อการล้าง และแยกผงถ่านหิน	83
4.4.5 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหิน	90
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย</b>	<b>97</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย	97
5.2 ข้อเสนอแนะ	99
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>100</b>
ภาคผนวก ก. รายงานผลการทดสอบความพรุนของหัวทราย	103
ภาคผนวก ข. รายงานผลการทดสอบปริมาณองค์ประกอบในถ่านหิน	106
ภาคผนวก ค. บทความสำหรับเผยแพร่ 1	121
ภาคผนวก ง. บทความสำหรับเผยแพร่ 2	130
ภาคผนวก จ. บทความสำหรับเผยแพร่ 3	138
ภาคผนวก ฉ. บทความสำหรับเผยแพร่ 4	148
ประวัติผู้เขียน	160

## รายการตาราง

		หน้า
ตารางที่ 3.1	ค่าการละลายของอากาศในน้ำที่ความดันต่างๆ	30
ตารางที่ 3.2	การกำหนดรายละเอียดของเงื่อนไข Spatial Discretization สำหรับการจำลองการไหลภายในกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์)	37
ตารางที่ 3.3	รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองวัดขนาดฟองอากาศ	39
ตารางที่ 3.4	การกำหนดรายละเอียดของเงื่อนไข Spatial Discretization สำหรับการจำลองการไหลภายในคอลัมน์ลอยแร่	45
ตารางที่ 3.5	รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองล้างและแยกผงถ่านหิน	52
ตารางที่ 4.1	การกระจายขนาดของถ่านหินหลังจากการบดละเอียด	73
ตารางที่ 4.2	รายละเอียดและเงื่อนไขที่ใช้เปรียบเทียบการลอยของถ่านหิน	74
ตารางที่ 4.3	รายละเอียดและเงื่อนไขการทดลองล้างและแยกผงถ่านหิน โดยใช้ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กรูปแบบต่างๆ	76
ตารางที่ 4.4	การกระจายขนาดของถ่านหินหลังจากผ่านกระบวนการล้างและแยกผงถ่านหินด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก	79
ตารางที่ 4.5	รายละเอียดและเงื่อนไขการทดลองล้างและแยกผงถ่านหิน เมื่อปรับความดันในถังและความสูงของแผ่นกั้น	83
ตารางที่ 4.6	รายละเอียดและเงื่อนไขการทดลองล้างและแยกผงถ่านหิน ที่ระยะเวลาการล้างแตกต่างกัน	90

## รายการภาพประกอบ

		หน้า
รูปที่ 1.1	ลักษณะของคอลัมน์ลอยแร่ (Flotation Column)	3
รูปที่ 2.1	เครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์	11
รูปที่ 2.2	ตัวกำเนิดฟองอากาศโดยการอัดอากาศผ่านวัสดุพอร์น	12
รูปที่ 2.3	ตัวกำเนิดฟองอากาศโดยใช้การอัดเพิ่มความดันอากาศให้ละลาย ในของเหลว	12
รูปที่ 2.4	ตัวกำเนิดฟองอากาศโดยใช้คลื่นเหนือเสียงส่งผ่านในของเหลว	13
รูปที่ 2.5	ตัวกำเนิดฟองอากาศโดยใช้แรงเฉือนตัดย่อยฟองให้มีขนาดเล็ก	13
รูปที่ 2.6	โครงสร้างการไหลภายในตัวกำเนิดฟองอากาศแบบใช้การไหลวน ของของเหลว (Swirl Liquid Flow Type)	14
รูปที่ 2.7	ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กแบบท่อเวนจูรี (Venturi)	15
รูปที่ 2.8	ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กแบบท่ออีเจ็คเตอร์ (Ejector)	15
รูปที่ 2.9	ตัวกำเนิดฟองอากาศระดับไมครอนแบบอัดอากาศด้วยความดันสูง (Pressurized Dissolution)	16
รูปที่ 2.10	แผนภาพคอลัมน์ลอยแร่แบบเพิ่มไซโคลน	17
รูปที่ 2.11	แผนภาพคอลัมน์ลอยแร่ทดสอบกับฟองอากาศขนาดเล็กระดับปิโค	18
รูปที่ 2.12	แผนภาพคอลัมน์ลอยแร่ แบบ CoalPro Flotation Column	18
รูปที่ 2.13	แผนภาพคอลัมน์ลอยแร่และตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับนาโน	19
รูปที่ 2.14	ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน โดยวิธีการเป่าอากาศผ่าน รูบนผิวของโรเตอร์	20
รูปที่ 2.15	ขนาดฟองอากาศที่ได้จากอุปกรณ์สร้างฟองอากาศขนาดเล็ก ที่ความเร็ว การหมุนของจานในระดับต่างๆ	20
รูปที่ 2.16	ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน	21
รูปที่ 2.17	การเกิดแรงหนีศูนย์กลางและแรงสู่ศูนย์กลางของน้ำและอากาศภายใน ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน	21
รูปที่ 2.18	ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน แบบท่อทรงกรวย	22
รูปที่ 2.19	ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน แบบทรงกระบอกกลาง	22
รูปที่ 2.20	ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน แบบติดตั้งแผ่นกั้น ห่างจากบริเวณทางออกของฟองอากาศเล็กน้อย	23

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 2.21	ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน แบบติดตั้งผนัง บริเวณปากทางออกของฟองอากาศบางส่วน	23
รูปที่ 2.22	ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน แบบติดตั้งท่อบังคับการไหล	24
รูปที่ 2.23	อุปกรณ์ที่ต้องใช้ร่วมกับตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน	24
รูปที่ 2.24	ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน แบบฮีเจ็คเตอร์	25
รูปที่ 2.25	คอลัมน์ลอยแร่สำหรับล้างถ่านหิน แบบใช้ใบพัด	26
รูปที่ 2.26	คอลัมน์ลอยแร่สำหรับล้างถ่านหิน แบบไซโคลน	26
รูปที่ 2.27	คอลัมน์ลอยแร่และชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน	27
รูปที่ 2.28	คอลัมน์ลอยแร่แบบไซโคลนและชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก ระดับไมครอน	27
รูปที่ 2.29	คอลัมน์และอุปกรณ์ฟ้อนอนุภาค	28
รูปที่ 3.1	รูปแบบตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กที่ใช้ในงานวิจัย	30
รูปที่ 3.2	แผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัย	32
รูปที่ 3.3	คอลัมน์ลอยแร่	32
รูปที่ 3.4	ชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน	32
รูปที่ 3.5	แบบจำลองของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบฮีเจ็คเตอร์)	33
รูปที่ 3.6	ลักษณะของกริดบนแบบจำลองตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบฮีเจ็คเตอร์)	34
รูปที่ 3.7	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบฮีเจ็คเตอร์)	35
รูปที่ 3.8	การกระจายความเร็วตามแนวรัศมี กรณีตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบฮีเจ็คเตอร์) ที่จำนวนกริดต่างๆ	38
รูปที่ 3.9	แผนภาพชุดทดลองสำหรับวัดขนาดฟองอากาศ	39
รูปที่ 3.10	อุปกรณ์ที่ใช้ถ่ายภาพฟองอากาศ	40
รูปที่ 3.11	เทคนิควิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม MATLAB	40
รูปที่ 3.12	แบบจำลองของคอลัมน์ลอยแร่ โดยความสูงของแผ่นกั้น 35 cm	41
รูปที่ 3.13	แบบจำลองของคอลัมน์ลอยแร่ โดยความสูงของแผ่นกั้น 50 cm	41
รูปที่ 3.14	ลักษณะของกริดบนแบบจำลองคอลัมน์ลอยแร่ ความสูงของแผ่นกั้น 35 cm	42



### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 3.15	ลักษณะของกริดบนแบบจำลองคอลัมน์ลอยแร่ ความสูงของแผ่นกั้น 50 cm	43
รูปที่ 3.16	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองคอลัมน์ลอยแร่	44
รูปที่ 3.17	แผนภาพชุดทดลองสำหรับศึกษาลักษณะการไหลในคอลัมน์	47
รูปที่ 3.18	อุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพการไหลในคอลัมน์	47
รูปที่ 3.19	อุปกรณ์ที่ใช้ในการบดถ่านหิน	49
รูปที่ 3.20	ขั้นตอนการบดและคัดขนาดถ่านหิน	49
รูปที่ 3.21	ชุดทดลองล้างและแยกผงถ่านหิน	50
รูปที่ 3.22	ขั้นตอนการเตรียมสภาพถ่านหิน	51
รูปที่ 3.23	ลักษณะของน้ำในคอลัมน์ก่อนและขณะเปิดระบบสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก	51
รูปที่ 3.24	ขั้นตอนการล้างและแยกผงถ่านหิน	53
รูปที่ 3.25	ขั้นตอนการเก็บหัวแร่	53
รูปที่ 3.26	ลักษณะของหัวแร่ที่ได้จากการล้างและแยกผงถ่านหินด้วยฟองอากาศ ขนาดเล็ก	54
รูปที่ 3.27	แผนภาพสรุปกิจกรรมการศึกษาใช้ฟองอากาศระดับไมครอน สำหรับล้างทำความสะอาดผงถ่านหิน	55
รูปที่ 4.1	การกระจายความเร็วที่ตำแหน่ง X ต่างๆ ภายในตัวกำเนิดฟองอากาศ ขนาดเล็ก	58
รูปที่ 4.2	การกระจายความดันที่ตำแหน่ง X ต่างๆ ภายในตัวกำเนิดฟองอากาศ ขนาดเล็ก	58
รูปที่ 4.3	พลังงานจลน์ความปั่นป่วน (Turbulence Kinetic Energy)	63
รูปที่ 4.4	ความเค้นเฉือน (Shear Stress)	64
รูปที่ 4.5	เส้นทางความเร็ว (Streamline)	65
รูปที่ 4.6	ลักษณะการเกิดฟองอากาศจากตัวกำเนิดฟองรูปแบบต่างๆ	67
รูปที่ 4.7	ลักษณะของฟองอากาศบริเวณปากทางออก	68
รูปที่ 4.8	ภาพถ่ายฟองอากาศจากกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลสำหรับวัดขนาดฟอง	68
รูปที่ 4.9	ภาพถ่ายฟองอากาศที่ได้จากหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถึงความดัน เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่ความดันและอัตราการไหลของอากาศ แตกต่างกัน	69

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับขนาดฟองอากาศโดยเฉลี่ย	70
รูปที่ 4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับขนาดฟองอากาศโดยเฉลี่ย	70
รูปที่ 4.12	เปรียบเทียบลักษณะการไหลวนของของไหลในคอลัมน์ โดยความสูงของแผ่นกั้น 35 cm	72
รูปที่ 4.13	เปรียบเทียบลักษณะการไหลวนของของไหลในคอลัมน์ โดยความสูงของแผ่นกั้น 50 cm	72
รูปที่ 4.14	เปรียบเทียบลักษณะการลอยของถ่านหินที่เงื่อนไขสภาพผิวแตกต่างกัน	75
รูปที่ 4.15	ลักษณะการลอยของผงถ่านหิน เมื่อรูปแบบของตัวกำเนิดฟองอากาศแตกต่างกัน	77
รูปที่ 4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของตัวกำเนิดฟองอากาศกับปริมาณหัวแร่ที่เก็บได้	79
รูปที่ 4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของตัวกำเนิดฟองอากาศกับปริมาณขี้เถ้า (Ash)	80
รูปที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของตัวกำเนิดฟองอากาศกับปริมาณสารระเหย (Volatile Matter)	82
รูปที่ 4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของตัวกำเนิดฟองอากาศกับปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon)	82
รูปที่ 4.20	เปรียบเทียบลักษณะการลอยของถ่านหินที่ความดัน 3-6 bar ความสูงแผ่นกั้น 35 cm	84
รูปที่ 4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาณหัวแร่ที่เก็บได้ โดยความสูงแผ่นกั้น 35 cm	85
รูปที่ 4.22	เปรียบเทียบลักษณะการลอยของถ่านหินที่ความดัน 3-6 bar ความสูงแผ่นกั้น 50 cm	86
รูปที่ 4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาณหัวแร่ที่เก็บได้ โดยความสูงแผ่นกั้น 50 cm	86
รูปที่ 4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาณขี้เถ้า (Ash)	88
รูปที่ 4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาณสารระเหย (Volatile Matter)	89
รูปที่ 4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon)	89

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.27	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหิน กับปริมาณหัวแร่ที่เก็บได้	91
รูปที่ 4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหิน กับปริมาณขี้เถ้า (Ash)	92
รูปที่ 4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหิน กับปริมาณซัลเฟอร์ (Sulfur)	93
รูปที่ 4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหิน กับปริมาณสารระเหย (Volatile Matter)	94
รูปที่ 4.31	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหิน กับปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon)	95
รูปที่ 4.32	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหิน กับปริมาณค่าความร้อน (Gross Calorific Value)	95

### สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

$D$	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ (mm)
$d$	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ (mm)
$d_T$	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ (mm)
$L$	คือ	ความยาวทางเข้าของหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ (mm)
$l$	คือ	ความยาวทางออกของหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ (mm)
$l_T$	คือ	ความยาวคอคอดของหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ (mm)
$Q_a$	คือ	อัตราการไหลของอากาศ (litre/min)
$P_w$	คือ	ความดันน้ำภายในถังอัด (bar)
wt.%	คือ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (weight, %)
db	คือ	ค่าที่คำนวณจากตัวอย่างที่ปราศจากความชื้น (dry basis)
daf	คือ	ค่าที่คำนวณจากตัวอย่างที่ปราศจากความชื้นและขี้เถ้า (dry ash free)
Å	คือ	หน่วยที่ใช้วัดความยาวคลื่น หรือโครงสร้างอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้น โดยพลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า คือ ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas) ซึ่งใช้ในอัตราร้อยละ 70 ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด เนื่องด้วยก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้ทำงานง่ายและมีประสิทธิภาพสูงรวมถึงสามารถผลิตได้เองในประเทศ แต่อย่างไรก็ตามยังคงเป็นปัญหาในเรื่องของปริมาณแหล่งสำรองก๊าซธรรมชาติในประเทศที่มีจำนวนจำกัด แต่ความต้องการใช้ก๊าซธรรมชาติสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องหาพลังงานชนิดอื่นมาทดแทนก๊าซธรรมชาติที่เริ่มลดลง อาทิเช่น ถ่านหิน น้ำมันปิโตรเลียม พลังงานชีวมวล พลังงานหมุนเวียน เป็นต้น แต่เนื่องด้วยพลังงานแต่ละชนิดมีข้อดี-ข้อด้อยที่แตกต่างกันออกไป ไม่ว่าจะเป็นปัจจัยทางด้านต้นทุนการผลิตที่ค่อนข้างสูงและความไม่เสถียรในการผลิตพลังงานที่ได้จากพลังงานชีวมวลและพลังงานหมุนเวียน หรือแม้แต่น้ำมันปิโตรเลียมที่นับวันปริมาณสำรองเริ่มลดลงเรื่อยๆ และราคาที่สูงขึ้นตามตลาดโลก อย่างไรก็ตามยังมีถ่านหินที่เป็นแหล่งพลังงานหรือเชื้อเพลิงที่น่าสนใจ เนื่องจากหาได้ง่าย ราคาถูก และยังคงมีปริมาณสำรองที่มากเมื่อเทียบกับพลังงานชนิดอื่น โดยแหล่งถ่านหินในประเทศไทยที่สำรวจพบส่วนใหญ่เป็นลิกไนต์และซับบิทูมินัส ซึ่งมีคุณภาพต่ำและให้ปริมาณความร้อนไม่สูงมากนัก นอกจากนี้ถ่านหินยังเป็นเชื้อเพลิงที่ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณสูงมากเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงประเภทอื่น และยังปล่อยสารมลพิษอื่นๆ ออกมาด้วย เช่น สารประกอบซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO<sub>x</sub>) และสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) จึงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ถ่านหินยังไม่เป็นที่นิยมใช้กันมากนัก ตลอดจนประชาชนส่วนใหญ่มีทัศนคติที่ไม่ดีต่อการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง แต่ปัจจุบันเทคโนโลยีในการใช้ประโยชน์จากถ่านหินได้พัฒนาไปจนถึงขั้นเทคโนโลยีถ่านหินสะอาด (Clean Coal Technology) เพื่อการใช้ประโยชน์จากถ่านหินที่คุ้มค่า รวมทั้งลดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด (Clean Coal Technology) คือ เทคโนโลยีเพิ่มประสิทธิภาพในการทำเหมืองถ่านหิน การจัดการถ่านหินก่อนนำมาใช้ และการใช้ประโยชน์ถ่านหิน โดยมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด เทคโนโลยีเหล่านี้เกี่ยวข้องกับการลดหรือกำจัดมลพิษที่เกิดขึ้นจากการนำถ่านหินมาใช้ประโยชน์ รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง โดยโรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศไทยได้นำเทคโนโลยีถ่านหินสะอาดมาใช้ในทุกขั้นตอนของการผลิตไฟฟ้า เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีมาตรฐานเป็นสากลและเป็นที่ยอมรับกันทั่วโลก นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยให้โลกมีความมั่นคงทางด้านพลังงาน แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

(1) เทคโนโลยีก่อนการเผาไหม้ เป็นเทคโนโลยีในการลดซัลเฟอร์ (Sulfur) และสิ่งเจือปนอื่นๆ ออกจากถ่านหินก่อนเข้าสู่ระบบการเผาไหม้ซึ่งมี 3 หลักการ ได้แก่ การทำความสะอาดถ่านหินทางกายภาพ การทำความสะอาดถ่านหินทางเคมี และการทำความสะอาดถ่านหินทางชีววิทยา

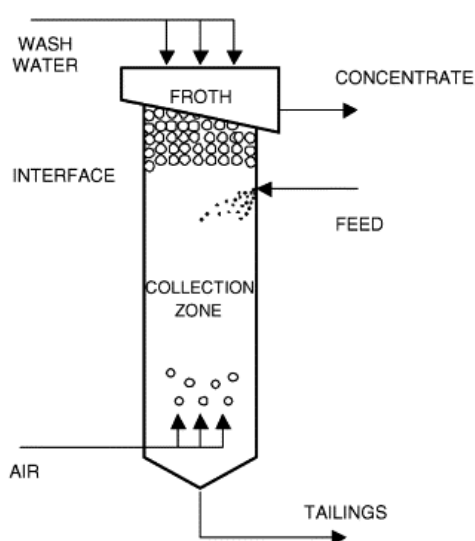
(2) เทคโนโลยีก่อนการเผาไหม้หรือระหว่างการเผาไหม้ เป็นเทคโนโลยีการกำจัดหรือลดมลพิษออกจากระบบระหว่างการใช้ประโยชน์ถ่านหิน ซึ่งเทคโนโลยีนี้มีผลดี คือ ไม่ต้องสร้างเครื่องมือขึ้นมาเพิ่มเติม เพื่อกำจัดออกไซด์ของซัลเฟอร์ ( $SO_x$ ) และออกไซด์ของไนโตรเจน ( $NO_x$ ) เช่น ขั้นตอนการกำจัดหรือลดมลพิษระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน หรือระหว่างการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Flue Gas) เทคโนโลยีนี้ ได้แก่ Fluidized Bed Combustion ของถ่านหินในสภาวะบรรยากาศปกติและในสภาวะความกดดันสูง

(3) เทคโนโลยีหลังการเผาไหม้ เป็นเทคโนโลยีการพัฒนาระบบดักจับสารมลพิษและฝุ่นละอองที่ออกจากกระบวนการเผาไหม้ก่อนปล่อยก๊าซออกสู่ปล่อง เพื่อระบายสู่บรรยากาศโดยปราศจากมลพิษ รวมทั้งเทคโนโลยีการจับสารประกอบซัลเฟอร์ออกไซด์ ( $SO_x$ ) ออกจากก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้หรือจากก๊าซเชื้อเพลิง (Flue Gas) ที่เกิดจากระบบการผลิตก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ เรียกกระบวนการนี้ว่า Flue Gas Desulfurization (FGD)

อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีถ่านหินสะอาดก่อนการเผาไหม้ เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเน้นในเรื่องของการทำความสะอาดโดยวิธีทางกายภาพ คือ เป็นการกำจัดสิ่งเจือปนประเภท ฝุ่นละออง ดิน หิน และสารประกอบพวกกำมะถัน อนินทรีย์ ซึ่งมีเหล็กเป็นส่วนประกอบ เช่น ไพไรติกซัลเฟอร์ (Pyritic Sulfur) เป็นต้น โดยมีวิธีการคือนำถ่านหินมาบดให้มีขนาดเล็กกว่าขนาดของฝุ่นผงแล้วล้างผ่านน้ำ ซึ่งอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นของถ่านหินกับสารเหล่านี้ จะทำให้สิ่งเจือปนต่างๆ ที่ไม่ต้องการถูกแยกออกจากเนื้อถ่านหิน วิธีนี้สามารถทำให้ไพไรติกซัลเฟอร์ถูกกำจัดออกได้ประมาณร้อยละ 90 และวิธีการทำความสะอาดถ่านหินทางกายภาพอีกวิธีหนึ่ง เรียกว่า การลอยผ่านคอลัมน์ (Flotation Column) เป็นการทำความสะอาดถ่านหิน โดยอาศัยหลักการที่ผงถ่านหินมีคุณสมบัติทางเคมี ซึ่งสามารถยึดติดกับฟองอากาศได้ เมื่อให้ฟองอากาศเคลื่อนที่ผ่านผงถ่านหินและน้ำ ซึ่งบรรจุอยู่ในอุปกรณ์ที่เรียกว่าคอลัมน์ (Column) โดยผงถ่านหินจะเกาะติดขึ้นไปกับฟองอากาศ ทิ้งให้สารประกอบอนินทรีย์ เช่น ไพไรติกซัลเฟอร์ (Pyritic Sulfur) และแร่ธาตุต่างๆ จมอยู่ชั้นล่าง

สำหรับอุปกรณ์ในการล้างถ่านหินหรือที่เรียกว่าคอลัมน์ลอยแร่ (Flotation Column) มีลักษณะเป็นหอคอยลอย แสดงในรูปที่ 1.1 โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนล่างจะติดตั้งตัวกำเนิดฟองอากาศและท่อระบายน้ำทิ้ง ส่วนกลางเป็นส่วนที่น้ำทำหน้าที่ล้างผงถ่านหินและฟองอากาศค่อยๆ ลอยขึ้นสู่ด้านบนพร้อมกับดักจับอนุภาคผงถ่านหิน และส่วนบนสุดเป็นส่วนที่ผง

ถ่านหินที่สะอาดจะรวมตัวกันก่อนที่จะล้นไหลออกนอกหอคอยลอย โดยด้านบนจะมีการป้อนผงถ่านหินที่ผสมน้ำ และมีหัวสเปรย์จ่ายน้ำติดตั้งอยู่ ซึ่งขนาดของฟองอากาศและจำนวนฟองจะมีผลต่อความสามารถในการดักจับผงถ่านหินขนาดต่างๆ โดยที่ขนาดของฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่จะไม่สามารถดักจับอนุภาคถ่านหินที่มีขนาดเล็กได้ จึงจำเป็นต้องใช้ระบบสร้างฟองอากาศระดับไมครอนเพื่อให้สามารถดักจับผงถ่านหินที่มีขนาดเล็กในช่วง 30-40  $\mu\text{m}$  ได้



รูปที่ 1.1 ลักษณะของคอลัมน์ลอยแร่ (Flotation Column) [1]

ฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน (Microbubble) คือ ฟองอากาศขนาดเล็กที่ถูกสร้างขึ้นผสมอยู่ในของเหลวโดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองมีขนาดเล็กกว่า 1,000  $\mu\text{m}$  (1 mm) ฟองอากาศในของเหลวจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของฟองที่ค่อนข้างสูง มีแรงลอยตัวต่ำสามารถไหลไปกับของเหลวรอบๆ ได้นานกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ นอกจากนี้ฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน ยังมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากฟองอากาศทั่วไป คือ ผิวของฟองมีสมบัติติดกับอนุภาคของแข็ง สามารถละลายในน้ำได้ดี และมีอัตราการลอยตัวสู่ผิวของเหลวที่ช้ากว่าเมื่อเทียบกับฟองอากาศขนาดใหญ่ ในปัจจุบันมีการนำฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอนมาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ระบบบำบัดน้ำเสีย, ระบบการล้างทำความสะอาด และการเพาะปลูกพืชหรือเกษตรกรรม เป็นต้น สำหรับการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การปล่อยอากาศผ่านวัสดุพรุน, การใช้แรงเฉือนตัดย่อยในการทำให้ฟองอากาศเกิดการแตกตัว และการอัดเพิ่มความดันแล้วลดความดันอย่างกะทันหัน อย่างไรก็ตามในปัจจุบันการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอนจำเป็นต้องใช้พลังงานที่ค่อนข้างสูง ทำให้เป็นสาเหตุที่ยังไม่นิยมใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรม จึงเป็นที่มาของงานวิจัยที่จะศึกษาหลักการเกิด

พองขนาดเล็กโดยอาศัยแรงเฉือนในการตัดย่อยพองอากาศ รวมทั้งการออกแบบตัวกำเนิดพองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอนที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อลดการใช้พลังงานในการสร้างพองอากาศขนาดเล็ก นอกจากนี้จะนำตัวกำเนิดพองอากาศขนาดเล็กที่ได้ไปทดสอบการล้างทำความสะอาดและแยกผงถ่านหิน สำหรับใช้ในเทคโนโลยีเผาไหม้ถ่านหินสะอาดต่อไป

ในงานวิจัยนี้จะออกแบบตัวกำเนิดพองอากาศขนาดเล็ก โดยศึกษาลักษณะการไหลของน้ำภายในตัวกำเนิดพองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ซึ่งสนใจหลักการสร้างพองอากาศขนาดเล็กด้วยวิธีใช้แรงเฉือนตัดย่อยพองอากาศให้มีขนาดเล็กลง สำหรับรูปแบบของตัวกำเนิดพองอากาศขนาดเล็กที่ศึกษาแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ วัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจานหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ และการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังอัดความดัน ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีข้อดีคือ สามารถสร้างพองอากาศที่มีขนาดเล็กเป็นจำนวนมากได้และสามารถควบคุมขนาดพองอากาศได้ง่ายเพียงควบคุมความดันของของเหลวและอัตราการไหลเข้าของอากาศ จากนั้นนำตัวกำเนิดพองอากาศขนาดเล็กรูปแบบต่างๆ ไปทดสอบการล้างและแยกผงถ่านหิน เพื่อเปรียบเทียบการเกาะตัวของถ่านหินและพองอากาศขนาดต่างๆ นอกจากนี้ยังศึกษาลักษณะการไหลของของไหลในคอลัมน์ลอยแร่ โดยใช้การถ่ายภาพและวิเคราะห์ภาพอนุภาคแบบ Particle Image Velocimetry (PIV) ที่มีผลต่อการลอยตัวของผงถ่านหินและพองอากาศขนาดเล็ก

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- (1) ศึกษาการล้างและแยกอนุภาคผงถ่านหินที่ผสมในคอลัมน์ลอยแร่ โดยใช้พองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอนเป็นตัวจับกับผงถ่านหิน
- (2) ศึกษาผลของขนาดพองอากาศที่มีต่อการล้างและแยกอนุภาคผงถ่านหิน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- (1) ศึกษาและพัฒนาตัวกำเนิดพองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน ให้มีลักษณะเป็นหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ (Ejector Nozzle)
- (2) ศึกษาและพัฒนาคอลัมน์ลอยแร่แบบไหลวน ทำจากกระจกใสประกอบเป็นคอลัมน์รูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 12.5 cm x 30 cm x 75 cm ด้านบนของคอลัมน์จะประกอบด้วยส่วนเก็บแร่ลอยซึ่งมีลักษณะเป็นรางสวมล้อมรอบคอลัมน์เอาไว้ นอกจากนี้ภายในคอลัมน์ยังติดตั้งกระจกใส เหนือฐานรองของคอลัมน์ 5 cm เพื่อให้ของไหลสามารถไหลวนในคอลัมน์ได้
- (3) ศึกษาลักษณะการไหลของน้ำภายในตัวกำเนิดพองอากาศขนาดเล็กและลักษณะการไหลของของไหลในคอลัมน์ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป ANSYS Ver.15.0 (Fluent)



(4) ศึกษาลักษณะการไหลของของไหลในคอลัมน์ โดยใช้การถ่ายภาพและวิเคราะห์ภาพอนุภาคแบบ Particle Image Velocimetry (PIV)

(5) ศึกษาขนาดของฟองอากาศที่ได้จากตัวกำเนิดฟองรูปแบบต่างๆ

(6) ศึกษาการล้างและแยกผงถ่านหินที่ผสมในคอลัมน์ลอยแร่ โดยใช้ระบบน้ำวนสำหรับนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ สำหรับถ่านหินที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นถ่านหินลิกไนต์ จากเหมืองถ่านหินแม่เมาะ จ.ลำปาง จากนั้นนำมาบดละเอียดเป็นผงให้มีขนาดเล็กกว่า 250  $\mu\text{m}$  ในขั้นตอนการล้างและแยกผงถ่านหินจะเติมสารเคมี ได้แก่ น้ำมันดีเซลและน้ำมันสน สำหรับเคลือบผิวแร่และเคลือบฟอง หลังจากผ่านกระบวนการล้างและแยกผงถ่านหินแล้ว จึงนำไปวิเคราะห์หาส่วนประกอบที่เหลืออยู่ในถ่านหิน ได้แก่ ซี้เถ้า (Ash), ซัลเฟอร์ (Sulfur), สารระเหย (Volatile Matter), คาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) และค่าความร้อน (Gross Calorific Value)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

(1) สามารถพัฒนาการล้างทำความสะอาดและแยกผงถ่านหินด้วยระบบตะกอนลอยหรือการลอยแร่ที่ใช้ฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน เพื่อลดปริมาณซี้เถ้าและสารประกอบประเภทซัลเฟอร์ออกจากผงถ่านหิน ที่ใช้เป็นเทคโนโลยีถ่านหินสะอาด

(2) สามารถนำไปใช้ในโรงงานผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน โรงงานที่มีหม้อต้มน้ำที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 เชื้อเพลิงถ่านหิน

ความมั่นคงด้านพลังงานเป็นปัญหาสำคัญภายในประเทศไทย ซึ่งมีแนวโน้มที่จะส่งผลกระทบต่อการพัฒนาประเทศมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้า เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ที่นับวันจะมีปริมาณลดน้อยลง และหมดไปในอนาคต อีกทั้งในเรื่องของราคาของเชื้อเพลิงที่ยังคงมีความผันผวนไปในแนวทางที่สูงขึ้นตามสถานการณ์ทางเศรษฐกิจของโลก ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้สัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในยุคปัจจุบันยังคงมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ และนับวันเชื้อเพลิงจะมีปริมาณลดลง อย่างไรก็ตามความจำเป็นที่ต้องใช้พลังงานยังคงมีอยู่ตลอด เนื่องจากพลังงานมีความสำคัญต่อปัจจัยพื้นฐานในการดำรงชีวิตของมนุษย์ และการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ ดังนั้นในส่วนของภาครัฐจึงมีความพยายามที่จะคิดค้นแหล่งพลังงานใหม่ๆ ซึ่งในอดีตประเทศไทยนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ ส่งผลให้ต้องสูญเสียงบประมาณเป็นจำนวนมาก และมีการพึ่งพาเชื้อเพลิงชนิดใดชนิดหนึ่งมากเกินไป ทำให้มีความเสี่ยงสูง นอกจากนี้การกระจายสัดส่วนเชื้อเพลิงที่เหมาะสม จะช่วยลดความเสี่ยงต่อการขาดแคลนพลังงานในอนาคต ดังนั้นเชื้อเพลิงจากถ่านหินจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมจะนำมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่ยังคงมีปริมาณมาก และราคาถูกเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น โดยพบว่าในประเทศไทยมีปริมาณถ่านหินสำรองประมาณกว่า 2,000 ล้านตัน ในจำนวนนี้คิดเป็นปริมาณสำรองที่ประเมินแล้ว (Measured Reserve) ประมาณ 1,100 ล้านตัน ซึ่งแหล่งถ่านหินส่วนใหญ่อยู่บริเวณตอนเหนือของประเทศไทย และยังพบว่ามีความอยู่ในชั้นลิกไนต์และซับบิทูมินัส ซึ่งให้ความร้อนไม่สูงมากนัก โดยถ่านหินถูกนำมาใช้ในภาคการผลิตไฟฟ้ามากที่สุด ส่วนในภาคอุตสาหกรรมนั้น นอกจากการใช้ในอุตสาหกรรมซีเมนต์แล้ว ถ่านหินยังไม่เป็นที่นิยมใช้กันมากนัก เนื่องจากปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม กล่าวคือ ถ่านหินเมื่อถูกทำให้เกิดการเผาไหม้จะปล่อยก๊าซต่างๆ ที่เป็นมลพิษทางอากาศ ทั้งที่อยู่ในรูปของละอองธุลี (Particulate Matters) และอยู่ในรูปของออกไซด์ของก๊าซต่างๆ เช่น ซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO<sub>x</sub>) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) เป็นต้น อันเป็นสาเหตุให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ที่ส่งผลโดยตรงต่อมนุษย์และบรรยากาศของโลก เช่น การเกิดฝนกรด ปรากฏการณ์ก๊าซเรือนกระจก เป็นต้น แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนานำถ่านหินมาใช้ควบคู่กับเทคโนโลยีถ่านหินสะอาด (Clean Coal Technology, CCT) เพื่อลดผลกระทบที่มีต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งการทำให้มลพิษที่เกิดจากการใช้ถ่านหินลดลง

## 2.2 เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด (Clean Coal Technology)

ถ่านหินเป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่ใช้กันมากและมีปริมาณมากพอให้ใช้กันอีกนับร้อยปี ดังนั้นเพื่อเป็นการลดปัญหาการเกิดมลพิษจากถ่านหิน จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำเหมือง การจัดการถ่านหินก่อนนำมาใช้ และการใช้ประโยชน์ถ่านหิน โดยให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ซึ่งเทคโนโลยีนี้เรียกว่า เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด (Clean Coal Technology) กระบวนการของเทคโนโลยีนี้สามารถทำได้ทั้ง 3 ขั้นตอน คือ เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดก่อนการเผาไหม้ เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดขณะเผาไหม้หรือเมื่อนำไปใช้ประโยชน์ และเทคโนโลยีถ่านหินสะอาดหลังการเผาไหม้ [2] ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.2.1 เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดก่อนการเผาไหม้ (Pre-Combustion)

เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดก่อนการเผาไหม้ เป็นการทำความสะอาดถ่านหินในขั้นตอนก่อนการเผาไหม้ ซึ่งอาจเรียกขั้นตอนนี้ว่าการปรับระดับถ่านหิน (Coal Upgrading) เพื่อลดปริมาณซัลเฟอร์และซัลเฟอรัที่ปะปนอยู่ในถ่านหิน ในขณะเดียวกันเป็นการเพิ่มค่าความร้อนของถ่านหินด้วยการทำความสะอาดก่อนการเผาไหม้มีด้วยกัน 3 วิธี คือ

(1) การทำความสะอาดโดยวิธีทางกายภาพ (Physical Cleaning or Washing) เป็นการกำจัดสิ่งเจือปนประเภท ผุ่นละออง ดิน หิน และสารประกอบพวกกำมะถันอนินทรีย์ ซึ่งมีเหล็กเป็นส่วนประกอบ เช่น ไพไรติกซัลเฟอรั (Pyritic Sulfur) เป็นต้น โดยมีวิธีการ คือ นำถ่านหินมาบดให้มีขนาดเล็กกว่าขนาดของผุ่นผงแล้วล้างผ่านน้ำ โดยอาศัยหลักการความแตกต่างของความหนาแน่นของถ่านหินกับสารเหล่านี้ จะทำให้สิ่งเจือปนต่างๆ ที่ไม่ต้องการจะถูกแยกออกจากเนื้อถ่านหิน ซึ่งวิธีนี้จะทำให้ไพไรติกซัลเฟอรัถูกกำจัดออกได้ประมาณร้อยละ 90 นอกจากนี้ยังมีวิธีทำความสะอาดถ่านหินทางกายภาพอีกวิธีหนึ่ง เรียกว่า การลอยผ่านคอลัมน์ (Flotation Column) เป็นการทำความสะอาดถ่านหิน โดยอาศัยความแตกต่างของคุณสมบัติทางเคมีของถ่านหิน ซึ่งมีความสามารถในการยึดติดกับฟองอากาศได้แตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อให้ฟองอากาศเคลื่อนที่ผ่านผุ่นถ่านหินและน้ำซึ่งบรรจุในคอลัมน์ (Column) ผุ่นถ่านหินจะติดขึ้นไปกับฟองอากาศ ทิ้งให้สิ่งเจือปนต่างๆ รวมทั้งไพไรติกซัลเฟอรัจมอยู่ในบริเวณส่วนล่างของคอลัมน์

(2) การทำความสะอาดโดยวิธีทางเคมี (Chemical Cleaning) โดยทั่วไปเป็นการใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติละลายแร่ธาตุและกำมะถันอนินทรีย์ ซึ่งไม่สามารถกำจัดได้โดยวิธีทางกายภาพ ในการทำปฏิกิริยากับผุ่นถ่านหินเพื่อกำจัดซัลเฟอร์และซัลเฟอรั เทคโนโลยีในกลุ่มนี้ ได้แก่ Molten-Caustic Leaching

(3) การทำความสะอาดโดยวิธีทางชีวภาพ (Biological Cleaning) วิธีนี้เป็นเทคโนโลยีที่ยังค่อนข้างใหม่ โดยใช้สิ่งมีชีวิตเล็กๆ จำพวกแบคทีเรียและเชื้อราบางชนิด ซึ่งต้องการ

ซัลเฟอร์เป็นอาหารเข้าไปช่วยในการกำจัดซัลเฟอร์ในถ่านหิน และสามารถนำสิ่งมีชีวิตเหล่านี้มาทำการเพาะเลี้ยงเพื่อสกัดเอาเอนไซม์ที่ใช้สำหรับการย่อยสลายซัลเฟอร์มาใช้ เพื่อเร่งกระบวนการกำจัดซัลเฟอร์ในถ่านหินได้

## 2.2.2 เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดขณะเผาไหม้หรือเมื่อนำไปใช้ประโยชน์ (Combustion)

เทคโนโลยีต่างๆ ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อนำมาใช้ในกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินหรือในขณะที่น่าถ่านหินไปใช้ประโยชน์ มีด้วยกันหลายอย่าง เช่น เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดขณะเผาไหม้ เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดโดยการแปรรูป และเทคโนโลยีสังเคราะห์เชื้อเพลิงสะอาด ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีจะช่วยลดปริมาณสิ่งเจือปนต่างๆ โดยเฉพาะซัลเฟอร์ในถ่านหินลงได้เป็นอย่างดี

(1) เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดขณะเผาไหม้ เป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับระบบการเผาไหม้ถ่านหิน โดยการปรับปรุงเตาเผาและหม้อไอน้ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ถ่านหิน และลดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ ซึ่งเทคโนโลยีในกลุ่มนี้ ได้แก่

(1.1) เทคโนโลยีการเผาเชื้อเพลิงที่เป็นผง (Pulverized Fuel Combustion, PFC) เป็นวิธีการเผาไหม้ถ่านหินซึ่งถูกบดอย่างละเอียดแล้วพ่นเข้าไปในเตาเผาพร้อมอากาศเมื่อถ่านหินติดไฟจะให้พลังงานความร้อนแก่หม้อไอน้ำ และไอน้ำจะไปหมุนกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตไฟฟ้า

(1.2) เทคโนโลยีการเผาสภาพของไหล (Fluidized Bed Combustion, FBC) เป็นวิธีการเผาไหม้ถ่านหินที่บดอย่างละเอียดผสมกับหินปูน แล้วพ่นเข้าไปในหม้อไอน้ำพร้อมอากาศร้อน ถ่านหินและหินปูนที่พ่นเข้าไปจะแขวนลอยอยู่ในคลื่นอากาศร้อน โดยมีลักษณะคล้ายของเหลวเดือด ขณะที่ถ่านหินเผาไหม้หินปูนจะทำหน้าที่คล้ายฟองน้ำดักจับซัลเฟอร์ที่เกิดขึ้น ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินจะถูกนำมาต้มน้ำ ทำให้เกิดเป็นไอน้ำเพื่อไปหมุนกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระบวนการนี้สามารถลดปริมาณซัลเฟอร์ที่จะถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ได้มากถึงร้อยละ 90

(1.3) เทคโนโลยีการเผาสภาพของไหลภายใต้ความดัน (Pressured Fluidized Bed Combustion, PFBC) เป็นการเผาไหม้ถ่านหินแบบเดียวกับการเผาสภาพของไหล โดยอยู่ภายใต้ความดันสูง พลังงานความร้อนที่ผลิตได้จะถูกนำไปใช้ผลิตไอน้ำเพื่อขับเคลื่อนกังหันไอน้ำ ส่วนก๊าซร้อนที่ได้จะมีแรงดันและอุณหภูมิสูงสามารถนำไปขับเคลื่อนกังหันก๊าซ เพื่อผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าแบบผลิตไฟฟ้าร่วมได้

(2) เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดโดยการแปรรูป (Coal Conversion) เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นเพื่อแปรรูปถ่านหินให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง (Coal Gasification) หรือเชื้อเพลิงเหลวจากถ่านหิน (Coal Liquefaction) โดยแต่ละเทคโนโลยีจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

(2.1) เทคโนโลยีแปรรูปถ่านหินให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง (Coal Gasification Technology, CGT) เป็นกระบวนการที่ทำให้ถ่านหินเกิดปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนหรืออากาศและไอน้ำภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง ซึ่งจะได้ก๊าซเชื้อเพลิงออกมาประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จะถูกนำมาทำให้สะอาดโดยการกำจัดมลพิษก่อนที่นำไปใช้ ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้นี้นอกจากนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงแล้ว อาจนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์แอมโมเนีย เมทานอล หรือก๊าซไฮโดรเจนได้

(2.2) เทคโนโลยีเชื้อเพลิงเหลวจากถ่านหิน (Coal Liquefaction Technology, CLT) เป็นการแปรรูปถ่านหินให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงเหลว (Liquid Fuel) โดยมีการแยกคาร์บอนออก (Carbonization) หรือการเติมไฮโดรเจนเข้าไป (Liquefaction) เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากถ่านหิน สามารถนำมากลั่นในกระบวนการกลั่นน้ำมัน จะได้น้ำมันสำหรับรถยนต์และผลิตภัณฑ์อื่นๆ จำพวกพลาสติกและสารละลายต่างๆ

(3) เทคโนโลยีสังเคราะห์เชื้อเพลิงสะอาด (Dimethyl Ether, DME) เป็นเทคโนโลยีที่ทำให้มีการใช้ถ่านหินที่สะอาดและประหยัด ซึ่งเป็นการนำเอาก๊าซมีเทนที่ได้มาจากการทำเหมืองถ่านหินมาทำการเผาไหม้กับออกซิเจน โดยมีการหมุนเวียนนำเอาไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ใหม่ ในกระบวนการเผาไหม้นี้ก๊าซที่ได้จะมีคุณสมบัติคล้ายก๊าซปิโตรเลียมเหลว

### 2.2.3 เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดหลังการเผาไหม้ (Post-Combustion) หรือเทคโนโลยีการป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดหลังการเผาไหม้ เป็นการกำจัดมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหิน ก่อนที่จะถูกปล่อยออกสู่สภาพแวดล้อม มีทั้งที่อยู่ในรูปของฝุ่นละอองต่างๆ และก๊าซ เทคโนโลยีที่นำมาใช้แก้ปัญหาในขั้นตอนนี้ ได้แก่

(1) การกำจัดฝุ่นละออง เมื่อถ่านหินถูกเผาไหม้จะมีฝุ่นละอองต่างๆ เกิดขึ้นในกระบวนการ ดังนั้นเพื่อเป็นการกำจัดฝุ่นละอองดังกล่าว จะมีการใช้อุปกรณ์สำหรับการดักจับฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นนี้ ซึ่งโดยทั่วไปที่ใช้กันอยู่ ได้แก่

(1.1) เครื่องดักฝุ่นด้วยไฟฟ้า (Electrostatic Precipitator) เป็นการกำจัดฝุ่นละอองโดยใช้หลักการไฟฟ้าสถิต เมื่อฝุ่นละอองเคลื่อนที่ผ่านสนามไฟฟ้าจะทำให้ฝุ่นละอองมีประจุไฟฟ้า และเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปยังถังเก็บ ซึ่งมีประจุไฟฟ้าขั้วตรงข้ามกับฝุ่นละอองๆ ก็จะถูกดูดให้ติดกับแผ่นรวบรวม (Collector Plates) ที่อยู่ภายในถังเก็บฝุ่น ระบบนี้ถือว่ามีประสิทธิภาพสูงมากในการดักจับฝุ่น

(1.2) เครื่องแยกฝุ่นแบบลมหมุน (Cyclone Separator) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกฝุ่นละอองออกจากก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน โดยใช้หลักของแรงเหวี่ยง เพื่อให้ก๊าซซึ่งมีฝุ่นละอองผสมอยู่เกิดการหมุนตัว จะทำให้ฝุ่นละอองซึ่งมีน้ำหนักมากกว่ารวมตัวกันและถูกแยกออกมา

(1.3) เครื่องกรองฝุ่นแบบถุง (Bag Filter) เป็นอุปกรณ์ที่มีถุงกรองเป็นตัวกรองแยกฝุ่นละอองออกจากก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน

(2) การกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulfurization) เป็นกระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ที่ถูกปล่อยออกมาพร้อมกับก๊าซทิ้งหลังการเผาไหม้สามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ แบบเปียก แบบแห้ง และแบบกึ่งแห้ง แต่กระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบเปียกจะเป็นที่นิยมมาก ส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นแบบ Limestone-Gypsum โดยการฉีดส่วนผสมของน้ำกับหินปูนเข้าไปทำปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ผสมอยู่ในก๊าซทิ้งนั้น ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้เกิดการรวมตัวและตกตะกอนเป็นยิปซัม ซึ่งเป็นสารประกอบที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้

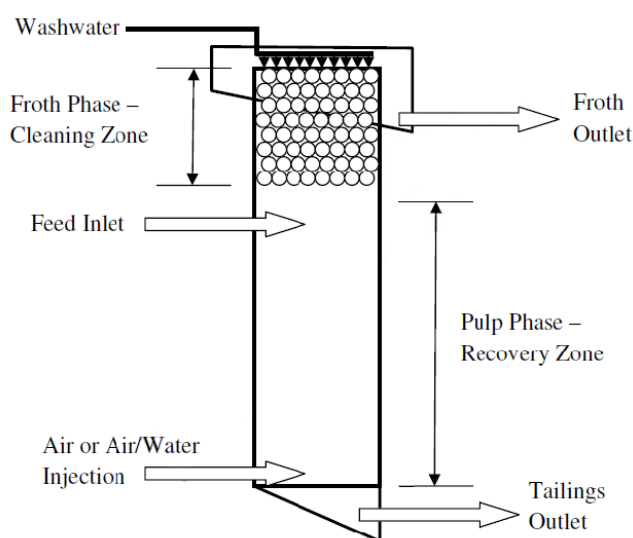
(3) การกำจัดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ เป็นกระบวนการกำจัดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาพร้อมกับก๊าซทิ้งหลังการเผาไหม้ กระบวนการที่ใช้แพร่หลายและมีประสิทธิภาพสูงคือ Selective Catalytic Reduction (SCR) โดยการใช้แอมโมเนียเข้าไปทำปฏิกิริยากับก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ผลของปฏิกิริยาจะเกิดเป็นไนโตรเจนและน้ำ

สำหรับถ่านหินที่ได้จากการขุดเหมืองต้องผ่านการล้างทำความสะอาดด้วยน้ำ ถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างหยาบจะสามารถล้างสิ่งเจือปนและแยกออกจากน้ำได้ง่าย แต่ผงถ่านหินที่มีขนาดเล็กในช่วง 30-40  $\mu\text{m}$  จะยากต่อการแยกออกจากถ่านหลังผ่านกระบวนการล้าง และก่อให้เกิดปัญหาหรือมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ นอกจากนี้ยังเกิดการสูญเสียถ่านหินเป็นปริมาณมากที่ผสมอยู่ในน้ำ ในงานวิจัยนี้สนใจการทำความสะอาดโดยวิธีทางกายภาพ และมีแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้ฟองอากาศระดับไมครอนใส่ใน Flotation Column เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำความสะอาดผงถ่านหินและแยกผงถ่านหินที่มีขนาดอนุภาคเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมุ่งเน้นศึกษาผลของขนาดฟองที่มีความสามารถในการดักจับผงถ่านที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ และความเร็วของการไหลเวียนใน Flotation Column

### 2.3 หลักการทำงานของเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์

ลักษณะของเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ (Flotation Column) แสดงดังรูปที่ 2.1 คอลัมน์ลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกยาวตั้งแต่ 1 m ขึ้นไป มีเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 2.5 cm โดยทั่วไปมีสัดส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 10:1 คอลัมน์จะไม่มีใบพัดกวนแร่ให้เกิดสภาวะ

ปั่นป่วนเหมือนเซลล์ลอยแร่ การสร้างฟองอากาศจะเกิดขึ้นโดยให้อากาศถูกอัดผ่านตัวทำฟองอากาศ (Sparger) ซึ่งมีรูพรุนเล็กๆ ที่ตั้งอยู่ด้านล่างของคอลัมน์ ทำให้ได้ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กเท่าๆ กันพุ่งเข้าสู่คอลัมน์ นอกจากนี้แล้วจะมีการใช้น้ำล้างฉีดผ่านท่อกระจาย (Distributor) หรือหัวฉีดทางตอนบนของคอลัมน์ด้วยเพื่อทำให้หัวแร่สะอาดขึ้น การป้อนจะป้อนเข้าส่วนกลางของคอลัมน์ที่ระดับ 0.5-1.5 m ต่ำจากส่วนบนของคอลัมน์ เพื่อเพิ่มโอกาสให้ของผสมปะทะกับฟองอากาศที่ลอยขึ้นมาจากด้านล่าง เรียกบริเวณนี้ว่า ชั้นเก็บแร่ ทำให้แร่ที่เกาะกับฟองอากาศลอยขึ้นสู่ส่วนบนของคอลัมน์ที่เรียกว่า ชั้นของแร่ลอย ซึ่งมลทินที่ถูกฟองอากาศหนุนขึ้นมาด้วยจะถูกน้ำล้างชะล้างลงด้านล่าง หัวแร่ที่สะอาดไหลล้นออกจากเซลล์ลอยแร่ ส่วนแร่จมจะไหลลงด้านล่างของคอลัมน์ซึ่งถูกแยกออกไป ประสิทธิภาพของเซลล์ลอยแร่ขึ้นอยู่กับความสูงของคอลัมน์ ตำแหน่งของช่องป้อน ปริมาณน้ำล้าง ปริมาณฟองอากาศ อัตราการป้อนแร่ เกรดของแร่ป้อน และปริมาณของสารเคมี



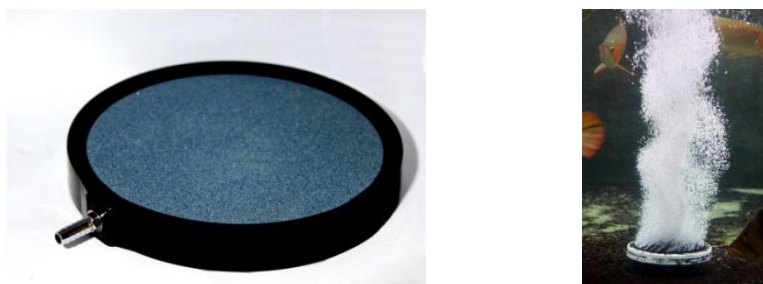
รูปที่ 2.1 เครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ [3]

#### 2.4 หลักการสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก

สำหรับการสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก โดยทั่วไปสามารถทำได้ 4 วิธี ดังนี้

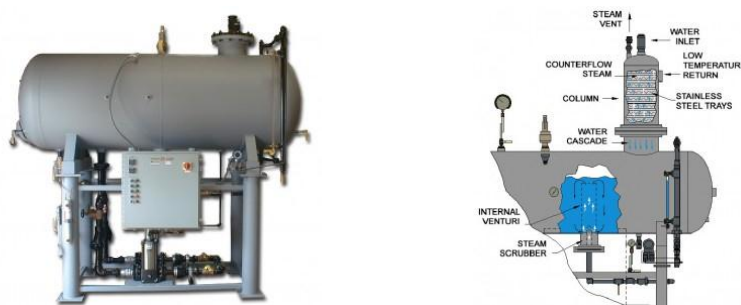
(1) การอัดอากาศผ่านวัสดุรูพรุนที่ทำจากแผ่นเซรามิก แผ่นโลหะ แผ่นฟิล์มหรือแผ่นพิวเตอร์ เป็นต้น การอัดอากาศผ่านชั้นของวัสดุเหล่านี้ทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ขึ้นไป ส่วนการลดขนาดของรูพรุนสามารถลดขนาดของฟองอากาศได้ แต่ขนาดรูพรุนต้องมีขนาดเล็กกว่าฟองอากาศหลายเท่า มีผลทำให้เกิดการสูญเสียความดันในระบบเพิ่มขึ้น ต้อง

ใช้พลังงานในการเดินปั๊มที่สูงขึ้น และรูพรุนที่อยู่ติดกันมีผลให้ฟองอากาศที่ปล่อยออกมาเกิดการรวมตัวเป็นฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ตัวกำเนิดฟองอากาศโดยการอัดอากาศผ่านวัสดุพรุน [4]

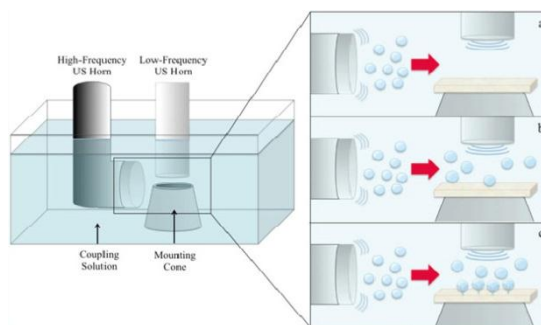
(2) การอัดเพิ่มความดันอากาศให้ละลายในของเหลว เป็นอีกวิธีในการสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก คือ การอัดเพิ่มความดันอากาศเหนือของเหลวจนถึงความดันไออิ่มตัวจนอากาศละลายในของเหลวได้มากขึ้น หลังจากนั้นเปิดวาล์วเพื่อลดความดันในถัง อากาศที่ละลายในของเหลวจะกลับสู่สถานะก๊าซ จากนั้นเกิดเป็นฟองอากาศที่มีขนาดเล็ก แต่วิธีการนี้มีปัญหาในเรื่องของการใช้พลังงานในการอัดอากาศที่ค่อนข้างมาก เพื่อสร้างฟองอากาศขนาดเล็กให้มีปริมาณมากเพียงพอ นอกจากนี้ชุดอุปกรณ์ในการสร้างฟองอากาศยังมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตัวกำเนิดฟองอากาศโดยใช้การอัดเพิ่มความดันอากาศให้ละลายในของเหลว [5]

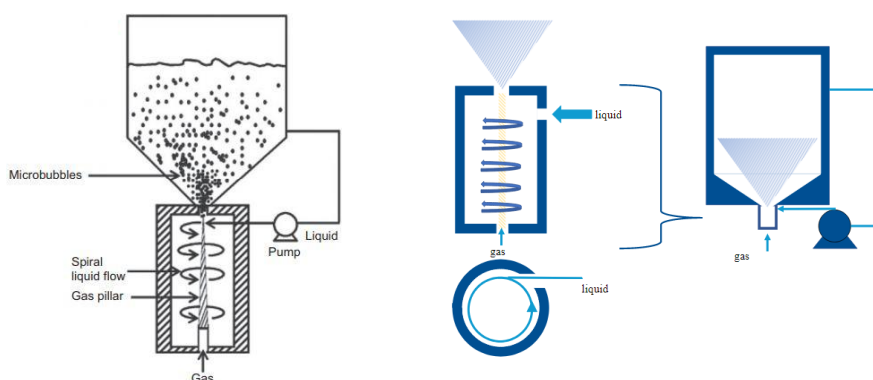
(3) การใช้คลื่นเหนือเสียงส่งผ่านในของเหลว ซึ่งก่อให้เกิดการสั่นของความดันส่งผลทำให้ของเหลวเกิดความปั่นป่วนในตำแหน่งที่มีความดันต่ำกว่าความดันไอ จึงกลายเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก นอกจากนี้ความถี่ของคลื่นเหนือเสียงมีผลต่อขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีปัญหาด้านปริมาณและการควบคุมขนาดของฟองอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.4





รูปที่ 2.4 ตัวกำเนิดฟองอากาศโดยใช้คลื่นเหนือเสียงส่งผ่านในของเหลว [6]

(4) วิธีการใช้แรงเฉือนตัดย่อยฟองอากาศให้มีขนาดเล็ก ซึ่งอาจจะใช้ใบพัดสำหรับ หมุนสร้างแรงเฉือนตัดย่อยฟอง หรืออาจใช้ของเหลวพ่นด้วยความเร็วสูงจนเกิดบริเวณที่มีความดันต่ำ ที่สามารถดึงฟองอากาศเข้ามาผสมในของเหลวอย่างรุนแรง จนเกิดการตัดเฉือนย่อยฟองอากาศให้มีขนาดเล็กลง สำหรับวิธีนี้มีข้อดี คือ สามารถสร้างฟองอากาศที่มีขนาดเล็กและมีปริมาณมากได้ โดยการควบคุมความเร็วของของเหลวหรือความเร็วใบพัด ดังแสดงในรูปที่ 2.5



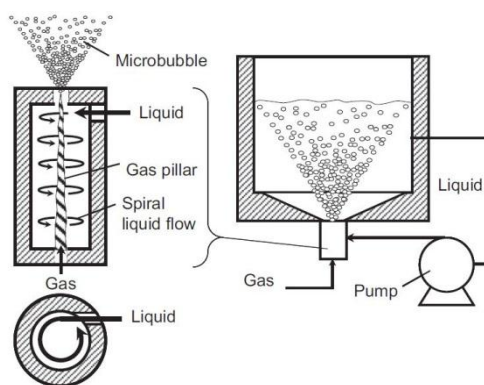
รูปที่ 2.5 ตัวกำเนิดฟองอากาศโดยใช้แรงเฉือนตัดย่อยฟองให้มีขนาดเล็ก [7]

จากทั้ง 4 หลักการที่กล่าวมาในข้างต้น ซึ่งสามารถสร้างฟองอากาศขนาดเล็กได้ทั้งหมด แต่จะต่างกันในเรื่องของขนาดและปริมาณของฟองอากาศ รวมไปถึงความซับซ้อนของเครื่องกำเนิด ฟองอากาศและการใช้พลังงานในการสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก โดยเครื่องกำเนิดฟองอากาศที่ใช้ หลักการใช้แรงเฉือนตัดย่อยฟองจะเป็นรูปแบบที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และใช้พลังงานค่อนข้างน้อยกว่า รูปแบบการอัดเพิ่มความดันอากาศให้ละลายในของเหลว นอกจากนี้สามารถควบคุมปริมาณและ ขนาดฟองอากาศได้อีกด้วย ในขณะที่เครื่องกำเนิดฟองที่ใช้หลักการอัดอากาศผ่านวัสดุพอร์และใช้ คลื่นเหนือเสียงส่งผ่านในของเหลวไม่สามารถทำได้

## 2.5 การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

### 2.5.1 การสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก

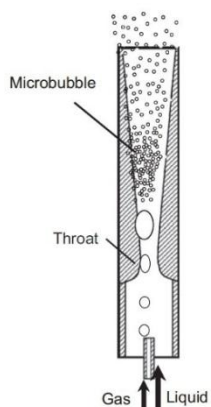
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างการไหลที่เกิดขึ้นภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กแบบใช้การไหลวนของของเหลว (Swirl Liquid Flow Type) วิธีนี้ น้ำจากปั๊มจะถูกส่งผ่านท่อที่ต่อเข้ากับตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กที่มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก น้ำจะไหลผ่านในแนวสัมผัสของท่อเพื่อสร้างกระแสน้ำวนภายในช่องว่างของท่อทรงกระบอก ส่วนอากาศจะถูกดูดผ่านแผ่นออริฟิสที่อยู่ด้านท้ายของตัวกำเนิดฟองอากาศ แล้วพ่นออกผ่านรูทางออกที่อยู่ด้านตรงข้ามพร้อมกับน้ำในลักษณะที่เป็นฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งเป็นผลของการหมุนเหวี่ยงของน้ำที่หมุนวนด้วยความเร็วสูง



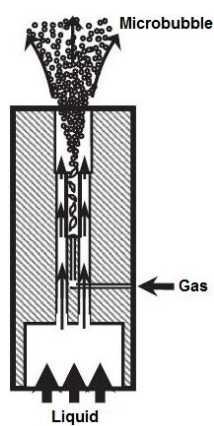
รูปที่ 2.6 โครงสร้างการไหลภายในตัวกำเนิดฟองอากาศแบบใช้การไหลวนของของเหลว (Swirl Liquid Flow Type) [7]

รูปที่ 2.7 แสดงตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กแบบท่อเวนจูรี (Venturi) ซึ่งที่บริเวณทางเข้าของท่อเวนจูรี ฟองอากาศจะถูกผสมอยู่กับของเหลวในสถานะของไหลสองสถานะ จากนั้นการไหลจะถูกเร่งผ่านที่ตำแหน่งคอคอดของท่อเวนจูรี ส่งผลให้มีการเพิ่มความดันเชิงจลน์อย่างกะทันหัน ทำให้เกิดฟองอากาศมีขนาดเล็กลงหรืออาจเกิดปรากฏการณ์โพรงอากาศขึ้น (Cavitation) ซึ่งจะช่วยให้ฟองอากาศเกิดการสลายแตกเป็นฟองขนาดเล็กจำนวนมาก

สำหรับตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กแบบท่ออีเจ็คเตอร์ (Ejector) ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก ภายในมีช่องทางไหลสำหรับของเหลวที่ถูกออกแบบให้หดและขยายพื้นที่หน้าตัดแบบเป็นขั้นบันได ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันที่ซับซ้อนตามเส้นทางการไหล โดยอากาศจะถูกดูดโดยอัตราโนมิติที่ตำแหน่งความดันลดต่ำมากที่สุด จากนั้นเกิดปรากฏการณ์โพรงอากาศขึ้น ทำให้ฟองอากาศเกิดการสลายแตกเป็นฟองขนาดเล็กและมีปริมาณมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.8

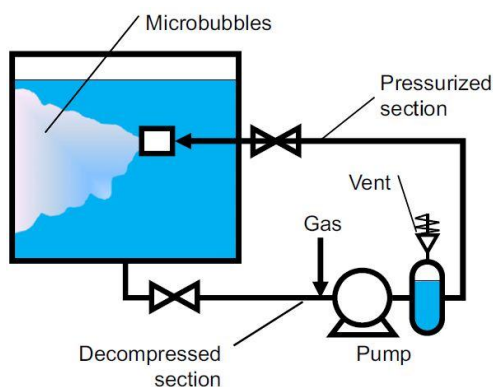


รูปที่ 2.7 ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กแบบทอเวนจูรี (Venturi) [8]



รูปที่ 2.8 ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กแบบทออีเจ็คเตอร์ (Ejector) [8]

รูปที่ 2.9 แสดงตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กแบบการอัดอากาศด้วยความดันสูงให้เข้าไปละลายในของเหลว (Pressurized Dissolution) ระบบนี้อากาศและของเหลวจะถูกอัดด้วยความดันสูงภายในถังอัดความดัน จนอากาศละลายในของเหลวถึงสภาวะอิ่มตัว ฟองอากาศขนาดเล็กจะเกิดขึ้นเมื่อปล่อยของเหลวอิ่มตัวผ่านวาล์วลดความดัน โดยที่ขนาดและปริมาณของฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความดันในถังอัด

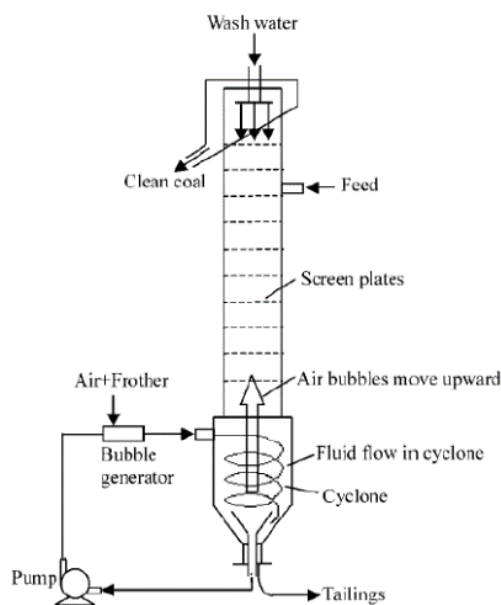


รูปที่ 2.9 ตัวกำเนิดฟองอากาศระดับไมครอนแบบอัดอากาศด้วยความดันสูง  
(Pressurized Dissolution) [8]

### 2.5.2 การแยกอนุภาคด้วยการลอยแร่

Shen และ Wheelock [9] ได้ศึกษาการทำความสะอาดถ่านหินบิทูมินัส (ที่มีซีไธ้ผสมอยู่ประมาณ 26% โดยน้ำหนัก) ด้วยวิธีตะกอนลอยแบบเลือกรวมกลุ่มของอนุภาคผงถ่านที่ผสมปนในน้ำ โดยใช้ฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอนเป็นตัวรวมกลุ่มก่อน ในงานวิจัยนี้กลุ่มฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอนถูกอัดเพิ่มความดันจนถึงความดันไออิ่มตัวเพื่อให้อากาศละลายในน้ำ (จาก 136 เป็น 205 kPa) หลังจากนั้นลดความดันกะทันหันทำให้น้ำเกิดการปั่นป่วนเกิดเป็นกลุ่มฟองอากาศขนาดเล็กเพื่อเพิ่มความเสถียรของฟองอากาศ และได้ผสมสารเคมี (I-Octane) ลงในน้ำเล็กน้อยประมาณ 1.0 ปริมาตรต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักถ่านหิน จากผลการทดสอบพบว่าเกิดการรวมกลุ่มระหว่างผงถ่านหินกับฟองอากาศลอยขึ้นสู่ผิว โดยผิวด้านบนจะรวมเป็นชั้นของถ่านที่ถูกกำจัดซีไธ้เถ้าออก (ซีไธ้ผสมอยู่ 6-7% โดยน้ำหนัก) แยกอยู่ประมาณ 75-85% ในขณะที่ชั้นที่อยู่ด้านล่างจะเป็นก้อนของซีไธ้ที่รวมตัวกัน

Li และคณะ [10] ได้พัฒนาระบบแยกอนุภาคแบบตะกอนลอยโดยเพิ่มในส่วนของไซโคลนเพื่อให้การแยกไพไรติกซัลเฟอร์ (Pyritic Sulfur) มีประสิทธิภาพสูงขึ้น รูปที่ 2.10 แสดงแผนภาพของระบบตะกอนลอยที่ใช้ฟองอากาศระดับไมครอนเป็นตัวดักจับ โดยด้านล่างจะมีส่วนของไซโคลนที่พ่นฉีดน้ำผสมฟองอากาศในแนวสัมผัสกับตัวถัง ระบบที่สร้างขึ้นนี้ได้ทดสอบล้างและแยกผงถ่านหินที่มีขนาดเล็กถึง 45  $\mu\text{m}$  สามารถล้างถ่านหินให้เหลือปริมาณซีไธ้ 1.5-1.6% โดยน้ำหนักจากถ่านที่มีปริมาณซีไธ้เจือปน 9.8%

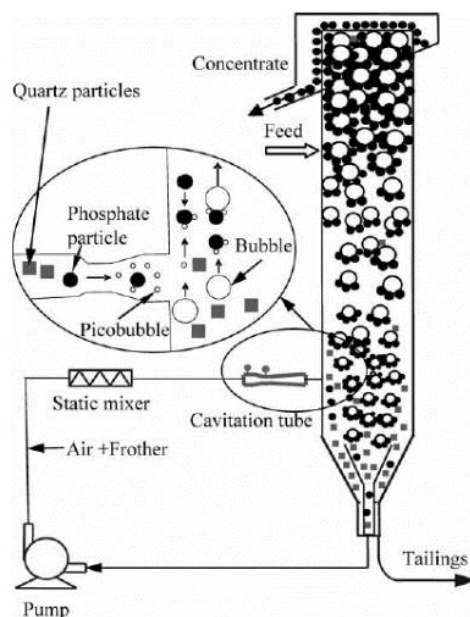


รูปที่ 2.10 แผนภาพคอลัมน์ลอยแร่แบบเพิ่มไซโคลน [10]

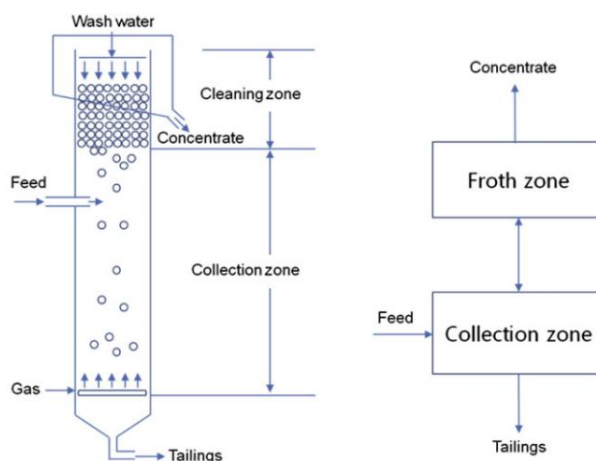
Tao และคณะ [11] ได้ทดสอบใช้ฟองอากาศขนาดเล็กระดับปิโค (Picobubbles) ในระบบทำความสะอาดและดักจับผงถ่านหินด้วยฟองอากาศ ดังรูปที่ 2.11 เนื่องจากระบบตะกอนลอยโดยทั่วไปสามารถใช้ทำความสะอาดและดักจับผงถ่านหินในช่วงขนาด 0.6-0.15 mm การดักจับขึ้นอยู่กับความเป็นไปได้ที่อนุภาคและฟองอากาศจะชนกัน และความเป็นไปได้ที่อนุภาคจะหลุดออกจากฟองอากาศ โดยวิธีลอยตะกอนมีประสิทธิภาพที่สูงในช่วงที่อนุภาคมีขนาด 10-100  $\mu\text{m}$  หากเล็กกว่าช่วงขนาดนี้แล้วประสิทธิภาพการดักจับจะลดลงอย่างมาก แต่จากการวิเคราะห์พบว่าการใช้ฟองอากาศขนาดเล็กระดับปิโคสามารถเพิ่มการดักจับอนุภาคได้ดีขึ้น เนื่องจากสามารถเพิ่มโอกาสที่อนุภาคชนกับฟองอากาศและลดการแยกตัว ในงานวิจัยนี้การสร้างฟองอากาศขนาดเล็กระดับปิโคโดยอาศัยหลักการสร้างปรากฏการณ์โพรงอากาศ (Cavitation) ในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก และได้ทดสอบดักจับผงถ่านหินในคอลัมน์ระดับห้องปฏิบัติการเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 cm พบว่าเมื่อเทียบกับฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน สามารถเพิ่มความสามารถดักจับสูงกว่า 10% ในกรณีผงถ่านหินดลอยได้ดี และสามารถเพิ่มความสามารถดักจับสูงกว่า 40% ในกรณีผงถ่านหินดลอยได้ไม่ดี

Han และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาค้นคว้าโดยใช้ CoalPro Flotation Column ดังรูปที่ 2.12 ที่พัฒนาโดย Canadian Process Technologies (CPT) หลังจากที่ได้ทดสอบใช้ชุดคอลัมน์ลอยแร่ศึกษาหาสภาวะเงื่อนไขการลอยที่เหมาะสม และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของคอลัมน์ลอยแร่ ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพคอลัมน์ลอยแร่ดีกว่าเซลล์ลอยแร่ (Conventional Cell) โดยคอลัมน์ลอยแร่สูง 40 cm ถูกแบ่งออกเป็นบริเวณของฟองอากาศขนาดเล็กและบริเวณ

ฟองอากาศจับกับอนุภาคถ่านหิน สำหรับการทำความสะอาดถ่านหินด้วยคอลัมน์ลอยแร่ พบว่าได้ ถ่านหินสะอาดที่นำกลับมาใช้และติดไฟได้ 85% กำจัดซี้เถ้า 81% ที่ประสิทธิภาพการแยกสูงสุด 62% เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์ลอยแร่ที่ให้ถ่านหินนำกลับมาใช้ได้ 70% กำจัดซี้เถ้า 70% ที่ ประสิทธิภาพ 42%



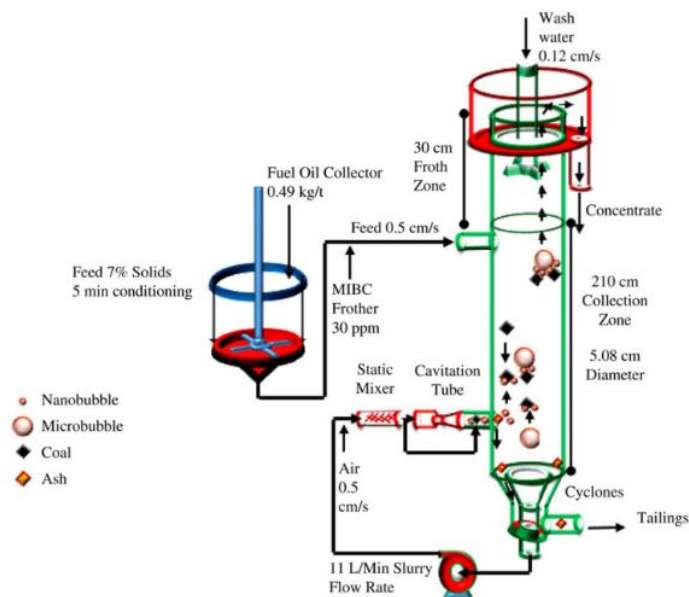
รูปที่ 2.11 แผนภาพคอลัมน์ลอยแร่ทดสอบกับฟองอากาศขนาดเล็กระดับปิโค [11]



รูปที่ 2.12 แผนภาพคอลัมน์ลอยแร่ แบบ CoalPro Flotation Column [12]

Jena และคณะ [13] ได้ทดลองเปรียบเทียบการใช้เซลล์ลอยแร่และคอลลิม์ลอยแร่สำหรับล้างทำความสะอาดถ่านหินซึ่งมีปริมาณซัลเฟอร์, สารระเหย, และคาร์บอนเฉลี่ย 24.4%, 19.8% และ 53.8% ตามลำดับ ในการทดลองได้เติมสารเคมี คือ น้ำมันดีเซล (Light Diesel Oil) สำหรับเป็นตัวเคลือบผิวอนุภาคถ่านหิน และน้ำมันสน (Pine Oil) สำหรับเคลือบผิวให้กับฟองอากาศ ซึ่งจากการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการล้างถ่านหิน พบว่าคอลลิม์ลอยแร่จะให้ผลการล้างที่สามารถกำจัดสิ่งสกปรกออกได้มากกว่าการใช้เซลล์ลอยแร่

Sobhy และคณะ [14] ได้ศึกษากระบวนการล้างและแยกอนุภาคถ่านหิน ซึ่งจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้กับอนุภาคถ่านหินมีขนาด 50-600  $\mu\text{m}$  ทดสอบโดยการใช้ฟองอากาศขนาดเล็กระดับนาโน (Nanobubbles) ที่อาศัยหลักการสร้างปรากฏการณ์โพรงอากาศในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาด จากการทดลองพบว่าอนุภาคถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 150  $\mu\text{m}$  เมื่อจับกับฟองอากาศขนาดเล็กระดับนาโน จะทำให้ได้ถ่านหินที่สามารถนำกลับมาใช้งานได้ เพิ่มขึ้น 5-50% ดังแสดงในรูปที่ 2.13

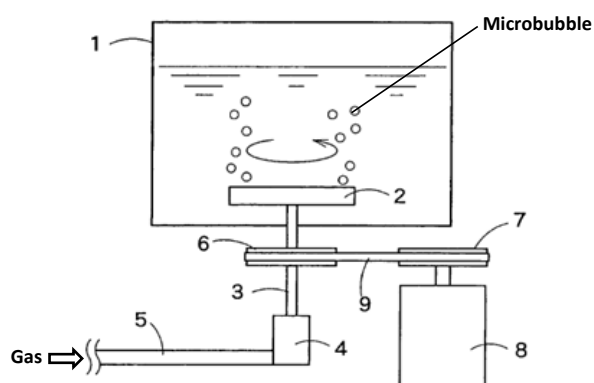


รูปที่ 2.13 แผนภาพคอลลิม์ลอยแร่และตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับนาโน [14]

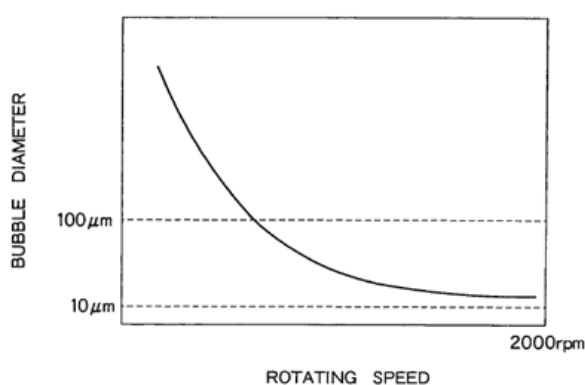
## 2.6 การสืบค้นจากฐานข้อมูลสิทธิบัตร

### 2.6.1 การสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก

สิทธิบัตร US 0258509A1 [15] เสนอรูปแบบตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน โดยวิธีการเป่าอากาศผ่านรูที่อยู่บนผิวของแผ่นโรเตอร์ที่กำลังหมุนอยู่ในของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 2.14 แรงเฉือนที่เกิดจากการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างของเหลวกับผนังของแผ่นโรเตอร์ที่หมุนจะทำให้ฟองอากาศถูกย่อยเป็นฟองขนาดเล็ก วิธีนี้สามารถสร้างฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอนได้จำนวนมาก โดยไม่ต้องบังคับให้เกิดการไหลแบบหมุนวนของของเหลว แต่จะต้องมีรอบการหมุนของจานหมุนที่ค่อนข้างสูงจึงจะได้ฟองอากาศที่มีขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.15



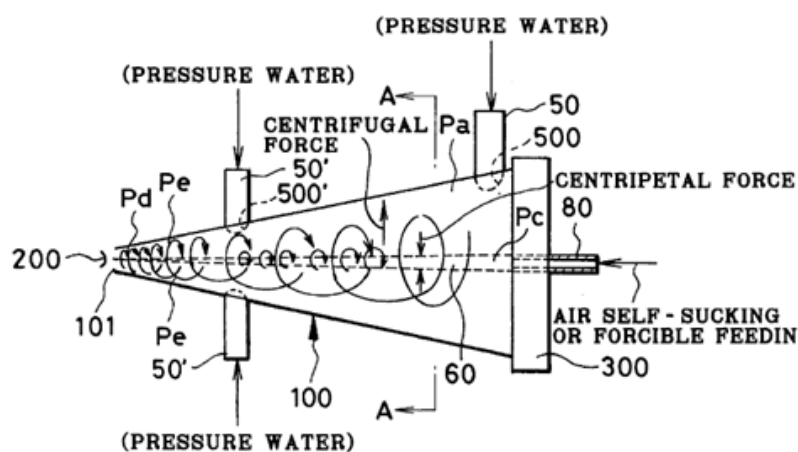
รูปที่ 2.14 ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน  
โดยวิธีการเป่าอากาศผ่านรูบนผิวของโรเตอร์ [15]



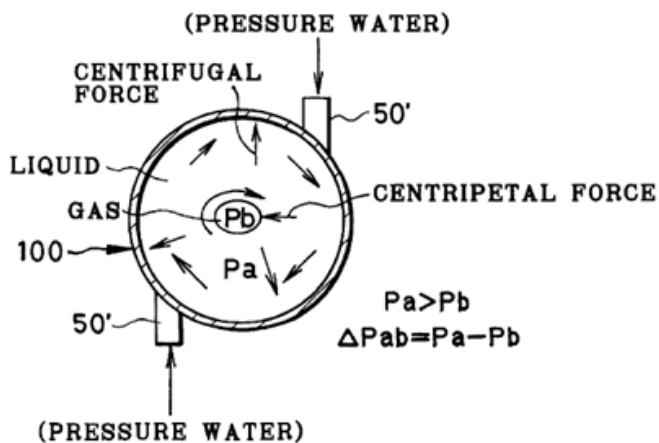
รูปที่ 2.15 ขนาดฟองอากาศที่ได้จากอุปกรณ์สร้างฟองอากาศขนาดเล็ก  
ที่ความเร็วการหมุนของจานในระดับต่างๆ [15]



สิทธิบัตร US 6382601B1 [16] เสนอรูปแบบตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน ซึ่งสามารถสร้างฟองอากาศที่มีขนาด 10-20  $\mu\text{m}$  โดยตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กมีลักษณะเป็นท่อทรงกรวย มีทางเข้าของน้ำในแนวสัมผัสทั้งหมด 3 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) กระทำบนของเหลวและแรงสู่ศูนย์กลาง (Centripetal Force) กระทำบนอากาศพร้อมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.17

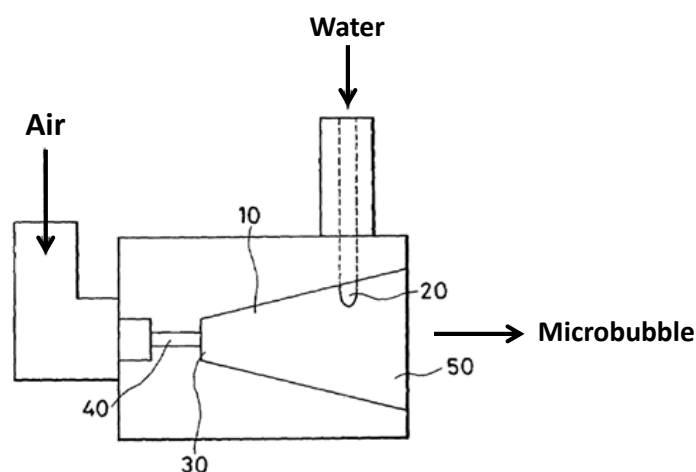


รูปที่ 2.16 ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน [16]

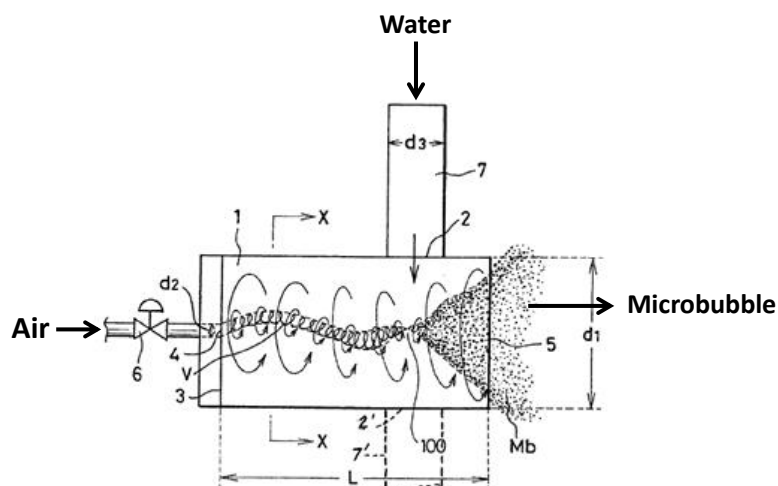


รูปที่ 2.17 การเกิดแรงหนีศูนย์กลางและแรงสู่ศูนย์กลางของน้ำและอากาศภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน [16]

สิทธิบัตร US 7261283B1 [17] เสนอรูปแบบตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน ซึ่งสามารถสร้างฟองอากาศที่มีขนาดต่ำกว่า  $20\ \mu\text{m}$  โดยตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กมีลักษณะเป็นท่อทรงกรวย มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดให้ขยายออก ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งแบบเดิมตัวกำเนิดฟองอากาศมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งยากต่อการสร้างฟองอากาศที่มีขนาดเล็ก

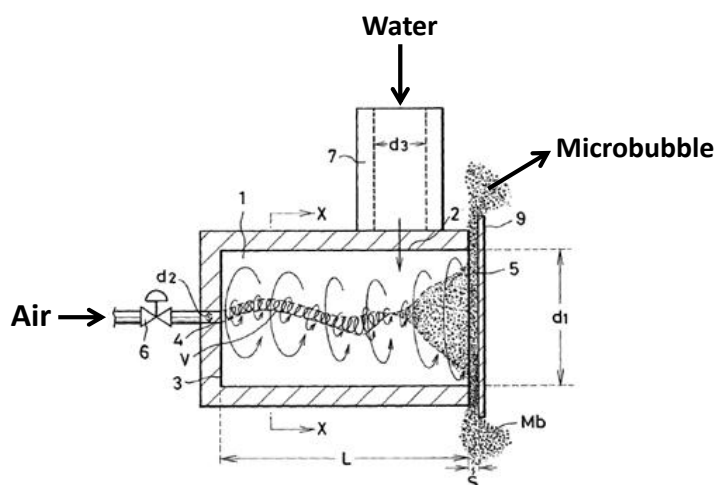


รูปที่ 2.18 ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน แบบท่อทรงกรวย [17]

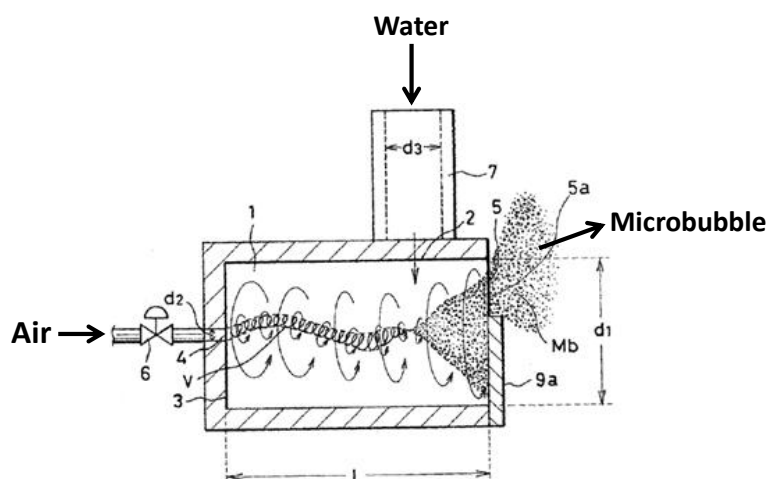


รูปที่ 2.19 ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน แบบทรงกระบอกกลาง [17]

สิทธิบัตร US 7472893B2 [18] เสนอรูปแบบตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน ซึ่งสามารถสร้างฟองอากาศที่มีขนาดต่ำกว่า  $2\ \mu\text{m}$  สามารถควบคุมปริมาณของฟองอากาศได้ด้วยการใช้แผ่นกั้นที่มีระยะห่างจากปากทางออกเพียงเล็กน้อย หรือใช้ผนังปิดปากทางออกของท่อทรงกระบอกหลักไว้ส่วนหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.20 และรูปที่ 2.21 ตามลำดับ สำหรับตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กจะมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกกลวง

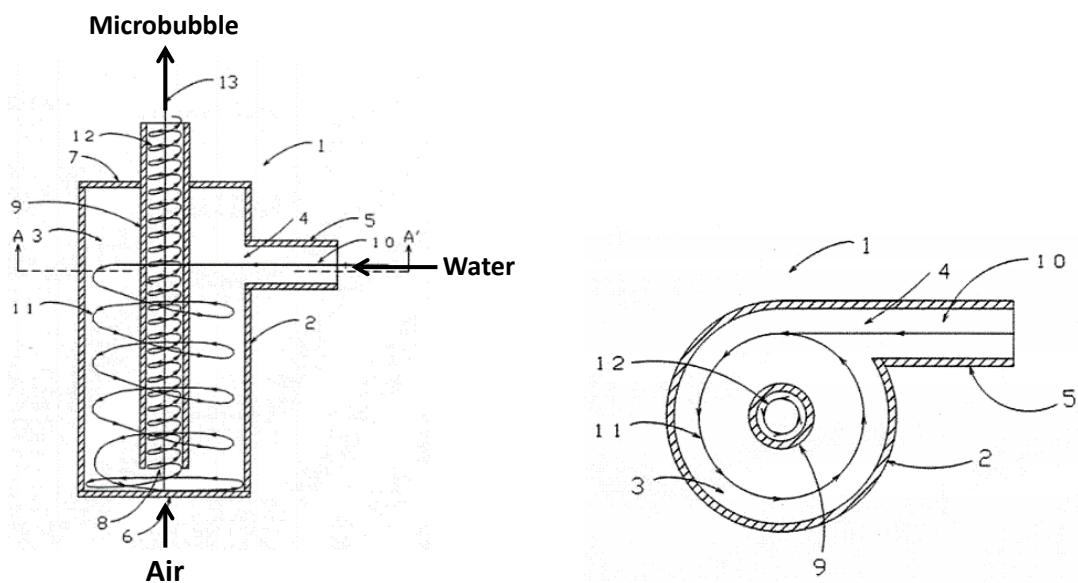


รูปที่ 2.20 ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน แบบติดตั้งแผ่นกั้นห่างจากบริเวณทางออกของฟองอากาศเล็กน้อย [18]



รูปที่ 2.21 ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน แบบติดตั้งผนังบริเวณปากทางออกของฟองอากาศบางส่วน [18]

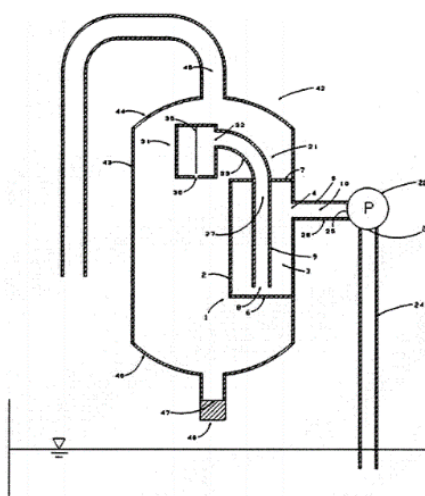
สิทธิบัตร US 0126436A1 [19] เสนอการพัฒนาตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน โดยมีท่อติดตั้งภายในอีกหนึ่งชั้น ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.22 โดยตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กนี้จะต้องนำไปใช้ร่วมกับอุปกรณ์ตามที่ได้ออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.23 จึงสามารถสร้างฟองอากาศที่มีขนาดอยู่ในช่วง 50-200 nm



(ก) รูปตัดด้านข้าง

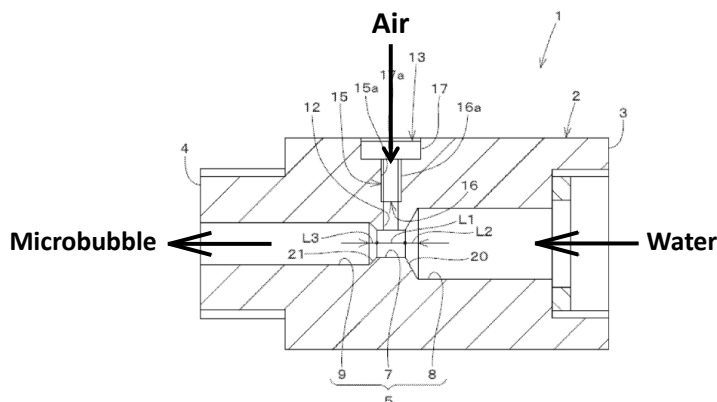
(ข) รูปตัดด้านบน

รูปที่ 2.22 ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน แบบติดตั้งท่อบังคับการไหล [19]



รูปที่ 2.23 อุปกรณ์ที่ต้องใช้ร่วมกับตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน [19]

สิทธิบัตร US 0214436A1 [20] เสนอรูปแบบตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอนแบบคอคอด ดังแสดงในรูปที่ 2.24 จุดเด่นของการออกแบบ คือ มีรูปร่างที่ไม่ซับซ้อนสามารถผลิตได้ง่าย โดยลักษณะของคอคอดเป็นแบบลดขนาดคงที่ บริเวณที่เติมอากาศเป็นรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับฝักบัวอาบน้ำในครัวเรือนได้



รูปที่ 2.24 ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน แบบบีเจ็คเตอร์ [20]

จากการสืบค้นข้อมูลจากสิทธิบัตรที่ผ่านมาเห็นได้ว่าการคิดค้นตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอนในหลากหลายรูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบก็มีประสิทธิภาพในการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กที่แตกต่างกันออกไป นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมปริมาณและขนาดฟองอากาศได้

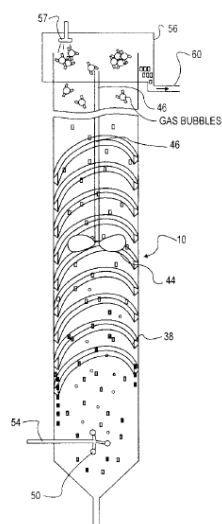
### 2.6.2 การแยกอนุภาคด้วยการลอยแร่

สิทธิบัตร US 6056125 [21] เสนออุปกรณ์และวิธีการแยกสิ่งสกปรกออกจากถ่านหิน ดังแสดงในรูปที่ 2.25 โดยการประยุกต์ใช้ระบบสร้างฟองอากาศในการทดสอบคู่กับคอลัมน์ลอยแร่ โดยการติดตั้งใบพัดไว้ตรงกลางของคอลัมน์ลอยแร่ สำหรับสร้างแรงหมุนเหวี่ยงและทำให้น้ำเกิดการปั่นป่วน ส่งผลให้สิ่งสกปรกและซีเมนต์หลุดออกจากถ่านหิน

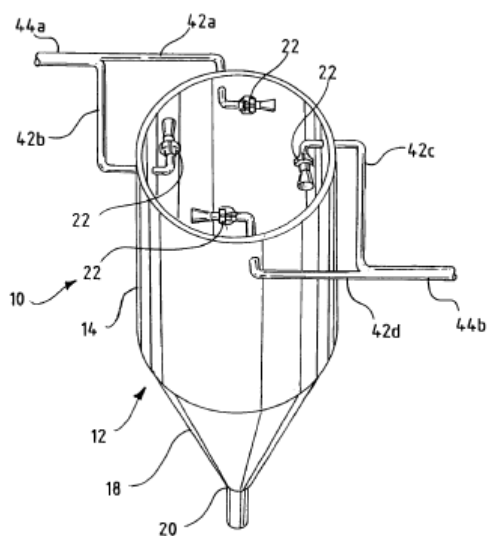
สิทธิบัตร US 0242000A1 [22] เสนอรูปแบบของคอลัมน์ลอยแร่ มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกขนาดใหญ่ ผนังด้านข้างและด้านล่างติดตั้งท่อสำหรับระบายน้ำออก ด้านล่างมีลักษณะเป็นไซโคลน เมื่อของไหลไหลวนในคอลัมน์จะเกิดการหมุนเหวี่ยง ทำให้สิ่งสกปรกที่เจือปนกับอนุภาคถ่านหินถูกกำจัดออกไปได้ ดังรูปที่ 2.26

สิทธิบัตร US 5167798 [23] เสนอการแยกอนุภาคโดยคอลัมน์ลอยแร่และใช้ฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 2.27 โดยได้ทดสอบกับอนุภาคที่มีความละเอียดและหยาบ

เพื่อให้ได้อนุภาคที่สะอาดและสามารถนำกลับมาใช้ได้ ซึ่งจุดเด่นของการสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก  
ระดับไมครอน คือ มีประสิทธิภาพสูง และราคาถูก



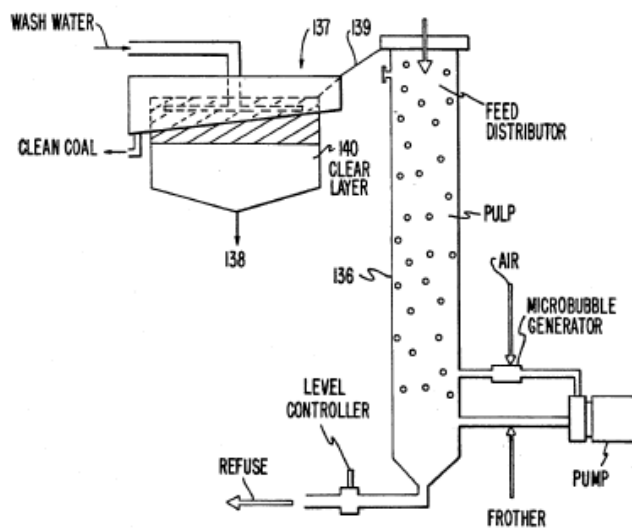
รูปที่ 2.25 คอลัมน์ลอยแร่สำหรับล้างถ่านหิน แบบใช้ใบพัด [21]



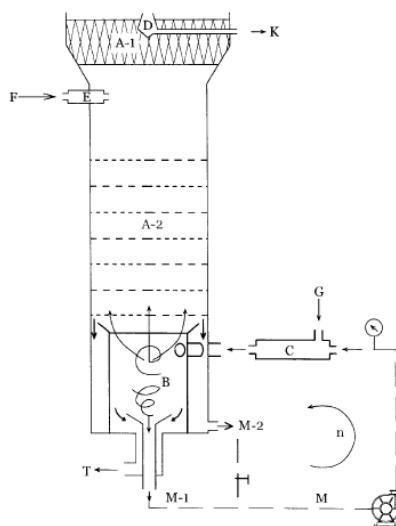
รูปที่ 2.26 คอลัมน์ลอยแร่สำหรับล้างถ่านหิน แบบไซโคลน [22]

สิทธิบัตร US 6073775 [24] เสนออุปกรณ์สร้างฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอนที่ใช้  
คู่กับคอลัมน์ลอยแร่ โดยด้านล่างมีลักษณะเป็นไซโคลนเพื่อใช้เป็นบริเวณสำหรับแยกอนุภาคและ

สิ่งสกปรกออกจากกัน อนุภาคถ่านหินจะจับกับฟองอากาศแล้วลอยขึ้นสู่ด้านบนของคอลัมน์ ส่วนขี้เถ้าและสิ่งสกปรกจะตกลงสู่ด้านล่างของคอลัมน์ลอยแร่ ดังแสดงในรูปที่ 2.28

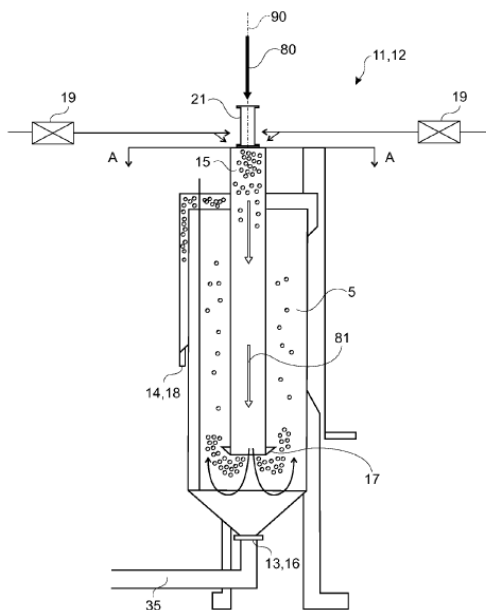


รูปที่ 2.27 คอลัมน์ลอยแร่และชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน [23]



รูปที่ 2.28 คอลัมน์ลอยแร่แบบไซโคลนและชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน [24]

สิทธิบัตร US 0089679A1 [25] เสนอรูปแบบตัวกำเนิดฟองอากาศพร้อมกับอุปกรณ์ฉีดพ่นผงอนุภาค ซึ่งจะติดตั้งอยู่ด้านบนสุดของคอลัมน์ลอยแร่ จากนั้นอนุภาคจะจับกับฟองอากาศแล้วลอยขึ้นด้านบน จากนั้นจะไหลออกไปตามท่อด้านข้างคอลัมน์ ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 คอลัมน์และอุปกรณ์ฟลูอิดเบด [25]

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการลอยแร่โดยใช้ฟองอากาศขนาดเล็กเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของแร่หรือถ่านหินให้สูงขึ้น กล่าวคือ สามารถกำจัดหรือช่วยลดปริมาณมลทินหรือสิ่งสกปรก จำพวกซีเมนต์และซัลเฟอร์ออกจากถ่านหิน ในขณะเดียวกันสามารถเพิ่มปริมาณคาร์บอนคงที่และค่าความร้อนในถ่านหินให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามกระบวนการหรือวิธีการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กยังมีข้อด้อยในด้านการใช้พลังงานจากปั๊มที่สิ้นเปลือง ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการประยุกต์วิธีการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน โดยนำจุดเด่นหรือคุณสมบัติพิเศษของฟองอากาศขนาดเล็ก เช่น ระยะเวลาที่ลอยตัวอยู่ในน้ำได้นาน อีกทั้งฟองอากาศขนาดเล็กยังแตกสลายได้ยากกว่าฟองอากาศทั่วไป นอกจากนี้ฟองอากาศขนาดเล็กสามารถเกาะติดหรือจับกับอนุภาคขนาดเล็กได้ดี เป็นต้น มาใช้คู่กับคอลัมน์ลอยแร่สำหรับล้างและแยกผงถ่านหิน เพื่อกำจัดและแยกสิ่งสกปรกออกจากถ่านหิน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของถ่านหินให้สูงขึ้น นอกจากนี้คอลัมน์ลอยแร่ที่ใช้ในงานวิจัย มีความแตกต่างจากคอลัมน์ลอยแร่แบบทั่วไป คือ การติดแผ่นกั้นบริเวณตรงกลางคอลัมน์ สำหรับแบ่งช่องการไหล เพื่อเพิ่มระยะเวลาของฟองอากาศและถ่านหินให้ลอยอยู่ในคอลัมน์ได้นานขึ้น รวมทั้งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการล้างและแยกผงถ่านหินให้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังใช้เป็นระบบน้ำไหลวน ช่วยเพิ่มโอกาสที่อนุภาคผงถ่านหินจะจับกับฟองอากาศขนาดเล็กได้มากขึ้น ส่งผลต่อการลดปริมาณสิ่งสกปรกจำพวกซีเมนต์และซัลเฟอร์ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม



### บทที่ 3

#### ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย

ในบทที่ 3 แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนที่หนึ่ง การศึกษารูปแบบและลักษณะการเกิดฟองอากาศขนาดเล็กจากตัวกำเนิดฟองรูปแบบต่างๆ รวมทั้งการวัดขนาดฟองอากาศ นอกจากนี้ศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในตัวกำเนิดฟองอากาศ โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent) ส่วนที่สอง การศึกษาลักษณะการไหลของของไหลในคอลัมน์ลอยแร่ โดยเปรียบเทียบผลระหว่างการถ่ายภาพและวิเคราะห์ภาพอนุภาคแบบ Particle Image Velocimetry (PIV) และการจำลองการไหลด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ส่วนที่สาม ศึกษาขนาดฟอง, ความดันของอากาศภายในถังความดัน, ความสูงของแผ่นกั้น และระยะเวลาที่มีผลต่อการล้างและแยกผงถ่านหิน

#### 3.1 รายละเอียดตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก

รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของตัวกำเนิดฟองอากาศที่ใช้ในงานวิจัยแบ่งเป็น 3 แบบ ได้แก่ วัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน (Porous Stones), หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ (Ejector Nozzle) และการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน (Pressure Tank)

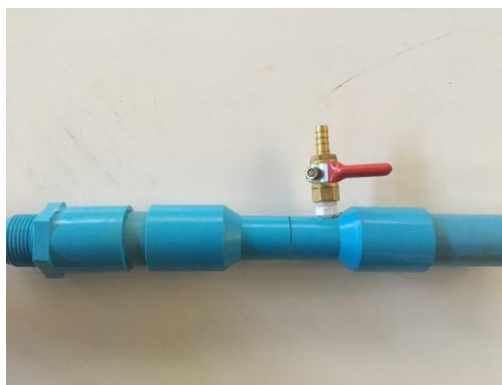
วัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจานทำจากวัสดุประเภทเซรามิก (รูปที่ 3.1(ก)) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 inch และมีขนาดของรูพูน (Pore Size) เฉลี่ยเท่ากับ 140 Å โดยอากาศสามารถไหลผ่านช่องว่างหรือรูเล็กๆ ได้ เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีลักษณะเป็นรูพูน จากนั้นเมื่ออัดอากาศผ่านเข้าไปยังท่อหรือสายยางที่เชื่อมต่อกับหัวทราย ทำให้อากาศที่ออกมากระจายตัวออกเป็นฝอยและมีขนาดใหญ่น้อยปะปนกัน ส่วนหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ (รูปที่ 3.1(ข)) ทำจากซอลด์พีวีซีมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 inch x 1/2 inch เจาะรูขนาด 1/4 inch ไว้ตรงตำแหน่งที่มีการลดขนาดของพีวีซี (คอคอด) สำหรับการดูดอากาศเข้ามาในหัวฉีด ซึ่งฟองอากาศที่ผ่านการตัดเฉือนด้วยความเร็วของน้ำ ส่งผลให้เกิดการกระจายแตกออกเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก นอกจากนี้การใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน (รูปที่ 3.1(ค)) ซึ่งอาศัยหลักการดูดอากาศจากภายนอกผ่านหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์เข้ามาอัดในถังความดัน โดยกำหนดให้ความดันที่ใช้ในระบบอยู่ในช่วง 3-6 bar [26-29] เนื่องจากการเพิ่มความดันให้กับน้ำโดยใช้อากาศและเมื่อความดันรวมในระบบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการละลายของอากาศในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น จึงเกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็กและส่งผลให้มีปริมาณของฟองอากาศที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าการละลายของอากาศในน้ำที่ความดันต่างๆ เมื่ออุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 25°C [30] ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าการละลายของอากาศในน้ำที่ความดันต่างๆ

ความดัน (atm)	อากาศละลายในน้ำ (g/kg)
1	0.023
2	0.045
3	0.068
4	0.091
5	0.114
6	0.136



(ก) วัสดุพอรุนหรือหัวทรายแบบจาน  
(Porous Stones)



(ข) หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์  
(Ejector Nozzle)



(ค) ถังความดัน  
(Pressure Tank)

รูปที่ 3.1 รูปแบบตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กที่ใช้ในงานวิจัย

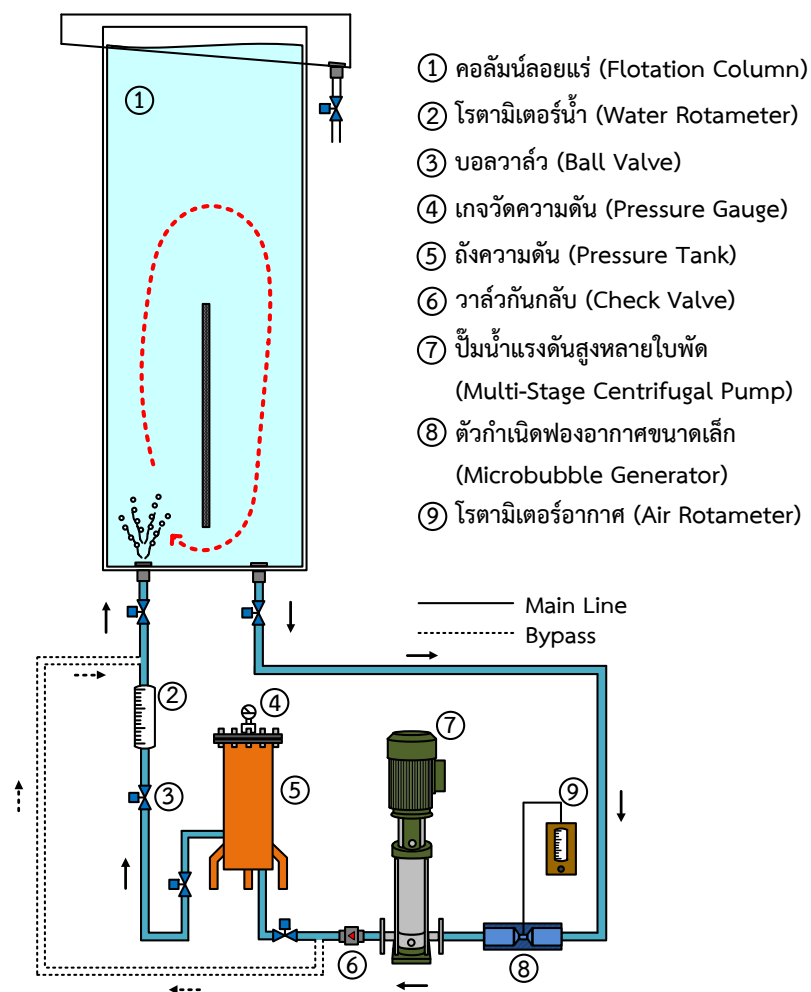
### 3.2 รายละเอียดชุดทดลอง

แผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัย รูปที่ 3.2 ประกอบด้วยคอลัมน์ลอยแร่และชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก จากรูปที่ 3.3 แสดงรูปแบบของคอลัมน์ลอยแร่มีลักษณะเป็นตู้สี่เหลี่ยมทำจากกระจกใส ขนาดความกว้าง 12.5 cm ยาว 30 cm และสูง 75 cm ตรงกลางติดแผ่นกั้นขนาดความกว้าง 12.5 cm ไว้เหนือฐานคอลัมน์ 5 cm มีลักษณะเป็นการแบ่งช่องการไหลออกเป็น 2 ช่อง ฝั่งซ้ายเป็นทางเข้าของน้ำและฟองอากาศขนาดเล็ก ส่วนฝั่งขวาเป็นทางออกสำหรับไหลกลับไปยังชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กอีกครั้ง โดยมีการเจาะรูขนาด 1 inch จำนวน 2 รู ไว้ที่ฐานของคอลัมน์

สำหรับชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวกำเนิดฟองอากาศ (หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์), ปั๊มน้ำแรงดันสูงหลายใบพัด (Multi-Stage Centrifugal Pump) ยี่ห้อ Arwana Pump รุ่น MTVS-215 ขนาด 2 hp, ถังความดัน (Pressure Tank), โรตاميเตอร์ (Rotameter) สำหรับวัดอัตราการไหลของน้ำ ยี่ห้อ Well รุ่น Z-5032 (Range: 8-80 litre/min) และโรตاميเตอร์สำหรับวัดอัตราการไหลของอากาศ ยี่ห้อ Ki instruments (Range: 0.1-1 litre/min) ดังแสดงในรูปที่ 3.4

ในส่วนของขั้นตอนการทำงาน เริ่มจากน้ำไหลผ่านตัวกำเนิดฟองอากาศ (Microbubble Generator) ซึ่งเป็นหัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์ อากาศถูกดูดอัดโนมิตที่ตำแหน่งคอคอดและเกิดปรากฏการณ์โพรงอากาศขึ้น ส่งผลให้ฟองอากาศเกิดการสลายแตกเป็นฟองขนาดเล็ก โดยมีโรตاميเตอร์สำหรับวัดและควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ไหลเข้าไปยังตัวกำเนิดฟองอากาศ ต่อมา น้ำที่มีฟองอากาศขนาดเล็กไหลผ่านปั๊มน้ำแรงดันสูงและเข้าไปยังถังความดัน โดยปริมาณของฟองอากาศจะขึ้นอยู่กับความดันในถังอัดความดัน จากนั้นน้ำที่มีฟองอากาศขนาดเล็กเคลื่อนที่ไหลผ่านวาล์วซึ่งทำหน้าที่ปรับและควบคุมปริมาณการไหลของน้ำ โดยอ่านค่าผ่านโรตاميเตอร์ จากนั้นน้ำที่มีฟองอากาศขนาดเล็กจะไหลเข้าสู่คอลัมน์ลอยแร่เป็นลำดับถัดไป

นอกจากนี้ชุดทดลองยังมีในส่วนของท่อสำหรับเบี่ยงเส้นทางน้ำ (Bypass) เพื่อช่วยลดอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านท่อหลัก สำหรับใช้ในกรณีที่ต้องการควบคุมอัตราการไหลของน้ำให้ผ่านท่อหลักได้น้อย เนื่องจากการปรับอัตราการไหลของน้ำในท่อหลักในน้อยลง ส่งผลให้มีแรงดันในระบบสูงขึ้น ซึ่งอาจมีผลทำให้ปั๊มน้ำรวมทั้งอุปกรณ์อื่นๆ เสียหายได้



รูปที่ 3.2 แผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.3 คอลัมน์ลอยแร่



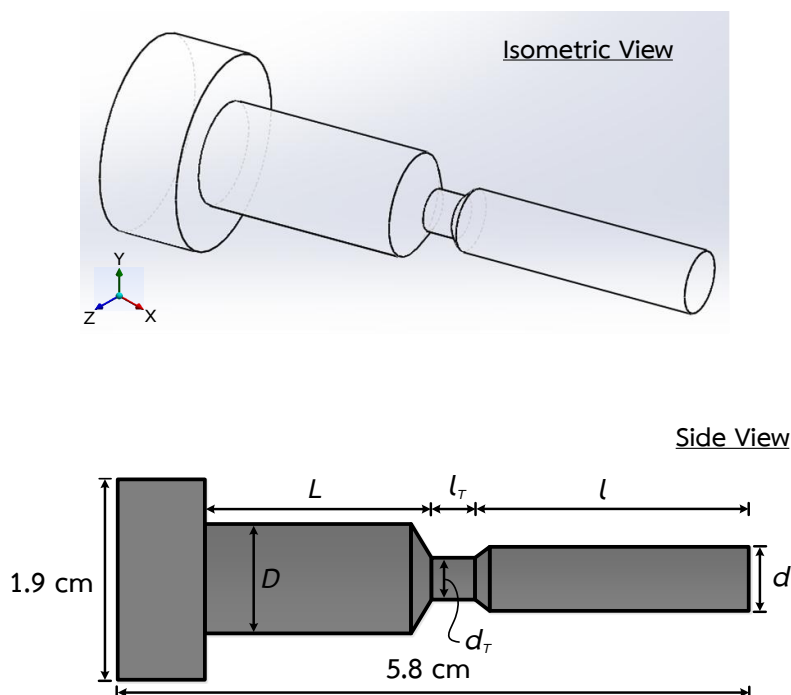
รูปที่ 3.4 ชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน

### 3.3 การศึกษาลักษณะการไหลภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent)

#### 3.3.1 การกำหนดโมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล

งานวิจัยนี้ได้จำลองพฤติกรรมการไหลของน้ำภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์) โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent) เป็นการจำลองการไหลแบบ 3 มิติ (3D) และมีลักษณะหรือรูปแบบเดียวกับการทดลอง นอกจากนี้ กำหนดเฉพาะน้ำที่ไหลเข้าและออกจากโดเมน (การทดลองจะให้อากาศไหลเข้าไปด้วย) เนื่องจากพิจารณาเฉพาะลักษณะการไหลของน้ำภายในชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก

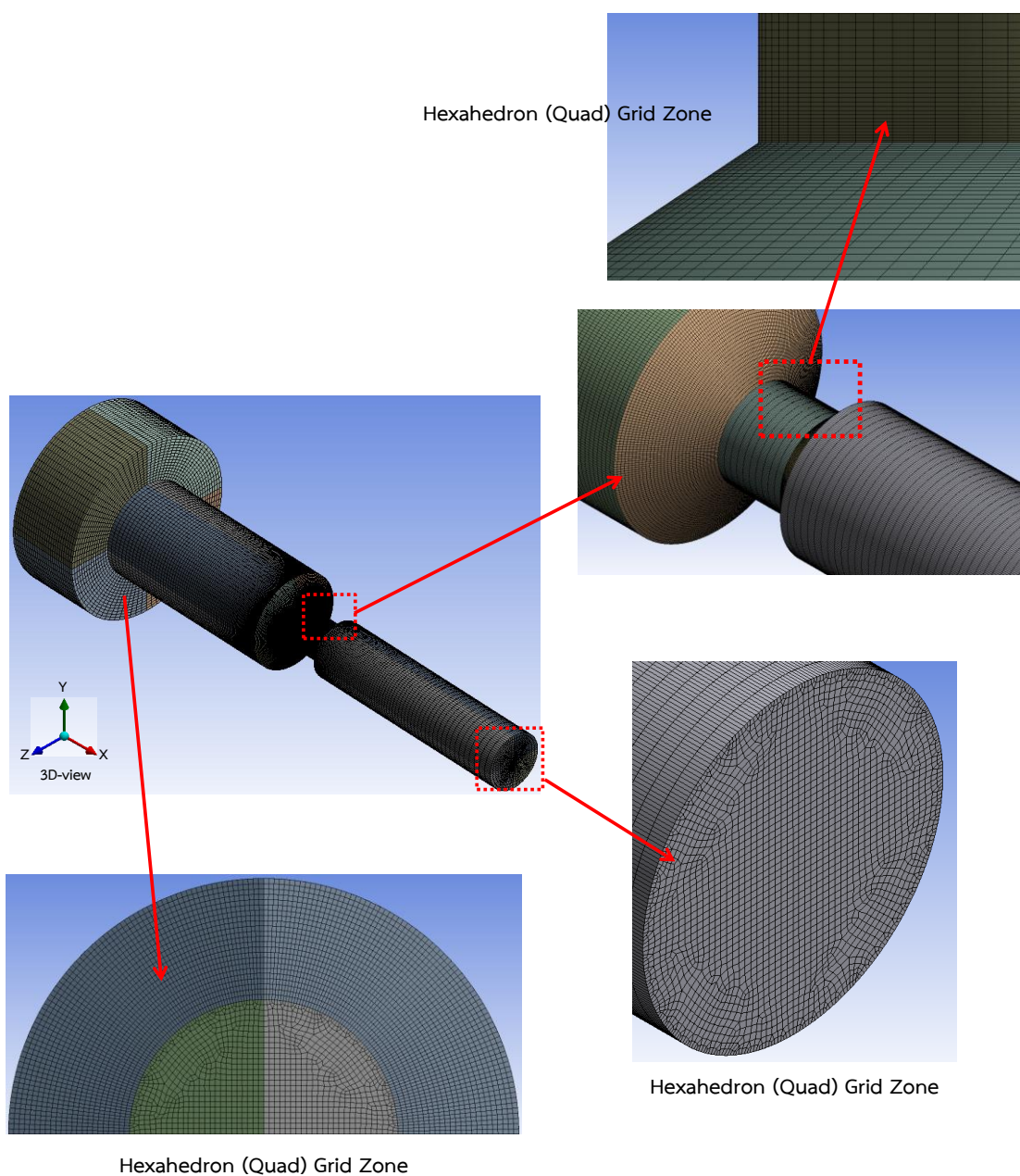
สำหรับแบบจำลองการไหลของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งกำหนดให้เป็นหัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์ มีรูปร่างและขนาดที่สอดคล้องกับสิทธิบัตร US 0214436A1 [20] โดยโมเดลมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก ภายในมีขนาดพื้นที่หน้าตัดลดลงแบบเป็นขั้นบันได กำหนดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าของน้ำ ( $D$ ) เท่ากับ 6 mm และ 10 mm, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของน้ำ ( $d$ ) เท่ากับ 6 mm และ 10 mm, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด ( $d_T$ ) เท่ากับ 3 mm, 4 mm และ 5 mm ส่วนความยาวทางเข้า ( $L$ ) และทางออกของน้ำ ( $l$ ) มีค่าคงที่ที่ 20 mm และ 24 mm ตามลำดับ ส่วนความยาวของคอคอด ( $l_T$ ) มีค่าคงที่ที่ 3 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แบบจำลองของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์)

### 3.3.2 การสร้างกริด (Meshing)

ขั้นตอนการสร้างกริด (Meshing) ของโมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล โดยกำหนดให้รูปแบบการสร้างกริดมีลักษณะเป็นลูกบาศก์สี่เหลี่ยมตลอดทั่วทั้งแบบจำลอง ดังนั้นกริดจึงมีความละเอียดมากบริเวณที่มีการขยายและลดพื้นที่หน้าตัดของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์) ดังแสดงในรูปที่ 3.6

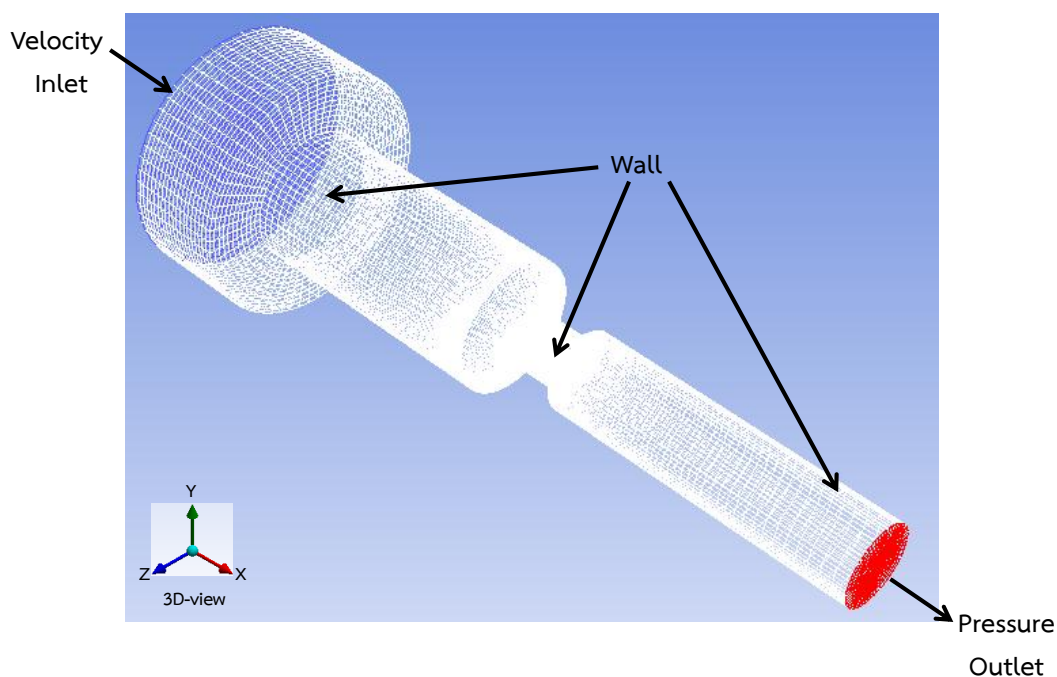


รูปที่ 3.6 ลักษณะของกริดบนแบบจำลองตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์)

### 3.3.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

การจำลองการไหลของน้ำภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์) กำหนดให้ลักษณะการไหลของน้ำเป็นการไหลแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Steady Flow) การคำนวณไม่พิจารณาผลจากการถ่ายเทและการสูญเสียความร้อน โดยกำหนดให้อุณหภูมิของน้ำมีค่าคงที่ รวมทั้งไม่คิดผลของความเร่งโน้มถ่วง

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตบนแบบจำลองตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.7 แบ่งออกเป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณที่ 1 Velocity Inlet (สีน้ำเงิน) คือบริเวณที่เป็นทางเข้าของการไหล โดยกำหนดลักษณะของทางเข้าในรูปแบบของความเร็ว บริเวณที่ 2 Pressure Outlet (สีแดง) คือบริเวณที่กำหนดให้เป็นทางออกของการไหล โดยกำหนดลักษณะของทางออกในรูปแบบของความดัน ส่วนบริเวณที่ 3 Wall (สีขาว) คือบริเวณที่กำหนดให้เป็นผนังของการไหลของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์)



รูปที่ 3.7 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์)

การกำหนดเงื่อนไขของความเร็วทางเข้า, ความดันทางออก, ผนังของการไหล, ความหนาแน่นและความหนืดของน้ำ ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

เงื่อนไขของความเร็วทางเข้า

- กำหนดความเร็วของไหลที่ทางเข้าให้มีค่าคงที่เท่ากับ  $0.9178 \text{ m/s}$  ซึ่งเท่ากับ อัตราการไหลที่ใช้ในการทดลองจริงที่  $15 \text{ litre/min}$

เงื่อนไขของความดันทางออก

- กำหนดให้ความดันทางออกของการไหลเท่ากับความดันบรรยากาศ (ความดัน เกจมีค่าเท่ากับ  $0 \text{ Pa}$ )

เงื่อนไขของผนังของการไหล

- กำหนดให้ผนังไม่มีการไถล และไม่มีการเคลื่อนที่

เงื่อนไขของความหนาแน่นและความหนืดของน้ำ

- กำหนดความหนาแน่นและความหนืดของน้ำ ณ อุณหภูมิขณะทดลองจริงที่  $\text{Density} = 996.2 \text{ kg/m}^3$  และ  $\text{Viscosity} = 0.000819 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$

### 3.3.4 วิธีการคำนวณ

การไหลภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์) สามารถอธิบาย พฤติกรรมของการไหล โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจแบบจำลองความปั่นป่วน แบบ Shear Stress Transport  $k - \omega$  Model (SST  $k - \omega$  Model) ซึ่งถูกค้นพบและพัฒนาโดย Menter's [31] ได้รวมเอาแบบจำลอง 2 ชนิด ผสมผสานเข้าด้วยกันระหว่างการจำลองความปั่นป่วน แบบ  $k - \epsilon$  Model สำหรับการคำนวณการไหลที่บริเวณชั้นไกลจากผนัง (Outer Layer) และการ จำลองความปั่นป่วนแบบ  $k - \omega$  Model สำหรับการคำนวณการไหลที่บริเวณชั้นชิดผนัง (Inner Layer) ซึ่งสามารถให้ผลการลู่เข้าของคำตอบที่ใกล้เคียงและดีสำหรับการไหลแบบหมุนวน และการ ไหลบริเวณใกล้กับผนัง

ส่วนวิธีการคำนวณได้กำหนดอัลกอริทึมเป็นแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) โดยรายละเอียดของ Spatial Discretization ในแต่ละสมการที่ใช้ใน การคำนวณกำหนดตามตารางที่ 3.2 โดยกำหนดเงื่อนไขในการหยุดประมวลผลที่ค่าความผิดพลาด (Residuals) เท่ากับ  $1 \times 10^{-5}$



**ตารางที่ 3.2** การกำหนดรายละเอียดของเงื่อนไข Spatial Discretization สำหรับการจำลองการไหลภายในกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์)

Solution Method	Spatial Discretization
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Second Order Upwind
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Specific Dissipation Rate	Second Order Upwind

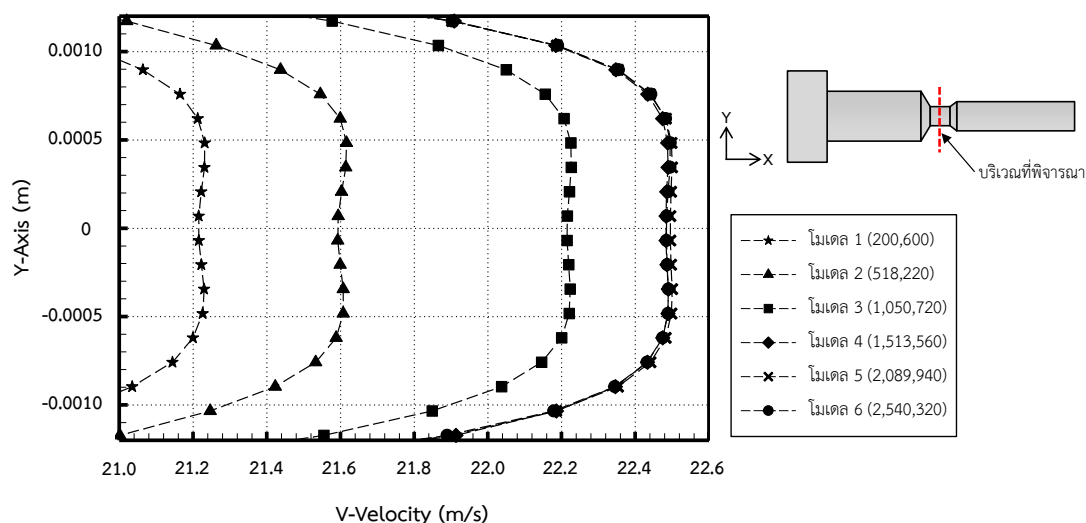
### 3.3.5 การหาค่าจำนวนกริดที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลอง

ในการหาค่าจำนวนกริดหรือความละเอียดให้มีความเหมาะสมกับแบบจำลอง โดยใช้โมเดลตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์) ได้กำหนดให้โมเดลมีจำนวนกริดที่แตกต่างกันออกไปจำนวน 6 โมเดล ได้แก่

โมเดลที่ 1	200,600 Elements
โมเดลที่ 2	518,220 Elements
โมเดลที่ 3	1,050,720 Elements
โมเดลที่ 4	1,513,560 Elements
โมเดลที่ 5	2,089,940 Elements
โมเดลที่ 6	2,540,320 Elements

การคำนวณใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Shear Stress Transport  $k - \omega$  Model (SST  $k - \omega$  Model) กำหนดอัลกอริทึมเป็นแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) และ Spatial Discretization ทุกเทอมเป็นแบบ Second Order Upwind

จากรูปที่ 3.8 แสดงผลของจำนวนกริดที่มีต่อการกระจายความเร็วตามแนวรัศมี (Y-Axis) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางคอคอด พบว่าผลการจำลองที่ออกมามีค่าที่แตกต่างกันตั้งแต่โมเดลที่ 1 ถึงโมเดลที่ 4 และเมื่อเพิ่มจำนวนกริดจากโมเดลที่ 5 ถึงโมเดลที่ 6 ผลการจำลองมีค่าที่ใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าจำนวนกริดที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการจำลองอยู่ที่โมเดลที่ 5 คือ 2,089,940 Elements เนื่องจากจำนวนกริดที่น้อย อาจทำให้ผลการจำลองเกิดความผิดพลาดหรือคลาดเคลื่อน ส่วนจำนวนกริดที่มากเกินไป ซึ่งให้ผลการจำลองที่คล้ายคลึงกัน ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้กริดที่มีปริมาณมาก เนื่องจากการสิ้นเปลืองทรัพยากรและเวลาในการจำลอง



รูปที่ 3.8 การกระจายความเร็วตามแนวรัศมี กรณีตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์) ที่จำนวนกริดต่างๆ

### 3.4 รายละเอียดชุดทดลองและขั้นตอนสำหรับการวัดขนาดฟองอากาศ

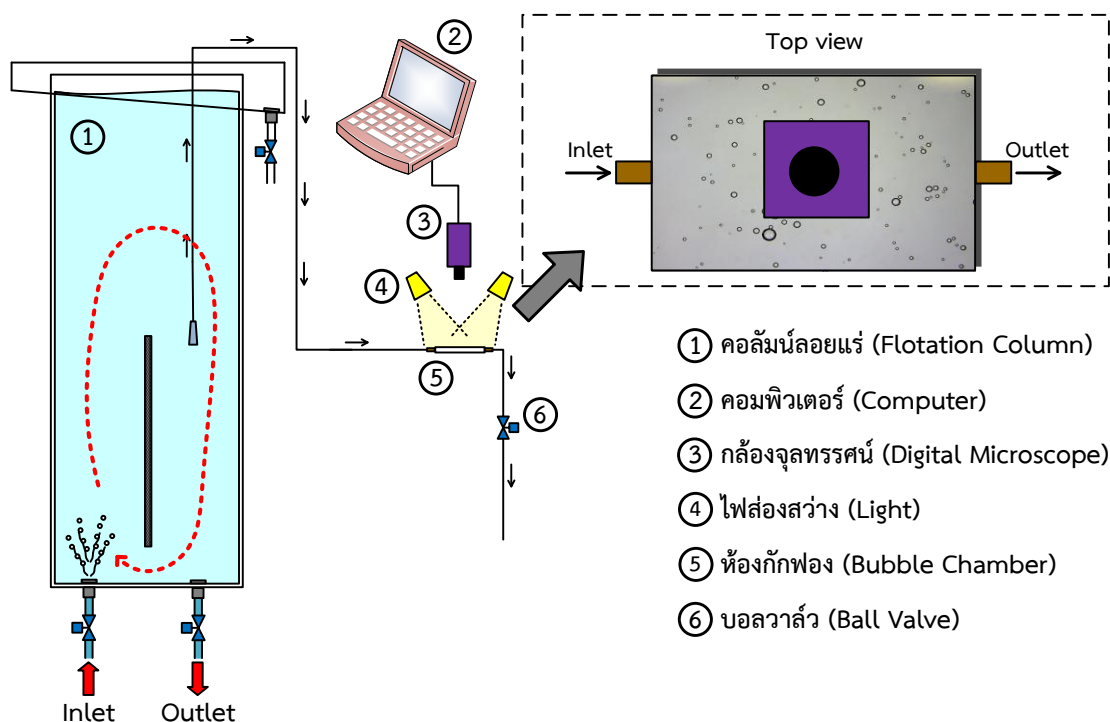
รูปที่ 3.9 แสดงแผนภาพชุดทดลองสำหรับวัดขนาดฟองอากาศ จากรูปคอลัมน์ซึ่งเชื่อมต่อกับชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน (Microbubble Generator) ด้วยสายยางขนาด 1½ inch เติมน้ำในคอลัมน์และเปิดระบบสร้างฟองอากาศ โดยปรับอัตราการไหลของน้ำ, อัตราการไหลของอากาศ และความดันตามเงื่อนไขในแต่ละการทดลอง จากนั้นดูดฟองอากาศที่อยู่ในคอลัมน์ให้ไหลผ่านวาล์วเข้าไปยังห้องกักฟอง แสดงในรูปที่ 3.10 โดยทำจากแผ่นกระจกใสขนาดความกว้าง 12 cm ยาว 16 cm ติดประกบเข้ากับแผ่นอะคริลิก ซึ่งมีขนาดเท่ากับแผ่นกระจกใส นอกจากนี้ยังเว้นช่องว่างระหว่างแผ่นกระจกและแผ่นอะคริลิก 0.2 cm เพื่อให้ฟองอากาศขนาดเล็กสามารถอยู่ในห้องกักได้ เจาะรูที่แผ่นอะคริลิกจำนวน 2 รู สำหรับเป็นทางเข้า-ออกของฟองอากาศขนาดเล็ก ติดตั้งกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิตอล (USB Digital Microscope H1000X 5.0 Mega Pixel) กำลังขยาย 1,000 เท่า ไว้ด้านบนของห้องกักฟอง สำหรับถ่ายรูปฟองอากาศ ส่วนน้ำที่ไหลออกจากห้องกักจะปล่อยกลับสู่คอลัมน์ตามเดิม

สำหรับขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง เริ่มด้วยการดูดฟองอากาศขนาดเล็กจากคอลัมน์ให้ไหลผ่านอุปกรณ์โดยวิธีกลักน้ำ ซึ่งในระหว่างนั้นน้ำและฟองอากาศสามารถไหลเข้าสู่ห้องกักได้อย่างต่อเนื่อง ต่อมาปิดวาล์วเพื่อขังฟองอากาศขนาดเล็กให้ติดค้างอยู่ภายในห้องกักฟอง จากนั้นถ่ายรูปฟองอากาศขนาดเล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิตอลจำนวน 100 ภาพ นำภาพที่ได้ไปวิเคราะห์หาขนาดฟองอากาศ ด้วยโปรแกรม MATLAB ใช้การคำนวณด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ (Image Processing Method) และกำหนดให้ผลการคำนวณแสดงออกมาในรูปของเส้นผ่านศูนย์กลาง

ของฟอง ซึ่งในแต่ละภาพมีจำนวนฟองอากาศประมาณ 30-50 ฟอง ดังแสดงในรูปที่ 3.11 จากนั้นนำผลการวิเคราะห์แต่ละภาพมาหาค่าเฉลี่ยของขนาดฟองอากาศในแต่ละเงื่อนไข ส่วนรายละเอียดและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองวัดขนาดฟองอากาศ แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองวัดขนาดฟองอากาศ

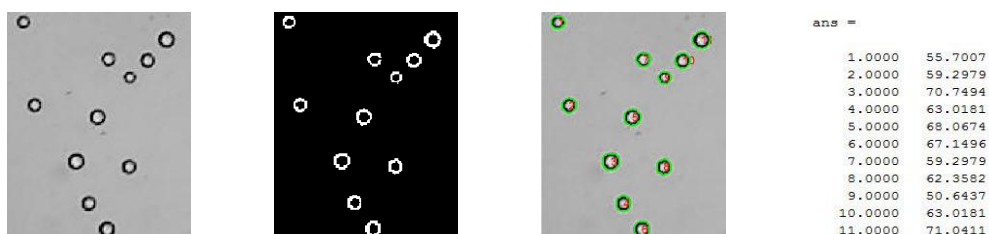
รายละเอียดตัวแปร	เงื่อนไขและขนาด
ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก	<ul style="list-style-type: none"> <li>- วัสดุพอร์นหรือหัวทรายแบบจาน</li> <li>- หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์</li> <li>- หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน</li> </ul>
อัตราการไหลของน้ำ	20 litre/min
อัตราการไหลของอากาศ	0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 litre/min
ความดันของน้ำในถัง	3, 4, 5 และ 6 bar



รูปที่ 3.9 แผนภาพชุดทดลองสำหรับวัดขนาดฟองอากาศ



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ที่ใช้ถ่ายภาพฟองอากาศ



(ก) รูปถ่าย (ข) ปรับเป็นภาพขาว-ดำ (ค) แสดงผล (ง) ขนาดฟองอากาศ

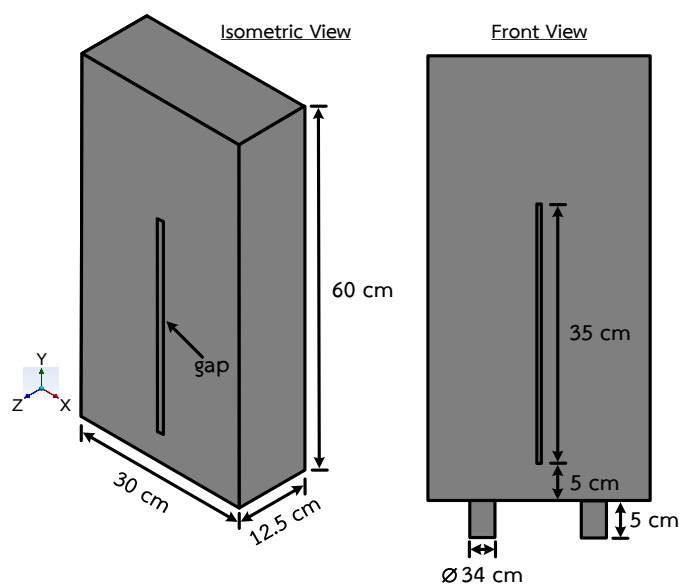
รูปที่ 3.11 เทคนิควิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม MATLAB

### 3.5 รายละเอียดชุดทดลองและขั้นตอนสำหรับการศึกษาลักษณะการไหลของของไหลในคอลัมน์

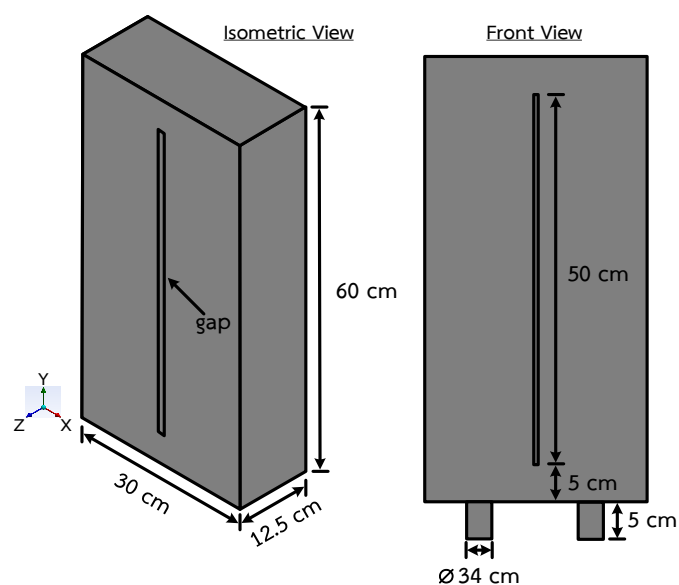
#### 3.5.1 การศึกษาการเคลื่อนที่ โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS

##### Ver.15.0 (Fluent)

งานวิจัยนี้ได้จำลองพฤติกรรมการไหลวนของน้ำภายในคอลัมน์ลอยแร่ โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent) โดยการจำลองการไหลแบบ 3 มิติ (3D) และมีลักษณะหรือรูปแบบเหมือนกับการทดลอง ซึ่งแบบจำลองการไหลของของไหลในคอลัมน์ลอยแร่ ได้แบ่งโมเดลออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกกำหนดเป็นของไหลภายในท่อสำหรับไหลเข้าและไหลออกจากคอลัมน์ ซึ่งมีขนาดความกว้าง 3.4 cm และยาว 5 cm ส่วนที่สองกำหนดเป็นของไหลภายในคอลัมน์ มีลักษณะเป็นตู้สี่เหลี่ยมขนาดความกว้าง 12.5 cm ยาว 30 cm และสูง 60 cm นอกจากนี้ภายในยังมีส่วนที่เป็นช่องว่าง (Gap) เว้นไว้สำหรับแผ่นกั้นซึ่งติดตั้งกลางคอลัมน์ โดยมีความกว้างและยาวเหมือนกับคอลัมน์ลอยแร่ แต่ต่างกันที่ความสูงของแผ่นกั้น โดยกำหนดให้ความสูงของแผ่นกั้นที่เงื่อนไข 35 cm และ 50 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และ 3.13

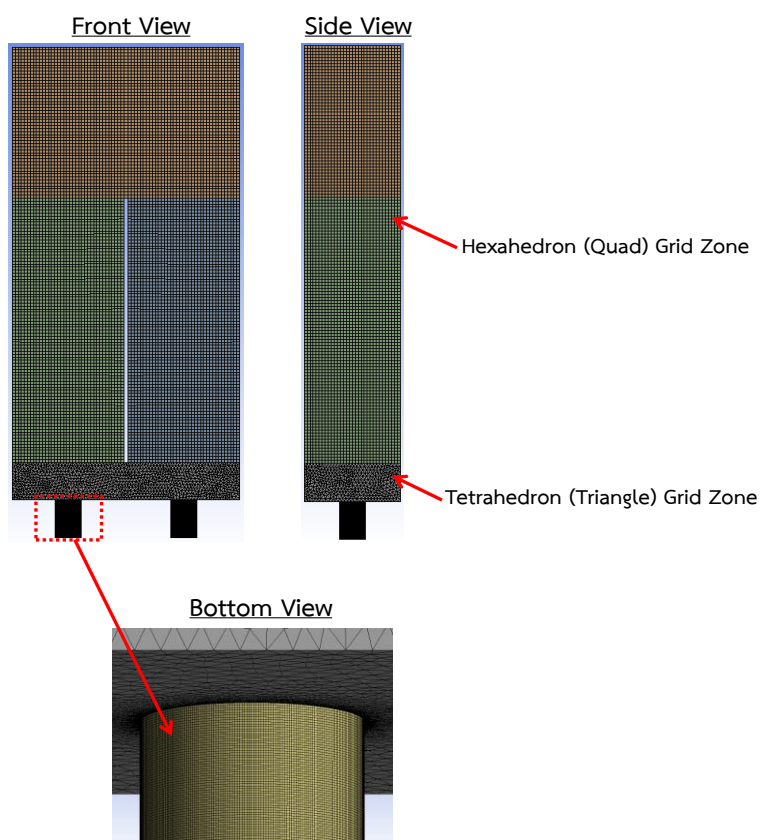
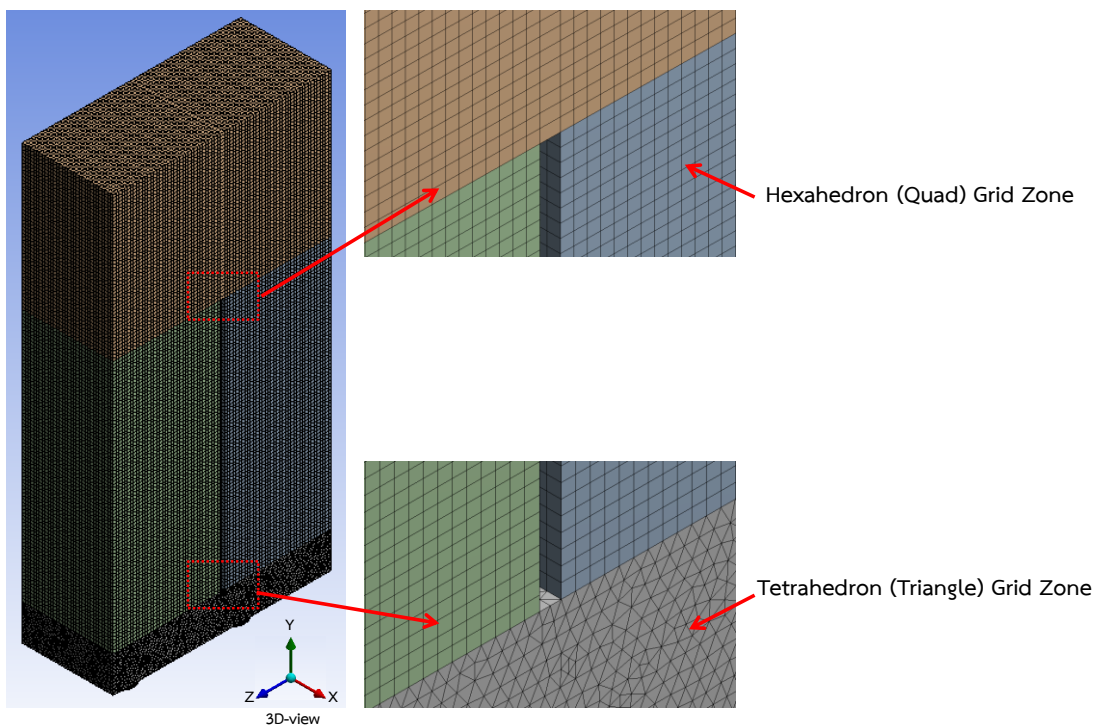


รูปที่ 3.12 แบบจำลองของคอลัมน์ลอยแร่ โดยความสูงของแผ่นกั้น 35 cm

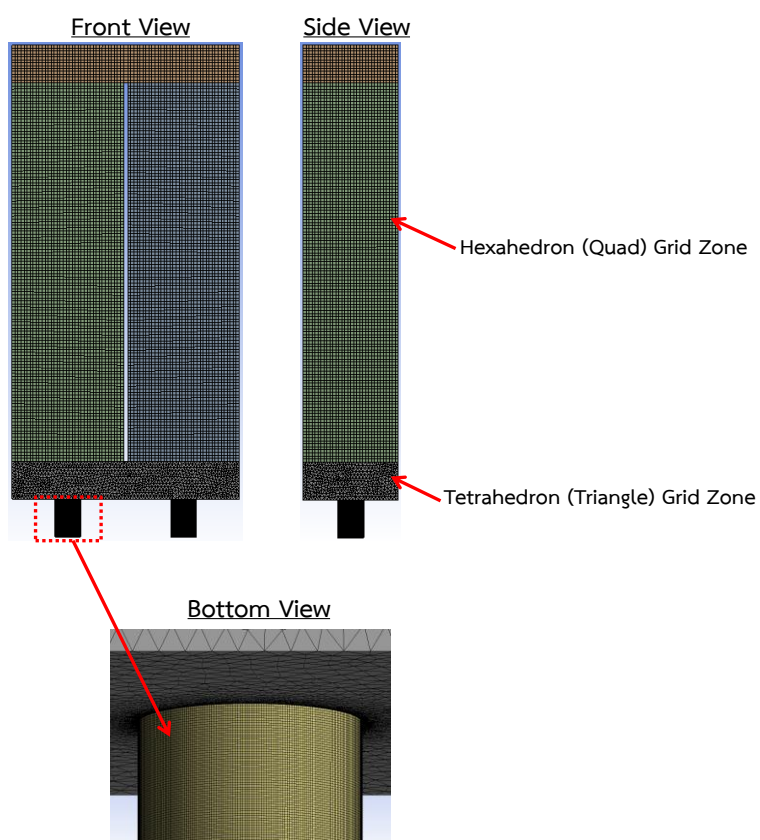
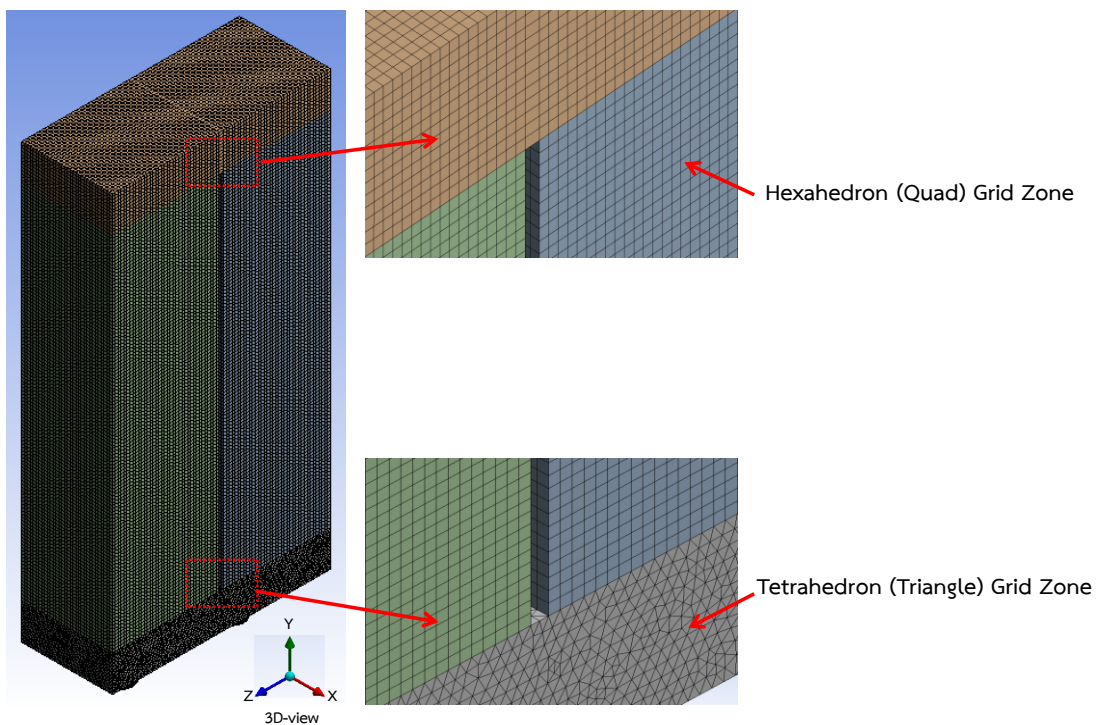


รูปที่ 3.13 แบบจำลองของคอลัมน์ลอยแร่ โดยความสูงของแผ่นกั้น 50 cm

ส่วนการสร้างกริด (Meshing) บนโมเดลคอลัมน์ลอยแร่ กริดมีลักษณะเป็นแบบลูกบาศก์สี่เหลี่ยม และมีความละเอียดมากบริเวณใกล้ผนัง ส่วนรอยต่อระหว่างคอลัมน์และท่อทางเข้า-ออกของของไหล กำหนดให้กริดมีลักษณะเป็นรูปแบบผสมระหว่างกริดรูปทรงสามเหลี่ยมและลูกบาศก์สี่เหลี่ยม เพื่อให้สอดคล้องกับรูปร่างของแบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.14 และ 3.15

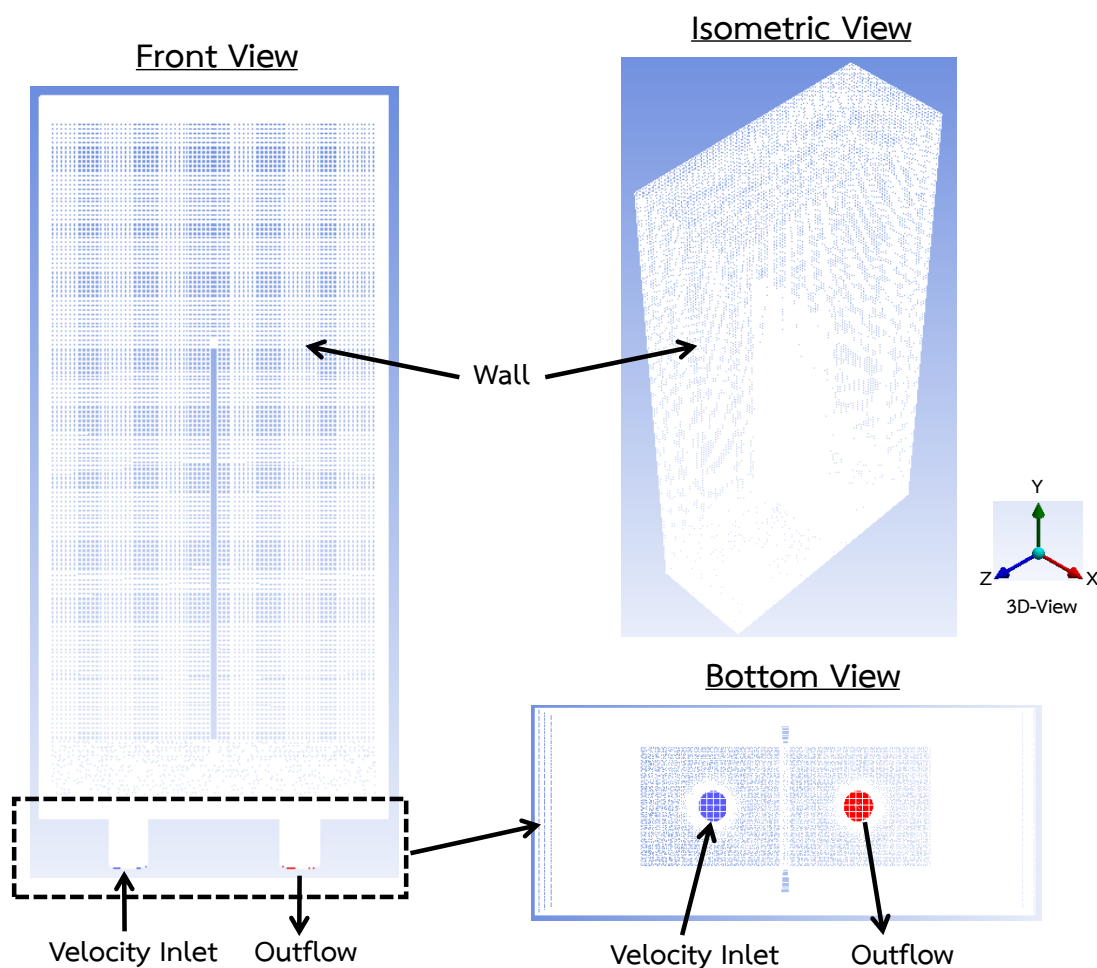


รูปที่ 3.14 ลักษณะของกริดบนแบบจำลองคอลัมน์ลอยแร่ ความสูงของแผ่นกั้น 35 cm



รูปที่ 3.15 ลักษณะของกริดบนแบบจำลองคอลัมน์ลอยแร่ ความสูงของแผ่นกั้น 50 cm

ในขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) โดยให้ลักษณะการไหลของน้ำเป็นการไหลแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Steady Flow) การคำนวณไม่พิจารณาผลจากการถ่ายเทและการสูญเสียความร้อน โดยกำหนดให้อุณหภูมิของน้ำมีค่าคงที่ รวมทั้งไม่คิดผลของความเร่งโน้มถ่วง จากรูปที่ 3.16 แสดงเงื่อนไขขอบเขตบนแบบจำลองคอลัมน์ลอยแร่ แบ่งออกเป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณที่ 1 Velocity Inlet (สีน้ำเงิน) คือบริเวณที่เป็นทางเข้าของการไหล โดยกำหนดลักษณะของทางเข้าในรูปแบบของความเร็ว บริเวณที่ 2 Outflow (สีแดง) คือบริเวณที่กำหนดให้เป็นทางออกของการไหล โดยกำหนดลักษณะของทางออกในรูปแบบของความดัน ส่วนบริเวณที่ 3 Wall (สีขาว) คือบริเวณที่กำหนดให้เป็นผนังของการไหลของคอลัมน์ลอยแร่ ซึ่งมีแผ่นกั้นรวมทั้งท่อทางเข้าและออกของของไหลด้วย



รูปที่ 3.16 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองคอลัมน์ลอยแร่



การกำหนดเงื่อนไขของความเร็วทางเข้า, ความดันทางออก, ผนังของการไหล, ความหนาแน่นและความหนืดของน้ำ ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

เงื่อนไขของความเร็วทางเข้า

- กำหนดความเร็วของไหลที่ทางเข้าให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.05507 m/s ซึ่งเท่ากับ อัตราการไหลที่ใช้ในการทดลองจริงที่ 3 litre/min

เงื่อนไขของความดันทางออก

- กำหนดให้ความดันทางออกของการไหลเป็นแบบ Outflow ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1

เงื่อนไขของผนังของการไหล

- กำหนดให้ผนังไม่มีการไหล และไม่มีการเคลื่อนที่

เงื่อนไขของความหนาแน่นและความหนืดของน้ำ

- กำหนดความหนาแน่นและความหนืดของน้ำ ณ อุณหภูมิขณะทดลองจริงที่  
Density = 996.2 kg/m<sup>3</sup> และ Viscosity = 0.000819 kg/m·s

สำหรับวิธีการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Shear Stress Transport  $k - \omega$  Model (SST  $k - \omega$  Model) ส่วนวิธีการคำนวณได้กำหนดอัลกอริทึมเป็นแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) โดยรายละเอียดของ Spatial Discretization ในแต่ละสมการที่ใช้ในการคำนวณกำหนดตามตารางที่ 3.4 โดยกำหนดเงื่อนไขในการหยุดประมวลผลที่ค่าความผิดพลาด (Residuals) เท่ากับ  $1 \times 10^{-5}$

**ตารางที่ 3.4** การกำหนดรายละเอียดของเงื่อนไข Spatial Discretization สำหรับการจำลองการไหลภายในคอลัมน์ลอยแร่

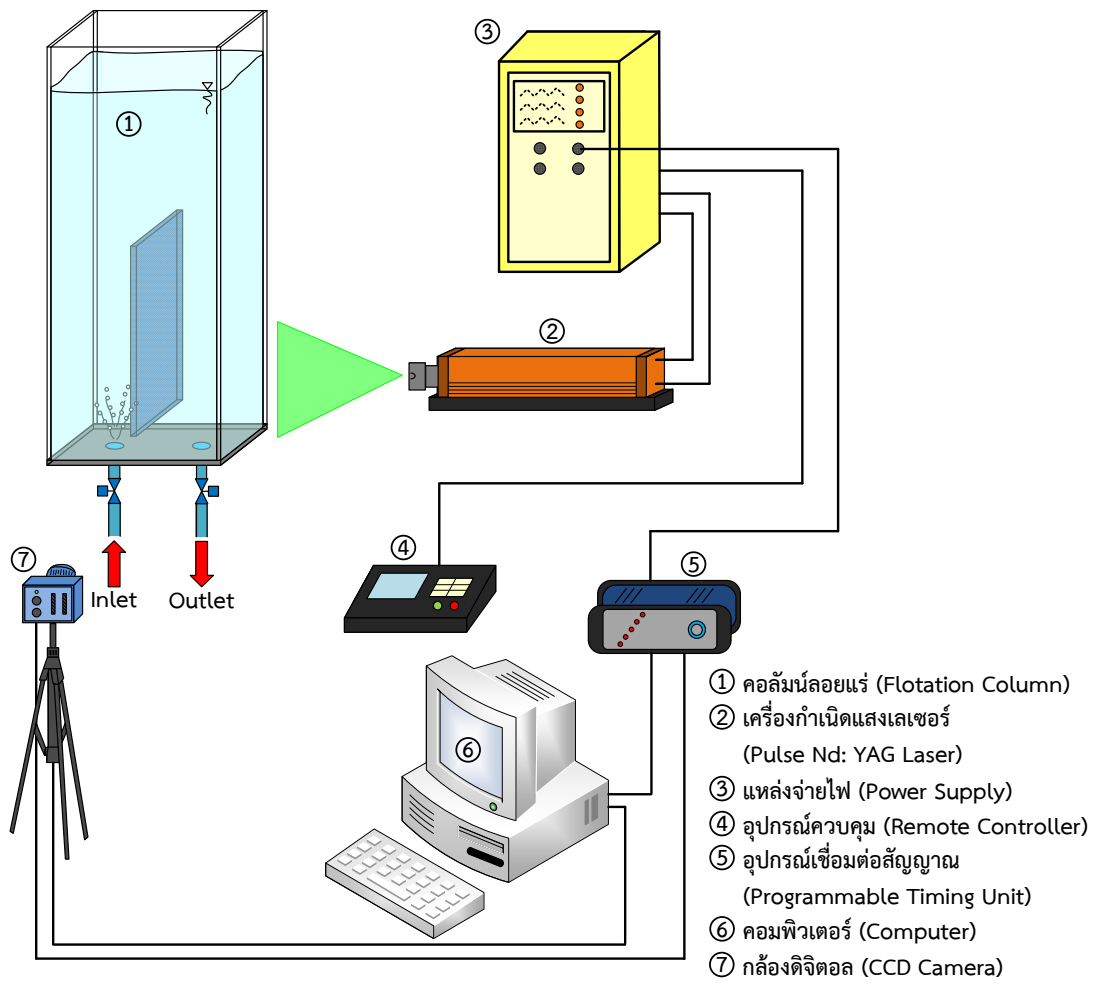
Solution Method	Spatial Discretization
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Second Order Upwind
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Specific Dissipation Rate	Second Order Upwind

### 3.5.2 การศึกษาการเคลื่อนที่ โดยใช้การถ่ายภาพและวิเคราะห์ภาพอนุภาคแบบ Particle Image Velocimetry (PIV) [32]

รูปที่ 3.17 แสดงแผนภาพชุดทดลองสำหรับศึกษาลักษณะการไหลของของไหลในคอลัมน์ จากรูปคอลัมน์ซึ่งเชื่อมต่อกับชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน (Microbubble Generator) ด้วยสายยางขนาด 1½ inch ส่วนความสูงของแผ่นกั้นมีการปรับเปลี่ยนขนาดสำหรับใช้ในการทดลอง ได้แก่ 35 cm และ 50 cm เพื่อศึกษาความแตกต่างของการไหลที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์

ในการทดลองจะเติมน้ำในคอลัมน์ที่ระดับ 60 cm ปริมาณน้ำในคอลัมน์ 22.5 litre ควบคุมอัตราการไหลของน้ำให้คงที่ที่ 3 litre/min จากนั้นใส่ Polyamid Seeding Particles ขนาด 50 µm ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่สามารถแขวนลอยอยู่ในของไหลเพื่อใช้เป็นตัวติดตามการไหลได้ สำหรับขั้นตอนการใช้งานควรผสมอนุภาคกับของไหลชนิดเดียวกับของไหลที่ต้องการศึกษาลงในภาชนะอื่นก่อน ซึ่งไม่ควรเติมอนุภาคลงไปโดยตรงในของไหลที่จะศึกษาโดยตรง จากนั้นค่อยๆ เติมอนุภาคที่ผสมกับของไหลลงไปของไหลที่ต้องการศึกษา ซึ่งปริมาณการเติมอนุภาคขึ้นอยู่กับความสามารถในการสะท้อนแสงและการมองเห็น การเติมในปริมาณที่น้อยเกินไป ทำให้การมองเห็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้ไม่ชัดเจน แต่หากเติมอนุภาคในปริมาณที่มากเกินไป ส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคในของไหลหนาแน่นขึ้น ทำให้การมองเห็นลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้ยากเช่นกัน รวมทั้งไม่สามารถนำไปวิเคราะห์หาผลลัพธ์ที่ต้องการได้

จากรูปที่ 3.18 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพการไหลในคอลัมน์ ซึ่งบริเวณที่มีการศึกษาลักษณะการไหลจะถูกส่องผ่านโดยแผ่นลำแสงเลเซอร์ (Laser Sheet) ทำให้อนุภาคที่เคลื่อนที่อยู่ในของไหลเกิดการสะท้อนแสง โดยกำหนดให้ความถี่ของการปล่อยแสงเลเซอร์คงที่ที่ 15 Hz จากนั้นบันทึกภาพด้วยกล้อง CCD ยี่ห้อ Imperx รุ่น CLB-B1620M-TC000 เลนส์ 50 mm จำนวน 300 ภาพ นำไปวิเคราะห์ผลผ่านโปรแกรม Davis 10.0.4 เพื่อหาค่าความเร็วเฉลี่ยของแต่ละอนุภาคที่เคลื่อนที่ภายในคอลัมน์ จากนั้นนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent)



รูปที่ 3.17 แผนภาพชุดทดลองสำหรับศึกษาลักษณะการไหลในคอลัมน์



รูปที่ 3.18 อุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพการไหลในคอลัมน์

### 3.6 รายละเอียดชุดทดลองและขั้นตอนสำหรับล้างถ่านหิน

การล้างและแยกผงถ่านหิน โดยใช้ระบบน้ำไหลวนภายในคอลัมน์ลอยแร่และฟองอากาศขนาดเล็ก สำหรับวิธีการทดลองได้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

#### 3.6.1 การลดขนาดหรือการบดถ่านหิน

ตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะ จ.ลำปาง บรรจุกระสอบละ 50 kg จากตัวอย่างพบว่ามีถ่านหินที่เป็นก้อนใหญ่และละเอียดปะปนกัน ดังนั้นจึงต้องผ่านกระบวนการลดขนาดหรือบดถ่านหินเพื่อให้มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการล้าง ขั้นตอนการบดประกอบไปด้วยเครื่องย่อย (Jaw Crusher) ยี่ห้อ Guanming รุ่น GM/EP-100×60X และเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer Crusher) ยี่ห้อ Guanming รุ่น GM/PC-400×200A ทำหน้าที่ย่อยและตีกระแทกถ่านหินขนาดใหญ่ให้แตกออกจากกันเป็นชิ้นเล็กๆ ส่วนเครื่องบดแบบบอลมิลล์ (Ball Mill) ทำหน้าที่บดถ่านหินขนาดเล็กให้ละเอียดเป็นผง นอกจากนี้ยังมีตะแกรงคัดขนาดแบบมาตรฐาน (Standard Sieve) ยี่ห้อ Endecotts แบบ ASTM Laboratory Test Sieve ซึ่งใช้คู่กับเครื่องเขย่า (Sieve Shaker) ยี่ห้อ Fritsch รุ่น Analysette 3 Pro เพื่อคัดและแยกผงถ่านหินให้มีขนาดเล็กกว่า 250  $\mu\text{m}$  [33-35] เนื่องจากเป็นช่วงที่ดีที่สุดสำหรับการลอยแร่ ดังแสดงในรูปที่ 3.19

สำหรับขั้นตอนการบดและคัดขนาดถ่านหิน ดังแสดงในรูปที่ 3.20 เริ่มจากการป้อนถ่านหินที่มีลักษณะเป็นก้อนขนาดใหญ่เข้าเครื่องย่อยและเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง เพื่อให้ถ่านหินแตกเป็นชิ้นและมีขนาดเล็กลง ต่อมาป้อนถ่านหินเข้าเครื่องบดแบบบอลมิลล์ ขั้นตอนนี้ถ่านหินที่ได้จะมีความละเอียดมาก (คล้ายกับผงแป้ง) โดยขนาดของผงถ่านหินที่ได้จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการบด จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนการร่อนและคัดขนาดผงถ่านหิน โดยนำผงถ่านหินไปผ่านตะแกรงคัดขนาดมาตรฐาน ซึ่งขนาดของตะแกรงที่ใช้ ได้แก่ 75  $\mu\text{m}$ , 106  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$  และ 212  $\mu\text{m}$  จากนั้นจะซ้อนตะแกรงเบอร์ลำดับติดกันจากขนาดใหญ่ ซึ่งอยู่ด้านบนไปหาขนาดเล็กซึ่งอยู่ด้านล่าง และมีชั้นล่างสุดเป็นถาดรองรับ (Pan) นำชุดตะแกรงมาตรฐานดังกล่าวไปวางบนเครื่องเขย่า เทผงถ่านหินที่ผ่านการบดใส่ในตะแกรงชั้นบนสุด เริ่มเขย่าและร่อนให้ผงถ่านหินลอดผ่านรูของตะแกรงกระจายตกลงไปค้างอยู่บนตะแกรงแต่ละขนาด เมื่อซั่งน้ำหนักของผงถ่านหินที่ค้างอยู่บนตะแกรงแต่ละขนาดก็สามารถนำไปคำนวณหาขนาดเฉลี่ยของถ่านหินได้



(ก) เครื่องย่อย  
(Jaw Crusher)



(ข) เครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง  
(Hammer Crusher)



(ค) เครื่องบดแบบบอลมิลล์  
(Ball Mill)



(ง) ตะแกรงคัดขนาดแบบมาตรฐาน  
(Standard Sieve)

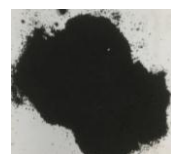
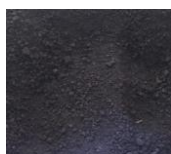


(จ) เครื่องเขย่า  
(Sieve Shaker)

รูปที่ 3.19 อุปกรณ์ที่ใช้ในการบดถ่านหิน



ถ่านหิน  
(Raw Coal)



เครื่องย่อย  
(Crushing)



เครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง  
(Hammer Mill)



เครื่องบดแบบบอลมิลล์  
(Ball Mill)



ตะแกรงคัดขนาดและเครื่องเขย่า  
(Standard Sieve and Sieve Shaker)

รูปที่ 3.20 ขั้นตอนการบดและคัดขนาดถ่านหิน

### 3.6.2 การเตรียมสภาพถ่านหินและระบบการสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก

สำหรับชุดทดลองล้างและแยกผงถ่านหิน ดังแสดงในรูปที่ 3.21 ประกอบด้วยคอลัมน์ลอยแร่และชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก ในส่วนของการทดลองแบ่งออก 2 ส่วน ได้แก่ การเตรียมสภาพถ่านหิน และระบบการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กหรือเตรียมน้ำสำหรับล้างและแยกผงถ่านหิน โดยกำหนดให้มีขั้นตอนและการเตรียมวัตถุดิบสอดคล้องกับงานวิจัยของเล็ก สีคง [36]



รูปที่ 3.21 ชุดทดลองล้างและแยกผงถ่านหิน

(1) การเตรียมสภาพถ่านหิน เริ่มจากอบผงถ่านหินเพื่อลดความชื้นโดยควบคุมอุณหภูมิในเตาอบที่  $70^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง รูปที่ 3.22 แสดงขั้นตอนการเตรียมสภาพถ่านหิน โดยเริ่มจากนำผงถ่านหิน 1 kg ผสมกับน้ำโดยควบคุมความเข้มข้นของของผสมเท่ากับ 50% Solids ผสมรวมกันในถังปรับสภาพ (Conditioning Tank) กวนผสมให้ผงถ่านหินและน้ำคลุกเคล้ากัน โดยควบคุมความเร็วของใบพัดที่ 620 rpm ใช้เวลาประมาณ 1 นาที หลังจากนั้นเติมน้ำมันดีเซลซึ่งเป็นสารเคลือบผิวแร่ปริมาณ 8 kg/tons of coal ลงไปในของผสม กวนให้เข้ากันอีกประมาณ 2 นาที

(2) การเตรียมระบบสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก เติมน้ำลงในคอลัมน์ลอยแร่ โดยมีปริมาตรน้ำในคอลัมน์ 22.5 litre หรือสูงจากฐานคอลัมน์ 60 cm จากนั้นเปิดระบบสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก โดยการควบคุมอัตราการไหลของน้ำ, อัตราการไหลของอากาศ และความดันที่ถึงความดันตามเงื่อนไขการทดลองที่กำหนด หลังจากนั้นเติมน้ำมันสนซึ่งเป็นสารเคลือบฟองปริมาณ 0.15 kg/tons of coal ลงในคอลัมน์ที่มีฟองอากาศขนาดเล็ก รูปที่ 3.23 แสดงลักษณะของน้ำในคอลัมน์ก่อนและขณะเปิดระบบสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก

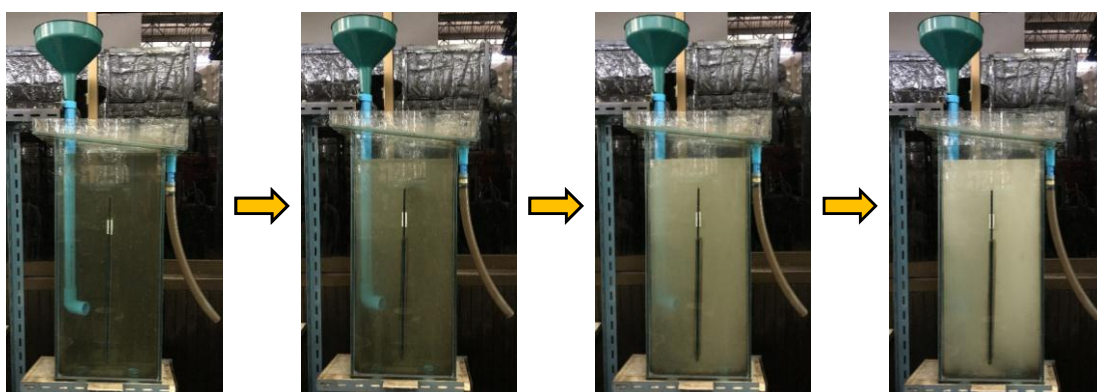


(ก) ผงถ่านหิน 1 kg

(ข) กวนคลุกเคล้าส่วนผสม

(ค) ของผสมพร้อม  
สำหรับการลอย

รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการเตรียมสภาพถ่านหิน

(ก) ก่อนเปิดระบบ  
สร้างฟองอากาศ(ข) เริ่มต้นเปิดระบบ  
สร้างฟองอากาศ(ค) ฟองอากาศไหลวน  
ทั่วคอลัมน์(ง) ปริมาณฟองอากาศ  
มีความหนาแน่นขึ้น

รูปที่ 3.23 ลักษณะของน้ำในคอลัมน์ก่อนและขณะเปิดระบบสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก

### 3.6.3 ขั้นตอนการล้างและแยกผงถ่านหิน

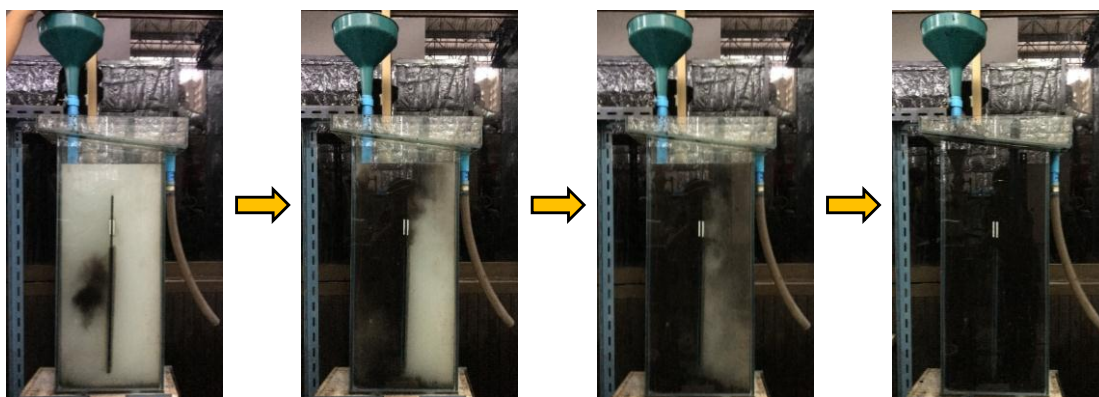
สำหรับขั้นตอนของการล้างและแยกผงถ่านหิน โดยรายละเอียดและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.5 ในส่วนของขั้นตอนการล้างและแยกผงถ่านหิน ในรูปที่ 3.24 เริ่มจากนำของผสมที่ผ่านการปรับสภาพผิวและคลุกเคล้าไว้ก่อนหน้านี้ ป้อนผ่านท่อขนาด 1 inch ซึ่งติดตั้งไว้ตรงกับบริเวณที่เกิดฟองอากาศขนาดเล็กลอยขึ้นมา โดยตำแหน่งปากทางออกของของผสมจะอยู่ต่ำกว่าระดับผิวน้ำ 40 cm เพื่อเพิ่มโอกาสให้ของผสมปะทะกับฟองอากาศขนาดเล็ก จากนั้นถ่านหินที่จับกับฟองอากาศลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้เป็นส่วนของหัวแร่ (Concentrate) โดยมลทินที่ถูกฟองอากาศ

หมุนขึ้นมาด้วยจะถูกชะล้างโดยการสเปรย์น้ำลงบนแร่ที่ลอยหรือหัวแร่ เพื่อให้หมักหินจมลงด้านล่าง จะได้หัวแร่ที่สะอาดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.25 นอกจากนี้หัวแร่ที่ไหลล้นออกจากคอลัมน์จะกวาดแยกใส่ภาชนะ ส่วนแร่จมหรือหางแร่ (Tailings) จะแยกใส่ภาชนะอื่นที่เตรียมไว้เช่นกัน นำหัวแร่และหางแร่ไปอบแห้งไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110°C ส่วนรูปที่ 3.26 แสดงลักษณะของหัวแร่หลังจากการล้างและการอบแห้ง จากนั้นจึงนำหัวแร่ที่ผ่านการอบแห้งไปวิเคราะห์หาส่วนประกอบที่อยู่ในถ่านหิน (Proximate Analysis) ตามมาตรฐานของ ASTM ซึ่งประกอบด้วย ขี้เถ้า (Ash), ซัลเฟอร์ (Sulfur), สารระเหย (Volatile Matter), คาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) และค่าความร้อน (Gross Calorific Value)

### ตารางที่ 3.5 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองล้างและแยกผงถ่านหิน

รายละเอียดตัวแปร	เงื่อนไขและขนาด
รูปแบบตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก	- วัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน - หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ - หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน
ปริมาณน้ำในคอลัมน์	22.5 litre
ความสูงแผ่นกั้น	35 cm และ 50 cm
อัตราการไหลของน้ำ	20 litre/min
อัตราการไหลของอากาศ	0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 litre/min
ความดันของน้ำในถัง	3, 4, 5 และ 6 bar
ขนาดถ่านหิน	<212 $\mu$ m
ปริมาณถ่านหิน	1 kg
ปริมาณน้ำสำหรับปรับสภาพ	2 litre
ปริมาณสารเคลือบผิวแร่ (น้ำมันดีเซล)	30 g (8 kg/tons of coal)
ปริมาณสารเคลือบฟอง (น้ำมันสน)	18 g (0.15 kg/tons of coal)
ความเร็วใบพัดสำหรับปรับสภาพ	620 rpm
เวลาที่ใช้ในการเตรียมสภาพผิวแร่	3 min
เวลาที่ใช้ในการล้างถ่านหิน	30, 60, 90, 120 และ 150 min





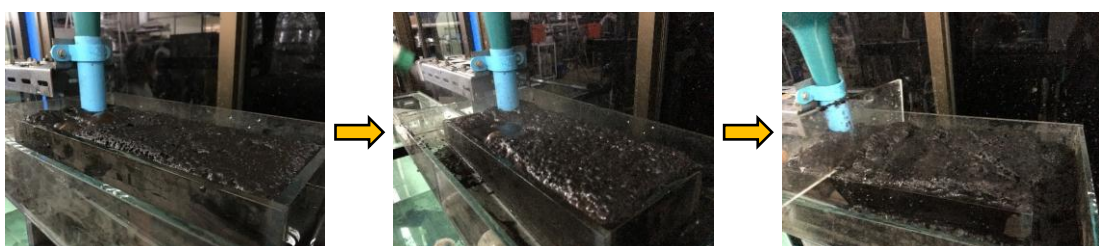
(ก) เริ่มป้อนของผสม

(ข) ฟองอากาศจับกับผงถ่านหิน

(ค) ฟองอากาศที่จับกับผงถ่านหิน เริ่มไหลวนภายในคอลัมน์

(ง) ฟองอากาศที่จับกับผงถ่านหินไหลวนภายในคอลัมน์

รูปที่ 3.24 ขั้นตอนการล้างและแยกผงถ่านหิน

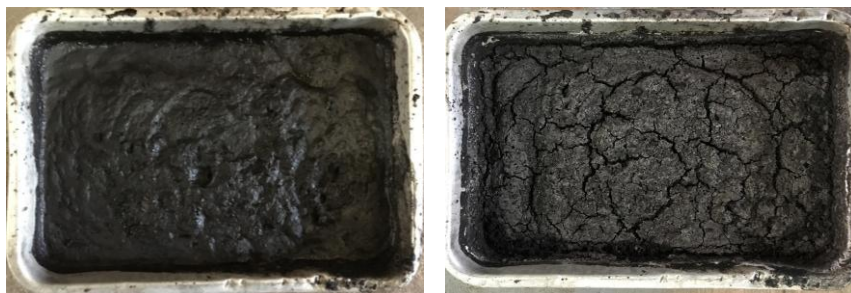


(ก) หัวแร่ที่ลอยขึ้นมากับฟองอากาศ

(ข) ฉีดสเปรย์น้ำบนหัวแร่เพื่อชะล้างมลทิน

(ค) กวาดหัวแร่ใส่ภาชนะ

รูปที่ 3.25 ขั้นตอนการเก็บหัวแร่

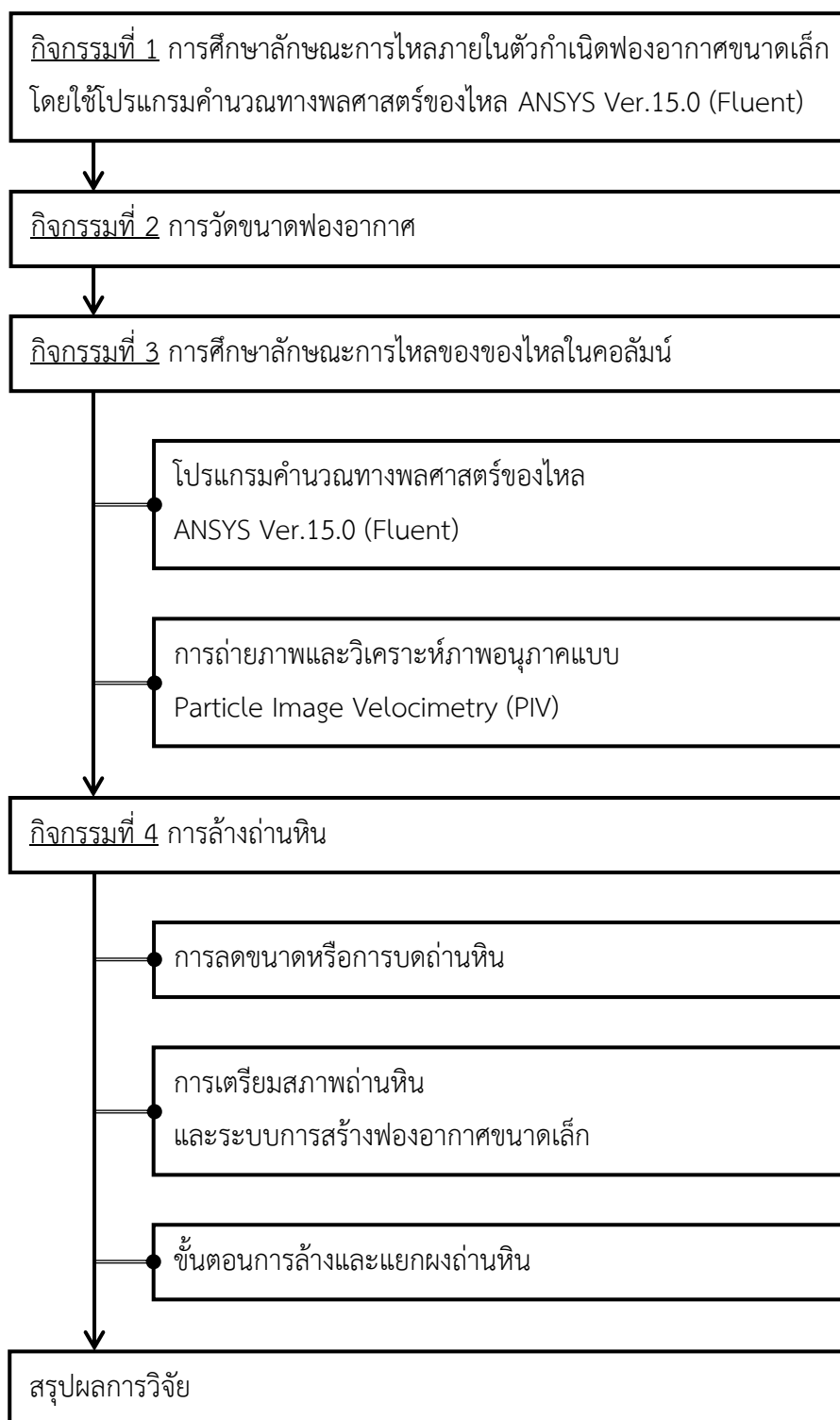


(ก) หัวแร่หลังจากการล้าง

(ข) หัวแร่หลังจากอบแห้ง

### รูปที่ 3.26 ลักษณะของหัวแร่ที่ได้จากการล้างและแยกผงถ่านหินด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก

รูปที่ 3.27 แสดงแผนภาพสรุปกิจกรรมสำหรับงานวิจัยการศึกษาใช้ฟองอากาศระดับไมครอนสำหรับล้างทำความสะอาดผงถ่านหิน ประกอบด้วยการศึกษาลักษณะการไหลภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลและปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศ จากนั้นเปรียบเทียบขนาดฟองที่เกิดจากตัวกำเนิดฟองอากาศรูปแบบต่างๆ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการเกิดฟองอากาศขนาดเล็ก นอกจากนี้มีการศึกษาลักษณะการไหลวนของของไหลภายในคอลัมน์ลอยแร่ ซึ่งมีความแตกต่างจากคอลัมน์ทั่วไป คือ การติดแผ่นกั้นตรงกลางสำหรับแบ่งช่องการไหล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการล้างและแยกผงถ่านหินให้ดียิ่งขึ้น แบ่งออกเป็นการศึกษาโดยใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent) และการถ่ายภาพและวิเคราะห์ภาพอนุภาคแบบ Particle Image Velocimetry (PIV) สำหรับในส่วนของกรล้างและแยกผงถ่านหิน ซึ่งแบ่งออกเป็นการลดขนาดหรือการบดถ่านหิน ต่อมาเป็นการเตรียมสภาพถ่านหินรวมทั้งระบบการสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนการล้างและแยกผงถ่านหินด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก โดยศึกษาตัวแปรหรือปัจจัยที่มีผลต่อการแยกสิ่งเจือปนออกจากถ่านหิน ได้แก่ รูปแบบของตัวกำเนิดฟองอากาศ, ความดัน, ความสูงของแผ่นกั้น รวมทั้งระยะเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหิน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ทั้งในแง่ของปริมาณหัวแร่ที่เก็บได้ รวมทั้งการลดหรือกำจัดมลทินออกจากถ่านหิน เช่น ซัลเฟอร์, ซัลเฟต และสารระเหย ในขณะเดียวกันสามารถเพิ่มปริมาณคาร์บอนคงที่และค่าความร้อนในถ่านหินให้สูงขึ้นได้



รูปที่ 3.27 แผนภาพสรุปกิจกรรมการศึกษาใช้ฟองอากาศระดับไมครอน  
สำหรับล้างทำความสะอาดผงถ่านหิน

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

ในบทนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 4 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งอธิบายผลของการศึกษาลักษณะการไหลภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์) โดยใช้โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent) ส่วนที่สองอธิบายเกี่ยวกับผลของขนาดฟองอากาศที่ได้จากตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กรูปแบบต่างๆ ส่วนที่สามอธิบายผลการศึกษากการไหลของของไหลภายในคอลัมน์ เมื่อปรับความสูงของแผ่นกั้น 35 cm และ 50 cm โดยเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลระหว่างการใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent) และการใช้การถ่ายภาพและวิเคราะห์ภาพอนุภาคแบบ Particle Image Velocimetry (PIV) และส่วนที่สี่อธิบายผลการศึกษากการล้างและแยกผงถ่านหิน โดยใช้ฟองอากาศขนาดเล็ก

#### 4.1 การศึกษาลักษณะการไหลภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก โดยใช้โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent)

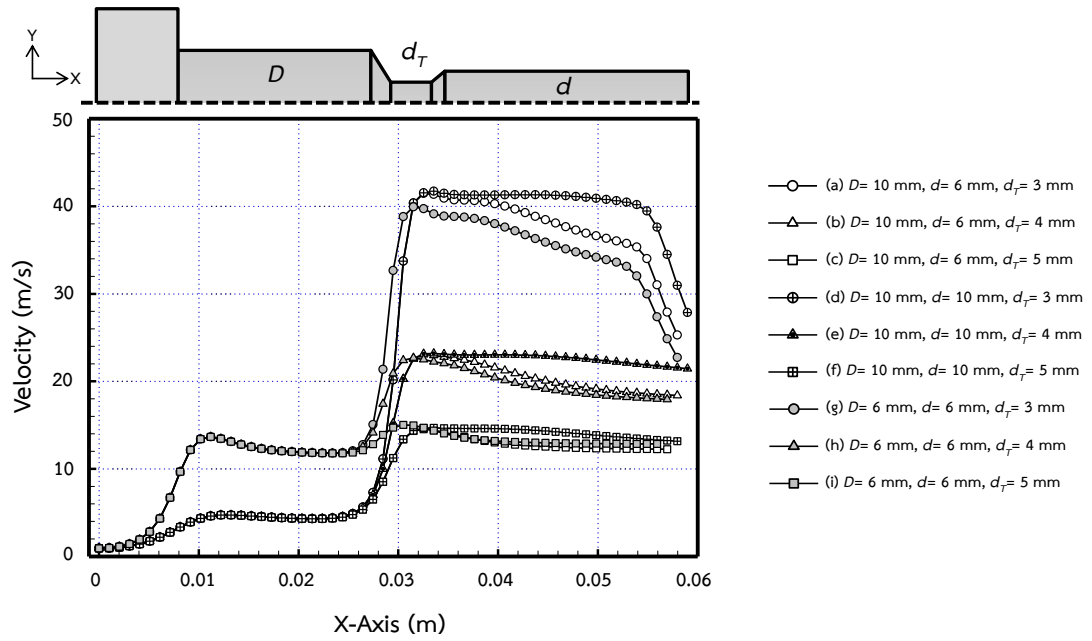
##### 4.1.1 การกระจายความเร็วและความดันภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลการกระจายความเร็ว (Velocity) ที่ตำแหน่ง X ต่างๆ และพิจารณาบริเวณกึ่งกลางภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์) โดยกำหนดให้อัตราการไหลของของไหลบริเวณปากทางเข้า (Velocity Inlet) มีค่าคงที่ที่ 15 litre/min และเท่ากันในทุกกรณี สังเกตได้ว่าที่ตำแหน่งทางเข้า ( $D$ ) ของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหล โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า,  $D = 6$  mm ความเร็วที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับกรณี  $D = 10$  mm เป็นผลมาจากอัตราการไหลที่มีค่าคงที่ ทำให้เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ความเร็วมีค่าลดลง ต่อมาเป็นบริเวณที่ของไหลเริ่มเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งคอคอด ( $d_T$ ) พบว่าความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างกะทันหัน ซึ่งกราฟมีลักษณะความชันเป็นบวก โดยเป็นผลมาจากการไหลผ่านบริเวณที่มีการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตำแหน่งทางเข้ามายังคอคอดของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก ทำให้เกิดความเร่งของการไหลและความเร็วมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สังเกตได้ว่าตำแหน่งคอคอดเป็นบริเวณที่ความเร็วมีค่ามากที่สุด อย่างไรก็ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด มีผลต่อความเร็วที่เกิดขึ้นภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก กล่าวคือ เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดเพิ่มขึ้น ได้แก่ 3 mm, 4 mm และ 5 mm ส่งผลให้ความเร็วของของไหลมีค่าลดลงตามลำดับ หลังจากนั้นเมื่อของไหลไหลออกจากตำแหน่งคอคอดไปยังทางออก ( $d$ ) ของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก สังเกตได้ว่าความเร็วเริ่มมีค่าลดลง โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก,  $d = 6$  mm ความเร็วที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณี

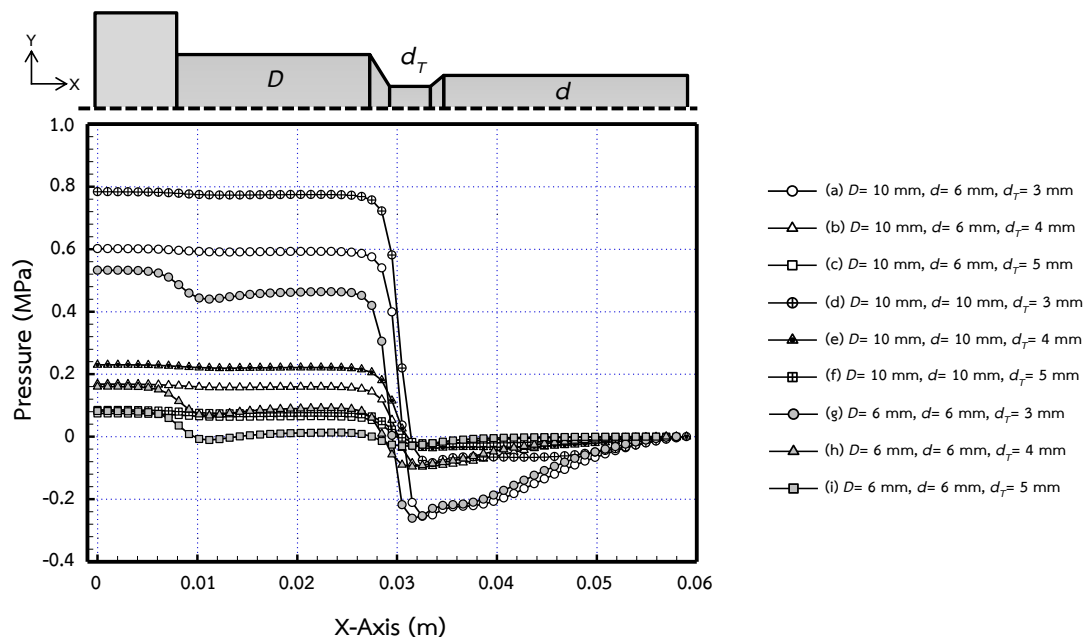
$d = 10$  mm นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด มีผลต่อความเร็วที่เกิดขึ้นบริเวณปากทางออกของของไหล โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด,  $d_T = 3$  mm ความเร็วที่เกิดขึ้นมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับกรณี  $d_T = 4$  mm และ  $d_T = 5$  mm ซึ่งความเร็วมีค่าลดลงตามลำดับ

ส่วนรูปที่ 4.2 แสดงผลการกระจายความดัน (Pressure) ที่ตำแหน่ง X ต่างๆ และพิจารณาบริเวณกึ่งกลางภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์) โดยกำหนดให้ความดันบริเวณปากทางออกของของไหลเท่ากับความดันบรรยากาศ (Pressure Outlet) หรือความดันเกจมีค่าเท่ากับ 0 Pa และเท่ากันในทุกกรณี จากรูปพบว่าที่ตำแหน่งทางเข้า ( $D$ ) ของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของความดันเกิดขึ้น ซึ่งความดันมีค่าเป็นบวก โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า,  $D = 6$  mm ความดันที่เกิดขึ้นภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณี  $D = 10$  mm นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด ( $d_T$ ) มีผลต่อความดันบริเวณทางเข้าของของไหล กล่าวคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด,  $d_T = 3$  mm ความดันที่เกิดขึ้นมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับกรณี  $d_T = 4$  mm และ  $d_T = 5$  mm ตามลำดับ ต่อมาเมื่อของไหลเริ่มเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งคอคอด พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างทันทีทันใด ซึ่งกราฟมีลักษณะความชันเป็นลบ โดยเป็นผลมาจากการไหลผ่านบริเวณที่มีการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตำแหน่งทางเข้ามายังคอคอดของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลของการกระจายความเร็ว คือ เมื่อความเร็วของการไหลภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดความดันลดต่ำลงหรือความดันมีค่าเป็นลบ จากนั้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งคอคอดไปยังทางออก ( $d$ ) ของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก สังเกตได้ว่าความดันเริ่มมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น ในขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด,  $d_T = 3$  mm มีการเปลี่ยนแปลงความดันบริเวณทางออกจากความดันติดลบและเริ่มมีค่าเข้าใกล้ความดันบรรยากาศ เมื่อของไหลเคลื่อนที่ใกล้กับปากทางออกของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กได้ช้ากว่า เมื่อเทียบกับกรณี  $d_T = 4$  mm และ  $d_T = 5$  mm ตามลำดับ

กล่าวโดยรวมได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด ( $d_T$ ) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วและความดันภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์) คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดยังมีค่าน้อย ส่งผลทำให้ความเร็วมีค่ามาก ในขณะที่เดียวกันความดันที่เกิดขึ้นมีค่าติดลบมากที่สุด ดังนั้นบริเวณดังกล่าวจึงสามารถดูดอากาศจากภายนอกเข้ามายังตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กได้ดีที่สุด



รูปที่ 4.1 การกระจายความเร็วที่ตำแหน่ง X ต่างๆ ภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก



รูปที่ 4.2 การกระจายความดันที่ตำแหน่ง X ต่างๆ ภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก

#### 4.1.2 ผลของพลังงานจลน์ความปั่นป่วนภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก

จากรูปที่ 4.3 แสดงการกระจายของพลังงานจลน์ความปั่นป่วน (Turbulence Kinetic Energy) ภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์) โดยในกรณีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า,  $D = 10$  mm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก,  $d = 6$  mm (รูปที่ 4.3(a), รูปที่ 4.3(b) และรูปที่ 4.3(c)) พบว่าพลังงานจลน์ความปั่นป่วนเกิดขึ้นหลังจากที่ของไหลเคลื่อนที่ผ่านคอคอดหรือหรือบริเวณก่อนทางออกจากตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก นอกจากนี้สังเกตได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอด ( $d_T$ ) มีผลต่อปริมาณของพลังงานจลน์ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้น กล่าวคือ เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอดเล็กลง มีผลทำให้ของไหลเคลื่อนที่ด้วยความเร่งและความเร็วที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นบริเวณก่อนทางออกจากตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กจึงเกิดความปั่นป่วนของของไหลขึ้น โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด,  $d_T = 3$  mm (รูปที่ 4.3(a)) สามารถเกิดพลังงานจลน์ความปั่นป่วนมากที่สุด เมื่อเทียบกับกรณี  $d_T = 4$  mm และ  $d_T = 5$  mm ตามลำดับ (รูปที่ 4.3(b) และรูปที่ 4.3(c))

ส่วนในกรณีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า,  $D = 10$  mm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก,  $d = 10$  mm (รูปที่ 4.3(d), รูปที่ 4.3(e) และรูปที่ 4.3(f)) พบว่าเกิดพลังงานจลน์ความปั่นป่วนบริเวณก่อนทางออกจากตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กเช่นเดียวกัน แต่พลังงานจลน์ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับกรณี  $D = 10$  mm และ  $d = 6$  mm เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้พลังงานจลน์ความปั่นป่วนสามารถกระจายออกไปรอบบริเวณภายในของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กได้มากกว่า นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอด ( $d_T$ ) มีผลทำให้เกิดพลังงานจลน์ความปั่นป่วนเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด,  $d_T = 3$  mm (รูปที่ 4.3(d)) สามารถเกิดพลังงานจลน์ความปั่นป่วนมากที่สุด เมื่อเทียบกับกรณี  $d_T = 4$  mm และ  $d_T = 5$  mm ตามลำดับ (รูปที่ 4.3(e) และรูปที่ 4.3(f))

สำหรับการกระจายพลังงานจลน์ความปั่นป่วน กรณีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า,  $D = 6$  mm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก,  $d = 6$  mm (รูปที่ 4.3(g), รูปที่ 4.3(h) และรูปที่ 4.3(i)) พบว่าลักษณะการเกิดพลังงานจลน์ความปั่นป่วนบริเวณก่อนทางออกจากตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กมีความคล้ายคลึงกับกรณี  $D = 10$  mm และ  $d = 6$  mm นอกจากนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอด ( $d_T$ ) ยังคงมีผลต่อปริมาณของพลังงานจลน์ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้น โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด,  $d_T = 3$  mm (รูปที่ 4.3(g)) สามารถเกิดพลังงานจลน์ความปั่นป่วนมากที่สุด เมื่อเทียบกับกรณี  $d_T = 4$  mm และ  $d_T = 5$  mm ตามลำดับ (รูปที่ 4.3(h) และรูปที่ 4.3(i))

กล่าวโดยภาพรวมได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก ( $d$ ) มีผลต่อการกระจายพลังงานจลน์ความปั่นป่วน เนื่องจากบริเวณทางออกของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก สามารถเกิดการไหลแบบปั่นป่วนหลังจากที่ของไหลเคลื่อนที่ผ่านคอคอด ซึ่งเมื่อขนาดพื้นที่หน้าตัดทางออกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการกระจายพลังงานมากขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด ( $d_T$ ) มีผลต่อปริมาณการเกิดพลังงานจลน์ความปั่นป่วน คือ เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดมีค่าน้อยลง ส่งผลให้พลังงานจลน์ความปั่นป่วนมีค่ามากขึ้น ดังนั้นสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ว่า บริเวณที่เกิดพลังงานจลน์ความปั่นป่วนภายในตัวกำเนิดฟองอากาศ มีส่วนช่วยให้อากาศสามารถเข้าไปผสมกับของไหลได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยให้ฟองอากาศขนาดใหญ่เกิดการแตกสลายเป็นฟองขนาดเล็กได้

#### 4.1.3 ผลของความเค้นเฉือนภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก

จากรูปที่ 4.4 แสดงผลของความเค้นเฉือน (Shear Stress) ภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์) โดยในกรณีที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า,  $D = 10$  mm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก,  $d = 6$  mm (รูปที่ 4.4(a), รูปที่ 4.4(b) และรูปที่ 4.4(c)) สังเกตได้ว่าเกิดความเค้นเฉือนของของไหลบริเวณผนังของคอคอด ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลที่ผ่านบริเวณที่มีการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตำแหน่งทางเข้ามายังคอคอดของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก มีผลทำให้เกิดความเร่งของการไหลและความเร็วมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของการกระจายความเร็วภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอด ( $d_T$ ) โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด,  $d_T = 3$  mm (รูปที่ 4.4(a)) สามารถเกิดความเค้นเฉือนบริเวณที่ใกล้กับผนังของคอคอดมากที่สุด เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีความเร็วของการไหลมากกว่าบริเวณอื่นๆ ในขณะที่เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดเพิ่มขึ้น ได้แก่  $d_T = 4$  mm และ  $d_T = 5$  mm (รูปที่ 4.4(b) และรูปที่ 4.4(c)) มีผลทำให้ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้น มีปริมาณลดลงตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากความเร็วของการไหลที่ไหลผ่านคอคอดน้อยกว่าในกรณีที่  $d_T = 3$  mm

ส่วนในกรณีที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า,  $D = 10$  mm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก,  $d = 10$  mm (รูปที่ 4.4(d), รูปที่ 4.4(e) และรูปที่ 4.4(f)) พบว่าเกิดความเค้นเฉือนบริเวณการไหลชิดผนังคอคอดเช่นเดียวกัน นอกจากนี้สังเกตได้ว่ามีความเค้นเฉือนเกิดขึ้นกระจายอยู่รอบบริเวณทางออกของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอด ( $d_T$ ) มีผลทำให้ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่าแตกต่างกัน กล่าวคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด,  $d_T = 3$  mm (รูปที่ 4.4(d)) ทำให้ความเร็วของของไหลเมื่อเคลื่อนที่ผ่านคอคอดมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้บริเวณใกล้กับผนังของคอคอดมีความเค้นเฉือนของชั้นของไหลเพิ่มมา



ขึ้น ในขณะที่เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดเพิ่มขึ้น ได้แก่  $d_T = 4$  mm และ  $d_T = 5$  mm (รูปที่ 4.4(e) และรูปที่ 4.4(f)) มีผลทำให้ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้น มีปริมาณลดลงตามลำดับ

สำหรับกรณีของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า,  $D = 6$  mm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก,  $d = 6$  mm (รูปที่ 4.4(g), รูปที่ 4.4(h) และรูปที่ 4.4(i)) สังเกตได้ว่าเกิดความเค้นเฉือนบริเวณการไหลขีดผนังคอคอดภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งมีลักษณะเดียวกับกรณีที่  $D = 10$  mm และ  $d = 6$  mm แต่มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณิดังกล่าว นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้น เป็นผลมาจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอด ( $d_T$ ) โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด,  $d_T = 3$  mm (รูปที่ 4.4(g)) สามารถเกิดความเค้นเฉือนบริเวณที่ใกล้กับผนังของคอคอดมากที่สุด เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีความเร็วของการไหลมากกว่าบริเวณอื่นๆ ในขณะที่เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดเพิ่มขึ้น ได้แก่  $d_T = 4$  mm และ  $d_T = 5$  mm (รูปที่ 4.4(h) และรูปที่ 4.4(i)) มีผลทำให้ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้น มีปริมาณลดลงตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากความเร็วของการไหลที่ไหลผ่านคอคอดน้อยกว่าในกรณีที่  $d_T = 3$  mm

กล่าวโดยภาพรวมได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด ( $d_T$ ) มีผลต่อปริมาณความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก โดยเฉพาะบริเวณที่ใกล้กับผนังของคอคอด ซึ่งบริเวณดังกล่าว มีผลทำให้ความเร็วของของไหลช่วยในการตัดเฉือนฟองอากาศขนาดใหญ่ที่ถูกดูดเข้ามายังตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กให้แตกย่อยออกเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดที่เล็กลง ช่วยให้ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นภายในตัวกำเนิดฟองอากาศมีมากขึ้น ซึ่งสามารถตัดย่อยฟองอากาศขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กได้ดีขึ้น

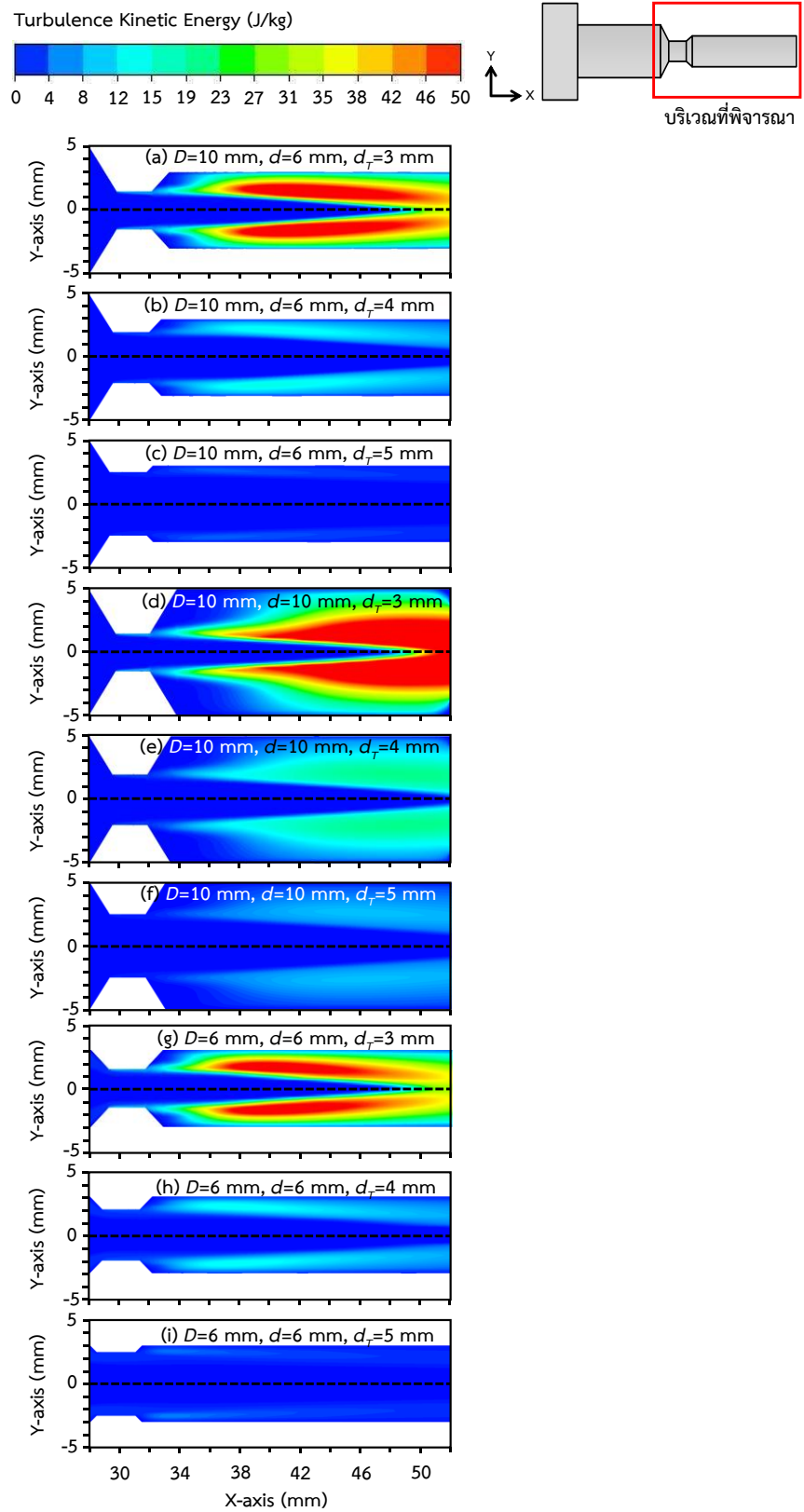
#### 4.1.4 ผลของเส้นทางการไหลภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก

จากรูปที่ 4.5 แสดงเส้นทางการไหล (Streamline) ของของไหล ภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์) โดยในกรณีที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า,  $D = 10$  mm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก,  $d = 6$  mm (รูปที่ 4.5(a), รูปที่ 4.5(b) และรูปที่ 4.5(c)) สังเกตได้ว่าเมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านบริเวณคอคอด ซึ่งมีการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตำแหน่งทางเข้ามายังคอคอดของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก มีผลทำให้เกิดความเร่งของการไหลและความเร็วมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้บริเวณก่อนถึงทางออกของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กพบว่าพฤติกรรมของการไหลมีลักษณะเป็นการไหลแบบหมุนวน (Recirculation) เกิดขึ้นและสามารถดึงของไหลที่อยู่รอบๆ เข้ามาผสมกับกระแสการไหลหลัก โดยเฉพาะในกรณีที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด,  $d_T = 3$  mm (รูปที่ 4.5(a)) พฤติกรรมการไหลแบบหมุนวนมีค่ามากที่สุด เมื่อเทียบกับกรณี  $d_T = 4$  mm และ  $d_T = 5$  mm ตามลำดับ (รูปที่ 4.5(b) และรูปที่ 4.5(c))

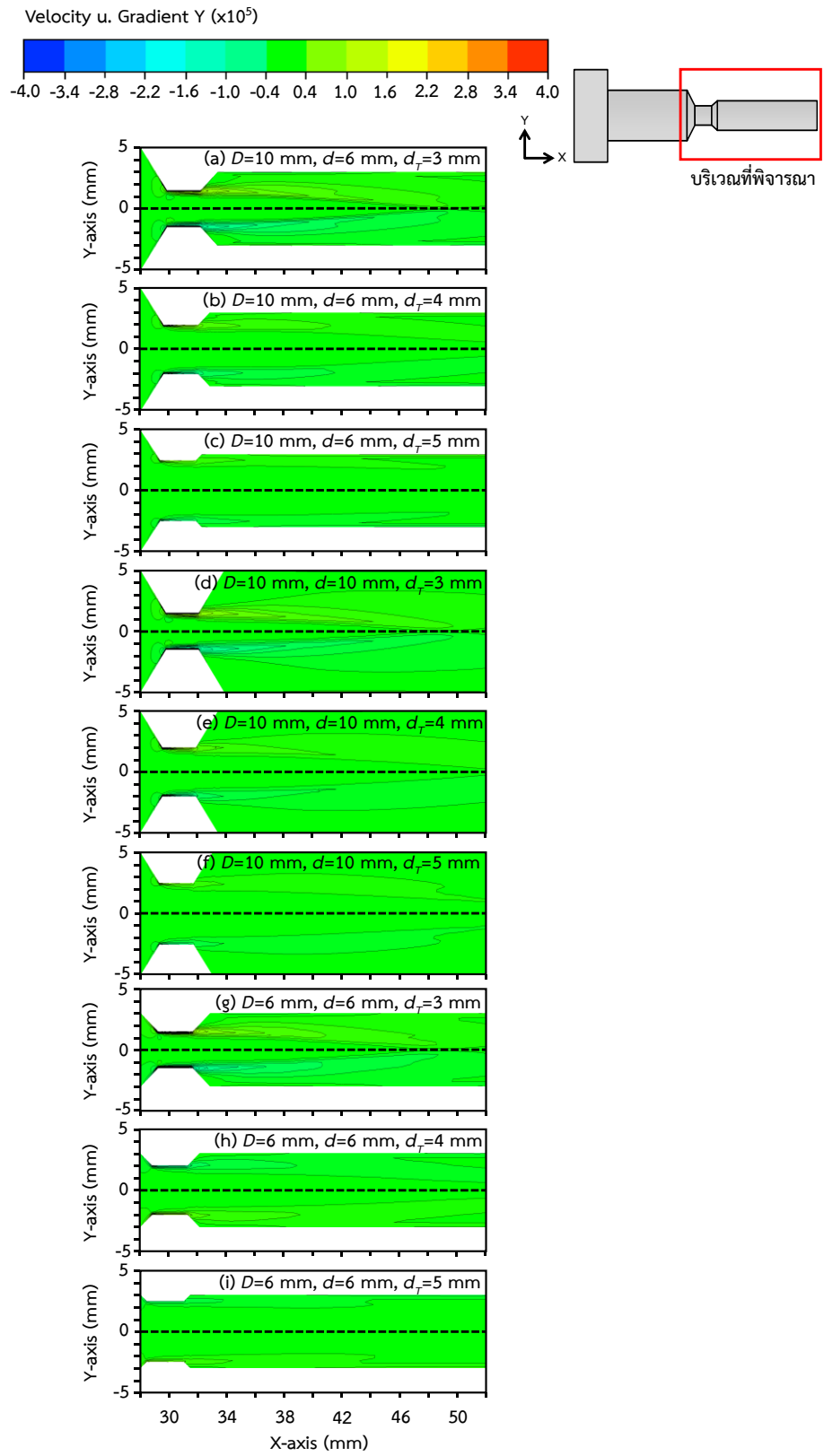
ส่วนในกรณีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า,  $D = 10$  mm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก,  $d = 10$  mm (รูปที่ 4.5(d), รูปที่ 4.5(e) และรูปที่ 4.5(f)) พบว่าเส้นทางการไหลของของไหลบริเวณก่อนถึงทางออกของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก มีลักษณะการไหลเป็นแบบหมุนวนเช่นเดียวกัน แต่มีปริมาณที่มากกว่าเมื่อเทียบกับกรณี  $D = 10$  mm และ  $d = 6$  mm เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกมีขนาดใหญ่ ทำให้ความเร็วของของไหลสูงขึ้นหลังจากเคลื่อนที่ผ่านบริเวณคอคอด จากนั้นของไหลที่อยู่รอบๆ เกิดการหมุนวนและไหลเข้าไปผสมกับกระแสไหลหลักได้รุนแรงกว่าในกรณี  $D = 10$  mm และ  $d = 6$  mm นอกจากนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด,  $d_T = 3$  mm (รูปที่ 4.5(d)) แสดงให้เห็นถึงเส้นทางการไหลของของไหลที่มีลักษณะเป็นการไหลแบบหมุนวนเกิดขึ้นมากที่สุด เมื่อเทียบกับกรณี  $d_T = 4$  mm และ  $d_T = 5$  mm ตามลำดับ (รูปที่ 4.5(e) และรูปที่ 4.5(f))

สำหรับกรณีของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า,  $D = 6$  mm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก,  $d = 6$  mm (รูปที่ 4.5(g), รูปที่ 4.5(h) และรูปที่ 4.5(i)) สังเกตได้ว่าบริเวณก่อนถึงทางออกของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก พบว่าพฤติกรรมของการไหลมีลักษณะเป็นการไหลแบบหมุนวน (Recirculation) เกิดขึ้นและสามารถดึงของไหลที่อยู่รอบๆ เข้ามาผสมกับกระแสการไหลหลัก ซึ่งมีลักษณะเดียวกับกรณี  $D = 10$  mm และ  $d = 6$  mm แต่มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีดังกล่าว นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของการไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้น เป็นผลมาจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอด ( $d_T$ ) โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด,  $d_T = 3$  mm (รูปที่ 4.5(g)) สามารถเกิดพฤติกรรมการไหลแบบหมุนวนมีค่ามากที่สุด เมื่อเทียบกับกรณี  $d_T = 4$  mm และ  $d_T = 5$  mm ตามลำดับ (รูปที่ 4.5(h) และรูปที่ 4.5(i))

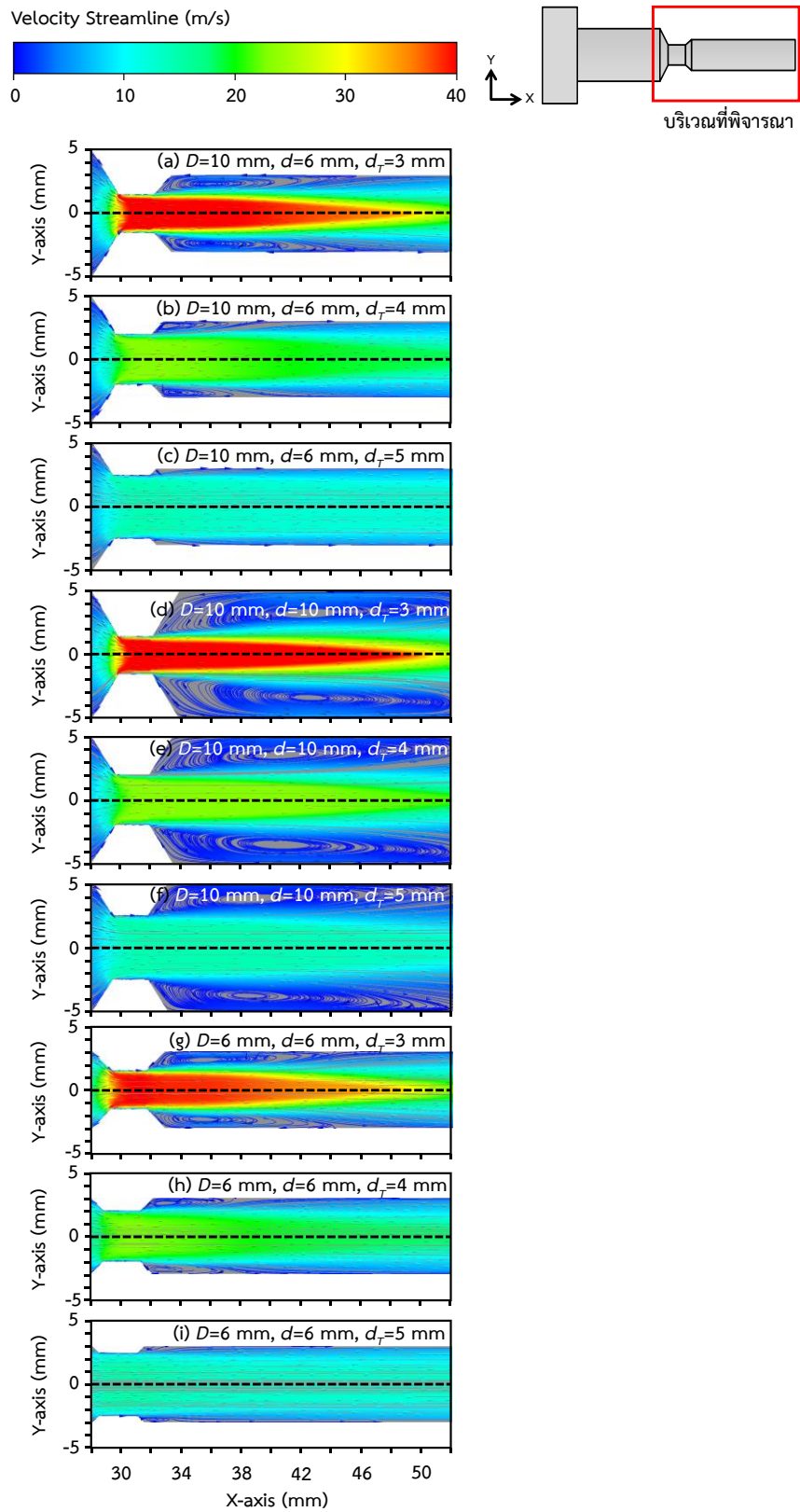
กล่าวโดยภาพรวมได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด ( $d_T$ ) มีผลต่อพฤติกรรมการไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้นภายในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กโดยเฉพาะบริเวณก่อนทางออก ซึ่งหลังจากที่ของไหลเคลื่อนที่ผ่านคอคอด ทำให้ความเร็วของของไหลสูงขึ้น จากนั้นของไหลที่อยู่รอบๆ เกิดการหมุนวนและไหลเข้าไปผสมกับกระแสไหลหลักได้รุนแรง ส่งผลให้เกิดการดูดอากาศจากภายนอกเข้ามายังตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กได้มากขึ้น



รูปที่ 4.3 พลังงานจลน์ความปั่นป่วน (Turbulence Kinetic Energy)



รูปที่ 4.4 ความเค้นเฉือน (Shear Stress)



รูปที่ 4.5 เส้นทางความเร็ว (Streamline)

## 4.2 การวัดขนาดฟองอากาศ

### 4.2.1 การศึกษาลักษณะของฟองอากาศที่ได้จากตัวกำเนิดฟองรูปแบบต่างๆ

การทดลองเปรียบเทียบลักษณะของฟองอากาศที่ได้จากตัวกำเนิดฟองรูปแบบต่างๆ ได้แก่ วัสดุพอร์หรือหัวทรายแบบจาน หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ และหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน โดยกำหนดให้อัตราการไหลของน้ำและอากาศเท่ากันทุกกรณี คือ 20 litre/min และ 0.1 litre/min ตามลำดับ ส่วนกรณีการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน ได้กำหนดให้ความดันน้ำภายในถังมีค่าเท่ากับ 3 bar

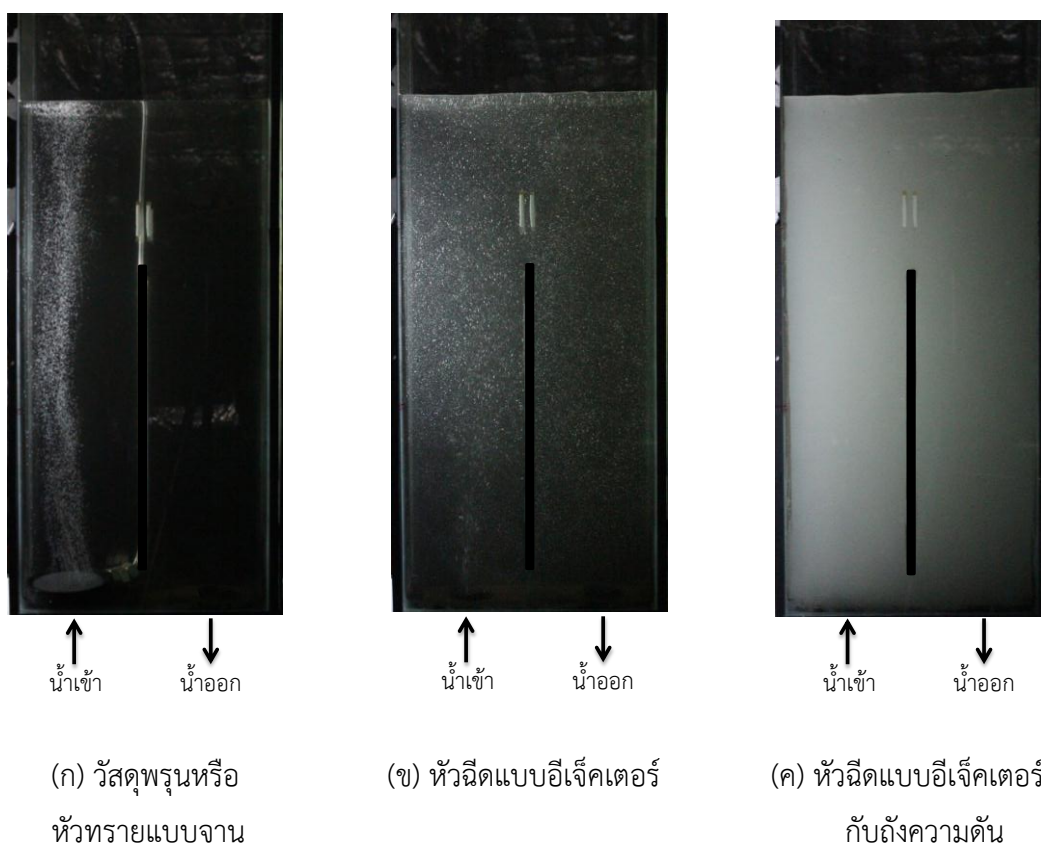
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.6 แสดงลักษณะการเกิดฟองอากาศจากตัวกำเนิดฟองรูปแบบต่างๆ พบว่าสามารถสร้างฟองอากาศให้มีขนาดเล็กได้ แต่มีความแตกต่างกันในแง่ของขนาดและปริมาณฟองอากาศ โดยการอัดอากาศผ่านวัสดุพอร์หรือหัวทราย (รูปที่ 4.6(ก)) ลักษณะของฟองอากาศที่ได้มีขนาดใหญ่และลอยตัวหรือเคลื่อนที่อยู่บริเวณใกล้กับตัวกำเนิดฟองอากาศเท่านั้น โดยฟองอากาศไม่สามารถไหลวนหรือสะสมอยู่ในน้ำเป็นเวลานานได้ เนื่องจากฟองอากาศขนาดใหญ่มีข้อดีน้อยกว่าฟองอากาศขนาดเล็ก คือ ความเหนียวหรือความเสถียรของฟองมีน้อย จึงแตกได้ง่ายกว่าฟองอากาศขนาดเล็ก ดังนั้นจึงทำให้ฟองอากาศไม่สามารถคงตัวอยู่ในน้ำได้

ส่วนลักษณะของฟองอากาศขนาดเล็กที่เกิดจากหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ (รูปที่ 4.6(ข)) จากการศึกษการไหลที่เกิดขึ้นในตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กโดยใช้โปรแกรมการจำลองการไหล ในหัวข้อที่ 4.1 ทำให้ทราบว่าเมื่อของไหลหรือน้ำไหลผ่านบริเวณคอคอดของหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ ส่งผลให้การไหลบริเวณดังกล่าวมีความเร็วสูงและความดันต่ำ ซึ่งทำให้อากาศจากภายนอกถูกดูดเข้ามาภายในหัวฉีด นอกจากนี้การเกิดพลังงานจลน์ความปั่นป่วน ช่วยให้อากาศที่เข้ามาภายในหัวฉีดสามารถผสมกับน้ำได้มากขึ้น ในขณะเดียวกันเมื่อน้ำไหลผ่านคอคอด ทำให้เกิดความเค้นเฉือนบริเวณใกล้กับผนังของคอคอด ส่งผลให้พฤติกรรมของการไหลของน้ำที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ช่วยในการตัดย่อยฟองอากาศขนาดใหญ่ที่ไหลผ่านเข้ามาในหัวฉีดให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งสังเกตได้ว่าฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กกว่าฟองอากาศที่เกิดจากการอัดอากาศผ่านวัสดุพอร์หรือหัวทราย นอกจากนี้ฟองอากาศดังกล่าวยังสามารถคงอยู่ในน้ำได้นานและเกิดการสะสมปริมาณฟองอากาศได้มากกว่า เนื่องจากคุณสมบัติของฟองอากาศขนาดเล็ก มีจุดเด่น คือ แรงลอยตัวต่ำ ทำให้สามารถลอยอยู่ในน้ำได้นาน

นอกจากนี้การใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน (รูปที่ 4.6(ค)) ซึ่งอาศัยหลักการดูดอากาศจากภายนอกผ่านหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์เข้ามาอัดในถังความดัน ส่งผลให้ปริมาณของฟองอากาศขนาดเล็กในระบบเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ปัจจัยของการเพิ่มขึ้นของปริมาณฟองอากาศขึ้นอยู่กับความดันของน้ำภายในถังอัดความดัน คือ เมื่อเพิ่มความดันให้กับน้ำโดยใช้อากาศและเมื่อความดันรวมในระบบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการละลายของอากาศในน้ำมีเพิ่มขึ้นตามกฎของก๊าส จึงเกิดเป็น

ฟองอากาศขนาดเล็กและส่งผลให้มีปริมาณของฟองอากาศที่เพิ่มขึ้น สังเกตได้ว่าลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กเช่นเดียวกับการใช้หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์เพียงอย่างเดียว ในขณะที่การใช้ถึงความดันสามารถทำให้ฟองอากาศมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งพบว่าน้ำภายในคอลัมน์มีลักษณะขุ่นคล้ายกับฟองน้ำนม ส่วนรูปที่ 4.7 แสดงลักษณะของฟองอากาศบริเวณปากทางออกของหัวฉีดซึ่งต่อกับคอลัมน์ ซึ่งสังเกตได้ว่าฟองอากาศจากการใช้หัวฉีดอ็ีเจ็คเตอร์คู่กับถึงความดัน สามารถเกิดฟองอากาศขนาดเล็กและมีปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวกำเนิดฟองอากาศรูปแบบอื่นๆ

สำหรับการเปรียบเทียบขนาดของฟองอากาศจากตัวกำเนิดรูปแบบต่างๆ โดยวิธีกาลักน้ำ ซึ่งดูดน้ำผ่านเข้ามายังห้องกักแล้วถ่ายรูปฟอง จากนั้นนำไปคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB ซึ่งผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองอากาศที่ได้จากการอัดอากาศผ่านวัสดุพอร์น มีขนาดประมาณ 385  $\mu\text{m}$  ส่วนฟองอากาศที่ได้จากหัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์และการใช้หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์คู่กับถึงความดัน ขนาดของฟองอยู่ในช่วง 82-85  $\mu\text{m}$  แต่การใช้ถึงความดันสามารถเพิ่มปริมาณของฟองอากาศที่อยู่ในน้ำให้มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.6 ลักษณะการเกิดฟองอากาศจากตัวกำเนิดฟองรูปแบบต่างๆ



(ก) วัสดุพูนหรือ  
หัวทรายแบบจาน

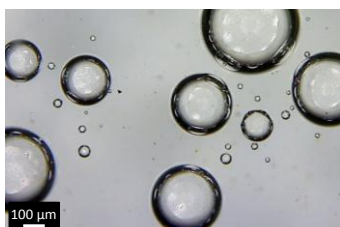


(ข) หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์

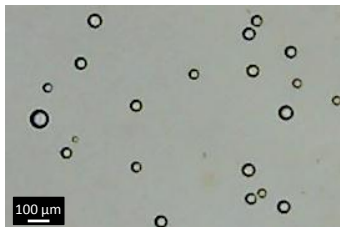


(ค) หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่  
กับถังความดัน

รูปที่ 4.7 ลักษณะของฟองอากาศบริเวณปากทางออก



(ก) วัสดุพูนหรือ  
หัวทรายแบบจาน



(ข) หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์



(ค) หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่  
กับถังความดัน

รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายฟองอากาศจากกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลสำหรับวัดขนาดฟอง

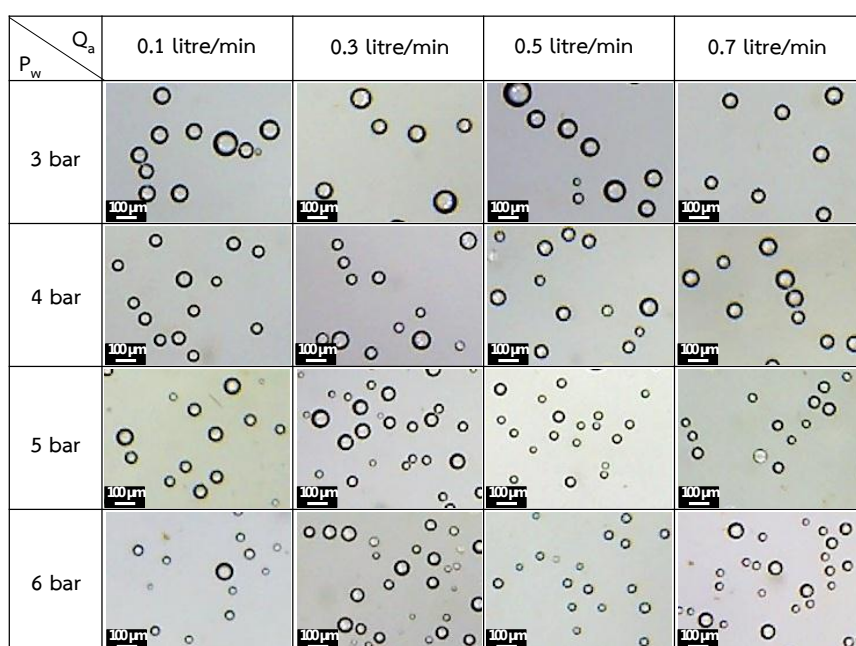
#### 4.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะฟองอากาศที่ได้จากหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน

ในการทดลองเปรียบเทียบขนาดฟองที่ได้จากตัวกำเนิดฟองรูปแบบต่างๆ พบว่าการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน สามารถสร้างฟองอากาศที่มีขนาดเล็กและมีปริมาณความหนาแน่นของฟองได้ดีที่สุด ดังนั้นจึงทำการทดลองปรับเปลี่ยนค่าความดันและอัตราการไหลของอากาศที่เงื่อนไขต่างๆ เพื่อหาขนาดฟองอากาศที่เล็กและมีปริมาณเหมาะสมที่สุด โดยที่กำหนดความดันของน้ำในถังอัดความดัน ( $P_w$ ) เท่ากับ 3, 4, 5 และ 6 bar ส่วนอัตราการไหลของอากาศ ( $Q_a$ )



กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 litre/min นอกจากนี้กำหนดอัตราการไหลของน้ำให้มีค่าคงที่ที่ 20 litre/min เท่ากันทุกกรณี

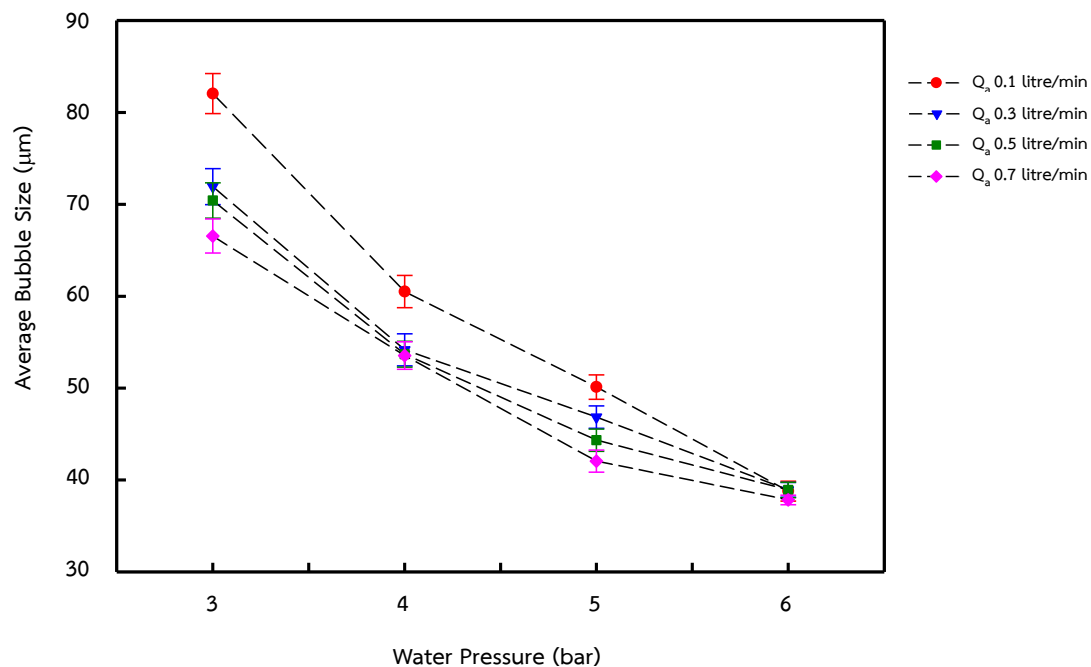
การใช้หัวฉีดอีเจ็คเตอร์สำหรับดูดอากาศคู่กับถังความดัน ทำให้อากาศจากภายนอกสามารถเข้าไปละลายในน้ำส่งผลให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็ก จากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อปรับความดันในถังให้สูงขึ้น ส่งผลให้ฟองอากาศที่ได้มีขนาดเล็กลง โดยความดัน 6 bar ทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับความดันอื่นๆ ในขณะที่เดียวกันการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ช่วยให้ฟองอากาศในระบบมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อการลดขนาดฟองอากาศ



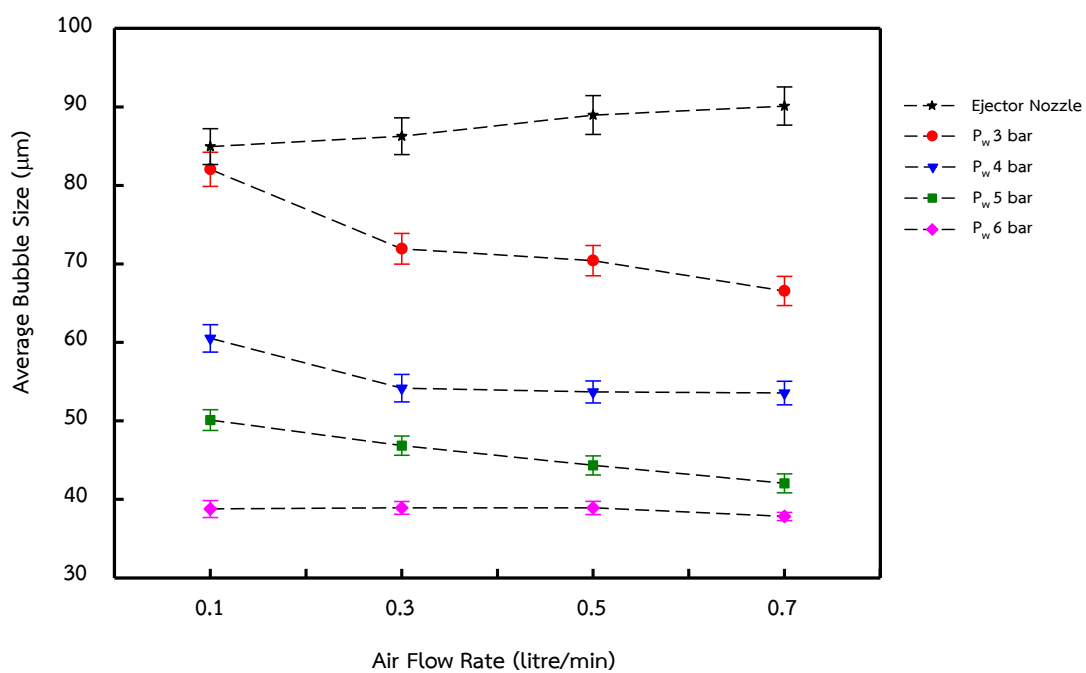
**รูปที่ 4.9** ภาพถ่ายฟองอากาศที่ได้จากหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่ความดันและอัตราการไหลของอากาศแตกต่างกัน

จากนั้นเปรียบเทียบขนาดของฟองอากาศจากหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน ในรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและขนาดฟองอากาศโดยเฉลี่ยพบว่าที่ความดัน 3 bar ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ที่สุด โดยเฉลี่ย 66-82  $\mu\text{m}$  และเมื่อเพิ่มความดันไปที่ 4 ถึง 6 bar ทำให้ขนาดของฟองอากาศโดยเฉลี่ยลดลง คือ 55-60  $\mu\text{m}$ , 44-51  $\mu\text{m}$  และ 38-40  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะไม่มีผลต่อการลดขนาดฟอง แต่เห็นได้ชัดในแง่ของปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กที่มีจำนวนเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟองอากาศที่ถูกดูดผ่านหัวฉีดอีเจ็คเตอร์สามารถเข้าไปละลายในน้ำได้มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.11 นอกจากนี้ในกรณีการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์เพียงอย่างเดียวสำหรับสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก สังเกตได้ว่าการเพิ่มอัตราการไหล

ของอากาศตั้งแต่ 0.1-0.7 litre/min มีผลทำให้ฟองอากาศที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณอากาศ โดยเฉลี่ย 85-90  $\mu\text{m}$



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความดันกับขนาดฟองอากาศโดยเฉลี่ย



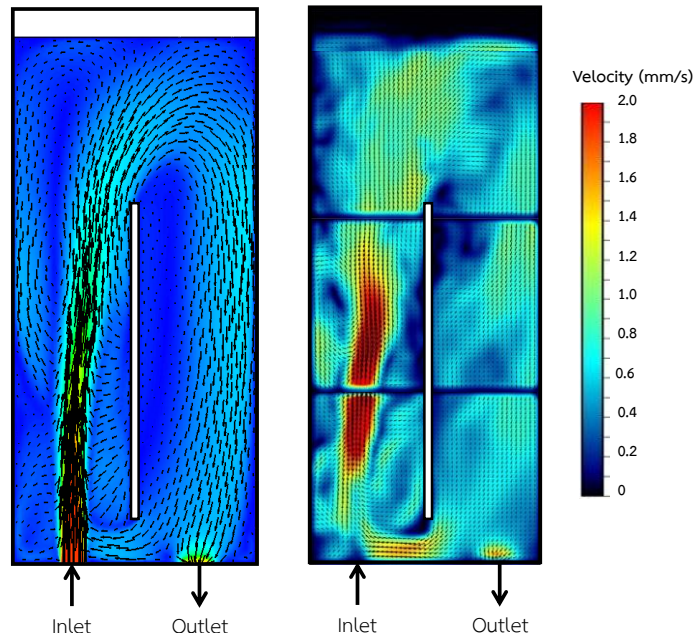
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับขนาดฟองอากาศโดยเฉลี่ย

#### 4.3 การศึกษาลักษณะการไหลของของไหลและฟองอากาศขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในคอลัมน์

ในการศึกษาลักษณะการไหลของของไหลภายในคอลัมน์ โดยปรับระยะความสูงของแผ่นกั้นที่ติดตั้งกลางคอลัมน์ เพื่อให้เกิดการไหลวนของของไหล โดยมีระดับความสูงที่ 35 cm และ 50 cm จากนั้นเปรียบเทียบลักษณะการเคลื่อนที่ของของไหลระหว่างผลจากการจำลองการไหลด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent) และภาพถ่ายจากการทดลอง โดยใช้การถ่ายภาพและวิเคราะห์ภาพอนุภาคแบบ Particle Image Velocimetry (PIV)

จากรูปที่ 4.12 แสดงเวกเตอร์และ contour ความเร็วของของไหลที่เคลื่อนที่เข้าสู่คอลัมน์ จากรูปที่ 4.12(ก) เป็นผลจากการจำลองลักษณะการไหลด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent) ส่วนรูปที่ 4.12(ข) เป็นผลการทดลองโดยใช้การถ่ายภาพและวิเคราะห์ภาพอนุภาคแบบ Particle Image Velocimetry (PIV) ในการศึกษาลักษณะการไหลในคอลัมน์ โดยมีแผ่นกั้นความสูง 35 cm ติดตรงกลางคอลัมน์เพื่อแบ่งช่องการไหล เริ่มจากของไหลไหลเข้า (Inlet) ทางด้านซ้ายและไหลออก (Outlet) ทางด้านขวาของคอลัมน์ โดยกำหนดให้อัตราการไหลของของไหลบริเวณทางเข้าอยู่ที่ 3 litre/min จากรูปสังเกตเห็นได้ว่าบริเวณที่ของไหลไหลเข้าคอลัมน์ความเร็วของกระแสการไหลมีค่ามากและมีการตั้งของไหลที่อยู่รอบๆ ให้เข้ามาผสมในกระแสไหลหลัก ส่วนบริเวณการไหลชิดผนังคอลัมน์หรือชิดแผ่นกั้น พบว่าความเร็วมีค่าน้อยมากนอกจากนี้ ด้านบนมีการไหลวกกลับของน้ำจากด้านซ้ายไหลวนไปยังด้านขวา และมีของไหลบางส่วนที่เคลื่อนที่ขึ้นด้านบนสุดก่อนไหลวกกลับ สำหรับบริเวณทางออกของคอลัมน์ มีน้ำบางส่วนไหลออกจากคอลัมน์ (วนกลับเข้าชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก) และมีบางส่วนไหลวนกลับไปยังด้านซ้ายของคอลัมน์อีกครั้ง แสดงให้เห็นว่าการติดแผ่นกั้นช่วยให้ของไหลเกิดการไหลวนซ้ำได้มากขึ้น

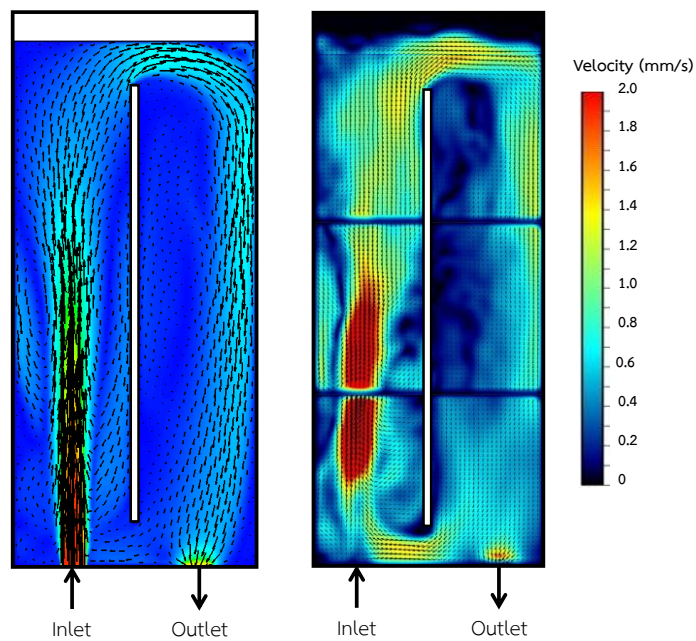
ส่วนรูปที่ 4.13 แสดงเวกเตอร์และ contour ความเร็วของของไหลที่เคลื่อนที่เข้าสู่คอลัมน์ โดยปรับความสูงของแผ่นกั้นเป็น 50 cm และเปรียบเทียบลักษณะการไหลของของไหลด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent) (รูปที่ 4.13(ก)) และการทดลองโดยใช้การถ่ายภาพและวิเคราะห์ภาพอนุภาคแบบ Particle Image Velocimetry (PIV) (รูปที่ 4.13(ข)) จากผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มความสูงของแผ่นกั้น ส่งผลให้ของไหลมีการเคลื่อนที่ได้สูงขึ้น บริเวณด้านบนเหนือแผ่นกั้นหรือช่วงที่มีการไหลแบบวกกลับ โดยของไหลสามารถอยู่ได้นานในช่องที่ตรงกับทางเข้าก่อนการไหลวนกลับไปยังด้านขวาของคอลัมน์ สำหรับบริเวณที่ของไหลไหลเข้าคอลัมน์ความเร็วของกระแสการไหลมีค่ามาก และมีการตั้งของไหลที่อยู่รอบๆ ให้เข้ามาผสมในกระแสไหลหลักเช่นเดียวกับกรณีความสูงแผ่นกั้น 35 cm นอกจากนี้พบว่า การติดแผ่นกั้น 50 cm ช่วยให้ของไหลไหลได้ทั่วทั้งคอลัมน์มากกว่าแผ่นกั้น 35 cm เนื่องจากของไหลสามารถเคลื่อนที่ในช่องการไหลฝั่งเดียวกับทางเข้าได้สูงกว่าก่อนการวนกลับมาอีกฝั่งของช่องการไหล



(ก) CFD Simulation

(ข) การทดลอง PIV

รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบลักษณะการไหลวนของของไหลในคอลัมน์ โดยความสูงของแผ่นกั้น 35 cm



(ก) CFD Simulation

(ข) การทดลอง PIV

รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบลักษณะการไหลวนของของไหลในคอลัมน์ โดยความสูงของแผ่นกั้น 50 cm

#### 4.4 การศึกษาการล้างและแยกอนุภาคผงถ่านหิน

##### 4.4.1 การเตรียมตัวอย่างถ่านหิน

ในกระบวนการร่อนถ่านหินผ่านตะแกรงคัดขนาดมาตรฐาน แบ่งออกเป็น 5 ขนาด ได้แก่ 75  $\mu\text{m}$ , 106  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$  และ 212  $\mu\text{m}$  โดยชั้นตะแกรงเบอร์ลำดับติดกันจากขนาดใหญ่อยู่ด้านบนไปหาขนาดเล็กที่อยู่ด้านล่าง และมีชั้นล่างสุดเป็นถาดรองรับ (Pan) นำชุดตะแกรงมาตรฐานดังกล่าวไปวางบนเครื่องเขย่า ในขั้นตอนการหาการกระจายขนาดของถ่านหินหลังจากการบดละเอียด โดยการสุมตัวอย่างถ่านหินปริมาณ 200 g ใส่ในตะแกรงชั้นบนสุด เริ่มเขย่าและร่อนให้ผงถ่านหินลอดผ่านรูของตะแกรง กระจายตกลงไปค้างอยู่บนตะแกรงแต่ละขนาด เมื่อชั่งน้ำหนักของผงถ่านหินที่ค้างอยู่บนตะแกรงแต่ละขนาดก็สามารถนำไปคำนวณหาขนาดเฉลี่ยของผงถ่านหินได้ รายละเอียดของผงถ่านหินที่ค้างอยู่ในตะแกรงแต่ละขนาด แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การกระจายขนาดของถ่านหินหลังจากการบดละเอียด

ขนาดถ่านหิน ( $\mu\text{m}$ )	ปริมาณถ่านหินเฉลี่ย (%)
0 - 75	31.5
75 - 106	23.6
106 - 150	18.5
150 - 212	13.5
212 ขึ้นไป	12.9
รวม	100.0

##### 4.4.2 การศึกษาลักษณะการลอยของถ่านหินที่เงื่อนไขสภาพผิวแตกต่างกัน

ทดลองเปรียบเทียบลักษณะการลอยของถ่านหิน โดยมีเงื่อนไขการปรับสภาพผิวแร่และประเภทของน้ำที่ใช้ทดลองแตกต่างกัน รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.2 ในการทดลองใช้ผงถ่านหินขนาดเล็กกว่า 212  $\mu\text{m}$  นำไปลอยในน้ำปริมาตร 200 ml จากนั้นเปรียบเทียบลักษณะการลอยตัวของถ่านหิน รวมทั้งศึกษาผลของการปรับสภาพของผิวถ่านหินและน้ำที่เหมาะสมต่อกระบวนการล้างและแยกผงถ่านหินต่อไป

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดและเงื่อนไขที่ใช้เปรียบเทียบการลอยของถ่านหิน

ตัวอย่าง	สภาพผิวถ่านหิน	ประเภทของน้ำ
ก	ไม่ปรับสภาพ	น้ำเปล่า
ข	ปรับสภาพ (เติมน้ำมันดีเซล)	น้ำเปล่า
ค	ปรับสภาพ (เติมน้ำมันดีเซล)	น้ำที่มีฟองอากาศขนาดเล็ก (เติมน้ำมันสน)

เนื่องจากผิวของถ่านหินมีคุณสมบัติที่ไม่เปียกน้ำหรือไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ดังนั้นถ่านจึงไม่สามารถรวมตัวกับน้ำได้ จากรูปที่ 4.14(ก) การเทถ่านหินที่ไม่ผ่านการปรับสภาพลงไปในน้ำเปล่าหรือน้ำที่ไม่มีฟองอากาศ พบว่าถ่านหินไม่สามารถรวมตัวเข้ากับน้ำได้ จึงเกาะกลุ่มลอยอยู่บนผิวน้ำ

ส่วนรูปที่ 4.14(ข) แสดงให้เห็นว่าถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยสารเคลือบผิวแร่ (น้ำมันดีเซล) เมื่อเทลงในน้ำเปล่าซึ่งไม่มีฟองอากาศขนาดเล็ก พบว่าถ่านหินจมลงด้านล่าง เนื่องจากในน้ำเปล่าซึ่งไม่มีฟองอากาศขนาดเล็ก ทำให้ไม่สามารถช่วยพยุงให้ถ่านหินลอยขึ้นผิวน้ำได้ แต่มีผงถ่านหินบางส่วนเท่านั้นที่สามารถลอยได้ ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลือบผิวแร่ที่มีน้ำมันเป็นส่วนผสมทำให้เกิดการแยกชั้นระหว่างน้ำและน้ำมัน ถ่านหินที่ถูกเคลือบด้วยน้ำมันดีเซลจึงสามารถลอยอยู่บนผิวน้ำ

สำหรับถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคลือบผิวแร่ เมื่อเทลงในน้ำที่มีฟองอากาศขนาดเล็กซึ่งเพิ่มสารเคลือบฟอง (น้ำมันสน) เพื่อช่วยให้ฟองอากาศมีความเหนียวมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.14(ค) พบว่าฟองอากาศขนาดเล็กสามารถจับกับผงถ่านหินซึ่งเคลือบด้วยน้ำมันแล้วพยุงขึ้นสู่ผิวน้ำได้ นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นชั้นของถ่านหินซึ่งแยกตัวลอยอยู่ที่ผิวน้ำ ลักษณะมีความมันเงาและจับกลุ่มเป็นชั้นของเนื้อถ่านหิน

ดังนั้นในการทดลองล้างและแยกถ่านหินจำเป็นต้องมีการปรับสภาพของผิวแร่ เมื่อนำไปลอยในน้ำที่มีฟองอากาศขนาดเล็กทำให้เกิดการล้างและแยกผงถ่านหิน เนื่องจากฟองอากาศขนาดเล็กสามารถจับกับผงถ่านหินละเอียดซึ่งมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ส่วนมลทินหรือสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการซึ่งฟองอากาศขนาดเล็กไม่สามารถจับหรือเกาะที่ผิวได้ จึงถูกแยกออกและจมลงด้านล่าง



(ก) ถ่านหินไม่ได้ปรับสภาพลอยในน้ำเปล่า



(ข) ถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพลอยในน้ำเปล่า



(ค) ถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพลอยในน้ำที่มีฟองอากาศขนาดใหญ่

รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบลักษณะการลอยของถ่านหินที่เงื่อนไขสภาพผิวแตกต่างกัน

#### 4.4.3 การศึกษาผลของตัวกำเนิดฟองอากาศรูปแบบต่างๆ ต่อการล้างและแยกผงถ่านหิน

ในการทดลองศึกษาการล้างและแยกผงถ่านหิน โดยใช้ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก 3 แบบ ได้แก่ วัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์ และหัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน เพื่อศึกษาผลของฟองอากาศที่มีต่อการลอยของผงถ่านหิน หลังจากฟองอากาศเกาะกับผงถ่านหินและพองให้ลอยขึ้นสู่อากาศ จะกวาดหัวแร่ใส่ภาชนะและนำไปอบไล่ความชื้น จากนั้นชั่งน้ำหนักเปรียบเทียบปริมาณของหัวแร่ที่เก็บได้ และนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบที่เหลือในถ่านหินต่อไป โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.3** รายละเอียดและเงื่อนไขการทดลองล้างและแยกผงถ่านหิน โดยใช้ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กรูปแบบต่างๆ

รายละเอียดตัวแปร	เงื่อนไขและขนาด
รูปแบบตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก	- วัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน - หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์ - หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน
ปริมาณน้ำในคอลัมน์	22.5 litre
ความสูงแผ่นกั้น	35 cm
อัตราการไหลของน้ำ	20 litre/min
อัตราการไหลของอากาศ	0.7 litre/min
ความดันของน้ำในถัง	3 bar
ขนาดถ่านหิน	<212 $\mu$ m
ปริมาณถ่านหิน	1 kg
ปริมาณน้ำสำหรับปรับสภาพ	2 litre
ปริมาณสารเคลือบผิวแร่ (น้ำมันดีเซล)	30 g (8 kg/tons of coal)
ปริมาณสารเคลือบฟอง (น้ำมันสน)	18 g (0.15 kg/tons of coal)
ความเร็วใบพัดสำหรับปรับสภาพ	620 rpm
เวลาที่ใช้ในการเตรียมสภาพผิวแร่	3 min

จากรูปที่ 4.15 แสดงลักษณะการลอยของผงถ่านหิน คอลัมน์ที่ติดแผ่นกั้นจะแบ่งทางเข้าและทางออกของของไหล โดยทางซ้ายของคอลัมน์จะเป็นตำแหน่งที่ตรงกับตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก จากรูปที่ 4.15(ก) เป็นลักษณะการลอยของถ่านหิน โดยใช้วัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน



เป็นตัวกำเนิดฟองอากาศ สังเกตได้ว่ามีฟองอากาศขนาดใหญ่ลอยอยู่ที่ผิวน้ำบริเวณที่ตรงกับตำแหน่งของหัวทราย นอกจากนี้ฟองอากาศจะดันผงถ่านหินที่ลอยให้ไปอยู่บริเวณทางขวาของคอลัมน์

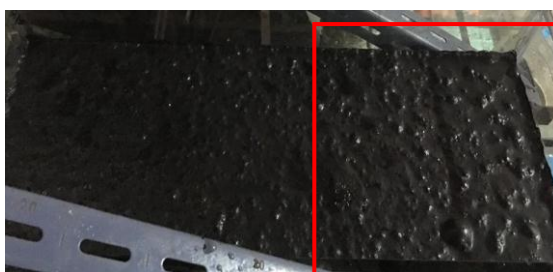
ส่วนการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ ในรูปที่ 4.15(ข) พบว่าฟองอากาศขนาดเล็กสามารถจับกับผงถ่านหินและลอยทั่วทั้งบริเวณผิวน้ำในคอลัมน์ นอกจากนี้การใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน จะช่วยเพิ่มปริมาณของฟองอากาศให้มากขึ้น ส่งผลให้ผงถ่านหินที่จับกับฟองอากาศขนาดเล็กลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.15(ค)



(ก) วัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน



(ข) หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์



(ค) หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน

รูปที่ 4.15 ลักษณะการลอยของผงถ่านหิน เมื่อรูปแบบของตัวกำเนิดฟองอากาศแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของตัวกำเนิดฟองอากาศกับปริมาณหัวแร่ที่เก็บได้ พบว่าตัวกำเนิดฟองอากาศแต่ละรูปแบบสามารถสร้างฟองอากาศที่มีความสามารถในการเกาะติดกับผงถ่านหินได้แตกต่างกัน โดยการอัดอากาศผ่านวัสดุพูนหรือหัวทราย ฟองอากาศที่ได้มีขนาดใหญ่ ทำให้ระยะเวลาที่ฟองสามารถอยู่ในน้ำได้ค่อนข้างน้อยหรือฟองอากาศจะแตกสลายก่อนที่จะลอยขึ้นสู่น้ำ ส่งผลให้ปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะพองให้ผงถ่านหินลอยขึ้นสู่น้ำ ซึ่งปริมาณหัวแร่ที่เก็บได้ ประมาณ 83.7 g

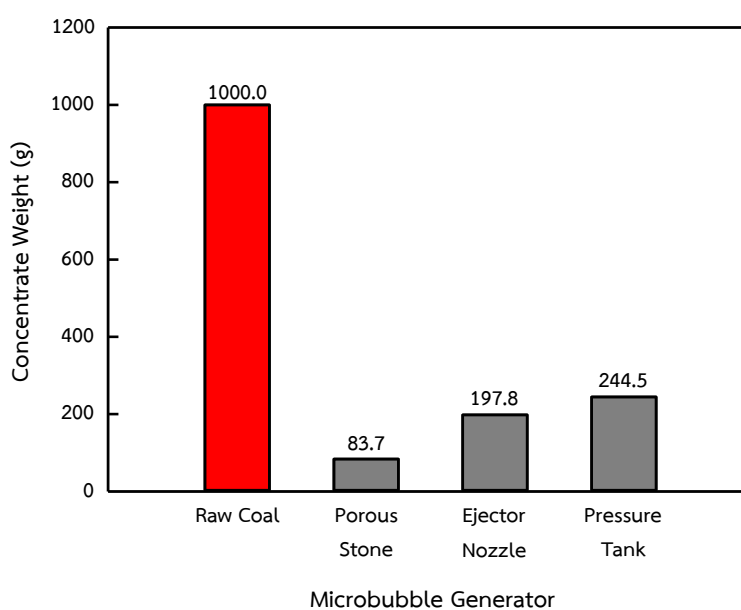
ส่วนการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ โดยเมื่อความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านเข้ามาในหัวฉีด ถูกเร่งความเร็วบริเวณคอคอดของหัวฉีดแล้ว ทำให้ความดันบริเวณดังกล่าวลดต่ำลง จากนั้นอากาศจะถูกดูดเข้ามาภายในหัวฉีดและความเร็วของน้ำตัดเฉือนฟองอากาศแล้ว จะทำให้ฟองอากาศแตกละเอียดออกเป็นฟองขนาดเล็ก โดยฟองอากาศขนาดเล็กสามารถเกาะกับผงถ่านหินขนาดเล็กได้และช่วยพองให้ถ่านหินลอยขึ้นสู่น้ำได้มากกว่าการใช้หัวทรายในการสร้างฟอง โดยปริมาณหัวแร่ที่เก็บได้จาก การใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ในการสร้างฟอง มีประมาณ 197.8 g

นอกจากนี้เมื่อนำหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์มาใช้ควบคู่กับถังความดัน จะทำให้ฟองอากาศมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อความดันในถังเพิ่มขึ้น อากาศที่ถูกดูดเข้ามาสามารถละลายในน้ำได้มากขึ้น ดังนั้นความหนาแน่นของฟองอากาศหรือปริมาณของฟองอากาศในระบบย่อมมีมากขึ้น เพิ่มโอกาสที่ฟองอากาศสามารถเกาะกับผงถ่านหินได้มากขึ้น นอกจากนี้ฟองอากาศขนาดเล็กที่มีคุณสมบัติลอยอยู่ในน้ำได้นาน จะช่วยให้ปริมาณของหัวแร่หรือถ่านหินที่ลอยเพิ่มมากขึ้นกว่าการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์เพียงอย่างเดียว โดยปริมาณหัวแร่ที่เก็บได้จากการใช้ถังความดันเพิ่มปริมาณฟองอากาศมีค่าประมาณ 244.5 g

จากตารางที่ 4.4 แสดงการกระจายขนาดของถ่านหินหลังจากผ่านกระบวนการล้างและแยกผงถ่านหินด้วยฟองอากาศขนาดเล็กที่ได้จากตัวกำเนิดฟองรูปแบบต่างๆ โดยนำหัวแร่ที่ได้ไปคัดและแยกขนาดด้วยตะแกรงคัดขนาดมาตรฐาน พบว่าฟองอากาศที่เกิดจากการอัดอากาศผ่านวัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน สามารถดักจับกับผงถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 150  $\mu\text{m}$  ได้ประมาณร้อยละ 50 ของปริมาณถ่านหินทั้งหมด เนื่องจากฟองอากาศซึ่งมีขนาดใหญ่ ทำให้ความสามารถในการจับกับผงถ่านหินที่มีขนาดเล็กได้น้อยกว่าการเกาะจับกับผงถ่านหินที่มีขนาดใหญ่

ส่วนฟองอากาศขนาดเล็กที่ได้จากหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ สามารถดักจับผงถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 150  $\mu\text{m}$  ได้มากถึงร้อยละ 89.6 ของปริมาณถ่านหินทั้งหมด ซึ่งเป็นผลมาจากฟองอากาศที่มีขนาดเล็ก ทำให้โอกาสที่ฟองอากาศสามารถจับกับผงถ่านหินที่มีขนาดเล็กได้ดี นอกจากนี้แรงลอยตัวของฟองอากาศสามารถพองผงถ่านหินที่มีขนาดเล็กให้ลอยขึ้นสู่น้ำได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับกรณีของฟองอากาศที่ได้จากการอัดอากาศผ่านวัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน

ในขณะที่การล้างและแยกผงถ่านหินด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก ที่สร้างจากหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน ซึ่งฟองอากาศที่ได้มีขนาดเล็กและช่วยเพิ่มจำนวนของฟองอากาศขนาดเล็กในระบบให้มากขึ้น สามารถเพิ่มโอกาสที่ฟองอากาศขนาดเล็กดักจับกับผงถ่านหินได้มากขึ้น เช่นเดียวกัน สังเกตได้ว่าผงถ่านหินส่วนใหญ่ร้อยละ 93.1 ของปริมาณถ่านหินทั้งหมด มีขนาดเล็กกว่า 150  $\mu\text{m}$

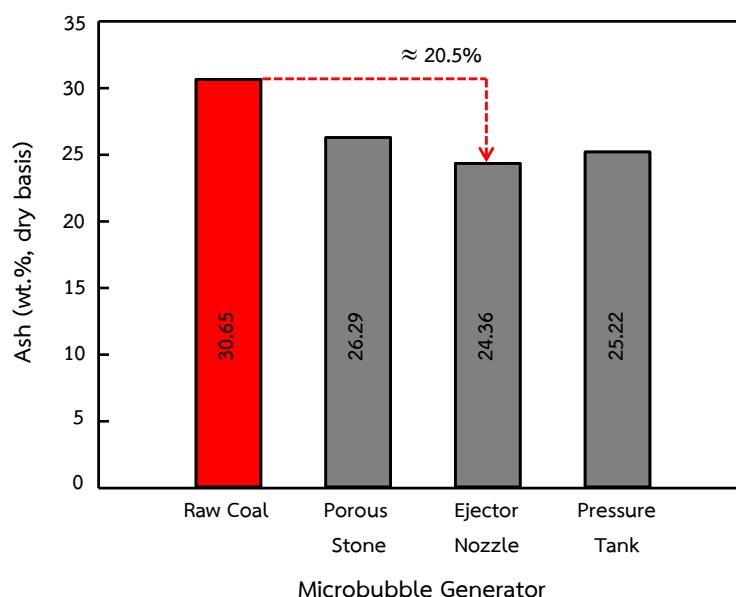


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของตัวกำเนิดฟองอากาศกับปริมาณหัวแร่ที่เก็บได้

ตารางที่ 4.4 การกระจายขนาดของถ่านหินหลังจากผ่านกระบวนการล้างและแยกผงถ่านหินด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก

ขนาดถ่านหิน ( $\mu\text{m}$ )	ปริมาณถ่านหินเฉลี่ย (%)		
	วัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน	หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์	หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน
0 - 75	12.2	51.4	56.8
75 - 106	17.5	20.4	21.1
106 - 150	20.3	17.8	15.2
150 - 212	21.6	9.1	5.6
212 ขึ้นไป	28.4	1.3	1.3
รวม	100.0	100.0	100.0

จากนั้นนำหัวแร่ไปวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบที่เหลืออยู่ในถ่านหิน ซึ่งประกอบด้วย ซี้เถ้า (Ash), สารระเหย (Volatile Matter) และคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) จากการทดลองพบว่า ฟองอากาศที่เกิดจากตัวกำเนิดฟองรูปแบบต่างๆ สามารถเกาะกับผงถ่านหินและพองให้ลอยขึ้นสู่น้ำ อธิบายได้ว่าผงถ่านหินซึ่งมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสามารถเกาะติดกับฟองอากาศและถูกยกให้ลอยขึ้นสู่น้ำ ในขณะที่มลทินหรือสิ่งเจือปนในถ่านหินที่มีคุณสมบัติแตกต่างออกไปหรือมีน้ำหนักมากจะแยกตัวออกจากถ่านหิน ดังนั้นทำให้ถ่านหินที่ลอยหรือหัวแร่มีความบริสุทธิ์และสะอาดมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ปริมาณองค์ประกอบในผงถ่านหินมีความเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยที่ปริมาณซี้เถ้า (Ash) หรือสิ่งสกปรกมีค่าลดลง ซึ่งสังเกตได้ว่าการอัดอากาศผ่านวัสดุพอร์นหรือหัวทรายแบบจาน สามารถลดปริมาณซี้เถ้าจากเดิม 30.65 wt.% db เหลือ 26.29 wt.% db ส่วนการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์สามารถลดปริมาณซี้เถ้าจากเดิมให้เหลือประมาณ 24.36 wt.% db นอกจากนี้การใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน ทำให้ปริมาณซี้เถ้าลดลงเหลือประมาณ 25.22 wt.% db โดยภาพรวมแล้วตัวกำเนิดฟองอากาศทั้ง 3 รูปแบบ สามารถสร้างฟองอากาศขนาดเล็กที่จับกับผงถ่านหินได้ในทุกกรณี นอกจากนี้ยังช่วยแยกสิ่งสกปรกและสามารถลดปริมาณซี้เถ้าที่มีอยู่ในถ่านหินได้เช่นเดียวกัน ส่งผลให้ปริมาณซี้เถ้าที่ได้หลังจากการล้างลดลงจากก่อนล้างประมาณ 20.5% ดังแสดงในรูปที่ 4.17

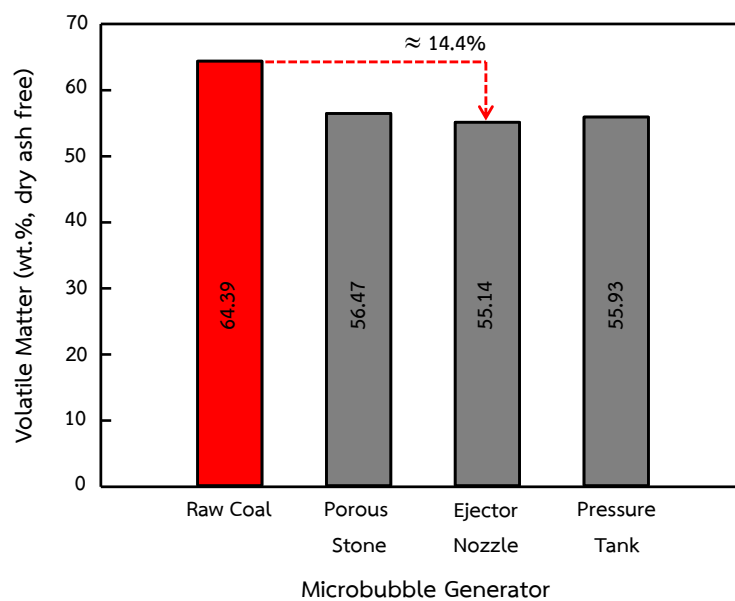


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของตัวกำเนิดฟองอากาศกับปริมาณซี้เถ้า (Ash)

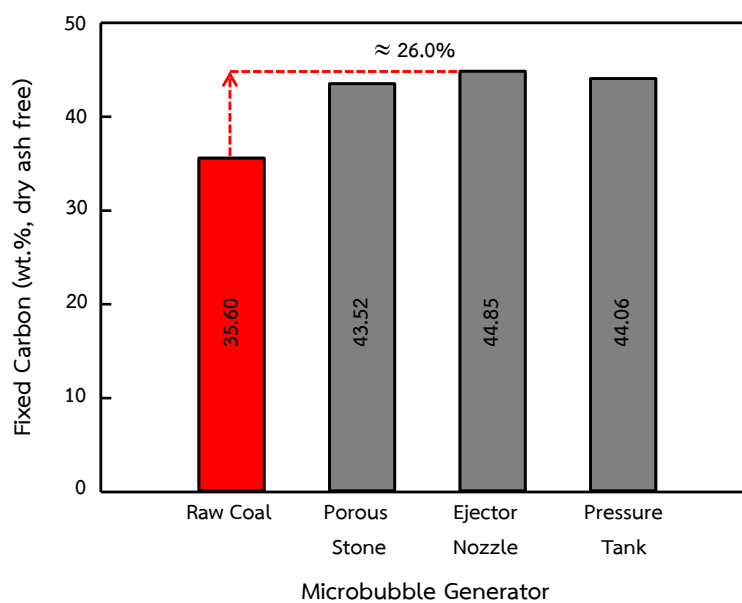
ส่วนปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) รูปที่ 4.18 พบว่ามีค่าลดลงและใกล้เคียงกันในทุกกรณี โดยที่ก่อนการล้างถ่านหิน มีปริมาณสารระเหยอยู่ที่ 64.39 wt.% daf หลังจากผ่านกระบวนการล้างและแยกผงถ่านหินด้วยฟองอากาศที่เกิดจากการอัดอากาศผ่านวัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจานแล้ว ปริมาณลดลงเหลือ 56.47 wt.% daf ส่วนการใช้หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์ในการสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก สามารถลดปริมาณขี้เถ้าจากเดิม คือ 64.39 wt.% daf ให้เหลือประมาณ 55.14 wt.% daf หรือประมาณ 14.4% นอกจากนี้การใช้หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน ช่วยให้ปริมาณของฟองอากาศขนาดเล็กเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณสารระเหยลดลงจากเดิมเหลือ 55.93 wt.% daf

สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) รูปที่ 4.19 พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นในทุกกรณี นอกจากนี้สังเกตได้ว่าปริมาณคาร์บอนคงที่ในถ่านหินที่เพิ่มขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันโดยฟองอากาศที่ได้จากการอัดอากาศผ่านวัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน สามารถเพิ่มปริมาณคาร์บอนคงที่จากเดิม คือ 35.60 wt.% daf เพิ่มขึ้นเป็น 43.52 wt.% daf ส่วนการใช้หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์ในการสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก ทำให้ปริมาณคาร์บอนในถ่านหินมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 26.0% หรือ 44.85 wt.% daf นอกจากนี้การใช้หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดันทำให้ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นจาก 35.60 wt.% daf เป็น 44.06 wt.% daf

อธิบายโดยภาพรวมได้ว่าปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ ขี้เถ้า (Ash), สารระเหย (Volatile Matter) และคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) ที่อยู่ในถ่านหินหลังจากผ่านการล้างและแยกด้วยฟองอากาศจากตัวกำเนิดฟองรูปแบบที่แตกต่างกัน พบว่าปริมาณขี้เถ้าและสารระเหยมีค่าลดลง ในขณะที่คาร์บอนคงที่มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณองค์ประกอบดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบในแง่ของปริมาณปริมาณหัวแร่หรือถ่านหินที่ลอยขึ้นสู่น้ำ จากรูปที่ 4.16 การใช้หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน ทำให้ฟองอากาศที่ได้มีขนาดเล็กและมีปริมาณมาก ส่งผลให้ปริมาณหัวแร่ที่ได้มีมากที่สุด รองลงมาคือหัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์และวัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน ดังนั้นอธิบายได้ว่าปริมาณหัวแร่ที่สะอาดและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดีที่สุด คือการล้างและแยกผงถ่านหินด้วยฟองอากาศขนาดเล็กที่เกิดจากการใช้หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน ซึ่งช่วยให้มีปริมาณถ่านหินมากที่สุด และยังสามารถลดมลทินและเพิ่มค่าคาร์บอนคงที่ได้ดีที่สุด



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของตัวกำเนิดฟองอากาศ กับปริมาณสารระเหย (Volatile Matter)



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของตัวกำเนิดฟองอากาศ กับปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon)

#### 4.4.4 การศึกษาผลของความดันและความสูงของแผ่นกั้น ต่อการล้างและแยกผงถ่านหิน

จากการทดลองที่ 4.4.3 พบว่าการใช้หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน สามารถล้างและแยกผงถ่านหินให้ลอยขึ้นสู่อากาศได้มากที่สุด ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการปรับความดันในถังที่เงื่อนไขต่างๆ เพื่อศึกษาผลของความดันที่มีต่อการล้างและแยกถ่านหิน เนื่องจากการเพิ่มความดันช่วยให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กและสามารถเพิ่มปริมาณของฟองอากาศในระบบ โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.5

**ตารางที่ 4.5** รายละเอียดและเงื่อนไขการทดลองล้างและแยกผงถ่านหิน เมื่อปรับความดันในถังและความสูงของแผ่นกั้น

รายละเอียดตัวแปร	เงื่อนไขและขนาด
รูปแบบตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก	หัวฉีดแบบอ็ีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน
ปริมาณน้ำในคอลัมน์	22.5 litre
ความสูงแผ่นกั้น	35 cm และ 50 cm
อัตราการไหลของน้ำ	20 litre/min
อัตราการไหลของอากาศ	0.7 litre/min
ความดันของน้ำในถัง	3, 4, 5 และ 6 bar
ขนาดถ่านหิน	<212 $\mu$ m
ปริมาณถ่านหิน	1 kg
ปริมาณน้ำสำหรับปรับสภาพ	2 litre
ปริมาณสารเคลือบผิวแร่ (น้ำมันดีเซล)	30 g (8 kg/tons of coal)
ปริมาณสารเคลือบฟอง (น้ำมันสน)	18 g (0.15 kg/tons of coal)
ความเร็วใบพัดสำหรับปรับสภาพ	620 rpm
เวลาที่ใช้ในการเตรียมสภาพผิวแร่	3 min

ผลการทดลองล้างและแยกผงถ่านหิน โดยกำหนดความสูงของแผ่นกั้น 35 cm พบว่า ฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอนที่สร้างจากหัวฉีดแบบอู๋เจ็คเตอร์และใช้คู่กับถังความดัน เพื่อเพิ่มปริมาณฟองอากาศในระบบให้มากขึ้น นอกจากนี้ในการทดลองยังเติมสารเคลือบฟอง (น้ำมันสน) เพื่อให้ฟองอากาศขนาดเล็กมีความเหนียวและเพิ่มความเสถียรให้กับฟอง จากนั้นนำถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคลือบผิวแร่ (น้ำมันดีเซล) ป้อนลงในน้ำที่มีฟองอากาศขนาดเล็ก กำหนดให้ตำแหน่งปากทางออกของของผสมอยู่ต่ำกว่าระดับผิวน้ำ 40 cm โดยหลังจากป้อนของผสมลงไปใ้ในคอลัมน์ และเกิดกระบวนการล้างและแยกผงถ่านหินด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก สังเกตได้ว่าบับผิวน้ำมีถ่านหินลอยอยู่ที่หัวคอลัมน์ในทุกกรณี เนื่องจากฟองอากาศขนาดเล็กสามารถจับกับผงถ่านหินและพองให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 จากนั้นนำถ่านหินส่วนที่ลอยหรือหัวแร่ไปอบแห้งและชั่งน้ำหนัก พบว่าเมื่อปรับความดันภายในถังอัดให้เพิ่มขึ้นจาก 3 ถึง 6 bar ทำให้ปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กมีมากขึ้น จึงมีส่วนช่วยให้ผงถ่านหินสามารถเกาะกับฟองอากาศได้มากขึ้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นหลังจากผ่านกระบวนการล้างและแยกผงถ่านหินแล้ว ทำให้ปริมาณถ่านหินที่ลอยหรือหัวแร่มากขึ้น คือ 248.4 g, 259.2 g, 288.9 g และ 294.3 g ตามลำดับ โดยที่ความดันภายในถังอัดเท่ากับ 6 bar สามารถทำให้ผงถ่านหินลอยได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความดันค่าอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.21



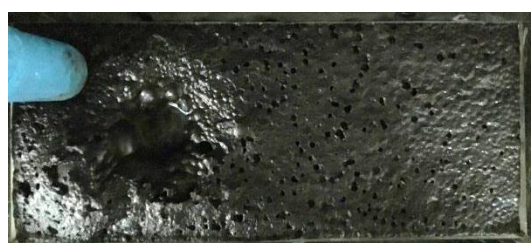
(ก) ความดัน 3 bar



(ข) ความดัน 4 bar



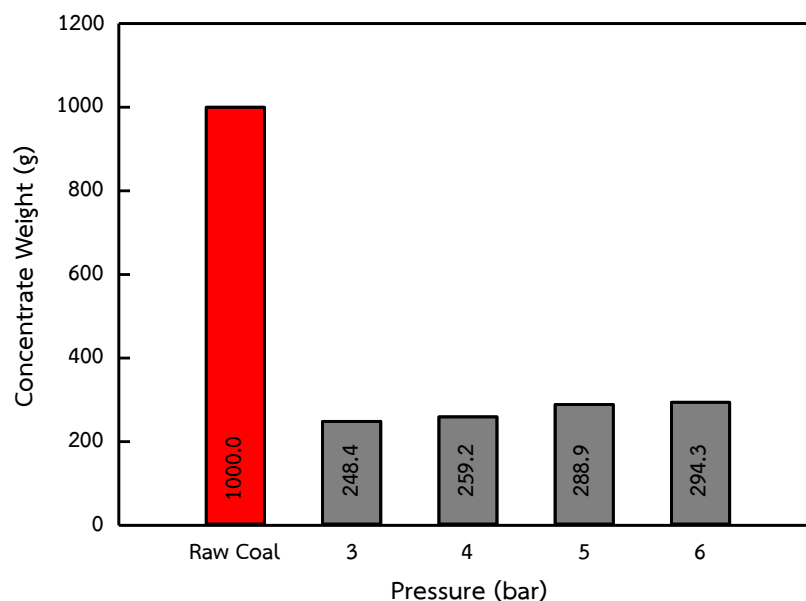
(ค) ความดัน 5 bar



(ง) ความดัน 6 bar

รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบลักษณะการลอยของถ่านหินที่ความดัน 3-6 bar ความสูงแผ่นกั้น 35 cm





รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาณหัวแร่ที่เก็บได้ โดยความสูงแผ่นกั้น 35 cm

นอกจากนี้เปรียบเทียบลักษณะการลอยของถ่านหิน โดยการปรับความสูงของแผ่นกั้น เนื่องจากการทดลองได้ติดตั้งแผ่นกั้นไว้ตรงกลางคอลัมน์ เพื่อให้เกิดการไหลวนของของไหล ได้แก่ น้ำ และถ่านหิน ช่วยเพิ่มโอกาสให้ฟองอากาศขนาดเล็กจับกับถ่านหินได้มากขึ้น โดยเพิ่มความสูงของแผ่นกั้นจากเดิม 35 cm เป็น 50 cm

ผลการทดลองล้างและแยกผงถ่านหิน โดยความสูงของแผ่นกั้น 50 cm จากรูปที่ 4.22 สังเกตได้ว่าฟองอากาศขนาดเล็กสามารถจับกับผงถ่านหินและพยุงให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ทุกกรณี เช่นเดียวกัน จากนั้นนำผงถ่านหินที่ลอยหรือหัวแร่ไปอบแห้งและชั่งน้ำหนัก เปรียบเทียบปริมาณถ่านหินที่ได้หลังผ่านกระบวนการล้างและแยกผงถ่านหิน ในกรณีที่เงื่อนไขของการเพิ่มความดันในถังอัดให้สูงขึ้นจาก 3 bar ถึง 6 bar พบว่าเมื่อความดันในถังเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ฟองอากาศขนาดเล็กมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นฟองอากาศขนาดเล็กจึงมีโอกาสจับกับผงถ่านหินได้สูงขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งหลังจากผ่านกระบวนการล้างและแยกผงถ่านหินแล้ว พบว่าปริมาณถ่านหินที่ลอยหรือหัวแร่มากขึ้น คือ 350.8 g, 378.1 g, 402.9 g และ 419.3 g ตามลำดับ โดยที่ความดันภายในถังอัดเท่ากับ 6 bar สามารถทำให้ผงถ่านหินลอยได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความดันค่าอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.23



(ก) ความดัน 3 bar



(ข) ความดัน 4 bar

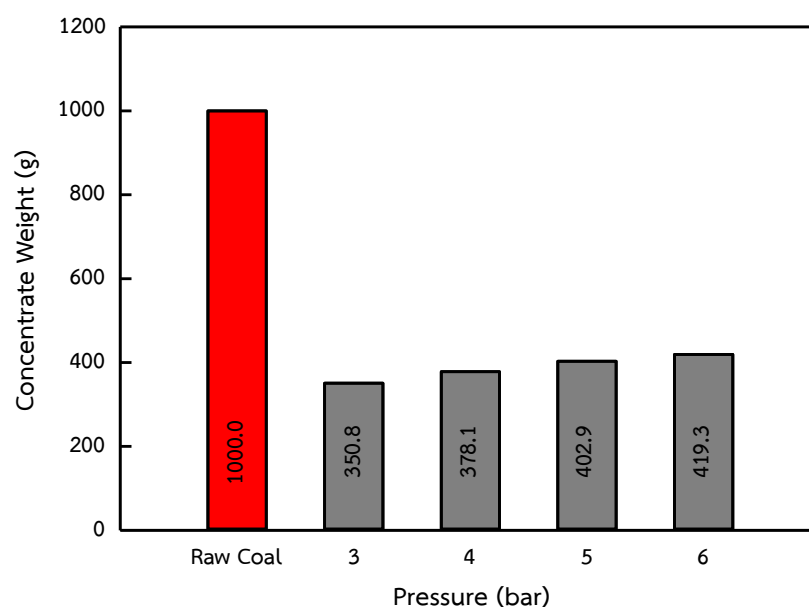


(ค) ความดัน 5 bar



(ง) ความดัน 6 bar

รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบลักษณะการลอยของถ่านหินที่ความดัน 3-6 bar ความสูงแผ่นกั้น 50 cm

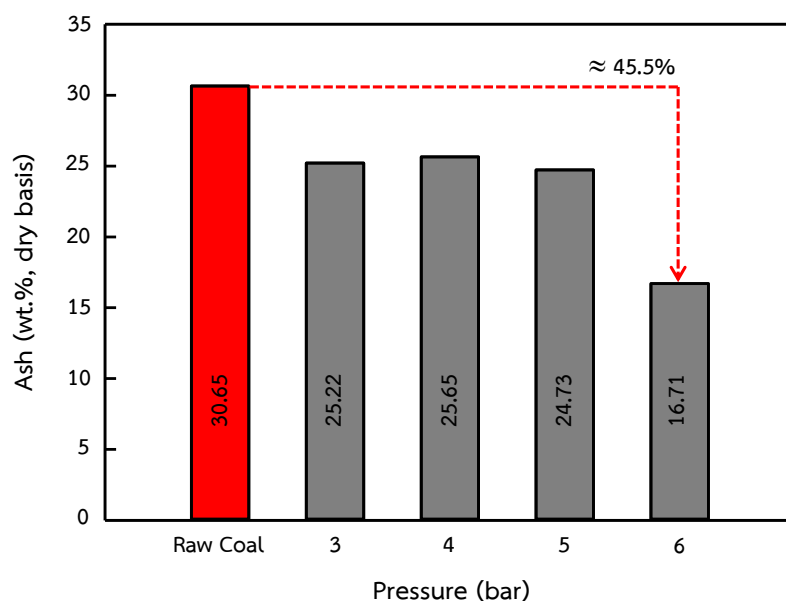


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาณหัวแร่ที่เก็บได้ โดยความสูงแผ่นกั้น 50 cm

อธิบายโดยภาพรวมได้ว่าความสูงของแผ่นกั้นที่ติดไว้ตรงกลางคอลัมน์ลอยแรมมีจุดประสงค์เพื่อให้ฟองอากาศขนาดเล็กสามารถเกาะติดกับผนังท่อ ช่วยแยกสิ่งสกปรกหรือมลทินที่ไม่ต้องการออกจากถ่านหินได้ จากนั้นฟองอากาศขนาดเล็กช่วยพยุงผนังท่อให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำกลายเป็นหัวแร่หรือถ่านหินที่ลอย (Concentrate) ส่วนฟองอากาศขนาดเล็กและถ่านหินบางส่วนจะไหลวนกลับมาอีกฝั่งของช่องการไหลภายในคอลัมน์ และเกิดกระบวนการล้างและแยกผนังท่ออีกครั้ง อย่างไรก็ตามมีหัวแร่ที่ลอยอยู่บนผิวน้ำบางส่วนจะถูกกระแสน้ำและฟองอากาศพาให้ไหลวนกลับมาด้านล่าง ซึ่งส่งผลให้หัวแร่ที่ได้มีปริมาณลดลง ดังนั้นจากการทดลองเปรียบเทียบการใช้แผ่นกั้นสูง 35 cm และ 50 cm พบว่าปริมาณหัวแร่ที่ได้เมื่อผ่านกระบวนการล้างและแยกผนังท่อ โดยมีความสูงของแผ่นกั้นเท่ากับ 50 cm ฟองอากาศขนาดเล็กสามารถจับกับผนังท่อและพยุงให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับกรณีการใช้แผ่นกั้นที่มีความสูง 35 cm ส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบในถ่านหินหลังจากการล้าง โดยนำหัวแร่ที่ได้จากการทดลองล้างและแยกผนังท่อ ซึ่งมีเงื่อนไขการใช้แผ่นกั้นกลางสูง 50 cm ไปวิเคราะห์หาส่วนประกอบดังกล่าว เนื่องจากสามารถได้ปริมาณหัวแร่ที่มากกว่าการใช้แผ่นกั้นกลางสูง 35 cm

นอกจากนี้เปรียบเทียบกรณีการเพิ่มความดันภายในถังอัดความดัน โดยหลังจากการล้างและแยกถ่านหินด้วยฟองอากาศขนาดเล็กที่สร้างจากหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน พบว่าเมื่อความดันในระบบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของฟองอากาศขนาดเล็กมีค่ามากขึ้น ซึ่งมีสีหรือลักษณะขุ่นคล้ายกับฟองน้ำนม แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของปริมาณฟองอากาศขนาดเล็ก ดังนั้นโอกาสที่ฟองอากาศขนาดเล็กจะจับกับผนังท่อมีมากขึ้นเช่นกัน อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณขี้เถ้าหรือสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการออกจากถ่านหินได้อีกด้วย

จากรูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาณขี้เถ้า (Ash) สังเกตได้ว่าเมื่อความดันมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณขี้เถ้าในถ่านหินมีค่าลดลง ซึ่งจากเดิมมีปริมาณขี้เถ้าอยู่ที่ 30.65 wt.% db หลังจากผ่านกระบวนการล้างและแยกผนังท่อด้วยฟองอากาศขนาดเล็กที่สร้างจากหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน โดยเมื่อเพิ่มความดันภายในถังอัดความดันตั้งแต่ 3 bar ถึง 6 bar สังเกตได้ว่าปริมาณขี้เถ้าในถ่านหินมีค่าลดลง ได้แก่ 25.22 wt.% db, 25.65 wt.% db, 24.73 wt.% db และ 16.71 wt.% db ตามลำดับ หรือปริมาณขี้เถ้าลดลงจากก่อนการล้างสูงถึง 45.5% อธิบายได้ว่าเมื่อฟองอากาศขนาดเล็กมีปริมาณมากขึ้น แปรผันตรงตามการเพิ่มขึ้นของความดัน ส่งผลให้ความสามารถในการแยกสิ่งสกปรกหรือมลทินออกจากผนังท่อมีมากขึ้น รวมทั้งฟองอากาศขนาดเล็กยังสามารถช่วยพยุงผนังท่อให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้มากขึ้นเช่นเดียวกัน

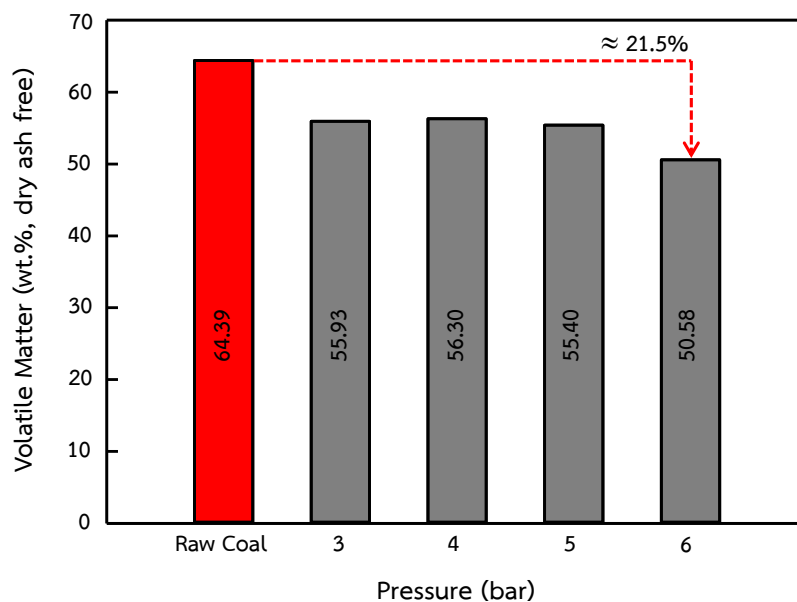


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาณขี้เถ้า (Ash)

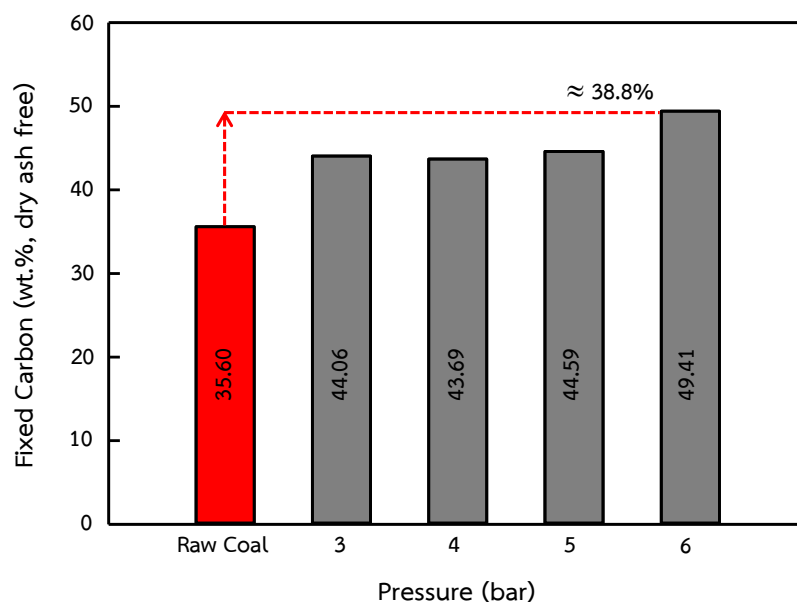
สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) โดยก่อนการล้างมีปริมาณสารระเหยอยู่ในถ่านหิน 64.39 wt.% daf ดังแสดงในรูปที่ 4.25 หลังจากผ่านกระบวนการล้างและแยกผงถ่านหิน โดยใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดันสำหรับสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก และปรับความดันที่ค่าต่างๆ พบว่าเมื่อเพิ่มความดันภายในถังอัดความดันให้สูงขึ้น จาก 3 bar ถึง 6 bar ส่งผลให้ปริมาณสารระเหยในถ่านหินมีค่าลดลงและใกล้เคียงกันในทุกกรณี ดังนี้ 55.93 wt.% daf, 56.30 wt.% daf, 55.40 wt.% daf และ 50.58 wt.% daf ตามลำดับ หรือลดลงจากเดิม 21.5% ใดๆก็ตามผลการทดลองมีความสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณขี้เถ้า โดยที่ฟองอากาศขนาดเล็กสามารถกำจัดหรือลดสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการในถ่านหินออกได้ ซึ่งสารระเหยจัดเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ถูกแยกออกจากผงถ่านหินด้วยฟองอากาศขนาดเล็กเช่นเดียวกัน

สำหรับผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) ที่อยู่ในถ่านหิน ก่อนกระบวนการล้างและแยกผงถ่านหิน มีปริมาณคาร์บอนคงที่ 35.60 wt.% daf ซึ่งหลังจากการล้างและแยกผงถ่านหินด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก พบว่าเมื่อความดันภายในถังอัดความดันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนคงที่มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตได้ว่าที่ความดัน 6 bar ปริมาณคาร์บอนคงที่มีค่ามากที่สุด คือ 49.41 wt.% daf หรือเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 38.8% และสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณขี้เถ้าและสารระเหย สามารถอธิบายได้ว่าความดันที่มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น ทำให้โอกาสที่ฟองอากาศขนาดเล็กสามารถเกาะกับผงถ่านหินและแยกสิ่งสกปรกออกไปได้มากขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้ถ่านหินที่ผ่านการล้างและแยกด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก

มีปริมาณคาร์บอนคงที่ที่เพิ่มขึ้น ส่วนความดันค่าอื่นๆ ปริมาณคาร์บอนคงที่ในถ่านหินก็มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งในกรณีที่ความดันตั้งแต่ 3 bar ถึง 5 bar มีปริมาณคาร์บอนคงที่ใกล้เคียงกัน คือ 44.06 wt.% daf, 43.69 wt.% daf และ 44.59 wt.% daf ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาณสารระเหย (Volatile Matter)



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon)

#### 4.4.5 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหิน

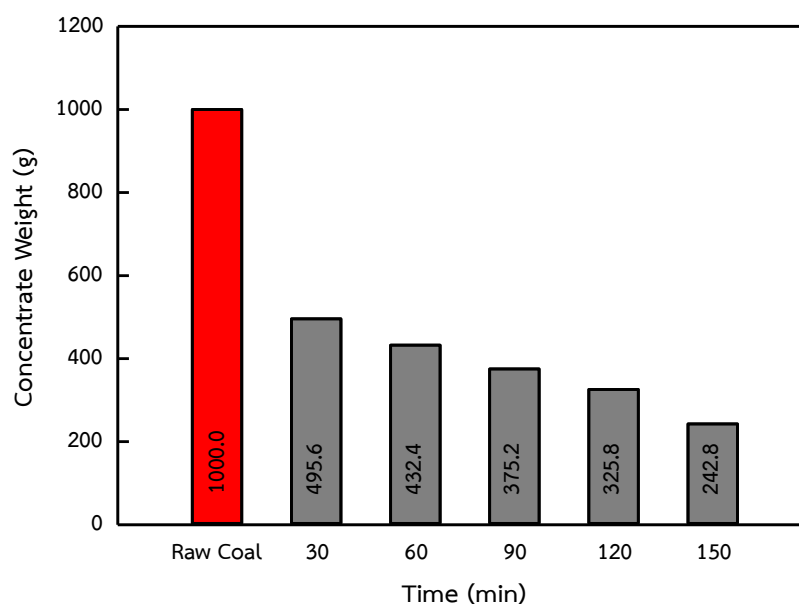
สำหรับในการทดลองนี้ได้ศึกษาผลของระยะเวลาที่มีต่อการล้างและแยกผงถ่านหิน โดยเพิ่มเงื่อนไขของระยะเวลาที่ใช้สำหรับล่อยแร่ ได้แก่ 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที, 120 นาที และ 150 นาที โดยใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดันสำหรับสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก และกำหนดให้ความดันในถังความดันมีค่าคงที่เท่ากับ 6 bar เนื่องจากที่เงื่อนไขดังกล่าวฟองอากาศขนาดเล็กสามารถจับกับผงถ่านหิน และสามารถพองให้ลอยขึ้นสู่อากาศ ทำให้ได้หัวแร่มากที่สุด ส่วนรายละเอียดอื่นๆ ที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.6

**ตารางที่ 4.6** รายละเอียดและเงื่อนไขการทดลองล้างและแยกผงถ่านหิน ที่ระยะเวลาการล้างแตกต่างกัน

รายละเอียดตัวแปร	เงื่อนไขและขนาด
รูปแบบตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก	หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน
ปริมาณน้ำในคอลัมน์	22.5 litre
ความสูงแผ่นกั้น	50 cm
อัตราการไหลของน้ำ	20 litre/min
อัตราการไหลของอากาศ	0.7 litre/min
ความดันของน้ำในถัง	6 bar
ขนาดถ่านหิน	<212 $\mu\text{m}$
ปริมาณถ่านหิน	1 kg
ปริมาณน้ำสำหรับปรับสภาพ	2 litre
ปริมาณสารเคลือบผิวแร่ (น้ำมันดีเซล)	30 g (8 kg/tons of coal)
ปริมาณสารเคลือบฟอง (น้ำมันสน)	18 g (0.15 kg/tons of coal)
ความเร็วใบพัดสำหรับปรับสภาพ	620 rpm
เวลาที่ใช้ในการเตรียมสภาพผิวแร่	3 min
เวลาที่ใช้ในการล้างถ่านหิน	30, 60, 90, 120 และ 150 min

สำหรับขั้นตอนในการทดลอง โดยเริ่มจับเวลาตั้งแต่ป้อนถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพเข้าสู่คอลัมน์ จากนั้นจึงปล่อยให้ฟองอากาศขนาดเล็กจับกับผงถ่านหินและลอยขึ้นสู่อากาศ เกิดกระบวนการล้างและแยกผงถ่านหิน ต่อมาเมื่อครบเวลาตามที่เงื่อนไขกำหนดจะกวาดถ่านหินที่ลอยหรือหัวแร่ใส่ภาชนะ นำไปอบแห้งและชั่งน้ำหนัก เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาในการล้างและแยกถ่านหินต่อไป

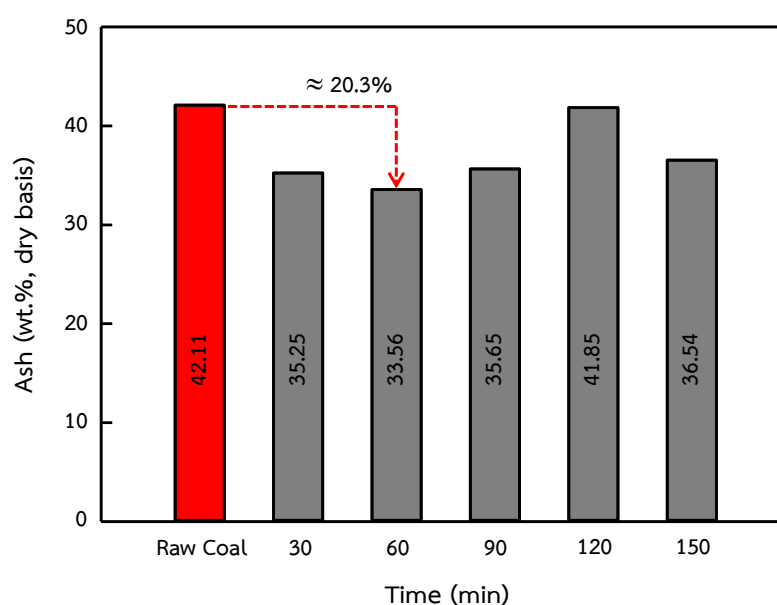
รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหินกับปริมาณหัวแร่ที่เก็บได้ พบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณหัวแร่ที่เก็บได้มีค่าลดลง กล่าวคือ เมื่อป้อนของผสมลงในคอลัมน์ลอยแร่ จากนั้นฟองอากาศขนาดเล็กสามารถจับกับผงถ่านหินและพองให้ลอยขึ้นสู่น้ำ หลังจากครบเวลาที่กำหนด ได้แก่ 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที, 120 นาที และ 150 นาที พบว่าปริมาณถ่านหินที่ลอยขึ้นบนผิวน้ำมีแนวโน้มลดลง โดยที่เวลาในการล้าง 30 นาที ได้ปริมาณหัวแร่ที่มากที่สุด คือ 495.6 g ส่วนเวลาในการล้างถ่านหินที่เพิ่มขึ้นจาก 60 นาที ถึง 150 นาที ปริมาณหัวแร่หรือถ่านหินที่ลอยมีค่าลดลง ได้แก่ 432.4 g, 375.2 g, 325.8 g และ 242.8 g ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของการไหล โดยน้ำและฟองอากาศจะทำให้ถ่านหินที่ลอยอยู่บนผิวน้ำเกิดการไหลวนกลับลงด้านล่างของคอลัมน์ ในขณะที่เวลาในการล้างถ่านหินที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ถ่านหินที่ลอยอยู่บนผิวน้ำมีโอกาสที่จมลงด้านล่างมากขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหินกับปริมาณหัวแร่ที่เก็บได้

จากนั้นนำถ่านหินที่ลอยหรือหัวแร่ไปวิเคราะห์หาปริมาณส่วนประกอบที่เหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการล้างและแยกผงถ่านหินด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก ประกอบด้วยปริมาณขี้เถ้า (Ash), ปริมาณซัลเฟอร์ (Sulfur), ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter), ปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) และค่าความร้อน (Gross Calorific Value) ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.28-4.32

จากรูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหินกับปริมาณขี้เถ้า (Ash) สำหรับผลการวิเคราะห์ปริมาณขี้เถ้าที่อยู่ในถ่านหิน โดยก่อนล้างถ่านหินมีปริมาณขี้เถ้า 42.11 wt.% db ส่วนหลังจากการล้างและแยกผงถ่านหินด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก พบว่าปริมาณขี้เถ้ามีค่าลดลงในทุกกรณี จากรูปสังเกตได้ว่าระยะเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหินด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที, 120 นาที และ 150 นาที ปริมาณขี้เถ้าในถ่านหินมีค่าลดลงเหลือ 35.25 wt.% db, 33.56 wt.% db, 35.65 wt.% db, 41.85 wt.% db และ 36.54 wt.% db ตามลำดับ หรือลดลงจากเดิมประมาณ 20.3% อธิบายได้ว่าเมื่อฟองอากาศขนาดเล็กจับกับผงถ่านหิน จากนั้นช่วยพองผงถ่านหินให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ในขณะที่สิ่งเจือปนหรือมลทินที่ไม่ต้องการจะแยกตัวออกและจมลงสู่ด้านล่างของคอลัมน์ ทำให้หัวแร่ที่ได้มีความสะอาดมากขึ้น

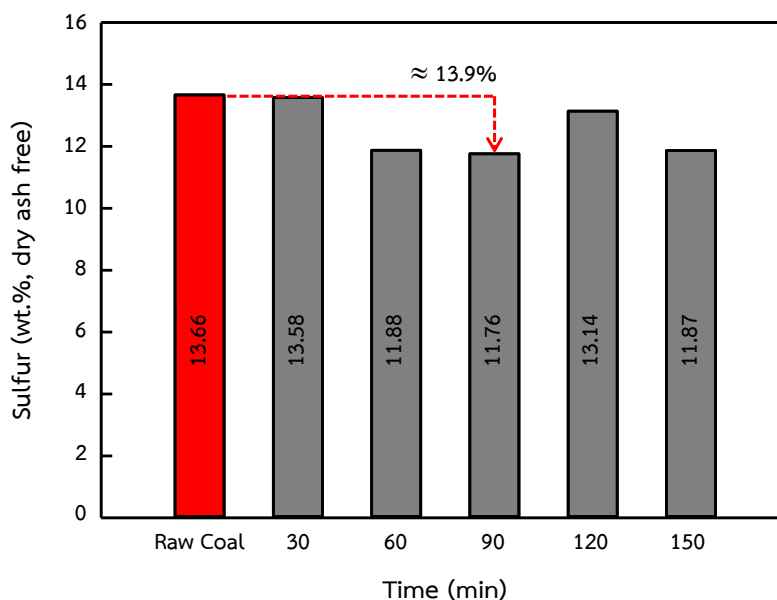


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหินกับปริมาณขี้เถ้า (Ash)

จากรูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหินกับปริมาณซัลเฟอร์ (Sulfur) โดยก่อนการล้างถ่านหินมีปริมาณซัลเฟอร์ 13.66 wt.% daf และหลังจากผ่านกระบวนการล้างและแยกถ่านหินด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก พบว่าปริมาณซัลเฟอร์มีค่าลดลงในทุกกรณีและมีค่าที่ใกล้เคียงกัน กล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ซัลเฟอร์อาจอยู่ในรูปของสารประกอบที่ฝังอยู่ในเนื้อของถ่านหิน ทำให้ฟองอากาศขนาดเล็กสามารถแยกซัลเฟอร์ออกจากถ่านหินได้น้อย ซึ่งจากรูปสังเกตได้ว่าระยะเวลาในการล้างและแยกถ่านหิน 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที, 120 นาที และ



150 นาที ทำให้มีปริมาณซัลเฟอร์ลดลงเป็น 13.58 wt.% daf, 11.88 wt.% daf, 11.76 wt.% daf, 13.14 wt.% daf และ 11.87 wt.% daf ตามลำดับ หรือลดลงจากเดิมประมาณ 13.9%

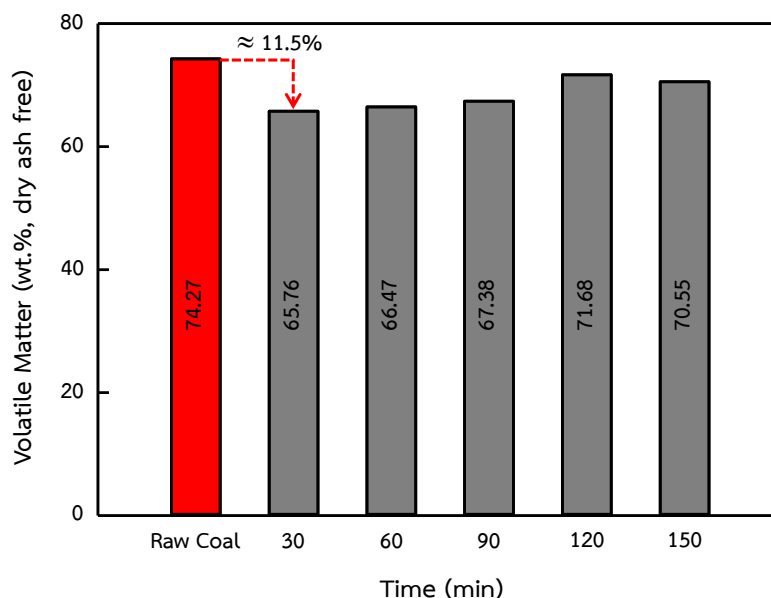


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหินกับปริมาณซัลเฟอร์ (Sulfur)

จากรูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหินกับปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) ซึ่งมีปริมาณสารระเหยก่อนการล้าง 74.27 wt.% daf และหลังจากผ่านกระบวนการล้างและแยกผงถ่านหินด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก พบว่าปริมาณสารระเหยมีค่าลดลงในทุกกรณีและมีค่าที่ใกล้เคียงกัน จากรูปสังเกตได้ว่าระยะเวลาในการล้างและแยกถ่านหิน 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที, 120 นาที และ 150 นาที มีผลทำให้ปริมาณสารระเหยในถ่านหินลดลงจากเดิมเป็น 65.76 wt.% daf, 66.47 wt.% daf, 67.38 wt.% daf, 71.68 wt.% daf และ 70.55 wt.% daf ตามลำดับ หรือลดลงจากก่อนการล้างประมาณ 11.5%

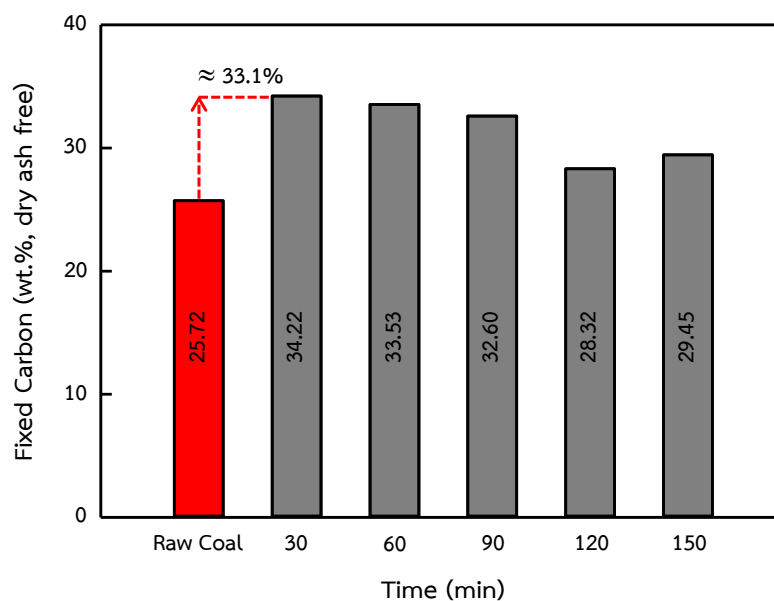
สำหรับผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) ที่อยู่ในถ่านหิน ซึ่งก่อนล้างถ่านหินมีปริมาณคาร์บอนคงที่ 25.72 wt.% daf โดยหลังจากการล้างและแยกด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก พบว่าปริมาณคาร์บอนคงที่มีค่าเพิ่มขึ้นในทุกกรณี จากรูปสังเกตได้ว่าระยะเวลาในการล้างและแยกผงถ่านหินที่ 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที, 120 นาที และ 150 นาที มีผลทำให้ปริมาณคาร์บอนคงที่ในถ่านหินมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 34.22 wt.% daf, 33.53 wt.% daf, 32.60 wt.% daf, 28.32 wt.% daf และ 29.45 wt.% daf ตามลำดับ หรือเพิ่มขึ้นจากก่อนการล้างประมาณ 33.1% ดังรูปที่ 4.31 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหินกับปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) แสดงให้เห็นว่าเมื่อถ่านหินถูกล้างและแยกด้วยฟองอากาศ

ขนาดเล็ก สามารถลดสิ่งสกปรกหรือกำจัดมลทินและส่งผลให้ถ่านมีปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

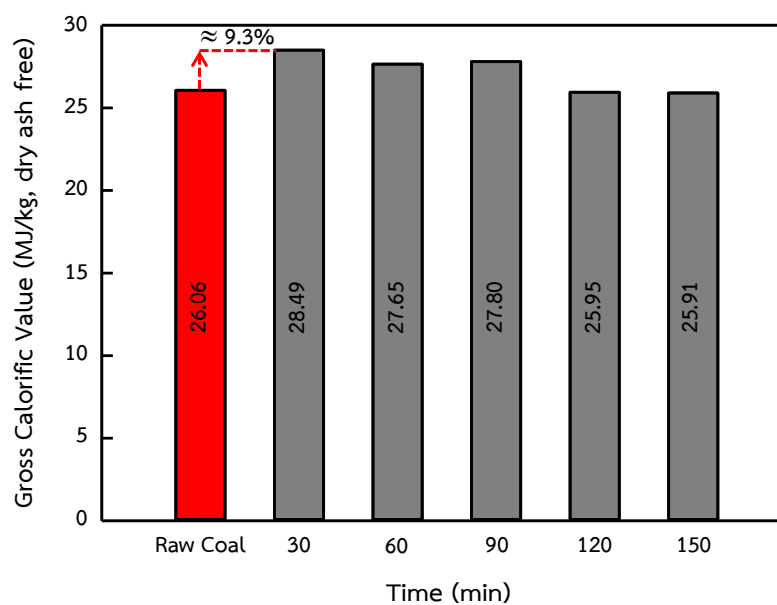


รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหินกับปริมาณสารระเหย (Volatile Matter)

อย่างไรก็ตามการล้างและแยกผงถ่านหินด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก นอกจากมีส่วนช่วยในการเพิ่มปริมาณคาร์บอนคงที่แล้ว ยังส่งผลต่อปริมาณค่าความร้อน (Gross Calorific Value) ในถ่านหินที่เพิ่มขึ้นด้วย จากรูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหินกับปริมาณค่าความร้อน (Gross Calorific Value) อธิบายได้ว่าเมื่อปริมาณคาร์บอนคงที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความร้อนในถ่านหินเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน โดยมีปริมาณความร้อนในถ่านหินก่อนการล้าง 26.06 MJ/kg daf หลังจากผ่านกระบวนการล้างที่เวลา 30 นาที ถึง 150 นาที มีผลทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้นเป็น 28.49 MJ/kg daf, 27.65 MJ/kg daf, 27.80 MJ/kg daf, 25.95 MJ/kg daf และ 25.91 MJ/kg daf ตามลำดับ หรือเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 9.3% อธิบายได้ว่าฟองอากาศขนาดเล็กสามารถล้างและแยกสิ่งเจือปนออกจากถ่านหินได้ ทำให้ถ่านหินมีความสะอาดและช่วยเพิ่มปริมาณความร้อนในถ่านหินให้มากขึ้น



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหิน กับปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon)



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหิน กับปริมาณค่าความร้อน (Gross Calorific Value)

สรุปโดยภาพรวมได้ว่าระยะเวลาใช้ในการล้างและแยกผงถ่านหินที่เพิ่มขึ้น ทำให้ฟองอากาศขนาดเล็กสามารถจับกับผงถ่านหินได้นานขึ้น และยังช่วยกำจัดหรือลดมลทินในถ่านหิน ทำให้ถ่านหินที่ลอยหรือหัวแร่มีความสะอาดมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้หลังจากการวิเคราะห์องค์ประกอบที่มีอยู่ในถ่านหิน พบว่าปริมาณซีเถ้า ปริมาณซัลเฟอร์ และปริมาณสารระเหยมีค่าลดลง ในขณะที่คาร์บอนคงที่และค่าความร้อนในถ่านหินมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการล้างและแยกผงถ่านหิน มีข้อด้อยอยู่ที่หัวแร่หรือแร่ที่ลอยมีปริมาณที่ลดลง ดังนั้นในการพิจารณาถึงผลการทดลอง จำเป็นต้องนำข้อมูลของปริมาณหัวแร่ที่เก็บได้รวมทั้งการกำจัดสิ่งสกปรกมาเปรียบเทียบทั้งในแง่ของการลดลงและเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบที่มีอยู่ในถ่านหินดังที่กล่าวมาแล้ว เพื่อให้สอดคล้องกับการนำถ่านหินนำไปใช้ประโยชน์ได้ดีที่สุด

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการล้างและแยกผงถ่านหินในคอลัมน์ลอยแร่ โดยใช้ฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอนเป็นตัวจับกับผงถ่านหิน โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือขนาดและลักษณะของฟองอากาศที่ได้จากตัวกำเนิดฟองรูปแบบต่างๆ ได้แก่ วัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน, หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ และการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน รวมทั้งความสูงของแผ่นกั้นและระยะเวลาที่มีผลต่อการล้างและแยกผงถ่านหิน นอกจากนี้ศึกษาลักษณะการไหลของของไหลในคอลัมน์ลอยแร่ โดยเปรียบเทียบผลระหว่างการถ่ายภาพและวิเคราะห์ภาพอนุภาคแบบ Particle Image Velocimetry (PIV) และการจำลองการไหลด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ ดังนี้

(1) ขนาดของหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า ( $D$ ) และเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด ( $d_c$ ) มีผลต่อพลังงานจลน์ความปั่นป่วนและความเค้นเฉือน รวมทั้งเส้นทางการไหลที่เกิดขึ้นภายในหัวฉีด ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 3 mm ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างกะทันหัน ส่งผลให้เกิดการเฉือนและพลังงานมากที่สุด เมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดที่ใหญ่กว่า

(2) ขนาดของฟองอากาศที่เกิดจากการอัดอากาศผ่านวัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน พบว่าฟองอากาศมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ในการสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองอากาศจากหัวทรายแบบจานและหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ประมาณ 385  $\mu\text{m}$  และ 85  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ

(3) การใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน เมื่อเพิ่มความดันอากาศให้มากขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กในระบบเพิ่มขึ้นด้วย โดยน้ำมีลักษณะขุ่นคล้ายฟองน้ำนม เนื่องจากอากาศที่ถูกดูดสามารถละลายในน้ำได้มากขึ้น ส่วนขนาดของฟองอากาศมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 38-40  $\mu\text{m}$  โดยที่ความดันอากาศในถังอัดเท่ากับ 6 bar

(4) การติดแผ่นกั้นกลางคอลัมน์สำหรับแบ่งช่องการไหล เพื่อให้ของไหลเกิดการไหลวน จากผลการศึกษาดังกล่าวโดยใช้การถ่ายภาพและวิเคราะห์ภาพอนุภาคแบบ Particle Image Velocimetry (PIV) พบว่ามีของไหลบางส่วนที่ยังสามารถไหลวนอยู่ในคอลัมน์ได้ ซึ่งสอดคล้องกับการจำลองการไหลด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล นอกจากนี้ความสูงของแผ่นกั้น 50 cm ช่วยให้ของไหลไหลได้ทั่วทั้งคอลัมน์มากกว่าแผ่นกั้น 35 cm เนื่องจากของไหลสามารถเคลื่อนที่ในช่องการไหลฝั่งเดียวกับทางเข้าได้นานกว่า ก่อนการวนกลับมาอีกฝั่งของช่องการไหล

(5) ในการทดลองล้างและแยกผงถ่านหินด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก จำเป็นต้องมีการปรับสภาพของผิวถ่านหินและสภาพของฟองอากาศ โดยการเติมสารเคมี ได้แก่ น้ำมันดีเซลและน้ำมันสน เนื่องจากผิวถ่านหินมีคุณสมบัติทางกายภาพ คือ ไม่เปียกน้ำหรือความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จึงไม่สามารถเกาะติดกับฟองอากาศได้ นอกจากนี้การเติมน้ำมันสนเพื่อปรับสภาพผิวของฟอง ช่วยให้ฟองอากาศมีความเสถียรและเหนียวมากยิ่งขึ้น ทำให้ฟองอากาศสามารถจับกับผงถ่านหินได้ดีขึ้น

(6) ตัวกำเนิดฟองอากาศทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ วัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน, หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ และการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน สามารถสร้างฟองอากาศให้มีขนาดและปริมาณที่แตกต่างกัน แต่มีข้อดี-ข้อด้อยอยู่ที่ปริมาณของหัวแร่ที่เก็บได้ ซึ่งการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน มีผลทำให้หัวแร่ที่ได้มีปริมาณมากที่สุด รองลงมาคือ ฟองอากาศจากหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์และวัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน ตามลำดับ

(7) สำหรับการกระจายขนาดของถ่านหิน พบว่าฟองอากาศขนาดเล็กที่ได้จากการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน สามารถจับกับผงถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า  $150 \mu\text{m}$  ได้มากถึงร้อยละ 93.1 ของปริมาณถ่านหินทั้งหมด นอกจากนี้ฟองอากาศขนาดเล็ก ยังช่วยกำจัดสิ่งสกปรกออกจากถ่านหินได้ โดยพบว่าสามารถลดปริมาณซัลเฟอร์และสารระเหยในถ่านหินลงได้ประมาณ 20.5% และ 14.4% ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันช่วยให้ปริมาณคาร์บอนคงที่ในถ่านหินมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 26.0%

(8) ที่ความสูงของแผ่นกั้น 50 cm ฟองอากาศขนาดเล็กสามารถจับกับผงถ่านหินได้นานและเป็นระยะทางที่สูงกว่าแผ่นกั้น 35 cm ก่อนที่ฟองอากาศขนาดเล็กและถ่านหินจะเคลื่อนที่ไหลวนกลับมาอีกฝั่งของช่องการไหล สังเกตได้จากปริมาณหัวแร่ที่เก็บได้หลังจากการล้าง ซึ่งหัวแร่ที่ผ่านการล้างโดยติดตั้งแผ่นกั้น 50 cm มีปริมาณมากกว่าการล้างและแยกโดยมีแผ่นกั้นกลางสูง 35 cm

(9) เนื่องจากการเพิ่มความดันในถังอัดส่งผลให้ปริมาณฟองอากาศในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นการทดลองล้างและแยกถ่านหินโดยเพิ่มความดันมากขึ้น ทำให้หัวแร่ที่ได้มีปริมาณ โดยที่ความดัน 6 bar สามารถเกิดฟองอากาศขนาดเล็กในระบบมากที่สุด ทำให้โอกาสที่ฟองอากาศจับกับผงถ่านหินมีมากขึ้น ดังนั้นจึงมีส่วนทำให้หัวแร่ที่ได้มีปริมาณมากขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ฟองอากาศขนาดเล็ก ยังช่วยกำจัดสิ่งสกปรกออกจากถ่านหินได้ โดยพบว่าสามารถลดปริมาณซัลเฟอร์และ ปริมาณสารระเหยในถ่านหินลงได้ประมาณ 45.5% และ 21.5% ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันช่วยให้ปริมาณคาร์บอนคงที่ในถ่านหินมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 38.8%

(10) สำหรับระยะเวลาในการล้างและแยกผงถ่านหินโดยใช้ฟองอากาศขนาดเล็ก พบว่าเมื่อระยะเวลาในการล้างและแยกผงถ่านหินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้หัวแร่ที่ได้มีปริมาณลดลง ในขณะที่ปริมาณองค์ประกอบมีอยู่ในถ่านหิน ได้แก่ ปริมาณซัลเฟอร์ ปริมาณซัลเฟอร์ และปริมาณสารระเหยมีค่า

ลดลงเช่นเดียวกัน คือ 20.3%, 13.9% และ 11.5% ตามลำดับ ในทางกลับกันระยะเวลาในการล้างและแยกผงถ่านหินเพิ่มขึ้น สามารถเพิ่มปริมาณคาร์บอนคงที่ให้เพิ่มขึ้นประมาณ 33.1% และค่าความร้อนในถ่านหินเพิ่มขึ้น 9.3%

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาล้างและแยกผงถ่านหินในคอลัมน์ โดยใช้ฟองอากาศขนาดเล็กรูได้จากหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ ซึ่งในการศึกษาขั้นตอนต่อไปอาจต้องปรับปรุงและเพิ่มเติมขอบเขตดังนี้

- (1) ศึกษากรณีความสูงของคอลัมน์ที่เพิ่มขึ้น ที่มีผลต่อการล้างและแยกผงถ่านหิน
- (2) ศึกษาผลการล้างและแยกถ่านหิน โดยปรับระยะห่างระหว่างปากทางออกของของผสมและทางเข้าของฟองอากาศขนาดเล็ก
- (3) ศึกษาผลของการเติมสารเคมีสำหรับปรับสภาพของถ่านหินและน้ำ
- (4) ทดสอบการล้างและแยกถ่านหิน โดยการเทียบระหว่างคอลัมน์ธรรมดาและคอลัมน์แบบวกกลับ
- (5) ศึกษาแนวทางสำหรับการนำหางแร่ (Tailing) หรือแร่จมนที่เหลือไปใช้ประโยชน์

## บรรณานุกรม

- [1] Bergh, L.G., Yianatos, J.B., 2003, Flotation column automation: state of the art, Control Engineering Practice, Vol. 11, pp. 67–72.
- [2] กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ. 2547ข. ออนไลน์
- [3] S. Kawatra., “Flotation Fundamentals.” Available: <http://www.chem.mtu.edu/>
- [4] yourKoishouse.On-line. Available from internet, <http://www.yourkoishouse.com>, accessed 16 September 2016.
- [5] PARKER INDUSTRIAL BOILER. On-line. Available from internet, <http://www.Parkerboiler.com>, accessed 16 September 2016.
- [6] NSTDA Blog. On-line. Available from internet, <http://www.nstda.or.th>, accessed 16 September 2016.
- [7] Ohari, H., Saga, T., Watanabe, K., Maeda, K., 1999, High functional characteristics of micro-bubble and water purification, Resources Processing, Vol.46 (4), pp. 238-244.
- [8] Terasaka, K., Hirabayashi, A., Nishino, T., Fujioka, S., Kobayashi, D., 2011, Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge. Chemical Engineering Science, Vol. 66, pp. 3172-3179.
- [9] Shen, M., Wheelock, T.D., 2000, Coal agglomeration with microbubbles, Coal preparation, Vol. 21, pp. 277-298.
- [10] Li, B., Tao, D., Ou, Z. and Liu, J., 2003, Cyclo-microbubble column flotation of fine coal, Separation science and technology, Vol. 38, pp. 1125-1140.
- [11] Tao, D., Yu, S., Zhou, X., Honaker, R.Q. and Parekh, B.K., 2008, Picobubble column flotation of fine coal, Int. J. of coal preparation and utilization, Vol. 28, pp. 1-14.
- [12] Han, O-H., Kim, M-K., Kim, B-G., Subasinghe, N., Park, C-H., 2014, Fine coal beneficiation by column flotation, Fuel Processing Technology, Vol. 126, pp. 49-59.
- [13] Jena, M.S., Biswal, S.K., Das, S.P., Reddy, P.S.R., 2008, Comparative study of the performance of conventional and column flotation when treating coking coal fines, Fuel Processing Technology, Vol. 89, pp. 1409-1415.



- [14] Sobhy, A., Tao, D., 2013, Nanobubble column flotation of fine coal particles and associated fundamentals, International Journal of Mineral Processing, Vol. 124, pp. 109-116.
- [15] Iwaki, C., Aoki, K., Komita, Y., 2010. Microbubble generating apparatus and method, United States Patent Application Publication No.2010/0258509A1
- [16] Ohnari, H. 2002. Swing fine-bubble generator, United States Patent No. 6382601B1
- [17] Ohnari, H. 2007. Swing type fine air bubble generating device, United States Patent No. 7261283B1
- [18] Ohnari, H. 2009. Swing type Micro-bubble generating System, United States Patent No. 7472893B2
- [19] Hato, Y., 2012, Micro-bubble generator and micro-bubble generation device, United States Patent No. 0126436A1
- [20] Mori, Y., 2013, Micro-bubble generator, United States Patent No. 0214436A1
- [21] Lai, R.W., 2000, Cross flow cyclonic flotation column for coal and minerals beneficiation, United States Patent No. 6056125
- [22] Khan, L., 2005, Flotation device and method of froth flotation, United States Patent No. 0242000A1
- [23] Yoon, R.H., 1992, Apparatus and process for the separation of hydrophobic and hydrophilic particles using microbubble column flotation together with a process and apparatus for generation of microbubbles, United States Patent No. 5167798
- [24] Liu, J., 2000, Cyclonic-static micro-bubble floatation apparatus and method, United States Patent No. 6073775
- [25] Rodrigues, M.A., 2016, Automated system of froth flotation columns with aerators injection nozzles and process thereof, United States Patent No. 0089679A1
- [26] แสงนวล ศรีรัตน์ชัชวาล และ อนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล, กระบวนการลอยตะกอนแบบอากาศละลาย, วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 27, ฉบับที่ 1, มกราคม-เมษายน 2560, หน้า 205-217

- [27] Arumugam, P., 2015, Understanding the Fundamental Mechanisms of a Dynamic Micro-bubble Generator for Water Processing and Cleaning Applications, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto.
- [28] Edzwald, J.K., 2007, Developments of high rate dissolved air flotation for drinking water treatment, *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, Vol. 56 (6-7), pp. 399-409.
- [29] Etchepare, R., Oliveira, H., Azevedo, A., Rubio, J., 2017, Separation of emulsified crude oil in saline water by dissolved air flotation with micro and nanobubbles, *Separation and Purification Technology*, Vol. 186, pp. 326-332.
- [30] Pourkarimi, Z., Rezai, B., Noaparast, M., 2017, Effective parameters on generation of nanobubbles by cavitation method for froth flotation applications, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, Vol. 53(2), pp. 920-942.
- [31] Menter, F.R., 1994, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol.32, No.8, pp. 269-289.
- [32] Jahanmiri, M., 2013, Particle Image Velocimetry: Fundamentals and Its Applications, Research report Department of Applied Mechanics.
- [33] กานต์ ศุภนิรันดร์ และ เมตตา เจริญพานิช, ผลของความชื้นที่มีผลต่อการเกิดลูกใหม่ได้เองของ ถ่านหินซับบิทูมินัส, *วิศวกรรมสาร มก.*, ปีที่ 25, ฉบับที่ 81, กรกฎาคม-กันยายน 2555, หน้า 43-57
- [34] ASTM Standard D 3172 - 02. Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal. The American Society for Testing and Material, U.S.A.
- [35] Zhu, Q., 2014, Coal sampling and analysis standards, IEA Clean Coal Centre.
- [36] เล็ก สีคง, การเตรียมถ่านหินสะอาด, *ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และโลหวิทยา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์*, 2538.

ภาคผนวก ก.

รายงานผลการทดสอบความพร้อมของหัวทราย



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110  
โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง  
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-003 ฉบับที่ 13 บังคับใช้ 07/11/61

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R0238/62	หน้า:	1/1
วันที่ออกรายงาน:	25 มกราคม 2562	วันที่รับตัวอย่าง:	10 มกราคม 2562
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	0076/62		
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ผู้ทดสอบ:	นางวชิราภรณ์ ปิสิตโร		
วันที่ทำการทดสอบ:	14-17 มกราคม 2562		
วิธีการทดสอบ:	อ้างอิง WI-RES-BET 6P-001		
เครื่องมือทดสอบ:	Surface area and porosity analyzer (BET), ASAP 2460, ASAP 2060, Micromeritics, USA		
เทคนิคการทดสอบ:	Static volumetric N <sub>2</sub> gas adsorption method		
สภาพตัวอย่าง:	ของแข็ง		
รายละเอียดตัวอย่าง:	หัวทราย	จำนวน:	1 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

ที่	ตัวอย่าง	Degas temperature of sample cleaning (°C)	พารามิเตอร์	หน่วย	ผลการทดสอบ
1.	หัวทราย	200	BET Surface area	m <sup>2</sup> /g	0.0878
			Adsorption average pore diameter	Å	140.2641

\* ข้อมูลดิบถูกจัดเก็บในโฟลเดอร์: \\server2\BET\RAWDATA\2562\0076-62\ระพีพิศ

(นางรุสนี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

30 มกราคม 2562

.....สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ.....

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน  
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

Sample: sand head  
Operator:  
Submitter:  
File: D:\USERDATA\2562\0076-62ประไพพิศ\sand head.SMP

Started: 15/1/2562 17:32:43	Analysis Adsorptive: N2
Completed: 17/1/2562 15:34:28	Analysis Bath Temp.: 77.300 K
Report Time: 29/1/2562 10:12:23	Thermal Correction: No
Sample Mass: 2.2620 g	Warm Free Space: 16.4541 cm <sup>3</sup> Measured
Cold Free Space: 47.1429 cm <sup>3</sup>	Equilibration Interval: 5 s
Low Pressure Dose: None	Sample Density: 1.000 g/cm <sup>3</sup>
Automatic Degas: No	

### Summary Report

#### Surface Area

BET Surface Area: 0.0878 m<sup>2</sup>/g

#### Pore Volume

Single point adsorption total pore volume of pores  
less than 3,429.938 Å width at  $p/p^\circ = 0.994394596$ : 0.000308 cm<sup>3</sup>/g

#### Pore Size

Adsorption average pore diameter (4V/A by BET): 140.2641 Å

ภาคผนวก ข.

รายงานผลการทดสอบปริมาณองค์ประกอบในถ่านหิน

**ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND**  
**TEST REPORT COAL ANALYSIS**  
**FOR PROXIMATE ANALYSIS**

Report No. 610629

Page 1 of 1

CUSTOMER : **หปค-ช.**NSC-TISI-TIS 17025  
TESTING 0104

LAB NO.	610629-01	SAMPLE DATE	16/08/2018
SAMPLE NAME	ถ่าน J5 งานวิจัยล้างถ่าน	RECEIVED DATE	16/08/2018
SAMPLE DESCRIPTION	-	ANALYSED DATE	17/8/2018 - 4/9/2018
SAMPLE CONDITION	-		

	PARAMETER	UNIT	METHOD	RESULT
AS RECEIVED	MOISTURE	% by weight	ASTM D3302/3302 M-15	21.91
	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	* 32.88
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	33.58
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	11.63
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>e2</sup>	* 6.17
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	* 11.78
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	* 2816
	* NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	10.74
	Kcal/Kg	ASTM D5865-13	2566	
DRY BASIS	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	* 42.11
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	* 43.00
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	14.89
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>e2</sup>	* 7.91
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	* 15.09
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	* 3606
	* NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	14.43
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	3448
AIR DRY BASIS	INHERENT MOISTURE	% by weight	ASTM D7582-15	15.12
	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	* 35.74
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	36.50
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	12.64
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>e2</sup>	* 6.71
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	* 12.81
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	* 3062
	* RELATIVE DENSITY		AS 1038.21.1.1-2002	1.72

Remark : The results relate only to the sample(s) tested. This document shall not be reproduced except in full.  
Parameters marked "\*" in this report are not TISI accredited and not included in the TISI accreditation schedule for our laboratory

Approved By : .....

( Dr.Kanitta Wongyai )  
SCIENTIST LEVEL 9

Reported By : .....

( Miss Nucharin Whangdeeniran )  
SCIENTIST LEVEL 7



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง  
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-003 ฉบับที่ 13 บังคับใช้ 07/11/61

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R3965 / 61	หน้า:	1 / 1
วันที่ออกรายงาน:	30 พฤศจิกายน 2561	วันที่รับตัวอย่าง:	26 พฤศจิกายน 2561
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	4999 / 61		
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ผู้ทดสอบ:	นายทรงพล หอมอุทัย และนางสาวพัชรา สุกุลรัตน์		
วันที่ทำการทดสอบ:	29 พฤศจิกายน 2561		
วิธีการทดสอบ:	อ้างอิง WI-RES-Macro TGA-001 และ In-house method based on ASTM D7582-15		
เครื่องมือทดสอบ:	Macro TGA, TGA 701, LECO, USA		
เทคนิคการทดสอบ:	Thermogravimetry		
สภาพตัวอย่าง:	ผง		
รายละเอียดตัวอย่าง:	ถ่านหิน	จำนวน:	2 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

ที่	ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)			
		ความชื้น	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว	เถ้า
1	หัวทราย	11.45 (0.02)	39.07 (0.14)	26.21 (0.14)	23.28 (0.01)
2	Ejector	9.75 (0.09)	39.99 (0.11)	28.27 (0.16)	21.98 (0.06)

\*โปรแกรมทดสอบ 1) Heat from 25.00°C to 107.00°C at 6.00°C /min ; Nitrogen 2) Hold for 15.0 min at 107.00°C; Nitrogen  
3) Heat from 107.00°C to 950.00°C at 50.00°C /min ; Nitrogen 4) Hold for 7.0 min at 950.00°C; Nitrogen  
5) Heat from 600.00°C to 750.00°C at 3.00°C /min ; Oxygen 6) Hold for 15.0 min at 650.00°C; Oxygen

\* ผลการทดสอบเป็นดังเอกสารแนบจำนวน 2 แผ่น ข้อมูลถูกจัดเก็บในโฟลเดอร์ \\server2\rawdata\macro\_tga\614xxx\4999

(นางรุสนี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

3 ธันวาคม 2561

.....สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ.....

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน  
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์



# TGA701

## PSU LECO TGA-701 SN:11999

Name	Method	Initial Mass	Moisture Mass	Volatile Mass	Ash Mass	Moisture	Volatile	Fixed Carbon	Ash	Analysis Date	Volatile Dry	Fixed Carbon Dry	Ash Dry
499961@1-1	ASTM D7582 MVA In Coal	1.1278	0.9988	0.5578	0.2624	11.43	39.11	26.19	23.27	29/11/2018 1:30:24 PM	41.65	32.08	26.27
499961@1-2	ASTM D7582 MVA In Coal	1.0664	0.9441	0.5263	0.2482	11.47	39.18	26.08	23.28	29/11/2018 1:30:24 PM	41.69	32.02	26.29
499961@1-3	ASTM D7582 MVA In Coal	1.0719	0.9491	0.5320	0.2495	11.46	38.91	26.35	23.28	29/11/2018 1:30:24 PM	41.57	32.14	26.29

Element	Average	Std. Deviation	RSD	Count
Initial Mass	1.0887	0.03	3.118	3
Moisture	11.4538	0.01668	0.146	3
Volatile	39.0658	0.13909	0.356	3
Fixed Carbon	26.21	0.139	0.529	3
Ash	23.2750	0.00551	0.024	3
Volatile Dry	41.63	0.059	0.141	3
Fixed Carbon Dry	32.08	0.059	0.183	3
Ash Dry	26.29	0.011	0.042	3

# TGA701

## PSU LECO TGA-701 SN:11999

Name	Method	Initial Mass	Moisture Mass	Volatile Mass	Ash Mass	Moisture	Volatile	Fixed Carbon	Ash	Analysis Date	Volatile Dry	Fixed Carbon Dry	Ash Dry
499961@2-1	ASTM D7582 MVA In Coal	1.1799	1.0657	0.5944	0.2592	9.67	39.95	28.41	21.97	29/11/2018 1:30:24 PM	41.68	34.00	24.32
499961@2-2	ASTM D7582 MVA In Coal	1.0448	0.9430	0.5239	0.2303	9.74	40.11	28.10	22.05	29/11/2018 1:30:24 PM	41.75	33.82	24.43
499961@2-3	ASTM D7582 MVA In Coal	1.0307	0.9292	0.5178	0.2261	9.85	39.91	28.30	21.94	29/11/2018 1:30:24 PM	41.69	33.97	24.33

Element	Average	Std. Deviation	RSD	Count
Initial Mass	1.0851	0.08	7.588	3
Moisture	9.7545	0.08798	0.902	3
Volatile	39.9920	0.10568	0.264	3
Fixed Carbon	28.27	0.159	0.563	3
Ash	21.9840	0.05629	0.256	3
Volatile Dry	41.71	0.041	0.099	3
Fixed Carbon Dry	33.93	0.099	0.293	3
Ash Dry	24.36	0.058	0.239	3



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110  
โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง  
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-003 ฉบับที่ 13 บังคับใช้ 07/11/61

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R3940 / 61	หน้า:	1 / 1
วันที่ออกรายงาน:	29 พฤศจิกายน 2561	วันที่รับตัวอย่าง:	23 พฤศจิกายน 2561
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	4962 / 61		
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ผู้ทดสอบ:	นายทรงพล หอมอุทัย และนางสาวพัชรา ศุกลรัตน์		
วันที่ทำการทดสอบ:	26 พฤศจิกายน 2561		
วิธีการทดสอบ:	อ้างอิง WI-RES-Macro TGA-001 และ In-house method based on ASTM D7582-15		
เครื่องมือทดสอบ:	Macro TGA, TGA 701, LECO, USA		
เทคนิคการทดสอบ:	Thermogravimetry		
สภาพตัวอย่าง:	ผง		
รายละเอียดตัวอย่าง:	ถ่านหิน	จำนวน:	4 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

ที่	ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)			
		ความชื้น	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว	เถ้า
1	3 bar	5.60 (0.04)	42.15 (0.11)	28.44 (0.24)	23.81(0.19)
2	4 bar	5.77 (0.06)	42.16 (0.10)	27.90 (0.02)	24.17 (0.11)
3	5 bar	4.60 (0.03)	42.27 (0.34)	29.54 (0.26)	23.59 (0.13)
4	6 bar	3.73 (0.13)	43.85 (0.12)	36.33 (0.09)	16.09 (0.07)

\*โปรแกรมทดสอบ 1) Heat from 25.00°C to 107.00°C at 6.00°C /min ; Nitrogen 2) Hold for 15.0 min at 107.00°C; Nitrogen  
3) Heat from 107.00°C to 950.00°C at 50.00°C /min ; Nitrogen 4) Hold for 7.0 min at 950.00°C; Nitrogen  
5) Heat from 600.00°C to 750.00°C at 3.00°C /min ; Oxygen 6) Hold for 15.0 min at 650.00°C; Oxygen

\* ผลการทดสอบเป็นดังเอกสารแนบจำนวน 4 แผ่น ข้อมูลถูกจัดเก็บในโฟลเดอร์ \\server2\rawdata\macro\_tga\61\4xxx\4962

(นางรุสนี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

30 พฤศจิกายน 2561

สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ.....

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน  
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

# TGA701

## PSU LECO TGA-701 SN:11999

Name	Method	Initial Mass	Moisture Mass	Volatile Mass	Ash Mass	Moisture	Volatile	Fixed Carbon	Ash	Analysis Date	Volatile Dry	Fixed Carbon Dry	Ash Dry
496261@1-1	ASTM D7582 MVA In Coal	1.0570	0.9972	0.5513	0.2500	5.65	42.19	28.50	23.65	26/11/2018 4:35:07 PM	41.85	33.08	25.07
496261@1-2	ASTM D7582 MVA In Coal	1.0314	0.9739	0.5384	0.2477	5.58	42.22	28.18	24.02	26/11/2018 4:35:07 PM	41.85	32.71	25.44
496261@1-3	ASTM D7582 MVA In Coal	1.0190	0.9621	0.5339	0.2420	5.58	42.03	28.64	23.75	26/11/2018 4:35:08 PM	41.78	33.06	25.16

Element	Average	Std. Deviation	RSD	Count
Initial Mass	1.0358	0.02	1.871	3
Moisture	5.6048	0.04284	0.764	3
Volatile	42.1469	0.10624	0.252	3
Fixed Carbon	28.44	0.238	0.836	3
Ash	23.8075	0.19135	0.804	3
Volatile Dry	41.83	0.043	0.103	3
Fixed Carbon Dry	32.95	0.210	0.638	3
Ash Dry	25.22	0.195	0.771	3

# TGA701

## PSU LECO TGA-701 SN:11999

Name	Method	Initial Mass	Moisture Mass	Volatile Mass	Ash Mass	Moisture	Volatile	Fixed Carbon	Ash	Analysis Date	Volatile Dry	Fixed Carbon Dry	Ash Dry
496261@2-1	ASTM D7582 MVA In Coal	1.0158	0.9579	0.5289	0.2452	5.70	42.23	27.93	24.14	26/11/2018 4:35:08 PM	41.87	32.52	25.60
496261@2-2	ASTM D7582 MVA In Coal	1.0189	0.9597	0.5297	0.2454	5.81	42.20	27.91	24.08	26/11/2018 4:35:08 PM	41.88	32.55	25.57
496261@2-3	ASTM D7582 MVA In Coal	1.0626	1.0011	0.5543	0.2581	5.79	42.04	27.88	24.29	26/11/2018 4:35:08 PM	41.82	32.40	25.78

Element	Average	Std. Deviation	RSD	Count
Initial Mass	1.0324	0.03	2.535	3
Moisture	5.7655	0.06042	1.048	3
Volatile	42.1589	0.10238	0.243	3
Fixed Carbon	27.90	0.024	0.087	3
Ash	24.1726	0.10583	0.438	3
Volatile Dry	41.86	0.034	0.081	3
Fixed Carbon Dry	32.49	0.081	0.249	3
Ash Dry	25.65	0.115	0.447	3

# TGA701

## PSU LECO TGA-701 SN:11999

Name	Method	Initial Mass	Moisture Mass	Volatile Mass	Ash Mass	Moisture	Volatile	Fixed Carbon	Ash	Analysis Date	Volatile Dry	Fixed Carbon Dry	Ash Dry
496261@3-1	ASTM D7582 MVA In Coal	1.0463	0.9979	0.5526	0.2453	4.63	42.55	29.37	23.45	26/11/2018 4:35:08 PM	41.82	33.60	24.58
496261@3-2	ASTM D7582 MVA In Coal	1.0826	1.0330	0.5745	0.2560	4.58	42.36	29.42	23.64	26/11/2018 4:35:08 PM	41.73	33.49	24.78
496261@3-3	ASTM D7582 MVA In Coal	1.1273	1.0756	0.6033	0.2670	4.59	41.89	29.84	23.69	26/11/2018 4:35:08 PM	41.55	33.62	24.82

Element	Average	Std. Deviation	RSD	Count
Initial Mass	1.0854	0.04	3.734	3
Moisture	4.5977	0.02961	0.644	3
Volatile	42.2677	0.33930	0.803	3
Fixed Carbon	29.54	0.256	0.866	3
Ash	23.5916	0.12817	0.543	3
Volatile Dry	41.70	0.134	0.322	3
Fixed Carbon Dry	33.57	0.072	0.215	3
Ash Dry	24.73	0.127	0.514	3

# TGA701

## PSU LECO TGA-701 SN:11999

Name	Method	Initial Mass	Moisture Mass	Volatile Mass	Ash Mass	Moisture	Volatile	Fixed Carbon	Ash	Analysis Date	Volatile Dry	Fixed Carbon Dry	Ash Dry
496261@4-1	ASTM D7582 MVA In Coal	1.1146	1.0739	0.5841	0.1801	3.65	43.94	36.25	16.16	26/11/2018 4:35:08 PM	42.15	41.09	16.77
496261@4-2	ASTM D7582 MVA In Coal	1.0494	1.0088	0.5500	0.1688	3.88	43.71	36.32	16.09	26/11/2018 4:35:08 PM	42.10	41.16	16.74
496261@4-3	ASTM D7582 MVA In Coal	1.0645	1.0256	0.5582	0.1705	3.66	43.90	36.42	16.02	26/11/2018 4:35:08 PM	42.13	41.24	16.62

Element	Average	Std. Deviation	RSD	Count
Initial Mass	1.0762	0.03	3.170	3
Moisture	3.7300	0.12748	3.418	3
Volatile	43.8519	0.12069	0.275	3
Fixed Carbon	36.33	0.087	0.240	3
Ash	16.0870	0.07020	0.436	3
Volatile Dry	42.13	0.021	0.050	3
Fixed Carbon Dry	41.16	0.078	0.190	3
Ash Dry	16.71	0.076	0.457	3

ที่ ทภก-ช. 685/27.9.61

LF-044

ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND  
 TEST REPORT COAL ANALYSIS  
 FOR PROXIMATE ANALYSIS

Report No. 610706  
 Page 1 of 6



CUSTOMER : ฝ่ายการผลิตเหมืองแม่เมาะ (ตัวอย่างจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.สงขลานครินทร์)

NSC-TISI-TIS 17025  
 TESTING 0104

LAB NO.	610706-01	SAMPLE DATE	10/09/2018
SAMPLE NAME	Concentrate (หัวแร่)	RECEIVED DATE	14/09/2018
SAMPLE DESCRIPTION	C-30 min	ANALYSED DATE	18 - 25/9/2018
SAMPLE CONDITION	-		

	PARAMETER	UNIT	METHOD	RESULT
AS RECEIVED	MOISTURE	% by weight	ASTM D3302/3302 M-15	8.91
	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	* 32.11
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	38.79
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	20.19
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>e2</sup>	* 8.01
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	* 16.81
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	* 4017
	* NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	-
	Kcal/Kg	ASTM D5865-13	-	
DRY BASIS	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	* 35.25
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	* 42.58
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	22.16
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>e2</sup>	* 8.79
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	* 18.45
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	* 4410
	* NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	-
	Kcal/Kg	ASTM D5865-13	-	
AIR DRY BASIS	INHERENT MOISTURE	% by weight	ASTM D7582-15	8.91
	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	* 32.11
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	38.79
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	20.19
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>e2</sup>	* 8.01
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	* 16.81
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	* 4018
	* RELATIVE DENSITY		AS 1038.21.1.1-2002	-

Remark : The results relate only to the sample(s) tested. This document shall not be reproduced except in full.  
 Parameters marked "\*" in this report are not TISI accredited and not included in the TISI accreditation schedule for our laboratory

Approved By : K. Wongyai  
 ( Dr.Kanitta Wongyai )  
 SCIENTIST LEVEL 9

Reported By : Nucharin Whangdeeniran  
 ( Miss Nucharin Whangdeeniran )  
 SCIENTIST LEVEL 7



**ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND**  
**TEST REPORT COAL ANALYSIS**  
**FOR PROXIMATE ANALYSIS**

Report No. 610706

Page 2 of 6



CUSTOMER : ฝ่ายการผลิตเหมืองแม่เมาะ (ตัวอย่างจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.สงขลานครินทร์)

NSC-TISI-TIS 17025  
TESTING 0104

LAB NO.	610706-02			
SAMPLE NAME	Concentrate (หัวแร่)	SAMPLE DATE	10/09/2018	
SAMPLE DESCRIPTION	C-60 min	RECEIVED DATE	14/09/2018	
SAMPLE CONDITION	-	ANALYSED DATE	18 - 25/9/2018	
	PARAMETER	UNIT	METHOD	RESULT
AS RECEIVED	MOISTURE	% by weight	ASTM D3302/3302 M-15	11.52
	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	29.69
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	39.07
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	19.72
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>e2</sup>	* 6.98
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	* 16.25
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	* 3885
	* NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	-
	Kcal/Kg	ASTM D5865-13	-	
DRY BASIS	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	* 33.56
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	* 44.16
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	22.28
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>e2</sup>	* 7.89
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	* 18.37
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	* 4391
	* NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	-
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	-
AIR DRY BASIS	INHERENT MOISTURE	% by weight	ASTM D7582-15	10.16
	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	30.15
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	39.67
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	20.02
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>e2</sup>	* 7.09
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	* 16.50
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	* 3944
	* RELATIVE DENSITY		AS 1038.21.1.1-2002	-

Remark : The results relate only to the sample(s) tested. This document shall not be reproduced except in full.

Parameters marked "\*" in this report are not TISI accredited and not included in the TISI accreditation schedule for our laboratory

Approved By : .....

( Dr.Kanitta Wongyai )  
 SCIENTIST LEVEL 9

Reported By : .....

( Miss Nucharin Whangdeeniran )  
 SCIENTIST LEVEL 7

**ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND**  
**TEST REPORT COAL ANALYSIS**  
**FOR PROXIMATE ANALYSIS**

Report No. 610706

Page 3 of 6



NSC-TISI-TIS 17025  
 TESTING 0104

CUSTOMER : ฝ่ายการผลิตเหมืองแม่เมาะ (ตัวอย่างจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.สงขลานครินทร์)

LAB NO.	610706-03		SAMPLE DATE	10/09/2018
SAMPLE NAME	Concentrate (หัวแร่)		RECEIVED DATE	14/09/2018
SAMPLE DESCRIPTION	C-90 min		ANALYSED DATE	18 - 25/9/2018
SAMPLE CONDITION	-			
AS RECEIVED	PARAMETER	UNIT	METHOD	RESULT
	MOISTURE	% by weight	ASTM D3302/3302 M-15	9.83
	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	* 32.15
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	39.10
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	18.92
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>e2</sup>	* 6.82
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	* 16.13
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	* 3856
* NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	-	
	Kcal/Kg	ASTM D5865-13	-	
DRY BASIS	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	* 35.65
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	* 43.36
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	20.98
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>e2</sup>	* 7.57
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	* 17.89
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	* 4276
* NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	-	
	Kcal/Kg	ASTM D5865-13	-	
AIR DRY BASIS	INHERENT MOISTURE	% by weight	ASTM D7582-15	9.83
	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	* 32.15
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	39.10
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	18.92
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>e2</sup>	* 6.82
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	* 16.13
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	* 3855
* RELATIVE DENSITY		AS 1038.21.1.1-2002	-	

Remark : The results relate only to the sample(s) tested. This document shall not be reproduced except in full.

Parameters marked "\*" in this report are not TISI accredited and not included in the TISI accreditation schedule for our laboratory

 Approved By : ..... *K. Wongyai* .....

( Dr.Kanitta Wongyai )  
 SCIENTIST LEVEL 9

 Reported By : ..... *Miss Nucharin Whangdeeniran* .....

( Miss Nucharin Whangdeeniran )  
 SCIENTIST LEVEL 7

**ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND**  
**TEST REPORT COAL ANALYSIS**  
**FOR PROXIMATE ANALYSIS**

Report No. 610706

Page 4 of 6



NSC-TISI-TIS 17025  
 TESTING 0104

CUSTOMER : ฝ่ายการผลิตเหมืองแม่เมาะ (ตัวอย่างจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.สงขลานครินทร์)

LAB NO.	610706-04		SAMPLE DATE	10/09/2018
SAMPLE NAME	Concentrate (หัวแร่)		RECEIVED DATE	14/09/2018
SAMPLE DESCRIPTION	C-120 min		ANALYSED DATE	18 - 25/9/2018
SAMPLE CONDITION	-			
	PARAMETER	UNIT	METHOD	RESULT
AS RECEIVED	MOISTURE	% by weight	ASTM D3302/3302 M-15	9.77
	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	* 37.76
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	37.61
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	14.86
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>e2</sup>	* 6.89
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	* 13.62
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	* 3255
	* NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	-
	Kcal/Kg	ASTM D5865-13	-	
DRY BASIS	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	* 41.85
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	* 41.68
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	16.47
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>e2</sup>	* 7.64
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	* 15.09
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	* 3608
	* NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	-
	Kcal/Kg	ASTM D5865-13	-	
AIR DRY BASIS	INHERENT MOISTURE	% by weight	ASTM D7582-15	9.77
	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	* 37.76
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	37.61
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	14.86
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>e2</sup>	* 6.89
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	* 13.62
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	* 3255
	* RELATIVE DENSITY		AS 1038.21.1.1-2002	-

Remark : The results relate only to the sample(s) tested. This document shall not be reproduced except in full.

Parameters marked "\*" in this report are not TISI accredited and not included in the TISI accreditation schedule for our laboratory

 Approved By : ..... *K. Wongyai* .....

( Dr.Kanitta Wongyai )  
 SCIENTIST LEVEL 9

 Reported By : ..... *Ms. Nucharin Whangdeeniran* .....

( Miss Nucharin Whangdeeniran )  
 SCIENTIST LEVEL 7

**ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND**  
**TEST REPORT COAL ANALYSIS**  
**FOR PROXIMATE ANALYSIS**

Report No. 610706

Page 5 of 6



NSC-TISI-TIS 17025  
TESTING 0104

CUSTOMER : ฝ่ายการผลิตเหมืองแม่เมาะ (ตัวอย่างจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.สงขลานครินทร์)

LAB NO.	610706-05	SAMPLE DATE	10/09/2018	
SAMPLE NAME	Concentrate (หัวแร่)	RECEIVED DATE	14/09/2018	
SAMPLE DESCRIPTION	C1-150 min	ANALYSED DATE	18 - 25/9/2018	
SAMPLE CONDITION	-			
AS RECEIVED	PARAMETER	UNIT	METHOD	RESULT
	MOISTURE	% by weight	ASTM D3302/3302 M-15	10.18
	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	* 32.82
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	40.21
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	16.79
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>e2</sup>	* 6.77
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	* 14.77
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	* 3529
* NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	-	
	Kcal/Kg	ASTM D5865-13	-	
DRY BASIS	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	* 36.54
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	* 44.77
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	18.69
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>e2</sup>	* 7.53
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	* 16.44
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	* 3929
	* NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	-
	Kcal/Kg	ASTM D5865-13	-	
AIR DRY BASIS	INHERENT MOISTURE	% by weight	ASTM D7582-15	10.18
	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	* 32.82
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	40.21
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	16.79
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>e2</sup>	* 6.77
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	* 14.77
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	* 3530
* RELATIVE DENSITY		AS 1038.21.1.1-2002	-	

Remark : The results relate only to the sample(s) tested. This document shall not be reproduced except in full.

Parameters marked "\*" in this report are not TISI accredited and not included in the TISI accreditation schedule for our laboratory

Approved By : 

( Dr.Kanitta Wongyai )  
SCIENTIST LEVEL 9

Reported By : 

( Miss Nucharin Whangdeeniran )  
SCIENTIST LEVEL 7

ภาคผนวก ค.  
บทความสำหรับเผยแพร่ 1  
การศึกษาลักษณะการไหลในชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก  
โดยใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์

## การศึกษาลักษณะการไหลในชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก โดยใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์

### A STUDY OF FLOW CHARACTERISTICS OF MICROBUBBLE GENERATOR BY EJECTOR NOZZLE

ประไพพิศ ถาวรศรี

ศิรัชช สังขพันธ์

ชยุต นันทกุลสิต

สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงานและภาควิชา

วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา 90112

E-mail: [chayut@me.psu.ac.th](mailto:chayut@me.psu.ac.th)

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาลักษณะการไหลภายในชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก โดยใช้วิธีการคำนวณทางพลศาสตร์การไหล หัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กเป็นแบบอีเจ็คเตอร์ ลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกภายในมีช่องทางไหลสำหรับของเหลวที่ถูกออกแบบให้ขยายและลดพื้นที่หน้าตัดแบบเป็นขั้นบันได ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันที่ซับซ้อนตามเส้นทางการไหล โดยอากาศจะถูกดูดโดยอัตโนมัติที่ตำแหน่งความดันลดต่ำมากที่สุด และเกิดปรากฏการณ์โพรงอากาศขึ้น ทำให้ฟองอากาศเกิดการสลายแตกเป็นฟองขนาดเล็กจำนวนมาก ในการทดลองได้พิจารณาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าของน้ำ ( $D$ ) 6, 10 mm, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของน้ำ ( $d$ ) 6, 10 mm, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด ( $d_t$ ) 3, 4, 5 mm และตำแหน่งทางเข้าของอากาศ ผลจากการศึกษาพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าของน้ำ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดมีผลต่อความเร็ว ความดัน และพฤติกรรมของน้ำในแต่ละชั้นการไหล

**คำสำคัญ:** ฟองอากาศขนาดเล็ก, หัวฉีดอีเจ็คเตอร์, ขนาดฟองอากาศ, การจำลองทางพลศาสตร์ของไหล

**Abstract**

The purpose of this research was to study of flow characteristics of microbubble generator using computational fluid dynamics. Nozzles created small bubbles as ejector type microbubble generator. A cylindrical tube within the channels for fluid flow that was design to extend and reduced the area of steps so that the complex pressure change along the flow. Air was sucked by minus pressure point. The bubble was reduced to a number of microbubbles by the cavitation. In the experiment, considering the effect of diameter of the water inlet ( $D$ ) 6, 10 mm, diameter of the water outlet ( $d$ ) 6, 10 mm, diameter of the throat ( $d_t$ ) 3, 4, 5 mm and position of the air inlet. The results show that the diameter of the water inlet and diameter of the throat affects the speed, pressure and the behavior of water in each layer flow.

**Keywords:** Microbubble, Ejector nozzle, Bubble diameter, Computational Fluid Dynamics

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันน้ำเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่จำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต และยังเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ต้องใช้ในภาคเกษตรกรรมและภาคอุตสาหกรรม ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร และความก้าวหน้าทางด้านอุตสาหกรรม มีส่วนเกี่ยวข้องที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำหรือปัญหาน้ำเน่าเสีย อันมีสาเหตุมาจากการทิ้งขยะจากครัวเรือน สารเคมีจากการทำการเกษตร หรือการทิ้งสารเคมีจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น หากปัญหาเหล่านี้ไม่ได้รับการแก้ไขหรือไม่ได้ผ่านการบำบัดที่สมบูรณ์ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จะส่งผลกระทบต่อในวงกว้าง เช่น ส่งกลิ่นเหม็นรบกวน อีกทั้งยังเป็นอันตรายต่อสุขภาพ และทำลายระบบนิเวศน์ เป็นต้น จะเห็นได้ว่าการบำบัดน้ำเสียเหล่านี้ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง การเติมอากาศลงในน้ำโดยใช้ฟองอากาศขนาดเล็กจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากคุณสมบัติของฟองอากาศขนาดเล็กมีแรงลอยตัวน้อยกว่าเมื่อเทียบกับฟองอากาศขนาดใหญ่ ทำให้สามารถลอยอยู่ในน้ำได้นานกว่า มีผลทำให้ออกซิเจนละลายในน้ำได้ดีขึ้น ซึ่งในงานวิจัย [1], [2], [3] ได้มีการออกแบบและพัฒนาารูปแบบ รวมทั้งหลักการต่างๆที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย สำหรับในงานวิจัยจะศึกษาหลักการไหลภายในชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก โดยใช้หัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กแบบอีเจ็คเตอร์ ซึ่งภายในท่อทรงกระบอกถูกออกแบบช่องทางไหลให้ขยายและลดพื้นที่หน้าตัดแบบเป็นขั้นบันได ตรงกลางท่อมักมีลักษณะเป็นคอคอดและเจาะรูสำหรับอากาศไหลเข้ามาภายในท่อ เมื่อน้ำไหลผ่านท่อส่วนที่มีการลดพื้นที่หน้าตัดน้ำจะมีความเร็วเพิ่มสูงขึ้น จนความดันลดต่ำลงจนสามารถดึงอากาศจากรูที่ผนังคอคอดไหลเข้ามา หลังจากนั้นอากาศที่ไหลเข้ามาจะตัดย่อยอากาศเป็นฟองที่มีขนาดเล็กลง [4], [5],

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาหลักการไหลภายในชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก โดยพิจารณารูปแบบลักษณะต่างๆของช่องทางไหลของของเหลวภายในท่อทรงกระบอก เพื่อให้ได้รูปแบบของชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กที่ดีที่สุด สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าของน้ำ( $D$ ) 6, 10 mm, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของน้ำ( $d$ ) 6, 10 mm, และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด( $d_c$ ) 3, 4, 5 mm ส่วนความยาวทางเข้าของน้ำ ( $L$ ) 20 mm, ความยาวทางออกของน้ำ( $l$ ) 24 mm, และความยาวคอคอด( $l_c$ ) 3 mm โดยมีอัตราการไหลของน้ำเข้า( $Q_w$ ) 15 l/min ในการทดลองแต่ละเงื่อนไขได้ใช้น้ำที่อุณหภูมิห้อง

## 2. หลักการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กและการศึกษาหลักการไหลโดยวิธีการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหลด้วยคอมพิวเตอร์

### 2.1 หลักการสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก

หัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กแบบอีเจ็คเตอร์ (Ejector Nozzle) ลักษณะเป็นทรงกระบอกภายในมีช่องทางไหลสำหรับของเหลวที่ถูกออกแบบให้ขยายและลดพื้นที่หน้าตัดแบบเป็นขั้นบันไดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันที่ซับซ้อนตามเส้นทางการไหล โดยแก๊สจะถูกดูดโดยอัตโนมัติที่ตำแหน่งความดันลดต่ำมากที่สุด และ

เกิดปรากฏการณ์โพรงอากาศขึ้น (Cavitation) ทำให้ฟองอากาศเกิดการสลายแตกเป็นฟองขนาดเล็กจำนวนมาก

### 2.2 การศึกษาหลักการไหลโดยวิธีการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหลด้วยคอมพิวเตอร์

การศึกษาหลักการไหลของน้ำในชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก โดยใช้วิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลด้วยคอมพิวเตอร์ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ในการศึกษาจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป ANSYS V15.0 (Fluent) โดยสร้างโมเดลเสมือนจริงกับการทดลอง จากนั้นจะทำการกำหนดสภาพของเขตของปัญหาแล้วใช้โปรแกรมทำการแก้ปัญหาดังกล่าว

#### 2.2.1 สมการควบคุมที่ใช้ในการจำลองการไหลทางคณิตศาสตร์

การไหลของของไหลโดยทั่วไปอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ การแก้ปัญหาเชิงอนุพันธ์ค่อนข้างซับซ้อน อย่างไรก็ตามสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) และใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ สำหรับหลักการแก้ปัญหาพลศาสตร์ของไหลด้วยวิธีเชิงตัวเลขจะนิยมใช้หลักการคำนวณแบบปริมาตรควบคุม (Control volume) ซึ่งเป็นการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของของไหลที่พื้นผิวเข้า-ออกของปริมาตรควบคุมแต่ละด้าน โดยใช้สมการควบคุม (Governing equations) ในกรณีที่ไม่เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน สมการควบคุมประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์มวลและสมการนาเวียร์-สโตกส์

#### - สมการอนุรักษมวล (Conservation of mass)

สมการอนุรักษมวลเป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งที่อธิบายถึงการไม่สูญหายของมวล หรือมวลเข้าเท่ากับมวลออก เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า สมการต่อเนื่อง (Continuity Equation) โดยที่ตัวแปรเหล่านั้นจะเปลี่ยนแปลงไปได้ตลอดโดเมนของการไหล ดังสมการ (1)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m \quad (1)$$

โดยที่  $u_i$  คือ ความเร็ว

$S_m$  คือ มวลที่เพิ่มขึ้นจากการกระจายของมวลหลักและแหล่งกำเนิดอื่น

#### - สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation)

สมการ (2) เขียนในรูปแบบอนุรักษ (Conservation form) อธิบายได้ว่าผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมต้องเท่ากับผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุม (อัตราการไหลเข้าออกสุทธิของโมเมนตัมเชิงเส้น) งานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐานให้ของไหลเป็นแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) จึงนำกฎของสโตกส์ (Stokes's law) ซึ่งความเค้นเนื่องจากความหนืด (Viscous stresses) เท่ากับผลคูณของอัตราความเครียด (Strain rates) และสัมประสิทธิ์ความหนืด (Viscous coefficient) เรียกสมการที่ได้นี้ว่า สมการนาเวียร์-สโตกส์

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

โดยที่  $P$  คือ ความดันสถิต (Static pressure)

$g_i$  คือ แรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่อการไหล

(Gravitational body force)

$F_i$  คือ แรงภายนอกที่กระทำต่อการไหล

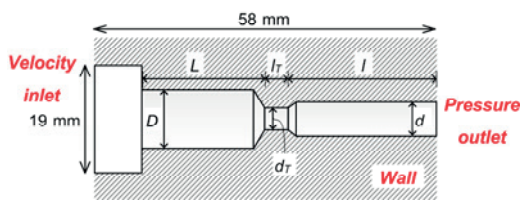
(External body force)

สมการข้างต้นเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่หาผลเฉลยได้ยาก ไม่ว่าจะเขียนระบบสมการย่อยเหล่านี้ในรูปแบบใดก็ตาม เพราะเป็นระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Coupled partial differential equations) ผลลัพธ์ที่คำนวณได้จะต้องสอดคล้องพร้อมกันทุกสมการและความยากอีกประการหนึ่งคือ สมการเหล่านี้อยู่ในรูปแบบสมการไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear equations) จึงเป็นการยากที่จะหาผลเฉลยที่เที่ยงตรง ถึงแม้ว่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) และลักษณะรูปร่าง (Geometry) ของปัญหาจะง่ายก็ตาม จึงทำให้มีวิธีการแก้ปัญหาของไหลด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามามีบทบาทในการคำนวณ

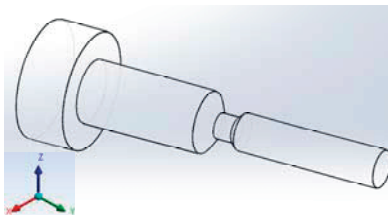
## 2.2.2 โมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหลโดยใช้ CFD

โมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหลถูกกำหนดเฉพาะน้ำที่ไหลเข้าและออกจากโดเมน (ในการทดลองจะให้อากาศไหลเข้าไปด้วย) เนื่องจากจะพิจารณาเฉพาะลักษณะการไหลของน้ำภายในชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก

การกำหนดสภาพขอบเขต (Boundary condition) ที่ใช้ในการทดลองได้กำหนดให้ทางเข้าท่อน้ำเป็นแบบ Velocity inlet ส่วนความเร็วเริ่มต้นจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำตามที่ได้กำหนดใช้ในการทดลอง สำหรับบริเวณที่น้ำไหลออกสู่บรรยากาศทั้งหมดได้กำหนดสภาพขอบเขตเป็นแบบ Pressure outlet และพื้นผิวทั้งหมดของชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กได้กำหนดให้สภาพขอบเขตเป็นแบบ Wall



(ก) โมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล

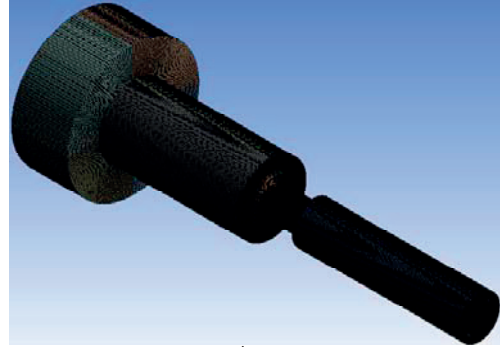


(ข) โมเดลจากโปรแกรมจำลองการไหล

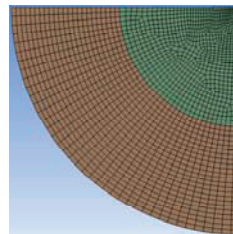
รูปที่ 1 แสดงโมเดลที่ใช้ในการออกแบบสำหรับการจำลองการไหล

## 2.2.3 การสร้างกริด (Meshing)

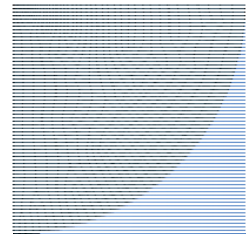
ในการสร้างกริด (Meshing) ของโมเดลที่ใช้ในการจำลองได้กำหนดให้รูปแบบการสร้างกริดมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม โดยกริดจะมีความละเอียดมากบริเวณที่มีการขยายและลดพื้นที่หน้าตัดของชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก สำหรับบริเวณทางเข้าและทางออกของชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก ได้สร้างกริดลักษณะเป็นรูปแบบผสมเพื่อให้สอดคล้องกับรูปร่างของโดเมน



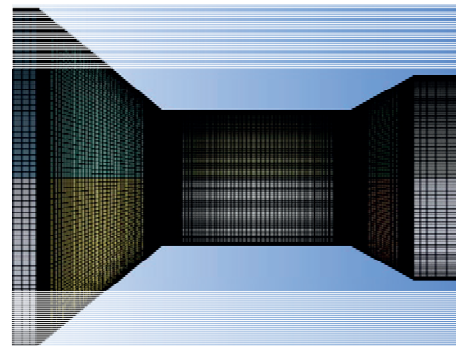
(ก) กริดที่ใช้กับโมเดล



(ข) กริดบริเวณทางเข้า



(ค) กริดบริเวณทางออก



(ง) กริดบริเวณคอขวด

รูปที่ 2 แสดงรายละเอียดกริดภายในโดเมนที่ใช้ในการจำลองการไหล

## 2.2.4 ข้อสมมติฐานและวิธีที่ใช้ในการคำนวณ

การใช้วิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลด้วยคอมพิวเตอร์ในการจำลองการไหลในครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์การไหลเป็นแบบคงตัว (Steady flow) ไม่พิจารณาผลจากการถ่ายเทความร้อนและไม่คิดผลการสูญเสียความร้อน โดยกำหนดให้อุณหภูมิมีค่าคงที่ไม่คิดผลของแรงโน้มถ่วง สำหรับโมเดลของความปั่นป่วนใช้แบบ Standard k-epsilon โดยบริเวณที่ใกล้ผิวใช้แบบ Standard Wall Functions สำหรับวิธีการคำนวณ ได้ทำการกำหนดอัลกอริทึมเป็นแบบ SIMPLE โดยกำหนด Spatial Discretization ทุกเทอมเป็นแบบ Second order upwind



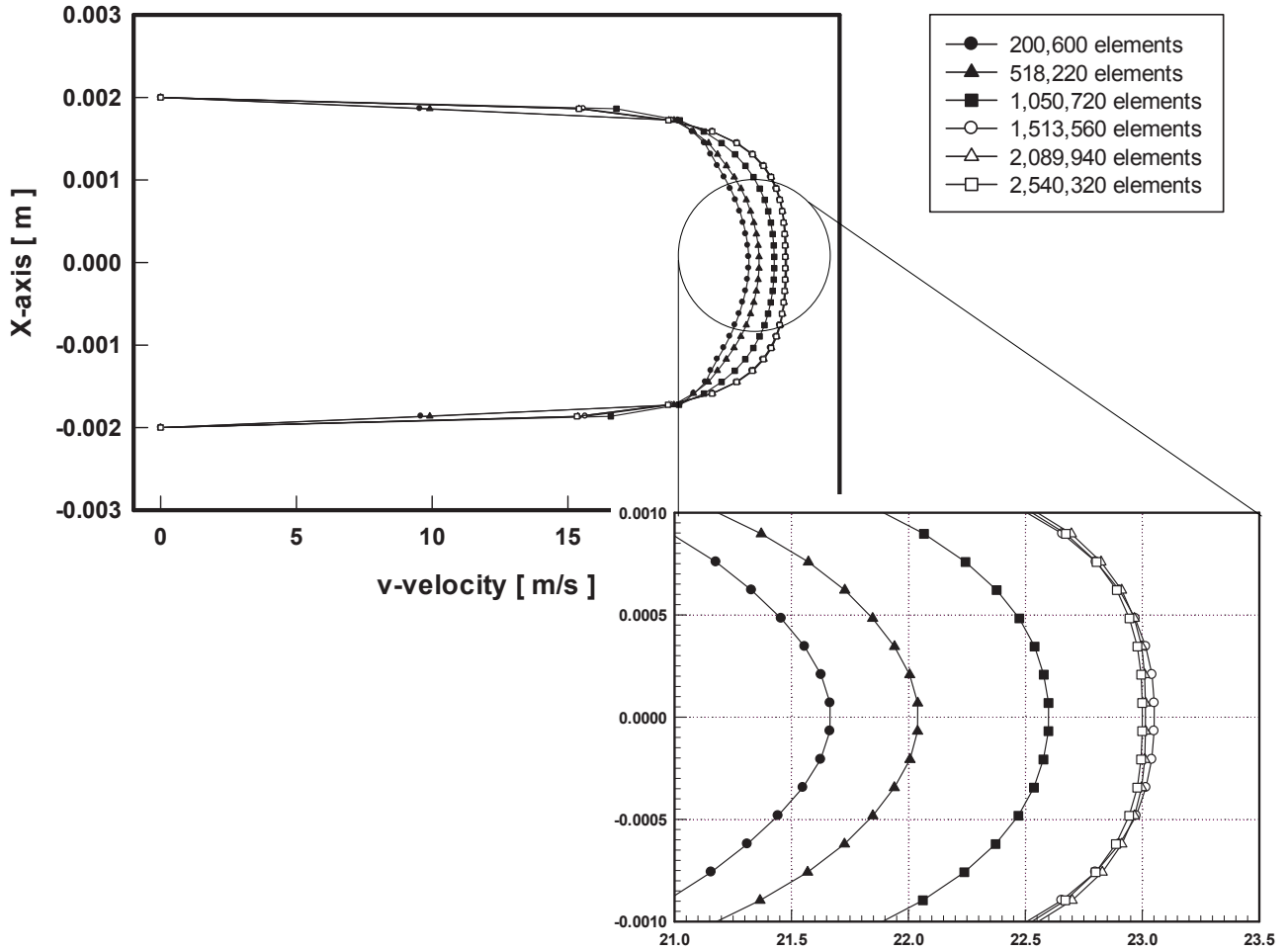
### 2.2.5 การหาค่าจำนวนกริดของโดเมนที่เหมาะสม

ในการหาค่าจำนวนกริดของโดเมนที่เหมาะสมได้มีการสร้างโมเดลของการทดลองแบบอ็ีเจ็คเตอร์จำนวน 6 โมเดล และแต่ละโมเดลได้มีการแบ่งกริดเป็นจำนวนที่ต่างกันออกไป ดังนี้

โมเดลที่ 3 1,050,720 elements  
 โมเดลที่ 4 1,513,560 elements  
 โมเดลที่ 5 2,089,940 elements  
 โมเดลที่ 6 2,540,320 elements

โมเดลที่ 1 200,600 elements  
 โมเดลที่ 2 518,220 elements

โดยแสดงผลการจำลองการไหลในแต่ละจำนวนกริด ดังในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การกระจายความเร็วตามแนวรัศมี กรณีหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กแบบอ็ีเจ็คเตอร์ที่จำนวนกริดต่างๆ

จากรูปที่ 3 แสดงการกระจายความเร็วตามแนวรัศมีที่ตำแหน่งกึ่งกลางคอคอด กรณีหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กแบบอ็ีเจ็คเตอร์ที่จำนวนกริดต่างๆ พบว่าผลการจำลองที่ออกมา มีค่าที่ต่างกันตั้งแต่โมเดลที่ 1 ถึงโมเดลที่ 4 และเมื่อเพิ่มจำนวนกริดจากโมเดลที่ 5 ถึงโมเดลที่ 6 ผลการจำลองมีค่าที่ใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าจำนวนกริดที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการจำลองอยู่ที่โมเดลที่ 5 2,089,940 elements เนื่องจากจำนวนกริดที่น้อยจะส่งผลให้ผลการจำลองที่คาดเคลื่อนหรือผิดพลาด ส่วนจำนวนกริดที่มากเกินไปก็จะได้ผลการจำลองที่คล้ายคลึงกันและเป็นการสิ้นเปลืองทรัพยากร

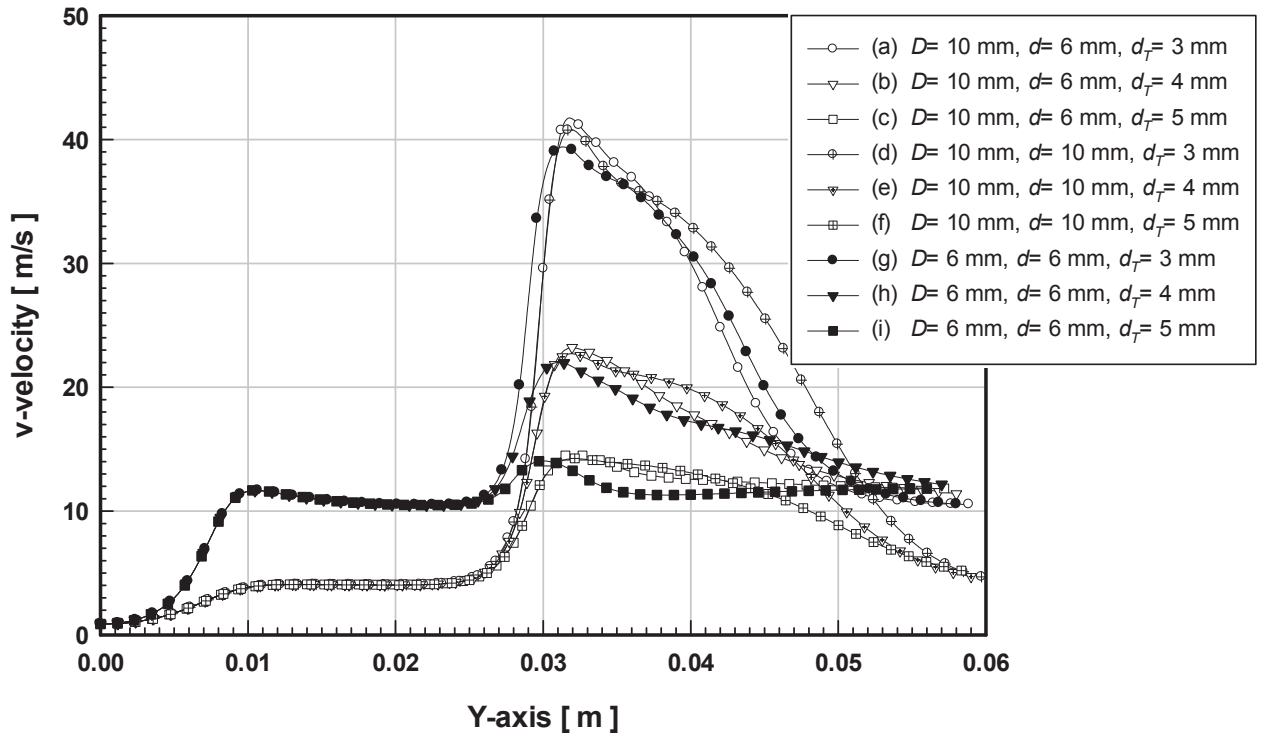
### 3. ผลการจำลองและวิเคราะห์ผล

ลักษณะการไหลของน้ำภายในหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กแบบอ็ีเจ็คเตอร์ โดยศึกษาที่เงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำเข้า ( $Q_w$ ) 15 l/min เท่ากันในทุกกรณี และทำการปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มีรายละเอียดรูปแบบดังนี้

- $D=10$  mm,  $d=6$  mm,  $d_f=3$  mm
- $D=10$  mm,  $d=6$  mm,  $d_f=4$  mm
- $D=10$  mm,  $d=6$  mm,  $d_f=5$  mm
- $D=10$  mm,  $d=10$  mm,  $d_f=3$  mm
- $D=10$  mm,  $d=10$  mm,  $d_f=4$  mm

- (f)  $D= 10 \text{ mm}, d= 10 \text{ mm}, d_T= 5 \text{ mm}$   
 (g)  $D= 6 \text{ mm}, d= 6 \text{ mm}, d_T= 3 \text{ mm}$

- (h)  $D= 6 \text{ mm}, d= 6 \text{ mm}, d_T= 4 \text{ mm}$   
 (i)  $D= 6 \text{ mm}, d= 6 \text{ mm}, d_T= 5 \text{ mm}$

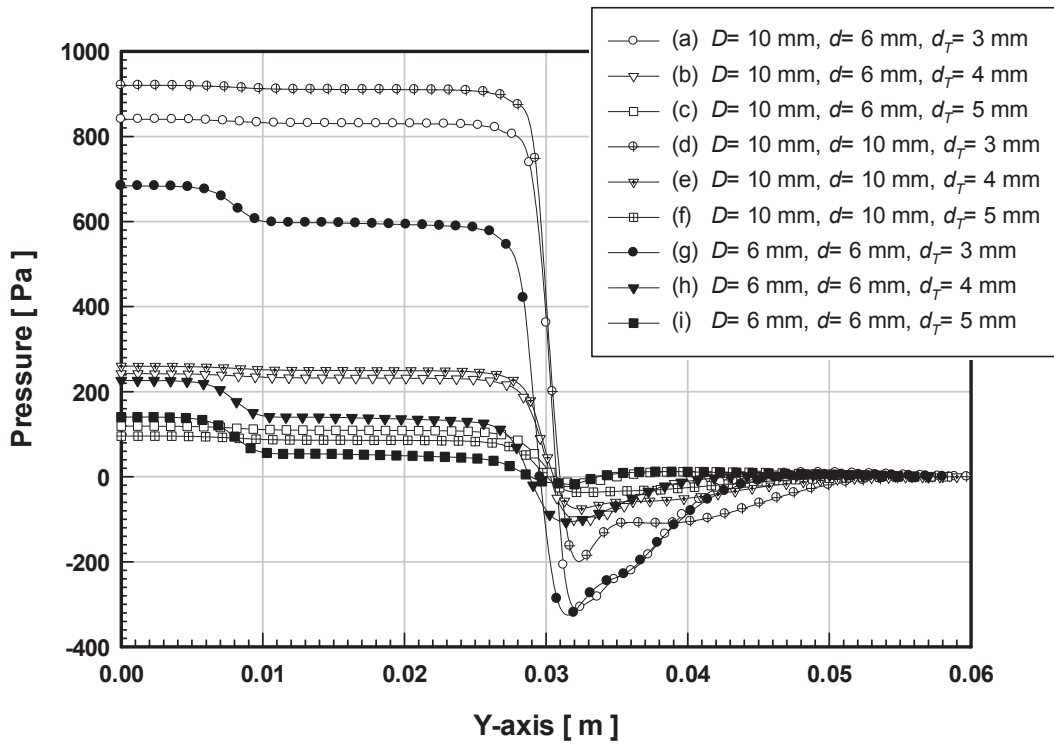


รูปที่ 4 การกระจายความเร็วที่ตำแหน่ง y ต่างๆ

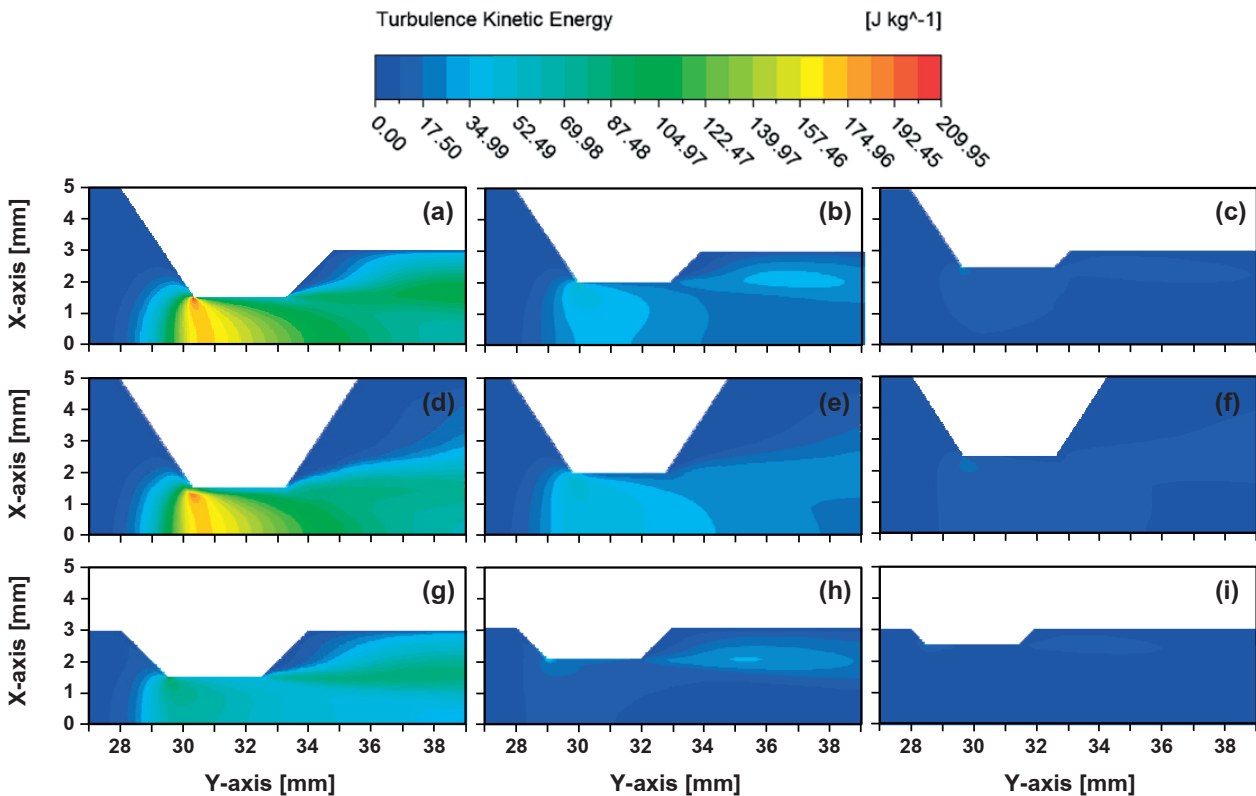
จากรูปที่ 4 แสดงการกระจายความเร็ว(v-velocity) ที่ตำแหน่ง y ต่างๆ ภายในหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กแบบอีเจ็คเตอร์ พบว่าตำแหน่งก่อนเข้าคอคอดมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วอย่างกะทันหัน ซึ่งมีลักษณะเป็นกราฟที่มีความชันเป็นบวก และจะมีความเร็วสูงสุดที่บริเวณคอคอด หลังจากนั้นความเร็วจะค่อยๆ ลดต่ำลงเมื่อผ่านตำแหน่งคอคอดแล้ว สำหรับหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กแบบอีเจ็คเตอร์รูปแบบ (a)  $D= 10 \text{ mm}, d= 6 \text{ mm}, d_T= 3 \text{ mm}$  จะมีความเร็วบริเวณคอคอดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กรูปแบบอื่นๆ และจะสังเกตเห็นว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด( $d_c$ ) ที่ขนาด 3 mm จะเกิดความเร็วที่มีค่าสูง

ที่สุด เมื่อเทียบกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดที่ 4 mm และ 5 mm ซึ่งจะมีความเร็วค่อยๆ ลดตามลำดับ

สำหรับรูปที่ 5 แสดงความดัน(pressure) ที่ตำแหน่ง y ต่างๆ ภายในหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กแบบอีเจ็คเตอร์ พบว่าตำแหน่งก่อนเข้าคอคอดเกิดความดันลดลงอย่างทันทีทันใด ซึ่งมีลักษณะเป็นกราฟที่มีความชันเป็นลบ และความดันจะลดลงต่ำมากที่สุดบริเวณคอคอด สำหรับหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กแบบอีเจ็คเตอร์รูปแบบ (g)  $D= 6 \text{ mm}, d= 6 \text{ mm}, d_T= 3 \text{ mm}$  มีค่าความดันต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กรูปแบบอื่นๆ ซึ่งในกรณีนี้ความดันจะมีค่าต่ำสุดที่ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด( $d_c$ ) เท่ากับ 3 mm เช่นเดียวกับกรณีของความเร็ว

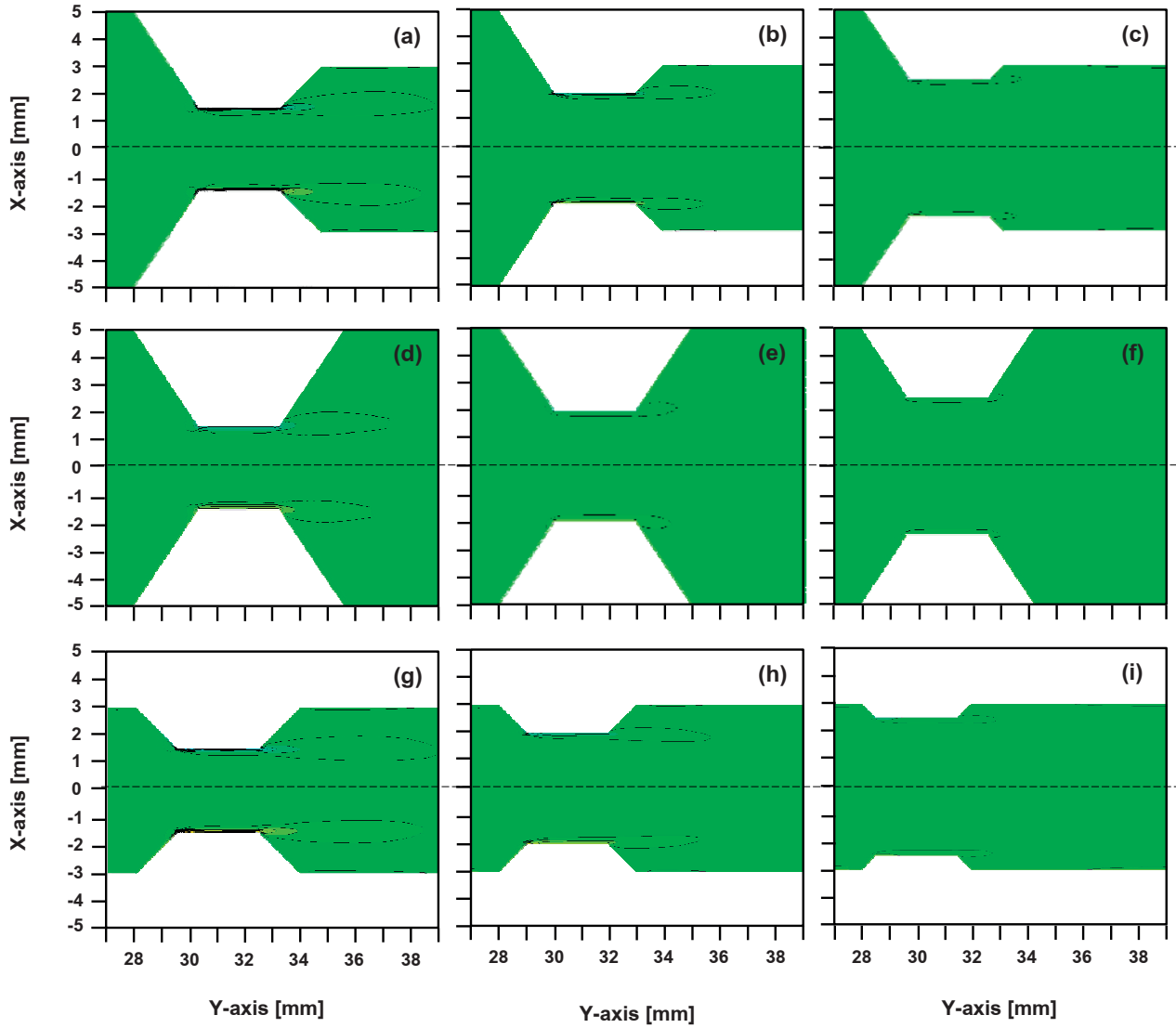
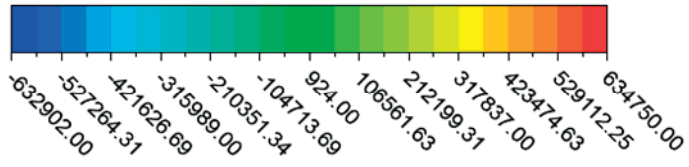


รูปที่ 5 ความดันที่ตำแหน่ง y ต่างๆ



รูปที่ 6 Contour ของ Turbulence Kinetic Energy

Velocity v.Gradient X



รูปที่ 7 Contour ของความเค้นเฉือน

จากรูปที่ 6 แสดง Contour ของ Turbulence Kinetic Energy ที่ตำแหน่ง  $y$  ต่างๆ ภายในหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กแบบอ็ีเจ็คเตอร์ พบว่าบริเวณคอคอดคอดมีพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนสูงเกิดขึ้น จะสังเกตเห็นชัดในกรณีหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กแบบอ็ีเจ็คเตอร์รูปแบบ (a)  $D= 10$  mm,  $d= 6$  mm,  $d_7= 3$  mm และ (d)  $D= 10$  mm,  $d= 10$  mm,  $d_7= 3$  mm ซึ่งจะแตกต่างจากรูปแบบ (g)  $D= 6$  mm,  $d= 6$  mm,  $d_7= 3$  mm คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าของน้ำ( $D$ ) 10 mm จะเกิดพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนสูงกว่า ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด( $d_7$ ) เท่ากัน

สำหรับความเค้นเฉือน(shear stress) ที่บริเวณผนังคอคอดภายในหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กแบบอ็ีเจ็คเตอร์ พบว่าหัวฉีดรูปแบบ (a)  $D= 10$  mm,  $d= 6$  mm,  $d_7= 3$  mm มีความเค้นเฉือนระหว่างชั้นการไหลที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กรูปแบบอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 7

#### 4.สรุปผล

จากการศึกษาลักษณะการไหลในชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กโดยใช้วิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลด้วยโปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS V15.0 (Fluent) เพื่อจำลองลักษณะการไหลของน้ำภายในชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กโดยใช้หัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กแบบอ็ีเจ็คเตอร์ โดยทำการปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต่างกันจำนวน 9 รูปแบบ สามารถสรุปได้ดังนี้

- (1) ผลของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด( $d_7$ ) ที่ 3 mm จะแสดงผลของความเร็วที่มีค่าสูงที่สุดและความดันที่มีค่าน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดที่ 4 mm และ 5 mm
- (2) ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าของน้ำ( $D$ ) ที่ 10 mm จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วและความดันอย่างกะทันหัน มากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าของน้ำ( $D$ ) ที่ 6 mm แต่ที่  $D= 6$  mm และ  $d_7= 3$  mm จะเกิดความดันต่ำมากที่สุดเมื่อเทียบ  $D= 10$  mm และ  $d_7= 3$  mm ที่ตำแหน่งเดียวกัน คือ บริเวณกึ่งกลางคอคอด
- (3) สำหรับตำแหน่งเจาะรูเพื่อให้อากาศไหลเข้า คือ บริเวณที่มีความดันต่ำที่สุด นั่นคือ ตรงตำแหน่งคอคอด เนื่องจากจุดนี้อากาศจะถูกดูดเข้ามาภายในหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กแบบอ็ีเจ็คเตอร์โดยอัตโนมัติ
- (4) เมื่อน้ำอยู่ในสภาวะที่ความดันต่ำกว่าความดันไอ จะทำให้น้ำบางส่วนเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอหรือแก๊ส และจะเกิดการขยายตัวทำให้เกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก (microbubbles) จำนวนมาก

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Ohnari, H., Saga, T., Watanabe, K., Maeda, K., Maeda, K., 1999. High functional characteristics of micro-bubbles and water purification, Resources Processing, Vol. 46 (4), pp. 238–244.
- [2] Sadatomi, M., Kawahara, A., Kano, K. and Ohtomo, A., 2005, Performance of a new micro-bubble generator with a spherical body in a flowing water tube, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 29, pp. 615-623.
- [3] Sadatomi, M., Kawahara, A., Matsuura, H. and Shikatani, S., 2012, Micro-bubble generation rate and bubble dissolution rate into water by a simple multi-fluid mixer with orifice and porous tube, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 41, pp. 23–30.
- [4] Terasaka, K., Hirabayashi, A., Nishino, T., Fujioka, S., Kobayashi, D., 2011. Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge. Chemical Engineering Science, Vol. 66, pp. 3172-3179.
- [5] Mori, Y., 2015, Micro-bubble generator, United States Patent No. 9,061,256 B2

ภาคผนวก ง.

บทความสำหรับเผยแพร่ 2

Effect of Contraction Diameter Ratio on Ejector Nozzle  
for Microbubble Generator

# Effect of Contraction Diameter Ratio on Ejector Nozzle for Microbubble Generator

Prapaipis Tawonsri<sup>1</sup>, Sirachut Sungkapun<sup>1</sup> and Chayut Nuntadusit<sup>1,\*</sup>

## Abstract

The purpose of this study was to study flow behavior in ejector nozzle for microbubble generator. The ejector nozzle composed of two circular flow channels connected with convergence and divergence section. The water flow was accelerated in convergence section. The air was introduced into the nozzle through air hole and mixed with water in throat section. Then the water with air bubble decelerated in divergence section and became microbubble. In this study, the flow simulation technique was applied for understanding the phenomena of microbubble generation using commercial software, ANSYS Ver.15 (Fluent). The effect of nozzle geometry on flow characteristic was also investigated. It is found that the contraction diameter ratio between inlet diameter and throat diameter effects to the flow behavior significantly.

**Keywords:** Microbubble, Ejector nozzle, Nozzle geometry, Computational Fluid Dynamics

---

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90112 Thailand.

\*Corresponding author, E-mail: chayut.n@psu.ac.th

## 1. Introduction

Water is an important resource for human life. The wastewater from industry need to be treated properly before discharge to natural water resource. Recently, aeration in the water by microbubbles is an attractive alternative. Because the properties of microbubbles have many useful characteristics, such as a large gas-liquid interfacial area, long residence time in the liquid and fast dissolution rate so that they have an advantage to dissolve the oxygen gas in air into water. Microbubble has been designed and developed to use in wastewater treatment [1-3].

In general, there are many techniques to generate microbubbles [4, 5]. This study focused on microbubble generation using ejector nozzle. Fig. 1 shows the typical ejector nozzle. The liquid flow with high velocity flows in small channels and then shear the gas flow into small gas bubbles. However, the mechanism of microbubble generation is still unclear. In this study, the behavior of water flow passing ejector nozzle was investigated using computational fluid dynamics. The effect of nozzle geometry was also studied. However, the air is not considered in simulation.

## 2. Numerical Simulation

### 2.1 Simulation model

Fig. 2 shows the ejector model using in this study. The ejector nozzle consisted of flow channel with two different diameters. The flow channel has convergence and divergence section connected with throat section. The water from pump has forced to accelerate in convergence section. The air flow is introduced and mixed with water in throat section. Then the water with air bubbles decelerated again in divergence section. The air bubble then break into microbubbles.

The nozzle geometry was investigated for nozzle inlet diameter ( $D$ ) at 6 and 10 mm, nozzle outlet diameter ( $d$ ) at 6 and 10 mm, with different the throat diameter ( $d_T$ ) at 3, 4 and 5 mm. For all simulation, the nozzle inlet length ( $L$ ) was fixed at 20 mm, the nozzle outlet length ( $l$ ) was fixed at 24 mm and the throat length ( $l_T$ ) was fixed at 3 mm. All simulations were carried out for inlet condition with constant water flow rate at 15 l/min for comparison.

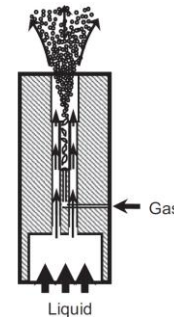


Fig. 1 Ejector type microbubble generator

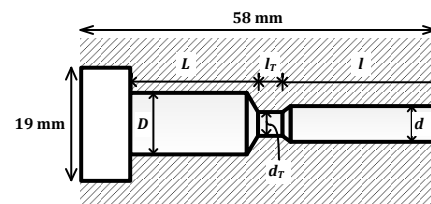


Fig. 2 Simulation model using in this study

### 2.2 Simulation setup

Since, the Reynolds number for water flow at inlet based on water flow rate and diameter at inlet was  $Re=20,300$ . The flow was in turbulent flow regime. So, turbulent model was applied for this simulation.

#### 2.2.1 Governing equations for turbulent flow

In this study, the flow is assumed to be incompressible, steady state, and turbulent flow. The governing equations for Reynolds-Averaged continuity, Navier-Stokes and energy equation are as follows [6, 7, 8]:



Continuity equation

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Navier-Stokes equation

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \mu_t \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

Energy equation

$$\rho u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

The *SST* (*shear stress transport*) *k- $\omega$*  turbulence model developed by Menter [9] was applied for taking term of turbulent viscosity. For this modelling, a blending function ( $F_1$ ) is introduced which is equal to one near the solid surface and equal to zero for the flow domain away from the wall. The *SST k- $\omega$*  turbulence model combines the *k- $\omega$*  model near the wall and the *k- $\epsilon$*  model away from the wall as a unified two-equation turbulence model. In addition, the *SST k- $\omega$*  turbulence model also features a modification of the eddy viscosity is redefined so as to take into account the transport of the turbulent shear stress. This modification is required to accurately capture the onset of separation under pressure gradients [10]. The model equations of *SST k- $\omega$*  turbulence model are as follows:

Turbulence kinetic energy, *k*

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_j k)}{\partial x_j} = \tau_w \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} - \beta^* k \rho \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

Specific dissipation rate,  $\omega$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\alpha}{\nu_t} \tau_w \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2\rho(1-F_1)\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (5)$$

Blending function,  $F_1$

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}y^2} \right] \right\}^4 \quad (6)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left( 2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad (7)$$

Turbulent viscosity

$$\mu_t = \min \left( \frac{\rho k}{\omega}, \frac{a_1 \rho k}{SF_2} \right); a_1=0.31 \quad (8)$$

Blending function,  $F_2$

$$F_2 = \tanh \left[ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \quad (9)$$

For Blending function,  $F_1$  is equal to 1 at inside the boundary layer and 0 in the free stream.

The coefficients of the *k- $\omega$*  and the *k- $\epsilon$*  model respectively:

$$\sigma_k=1.176, \sigma_\omega=2, \alpha=0.5532, \beta=0.075 \text{ and } \beta^*=0.09$$

*k- $\epsilon$*  model;

$$\sigma_k=1, \sigma_\omega=1.168, \alpha=0.4403, \beta=0.0828 \text{ and } \beta^*=0.09$$

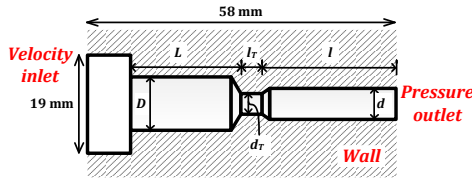
## 2.2.2 Simulation conditions

The numerical model was considered for one phase flow of water. The air flow will not be simulated due to complexity of simulation. The properties of the water are shown in Table 1.

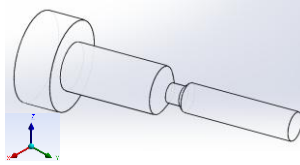
**Table 1** Water Properties

Room Temperature (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosity (kg/m·s)
28	996.2	0.000819

Fig. 3 shows the detail of simulation domain with boundary condition. The water velocity was applied for inlet boundary condition. The constant pressure outlet was set at atmosphere for outlet condition and other boundary surface was set as wall boundary condition.



(a) Detail of the simulation with boundary condition

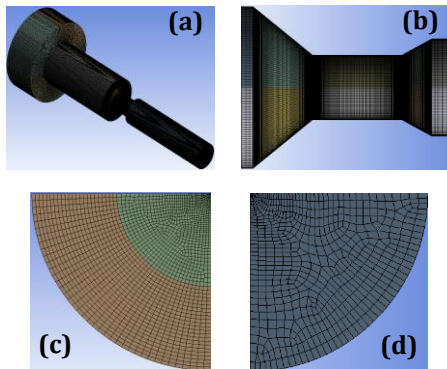


(b) 3D model for simulation domain

**Fig. 3** Detail of simulation model with boundary conditions

**2.2.3 Grid system**

Hexahedral grid structure was generated for 3D domain in microbubble generator as shown in Fig.4. The grids would be finer in region of convergence and divergence in microbubble generator. Inlet and outlet region have been created a combined grid to the consistent with the geometry of the domain. About 2,000,000 elements of quadrilateral grids were used.



**Fig. 4** Grid distribution in different simulation domain, (a) grid on surface model, (b) grid on the center of throat region, (c) grid on the cross section of inlet region and (d) grid on the cross section of outlet region

**2.2.4 Numerical method**

The flow field was simulated by using commercial software, ANSYS Ver.15.0 (Fluent). The numerical

computation was carried out by solving the governing equations with boundary condition. The SST  $k-\omega$  turbulence model was used for solving turbulent flow. The solution method is based on SIMPLE algorithm with second order upwind for all spatial discretization. The solution is considered to be convergent when the normalized residual of the algebraic equation is less than a prescribed value of  $1 \times 10^{-5}$ .

**3. Results and discussion**

The flow filed of water inside the microbubble generator was investigated in this study. The geometry of microbubble generator are described in Table 2. The water flow rate was fixed at 15 l/min for comparison with different generators.

**Table 2** Detail of the microbubble generator diameter for simulation

Models	D (mm)	d (mm)	d <sub>r</sub> (mm)
(a)	10	6	3
(b)	10	6	4
(c)	10	6	5
(d)	10	10	3
(e)	10	10	4
(f)	10	10	5
(g)	6	6	3
(h)	6	6	4
(i)	6	6	5

Fig. 5 and Fig. 6 are shows the variation of velocity in y-axis direction and pressure along the center of the nozzle. The increase of velocity occurs in the convergent section due to transformation of pressure into kinetic energy. The maximum velocity occurs in the throat section; therefore, pressure drop rapidly. The results can be explained at before the throat inlet has the velocity changes so rapidly causes the graph is positive slope and maximum velocity at the throat. Then the velocity is decrease when through the throat. Otherwise before the throat inlet has the pressure drop changes so rapidly causes the graph is negative slope

and minimum pressure at the throat. For the microbubble generator model is (a)  $D=10$  mm,  $d=6$  mm and  $d_T=3$  mm has maximum velocity and minimum pressure at the throat when compared with other models because the maximum different of the contraction diameter ratio ( $D/d_T$ ).

- (a)  $D=10$  mm,  $d=6$  mm,  $d_T=3$  mm
- △ (b)  $D=10$  mm,  $d=6$  mm,  $d_T=4$  mm
- (c)  $D=10$  mm,  $d=6$  mm,  $d_T=5$  mm
- ⊕ (d)  $D=10$  mm,  $d=10$  mm,  $d_T=3$  mm
- ▲ (e)  $D=10$  mm,  $d=10$  mm,  $d_T=4$  mm
- ⊞ (f)  $D=10$  mm,  $d=10$  mm,  $d_T=5$  mm
- (g)  $D=6$  mm,  $d=6$  mm,  $d_T=3$  mm
- △ (h)  $D=6$  mm,  $d=6$  mm,  $d_T=4$  mm
- (i)  $D=6$  mm,  $d=6$  mm,  $d_T=5$  mm

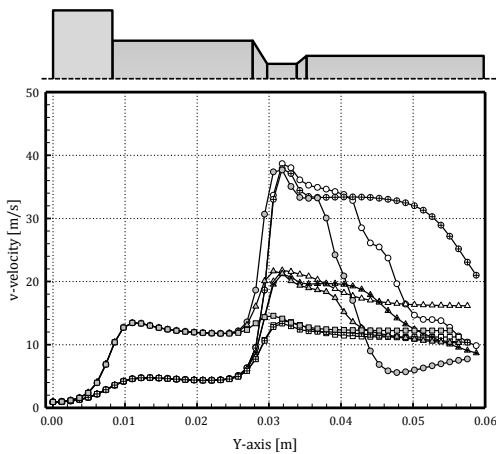


Fig. 5 v-velocity distribution at center along y-axis

- (a)  $D=10$  mm,  $d=6$  mm,  $d_T=3$  mm
- △ (b)  $D=10$  mm,  $d=6$  mm,  $d_T=4$  mm
- (c)  $D=10$  mm,  $d=6$  mm,  $d_T=5$  mm
- ⊕ (d)  $D=10$  mm,  $d=10$  mm,  $d_T=3$  mm
- ▲ (e)  $D=10$  mm,  $d=10$  mm,  $d_T=4$  mm
- ⊞ (f)  $D=10$  mm,  $d=10$  mm,  $d_T=5$  mm
- (g)  $D=6$  mm,  $d=6$  mm,  $d_T=3$  mm
- △ (h)  $D=6$  mm,  $d=6$  mm,  $d_T=4$  mm
- (i)  $D=6$  mm,  $d=6$  mm,  $d_T=5$  mm

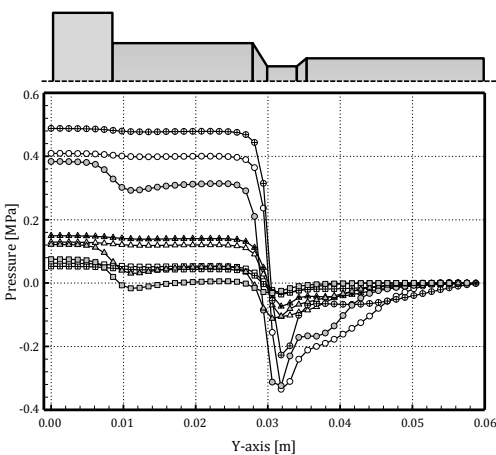


Fig. 6 Pressure at center along y-axis

Fig.7 shows the contour of turbulence kinetic energy (TKE) on the center plane of microbubble generator along y-axis. The result shows the region behind the throat has the high TKE in which high amount of turbulent energy is extracted from mean flow. The rapid reduction in cross sectional area causes the increase of TKE. This is clearly seen for case with the throat diameter of 3 mm. For case of larger throat diameter, the region of large TKE cannot be found. This turbulent kinetic energy will enhance the process of bubble breaking behind the throat section.

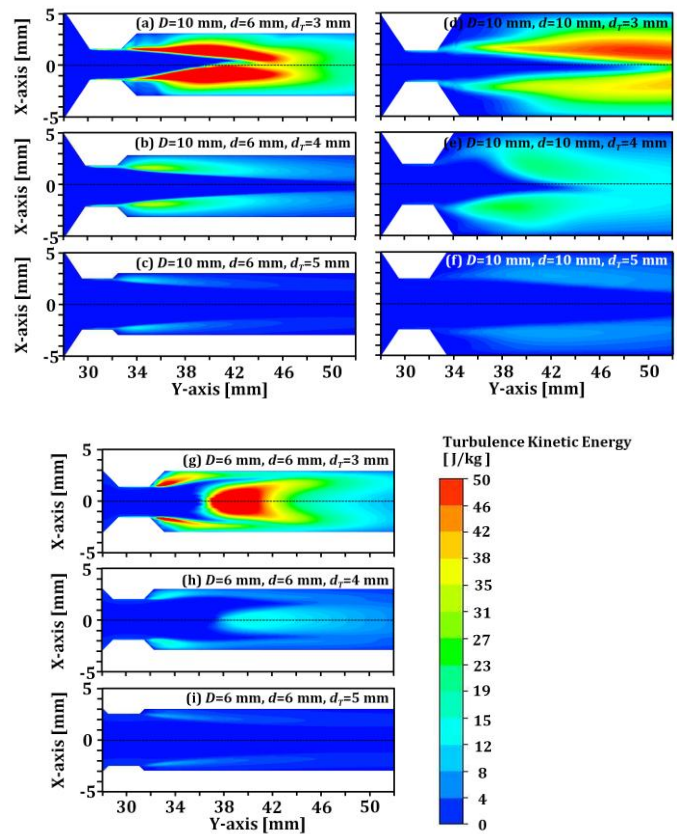
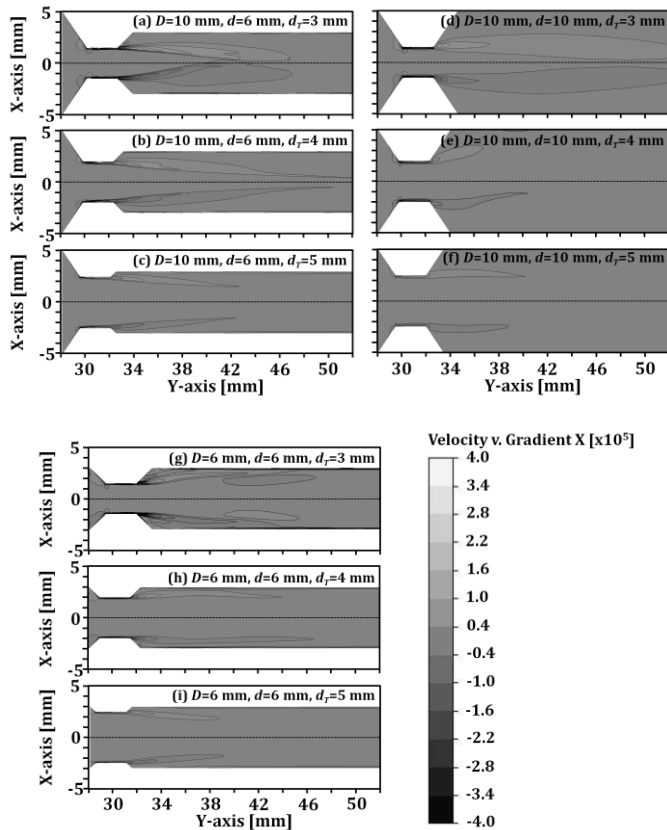


Fig. 7 Contour of turbulence kinetic energy on the center plane of microbubble generator along y-axis

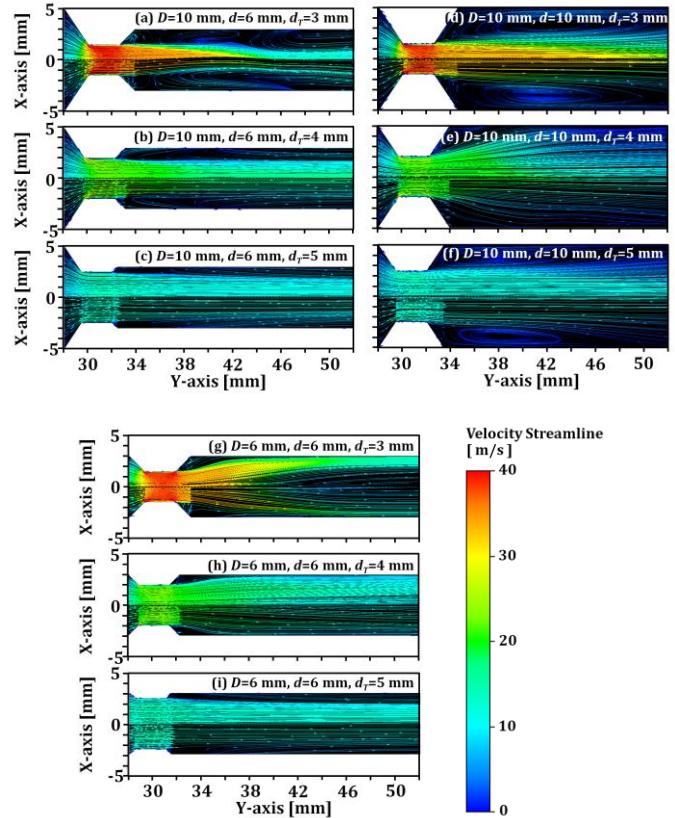
Fig.8 shows the shear stress at the throat wall within microbubble generator on the center plane along y-axis. The throat diameter is 3 mm has maximum shear stress between layers of the flow because in the velocity is higher

than other case of throat diameter. This shear stress will cut the air bubble to small size.



**Fig. 8** Contour of shear stress on the center plane of microbubble generator along y-axis

Fig.9 shows the velocity streamlines on the center plane of microbubble generator along y-axis. The reverse flow occurs at near wall region when the flow through the throat, especially with more different diameter of the inlet diameter and throat diameter. This reverse flow will be effect to pressure drop in nozzle.



**Fig. 9** Velocity streamline on the center plane of microbubble generator along y-axis

### 4. Conclusions

In this study, the flow characteristics in ejector type microbubble generator was studied using commercial software, ANSYS Ver.15.0 (Fluent). The main results can be concluded as follows:

- (1) The effect of the throat diameter ( $d_t$ ) at 3 mm as shown the value of maximum velocity and minimum pressure because the different diameter of the nozzle inlet diameter and the throat diameter is maximum.
- (2) The effect of the nozzle inlet diameter ( $D$ ) at 10 mm has to change the velocity and pressure rapidly. But at the nozzle inlet diameter ( $D$ ) is 6 mm and the throat diameter ( $d_t$ ) at 3 mm to minimum pressure when compared with  $D=10$  mm  $d_t=3$  mm at same position (throat region).

(3) For the position of air inlet is the lower pressure region or throat because this point air is sucked by the pressure different with atmosphere pressure.

## 5. Nomenclature

### Symbols

$CD_{k\omega}$	[-]	Cross-diffusion
$D$	[mm]	diameter of the nozzle inlet
$d$	[mm]	diameter of the nozzle outlet
$d_T$	[mm]	diameter of the throat
$k$	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	turbulent kinetic energy
$L$	[mm]	length of the nozzle inlet
$l$	[mm]	length of the nozzle outlet
$l_T$	[mm]	length of the throat
$P$	[Pa]	pressure
$Pr$	[-]	Prandtl number
$Pr_t$	[-]	turbulent Prandtl number
$Q_w$	[l/min]	water flow rate
$T$	[K]	temperature
$u$	[m/s]	velocity components ( $u; v; w$ ) in Cartesian directions: $x; y; z$

### Greek

$\mu$	[Pa·s]	viscosity
$\mu_t$	[Pa·s]	turbulent eddy viscosity
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematic viscosity
$\nu_t$	[m <sup>2</sup> /s]	turbulent kinematic viscosity
$\tau_w$	[N/m <sup>2</sup> ]	wall shear stress
$\omega$	[1/s]	specific dissipation rate
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	density
$\sigma_k$	[-]	turbulence Prandtl number for turbulence kinetic energy
$\sigma_\omega$	[-]	turbulence Prandtl number for specific dissipation rate
$\alpha, \beta, \beta^*$	[-]	turbulence model constant

### Subscripts

$i, j$	[-]	space components
--------	-----	------------------

## 6. Reference

- [1] Ohnari, H., Saga, T., Watanabe, K., Maeda, K., Maeda, K., 1999. High functional characteristics of micro-bubbles and water purification, *Resources Processing*, Vol. 46 (4), pp. 238–244.
- [2] Sadatomi, M., Kawahara, A., Kano, K. and Ohtomo, A., 2005, Performance of a new micro-bubble generator with a spherical body in a flowing water tube, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 29, pp. 615-623.
- [3] Sadatomi, M., Kawahara, A., Matsuura, H. and Shikatani, S., 2012, Micro-bubble generation rate and bubble dissolution rate into water by a simple multi-fluid mixer with orifice and porous tube, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 41, pp. 23–30.
- [4] Terasaka, K., Hirabayashi, A., Nishino, T., Fujioka, S., Kobayashi, D., 2011. Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge. *Chemical Engineering Science*, Vol. 66, pp. 3172-3179.
- [5] Mori, Y., 2015, Micro-bubble generator, United States Patent No. 9,061,256 B2.
- [6] Anderson, J.D., *Governing Equations of Fluid Dynamics*, In Anderson, J.D., Degrez, G.E., Degroote, J., et al. (eds.), *Computational Fluid Dynamics*, 3rd ed., chap. 2, Springer, Heidelberg, Germany, 2009
- [7] Baliga, B.R., Atabaki, N., *Control-Volume-Based Finite-Difference, and Finite-Element Methods*, In Minkowycz, W.J., Sparrow, E.M., Murthy, J.Y., (eds.), *Handbook of Numerical Heat Transfer*, 2nd ed., chap. 6, Wiley, Hoboken, New Jersey, 2009.
- [8] Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, chap. 2, Hemisphere Publishing Corp., Washington, D.C., 1980.
- [9] Menter, F.R., 1994. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol. 32(8), pp. 269-289.
- [10] Menter, F.R., Carregal Ferreira, J., Esch, T.M. and Konno, B., 2003. The SST turbulence model with improved wall treatment for heat transfer predictions in gas turbines, *International Gas Turbine Congress*, November 2-7, Tokyo.

ภาคผนวก จ.

บทความสำหรับเผยแพร่ 3

Application of microbubbles for cleaning coal powder

## Application of microbubbles for cleaning coal powder

Prapaipis Tawonsri, Somchai Saeung, and Chayut Nuntadusit\*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai,  
Songkhla 90110, Thailand

\*Corresponding author; E-mail: [chayut.n@psu.ac.th](mailto:chayut.n@psu.ac.th)

Received 31 October 2018; Revised 8 December 2018; Accepted 27 December 2018  
Published online 30 December 2018

### Abstract

It is known that Thailand has been using natural gas as its main fuel in producing electricity at the present time. A number of these reserved natural gases are likely to be dramatically decreased in the future. However, Thailand also has abundance of another fuel resource, which are the lignite coals that are considered lower quality but cheaper compared to other fuel resources. Even though lignite is not fully accepted and has bad reputation for its harmful impact on environment is being developed and used with clean coal technology in order to lower the pollution from the coal. This aims to study characteristics of bubbles produced by three different bubble generators: porous stones, ejector nozzle and pressure tank. Moreover, this study also investigates the result of coal cleaning by using the generated bubbles in order to carry the coal to the water surface. The result shows that the size of bubbles produced by porous material are appeared larger compares to the bubbles produced by the ejector nozzle combined with pressure tank are smallest. For the coal cleaning, it is found that the bubbles from the ejector nozzle combined with pressure tank can carry more coal powder to the water surface. In addition, flotation time also affects to remove sulfur and ash of the coal. The removal of sulfur content and ash content in coals, decreased with increasing flotation time. In addition, the fixed carbon and gross calorific value of the coals were increased with increasing flotation time.

**Keywords:** *bubble size, clean coal technology, coal, coal analysis, flotation column, microbubble generator*

### 1. Introduction

Coal has been used as a source of fuel for centuries. In addition, coal is found in prodigious amounts throughout the world and has lower cost as compared to other fossil fuels (Franco & Diaz, 2009). However, coal utilization has a few negative impacts on the environment. Coal is a complex chemical mixture composed of carbon, hydrogen, and dozens of trace elements. When coal is severed as a fuel source, some of these components would convert to gaseous emissions, such as sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), and other chemical by products through the coal combustion or thermal decomposition. These emissions have been established to possess harmful effects on the environment (He, Gu, Wang, & Zhang, 2017) and human health, which contributes to acid rain, greenhouse effect, and lung cancer (Longwell, Rubint, & Wilson, 1995; Beer, 2000). For these reasons, the introduction of environmentally friendly Clean Coal Technology (CCT) is one of our subjects of having more coal utilized.

Present commercial coal cleaning methods are mostly based on physical separation; chemical and biological methods tend to be more expensive. Typically, density separation is used to clean coarse coal while surface property-based methods are preferred for fine coal cleaning. In the density-based processes, coal particles are added to a liquid and then exposed to gravity to separate the organic-rich phase from the mineral-rich phase. In the surface property-based processes, pulverized coal is mixed with water and a little amount of collector reagent is added to increase the hydrophobicity of coal surfaces. Then, air bubbles are introduced in the presence of a frother to carry the coal particles to the top of the slurry, separating them from the hydrophilic mineral particles. Commercial surface property-based cleaning is completed through froth or column flotation (Ni et al., 2015; Park, Subasinghe, & Han, 2015; Bu, Zhang, Chen, Xie, & Peng, 2017; Babu, Patnaik, & Sunder, 2018; Bhunia, Kundu, & Mukherjee, 2018).

Microbubbles are the bubbles with diameter ranging from one to several hundred

microns, and they are characterized by a great interfacial area concentration per unit gas volume and low relative velocity between the bubbles and liquid phase (Maeda, Hosokawa, Baba, Tomiyama, & Ito, 2015). These characteristics are of huge applying in enhancement of adsorption of impurities at gas-liquid interface and mass transfer between the two phases (Takahashi et al., 2003; Takahashi, 2005). Microbubbles are, therefore, utilized to improve efficiencies and performances of various industrial systems such as water treatment systems (Chu, Xing, Yu, Sun, & Jurcik, 2008; Terasaka, Hirabayashi, Nishino, Fujioka, & Kobayashi, 2011; Rehman, Medley, Bandulasena, & Zimmerman, 2015), washing processes (Oliveira, Rodrigues, & Rubi, 2009), bathing systems (Tajima et al., 2008), chemical reactors (Matsumoto, Fukunaga, & On, 2010), medical systems (Kaneko et al., 2007) and plant cultivation (Park & Kurata, 2009). Since efficiencies and performances of these systems depend on the diameter and number density of microbubbles, it is essential to optimize them in development of the microbubble generators (Serizawa, Inui, Yashiro, & Kawara, 2003; Hirai, Komura, Saechout, & Sugiya, 2009) and to understand a mechanism of microbubble generation.

Various types of microbubble generators have been developed, and most of them can be classified into four methods, i.e., the method based on bubble breakup due to shear flow or pressure wave (Sadatomi, Kawahara, Kano, & Ohtomo, 2005; Fujiwara, Takagi, Watanabe, & Matsumoto, 2003), the method using ultrasonic wave (Makuta, Takemura, Hihara, Matsumoto, & Shoji, 2006; Thiemann, Nowak, Mettin, Holsteyns, & Lippert, 2011), the method using microfluidics technology (Xu, Li, Chen, & Luo, 2006; Arakawa, Yamamoto, & Shoji, 2008; Shintaku, Imamura, & Kawano, 2008) and the method based on bubbles of dissolved gas due to depressurization at a decompression nozzle (Fujikawa, Zhang, Hayama, & Peng, 2003; Hosokawa et al., 2010).

Meanwhile, coal cleaning by selective collection of an aqueous suspension of coal particles was demonstrated on a laboratory scale (Shen & Wheelock, 2000). The microbubbles were produced by saturating water with gas under pressure and then releasing the pressure as the water was agitated. Cyclo-microbubble flotation column is an advanced column flotation technology for fine coal cleaning developed (Li,

Tao, Ou, & Liu, 2003). It combines cyclone separation with column flotation to enhance pyritic sulfur rejection and separation efficiency. The cyclo-microbubble flotation column has been successfully employed to recover fine coal from discarded waste ponds and replace conventional mechanical cells. Froth flotation is used in the coal industry to clean a fine coal (Tao, Yu, Zhou, Honaker, & Parekh, 2008). A fundamental analysis has shown that use of picobubbles can significantly improve the flotation recovery of particles by increasing the probability of collision and attachment and reducing the probability of detachment. The experimental results have shown that the use of picobubbles in a column flotation increased the combustible recovery. The amenability of beneficiating a fine hard coal using column flotation has been studied using a CoalPro flotation column. Column flotation is capable of producing an acceptable clean coal concentrate of 85% combustible recovery with 81% ash rejection at maximum separation efficiency of 62%, compared to conventional flotation which has 70% recovery with 70% ash rejection at an efficiency of 42% (Han, Kim, Kim, Subasinghe, & Park, 2014).

However, under the former condition, there is a limitation because a high energy consumption to generate microbubbles and high cost for design. Consequently, it is cause of not widely used in the industry. In order to solve these problems, three types of microbubble generators were tested in order to observe how the factor affects the generation of microbubbles by using a shear flow method of microbubble generators, which for decreases the energy consumption and reduced cost for design. Furthermore, experiments on microbubble generators implementation in coal cleaning to remove excessive impurities for efficient and environmentally safe utilization of coal.

## 2. Objectives

This study was aimed at enhancing recovery of fine coal sample using a specially designed flotation column featuring a microbubble generator. Several kinds of the microbubble generators were also evaluated based on the size of bubbles suitable for the impurities removed from the coal.

## 3. Materials and methods

### 3.1 Microbubble generators



Figure 1 shows the three types of bubble generators used in this study. The air is introduced through small holes in an air diffuser or porous stones (Figure 1(a)), setting at the bottom of column, and the flow of the bubbles is controlled by a rotameter. However, there is a limit in the size of the bubbles produced by such methods.

In Figure 1(b), the ejector nozzle can be made with PVC pipes, the inlet and outlet diameters were 1 inch, the throat diameter is  $\frac{1}{2}$  inch. At the throat portion of the ejector nozzle,  $\frac{1}{4}$  inch diameter air hole was drilled through the wall. When the water flow passing through the throat of the ejector, the velocity is accelerated which creates a low pressure zone that draws in and entrains a suction air. The shearing of air–water mixture in turbulent flow creates the microbubbles.

In addition, the ejector nozzle can be used with pressure tank (see Figure 1(c)), the air is dissolved in the liquid into a tank by pressurizing the air-liquid mixture. When this supersaturated liquid is flashed using a reducing valve, microbubbles are generated. The size and number of the microbubbles depend on the pressure in the pressure tank and the decompression process.

### 3.2 Experimental setup

A schematic diagram of the experimental setup is shown in Figure 2. It consisted of column flotation, a microbubble generator, rotameter for air, rotameter for water, a high pressure pump and a pressure tank.

All experiments were carried out in a 28 L column flotation with glass walls (12.5 cm wide, 30 cm long and 75 cm high). The middle portion of column has a glass plate with a width of 12.5 cm and a thickness of 0.6 cm above the base of column 5 cm but the glass plate high varied 35 cm and 50 cm. To ease clean coal collection, a glass with a platform was mounted at the top of the column flotation. Half the surface of the platform was leveled with the top end of the column flotation, and the other half was an inclined channel so that liquid or coal could easily flow out of the column for coal collection. The microbubble generators used in the experiments as shown in Figure 1, the air flow rate is measured by an air rotameter and controlled by a valve. The water in the experimental setup was recirculated by a high pressure pump, and a water rotameter was used to measure discharge.

### 3.3 Measurement of the size of microbubbles

The diameter of the microbubbles produced at different liquid pressure and air flow rates were measured. The schematic diagram for measuring bubble diameter is shown in Figure 3. Air was introduced into water at the bottom of a column flotation. Produced microbubbles were introduced into a bubble chamber, which a glass plate 0.2 cm thickness, 12 cm wide and 16 cm long. The space between the 2 glasses 0.2 cm for the small bubbles can be trapped in a bubble chamber. Bubble diameters were determined by analyzing bubble pictures captured from a digital microscope camera, which set at the top of chamber. For analysis, images processing method the MATLAB software was used.

Image processing method via MATLAB coding was employed to average the bubble diameter from the picture that captured from digital microscope camera. In this process, transforming the original images to grayscale images is shown in Figure 4(a). Next, the gray levels of target object (bubbles) and background are very different. It is easy to accomplish the image with a direct threshold, just as shown in Figure 4(b). Then, the image was directly used to detect the bubble edge for determine the diameter of each bubble as shows in Figure 4(c). Finally, the results of average diameter of bubbles was calculated by dividing the number of bubbles as shows in Figure 4(d). An average diameter of bubbles was received from 10 pictures.

### 3.4 Materials and methods

Lignite coal samples used in this study were obtained from Mae Moh Mine, Lampang, Thailand. The coal samples was first crushed in a jaw crusher and then further crushed in a hammer crusher. Finally, a gyratory crusher was used to grind the coal samples to a finer size. After crushing and grinding, the coal was screened with sieve and shaker to about 250  $\mu\text{m}$  to be used as a feed in all flotation experiments. Then stored in plastic bags until required for flotation tests.

Prior to each test, the flotation feed was conditioned at 50% solids (consist of coal and water). Then add kerosene used as collector to enhance the hydrophobicity of the coal particle surfaces into the flotation feed. Conditioning was conducted in a conditioning tank that was equipped with a motor and three blades placed vertically of the tank. The impeller rotation speed was kept constant at 620 rpm.

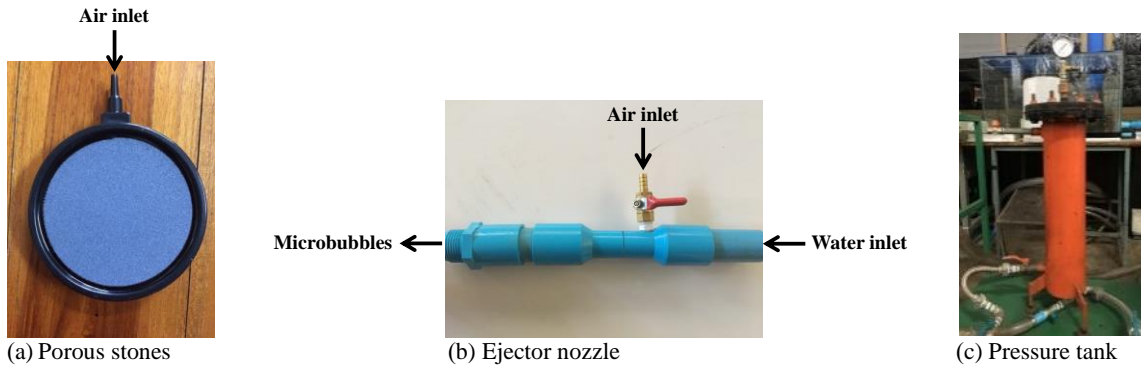


Figure 1 Microbubble generators

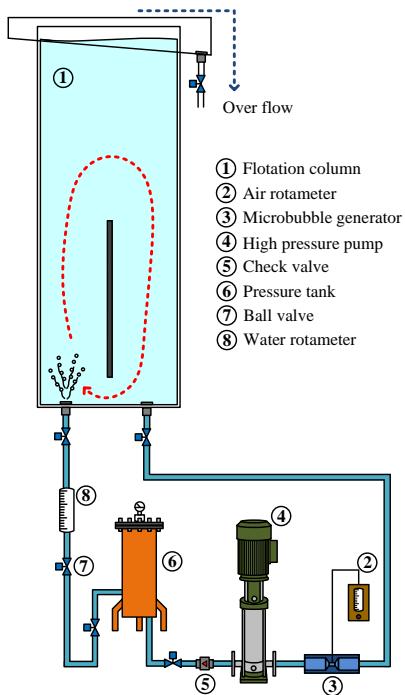


Figure 2 Experimental setup

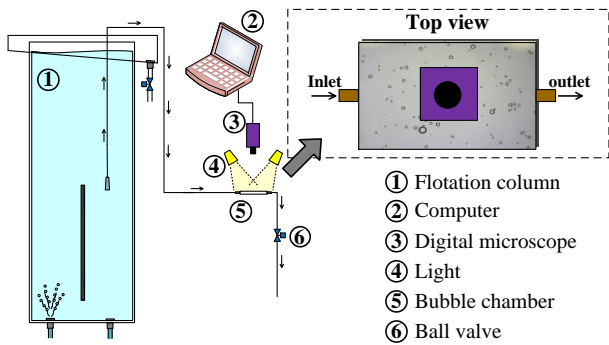
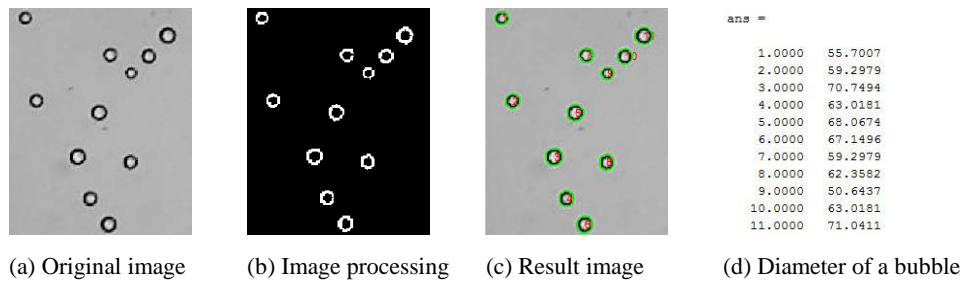


Figure 3 Experimental apparatus for the measurement of bubble diameter



**Figure 4** Bubble image processing via MATLAB software

At the beginning of the experiments, tap water was added into the flotation column from the top to the desired level. Flotation was started with generating bubbles. Water flow rate and air flow rate were kept constant. Pine oil was mixed thoroughly as the flotation frother. The feed slurry entered the column in the upper portion of the flotation column, 45 cm below the overflow lip. After being fed into the column, the clean coal is

concentrated by rising bubbles ascend to the top and the tailings coal is gathered at the bottom of the flotation column. The concentrate and tailings products were collected and dried in the hot air dryer at 110°C for 24 hours. Experiments were carried out at different flotation times keeping all other parameters constant. The details of these experiments are shown in Table 1.

**Table 1** Experimental details for coal cleaning

Parameter	Value
Coal size	< 250 microns
Collector dosage (kerosene)	8 kg/t
Frother dosage (pine oil)	0.15 kg/t
Impeller speed	620 rpm
Conditioned time	5 minutes
Water flow rate	20 l/min
Air flow rate	0.7 l/min
Feed position (below the overflow lip)	45 cm
Flotation time	30, 60, 90, 120, and 150 minutes
Drying temperature	110°C

#### 4. Results

##### 4.1 Comparison of bubbles generated by the microbubble generators

Figure 5 shows the photographs of bubbles from each generator. Comparison of bubbles generated by the microbubble generators: porous stones, ejector nozzle and ejector nozzle combine with pressure tank. In the experimental, the water flow rate and air flow rate were kept constant at 50 l/min and 0.7 l/min, respectively. It is clearly seen that each generator can generate the fine bubble but there were differences in terms of size and quantity of bubbles. For case of compressing the air through the porous stone, there

is a large bubble and present near to the generator only. The bubble cannot be circulated or accumulated in water for a long of times. While the bubbles from the ejector nozzle are smaller when compare with the bubbles from porous stone. In addition, the bubbles from using the ejector nozzle combine with pressure tank are the smallest. The water becomes milky due to the presence of a lot of fine microbubbles.

Average diameter of the bubbles generated from porous stones, ejector nozzle and ejector nozzle combine with pressure tank were 385 µm, 57 µm and 54 µm, respectively.

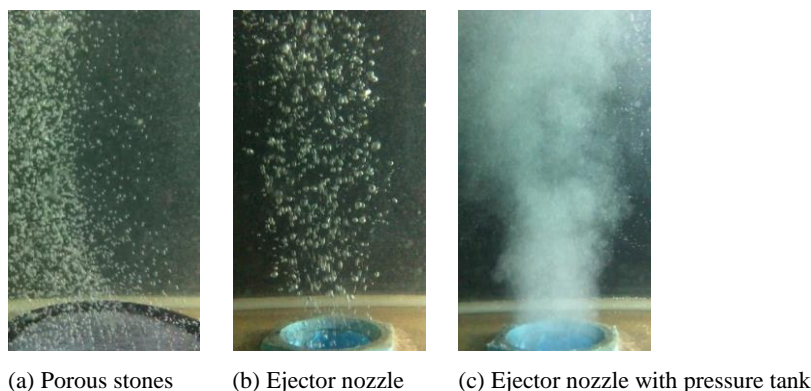


Figure 5 Comparison of the bubble from the microbubble generators

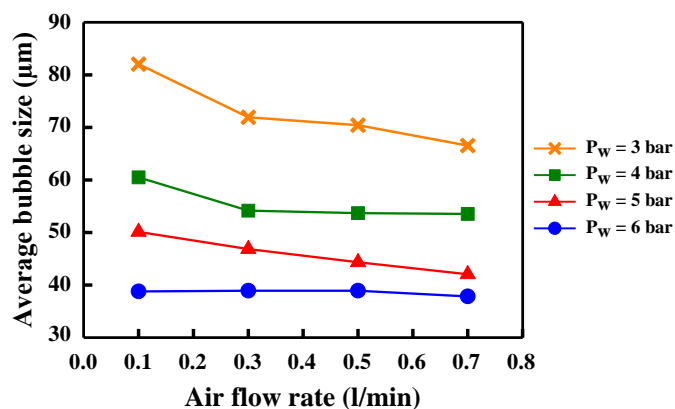


Figure 6 Relations between mean diameter of bubbles and air flow rate for different water pressures

#### 4.2 Effect of pressure on bubble size from ejector nozzle and pressure tank

Figure 6 shows the effect of air flow rate on the mean diameter of bubbles for different water pressures ( $P_w$ ). The ejector nozzle combined with the pressure tank are used because it is expected to increase the number density of bubbles formed in the flotation column. Under a given air flow rate, the mean diameter decreases with the increase of the water pressure. For a low water pressure, the mean diameter increases sharply. But for a higher water pressure, it increases slowly. Thus, it is important to increase the water pressure in order to enhance the number density by increasing the air flow rate and suppress the average diameter of bubbles.

#### 4.3 Effect of flotation times for coal cleaning

In the experiment, it uses an ejector nozzle combined with a pressure tank to generate bubbles. The microbubbles will increase the probability of collision and reducing the probability of detachment. The flotation times varied at 30, 60, 90, 120 and 150 minutes. The results show that flotation time at 30 minutes, the maximum coal concentrate was 495.6 g. When the flotation time increased from 60 to 150 minutes, the coal concentrate was decreased to 432.4, 375.2, 325.8, 242.8 g, respectively. The water and bubbles effect to the coal concentrate on the water surface recirculated to the bottom of the column.

Finally, the coal concentrate and tailings were proximate analyzed to determine the amount of residual components after cleaned and separated

including sulfur, ash, volatile matter, fixed carbon, gross calorific value. The proximate analysis of coal samples as shown in Table 2.

The results show proximate analysis (dry basis) of the components in coal, which raw coal and cleaned coal (consist of concentrate and tailing). The effects of flotation time on removed sulfur and ash of the coal sample in the interval 30-150 minutes are shown in Table 1. These experiments were performed with samples of concentrate coals and tailing coals. The results showed that the removal of sulfur content in the concentrate coals and tailing coals, decreased with increasing flotation time. The concentrate coals at 10.2% sulfur content was achieved at 150 minutes of flotation time. While the tailing coals at 7.1% sulfur content was achieved at 120 minutes of flotation time.

For ash content in coal, the results show that in the concentrate coals and tailing coals were

decreased slightly with increasing flotation time. The coal powders entrapped in the froth were removed with an increase in flotation time, thereby decreasing the ash content of the clean coal. The concentrate coals at 20.3% ash content at 60 minutes of flotation time. While in the tailing coals at 20.5% ash content at 150 minutes of flotation time.

In addition, volatile matter in concentrate coals and tailing coals are increased slightly with flotation time about 3.2-3.4% at 60 minutes of flotation time.

Finally, the fixed carbon of clean coal increased along with the gross calorific value, with an increase of the flotation time. The concentrate coals reached 49.6% of fixed carbon and gross calorific value of 22.3% at 60 minutes of flotation time. In addition, the tailing coals reached 48.0% of fixed carbon and gross calorific value of 21.7% at 150 minutes of flotation time.

**Table 2** Proximate analysis of raw coals, concentrate coals and tailing coals, dry basis (db), -250 µm

Coal sample	Flotation time (minutes)	Sulfur (wt. %)	Ash (wt. %)	Volatile matter (wt. %)	Fixed carbon (wt. %)	Gross calorific value (MJ/kg)	(kcal/kg)
Raw coals	-	7.91	42.11	43.00	14.89	15.09	3606
Concentrate coals	30	8.79	35.25	42.58	22.16	18.45	4410
	60	7.89	33.56	44.16	22.28	18.37	4391
	90	7.57	35.65	43.36	20.98	17.89	4276
	120	7.61	41.85	41.68	16.47	15.09	3608
	150	7.10	36.73	44.38	18.89	17.16	4101
Tailing coals	30	7.54	36.30	44.45	19.25	17.25	4122
	60	7.50	37.26	43.06	19.66	17.02	4069
	90	7.68	37.82	43.78	18.40	16.72	3996
	120	7.35	34.79	43.98	21.23	17.59	4204
	150	7.73	33.49	44.47	22.04	18.37	4391

(Laboratory Section, Geology Department, Mae Moh Mine Planning and Administration Division, EGAT)

## 5. Conclusion

The following major conclusions can be shown by this study:

1. The size of the bubbles generated from porous stone is larger than the ejector nozzle. In addition, using ejector nozzle combined with the pressure tank will generate the bubbles are smallest.

2. The bubble size decreased with increasing the pressure of the water in pressure tank. On the other hand, the number of the bubbles increased with increasing the water pressure.

3. The small bubbles or microbubble can

increase the probability of collision between the coal particles and bubbles. So the amount of concentrate coal has increased.

4. Flotation time affects to remove sulfur and ash of the coal. The removal of sulfur content in coals, decreased with increasing flotation time. Also, ash content decreased with increasing flotation time. In addition, the longer flotation time has the effect that the microbubbles stay for a longer time in the water. Microbubbles can be attributed to the high collision probability, high attachment probability and low detachment probability because of the introduction of the hydrophobic attractive force.

## 6. Acknowledgements

This research was supported by faculty of engineering, Prince of Songkla University. Many thanks go to Mae Moh mine, Lampang, Thailand.

## 7. References

- Arakawa, T., Yamamoto, Y., & Shoji, S. (2008). Micro-bubble formation with organic membrane in a multiphase microfluidic system, *Sensors and Actuators A Physical, A 143* (1), 58-63. DOI: 10.1016/j.sna.2007.06.038
- Babu, K. P., Patnaik, K. S. K. R., & Sunder, R. S. (2018). Effects of operating parameters on recovery of non floatable coal by column flotation. *International Journal of Applied Engineering Research 13*(12), 10462-10469.
- Beer, J. M. (2000). Combustion technology developments in power generation in response to environmental challenges. *Progress in Energy and Combustion Science, 26*(4-6), 301-327. DOI: 10.1016/S0360-1285(00)00007-1
- Bhunja, K., Kundu, G., & Mukherjee, D. (2018). Performance, mixing and kinetics study in the flotation column reactor using coal, *Separation Science and Technology, 53*(18), 2998-3007, DOI: 10.1080/01496395.2018.1490323
- Bu, X., Zhang, T., Chen, Y., Xie, G., & Peng, Y. (2017). Comparative study of conventional cell and cyclonic microbubble flotation column for upgrading a difficult-to-float Chinese coking coal using statistical evaluation. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, DOI: 10.1080/19392699.2017.1359577.
- Chu, L.-B., Xing, X.-H., Yu, A.-F., Sun, X.-L., & Jurcik, B. (2008). Enhanced treatment of practical textile wastewater by microbubble ozonation. *Process Safety and Environmental Protection, 86*(5), 389-393.
- Franco, A., & Diaz, A. R. (2009). The future challenges for clean coal technologies: joining efficiency increase and pollutant emission control. *Energy, 34*(3), 348-354.
- Fujikawa, S., Zhang, R., Hayama, S., & Peng, G. (2003). The control of micro-air bubble generation by a rotational porous plate. *International Journal of Multiphase Flow, 29*(8), 1221-1236. DOI: 10.1016/S0301-9322(03)00106-X
- Fujiwara, A., Takagi, S., Watanabe, K., & Matsumoto, Y. (2003). Experimental study on the new micro-bubble generator and its application to water purification system. in: *Proc. ASME/JSME 4th Joint Fluids Summer Engineering Conference, FEDSM 2003-45162*, 469-473. DOI: 10.1115/FEDSM2003-45162
- Han, O. H., Kim, M. K., Kim, B. G., Subasinghe, N., & Park, C. H. (2014). Fine coal beneficiation by column flotation. *Fuel Processing Technology, 126*, 49-59.
- He, F., Gu, L., Wang, T., & Zhang, Z. (2017). The synthetic geo-ecological environmental evaluation of a coastal coal-mining city using spatiotemporal big data: A case study in Longkou, China. *Journal of Cleaner Production, 142*(Part 2), 854-866. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.011>
- Hirai, S., Komura, M., Saechout, V., & Sugiya, S. (2009). Development of high density micro-bubble generator for environmental technology. *Electronics and Electrical Engineering, 4*(92), 37-40.
- Hosokawa, S., Tanaka, K., Maeda, Y., Tomiyama, A., Yamaguchi, A., & Ito, Y. (2010). Effect of entrained air bubbles generated by a pressurized dissolution method. *Trans. JSME, B 76*(765), 53-60.
- Kaneko, Y., Maruyama, T., Takegami, K., Watanabe, T., Mitsui, H., Hanajiri, K., . . . Matsumoto, Y. (2007). Use of a microbubble agent to increase the effects of high intensity focused ultrasound on liver tissue. *European radiology, 15*(7), 1415-1420. DOI: 10.1007/s00330-005-2663-7
- Li, B., Tao, D., Ou, Z. & Liu, J. (2003). Cyclo-microbubble column flotation of fine coal. *Separation science and technology, 38*(5), 1125-1140.
- Longwell, J. P., Rubint, E. S., & Wilson, J. (1995). Coal: energy for the future. *Progress in Energy and Combustion Science, 21*(4), 269-360. DOI: 10.1016/0360-1285(95)00007-0
- Maeda, Y., Hosokawa, S., Baba, Y., Tomiyama, A., & Ito, Y. (2015). Generation mechanism of micro-bubbles in a pressurized dissolution method.

- Experimental Thermal and Fluid Science*, 60, 201-207.
- Makuta, T., Takemura, F., Hihara, E., Matsumoto, Y., & Shoji, M. (2006). Generation of micro gas bubbles of uniform diameter in an ultrasonic field. *Journal of Fluid Mechanics*, 548, 113-131.
- Matsumoto, M., Fukunaga, T., & Onoe, K. (2010). Polymorph control of calcium carbonate by reactive crystallization using microbubble technique. *Chemical Engineering Research and Design*, 88(12), 1624-1630.
- Ni, C., Xie, G., Liu, B., Peng, Y., Sha, J., & Xia, W. (2015). A design of an inclined froth zone in column flotation device to reduce ash content in clean coal. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 35(6), 281-294. DOI:10.1080/19392699.2015.1019065
- Oliveira, C., Rodrigues, R. T., & Rubi, J. (2009). A new technique for characterizing aerated flocs in a flocculation - microbubble flotation system. *International Journal of Mineral Processing*, 96, 36-44. DOI: 10.1016/j.minpro.2010.07.001
- Park, C. H., Subasinghe, N., & Han, O. H. (2015). Amenability testing of fine coal beneficiation using laboratory flotation column. *Materials Transactions*, 56(5), 766-773. DOI: 10.2320/matertrans.M2014462
- Park, J. S., & Kurata, K. (2009). Application of microbubbles to hydroponics solution promotes lettuce growth. *Hort Technology*, 19(1), 212-215.
- Rehman, F., Medley, G. J. D., Bandulasena, H., & Zimmerman, W. B. J. (2015). Fluidic oscillator-mediated microbubble generation to provide cost effective mass transfer and mixing efficiency to the wastewater treatment plants. *Environmental Research*, 137, 32-39. DOI: 10.1016/j.envres.2014.11.017
- Sadatomi, M., Kawahara, A., Kano, K., & Ohtomo, A. (2005). Performance of a new microbubble generator with a spherical body in a flowing water tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29(5), 615-623. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2004.08.006
- Serizawa, A., Inui, T., Yashiro, T., & Kawara, Z. (2003). Laminarization of micro-bubble containing milky bubbly flow in a pipe. *in: 3rd European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting, Certosa di Pontignano*, 21-27.
- Shen, M., & Wheelock, T. D. (2000). Coal agglomeration with microbubbles. *Coal preparation*, 21, 277-298.
- Shintaku, H., Imamura, S., & Kawano, S. (2008). Microbubble formations in MEMS-fabricated rectangular channels: a high-speed observation. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32(5), 1132-1140. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2008.01.004
- Tajima, K., Tanaka, M., Mizuno, K., Okada, N., Rokushima, K., & Watanabe, Y. (2008). Effects of bathing in micro-bubbles on recovery from moderate mental fatigue. *Ergonomia IJE&HF* 30(2), 137-147.
- Takahashi, M., Kawamura, T., Yamamoto, Y., Ohnari, F., Himuro, S., & Shakutui, S. (2003). Effect of shrinking micro-bubble on gas hydrate formation. *Journal of Physical Chemistry B*, 107(10), 2171-2173. DOI: 10.1021/jp022210z
- Takahashi, M. (2005). Zeta potential of micro-bubble in aqueous: electrical properties of gas-water interface. *Journal of Physical Chemistry B*, 109 (46), 21858-21864. DOI: 10.1021/jp0445270
- Tao, D., Yu, S., Zhou, X., Honaker, R. Q., & Parekh, B. K. (2008). Picobubble column flotation of fine coal. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 28(1), 1-14.
- Terasaka, K., Hirabayashi, A., Nishino, T., Fujioka, S., & Kobayashi, D. (2011). Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge. *Chemical Engineering Science*, 66(14), 3172-3179. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.02.043>
- Thiemann, A., Nowak, T., Mettin, R., Holsteyns, F., & Lippert, A. (2011). Characterization of an acoustic cavitation bubble structure at 230 kHz, *Ultrasonics sonochemistry*, 18(2), 595-600. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2010.10.004
- Xu, J. H., Li, S. W., Chen, G. G., & Luo, G. S. (2006). Formation of monodisperse microbubbles in a microfluidic device. *American Institute of Chemical Engineers AIChE J.*, 52(6), 2254-2259. <https://doi.org/10.1002/aic.10824>

ภาคผนวก ฉ.

บทความสำหรับเผยแพร่ 4

การประยุกต์ใช้ฟองขนาดเล็กสำหรับล้างทำความสะอาดผนัง





FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

## การประยุกต์ใช้ฟองขนาดเล็กสำหรับล้างทำความสะอาดผงถ่านหิน

### Application of Microbubbles for Cleaning Coal Powder

ประไพพิศ ทาวอนศรี สมชาย แซ่เอ็ง มั๊กตาร์ 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 โดยใช้ผงถ่านหิน ลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะที่มีขนาดเล็กกว่า 250 ไมครอน ล้างและแยกโดยใช้ฟองอากาศขนาดเล็กระดับ ไมครอนที่สร้างจากหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ ซึ่งในการทดลองฟองอากาศที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ในช่วง 54-57 ไมครอน และในการศึกษาล้างและแยกถ่านหิน พบว่าฟองอากาศขนาดเล็กสามารถจับกับผง ถ่านหินและลอยขึ้นสู่น้ำได้ 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 ซึ่งในอนาคตปริมาณเชื้อเพลิงสำรองของก๊าซธรรมชาติเหล่านี้มีแนวโน้มที่ลดลงไม่เพียงพอต่อการใช้งานในประเทศ 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 กระบวนการเพื่อลดปริมาณกำมะถันและซีเ็ก้า แบ่งออกเป็น 3 วิธี ได้แก่

(1) การทำความสะอาดโดยวิธีทางกายภาพ (Physical cleaning or Washing) เป็นการแยกสารที่ไม่ต้องการ เช่น ผุละลาย ดิน หิน และสารประกอบอนินทรีย์ออกจากเนื้อถ่านหิน โดยใช้ความแตกต่างของความหนาแน่นของถ่านหินกับสารเหล่านี้ นอกจากนี้ คอลัมน์สำหรับลอยแร่ (Flotation column) ยังเป็นวิธีทำความสะอาดถ่านหินอีกวิธี ซึ่งอาศัยหลักการที่ผงถ่านหินมีคุณสมบัติทางเคมี คือ ความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และสามารถยึดติดกับฟองอากาศได้ โดยเมื่อให้ฟองอากาศเคลื่อนที่ผ่านผงถ่านหินและน้ำที่บรรจุในคอลัมน์ ผงถ่านจะติดขึ้นไปกับฟองอากาศ ทั้งให้สารประกอบอนินทรีย์และแร่ธาตุต่างๆ จมอยู่ชั้นล่าง

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

(3) การทำความสะอาดโดยวิธีทางเคมี (Chemical cleaning) เป็นการใส่สารเคมีที่มีคุณสมบัติชะล้างแร่ธาตุและกำมะถันอินทรีย์ ซึ่งไม่สามารถกำจัดได้โดยวิธีทางกายภาพ ในการทำปฏิกิริยากับผงถ่านหินเพื่อกำจัดกำมะถันและซีเ็ก้า

สำหรับอุปกรณ์ในการล้างถ่านหินที่เรียกว่า คอลัมน์ลอยแร่ (Flotation column) มีลักษณะเป็น

หอตระกอนลอย แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนล่าง ติดตั้งตัวกำเนิดฟองและท่อระบายน้ำทิ้ง ส่วนกลาง เป็นคอลัมน์ทำหน้าที่ล้างผงถ่านหินและฟองอากาศ จะลอยสู่ด้านบนพร้อมกับดักจับอนุภาคผงถ่านหิน ส่วนบนสุดผงถ่านหินขนาดเล็กที่สะอาดจะรวมตัวกัน ก่อนที่จะล้นไหลออกนอกหอตระกอนลอย โดยด้านบน จะมีการป้อนผงถ่านโคลล์มันน์ ซึ่งขนาดและจำนวน ของฟองอากาศจะมีผลต่อความสามารถดักจับผงถ่าน ขนาดต่างๆ โดยฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่จะสามารถ ดักจับอนุภาคถ่านหินที่มีขนาดใหญ่ได้ แต่ไม่สามารถ ดักจับผงถ่านที่มีขนาดเล็กได้

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

ปัจจุบันถ่านหินที่ได้จากการขุดเหมืองต้องผ่านการล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเพื่อล้างสิ่งสกปรก ออกจากถ่านก่อนเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ ใน การบำบัดน้ำทิ้ง ถ่านหินที่ผสมอยู่ในน้ำทิ้งที่มีขนาด ค่อนข้างหยาบจะสามารถกรองแยกออกจากน้ำได้ง่าย แต่ผงถ่านหินที่มีขนาดเล็กในช่วง 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 สำหรับการทำความสะอาดผงถ่านหิน และแยกผงถ่านหินในคอลัมน์ลอยแร่ (Flotation column) นอกจากนี้ยังออกแบบให้คอลัมน์เป็นระบบ น้ำไหลวน เพื่อเพิ่มระยะเวลาให้ฟองอากาศขนาดเล็ก สามารถอยู่ในน้ำได้นานขึ้น และเพิ่มความสามารถใน การล้างและแยกผงถ่านหินที่มีขนาดอนุภาคเล็กได้ อย่างมีประสิทธิภาพ

## 2. วิธีการวิจัย

### 2.1 รายละเอียดตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก

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



(ก) วัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน

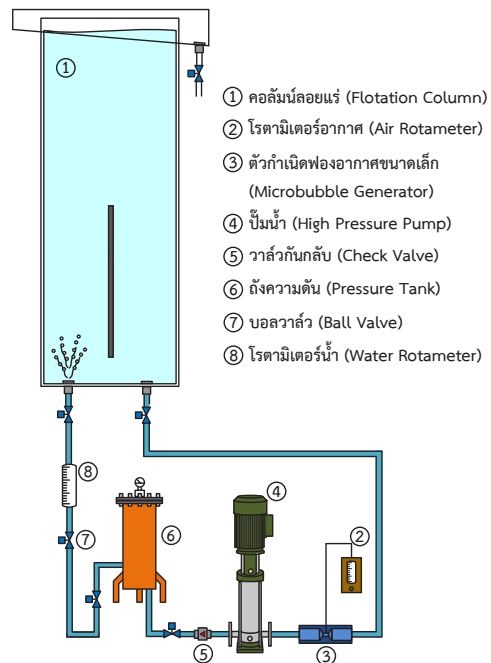


(ข) หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์

รูปที่ 1 รูปแบบตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก

## 2.2 รายละเอียดชุดทดลองสำหรับการล้างถ่านหิน

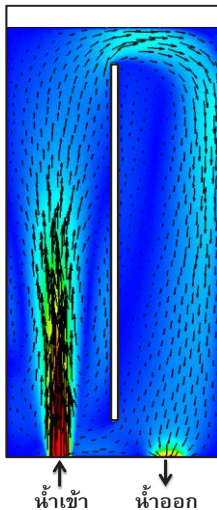
รูปที่ 2 แสดงแผนภาพชุดทดลองสำหรับการล้างและแยกผงถ่านหิน ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ คอลัมน์ลอยแร่แบบไหลวนและชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก สำหรับคอลัมน์ลอยแร่เป็นตู้สี่เหลี่ยมทำจากกระจกใส ขนาดความกว้าง 12.5 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร และสูง 75 เซนติเมตร ตรงกลางติดแผ่นกั้นขนาดความกว้าง 12.5 เซนติเมตร ใต้เหนือฐานของคอลัมน์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



รูปที่ 2 แผนภาพชุดทดลองสำหรับการล้างและแยกผงถ่านหิน

สำหรับชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กประกอบด้วย หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ซึ่งทำหน้าที่ดึงอากาศเข้าในระบบ โดยอัตราการไหลของอากาศสามารถควบคุมโดยโรตารีเมเตอร์ที่มีวาล์วปรับอัตราการไหล บีมน์น้ำทำหน้าที่เพิ่มความดันน้ำสะสมในถังความดัน ก่อนที่จะไหลผ่านโรตารีเมเตอร์สำหรับวัดและควบคุมอัตราการไหลของน้ำ

รูปที่ 3 แสดงเวกเตอร์ความเร็วและการกระจายความเร็วของน้ำภายในคอลัมน์ลอยแร่ที่ใช้ในการศึกษา พบว่าเกิดการหมุนเวียนของน้ำในคอลัมน์ น้ำบางส่วนจะไหลสู่ทางออกของคอลัมน์ แต่บางส่วนจะถูกดึงโดยการไหลของน้ำจากท่อทางเข้าเกิดการไหลเวียนในคอลัมน์ต่อไป



รูปที่ 3 ลักษณะการไหลวนของน้ำในคอลัมน์ลอยแร่

### 2.3 ขั้นตอนสำหรับล้างถ่านหิน

ในการทดลองล้างถ่านหินจะใช้คอลัมน์ลอยแร่แบบไหลวน ซึ่งถ่านหินจะถูกป้อนจากตำแหน่งบนสุดของคอลัมน์ เมื่อล้างได้ตามเวลาที่กำหนดแล้ว จะเก็บถ่านหินส่วนที่ลอยขึ้นสู่อ่างน้ำด้านบนหรือหัวแร่

(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

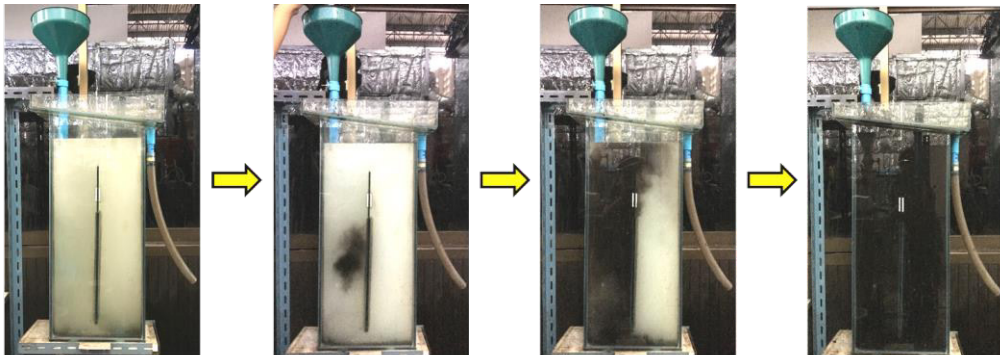
น้ำมันก๊าดซึ่งเป็นสารเคลือบผิวแร่ปริมาณ 30 กรัม แล้วกววนต่ออีก 2 นาที

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 แสดงขั้นตอนการล้างและแยกถ่านหิน 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) การสเปรย์น้ำบนหัวแร่เพื่อชะล้างมลทิน (ค) กวาดหัวแร่ใส่ภาชนะ

รูปที่ 5 ลักษณะการลอยและการเก็บหัวแร่

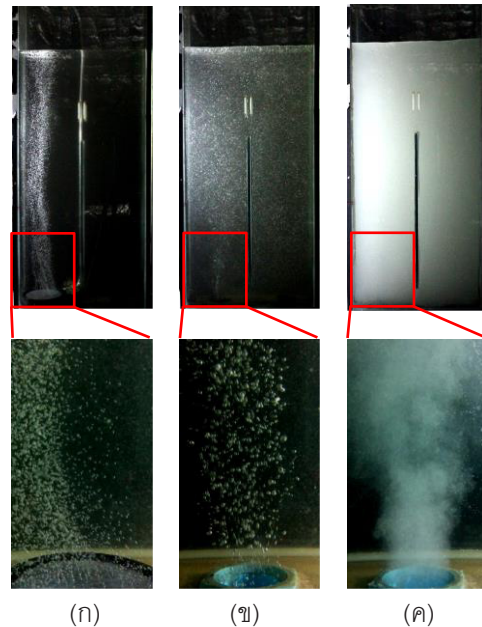
### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 ภาพถ่ายเปรียบเทียบลักษณะฟองอากาศที่เกิดจากตัวกำเนิดฟอง

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

ส่วนการวัดขนาดของฟองอากาศที่ได้จากตัวกำเนิดรูปแบบต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ พบว่าการอัดอากาศผ่านวัสดุพอร์นหรือหัวทราย ฟองอากาศที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 385 ไมครอน ส่วนฟองอากาศที่ได้จากหัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์และการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน มีขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ที่ 54 ไมครอน และ 57 ไมครอน ตามลำดับ



รูปที่ 6 ลักษณะการเกิดฟองจากตัวกำเนิดฟองอากาศ

(ก) วัสดุพอร์นหรือหัวทรายแบบจาน,

(ข) หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์

และ (ค) หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังอัดความดัน

#### 3.2 การศึกษาลักษณะการลอยของถ่านหินที่เงื่อนไขการปรับสภาพผิวต่างๆ

ในส่วนนี้จะทดลองเปรียบเทียบลักษณะการลอยของถ่านหินที่เงื่อนไขการปรับสภาพที่แตกต่างกัน โดยใช้ผงถ่านหินขนาด 250 ไมครอน ลอยในน้ำปริมาตร 200 มิลลิลิตร ที่เงื่อนไขการปรับสภาพผิวถ่านตามรายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** รายละเอียดและเงื่อนไขที่ใช้เปรียบเทียบการลอยของถ่านหิน

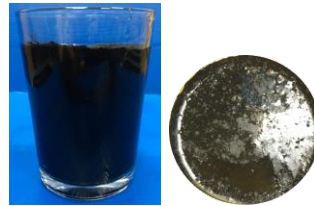
ตัวอย่าง	การปรับสภาพผิวถ่าน	น้ำที่ใช้ลอยถ่าน
ก	ไม่ปรับสภาพ	น้ำเปล่า
ข	ปรับสภาพด้วยสารเคลือบผิวแร่	น้ำเปล่า
ค	ปรับสภาพด้วยสารเคลือบผิวแร่	น้ำที่มีฟองอากาศขนาดเล็กและเพิ่มสารเคลือบฟอง

จากการทดลองพบว่า เมื่อเทถ่านหินที่ไม่ผ่านการปรับสภาพลงไปใต้น้ำเปล่า รูปที่ 7(ก) ถ่านจะลอยอยู่บนผิวน้ำ เนื่องจากผิวถ่านหินมีคุณสมบัติไม่เปียกน้ำหรือความตึงผิวที่สูง ดังนั้นถ่านหินจึงไม่สามารถจมและผสมกับน้ำได้ ส่งผลให้จับกลุ่มกันลอยอยู่เหนือผิวน้ำ ส่วนในรูปที่ 7(ข) แสดงให้เห็นว่าถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยสารเคลือบผิวแร่ (น้ำมันก๊าด) จากนั้นนำไปลอยใต้น้ำเปล่าที่ไม่มีฟองอากาศขนาดเล็ก พบว่าถ่านหินจะจมลงด้านล่างภาชนะ เนื่องจากไม่มีฟองอากาศเป็นตัวจับและพยุงถ่านหินให้ลอยขึ้นบนผิวน้ำ ส่วนถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคลือบผิวแร่ นำไปลอยใต้น้ำที่มีฟองอากาศขนาดเล็กและเพิ่มสารเคลือบฟอง (น้ำมันสน) เพื่อช่วยให้ฟองอากาศมีความเหนียวและไม่แตกง่าย แสดงในรูปที่ 7(ค) พบว่าถ่านหินลอยขึ้นสูผิวน้ำได้ เป็นผลมาจากฟองอากาศขนาดเล็กสามารถจับกับถ่านหินและช่วยพยุงถ่านหินให้ลอยขึ้นบนผิวน้ำ

ดังนั้นในการทดลองล้างและแยกถ่านหินควรจะปรับสภาพของผิวแร่ก่อน นำไปลอยใต้น้ำที่มีฟองอากาศขนาดเล็ก ถ่านหินซึ่งมีคุณสมบัติไม่เปียกน้ำจะถูก ฟองอากาศขนาดเล็กจับและพยุงตัวให้ลอยขึ้นสูผิวน้ำ นอกจากนี้มีลมทินหรือซีไ้ถ้าที่มีคุณสมบัติเปียกน้ำจะถูกแยกและจมอยู่ด้านล่าง



(ก) ถ่านหินไม่ได้ปรับสภาพลอยใต้น้ำเปล่า



(ข) ถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพลอยใต้น้ำเปล่า



(ค) ถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพลอยใต้น้ำที่มีฟองอากาศขนาดเล็ก

**รูปที่ 7** เปรียบเทียบลักษณะการลอยของถ่านหินที่เงื่อนไขสภาพผิวต่างๆ

**3.3 เปรียบเทียบผลการล้างและแยกผงถ่านหินโดยใช้ตัวกำเนิดฟองอากาศรูปแบบต่างๆ**

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



หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน จะช่วยให้ ฟองอากาศมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ฟองอากาศ ขนาดเล็กสามารถล้างสิ่งสกปรกออกจากถ่านหินและ พยุงถ่านหินให้ลอยขึ้นผิวน้ำได้มากกว่า โดยปริมาณ หัวแร่ที่ได้จากหัวทรายแบบจาน, หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์ และการใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์คู่กับถังความดัน คือ 83.7 กรัม, 197.8 กรัม และ 244.5 กรัม ตามลำดับ จากนั้นนำหัวแร่ไปวิเคราะห์หาปริมาณส่วนประกอบที่ เหลืออยู่หลังจากผ่านการล้าง โดยตารางที่ 2 แสดง ปริมาณองค์ประกอบหลักที่อยู่ในถ่านหิน 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
วัสดุพูนหรือหัวทรายแบบจาน (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 พบว่าปริมาณของหัวแร่ที่ซั้งได้เมื่อผ่านการล้างและแยกมีแนวโน้มลดลง 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%

จะพาให้ถ่านหินที่ลอยอยู่บนผิวน้ำเกิดการวกลงด้านล่างของคอลัมน์ 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 (นาที)	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 นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มค่าความร้อนในถ่านหินให้สูงขึ้น โดยที่เมื่อเทียบกับถ่านหินก่อนล้าง สามารถลดปริมาณเถ้าลงได้ 20.5% และสามารถเพิ่มค่าความร้อนในถ่านหินให้สูงขึ้น 21.7%

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนทุนการทำวิจัยและเชื้อเพลิงสถานที่ทำวิจัยในครั้งนี้

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 microbubbles 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.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นางสาวประไพพิศ ถาวรศรี		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5910120036		
วุฒิการศึกษา			
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา	
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2556	

### ทุนการศึกษา

ทุนบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมศาสตร์

### การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

#### (1) ผลงานการประชุมวิชาการ (Conference paper)

ประไพพิศ ถาวรศรี, ศิรัช สัจพันธ์ และ ชยุต นันทดุสิต, 2560, “การศึกษาลักษณะการไหลในชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กโดยใช้หัวฉีดแบบอีเจ็คเตอร์”, การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 16 ระหว่างวันที่ 23-24 กุมภาพันธ์ 2560 ณ ศูนย์ฝึกอบรมธนาคารไทยพาณิชย์ จังหวัดเชียงใหม่

Prapaipis Tawonsri, Sirachut Sungkapun and Chayut Nuntadusit, 2018, “Effect of Contraction Diameter Ratio on Ejector Nozzle for Microbubble Generator”, The 3<sup>rd</sup> International Conference on Engineering Science and Innovative Technology (ESIT 2018), Phang-Nga, Thailand, April 19-22, 2018.

#### (2) บทความวิชาการ (Journal paper)

Prapaipis Tawonsri, Somchai Saeung and Chayut Nuntadusit, 2018, “Application of microbubbles for cleaning coal powder”, Journal of Current Science and Technology (JCST), Vol. 8 No. 2 July-December, pp. 57-65.

ประไพพิศ ถาวรศรี, สมชาย แซ่อึ้ง, มั๊กตาร์ แวหะยี และ ชยุต นันทดุสิต, 2561, “การประยุกต์ใช้ฟองขนาดเล็กสำหรับล้างทำความสะอาดผงถ่านหิน”, วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2561, หน้า 60 - 70