



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบและสร้างเซลล์ลอยแร่ที่ใช้ลม

Design and Fabrication of Pneumatic Flotation Cell

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มบุญ มาศนิยม

รองหัวหน้าโครงการ รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีแดง

ผู้ช่วยนักวิจัย นาย นันทวัฒน์ เดมีย์กุล

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากเงินรายได้
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาเครื่องลอยแร่ที่ใช้ลม โดยปรับเปลี่ยนมาใช้ระบบป้อนแร่แบบไร้แรงดันและใช้อุปกรณ์ปล่อยฟองอากาศแทนการใช้ระบบการป้อนแร่โดยใช้แรงดันสูง เพื่อปะทะกับผิวน้ำให้เกิดฟองอากาศ วัสดุพอร์ซันที่ทำให้เกิดฟองอากาศทำจากทรายขนาดเฉลี่ย 79.4 ไมโครเมตร มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 24.75 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออัดอากาศเข้าไปทำให้เกิดฟองอากาศขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร ซึ่งใช้ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ของเครื่องลอยแร่ที่ประดิษฐ์ขึ้น เช่น ปริมาณฟองอากาศที่ป้อนให้กับระบบ ปริมาณของไหลที่ป้อนให้กับระบบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์และเปอร์เซ็นต์ของแข็งของของผสม โดยแร่แบไรต์ที่ใช้ในการศึกษาจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ และ เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และหาขนาดอนุภาคก่อนนำไปทดลอง ซึ่งตัวอย่างแร่แบไรต์ประกอบด้วยแร่แบไรต์ ควอตซ์และอะลูมินา โดยมีองค์ประกอบหลักเป็น แบริยมซัลเฟต 85.9 เปอร์เซ็นต์ ซิลิกอน 6.9 เปอร์เซ็นต์ และอะลูมินา 1.1 เปอร์เซ็นต์ มีขนาดอนุภาค (d80) ประมาณ 24 ไมโครเมตร ในการลอยแร่แบไรต์จะลอยในภาวะต่าง pH เท่ากับ 8 โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวปรับสภาพ และปรับสภาพผิวแร่แบไรต์ด้วยสารเคลือบผิวโซเดียมโอเลตปริมาณ 200 กรัมต่อตันแร่ ใช้สารเคลือบฟองเทอร์พีนอล ในปริมาณ 20 กรัมต่อตันแร่ หลังจากลอยแร่ สามารถทำให้ปริมาณแบริยมซัลเฟตเพิ่มขึ้นเป็น 89.5 เปอร์เซ็นต์ มีเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ 76 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองพบว่า อัตราการไหลของผสม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์และความเข้มข้นของของผสม มีอิทธิพลต่อการลอยแร่เพียงเล็กน้อย ส่วนตัวแปรที่มีความสำคัญคือ ปริมาณฟองอากาศและระยะจุ่ม จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการลอยอย่างมาก ซึ่งเมื่อเพิ่มระยะจุ่มมากขึ้นจะทำให้เกรดของหัวแร่สูงขึ้น แต่ปริมาณของแร่ที่เก็บได้มีปริมาณน้อยลง ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มระยะจุ่มจะทำให้เพิ่มระยะทางของแร่ที่ลอย ทำให้แร่ลอยออกมาจากดาวคัมเมอร์ได้ยากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณฟองอากาศจะทำให้ปริมาณของแร่ที่เก็บได้เพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อมีฟองอากาศในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้หางแร่ที่ไม่ต้องการลอยขึ้นมาด้วย ทำให้เกรดของหัวแร่ที่เก็บได้ลดลง ส่งผลทำให้เกรดของหัวแร้ลดลง อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลที่มาจากอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและระยะจุ่มในการลอยแร่ โดยใช้แร่แบไรต์เกรดต่ำที่ประกอบด้วยแร่ควอตซ์ เคโอลินต์ อิลไลต์ และ ไมโครโคลน ที่มีปริมาณแบริยมซัลเฟต 63.1 เปอร์เซ็นต์ มีขนาดอนุภาค (d80) ประมาณ 37 ไมโครเมตร การลอยแร่จะลอยในภาวะต่าง pH 9 โดยปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปรับสภาพผิวแร่แบไรต์ด้วยสารเคลือบผิวโซเดียมโอเลต ปริมาณ 200 กรัมต่อตันแร่ ใช้สารเคลือบฟองชนิดเทอร์พีนอล ในปริมาณ 20 กรัมต่อตันแร่ จากผลการลอยแร่พบว่าสามารถทำให้ปริมาณแบริยมซัลเฟตเพิ่มขึ้นเป็น 85 เปอร์เซ็นต์ และมีเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ 73 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองดังกล่าวสรุปได้ว่า การเพิ่มระยะจุ่มทำให้สามารถเพิ่มเกรดของหัวแร่ได้ แต่จะทำให้ปริมาณแร่ที่เก็บได้ลดลง และการเพิ่มฟองอากาศในปริมาณที่เหมาะสมทำให้สามารถเก็บแร่ได้เพิ่มขึ้น แต่เกรดหัวแร่จะลดลง

Abstract

The objective of this study is to develop the pneumatic flotation cell, a short column cell by alternation of the high pressure slurry feeding system to the pressureless one. The air bubble release device for generating air bubbles was fabricated located at the bottom of separation tank. It was made of porous sandy materials with an average particle size of 79.4 μm and a porosity of 24.75%. The air bubble size of about 1 mm was generated by using this device. The effect of operating parameters such as air flowrate, slurry flowrate, diameter of downcomer, immersion depth of downcomer and slurry concentration on performance of flotation of barite was investigated. The barite utilized in this experiment, analyzed by XRD and XRF, mainly consists of barite, quartz and alumina which have the chemical compositions of 85.9% BaSO_4 , 6.9% SiO_2 and 1.1% Al_2O_3 , respectively. The particle size (d80) of barite sample was about 24 μm . The flotation was carried out in an alkaline condition at pH 8 adjusted by potassium hydroxide. Sodium oleate and terpineol were used as a collector amount of 200 g/ton and a frother with amount of 20 g/ton, respectively. As the results, the optimal flotation condition gave a concentrate grade of 89.5% BaSO_4 with the 76% recovery. It was found that slurry flowrate, diameter of downcomer, and %solids had a slightly effect on flotation while immersion depths and air flowrate had much more significantly effect. The increasing immersion depths clouds improve in concentrate grade while the weight of concentrate decreased. A possible reason is that increased immersion depth could increase flotation distance resulting in the hindrance of low grade mineral to float. The increased in air flow rate, the more amount of mineral was recovered because the more air bubbles were generated to adhere the floating mineral particles. On the other hand, too dense air bubble could also float low grade mineral, leading to reduction of concentrate grade. Furthermore, we designed another experiment to confirm the results of high grade barite flotation for two effective parameters, air flowrate and immersion depth by using low grade barite flotation. The low grade barite mainly consists of barite, quartz, kaolinite, illite and microcline having 63.1% BaSO_4 and the particle size (d80) of about 37 μm . The flotation of low grade barite was carried out in an alkaline condition at pH 9 modified with sodium hydroxide. Sodium oleate and terpineol were used as a collector with amount of 200 g/ton, and as a frother with amount of 20 g/ton, respectively. Flotation under the optimal conditions gave a concentrate grade of 85% BaSO_4 with the recovery 73%. In conclusion, it was found that immersion depth of downcomer and air flow rate have

(4)

an effect on mineral flotation efficiency. Increasing immersion depth, the concentrate grade increased while the recovery of concentrate decreased. On the other hand, when increasing air flow rate, the recovery of concentrate increased but the concentrate grade decreased.

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง การออกแบบและสร้างเซลล์ลอยแร่ที่ใช้ลม (Design and Fabrication of Pneumatic Flotation Cell) ประสบความสำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีงบประมาณ 2557 งบประมาณการสร้างและพัฒนานวัตกรรม เป็นจำนวนเงิน 200,000 บาท (สองแสนบาทถ้วน) และความร่วมมือจากภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างสูงมาไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง เป็นอย่างยิ่งที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำและให้คำปรึกษางานวิจัยที่ดีเสมอมา ตลอดจนช่วยตรวจสอบและให้ข้อเสนอแนะที่เอื้อประโยชน์ต่องานวิจัยในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณบริษัท หาดใหญ่แปรรูป และ บริษัท พี.แอนด์.เอส.แบโรทีโมนิ่ง จำกัด ที่กรุณาอนุเคราะห์ตัวอย่างแร่แปรรูปเพื่อใช้ในการวิจัย

คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อประเทศและการพัฒนาอุตสาหกรรมแร่ต่อไปในอนาคต

ผู้วิจัย

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ..... | (2) |
| Abstract..... | (3) |
| กิตติกรรมประกาศ..... | (5) |
| สารบัญ..... | (6) |
| รายการตาราง | (9) |
| รายการรูป..... | (10) |
| สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ | (13) |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 บทนำ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 2 |
| 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 3 |
| 2.1 การลอยแร่..... | 3 |
| 2.1.1 สมบัติของผิวเม็ดแร่ในการลอยแร่ | 3 |
| 2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการลอยแร่..... | 4 |
| 2.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการลอยแร่ (Chemistry components)..... | 6 |
| 2.2.2 เครื่องมือหรือเซลล์ลอยแร่ (Equipment components)..... | 8 |
| 2.3 การพัฒนาเครื่องลอยแร่และวิวัฒนาการของเครื่องลอยแร่ | 9 |
| 2.3.1 เซลล์ลอยแร่เชิงกล (Mechanical cells)..... | 9 |
| 2.3.2 เครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ (Column cell)..... | 12 |
| 2.3.3 เครื่องลอยแร่แบบเจมสัน | 15 |
| 2.3.4 เครื่องลอยแร่แบบไซโคลเจ็ต | 19 |
| 2.4 แร่แบไรต์ (Barite) [34]..... | 22 |
| 2.4.1 สมบัติของแบไรต์ [34] | 22 |
| 2.4.2 ธรณีวิทยาแหล่งแร่แบไรต์ [34] | 23 |
| 2.4.3 การนำแร่แบไรต์ไปใช้ประโยชน์ [34] | 23 |
| 2.4.4 การลอยแร่แบไรต์ | 24 |
| 2.4.5 ผลกระทบของแร่ควอตซ์ต่อการใส่สารละลายโซเดียมโอไลเอต | 28 |
| บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีวิจัย | 30 |

| | | |
|---------|--|----|
| 3.1 | วิธีดำเนินการวิจัย | 30 |
| 3.1.1 | การออกแบบและการสร้างเครื่องลอยแร่ [5, 39, 40] | 30 |
| 3.1.2 | การสร้างถังกวน | 46 |
| 3.1.3 | การออกแบบระบบน้ำล้าง..... | 48 |
| 3.2 | วัสดุและอุปกรณ์ | 49 |
| 3.2.1 | ตัวอย่างแร่ที่ใช้ในการทดลอง | 49 |
| 3.2.2 | สารเคมีที่ใช้ในการลอยแร่ | 51 |
| 3.3 | ขั้นตอนการวิจัย..... | 51 |
| 3.3.1 | การทดสอบสมรรถนะเครื่องลอยแร่ด้วยแร่แบไรต์เกรดสูง..... | 51 |
| 3.3.2 | การทดสอบลอยแร่แบไรต์เกรดต่ำ..... | 56 |
| 3.4 | เทคนิคการวิเคราะห์และตรวจคุณลักษณะต่างๆ..... | 58 |
| 3.4.1 | การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแร่ [41] | 58 |
| 3.4.2 | เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD)..... | 61 |
| 3.4.3 | การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X ray Fluorescence Spectroscopy, XRF)..... | 62 |
| 3.4.4 | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM)..... | 63 |
| 3.4.5 | การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการลอยแร่ [2]..... | 63 |
| บทที่ 4 | ผลและการอภิปรายผล | 66 |
| 4.1 | การทดสอบสมบัติของตัวอย่างแร่ก่อนลอยแร่..... | 66 |
| 4.1.1 | การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค | 66 |
| 4.1.2 | การวิเคราะห์ชนิดของแร่ที่อยู่ในตัวอย่างแร่ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ | 68 |
| 4.1.3 | การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแร่ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) | 70 |
| 4.2 | ผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะการลอยแร่โดยใช้แร่แบไรต์เกรดสูง..... | 71 |
| 4.2.1 | ผลของอัตราการไหลของอากาศ..... | 75 |
| 4.2.2 | ผลของอัตราการไหลของผสม | 76 |
| 4.2.3 | ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ | 77 |
| 4.2.4 | ผลของระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ | 77 |
| 4.2.5 | ความเข้มข้นของของผสม..... | 78 |
| 4.3 | ผลการทดลองลอยแร่จริงโดยใช้แร่แบไรต์เกรดต่ำ | 79 |
| 4.3.1 | ผลของอัตราการไหลของอากาศและระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ที่มีผลต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้..... | 81 |
| 4.3.2 | ผลของอัตราการไหลของอากาศและระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ที่มีผลต่อเกรดของหัวแร่ | 82 |

| | |
|---|----|
| 4.3.3 ผลของอัตราการไหลของอากาศและระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ที่มีผลต่อ เปอร์เซ็นต์การเก็บแร่..... | 83 |
| บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ | 85 |
| 5.1 สรุป..... | 85 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 87 |
| บรรณานุกรม..... | 88 |
| ผลงานทางวิชาการที่ได้จากงานวิจัยนี้..... | 92 |

รายการตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1 การจำแนกประเภทของแร่ตามสภาวะมีขี้ว | 4 |
| ตารางที่ 2.2 ตัวแปรเปรียบเทียบระหว่างเครื่องลอยแร่แบบไซโคลเจ็ตและเจมสัน | 20 |
| ตารางที่ 2.3 สรุปข้อดีข้อเสียของเครื่องลอยแร่รูปแบบต่างๆ | 21 |
| ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรทั้งหมดที่ส่งผลกระทบต่อเกรดของหัวแร่..... | 53 |
| ตารางที่ 4.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดสูง | 66 |
| ตารางที่ 4.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของของตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดต่ำ | 67 |
| ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดสูง..... | 71 |
| ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดต่ำ | 71 |
| ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้ | 73 |
| ตารางที่ 4.6 ผลของอิทธิพลของอัตราการป้อนแร่และอัตราการไหลของอากาศต่อการลอยแร่แบไรต์เกรดสูง..... | 74 |
| ตารางที่ 4.7 ผลการลอยแร่แบไรต์เกรดสูงภายใต้ภาวะต่างๆ..... | 74 |
| ตารางที่ 4.8 สรุปผลการทดสอบอิทธิพลของตัวแปรทั้งหมดที่ส่งผลต่อแร่ลอย..... | 75 |
| ตารางที่ 4.9 ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ของการทดลองลอยแร่จริงด้วยแร่แบไรต์เกรดต่ำ | 80 |
| ตารางที่ 4.10 สรุปผลการทดสอบลอยแร่ด้วยแร่แบไรต์เกรดต่ำภายใต้ภาวะต่างๆ | 81 |

รายการรูป

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 แสดงการสมบัติของแร่ลอยและแร่จม | 5 |
| รูปที่ 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการลอยแร่..... | 5 |
| รูปที่ 2.3 แผนภูมิแสดงประเภทของน้ำยาเคลือบผิวแร่ | 7 |
| รูปที่ 2.4 การทำงานของน้ำยาเคลือบผิวแร่ | 7 |
| รูปที่ 2.5 เซลล์ลอยแร่ | 9 |
| รูปที่ 2.6 การวางชุดลอยแร่แบบเชิงกล..... | 10 |
| รูปที่ 2.7 เครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ | 12 |
| รูปที่ 2.8 เครื่องลอยแร่แบบเจมสัน | 16 |
| รูปที่ 2.9 การทำงานภายในดาวคัมเมอร์ของเครื่องลอยแร่แบบเจมสัน..... | 16 |
| รูปที่ 2.10 การพัฒนาการออกแบบดาวคัมเมอร์ | 18 |
| รูปที่ 2.11 เครื่องลอยแร่แบบไซโคลเจ็ต..... | 19 |
| รูปที่ 2.12 การเรียงตัวของโมเลกุลโซเดียมโอเลอิต..... | 25 |
| รูปที่ 2.13 ลักษณะพันธะระหว่างไอออนของผิวแร่แบไรต์กับโซเดียมโอเลอิต | 25 |
| รูปที่ 2.14 ความสามารถในการทำปฏิกิริยาของกรดโอเลอิกแต่ละชนิดในค่า pH ที่แตกต่างกัน..... | 26 |
| รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ซีต้าของแร่แบไรต์ | 26 |
| รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ซีต้าของแร่แบไรต์ด้วยโซเดียมซัลเฟต | 27 |
| รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ซีต้าของแร่ควอตซ์..... | 28 |
| รูปที่ 2.18 ค่าศักย์ซีต้าของแร่ควอตซ์ | 28 |
| รูปที่ 2.19 การเก็บแร่ควอตซ์ต่อปริมาณการใช้โซเดียมโอเลอิต..... | 29 |
| รูปที่ 3.1 แบบจำลองแสดงส่วนประกอบเครื่องลอยแร่ที่ออกแบบ..... | 31 |
| รูปที่ 3.2 ถังลอยแร่ | 32 |
| รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ปล่อยฟองอากาศ ที่ถูกติดตั้งภายในถังลอย..... | 33 |
| รูปที่ 3.4 อุปกรณ์การป้อน | 33 |
| รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบอุปกรณ์ชะลอความเร็วของผสมความยาวของครีป 20 มิลลิเมตร | 34 |

| | |
|---|----|
| รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบอุปกรณ์ชะลอความเร็วของผสมความยาวของครีป 10 มิลลิเมตร | 35 |
| รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ชะลอความเร็วของผสมของการป้อนแร่..... | 35 |
| รูปที่ 3.8 การไหลของน้ำเมื่อใช้ความยาวท่อ 25 มิลลิเมตร ความยาวของครีป 10 มิลลิเมตร | 36 |
| รูปที่ 3.9 การไหลของน้ำเมื่อใช้ความยาวท่อ 115 มิลลิเมตร ความยาวของครีป 20 มิลลิเมตร | 37 |
| รูปที่ 3.10 ดาวคัมเมอร์..... | 38 |
| รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ปล่อยฟองอากาศ..... | 39 |
| รูปที่ 3.12 เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ..... | 40 |
| รูปที่ 3.13 เครื่องควบคุมความดันของอากาศ | 41 |
| รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ปล่อยฟองอากาศในถังลอย | 41 |
| รูปที่ 3.15 วัสดุปล่อยฟองอากาศ..... | 42 |
| รูปที่ 3.16 ป้อนขนาดเล็ก | 42 |
| รูปที่ 3.17 การลอยแร่ที่ได้ติดตั้งวัสดุปล่อยฟองอากาศเพิ่ม | 42 |
| รูปที่ 3.18 ภาพถ่าย SEM หัวทรายปล่อยฟองอากาศ..... | 43 |
| รูปที่ 3.19 การคำนวณโดยใช้โปรแกรมอิมเมจ..... | 44 |
| รูปที่ 3.20 ลักษณะฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากวัสดุปล่อยฟองอากาศ..... | 44 |
| รูปที่ 3.21 แบบการติดตั้งวัสดุปล่อยฟองอากาศในถังลอย..... | 45 |
| รูปที่ 3.22 วัสดุปล่อยฟองอากาศและท่อลม | 45 |
| รูปที่ 3.23 ลักษณะฟองอากาศที่ได้ | 46 |
| รูปที่ 3.24 ถังกวนขนาด 50 ลิตร | 47 |
| รูปที่ 3.25 ใบพัดกวน | 47 |
| รูปที่ 3.26 ป้อนหย่งที่ใช้ป้อนของผสมเข้าสู่เครื่องลอยแร่..... | 48 |
| รูปที่ 3.27 หัวฉีดสเปรย์น้ำและการติดตั้ง | 48 |
| รูปที่ 3.28 ป้อนน้ำที่ใช้สำหรับน้ำล้าง..... | 49 |
| รูปที่ 3.29 ตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดสูง..... | 49 |
| รูปที่ 3.30 ตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดต่ำ..... | 50 |
| รูปที่ 3.31 แผนผังแสดงการทดสอบลอยแร่แบไรต์เกรดสูงเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของผสม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์และระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์..... | 54 |

| | |
|--|----|
| รูปที่ 3.32 แผนผังแสดงการทดสอบลอยแร่แบไรต์เกรดสูงเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการป้อนแร่และอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการเก็บแร่ได้..... | 55 |
| รูปที่ 3.33 แผนผังแสดงการทดสอบลอยแร่จริงด้วยแบไรต์เกรดต่ำ | 57 |
| รูปที่ 3.34 การคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงมาตรฐาน | 58 |
| รูปที่ 3.35 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการกระเจิงของแสง..... | 59 |
| รูปที่ 3.36 ฮิสโทแกรมแสดงปริมาณของการกระจายตัวของขนาดอนุภาคต่างๆ..... | 60 |
| รูปที่ 3.37 กฎของแบร็กส์ | 62 |
| รูปที่ 3.38 ชั้นพลังงานอิเล็กตรอนในตัวอย่าง | 63 |
| รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของแร่แบไรต์เกรดสูง..... | 67 |
| รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของแร่แบไรต์เกรดต่ำ..... | 68 |
| รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดสูง | 69 |
| รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดต่ำ | 70 |
| รูปที่ 4.5 อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้ | 76 |
| รูปที่ 4.6 อิทธิพลของอัตราการไหลของผสมต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้..... | 76 |
| รูปที่ 4.7 อิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้..... | 77 |
| รูปที่ 4.8 อิทธิพลของระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้ | 78 |
| รูปที่ 4.9 อิทธิพลของความเข้มข้นของผสมต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้ | 79 |
| รูปที่ 4.10 อิทธิพลของระยะจุ่มและอัตราการไหลของอากาศต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้ | 82 |
| รูปที่ 4.11 อิทธิพลของระยะจุ่มและอัตราการไหลของอากาศต่อเกรดของหัวแร่แบไรต์..... | 83 |
| รูปที่ 4.12 อิทธิพลของระยะจุ่มและอัตราการไหลของอากาศต่อเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ | 84 |

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

| | |
|----------|--|
| C | น้ำหนักของแรมมีค่าที่สามารถเก็บได้ (กิโลกรัม) |
| c | เกรดของหัวแรมมีค่าที่สามารถเก็บได้ (เปอร์เซ็นต์) |
| D | เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหม้ออบ (เซนติเมตร) |
| D10 | ขนาดอนุภาคที่มีเปอร์เซ็นต์การลอดผ่าน 10 เปอร์เซ็นต์ (ไมโครเมตร) |
| D50 | ขนาดอนุภาคที่มีเปอร์เซ็นต์การลอดผ่าน 50 เปอร์เซ็นต์ (ไมโครเมตร) |
| D90 | ขนาดอนุภาคที่มีเปอร์เซ็นต์การลอดผ่าน 90 เปอร์เซ็นต์ (ไมโครเมตร) |
| D_{am} | ค่าเฉลี่ยทางเลขคณิต |
| D_{gm} | ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต |
| D_i | ค่ากลางของแต่ละช่วงขนาด |
| d | ขนาดผลึก (นาโนเมตร) |
| F | น้ำหนักโดยรวมของแร่ป้อนทั้งหมด (กิโลกรัม) |
| f | เกรดของแร่ป้อน |
| L | ความยาวภายในของหม้ออบ (เซนติเมตร) |
| r | รัศมีของหม้ออบ (เซนติเมตร) |
| S1 | ตัวอย่างจากการลอยแร่ด้วยแร่แบไรต์เกรดต่ำ โดยใช้ปริมาณอัตราการไหลของฟองอากาศ 40 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของผสม 10 ลิตรต่อนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ 10 เซนติเมตร ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 15 เซนติเมตร และความเข้มข้นของผสม 10 เปอร์เซ็นต์ |
| S2 | ตัวอย่างจากการลอยแร่ด้วยแร่แบไรต์เกรดต่ำ โดยใช้ปริมาณอัตราการไหลของฟองอากาศ 40 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของผสม 10 ลิตรต่อนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ 10 เซนติเมตร ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 15 เซนติเมตร และความเข้มข้นของผสม 15 เปอร์เซ็นต์ |
| S3 | ตัวอย่างจากการลอยแร่ด้วยแร่แบไรต์เกรดต่ำ โดยใช้ปริมาณอัตราการไหลของฟองอากาศ 40 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของผสม 10 ลิตรต่อนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ 10 เซนติเมตร ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 15 เซนติเมตร และความเข้มข้นของผสม 20 เปอร์เซ็นต์ |
| S4 | ตัวอย่างจากการลอยแร่ด้วยแร่แบไรต์เกรดต่ำ โดยใช้ปริมาณอัตราการไหลของฟองอากาศ 40 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของผสม 10 ลิตรต่อนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ 10 เซนติเมตร ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 5 เซนติเมตร และความเข้มข้นของผสม 10 เปอร์เซ็นต์ |
| S5 | ตัวอย่างจากการลอยแร่ด้วยแร่แบไรต์เกรดต่ำ โดยใช้ปริมาณอัตราการไหลของฟองอากาศ 40 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของผสม 10 ลิตรต่อนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ 10 เซนติเมตร ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 10 เซนติเมตร และความเข้มข้นของผสม 10 เปอร์เซ็นต์ |

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

| | |
|----------|---|
| S6 | ตัวอย่างจากการลอยแร่ด้วยแร่แบไรต์เกรดต่ำ โดยใช้ปริมาณอัตราการใช้ของฟองอากาศ 40 ลิตรต่ออนาที อัตราการใช้ของผสม 10 ลิตรต่ออนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ 15 เซนติเมตร ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 15 เซนติเมตร และความเข้มข้นของของผสม 10 เปอร์เซ็นต์ |
| S7 | ตัวอย่างจากการลอยแร่ด้วยแร่แบไรต์เกรดต่ำ โดยใช้ปริมาณอัตราการใช้ของฟองอากาศ 40 ลิตรต่ออนาที อัตราการใช้ของผสม 10 ลิตรต่ออนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ 20 เซนติเมตร ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 15 เซนติเมตร และความเข้มข้นของของผสม 10 เปอร์เซ็นต์ |
| S8 | ตัวอย่างจากการลอยแร่ด้วยแร่แบไรต์เกรดต่ำ โดยใช้ปริมาณอัตราการใช้ของฟองอากาศ 40 ลิตรต่ออนาที อัตราการใช้ของผสม 15 ลิตรต่ออนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ 10 เซนติเมตร ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 15 เซนติเมตร และความเข้มข้นของของผสม 10 เปอร์เซ็นต์ |
| S9 | ตัวอย่างจากการลอยแร่ด้วยแร่แบไรต์เกรดต่ำ โดยใช้ปริมาณอัตราการใช้ของฟองอากาศ 40 ลิตรต่ออนาที อัตราการใช้ของผสม 20 ลิตรต่ออนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ 10 เซนติเมตร ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 15 เซนติเมตร และความเข้มข้นของของผสม 10 เปอร์เซ็นต์ |
| S10 | ตัวอย่างจากการลอยแร่ด้วยแร่แบไรต์เกรดต่ำ โดยใช้ปริมาณอัตราการใช้ของฟองอากาศ 20 ลิตรต่ออนาที อัตราการใช้ของผสม 10 ลิตรต่ออนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ 10 เซนติเมตร ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 15 เซนติเมตร และความเข้มข้นของของผสม 10 เปอร์เซ็นต์ |
| S11 | ตัวอย่างจากการลอยแร่ด้วยแร่แบไรต์เกรดต่ำ โดยใช้ปริมาณอัตราการใช้ของฟองอากาศ 30 ลิตรต่ออนาที อัตราการใช้ของผสม 10 ลิตรต่ออนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ 10 เซนติเมตร ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 15 เซนติเมตร และความเข้มข้นของของผสม 10 เปอร์เซ็นต์ |
| SEM | การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด |
| T | น้ำหนักของแร่ไม่มีค่าที่สามารถเก็บได้ (กิโลกรัม) |
| t | ความบริสุทธิ์ของแร่ไม่มีค่าที่สามารถเก็บได้ (เปอร์เซ็นต์) |
| N | จำนวนข้อมูลทั้งหมด |
| n | ค่าคงที่จำนวนเต็ม |
| XRD | เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ |
| XRF | เทคนิคการวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ |
| Y_i | ความถี่ของการเกิดในแต่ละช่วงขนาด |
| %R | เปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ได้ (เปอร์เซ็นต์) |
| θ | มุมที่เกิดการเบี่ยงเบน (องศา) |

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

λ
 σ

ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (อังสตรอม)
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

บทที่ 1 บทนำ

1.1 บทนำ

ทรัพยากรแร่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมและการพัฒนาประเทศรวมไปถึงมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตประจำวัน เมื่อมีการเจริญเติบโตของภาคอุตสาหกรรมและจำนวนประชากรเพิ่มขึ้น ทำให้ความต้องการใช้ทรัพยากรแร่นั้นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แนวโน้มของการผลิตและการสำรวจหาแหล่งทรัพยากรแร่เพื่อตอบสนองความต้องการในด้านวัตถุดิบของทั้งภาคอุตสาหกรรม หัตถกรรม เกษตรกรรมและชีวิตประจำวันของประชากร จึงมีมากขึ้นตามไปด้วยอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งในสังคมปัจจุบัน เครื่องอุปโภค วัสดุ อุปกรณ์ต่างๆ เกือบทั้งหมดจะต้องมีแร่เป็นวัตถุดิบเบื้องต้นในการผลิต ตลอดไปถึงสารอุปโภคพื้นฐานต่างๆ ด้วยสินแร่ที่มาจากแหล่งแร่ที่มีศักยภาพสูงซึ่งปัจจุบันเริ่มจะมีปริมาณแร่สำรองลดน้อยลง จึงจำเป็นต้องหาแหล่งแร่ที่มีศักยภาพแหล่งใหม่มาทดแทน แต่ในแหล่งใหม่นั้นการมีเกรดของหัวแร่สูงหรือต่ำนั้นขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของสภาพธรณีวิทยาแหล่งแร่นั้น และมีแร่ชนิดอื่นเข้ามาเจือปนทำให้เกรดของหัวแร่นั้นไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จึงจำเป็นต้องหาวิธีการแต่งแร่ให้มีความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้น

ปัจจุบันการแต่งแร่ที่มีขนาดละเอียดได้รับความสนใจมากขึ้น ในอดีตที่ผ่านมาการแต่งแร่มุ่งไปที่แร่ขนาดหยาบ หรือมีขนาดโตเท่าที่จะเป็นไปได้เนื่องจากแต่งแร่ได้ง่ายกว่า และได้กำไรมากกว่า ซึ่งในกระบวนการบดเพื่อที่จะทำให้แร่แตกตัวเป็นอิสระจากมลทินจะได้แร่ที่มีขนาดละเอียดออกมาเสมอ หรือในบางแหล่งเป็นธรรมชาติของแหล่งเองที่สินแร่มีขนาดละเอียดอยู่แล้ว แร่ขนาดละเอียดเหล่านี้จะแต่งได้ยาก เพราะมีวิธีการแต่งแร่เพียงไม่กี่วิธีที่สามารถประยุกต์ใช้ได้แก่ วิธีการแยกแร่ด้วยแม่เหล็กแบบเปียก และการลอยแร่ การแต่งแร่ด้วยวิธีลอยแร่จึงเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจในการแต่งแร่เหล่านี้ให้มีเกรดสูงขึ้นจนสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ การแต่งแร่ด้วยวิธีลอยแร่จะใช้เครื่องลอยแร่ซึ่งมีอยู่ 2 ประเภท คือ เครื่องลอยเชิงกล และเครื่องลอยแร่แบบใช้ลม หรือแบบคอลัมน์ (Flotation column) การลอยแร่ด้วยเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์นับเป็นวิทยาการใหม่ที่สำคัญ และเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจมากในอุตสาหกรรมแต่งแร่ เพราะเป็นการพัฒนากระบวนการแต่งแร่ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยคอลัมน์ที่สร้างขึ้นมานี้จะมีลักษณะที่สำคัญคือ ไม่มีการขับเคลื่อนใบพัดกวนเหมือนเครื่องแบบดั้งเดิม แต่จะใช้ลมอัดเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศแทนจึงลดการซ่อมบำรุงลงได้ นอกจากนี้ยังใช้เวลาในการลอยแร่ที่สั้นกว่า อย่างไรก็ตามการลอยแร่ด้วยเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ยาวนั้นจะต้องใช้ความเข้มข้นของแร่ต่ำกว่าเครื่องลอยแร่แบบเก่า ดังนั้นมีการพัฒนาเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์สั้น หรือเครื่องลอยแร่แบบเจมสัน (Jameson cell) ที่ให้ของผสมป้อนและฟองอากาศสัมผัสและผสมกันในส่วนของดาวคัมเมอร์ ทำให้เกิดการผสมกันระหว่างน้ำและอากาศ ไหลลงสู่ด้านล่างทำให้เกิดฟองอากาศและลอยตัวขึ้นในคอลัมน์ได้ ทำให้หัวแร่ลอยขึ้นมาจากด้านล่างแล้วไหลล้นออกมาจากส่วนบนของคอลัมน์ เครื่องลอยแร่แบบเจมสันจะมีข้อได้เปรียบคอลัมน์แบบเก่าคือ จะลดขนาดของพื้นที่ที่ใช้ในการติดตั้งเพราะว่าในส่วนของความสูงนั้นลดลง ในขณะที่ตัวถังนั้นขนาดเท่า

เดิม เครื่องลอยแร่แบบเครื่องลอยแร่แบบเจมสันนี้ได้ถูกสร้างและพัฒนาขึ้นมาครั้งแรกโดย Graeme J. Jameson (1988) ในประเทศออสเตรเลีย จากการทดลองใช้เครื่องลอยแร่แบบเจมสัน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เมตร สูง 1.10 เมตร ในการลอยแร่ตะกั่ว-สังกะสีที่ Mount Isa Mines Limited เปรียบเทียบกับ คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตร สูง 10 เมตร ปรากฏว่าหัวแร่ที่แต่งได้มีคุณภาพใกล้เคียงกันแต่ระยะเวลาที่แร่อยู่ในเครื่องลอยแร่ (Residence time) ในเครื่องลอยแร่แบบเจมสัน ใช้เวลาเพียง 10 วินาที ในขณะที่คอลัมน์ใช้เวลาจนถึง 10 นาที [1] ในปัจจุบันเครื่องลอยแร่แบบเจมสันเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมแต่งแร่มากขึ้น แต่เนื่องจากเครื่องลอยแร่แบบเจมสันใช้แรงดันของน้ำสูงเพื่อที่จะทำของผสม (Slurry) กระทบกับผิวแร่เพื่อให้เกิดปริมาณฟองอากาศที่มากพอสำหรับการลอยแร่ ต่อมาจึงได้มีผู้คิดค้นเครื่องลอยแร่ที่รู้จักในชื่อไซโคลเจ็ต (Cyclojet cell) ขึ้นมาโดยใช้แรงดันในการป้อนให้ของผสมต่ำกว่า สามารถลดการปั่นป่วนของของผสมในเซลล์ลอยแร่ได้และทำให้ประสิทธิภาพของการลอยแร่ดีขึ้น โดยเฉพาะแร่ที่ลอยได้ยาก อย่างเช่น เฟลด์สปาร์ และถ่านหิน ซึ่งในระบบนี้จะต้องปรับความเร็วในการป้อนของผสมให้ต่ำลง แต่การใช้แรงดันต่ำมากจะทำให้ปริมาณของฟองอากาศที่ใช้ในการลอยแร่นั้นไม่เพียงพอได้ จะเห็นว่าปัญหาหลักของเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ คือ จะต้องลดการปั่นป่วนที่เกิดจากการป้อนแร่ ที่ต้องทำให้ฟองอากาศเกิดขึ้นเพียงพอโดยการป้อนแร่ในรูปของของผสมต้องพ่นผิวแร่ในคอลัมน์ และต้องใช้ความเข้มข้นในการลอยต่ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ที่แก้ปัญหาในการป้อนที่จะลดความปั่นป่วนลง โดยออกแบบให้ไซโคลเจ็ตที่ใช้ไซโคลนรูปกรวยมาเป็นไซโคลนทรงกระบอกและออกแบบปลายด้านล่างของดาวคัมเมอร์ ให้มีพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดแรงกระแทก (ลดความเร็ว) ของของผสมที่พุ่งปะทะของเหลวในเซลล์ลง และจะติดตั้งอุปกรณ์ปล่อยฟองอากาศไว้ภายในเพื่อเพิ่มฟองอากาศในระบบ ชดเชยกับการที่ต้องลดการปั่นป่วนของของผสมในเซลล์ลอยแร่ลง เพราะปกติแรงปะทะของการป้อนแร่ที่รุนแรงจะทำให้เกิดฟองอากาศเป็นจำนวนมาก แต่จะเกิดการปั่นป่วนมากซึ่งไม่ส่งผลดีต่อการลอยแร่ ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่า ควรมีการออกแบบและพัฒนาเครื่องลอยแร่แบบใช้ลมแบบใหม่ขึ้นมา โดยได้ออกแบบและทำการศึกษาสมรรถนะของเครื่องเพื่อที่จะประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ออกแบบและสร้างเครื่องลอยแร่ที่ใช้ลม
- 2) เพื่อศึกษาการทำงาน และประสิทธิภาพของเครื่องลอยแร่ โดยการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่คาดหวังว่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพต่อการลอยแร่

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้เครื่องลอยแร่ที่ออกแบบขนาดห้องปฏิบัติการ
- 2) สามารถปรับปรุงเซลล์ลอยแร่แบบใช้ลมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้นได้
- 3) สามารถลอยแร่แปรไรต์ ด้วยเซลล์ลอยแร่ที่จัดทำขึ้นให้มีประสิทธิภาพสูงสุด
- 4) สามารถเผยแพร่ความรู้เพื่อเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การลอยแร่

ในปัจจุบันการลอยแร่ได้รับการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งในด้านเทคนิค การใช้น้ำยาลอยแร่ตลอดจนเซลล์ลอยแร่ ซึ่งในการลอยแร่จะอาศัยความแตกต่างของสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของผิวแร่ ในการดึงดูดหรือจับเกาะกับโมเลกุลของน้ำ เม็ดแร่ชนิดต่างๆ มีสมบัติของผิวเปียกน้ำได้ไม่เท่ากัน โดยธรรมชาติลักษณะทางฟิสิกส์ของผิวแร่ที่ไม่ชอบน้ำจะสามารถเกาะติดกับฟองอากาศได้ดีกว่าแร่ที่เปียกน้ำ ดังนั้นแร่ที่ลอยขึ้นมาด้วยฟองอากาศจะเกิดขึ้นกับเม็ดแร่ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ ส่วนเม็ดแร่ผิวเปียกจะยังคงจมอยู่ซึ่งสามารถแยกแร่ที่สมบัติของผิวแร่แตกต่างกันออกจากกันได้

2.1.1 สมบัติของผิวเม็ดแร่ในการลอยแร่

การที่ผิวแร่มีแรงดึงดูดหรือจับเกาะกันกับโมเลกุลของน้ำ ซึ่งทำให้ผิวแร่เปียกได้นั้น เนื่องจากบริเวณผิวของแร่นั้นมีพลังงานจำนวนหนึ่งสะสมอยู่ในรูปของพลังงานศักย์ เรียกว่า พลังงานผิวอิสระ (Free surface energy) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคของสารชั้นผิวนอกสุดของวัตถุจะเหลือพลังงานอยู่จำนวนหนึ่งหันออกสู่ผิวอิสระ พลังงานนี้เองที่เป็นต้นเหตุให้อนุภาคของสารต่าง ๆ สามารถดึงดูดกันได้ ถ้าเป็นอนุภาคเดียวกับแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคนั้นเรียกว่า แรงยึดติด (Cohesive forces) และถ้าเป็นอนุภาคต่างชนิดกันเรียกว่า แรงเชื่อมแน่น (Adhesive force)

ปรากฏการณ์ที่ผิวของเม็ดแร่เปียกน้ำก็เนื่องมาจากบริเวณผิวของเม็ดแร่มีพลังงานผิวอิสระอยู่ และสามารถดึงดูดกับโมเลกุลของน้ำรอบข้าง ทำให้เกิดเป็นชั้นน้ำบาง ๆ (Hydrate film) ปกคลุมผิวแร่อยู่เมื่อแร่จมอยู่ในน้ำ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การดูดซับ (Adsorption) บนผิวเม็ดแร่สำหรับเม็ดแร่ที่มีโครงสร้างเป็นชนิดมีขั้ว (Polar) จะยึดเกาะกันด้วยแรงเกาะกันทางเคมี (Chemical bond) ซึ่งจะให้ความแข็งแรงในการยึดเกาะสูงเพราะเกิด hydrogen bond กับน้ำ จึงมีพลังงานผิวอิสระมาก ฉะนั้นแร่ที่มีโครงสร้างแบบนี้จึงสามารถเปียกน้ำได้ดี จึงเป็นประเภทการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) ส่วนเม็ดแร่ที่มีโครงสร้างเป็นชนิดไม่มีขั้ว (Non-polar) จะยึดเกาะกับโมเลกุลอื่นด้วยแรงเกาะกันระหว่างโมเลกุล (Molecular bond) ที่เรียกว่า แรงแวนเดอวาลส์ (Van de Waals force) ซึ่งจะให้ความแข็งแรงในการยึดเกาะต่ำ จึงมีพลังงานผิวอิสระน้อย ฉะนั้นแร่ที่มีโครงสร้างแบบนี้ จึงไม่ค่อยเปียกน้ำ จัดเป็นประเภท การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

ปฏิกริยาระหว่างผิวแร่กับน้ำนอกจากจะสร้างชั้นน้ำบาง ๆ ปกคลุมผิวแร่แล้ว ยังสามารถละลายอนุภาคของแร่บางชนิดออกมาได้ด้วย ซึ่งอาจจะมีผลกระทบต่อผลการลอยแร่ได้ จึงควรพยายามหลีกเลี่ยงหรือหาทางป้องกันไม่ให้เกิดขึ้น

ตารางที่ 2.1 การจำแนกประเภทของแร่ตามสภาวะมีซั้ว [2]

| Group 1 | Group 2 | Group 3(a) | Group 4 | Group 5 |
|--------------------------|-----------|-------------------|-------------|--------------|
| Galena | Barite | Cerrusite | Hematite | Zircon |
| Covellite | Anhydrite | Malachite | Magnetite | Willemite |
| Bornite | Gypsum | Azurite | Goethite | Hemimouphite |
| Chalcocite | Anglesite | Wulfemite | Chromite | Beryl |
| Chalcopyrite | | | Ilmenite | Feldspar |
| Stibnite | | Group 3(b) | Corumdum | Sillmaruite |
| Argentite | | Fluorite | Pyrolusite | Garnet |
| Bismuthibnite | | Calcite | Limonite | Quartz |
| Millerite | | Witherite | Borax | |
| Cobaltite | | Magnesite | Wolframite | |
| Aesenopyrite | | Dolomite | Columbite | |
| Pyrite | | Apatite | Tantalite | |
| Sphalerite | | Scheelite | Rutile | |
| Orpiment | | Smitsonite | Cassiterite | |
| Pentlandite | | Rhodochrosite | | |
| Realgar | | Siderite | | |
| Native Au, Pt, Au, Cu | | Monazite | | |

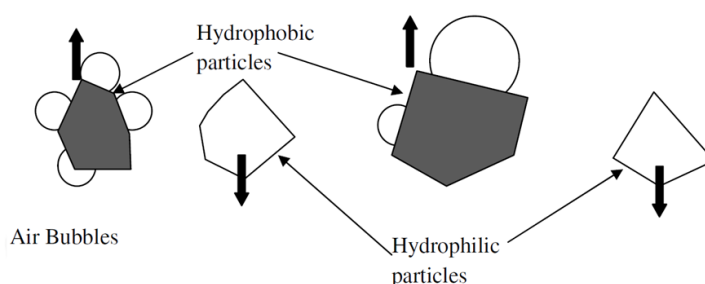
หมายเหตุ ความมีซั้วจากน้อยไปหามาก โดยเรียงจากกลุ่มซ้ายไปขวา

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่า ทองคำเป็นกลุ่มที่มีความเป็นซั้วน้อย อาจจัดเป็นพวกไม่มีซั้วซึ่งมีพลังงานผิวอิสระน้อย จึงไม่ค่อยเปียกน้ำ มีผลให้ลอยได้ไม่ยากนัก ซึ่งต้องพิจารณาร่วมกับปัจจัยอื่น ๆ ประกอบอีกเช่น รูปร่างของเม็ดแร่ เป็นต้น ตารางนี้จะมีประโยชน์ต่อการพิจารณาความเป็นไปได้ในการแยกแร่ด้วยวิธีการลอยแร่ เช่นถ้าจะลอยแร่กลุ่ม 1 ออกจากกลุ่ม 5 จะมีความเป็นไปได้สูง เพราะแร่กลุ่มที่ 1 จะลอยและแร่กลุ่มที่ 5 จะจม

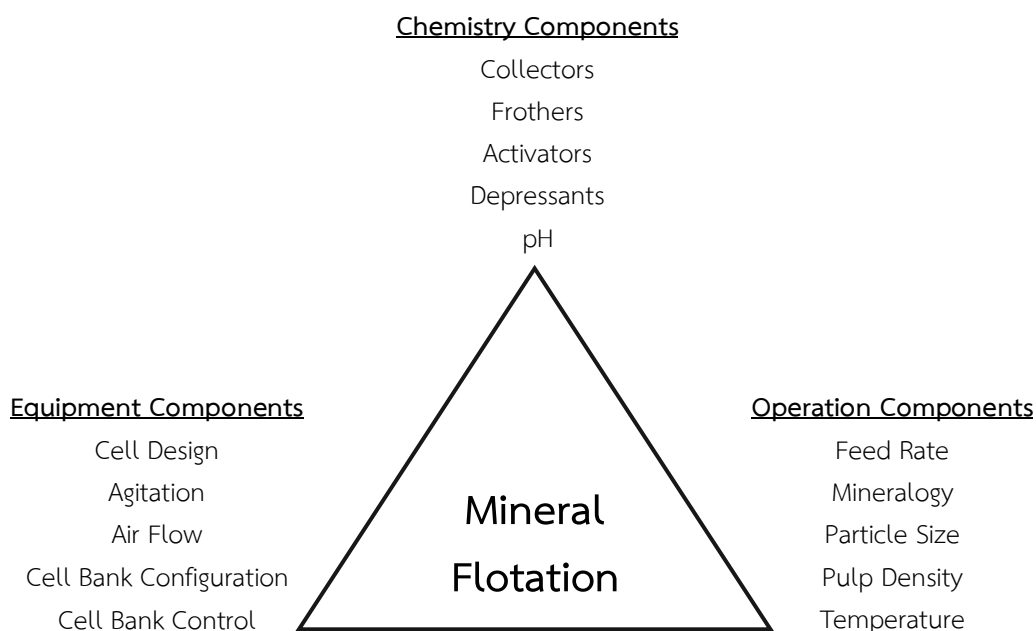
2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการลอยแร่

การลอยแร่ เป็นกระบวนการแยกแร่เชิงซ้อนหรือเกรดต่ำ ซึ่งขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเล็กเกินกว่าที่จะแยกโดยแรงโน้มถ่วง หรือความแตกต่างของแรงโน้มถ่วงระหว่างร่น้อยเกินไป กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับการทำให้เกิดฟองอากาศด้วยวิธีการอย่างหนึ่งอย่างใดในของผสมแร่กับน้ำ (Pulp) อนุภาคแร่เฉพาะที่มีสมบัติของผิวไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ซึ่งไม่เปียกน้ำจะเกาะกับฟองอากาศซึ่งมีแรงลอยตัวเพียงพอเพื่อพาแร่ลอยสู่ผิวน้ำ ของผสมจะประกอบด้วยกัน 3 ส่วน (ของแข็ง ของเหลว ก๊าซ) ซึ่งฟองอยู่ตัวจะจับแร่และสามารถกวาดออกได้หัวแร่ ส่วนแร่ที่ผิวแร่มี

สมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) จะถูกดึงดูดหรือจับเกาะกันกับโมเลกุลของน้ำ ซึ่งทำให้ผิวแร่เปียกและจมลง ดังรูปที่ 2.1 ดังนั้นการแยกแร่ขึ้นอยู่กับสมบัติของเครื่องมือหรือเซลล์ลอยแร่ รวมถึงวิธีการลอยแร่ (Equipment components) การปรับสภาพผิวของเม็ดแร่ให้เหมาะสมต่อการลอยแร่ และกระบวนการที่ใช้กับระบบของการลอยแร่ (Operation components) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 แสดงการสมบัติของแร่ลอยและแร่จม [3]



รูปที่ 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการลอยแร่ [4]

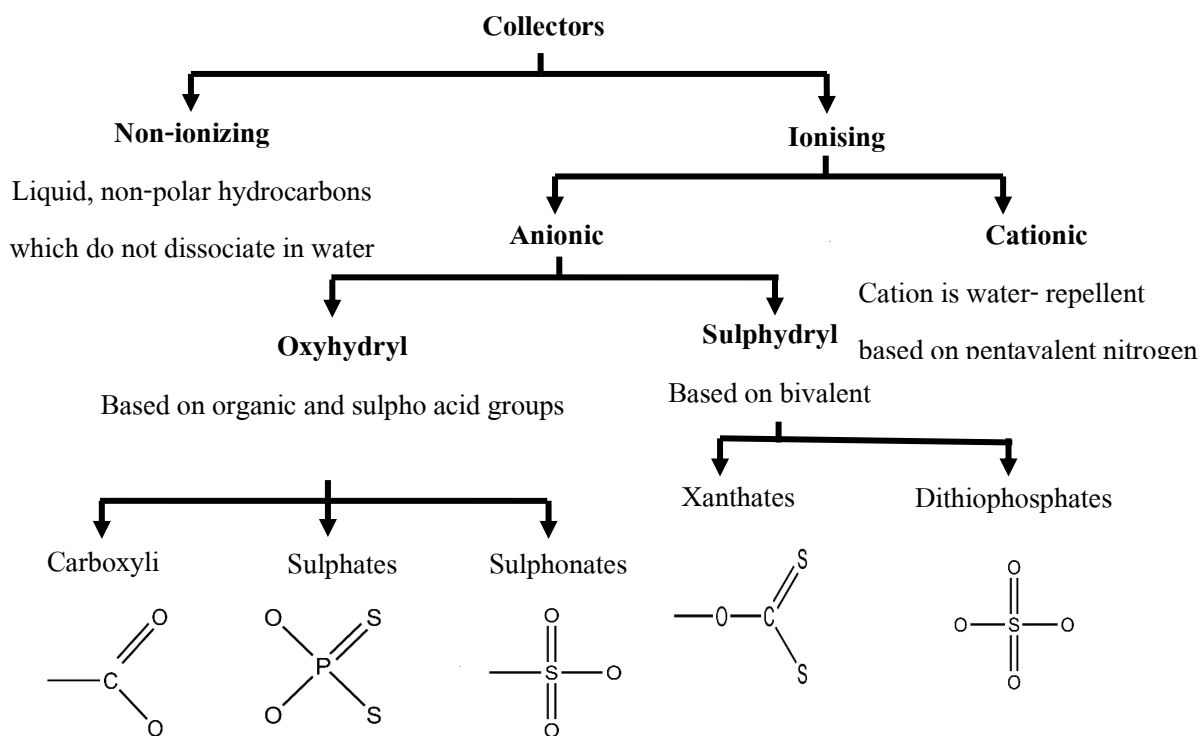
2.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการลอยแร่ (Chemistry components)

การเกาะตัวของฟองอากาศกับผิวของแร่ มุมที่เกาะระหว่างน้ำ อากาศและผิวของแข็งควรมีค่าสูง เช่น ผิวแร่ควรมีสมบัติไม่ชอบน้ำตามธรรมชาติ อย่างไรก็ตามผิวแร่จำนวนน้อยมากที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำตามธรรมชาติ ดังนั้นเพื่อให้ลอยแร่ได้ดี ผิวของแร่จำเป็นต้องทำให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ ดังนั้นจึงต้องปรับสภาวะผิวหน้าด้วยน้ำยาเคมีที่เหมาะสม ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องกระทำอย่างเฉพาะเจาะจงเพื่อให้ผิวหน้าของแร่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ ในขณะที่ผิวหน้าของแร่ยังคงมีสมบัติชอบน้ำ โดยทั่วไปน้ำยาลอยแร่แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

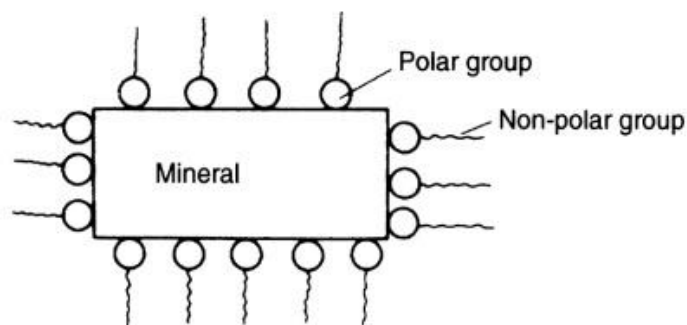
- 1). น้ำยาเคลือบผิวแร่ (Collectors)
- 2). น้ำยาเคลือบฟอง (Frothers)
- 3). น้ำยาปรับสภาพ (Modifiers)
 - 3.1). ตัวกด (Depressant)
 - 3.2). ตัวเร่งปฏิกิริยา (Activator)
 - 3.3). ตัวปรับสภาพกรด-ด่าง (pH-regulator)
 - 3.4). ตัวเติมซัลไฟด์ (Sulfidizer)
 - 3.5). ตัวกระจายตะกอน (Dispersant)
 - 3.6). ตัวรวมตะกอน (Flocculant)

น้ำยาเคลือบผิวแร่ [2, 5]

เป็นสารเคมีอินทรีย์หรือนินทรีย์ ดังรูปที่ 2.3 ทำหน้าที่เคลือบผิวแร่เพื่อเสริมสร้างสมบัติความไม่เปียกน้ำให้กับผิวแร่ มีทั้งชนิดที่ไม่แตกตัวเป็นอนุภาคที่มีประจุในน้ำ (Non-ionizing) เช่น พวบน้ำมัน ซึ่งใช้เป็นน้ำยาเคลือบผิวกับแร่ที่มีสมบัติไม่เปียกน้ำอยู่แล้ว เช่น ถ่านหิน กราไฟต์ แร่กำมะถัน เป็นต้น ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ น้ำมันก๊าด (Kerosene) ส่วนชนิดที่แตกตัวเป็นอนุภาคที่มีประจุในน้ำ (Ionizing) จะให้อนุภาคประจุบวกหรืออนุภาคประจุลบ ไปจับกับผิวแร่ได้อย่างแข็งแรง ซึ่งน้ำยาเคลือบผิวแร่ชนิดนี้จะประกอบขึ้นด้วยส่วนที่มีขั้ว และ ส่วนไม่มีขั้ว ดังรูปที่ 2.4 โดยจะหันกลุ่มอะตอมที่เป็น ส่วนมีขั้ว เข้าเกาะกับผิวแร่และหันส่วนที่เป็นส่วนไม่มีขั้วออกจากผิวแร่ การใช้ น้ำยาเคลือบผิวแร่ชนิดแอนไอออน (Anion collector) ชนิดกรดไขมัน คือ การใช้ น้ำยาที่มีการแตกตัวเป็นแอนไอออนที่สามารถเข้าไปจับกับผิวแร่ แอนไอออนจะเกาะกับผิวแร่แบบการดูดซับทางเคมี ที่ไม่ละลายน้ำ (Strongly hydrophobic)



รูปที่ 2.3 แผนภูมิแสดงประเภทของน้ำยาเคลือบผิวแร่ [2]



รูปที่ 2.4 การทำงานของน้ำยาเคลือบผิวแร่ [2]

น้ำยาเคลือบฟอง

เป็นน้ำยาเคมีประเภท เฮเทอโรโพลาร์ (Heteropolar compound) กล่าวคือ มีทั้งส่วนมีขั้ว และ ส่วนไม่มีขั้ว เช่นเดียวกับน้ำยาเคลือบผิวแร่เติมลงไปเพื่อช่วยให้ฟองอากาศมีเสถียรภาพดีขึ้น เหนียวไม่แตกง่าย และลดความตึงผิว ที่มีใช้กันอยู่อาจแบ่งออกเป็น 2 พวกคือ

- 1.) น้ำยาเคลือบฟองมาตรฐาน เช่น เทอร์ไพเนอล (Terpineol) น้ำมันสน (Pine oil) กรดครีไซลิก (Cresylic acid)

2.) น้ำยาเคลือบฟองสังเคราะห์ เช่น พวกลอกออล และเอสเทอร์ต่างๆ

สำหรับฟุ้งแร่ โดยเฉพาะที่มีขนาดละเอียดมากนั้น จึงจำเป็นต้องใช้น้ำยาเคลือบฟอง ซึ่งใช้ได้ผลดีกับการลอยแร่ฟุ้ง และฟองอากาศที่มีเสถียรภาพพอที่จะใช้กับเม็ดแร่ที่มีทั้งความถ่วงจำเพาะสูงและรูปร่างเป็นหยักเหลี่ยม ทำให้ฟองแตกง่าย

น้ำยาปรับสภาพ

เป็นน้ำยาเคมีอินทรีย์และอนินทรีย์ที่เติมลงไปเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ของน้ำยาเคมีชนิดอื่นหรือปรับสภาพของสารละลายให้เหมาะสมสำหรับแร่ที่ต้องการจะลอย ได้แก่

1.) ตัวกด (Depressant) เป็นตัวกดที่ไม่ต้องการให้ลอย มิให้ลอยขึ้นมากับแร่ที่ต้องการให้ลอยเช่น โซเดียมซัลไฟด์ โซยาไนต์ โซเดียมซิลิเกต และ ปูนขาว เป็นต้น ซึ่งแต่ละชนิดมีสมบัติกดแร่ต่างชนิดกัน ซึ่งต้องพิจารณาลักษณะวิทยาของแร่แต่ละชนิด

2.) ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นตัวทำให้น้ำยาเคลือบผิวทำปฏิกิริยากับผิวเม็ดแร่ได้ดีขึ้นและช่วยเพิ่มสมบัติเคลือบผิวแร่ให้ไม่เปียกน้ำดียิ่งขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมาก เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ใช้เร่งปฏิกิริยา แร่ออกไซด์ของโลหะมีใช้เหล็ก และคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$) ใช้เร่งปฏิกิริยาของแร่เหล็กซัลไฟด์และสังกะสีซัลไฟด์ เป็นต้น

3.) ตัวปรับสภาพกรด-ด่าง เป็นตัวปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายให้เหมาะสมที่แร่จะลอยได้ ทั้งนี้เพราะว่าสภาพของสารละลายที่แร่หนึ่งๆ จะสามารถลอยได้ดีนั้นจะต้องมีสภาพที่เหมาะสมเฉพาะตัวสำหรับแร่ชนิดนั้นๆ เช่น แร่ตะกั่ว มีสภาพของสารละลายเหมาะสมต่อการลอยที่เป็นด่างอ่อนๆ เป็นต้น สารที่นิยมใช้ปรับสภาพกรด-ด่าง ถ้าปรับสภาพให้เป็นกรด เช่น กรดกำมะถัน และ กรดเกลือ เป็นต้น และถ้าปรับสภาพให้เป็นด่าง เช่น ปูนขาว และ แฉาโซดา เป็นต้น

4.) ตัวเติมซัลไฟด์ เป็นสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อทำปฏิกิริยากับผิวแร่ให้เป็นสารประกอบซัลไฟด์ ซึ่งง่ายต่อการลอยยิ่งขึ้น ที่เรียกว่าการทำ ซัลไฟดิซเซชัน (Sulfidization) สารที่นิยมใช้กันมี โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เป็นต้น

5.) ตัวกระจายตะกอนเป็นตัวที่ทำหน้าที่กระจายอนุภาคขนาดเล็กๆ ของสารที่รวมกลุ่มจับกันเป็นก้อนและรบกวนต่อระบบการลอยแร่ สารที่ใช้ เช่น โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) และโซเดียมฟอสเฟต ($Na_4P_4O_7$) เป็นต้น

6.) ตัวรวมตะกอน เป็นตัวที่ทำหน้าที่รวมอนุภาคขนาดเล็กๆ ของสาร ในกรณีที่ต้องการให้ พวกตะกอนรวมกลุ่มจับตัวกัน สารที่ใช้กันมี ปูนขาว และกาว เป็นต้น

2.2.2 เครื่องมือหรือเซลล์ลอยแร่ (Equipment components)

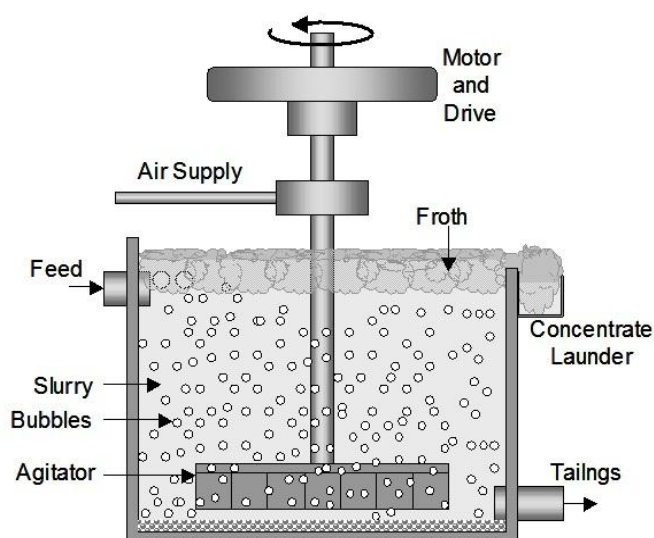
การลอยแร่นั้นนับเป็นวิธีการแยกแร่ที่ทันสมัยและได้ผลดีมากวิธีหนึ่ง การลอยแร่ในปัจจุบันส่วนใหญ่หรือเกือบทั้งหมดจะใช้เซลล์ลอยแร่เชิงกล (Mechanical cell) ซึ่งมีใบพัดกวนให้อนุภาคต่างๆ แขนลอยอยู่ในน้ำ อย่างไรก็ตามเมื่อเร็วๆ นี้ได้มีการประดิษฐ์คิดค้นเครื่องลอยแร่ออกมาในรูปแบบใหม่ๆ เช่นเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ อันก่อให้เกิดผลกำไรมากขึ้น กล่าวคือ สามารถลด

ค่าใช้จ่ายในการลงทุน อีกทั้งยังปรับปรุงประสิทธิภาพในการแต่งแร่ให้ได้หัวแร่ที่มีเกรดสูงและเก็บแร่ (Recovery) ได้มากขึ้น ซึ่งเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์นี้ยังได้ถูกพัฒนาเป็นเครื่องลอยแร่แบบต่างๆ ในปัจจุบัน

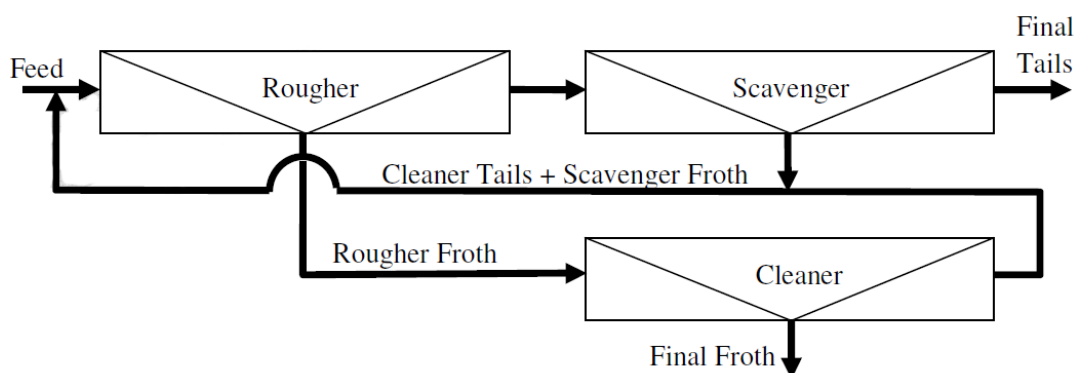
2.3 การพัฒนาเครื่องลอยแร่และวิวัฒนาการของเครื่องลอยแร่

2.3.1 เซลล์ลอยแร่เชิงกล (Mechanical cells)

เซลล์ลอยแร่ที่ใช้เป็นโดยทั่วไปจะเป็นเซลล์ลอยแร่เชิงกล (ดังรูปที่ 2.5) ได้มีการใช้มาเป็นเวลาหลายปี โดยใช้เซลล์ลอยแร่ทำเป็นชุดต่อเนื่องเป็นอนุกรม (Tanks in series) เซลล์ชุดแรกใช้ลอยแร่ที่ลอยได้ง่ายที่ผ่านการบดละเอียด เรียกว่า ชุดเก็บแร่หยาบ (Roughers) หางแร่จากชุดลอยแร่หยาบนั้นยังมีแร่มีค่าอยู่ จะถูกนำไปลอยอีกครั้งในเซลล์ชุดที่สอง เรียกว่า ชุดเก็บแร่ (Scavengers) ซึ่งบางครั้งอาจไม่จำเป็นก็ได้ขึ้นอยู่กับกับเกรดของแร่ในหางแร่ สำหรับหัวแร่ของชุดเก็บแร่หยาบ จะถูกไปลอยซ้ำในเซลล์ชุด เก็บทำความสะอาดแร่ (Cleaners) และจะได้หัวแร่สะอาดเพื่อการใช้งานหรือจำหน่ายต่อไปดังรูปที่ 2.6 การใช้เซลล์ลอยแร่เป็นจำนวนมากมาต่อกันเป็นอนุกรมเพื่อเป็นการเพิ่มการเก็บแร่ให้สูงขึ้นดีกว่าการใช้เซลล์ลอยแร่ขนาดใหญ่เพียงเซลล์เดียว แต่การลอยแร่ที่ใช้เซลล์ใหญ่เพียงเซลล์เดียวจะควบคุมอัตโนมัติได้ง่ายกว่า



รูปที่ 2.5 เซลล์ลอยแร่ [6]



รูปที่ 2.6 การวางชุดลอยแร่แบบเชิงกล [3]

ของผสมเมื่อถูกป้อนไปยังเซลล์ลอยแร่แล้ว ก็จะถูกปรับสภาพด้วยน้ำยาเคมีที่เหมาะสมและปริมาณที่พอเหมาะเพื่อให้แร่ที่ต้องการลอยมีสมบัติไม่เปียกน้ำดียิ่งขึ้น สามารถเกาะฟองอากาศและลอยขึ้นสู่ผิวหน้าเป็นชั้นของแร่ลอย (Froth zone) จากนั้นแร่ในชั้นของแร่ลอย ก็จะถูกปาดออกไปเป็นหัวแร่ (Concentrate) การกวนของใบพัดในเซลล์ลอยแร่ก็นำไปให้แร่แขวนลอยอยู่ในน้ำ แร่มีการสัมผัสกับน้ำยาเคมีและฟองอากาศได้อย่างทั่วถึงและการกวนนี้ยังทำหน้าที่เหมือนปั๊มดูดอากาศเข้าทางเพลากลวงที่อยู่รอบแกนใบพัด (ซึ่งเซลล์ลอยแร่บางชนิดใช้อากาศจากเครื่องเป่าลมที่ติดตั้งภายนอก) นอกจากนี้การกวนของใบพัดยังเป็นการเสียดสีกับอากาศที่เข้ามาให้ได้ฟองอากาศที่มีขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามฟองอากาศนี้จะมีขนาดเล็กเท่าๆ กันมีความเหนียวมากขึ้นและมีความหนาของชั้นแร่ลอยสม่ำเสมอ (Froth stability) หากใช้น้ำยาเคลือบฟองช่วย สำหรับแร่ที่ไม่เกาะฟองอากาศ ก็จะจมอยู่ในชั้นของของผสม (Slurry zone) และจะถูกส่งไปทำการแยกแร่ในขั้นต่อไป หรืออาจจะทิ้งเป็นหางแร่เลยก็ได้ การลอยแร่ด้วยเซลล์ชนิดนี้ไม่สามารถให้ผลการแยกแร่ได้สะอาดถึงร้อยละร้อย เนื่องจากมีกลไกต่างๆ มากมายที่ก่อให้เกิดการปะปนของแร่มลทินหรือกากแร่เข้าไปในหัวแร่ (Gangue recovery mechanisms) ซึ่งปัญหานี้อาจแก้ไขได้โดยวิธีการลอยซ้ำหลายๆ ครั้ง เพื่อให้ได้หัวแร่ที่มีคุณภาพตามความต้องการของตลาด แต่วิธีการลอยซ้ำในเซลล์ขั้นต่อไปนั้นเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่าย รวมถึงการลดประสิทธิภาพของกระบวนการแต่งแร่ด้วย (Loss of processing efficiency) จะเห็นว่าการทำงานของเซลล์ลอยแร่ก็นำไปให้เกิดความขัดแย้งกันเองกล่าวคือ จะต้องมีการกวนของใบพัดเพื่อให้แร่เกิดการแขวนลอยอยู่เสมอและช่วยให้เม็ดแร่มีโอกาสสัมผัสกับฟองอากาศมากขึ้นแต่ในขณะเดียวกันการกวนนี้เองก็เป็นเหตุให้แร่มลทินปะปนเข้าไปในชั้นแร่ลอย (Gangue entrainment) ต่อมาได้มีการใช้น้ำล้างในเซลล์ลอยแร่เพื่อลดปัญหานี้

เนื่องจากแร่มลทินที่ลอยขึ้นมาปะปนในชั้นของแร่ลอยทำให้หัวแร่มีเกรดต่ำลง ดังนั้นการที่จะลดมลทินเหล่านี้ได้จึงเป็นสิ่งสำคัญยิ่งในการลอยแร่ที่ดี วิธีการหนึ่งที่น่าสนใจที่สามารถช่วยลดปัญหานี้ได้คือการใช้ น้ำล้าง (Wash water) การฉีดพ่นน้ำล้างไปยังชั้นของแร่ลอยที่กำลังไหลล้นหรือถูกปาดออกเป็นหัวแร่ วิธีการนี้เรียกว่า การทำความสะอาดแร่ลอย (Froth washing) สำหรับการฉีดพ่นน้ำล้างนี้จะฉีดผ่านท่อที่เจาะรูเล็ก ๆ หรือหัวฉีด (Nozzles) ในการทำความสะอาดแร่ลอยมาประยุกต์ใช้กับเซลล์ลอยแร่ช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการลอยแร่ดียิ่งขึ้น เนื่องจากชั้นแร่ลอยมี

ความหนา (Froth thickness) สม่่าเสมอ และในขณะเดียวกันน้ำล้างนี้จะล้างหัวแร่ให้สะอาดทำให้ได้หัวแร่ที่มีเกรดสูงขึ้นลดปัญหาการมีแร่ลทินปะปนลงไปได้ [7]

ในเวลาต่อมาการนำการทำความสะอาดแร่ลอยมาใช้ ได้เป็นที่ยอมรับในหลายประเทศ เนื่องจากเกรดและการเก็บแร่ได้สูงขึ้นและยังช่วยลดปัญหาการยุบตัวของแร่ใน ชั้นของแร่ลอยลงไปยังชั้นแร่ผสมน้ำในกรณีที่แร่ในชั้นของแร่ลอยมีความหนาแน่นมาก หรือที่เรียกว่า ฟองตกค้าง (Froth knock down) ซึ่งการใช้ล้างจะช่วยทำให้เกิดการไหลล้น (Drainage) ของแร่ในชั้นของแร่ลอยดีขึ้นนั่นเองตัวอย่างการใช้การทำความสะอาดแร่ลอยกับเซลล์ลอยแร่ เช่น ที่ประเทศแคนาดาได้มีการทดลอง ทำให้ได้หัวแร่นิกเกิลเพิ่มขึ้นจาก 2.3 เป็น 2.7 ออนซ์ต่อตัน การเก็บแร่ได้เพิ่มขึ้นจาก 85 เปอร์เซ็นต์ เป็น 87 เปอร์เซ็นต์ ได้หัวแร่ทองแดงเพิ่มขึ้นจาก 24.5 เปอร์เซ็นต์ เป็น 25.9 เปอร์เซ็นต์ การเก็บแร่สังกะสีได้ โดยเพิ่มจาก 47 เปอร์เซ็นต์ เป็น 50 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ที่เหมืองสังกะสี ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการทดลองใช้การทำความสะอาดแร่ลอยเช่นเดียวกัน ในเซลล์ทำความสะอาดหัวแร่สังกะสี (Zinc cleaner circuit) โดยใช้ล้างน้ำล้างฉีดผ่านหัวฉีดพ่นลงยังผิวหน้าของแร่ที่กำลังไหลล้น ผลการทดลองพบว่า การทำความสะอาดแร่ลอย ช่วยลดแร่ลทินที่ปะปนขึ้นไปในหัวแร่ได้มาก ทำให้ได้หัวแร่สังกะสี สะอาดขึ้นจาก 54.5 เปอร์เซ็นต์ เป็น 56.1 เปอร์เซ็นต์ และการเก็บแร่ได้ เพิ่มขึ้นจาก 55 เปอร์เซ็นต์ เป็น 56.8 เปอร์เซ็นต์ (เปอร์เซ็นต์หัวแร่และปริมาณแร่ที่ได้) [7]

การทำความสะอาดแร่ลอยที่ใช้กับเซลล์ลอยแร่สามารถสรุปได้ว่า เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการแต่งแร่ (Metallurgical performance) ทั้งเกรดและการเก็บแร่ได้ โดยเน้นที่การกำจัดหรือลดปริมาณแร่ลทินในหัวแร่หรือที่เรียกว่า การเข้าไปผสมของมลทิน (Gangue entrainment) นั้นเอง

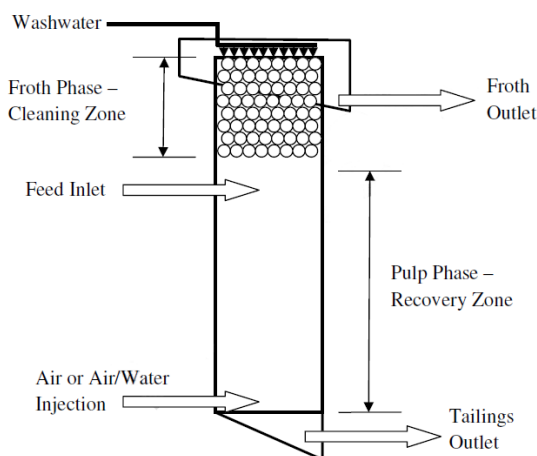
เนื่องการปะปนของแร่ลทินเข้าไปในหัวแร่ กลไกเหล่านั้นสามารถอธิบายได้จากการทำงานของเซลล์ลอยแร่จะเป็นแบ่งเป็น 2 ชั้นตอน คือ ชั้นของแร่ที่ลอย และชั้นของแร่ผสมน้ำ ดังนั้นการปะปนของแร่ลทินเข้าไปในหัวแร่ก็จะแบ่งตามชั้นทั้งสองนั้นด้วย โดยในชั้นของแร่ลอย แร่ลทินจะปะปนไปในลักษณะถูกกักไว้ หรือปะปนเข้าไปกับน้ำ เกิดขึ้นเนื่องจากฟองอากาศที่พาเอาแร่ที่ลอยได้ดี (Floatable) ซึ่งเกาะติดอยู่นั้นลอยขึ้นไปในชั้นลอยแร่เกิดการเชื่อมติดกัน ทำให้แร่ลทินหรือแร่ที่ไม่สามารถลอยได้ถูกกักอยู่ระหว่างการเชื่อมเกาะกับฟองอากาศนั้น ส่วนการเข้าไปแบบลักษณะเข้าไปปะปนกับน้ำนั้น เกิดขึ้นจากการที่น้ำพาเอาเม็ดแร่ขนาดละเอียด ซึ่งอาจจะเป็นแร่ลทินเข้าไปในชั้นของแร่ลอยสำหรับในชั้นของแร่ผสมน้ำ การปะปนเข้าไปของแร่ลทินจะเกิดแบบการจับตัวของฝุ่นบนผิวแร่ (Slime coating) และ เกิดจากการปะปนซึ่งสามารถแบ่งลักษณะออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ การปะปนเข้าไปกับน้ำ (Hydraulic entrainment) และ การปะปนจากอุปกรณ์ที่ใช้ (Mechanical entrainment) ซึ่งอธิบายได้ดังนี้ การเกิดการจับตัวของฝุ่นบนผิวแร่เกิดขึ้นจากการที่มีฝุ่นแร่ลทินไปเคลือบผิวของเม็ดแร่ที่ต้องการจะลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า ทำให้แร่ลทินนั้นลอยขึ้นไปเป็นปะปนหัวแร่ ทำให้หัวแร่ไม่สะอาดมีความบริสุทธิ์ต่ำลง ส่วนการเกิดแบบการปะปนเข้าไปกับน้ำในชั้นแร่ผสมน้ำนั้น เกิดขึ้นจากการที่ฟองอากาศลอยขึ้นไปชั้นของแร่ที่ลอย ฟองอากาศจะดูดเอาอนุภาคขนาดละเอียดติดไปด้วยตามด้วย และการเกิดแบบการปะปนจากอุปกรณ์ที่ใช้เกิดจากการกววนของใบพัดในเซลล์ลอยแร่ ซึ่งก่อให้เกิดภาวะปั่นป่วน (Turbulence) โดยเฉพาะบริเวณชั้นแบ่ง

ระหว่างชั้นของแร่ที่ลอยและชั้นของแร่ผสมน้ำหรือชั้นรอยต่อ (Interface level) การกววนจะทำให้แร่มลทินปะปนเข้าไปยังหัวแร่ในชั้นของแร่ที่ลอยได้

จากกลไกเหล่านี้ทำให้มีการปรับปรุงและพัฒนาการลอยแร่ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ซึ่งนอกจากการนำเอาการทำควมสะอาดแร่ลอยมาใช้แล้วยังได้มีการประดิษฐ์คิดค้นเครื่องลอยแร่ ออกมาในรูปแบบลักษณะที่แตกต่างกันออกไปซึ่งมีเครื่องลอยแร่ที่มีหลักการทำงานและการออกแบบที่น่าสนใจด้วยกัน 3 ชนิด คือ เซลล์ลอยแร่แบบคอลัมน์ แบบเจมสัน (Jameson cell) และเครื่องลอยแร่แบบไซโคลเจ็ต (Cyclojet cell) ซึ่งดัดแปลงมาจากแบบเจมสันโดยการปรับปรุงจุดบกพร่องในเซลล์ลอยแร่แบบเจมสัน ลักษณะของเซลล์ลอยแร่ทั้ง 3 ชนิดนี้จะมีรูปร่าง และหลักการทำงานดังนี้

2.3.2 เครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ (Column cell)

ลักษณะของเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์แสดงดังรูปที่ 2.7 คอลัมน์จะมีลักษณะเป็นกระบอกยาวตั้งแต่ 1 เมตรขึ้นไป มีเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 2.5 เซนติเมตร โดยทั่วไปจะมีสัดส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 10:1 คอลัมน์จะไม่มีใบพัดกววนแร่ให้เกิดสภาวะปั่นป่วนเหมือนเซลล์ลอยแร่ การผลิตฟองอากาศจะเกิดขึ้นโดยให้อากาศถูกอัดผ่านตัวทำฟองอากาศ (Sparger) ซึ่งมีรูพรุนเล็กๆ ที่ตั้งอยู่ด้านล่างของคอลัมน์ ทำให้ได้ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กเท่าๆ กัน พ่นเข้าสู่คอลัมน์ นอกจากนี้แล้วจะมีการใช้น้ำล้าง ฉีดผ่านท่อกระจาย (Distributor) หรือหัวฉีดทางตอนบนของคอลัมน์ด้วยเพื่อทำให้หัวแร่สะอาดขึ้น การป้อนจะป้อนเข้าสู่ส่วนกลางของคอลัมน์ที่ระดับ 0.5-1.5 เมตร ต่ำจากส่วนบนของคอลัมน์ ที่เพื่อเพิ่มโอกาสให้ของผสมปะทะกับฟองอากาศที่ลอยขึ้นมาจากด้านล่าง เรียกบริเวณนี้ว่า ชั้นเก็บแร่ทำให้แร่ที่เกาะกับฟองอากาศลอยขึ้นสู่ส่วนบนของคอลัมน์ที่เรียกว่า ชั้นของแร่ลอยซึ่งมลทินที่ถูกฟองอากาศหนุนขึ้นมาด้วยจะถูกน้ำล้างชะล้างลงด้านล่าง หัวแร่ที่สะอาดไหลล้นออกจากเซลล์ลอยแร่ ส่วนแร่จมจะไหลลงด้านล่างของคอลัมน์ซึ่งถูกแยกออกไป ประสิทธิภาพของเซลล์ลอยแร่ขึ้นอยู่กับความสูงของคอลัมน์ ตำแหน่งของช่องป้อน ปริมาณน้ำล้าง ปริมาณของฟองอากาศ อัตราการป้อนแร่ เกรดของแร่ป้อน ปริมาณของสารเคมี และอุณหภูมิของของผสมในคอลัมน์



รูปที่ 2.7 เครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ [3]

เครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ถือได้ว่าเป็นเครื่องลอยแร่ชนิดแรกๆ ใช้กันอยู่เป็นระยะเวลานานจนถึงปัจจุบัน โดยเครื่องลอยแร่ชนิดนี้ได้ถูกจัดทำขึ้นโดย Piere Boutin [8] ได้ประดิษฐ์เครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ในปี ค.ศ 1960 เพื่อใช้ในวงจรการลอยแร่ซิลิกาออกจากแร่เหล็กในขั้นตอนการลอยหยาบ (Rougher-scavenger) ซึ่งให้ผลการลอยดีกว่าการลอยแร่แบบดั้งเดิม และจากนั้นได้มีการพัฒนาคอลัมน์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นจากเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว เป็น 12 นิ้ว แบบกึ่งควบคุมอัตโนมัติในการลอยสินแร่ของบริษัทในแคนาดา และต่อมานำมาใช้ลอยแร่ซัลไฟด์โดย Canadian Copper Producer ได้ทดลองอย่างได้ผลดีกับคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 นิ้ว และได้นำไปทดลองลอยแร่ต่าง ๆ อย่างได้ผล แต่ก็ยังมีขนาดเล็กอยู่ เมื่อเปรียบเทียบกับความต้องการในการผลิตขั้นอุตสาหกรรม จึงพยายามสร้างขนาดที่ใหญ่ขึ้นโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 72 นิ้ว และในปี ค.ศ. 1980 บริษัท Mine Gaspé ได้นำคอลัมน์ขนาด 18 และ 36 นิ้ว ไปลอยแร่โมลิบดีนัม ซึ่งเป็นแร่พลอยได้ในชั้นละเอียด และเป็นการนำเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์มาใช้ในอุตสาหกรรมเป็นครั้งแรก กล่าวคือการเก็บแร่ได้เพิ่มเป็น 2 เมื่อเทียบกับการลอยแร่ก่อนหน้านั้น ส่งผลให้เครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์เริ่มแพร่หลายมากขึ้นโดยนำไปทดลองใช้ในประเทศซิวี แอฟริกา และยุโรป และต่อมาได้มีการสรุปข้อดีของเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์และปรับปรุงคุณภาพเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำงานมากยิ่งขึ้น

สรุปข้อดีของเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ไว้ดังนี้ [9, 10]

1.) การควบคุมการทำงานเป็นระบบปิด ใช้เครื่องควบคุมอัตโนมัติได้ทำให้สามารถเก็บข้อมูลและควบคุมตัวแปรต่างๆ รวมถึงข้อมูลทางเคมีโดยผ่านระบบคอมพิวเตอร์ได้เต็มประสิทธิภาพ

2.) ไม่ใช้อุปกรณ์ในการกวนผสม

3.) ให้เกรดของหัวแร่และการเก็บแร่ได้สูงขึ้น

4.) ลอยแร่ได้เร็วกว่าเซลล์ลอยแร่

5.) สามารถควบคุมอากาศที่ใช้ให้มีการกระจายตัวและปริมาณที่เหมาะสมซึ่งจากการศึกษาควรใช้อากาศประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรถัง

6.) ใช้พื้นที่แนวดิ่งจึงทำให้ประหยัดพื้นที่ในการใช้งาน

7.) การซ่อมรักษาใช้ระยะเวลานาน เพราะวัสดุในการสร้างคอลัมน์มีความทนทานสูง

8.) ค่าใช้จ่ายในการลอยแร่ต่ำกว่าเซลล์ลอยแร่

การศึกษาการลอยแร่โมลิบดีนัมให้สะอาดขึ้นด้วยเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ขนาดอุตสาหกรรมโดยได้ศึกษาการแยกแร่เฉพาะเจาะจงในชั้นของแร่ลอย โดยการสร้างโมเดลให้สามารถปรับเปลี่ยนระยะได้ 0.5-1.5 เมตรและสรุปผลได้ว่า ลึกมากกว่า 1 เมตร จะทำให้การเก็บแร่ได้สูงขึ้น 10-15 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าระยะความลึกน้อยกว่า 0.5 เมตร จะไม่สามารถแต่งแร่ได้ดีเท่าที่ควรเนื่องจากผลกระทบจากน้ำล้าง [11, 12]

ในการศึกษาขนาดของเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ ได้มีการศึกษาในส่วนของการเก็บแร่ โดยทำการศึกษาเป็นอัตราส่วนระหว่าง ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ จากการศึกษาพบว่า เมื่ออัตราส่วนนี้เพิ่มสูงขึ้น เกรดของหัวแร่นั้นมีแนวโน้มลดลง จากการทดลองใช้คอลัมน์มีความ

สูง 10-15 เมตร และควบคุมอัตราส่วนความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ โดยอัตราส่วนที่ดีที่สุดนั้นเท่ากับ 10 เมตร [13-16]

การใช้วัสดุพูนมาเป็นอุปกรณ์ปล่อยฟองอากาศ โดยที่วัสดุพูนทำจากเซรามิกหรือวัสดุเคลือบแก้วมีขนาดรูพรุนประมาณ 300 ไมโครเมตร ใช้วัสดุยึดผสมจนจำพวกยางทำให้เกิดฟองอากาศ ใช้สำหรับลอยแร่ [17] และต่อมาได้นำมาทำการศึกษาและวิจัยได้สรุปว่า การใช้วัสดุเซรามิกผสมกับวัสดุผสมจำพวกยางเป็นสาเหตุสำคัญทำให้เกิดพื้นที่ผิวที่เหมาะสมบนอุปกรณ์ปล่อยฟองอากาศซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับงานวิจัย [18] และการใช้สารเคมีเพื่อปรับสภาพฟองอากาศนั้นมีความสำคัญในการปรับขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศ [19] ต่อมาได้ศึกษาวัสดุผสมที่ใช้ทำอุปกรณ์ลอยแร่โดยการผสมโลหะผงในการขึ้นรูปด้วยการเผาผนึก (Sintering) ให้ผงโลหะหลอมติดกันลงไป ทำให้ขนาดของฟองอากาศที่ไหลกระจายตัวมีขนาดประมาณ 1-2 ไมโครเมตร ซึ่งสามารถลอยแร่ได้ดียิ่งขึ้น [20] ต่อมาได้มีผู้ทำการศึกษาขนาดของฟองอากาศที่เหมาะสมในการลอยแร่และพบว่าขนาดที่เหมาะสมคือขนาดประมาณ 0.4-0.8 มิลลิเมตร ด้วยเหตุผลที่ว่าขนาดของฟองอากาศขนาดนี้เป็นขนาดที่สูงที่สุดที่ก๊าซจะสามารถละลายอยู่ในน้ำได้ (Maximum gas rate) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่ได้สรุปงานวิจัยว่าขนาดฟองอากาศที่เหมาะสมในการลอยแร่มีขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศประมาณ 0.4 มิลลิเมตร [18] และจากการศึกษาไฮโดรไดนามิกส์ในอนุภาคขนาดละเอียดและฟองอากาศขนาด 70 -250 ไมโครเมตร ในการลอยถ่านหิน พบว่าขนาดของฟองอากาศ เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ การลดขนาดของฟองอากาศจะสามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ได้ และพบว่า การเพิ่มเวลาให้แร่ที่อยู่ในถังลอย (Residence time) ก็ส่งผลสมรรถนะของเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ด้วย [21]

ในการเปรียบเทียบการลอยแร่แบบคอลัมน์และเครื่องลอยแร่แบบเชิงกล [22] การใช้เครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์สามารถลอยแร่โครไมต์ (Chromite ore) เปรียบเทียบกับเซลล์ลอยแร่แบบเชิงกล พบว่าการลอยแร่ด้วยคอลัมน์ให้ผลดีกว่าเซลล์ลอยแร่เชิงกล ซึ่งสามารถลอยได้ดีทั้งเกรดและปริมาณการเก็บแร่ได้สูงกว่า ในขณะที่ความหนาแน่นของผสมในคอลัมน์มีความเหมาะสมอยู่ในช่วงตั้งแต่ 3-20 เปอร์เซ็นต์ของแข็งและใช้เวลาน้อยกว่า ที่โรงแต่งแร่ Polaris ในรัฐ Quebec ประเทศแคนาดา ได้ใช้เครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ 2 คอลัมน์ แทนเซลล์ลอยแร่แบบเชิงกลเพื่อแก้ไขปัญหาในการลอยแร่กาสินา ซึ่งผลจากการทดสอบพบว่าเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์สามารถลอยแร่ได้เกรดและการเก็บแร่ได้สูงกว่าเครื่องลอยแร่แบบเชิงกล โดยเกรดของหัวแร่เพิ่มขึ้นจาก เดิม 76 เปอร์เซ็นต์ เป็น 79.3 เปอร์เซ็นต์ โดยการเก็บแร่ได้เพิ่มขึ้นจาก 91 เปอร์เซ็นต์ เป็น 91.3 เปอร์เซ็นต์ [23]

ในการศึกษาการลอยแร่ไฟไรต์ออกจากถ่านหินที่มีความบริสุทธิ์อยู่ที่ 70-85 เปอร์เซ็นต์ และสามารถเก็บแร่ได้ 80-85 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกรดของถ่านหินไม่ได้สูงมากนัก เนื่องจากพบแร่ไฟไรต์ที่มีขนาดละเอียดฝักระจายอยู่ในถ่านหินทำให้เกรดของหัวแร่น้อยลง [8]

จากการทดลองนำถ่านหินจากน้ำทิ้งของโรงแต่งถ่านหินที่ Kentucky ซึ่งเป็นถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 100 เมช และมีปริมาณเถ้าสูงถึง 30-35 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก โดยการใช้อุปกรณ์ลอยแร่แบบคอลัมน์ขนาดห้องปฏิบัติการสามารถลดปริมาณเถ้าให้เหลือเพียง 2-8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถเก็บแร่ได้เกือบ 90 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณแร่ป้อน [24] ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องกับงานวิจัยใน

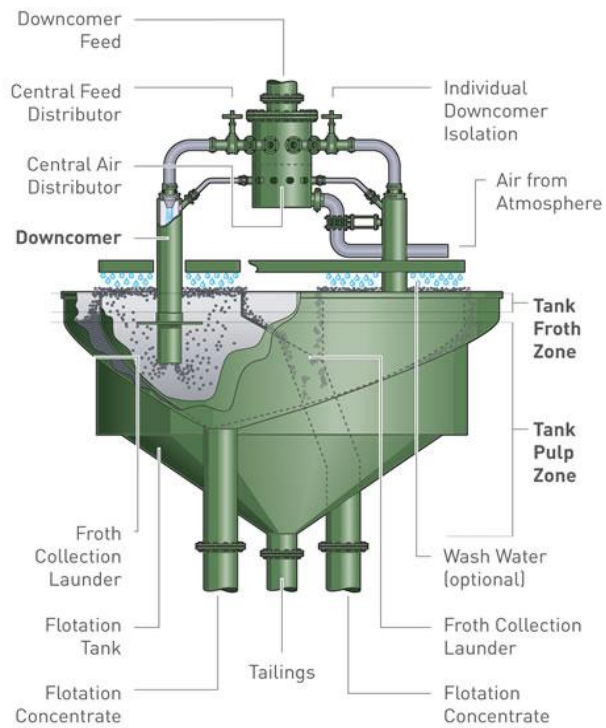
การลอยแร่เพื่อเพิ่มควมบริสุทธิ์ของถ่านโดยเครื่องลอยแร่แบบคอลลัมล์ ซึ่งการทดลองพบว่า การลอยแร่ด้วยเครื่องลอยแร่แบบคอลลัมน์สามารถทำให้ถ่านหินมีความบริสุทธิ์เพิ่มสูงขึ้น โดยการลอยแร่สามารถลดปริมาณเถ้าลดลงเหลือ 10 เปอร์เซ็นต์ จาก 60 เปอร์เซ็นต์ และสามารถเก็บแร่ได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ [25]

ต่อมาได้มีการวิจัยพบว่า ในส่วนของชั้นเก็บแร่ของเครื่องลอยแร่แบบคอลลัมน์ ไม่มีความจำเป็นใดๆ ต่อประสิทธิภาพในการเก็บแร่ดังนั้นจึงนำไปสู่การพัฒนาและออกแบบเครื่องลอยแร่แบบคอลลัมน์สั้น ซึ่งต่อมาได้ถูกพัฒนาและเรียกว่าเครื่องลอยแร่แบบเจมสัน [1]

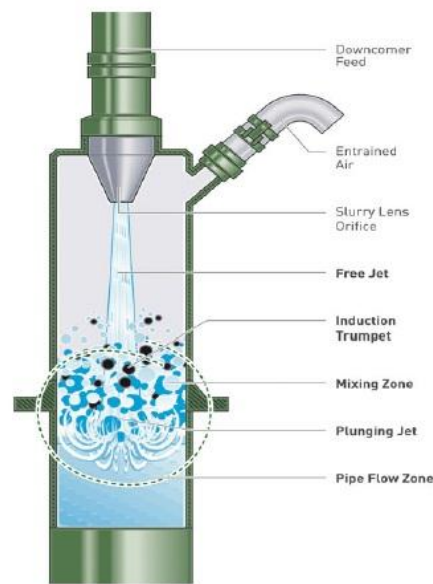
2.3.3 เครื่องลอยแร่แบบเจมสัน

หลักการทำงานของเครื่องลอยแร่แบบเจมสัน คือการสูบของผสมลงสู่ ดาวคัมเมอร์ ภายใต้ความดันสูงซึ่งของผสมจะผ่านบริเวณว่างเปล่า (Calming zone) และผ่านหัวฉีดโดยจะมีความเร็วของของผสมสูง ทำให้อากาศที่ผ่านเข้ามาทางรูที่เจาะบนดาวคัมเมอร์ แรงดูดจะเป็นลักษณะของสุญญากาศซึ่งจะดูดอากาศจากชั้นบรรยากาศภายนอกดาวคัมเมอร์ทำให้อากาศมาผสมกับของผสม ซึ่งจะใช้ผลิตเป็นฟองอากาศเพื่อใช้ในการลอยแร่ [26] และต่อมาเมื่อบีมของผสมผ่านหัวฉีดมาลงสู่ในเครื่องลอยแร่แบบเจมสัน อากาศจะผสมกับของผสมโดยเกิดแรงเฉือนและความปั่นป่วนขึ้น ทำให้ของผสมเกิดเป็นฟองอากาศละเอียดมาก (ประมาณ 0.3 มิลลิเมตร) ใช้ในการลอยแร่ได้ ของผสมจะถูกป้อนไปยังถังลอยโดยการป้อนของผสมจำเป็นต้องป้อนด้วยความดันสูง โดยให้ของผสมผ่านตลอดไปถึงบริเวณปากหัวฉีด (Orifice) ดังรูปที่ 2.8

แรงเฉือนของอากาศและของผสมภายในดาวคัมเมอร์ จะสร้างฟองอากาศและจะถูกส่งผ่านไปยัง โซนการผสม (Mixing zone) อนุภาคและฟองอากาศจะเกิดการชนและแนบติดกันและต่อมาจะถูกส่งลงจากดาวคัมเมอร์ผ่านท่อลงไป ฟองอากาศที่ถูกสร้างจากระบบสุญญากาศ จะลอยออกจากดาวคัมเมอร์เพื่อที่จะเพิ่มโอกาสเกาะติดกันระหว่างฟองอากาศและอนุภาคแร่ ทำให้สามารถลอยขึ้นไปยังชั้นของแร่ลอยที่เป็นบริเวณที่แร่ถูกแยกออกจากฟองอากาศ (รูปที่ 2.9) ประสิทธิภาพของเซลล์ลอยแร่ขึ้นอยู่กับ ระยะความลึกของปากดาวคัมเมอร์จากผิวหน้า เส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับผิวหน้า ความดันในการป้อนแร่ อัตราการป้อนแร่ ปริมาณน้ำล้าง เกรดของแร่ป้อน ปริมาณของสารเคมี อุณหภูมิของของผสมในการลอย [27]



รูปที่ 2.8 เครื่องลอยแร่แบบเจมสัน [28]



รูปที่ 2.9 การทำงานภายในดาวคัมเมอร์ของเครื่องลอยแร่แบบเจมสัน [29]

โดยที่ข้อดีของเครื่องลอยแร่แบบเจมสัน คือใช้ระยะเวลาในการลอยแร่รวดเร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ยาว ซึ่งเครื่องนี้ได้รับการปรับปรุงมาจากเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ โดย Graeme J. Jameson แห่งมหาวิทยาลัยนิวคาสเซิล รัฐนิวเซาท์เวลส์ ประเทศ

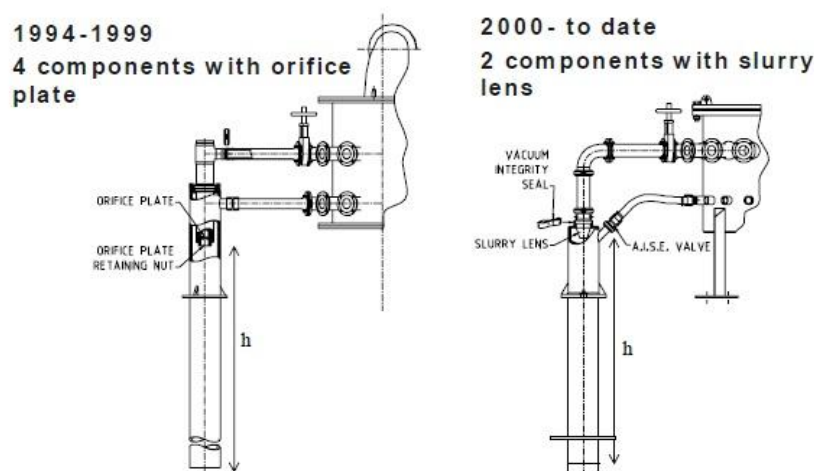
ออสเตรเลีย ร่วมกับบริษัท Mount Isa Mines Limited ได้ทำการประดิษฐ์เครื่องมือที่ใช้ในการลอยแร่แบบใหม่ขึ้นในปี ค.ศ. 1987 ซึ่งได้ดัดแปลงการทำงานมาจากคอลัมน์ โดยสร้างให้มีความสูงลดลง เพื่อที่จะลดปริมาตรของชั้นเก็บแร่ให้น้อยลงที่สุด ซึ่งมีลักษณะที่สำคัญคือของผสมป้อนและฟองอากาศสัมผัสและผสมกันในส่วนของดาวคัมเมอร์ ส่วนผสมของอากาศและน้ำไหลลงสู่ด้านล่างเพื่อดันลอยตัวขึ้นในคอลัมน์ซึ่งมีข้อได้เปรียบต่อคอลัมน์แบบเก่าคือจะลดขนาดของพื้นที่การติดตั้ง เพราะส่วนสูงลดน้อยลง ในขณะที่ขนาดเท่าเดิม จากการทดลองใช้เครื่องลอยแร่แบบเจมสัน ซึ่งมีดาวคัมเมอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เมตร สูง 1.1 เมตร ในการลอยแร่ตะกั่วสังกะสีที่ Mount Isa Mines Limited เปรียบเทียบกับ คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตร สูง 10 เมตร ปรากฏว่าหัวแร่ที่แต่งได้มีคุณภาพใกล้เคียงกันแต่ระยะเวลาที่แร่ลอยอยู่ในเครื่องลอยแร่ (Residence time) โดยในเครื่องลอยแบบเจมสันใช้เวลาเพียง 10 วินาที ในขณะที่คอลัมน์ใช้เวลาจนถึง 10 นาที และได้สรุปว่าในชั้นเก็บแร่ของเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ ไม่มีความจำเป็นใดๆ ดังนั้นจึงนำไปสู่การพัฒนาเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์สั้น [1]

ข้อเสียของเครื่องลอยแร่แบบเจมสัน โดยมีข้อเสียจุดใหญ่อยู่ที่เกิดการปั่นป่วนอยู่ตรงส่วนที่ก่อนจะออกจากดาวคัมเมอร์ จากการศึกษพบว่าส่วนที่อยู่ใต้ดาวคัมเมอร์ ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการปั่นป่วนมากและการฟุ้งกระจายของฟองอากาศที่มาจากเครื่องลอยแร่แบบเจมสันเองจะมีผลเสียต่อประสิทธิภาพของการลอยแร่อย่างมีนัยสำคัญ จึงได้ออกแบบแผ่นพรุณเพื่อเพิ่มความสามารถในการฟุ้งกระจายของของผสมที่เกิดจากความเร็วของของผสมพุ่งปะทะที่ผิวหน้าของน้ำในเซลล์ลอยแร่และทำให้ความเร็วของอากาศที่ถูกดูดเข้ามาลดลงจึงเกิดการปั่นป่วนลดลง และเพิ่มกระจายตัวของฟองอากาศ ดังนั้น พบว่าการปั่นป่วนลดลงประมาณ 69 เปอร์เซ็นต์ [26] และในเวลาต่อมา ได้มีการปรับปรุงลักษณะของหัวฉีดให้เหมาะสม ซึ่งพบว่าการใช้หัวฉีดที่มีการสัมผัสกับผิวน้ำได้ดีจะมีส่วนช่วยลดการปั่นป่วนได้ โดยได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีความสำคัญในการลอยถ่านหินเพื่อที่จะกำจัดถ่านในถ่านหินด้วยเครื่องลอยแร่แบบเจมสัน ขนาดถึง 54x130 เซนติเมตร มีการควบคุมเปอร์เซ็นต์ของแข็ง ให้คงที่ที่ 6 เปอร์เซ็นต์ ใช้น้ำยาเคลือบผิวแร่คงที่ที่ 1 กิโลกรัมต่อตันแร่ ใช้น้ำยาเคลือบฟองคงที่ที่ 400 กรัมต่อตันแร่ ความดันในการป้อนใช้ที่ 130 กิโลพาสคาล ปริมาณน้ำล้างคงที่ที่ 4 ลิตรต่ออนาที ใช้อัตราการไหลของผสมป้อน 200 ลิตรต่ออนาที และทำการทดลองโดยเปลี่ยนชนิดของหัวฉีด 3 ลักษณะที่แตกต่างกัน ระยะเวลาสูงของหัวฉีดจากระดับน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ และ ระยะที่ปากดาวคัมเมอร์ อยู่ลึกจากระดับผิวน้ำระหว่าง 5-40 เซนติเมตร ความสูงของฟองอยู่ระหว่าง 5-25 เซนติเมตร ผลปรากฏว่า ตัวแปรที่สามารถทำให้ประสิทธิภาพในการเก็บแร่ได้มากที่สุด คือ การใช้หัวฉีดชนิดที่มีการสัมผัสกับผิวน้ำของน้ำมากที่สุดจะให้ประสิทธิภาพในการลอยแร่ที่ดีกว่า ความสูงของหัวฉีดที่ระยะ 20 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ 15 เซนติเมตร และระยะที่ปากดาวคัมเมอร์อยู่ลึกจากระดับผิวน้ำ 10 เซนติเมตร สามารถลดถ่านในถ่านหินได้จาก 45.30 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 14.90 เปอร์เซ็นต์ [30]

ต่อมาได้พบว่า ระบบสุญญากาศที่เกิดขึ้นในระบบนั้นอาจมีผลต่อการเคลื่อนที่ของของผสมภายในดาวคัมเมอร์หรืออาจมีส่วนทำให้ของผสมไม่ไหลลงตามดาวคัมเมอร์ [31] ดังนั้นจึงได้ทำการพัฒนาระบบของดาวคัมเมอร์ โดยการเปลี่ยนแปลงการเกิดสุญญากาศในดาวคัมเมอร์เล็กน้อยจากการเชื่อมต่อกับท่ออากาศที่ซึ่งส่งผลต่อการไหลชั่วขณะของของผสมก่อนที่จะเข้าไปในดาวคัม

เมอร์ เรียกระบบนี้ว่า Air Isolating Slurry Eliminating (AISE) valve (รูปที่ 2.10) การออกแบบนี้สามารถลดโอกาสการไหลย้อนกลับของแร่ที่แยกแล้วเข้าสู่ภายในดาวคัมเมอร์ โดยตัวจ่ายอากาศจะทำงานเมื่อเกิดการไหลของของผสมภายในดาวคัมเมอร์เท่านั้น โดยใช้แนวคิดหรือหลักการมาจากการใช้ม่านยาง (Rubber curtain) สวมปิดให้สนิท โดยออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการลอยแร่โดยลดความต้านทานที่ต้านการไหลของอากาศให้น้อยที่สุด ตำแหน่งที่ติดตั้งวาล์ว AISE ทำจากยางอ่อน จะทำมุมประมาณ 45 องศาทิศทางการไหลของของผสมเพื่อให้การตอบสนองรวดเร็ว ในปี 1999 มีการเปลี่ยนแปลงปากหัวฉีดที่ใช้ในดาวคัมเมอร์ โดยได้มีการติดตั้งระบบลม (Jet) และ สเลอรี่เลนส์ (Slurry lens) มีลักษณะเด่นที่มีมุมราบเรียบ ทำให้ของผสมไหลผ่านไปยังท่อเซรามิก (เพื่อที่จะให้มีอายุการใช้งานสูงสุด) ที่ผนังภายในเป็นพอลิยูเรเทน (Polyurethane) เพื่อลดการสึกหรอที่เกิดจากการกระแทกจากแร่หนักและขนาดอนุภาคใหญ่ ข้อดีของการติดตั้งลักษณะนี้คือ

- 1.) ทำเป็นลักษณะกระบอกเพื่อให้มีความสามารถในการผ่านได้ดีและเพื่อให้มีส่วนอุดตันน้อยที่สุด
- 2.) การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับปากหัวฉีดโดยการลดใช้พลังประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์
- 3.) ทำให้การเกิดฟองมากขึ้น โดยทำให้การระลอกออกมาให้น้อยที่สุดซึ่งจะส่งผลมาจากการปรับปรุงระบบสุญญากาศและการเกาะติดฟองอากาศกับเม็ดแร่นั้นมีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น



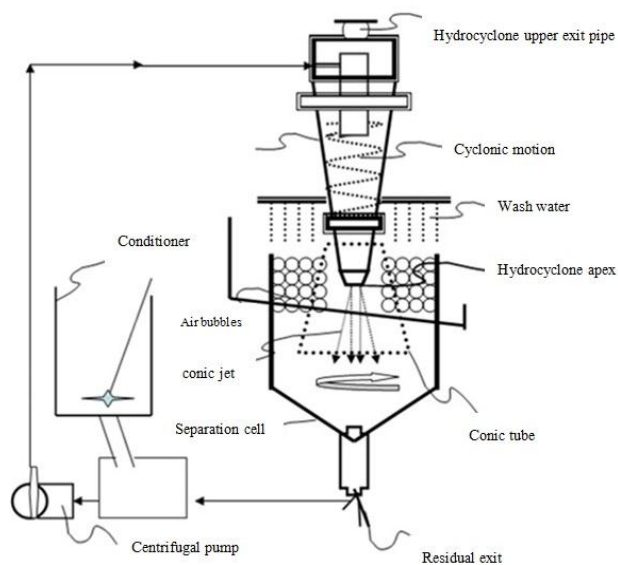
รูปที่ 2.10 การพัฒนาการออกแบบดาวคัมเมอร์ [31]

จากที่ได้กล่าวมานี้พบว่าเครื่องลอยแร่แบบเจมสัน นั้นมีข้อบกพร่องในส่วนที่ใช้ความดันสูงในการป้อนแร่ ซึ่งมีผลทำให้เกิดการสึกหรอภายในดาวคัมเมอร์สูง จากการศึกษาค้นคว้าเพื่อเลือกวัสดุที่สามารถยืดอายุการใช้งานของดาวคัมเมอร์ โดยครั้งแรกใช้ พอลิยูเรเทน (Polyurethane lined steel) พบว่ามีการสึกหรอของดาวคัมเมอร์ และมีอายุการใช้งานค่อนข้างสั้น ดังนั้นในปี ค.ศ. 1991 จึงมีการวิจัยเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ เช่น เหล็กกล้าโครเมียมสูง (High chromium hardened steel) และ เซรามิกชนิดต่างๆ พบว่าการใช้อะลูมินาความหนาแน่นสูงมีสมบัติที่ทนทานการสึกหรอได้ดีเยี่ยมและกลายเป็นที่นิยม [26] และต่อมาในปี ค.ศ. 2006 ได้มีการออกแบบเครื่องลอยแร่ที่ใช้แรงดันในการ

ป้อนแร่ต่ำที่มีระบบการป้อนแร่ด้วยไฮโดรไซโคลน เรียกว่า เครื่องลอยแร่แบบไซโคลเจ็ต (Cyclojet cell) [32] และได้มีการออกแบบให้ดาวคัมเมอร์ มีลักษณะรูปกรวยคว่ำ เพื่อลดการปะทะระหว่างของผสมกับผิวของดาวคัมเมอร์ ที่ตำแหน่งส่วนล่างสุด

2.3.4 เครื่องลอยแร่แบบไซโคลเจ็ต

เครื่องลอยแร่แบบไซโคลเจ็ตแสดงดังรูปที่ 2.11 ประกอบด้วย ระบบการป้อนด้วยไฮโดรไซโคลน ที่ด้านบนของท่อ (Vortex finder) ถูกปิดเพื่อป้องกันการไหลออกของของผสม ในกรณีที่ป้อนของผสมด้วยแรงดันสูงของผสมจะถูกผสมรวมกันอย่างดี เกิดการหมุนของของผสมภายในไฮโดรไซโคลน ไหลลงสู่ส่วนที่อยู่ต่ำกว่าภายในถังลอย ในขณะที่ช่องว่างอากาศ (Air gap) จะถูกสร้างขึ้นจากการหมุนภายในดาวคัมเมอร์ (Conical tube) มีลักษณะเป็นสุญญากาศและจะดูดเอาอากาศจากภายนอกเข้าไป อากาศจากภายนอกจะถูกดูดด้วยความเร็วสูงผ่านรูที่อยู่บนดาวคัมเมอร์ และเกิดการผสมกันระหว่างของผสมและอากาศ ฟุ้งจมลงไปในน้ำภายในถังลอย ซึ่งทำให้เกิดฟองอากาศเป็นจำนวนมากและเกิดการเกาะติดของแร่และฟองอากาศลอยขึ้นสู่ด้านบนของเซลล์ลอยแร่ ส่วนแร่ที่ไม่ถูกเคลือบด้วยฟองอากาศจะตกลงสู่ด้านล่าง



รูปที่ 2.11 เครื่องลอยแร่แบบไซโคลเจ็ต [33]

ถึงแม้ว่าเครื่องลอยแร่แบบไซโคลเจ็ต จะมีโครงสร้างที่แตกต่างกับจากเซลล์ลอยแร่แบบอื่น แต่ยังมีหลักการทำงานให้โดยดูดอากาศจากภายนอกเพื่อใช้ในการลอยแร่ ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนตัวของอากาศอย่างรวดเร็วที่เกิดจากแรงเหวี่ยงที่ป้อนด้วยไฮโดรไซโคลน ผ่านดาวคัมเมอร์ที่จุ่มอยู่ในเซลล์ลอยแร่ ดังนั้นประสิทธิภาพของเซลล์ลอยแร่ชนิดนี้จึงขึ้นอยู่กับ ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์จากผิวน้ำ เส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับผิวน้ำ ความดันในการป้อนแร่ อัตราการป้อนแร่ ปริมาณน้ำล้าง เกรดของแร่ป้อน ปริมาณของสารเคมี และอุณหภูมิของของผสมในคอลัมน์

จากการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องลอยแร่แบบไฮโคลเจ็ตเปรียบเทียบกับเครื่องแยกแร่ชนิดอื่นดังตารางที่ 2.2 เช่น เครื่องลอยแร่แบบเจมสัน ในภาวะใกล้เคียงกัน จากการศึกษา [32] พบว่า ในการแต่งถ่านหินบริสุทธิ์ 80 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณถ่านประมาณ 49 เปอร์เซ็นต์ และมีขนาดเล็กกว่า 53 ไมโครเมตร โดยมีตัวแปรที่เหมาะสมในการลอยแร่ดังตารางที่ 2.2 และได้พิสูจน์ว่าเครื่องลอยแร่แบบไฮโคลเจ็ต สามารถทำความสะอาดถ่านหินได้ดีกว่าเครื่องลอยแร่แบบเจมสัน กล่าวคือ ในการลอยแร่ด้วยเครื่องลอยแร่แบบไฮโคลเจ็ต แต่งฝุ่นถ่านหินให้มีปริมาณถ่านลดลงเป็น 11.32 เปอร์เซ็นต์ และเก็บแร่ได้ 72.80 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับปริมาณถ่าน 14.40 เปอร์เซ็นต์ และการเก็บแร่ได้ 73.82 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้เครื่องลอยแร่แบบเจมสัน เมื่อทดสอบกับถ่านหินชนิดเดียวกัน จะเห็นว่าเครื่องลอยแร่แบบไฮโคลเจ็ต สามารถเก็บแร่ถ่านหินที่สะอาดกว่าในขณะที่ใช้ความดันในการป้อนที่ต่ำกว่าเกือบ 3 เท่า

ตารางที่ 2.2 ตัวแปรเปรียบเทียบระหว่างเครื่องลอยแร่แบบไฮโคลเจ็ตและเจมสัน [32]

| ตัวแปรต่างๆ | ไฮโคลเจ็ต | เจมสัน |
|---|-----------|--------|
| ความดันที่ใช้ในการป้อน (กิโลพาสคาล) | 50 | 130 |
| ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ (เซนติเมตร) | 54/90 | 54/90 |
| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ (เซนติเมตร) | 32 | 15 |
| อัตราการป้อน (ลิตรต่อนาที) | 2 | 4 |
| ของแข็งผสม (เปอร์เซ็นต์) | 6 | 6 |
| ความหนาของชั้นฟองอากาศ (เซนติเมตร) | 19-20 | 15-16 |
| ปริมาณสารเคลือบผิวแร่ (กรัมต่อตันแร่) | 250 | 250 |
| ปริมาณสารเคลือบฟองอากาศ (กรัมต่อตันแร่) | 1600 | 1600 |

จากการศึกษาเครื่องลอยแร่แบบไฮโคลเจ็ต ในการลอยแร่เฟลด์สปาร์ [33] เพื่อที่จะกำจัดแร่โลหะที่ทำให้เกิดสี (ไฮดรอกไซด์ (Fe_2O_3) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)) โดยที่สินแร่มีปริมาณเฟอร์ริกซิลิเกต 0.1 เปอร์เซ็นต์ และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.36 เปอร์เซ็นต์ เมื่อผ่านการลอยแล้วพบว่าปริมาณของเฟอร์ริกซิลิเกต ลดลงเหลือเพียง 0.01 เปอร์เซ็นต์ และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เหลือเพียง 0.02 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น ทั้งหมดนี้สามารถกำจัดแร่โลหะได้มากที่สุดคิดเป็น 92.70 เปอร์เซ็นต์ และน้อยที่สุด 75.40 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้สารเคมีในการลอยคือ Aero 801 และ Aero 825 และจากการศึกษาตัวแปรเพื่อเปรียบเทียบว่าการใช้ปริมาณสารเคมี Aero 801 และ Aero 825 ในปริมาณที่ 1500 กรัมต่อตัน จะทำให้สามารถลอยแร่เพื่อกำจัด Fe_2SiO_3 และ TiO_2 ได้ดีกว่าการใช้ในปริมาณ 750 กรัมต่อตัน การใช้ความดันที่ 40 กิโลพาสคาล จะลอยได้ดีกว่าการใช้ความดันที่ 10 กิโลพาสคาล ความสูงของปากไฮดรไฮโคลน ที่ 10 เซนติเมตร จะลอยได้ง่ายกว่าใช้ความสูงที่ 20 เซนติเมตร และการใช้ระยะความลึกของปากดาวคัมเมอร์จากผิวน้ำ 10 เซนติเมตร จะสามารถลอยแร่ได้ดีกว่า 20 เซนติเมตร

ตารางที่ 2.3 สรุปข้อดีข้อเสียของเครื่องลอยแร่รูปแบบต่างๆ

| หัวข้อ | เครื่องลอยแร่แบบเชิงกล | เครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ | เครื่องลอยแร่แบบเจมสัน | เครื่องลอยแร่แบบไซโคลเจ็ต |
|----------------------------------|-------------------------------------|---|--|---|
| ความเข้มข้น (%Solids) | ความเข้มข้นสูง (20-25 %solids) | ความเข้มข้นต่ำ (10-15 %solids) | ความเข้มข้นต่ำ (<16 %solids) | ความเข้มข้นสูง (30 %solids) |
| ระยะเวลาที่ใช้ในการลอย | นานมาก | นาน | เร็ว | เร็ว |
| รูปแบบการติดตั้งในระบบอุตสาหกรรม | ชุดต่อเนื่องเป็นอนุกรม | เป็นลักษณะคอลัมน์เดี่ยวขนาดใหญ่ | เป็นถังขนาดใหญ่มีหลาย ดาวคัมเมอร์ | ยังไม่มีใช้อย่างแพร่หลายแต่มีแนวโน้มเหมือนกับเครื่องลอยแร่แบบเจมสัน |
| ลักษณะการเกิดฟองอากาศ | เกิดจากใบพัดที่ใช้กวน | เกิดจากอุปกรณ์ปล่อยฟองอากาศจากด้านล่างของคอลัมน์ | เกิดจากแร่ผสมน้ำที่ฉีดด้วยความดันสูงกระทบกับผิวหน้าของน้ำ | เกิดแร่จากผสมน้ำที่ไหลวนในไฮโดรไซโคลนและการฉีดด้วยความดันต่ำกระทบกับผิวหน้าของน้ำ |
| ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้น | มาก (เกิดจากใบพัดที่ใช้กวน) | น้อยมาก (เกิดจากการป้อนแร่เข้าไป) | มาก (เกิดจากการป้อนด้วยแรงดันสูง) | น้อย (เกิดจากการป้อนด้วยแรงดันต่ำ) |
| ตัวแปรควบคุมคุณภาพหัวแร่ | ความสูงของฟองอากาศ ความเร็วของใบพัด | ความสูงของตัวคอลัมน์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ ขนาดฟองอากาศและความเร็วในการกำเนิดฟองอากาศ | ความดันที่ใช้ในการป้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะระหว่างปาก ดาวคัมเมอร์ กับผิวหน้าความสูงระหว่างหัวฉีดกับผิวหน้า | ความดันที่ใช้ในการป้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะระหว่างปาก ดาวคัมเมอร์กับผิวหน้าความสูงระหว่างหัวฉีดกับผิวหน้า |
| พื้นที่ที่ใช้ในการติดตั้ง | ใช้พื้นที่ไม่มากนัก | ใช้พื้นที่ในแนวตั้งมากถูกกำหนดโดยความสูงของคอลัมน์และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง | ใช้พื้นที่ในแนวนอน ลักษณะเป็นทรงกระบอกหรือทรงเหลี่ยมตามที่ออกแบบ | ใช้พื้นที่ในแนวนอนมาก ในลักษณะเป็นทรงกระบอกหรือทรงเหลี่ยมตามที่ออกแบบ |
| วิธีการป้องกันมลทินติดกับหัวแร่ | ใช้ระบบน้ำล้าง | ใช้ระบบน้ำล้าง | ใช้ระบบน้ำล้าง | ใช้ระบบน้ำล้าง |

จากตารางที่ 2.3 พบว่าเครื่องลอยแร่แต่ละประเภทมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงได้ศึกษาและได้นำเอาข้อดีของเครื่องลอยแร่แต่ละประเภทมาประยุกต์ใช้กับ

เครื่องลอยแร่ที่ได้ออกแบบไว้ เช่น การใช้ไฮโดรไซโคลนในเครื่องลอยแร่แบบไซโคลเจ็ทมาเป็นตัวป้อน เพื่อช่วยให้เกิดฟองอากาศแต่มีลักษณะเป็นไซโคลนทรงกระบอกเพื่อต้องการลดแรงกระทบบนผิวน้ำ ซึ่งอาจทำให้เกิดจำนวนฟองอากาศไม่เพียงพอ จึงประยุกต์นำเอาอุปกรณ์ปล่อยฟองอากาศจากเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์มาใช้ ทั้งหมดนี้เพื่อป้องกันการปั่นป่วนที่เกิดขึ้นมาเป็นแนวทางการออกแบบในกระบวนการลอยแร่

2.4 แร่แบไรต์ (Barite) [34]

แร่แบไรต์ส่วนใหญ่มีปริมาณแบเรียมซัลเฟตอยู่ระหว่าง 80-90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจัดเป็นแร่แบไรต์เกรดโคลนเจาะสำหรับทำโคลนผงในการเจาะสำรวจปิโตรเลียม มีเพียงบางส่วนที่ปริมาณแบเรียมซัลเฟตอยู่ระหว่าง 95-99 เปอร์เซ็นต์ จัดอยู่ในเกรดเคมี เหมาะสำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเคมี เช่น ทำสารเคมีใช้เป็นสารเติมในสี อุตสาหกรรมแก้ว ยาง กระดาษ น้ำมัน พลาสติก ยา เป็นต้น ผลวิเคราะห์แร่แบไรต์นำไปใช้เป็นข้อมูลเพื่อพัฒนาการแต่งแร่ การจัดเกรดแร่ เพื่อการใช้ประโยชน์แร่แบไรต์ในเชิงอุตสาหกรรมให้ถูกต้องและได้ประโยชน์สูงสุด สำหรับประเทศไทยเมื่อเปิดเขตการค้าเสรี (FTA) จะกระตุ้นให้เป็นตลาดที่ใหญ่ขึ้น ก็จะส่งเสริมการลงทุนจากต่างประเทศ มีการผลิตจำนวนมาก ทำให้ต้นทุนถูกลง การค้าระหว่างกันก็จะเพิ่มมากขึ้น มีความสามารถในการแข่งขันสูง

2.4.1 สมบัติของแร่แบไรต์ [34]

แร่แบไรต์มีสูตรทางเคมี $BaSO_4$ ซึ่งมีส่วนประกอบเป็นแบเรียม (Ba) 58.8 เปอร์เซ็นต์ และไอออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) 41.2 เปอร์เซ็นต์ และอาจจะมีธาตุสตรอนเชียม (Sr) หรือตะกั่ว (Pb) เข้าแทนที่แบเรียมได้ แร่แบไรต์มีความหนาแน่นสัมพัทธ์หรือความถ่วงจำเพาะ 4.5 แต่แร่ที่เกิดในธรรมชาติจะมีสิ่งอื่นปะปนอยู่ แร่แบไรต์จึงมีความหนาแน่นสัมพัทธ์และปริมาณของแบเรียมไม่ถึงจำนวนดังกล่าว สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) รูปผลึกระบบออร์โธรอมบิก ผลึกมักจะเป็นแผ่นหนา ยาวขนานไปกับฐานผลึกหรือรูปแท่งเหลี่ยมๆ หรือพบเป็นผลึกเกิดรวมเป็นกลุ่มเหมือนดอกกุหลาบ เรียก “Crestedbarite” หรือ “Barite roses” อาจพบเป็นแผ่นบางซ้อนกันค่อนข้างหนา (Coarsely laminated) หรือเป็นมวลเมล็ด หรือแบบเนื้อด้านเหมือนดิน มีแนวแตกเรียบเด่นสมบูรณ์ ความแข็ง 3 - 3.5 โมห์ ค่อนข้างเปราะทุบให้แตกได้ง่าย ไม่ติดแม่เหล็ก วาวคล้ายแก้วหรือวาวคล้ายมุก อาจไม่มีสี สีขาว หรือมีสีออกน้ำเงินเหลืองแดงอ่อนๆ และอาจพบเป็นสีอื่นๆแต่ไม่ค่อยพบบ่อยนัก แร่แบไรต์เมื่อบดละเอียดจะเป็นผงสีขาว เนื้อแร่โปร่งใสไปจนกระทั่งโปร่งแสง สมบัติที่สำคัญของแร่แบไรต์คือ เป็นสารไม่ไวต่อปฏิกิริยา (Inert) ละลายในน้ำและกรดได้น้อย ไม่มีพิษ มีความเสถียรทางเคมี (Chemical stability) ไม่ทำปฏิกิริยากับตัวทำละลายใดๆ ที่มีอยู่ในธรรมชาติไม่ละลายในกรดไฮโดรคลอริก (HCl) แม้จะเผาหรือเร่งปฏิกิริยา เมื่อบดให้เป็นผงจะค่อยๆ ละลายในกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้น เมื่อเติมน้ำพอประมาณลงไปจะขุ่น และทิ้งไว้ให้เย็นจะตกตะกอนเป็นแบเรียมซัลเฟต ($BaSO_4$) อีกครั้ง และที่สำคัญมีความถ่วงจำเพาะสูง 4.2-4.5 เมื่อจับแร่แบไรต์ดูจะรู้สึกหนักมือ ผิดปกติไปจากแร่โลหะอื่นๆ ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน

2.4.2 ธรณีวิทยาแหล่งแร่แบไรต์ [34]

การกำเนิดแร่แบไรต์ แบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ แบบสายแร่ (Vein deposits) แบบแหล่งลานแร่พลัด (Residual deposits) และแบบชั้นหิน (Bedded deposits) การกำเนิดของแร่แบไรต์ โดยปกติมักจะมีแร่คาลโคไพไรต์ (Chalcopyrite) แคลไซต์ (Calcite) อะราโกไนต์ (Aragonite) กำมะถัน (Sulphur) ไพไรต์ (Pyrite) ควอตซ์ (Quartz) วานาดีไนต์ (Vanadinite) เซรัสไซต์ (Cerussite) และฟลูออไรต์ (Fluorite) เกิดปะปนอยู่ด้วยเสมอ นอกจากนี้ในการเกิดแบบสายแร่ น้ำร้อน (Hydrothermal vein) มักจะมีสินแร่ของโลหะเงิน ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง โคบอลต์ แมงกานีส และพลวง เกิดรวมอยู่ด้วย

2.4.3 การนำแร่แบไรต์ไปใช้ประโยชน์ [34]

แร่แบไรต์เป็นแร่อุตสาหกรรมชนิดหนึ่ง มีการนำแร่แบไรต์มาใช้ในงานต่างๆ เช่น การเจาะสำรวจน้ำมันดิบ แก๊สธรรมชาติ ตลอดจนการเจาะบ่อบาดาล จำเป็นต้องใช้โคลนผงในการหล่อลื่นระบายความร้อนหัวเจาะและก้านเจาะ อุดฉาบผนังรูเจาะ ป้องกันการยุบตัว พาเศษดิน หิน ขึ้นมาสู่ปากหลุม ควบคุมแก๊สและน้ำมันดิบที่มีความดันสูงตามโครงสร้างมิให้พุ่งขึ้นมา มีส่วนผสมที่สำคัญ คือ แร่แบไรต์ แร่แบไรต์นำไปใช้ประโยชน์ในลักษณะโลหะแบเรียมน้อยมาก ส่วนใหญ่ใช้ในลักษณะสารประกอบ ได้แก่ โคลนผง อุตสาหกรรมเคมี และอื่นๆ

1). โคลนผง

แร่แบไรต์ใช้ในรูปโคลนผงเกือบ 90 เปอร์เซ็นต์ เพื่อการสำรวจธรณีวิทยาในการหาแหล่งทรัพยากรธรณีใต้ดิน จากสมบัติที่สำคัญเฉพาะตัวของแบไรต์ คือ มีความแข็ง 3 โมห์ น้ำหนักมาก มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงถึง 4.5 เมื่อเตาตูในมือจะรู้สึกน้ำหนักกว่าหินสีขาวทั่วไปที่มีขนาดใกล้เคียงกัน และไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายใดๆ ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ สมบัตินี้ทำให้แร่แบไรต์มีความสำคัญต่อวงการเจาะสำรวจปิโตรเลียมอย่างมาก โดยนำแร่แบไรต์ไปบดให้เป็นผงละเอียดขนาดเล็กลงกว่า 325 เมช เพื่อเอาไปทำเป็นโคลนผงสำหรับการเจาะ เมื่อผสมโคลนผงนี้ด้วยสารอื่น และน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม จะกลายเป็นโคลนเหลวที่มีน้ำหนักมาก เอาไปใช้เป็นโคลนหมุนเวียนสำหรับเจาะบ่อลึกด้วยเครื่องเจาะแบบหมุน

2). อุตสาหกรรมเคมี

แร่แบไรต์เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารประกอบแบเรียมที่สำคัญ คือ แบเรียมคาร์บอเนต แบเรียมคลอไรด์ แบเรียมออกไซด์ แบเรียมไฮดรอกไซด์ แบเรียมไนเตรต แบเรียมเปอร์ออกไซด์ และแบเรียมซัลเฟต เป็นต้น การใช้สารเคมีเหล่านี้จัดเป็นการใช้แบไรต์เป็นอันดับสองรองจากการใช้ในโคลนผงแบเรียมคาร์บอเนต เป็นสารประกอบแบเรียมที่สำคัญ ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารประกอบอื่นๆ ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอิฐและกระเบื้อง เพื่อป้องกันการเกิดขี้เกลือ (Scum) อันเกิดจากยิปซัมและแมกนีเซียมซัลเฟตซึ่งปะปนอยู่ในดินเหนียว ที่มาใช้เป็นวัตถุดิบ ช่วยลดความพรุน (Porosity) ช่วยไม่ให้อิฐเปลี่ยนสี นอกจากนี้ยังใช้ในหลอดภาพโทรทัศน์ เลนส์แก้ว ผลิตภัณฑ์เครื่องเคลือบดินเผา และยาเบื่อหนูแบเรียมซัลเฟต เป็นวัตถุดิบในการผลิตแบเรียมออกไซด์ นอกจากนี้ ยังใช้เป็นสารเติมในสีพลาสติกและยาง สารผสมระหว่างแบเรียมซัลเฟตและสังกะสีซัลไฟด์ เรียกว่า ลิโทโปน

(Lithopone) ใช้ในการผลิตสีขาว อย่างไรก็ตามในปัจจุบันไทเทเนียมไดออกไซด์เข้ามาทดแทนส่วนนี้มาก นอกจากนั้นแบเรียมซัลเฟตใช้ประโยชน์ทางรังสีวิทยา เพื่อตรวจระบบทางเดินอาหารและระบบขับถ่าย แบเรียมคลอไรด์ใช้เป็นส่วนผสมในการชุบผิวแข็ง เป็นสารเชื้อในการผลิตโลหะแมกนีเซียม สารเคมีในห้องปฏิบัติการ แบเรียมคลอไรด์และโซเดียมซัลเฟตเป็นสารเติมสีขาว และสีสำหรับหนัง ยาง เสื้อผ้า และกระดาษอัดภาพแบเรียมไนเตรต ใช้ในการถลุงเหล็กด้วยไฟฟ้า เพื่อเพิ่มอายุอิฐทนไฟ เซิงกรด ลดปริมาณกำมะถันในเหล็กและลดความหนืดของตะกรันแบเรียมออกไซด์ ใช้ผลิตโลหะแบเรียม ที่ใช้ในหลอดสุญญากาศ เพื่อเป็นตัวขจัดแก๊สที่หลงเหลืออยู่ในหลอดสุญญากาศ เช่น หลอดภาพโทรทัศน์ เป็นตัวรีดิวซ์ออกซิเจนในการทำทองแดงให้บริสุทธิ์ เป็นส่วนผสมในโลหะเจือบางอย่าง เมื่อรวมกับตะกั่วและแคลเซียมได้โลหะเจือแรงเสียดทานต่ำ ใช้ทำโลหะสำหรับทำแบร็งแบเรียมและนิกเกิลใช้ในหลอดอิเล็กทรอนิกส์ และใช้ทำโลหะเจือสำหรับทำหัวเทียนจุดระเบิดในเครื่องยนต์เบนซินแบเรียมไฮดรอกไซด์ ใช้เป็นสารเติมในน้ำมันและน้ำมันหล่อลื่น นอกจากนี้ช่วยป้องกันการเกิดฝ้าในงานเครื่องปั้นดินเผาแบเรียมไททาเนต ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และสื่อสารขนาดเล็กใช้เป็นสารเติมในสี ในการพ่นสีรถยนต์ สารเคลือบสีรองพื้น ซึ่งมีผลให้สีเคลือบชั้นบนเป็นเงา เป็นสารเติมในผลิตภัณฑ์พลาสติกและยาง ทำด้านหลังพรม และเสื่อน้ำมันเพื่อเพิ่มน้ำหนัก ผงขี้ขาวของยางรถยนต์ ในอุตสาหกรรมกระดาษ กระดาษที่มีความขาวมากและเคลือบด้วยแบไรต์ หนาใช้เป็นกระดาษถ่ายเอกสาร หมึกพิมพ์ นอกจากนี้ยังใช้ในการผลิตแก้ว เติมนิโตรเจนในแก้วหลอม ทำให้ฟองฉนวนลอยปกคลุมผิวหน้า เป็นการช่วยประหยัดเชื้อเพลิง เป็นตัวเติมออกซิเจน ลดคลอรีน ทำให้แปรรูปแก้วได้ง่ายและเพิ่มความวาว

การใช้ประโยชน์อื่นๆ [34]

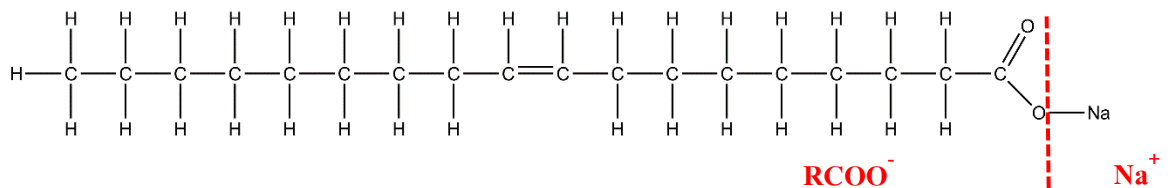
ผสมเป็นคอนกรีตสร้างเป็นกำแพงเพื่อเป็นเกราะกันกัมมันตภาพรังสีจากเตาปฏิกรณ์ปรมาณู เนื่องจากแบไรต์ดูดซับรังสีแกมมาได้ดี เป็นการลดปริมาณตะกั่วที่ต้องใช้ในการสร้างเกราะกันกัมมันตภาพรังสี ผสมเป็นคอนกรีตสร้างตัวยึดถ่วงท่อลำเลียงที่วางในบึงและที่ลุ่มต่ำ ใช้เป็นเครื่องถ่วงเรือไม่ให้โคลง ใช้ในงานหล่อโลหะ ผสมกับยางและยางมะตอย โดยมีแร่แบไรต์ก่อนเป็นส่วนผสมประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ใช้ลาดพื้นท่าลานจอดรถ ถนน และลานบิน ซึ่งปรากฏว่าลานที่ได้มีอายุยืนทนทาน

2.4.4 การลอยแร่แบไรต์

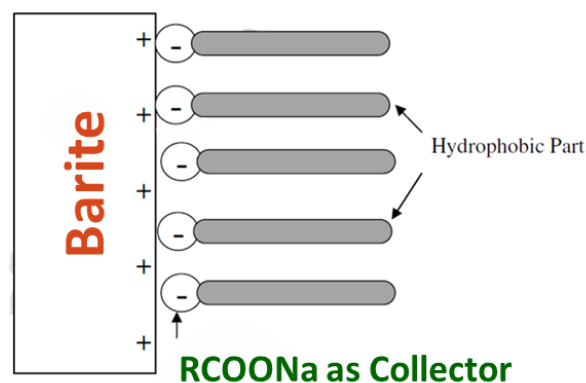
ในการลอยแร่แบไรต์ เนื่องจากในสินแร่แบไรต์มักจะมีแร่ควอตซ์ปะปนอยู่จึงนิยมลอยแร่ด้วยกัน 2 แบบคือ

- 1.) ลอยแร่โดยตรง (Direct flotation) โดยจะปรับสภาพผิวแร่แบไรต์ด้วยสารเคลือบผิวชนิดแอนไอออน ซึ่งนิยมใช้สารในหมู่ฟังก์ชันของกรดโอเลอิก และลอยแร่แบไรต์ออกมา
- 2.) ลอยแร่ทางอ้อม (Reverse flotation) โดยจะปรับสภาพผิวแร่ควอตซ์ด้วยสารเคลือบผิวชนิดแคตไอออนิก ซึ่งนิยมใช้สารในหมู่ฟังก์ชันของเอมีน และลอยแร่ควอตซ์ออกมา

แร่แบไรต์ มีประจุเป็นโปรตอน การใช้สารเคลือบผิวแร่ชนิดแอนไอออน เช่น โซเดียมโอเลต (Sodium oleate) เป็นสารเคลือบผิวแร่ ซึ่งโซเดียมโอเลตเมื่อละลายน้ำ จะทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลไดไอออน RCOO^- และ Na^+ [35] ดังรูปที่ 2.12 ไปจับกับผิวแร่ ไอออนลบ จะเกาะผิวแร่ซึ่งมีประจุเป็นโปรตอนอยู่ทำให้เกาะกับผิวแร่แบบการดูดซับทางเคมี [2] และทำให้ผิวของแร่แบไรต์มีสมบัติไม่เปียกน้ำดังรูปที่ 2.13

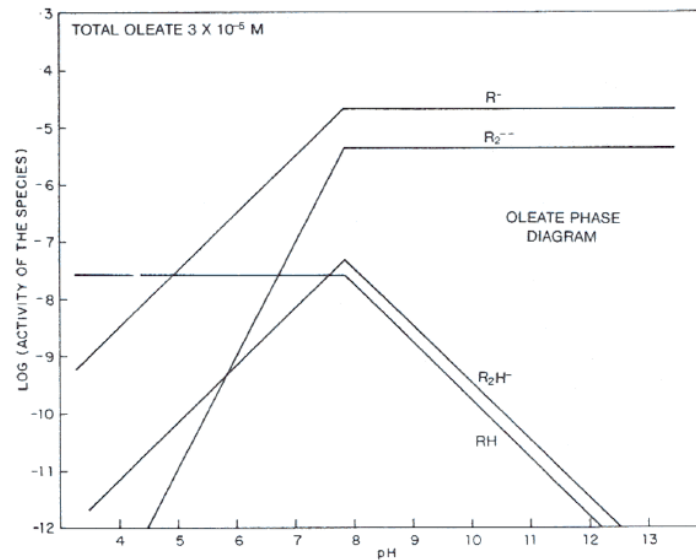


รูปที่ 2.12 การเรียงตัวของโมเลกุลโซเดียมโอเลต



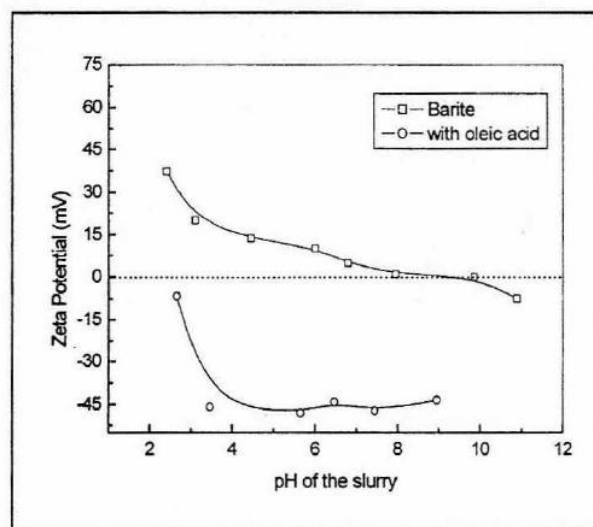
รูปที่ 2.13 ลักษณะพันธะระหว่างไอออนของผิวแร่แบไรต์กับโซเดียมโอเลต

โซเดียมโอเลตเป็นกรดไขมันที่มีพันธะคู่จะเรียกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งกรดไขมันไม่อิ่มตัวนั้นจะมีพันธะคู่อย่างน้อย 1 พันธะคู่ระหว่างอะตอมคาร์บอน (คู่ของอะตอมคาร์บอนเชื่อมต่อกันด้วยพันธะคู่สามารถอิมตัวโดยการเพิ่มไฮโดรเจนอะตอมที่แปลงจากพันธะคู่ไปพันธะเดี่ยว ดังนั้นพันธะคู่จึงเรียกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัว) 2 อะตอมคาร์บอนในห่วงโซ่ที่ถูกผูกไว้ไปด้านข้างของพันธะคู่สามารถเกิดขึ้นได้ ดังนั้นกรดไขมันสามารถดูดซับกับหมู่คาร์บอกซิล ชนิด RCOOH , $(\text{RCOO})_2^{2-}$ และ $(\text{RCOO})_2\text{H}^-$ ซึ่งสามารถเกาะกับผิวของแร่แบไรต์ได้ ซึ่งโซเดียมโอเลตเป็น RCOONa เมื่อละลายน้ำโมเลกุลจะแตกตัวได้ RCOOH และ Na^+ แต่เนื่องจากกรดไขมันมีสมบัติในการละลายตัวในสารละลายแตกต่างกันจึงมีงานวิจัย ศึกษาสมบัติการละลายตัวในน้ำที่มีค่า pH แตกต่างกัน [36] จากรูป 2.14 เป็นกราฟแสดงความสามารถของการทำปฏิกิริยาซึ่งพบว่า โซเดียมโอเลตสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีที่สุดเมื่อใช้โอเลอิก ในปริมาณความเข้มข้น 3×10^{-5} โมล โดยค่า pH มากกว่า 8



รูปที่ 2.14 ความสามารถในการทำปฏิกิริยาของกรดโอเลอิกแต่ละชนิดในค่า pH ที่แตกต่างกัน [36]

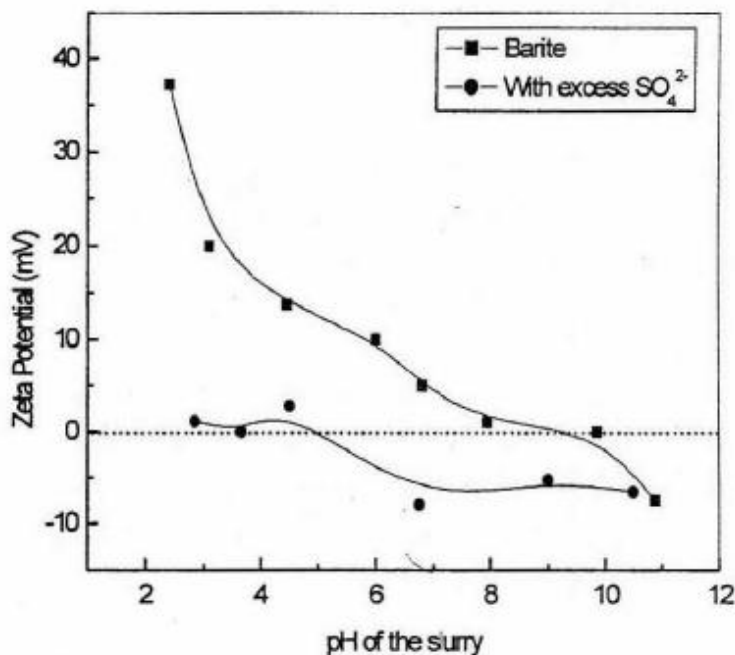
จากการศึกษาใช้กรดโอเลอิกในปรับสภาพผิวของแร่แบไรต์ โดยวิเคราะห์ค่าศักย์ซีตา (Zeta potential) เป็นค่าที่ใช้เพื่อบอกแนวโน้มที่อนุภาคจะมีการเกาะตัวกันเป็นก้อนและตกตัวลงที่ค่าศักย์ซีตาเท่ากับศูนย์ เมื่อมีการปรับค่า pH อนุภาคแขวนลอย จากรูปที่ 2.15 เป็นค่าศักย์ซีตาเปรียบเทียบแร่แบไรต์กับแร่แบไรต์ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดโอเลอิกและพบว่า เมื่อ pH เท่ากับ 8 แร่แบไรต์จะจับตัวกันเป็นก้อนแต่เมื่อแร่แบไรต์ถูกปรับสภาพผิวด้วยกรดโอเลอิกแล้วทำให้ค่าศักย์ซีตามีค่าติดลบมากขึ้นนั่นหมายความว่าอนุภาคของแร่แบไรต์นั้นสามารถกระจายตัวได้ดี และกรดโอเลอิกเคลือบผิวแร่ทำให้ผิวแร่มีคุณสมบัติอนุภาคแร่เฉพาะที่มีสมบัติของผิวแร่ไม่ชอบน้ำซึ่งเป็นการลดแรงดึงดูดผิวของแร่ทำให้แร่ไม่จับตัวกันเป็นก้อน



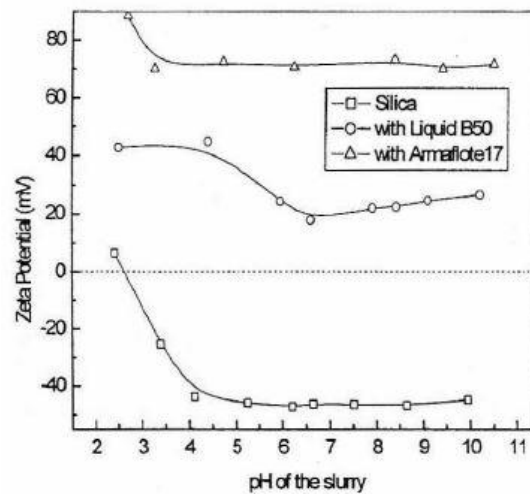
รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ซีตาของแร่แบไรต์ [35]

เมื่อนำไปทดสอบล้อยแร่แบไรต์โดยใช้ สารเคลือบผิวแร่เป็นกรดโอเลอิกปริมาณ 0.2-0.8 กิโลกรัมต่อตันแร่ ใช้ pH 9.2 โดยใช้โซเดียมซัลเฟตเป็นสารกดแร่ควอตซ์ในปริมาณ 2 กิโลกรัมต่อตันแร่พบว่า ปริมาณของสารเคลือบผิวแร่ในปริมาณ 0.2 กิโลกรัมต่อตันแร่ สามารถล้อยได้เกรดของหัวแร่สูงที่สุดแต่สามารถเก็บแร่ได้ในปริมาณน้อยและค่อยเพิ่มปริมาณการเก็บแร่ได้สูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารเคลือบผิว แต่เกรดของหัวแร่กลับลดลงเช่นกัน และได้ทำการทดสอบเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมในการใช้ปริมาณโซเดียมซัลเฟตในการกดแร่ควอตซ์พบว่า โซเดียมซัลเฟตไม่มีอิทธิพลในการกดแร่ควอตซ์มากนักในการแต่งแร่ที่มีความบริสุทธิ์สูงแต่เป็นสารที่ช่วยการกระจายตัวที่ดี [35]

ในการใช้สารเคลือบผิวแร่ชนิดแคตไอออนิก เช่น Armoflote-17 Liquid B-50 และ Sokem 524C เป็นสารเคลือบผิวแร่ควอตซ์ [35, 37] และปรับสภาพผิวของแร่แบไรต์ ด้วยโซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate, Na_2SO_4) เนื่องจากสภาพผิวแร่แบไรต์มีภาวะเป็นบวกเมื่อใช้โซเดียมซัลเฟต แตกตัวในน้ำจะได้ซัลเฟตไอออน (Sulfate ion, SO_4^{2-}) ซึ่งจะทำให้แร่แบไรต์มีค่าศักย์ซีตาดังรูปที่ 2.16 ซึ่งจะทำให้แร่แบไรต์สามารถดูดซับสารเคลือบผิวแร่ชนิดแคตไอออนิกและค่าศักย์ซีตาเข้าใกล้ศูนย์มากยิ่งขึ้นนั่นหมายความว่าแร่แบไรต์จะล้อยได้ยากยิ่งขึ้น [37] ในด้านการใช้สารเคลือบผิวแร่ควอตซ์ จำพวก Armoflote-17 Liquid B-50 และ Sokem 524C จะทำให้ศักย์ซีตาของแร่ควอตซ์เปลี่ยนจากค่าลบทำให้มีค่าเป็นบวก ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ซีตาของแร่แบไรต์ด้วยโซเดียมซัลเฟต [37]

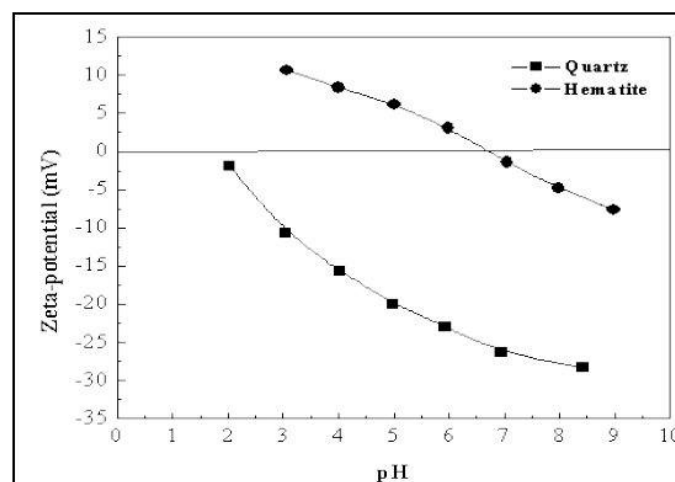


รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ซีต้าของแร่ควอตซ์ [37]

ในการทดสอบลอยแร่แบบไรต์โดยใช้แร่แบบไรต์ที่มีปริมาณ แบเรียมซิลเฟต 80.72 เปอร์เซ็นต์ และ ซิลิกา 13.64 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้สารเคลือบผิว Armoflote-17 และ Liquid B-50 [35] ในการลอยแร่ควอตซ์ออกจากแร่แบบไรต์ โดยการใช้สารเคลือบผิวชนิด Armoflote-17 ในปริมาณ 1 กิโลกรัมต่อตันแร่ pH 8.7 สามารถลอยได้แร่แบบไรต์ที่มีความบริสุทธิ์ 95.29 เปอร์เซ็นต์ มีเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ 73.66 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการใช้สารเคลือบผิว Liquid B-50 ในปริมาณ 0.35 กิโลกรัมต่อตันแร่ pH 8.5 สามารถลอยได้แร่แบบไรต์ที่มีความบริสุทธิ์ 95.56 เปอร์เซ็นต์ มีเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ 65 เปอร์เซ็นต์

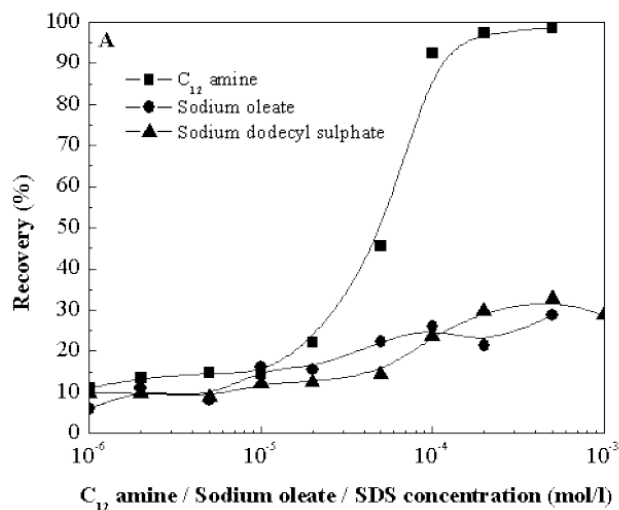
2.4.5 ผลกระทบของแร่ควอตซ์ต่อการใช้สารละลายโซเดียมโอเลียด

ส่วนในงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับลอยแร่ควอตซ์ในสารละลายโซเดียมโอเลียด [38] จากรูป 2.18 พบว่า แร่ควอตซ์มีการกระจายตัวได้ดีเมื่อค่า pH มีค่าสูง เนื่องจากมีค่าศักย์ซีต้า ติดลบสูง



รูปที่ 2.18 ค่าศักย์ซีต้าของแร่ควอตซ์ [38]

เมื่อทดสอบล่อยแร่ควอตซ์ด้วยโซเดียมโอเลตโดยใช้ค่า pH 9.5 พบว่าที่ปริมาณของแร่ควอตซ์ที่เก็บได้ ไม่ได้มีอิทธิพลมากนักต่อการเพิ่มหรือลดลงของความเข้มข้นของโซเดียมโอเลต ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การเก็บแร่ควอตซ์ต่อปริมาณการใช้โซเดียมโอเลต

ในงานวิจัยได้เลือกใช้โซเดียมโอเลตเป็นสารเคลือบผิวแร่ในปริมาณ 200 กรัมต่อตันแร่ ในกระบวนการล่อยแร่ในน้ำปริมาณ 100 ลิตร ปริมาณความเข้มข้นของกรดโอเลอิกคิดเป็น 3.55×10^{-5} โมลต่อลิตร โดยล่อยภายใต้ pH 8 ในการทดสอบสมรรถนะเครื่องล่อยแร่ด้วยการทดสอบล่อยแร่แปรต์เกรดสูง และ pH 9 ในการทดสอบล่อยแร่แปรต์เกรดต่ำ

บทที่ 3

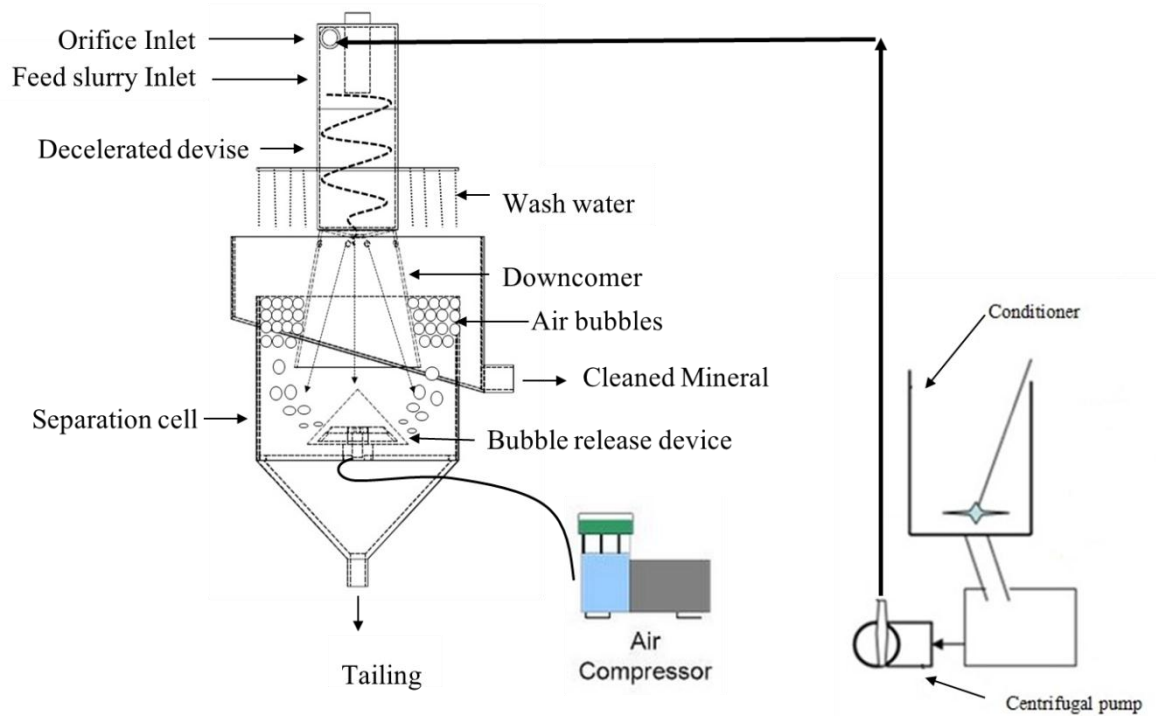
วัสดุ อุปกรณ์และวิธีวิจัย

3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการออกแบบเครื่องลอยแร่ เนื่องจากเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ยาวนั้นจะต้องใช้ความเข้มข้นของแร่ต่ำกว่าเครื่องลอยแร่แบบเก่า ดังนั้นมีการพัฒนาเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์สั้นหรือเครื่องลอยแร่แบบเจมสัน ที่ป้อนของผสมด้วยความดันสูงทำให้เกิดฟองอากาศและเกิดการผสมกันระหว่างของผสมกับอากาศในส่วนของดาวคัมเมอร์ หลังจากนั้นไหลลงสู่ด้านล่างทำให้เกิดฟองอากาศและลอยตัวขึ้นในคอลัมน์ได้ ทำให้หัวแร่จากการไหลล้นออกมาจากส่วนบนของคอลัมน์เครื่องลอยแร่แบบเจมสันสามารถแต่งแร่ได้มีคุณภาพใกล้เคียงกันกับเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ยาว แต่ระยะเวลาในการลอยแร่ด้วยเครื่องลอยแร่แบบเจมสันใช้เวลาน้อยกว่า เครื่องลอยแร่แบบเจมสันเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรม แต่เนื่องจากเครื่องลอยแร่แบบเจมสันใช้แรงดันในการป้อนสูงเพื่อทำให้เกิดปริมาณฟองอากาศที่มากพอสำหรับการลอยแร่ ต่อมาจึงได้มีการคิดค้นเครื่องลอยแร่โดยประยุกต์ใช้ไฮโดรไซโคลอนมาใช้ป้อนแร่ด้วยแรงดันต่ำ ซึ่งสามารถลดการปั่นป่วนของของผสมในเซลล์ลอยแร่ได้ และทำให้ประสิทธิภาพของการลอยแร่ดีขึ้นโดยเฉพาะแร่ที่ลอยได้ยาก อย่างเช่น เฟลด์สปาร์ และถ่านหิน ซึ่งในระบบนี้จะต้องปรับความเร็วในการป้อนของผสมให้ต่ำลง แต่ในการลอยแร่ในเครื่องลอยแร่ชนิดนี้ถ้าใช้แรงดันต่ำมากจะทำให้ปริมาณของฟองอากาศไม่เพียงพอได้ และเมื่อใช้แรงดันน้อยเกินไปก็จะทำให้เกิดการปั่นป่วน ซึ่งเป็นสาเหตุในฟองอากาศที่เคลือบผิวแร่อยู่แตก ส่งผลกระทบต่อการลอยแร่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ที่แก้ปัญหาในการป้อนที่จะลดความปั่นป่วนลง โดยออกแบบอุปกรณ์ป้อนแร่เป็นไฮโดรไซโคลนทรงกระบอกและออกแบบอุปกรณ์ขึ้นมาเพื่อลดแรงกระแทก (ลดความเร็ว) ของของผสมที่พุ่งปะทะของเหลวในเซลล์ลง และจะติดตั้งอุปกรณ์ปล่อยฟองอากาศไว้ภายในเพื่อเพิ่มฟองอากาศในระบบ ขัดเชยกับฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากปั่นป่วนดังเซลล์ลอยแร่แบบเจมสัน เพราะโดยปกติแรงปะทะของการป้อนแร่ที่รุนแรงจะทำให้เกิดฟองอากาศเป็นจำนวนมาก แต่การเกิดความปั่นป่วนในการลอยแร่นั้นจะส่งผลให้ฟองอากาศที่ใช้ในการลอยแร่แตกได้ ซึ่งไม่ส่งผลดีต่อการลอยแร่ ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่า ควรมีการออกแบบและพัฒนาเครื่องลอยแร่แบบใช้ลมแบบใหม่ขึ้นมา โดยได้ออกแบบและทำการศึกษาสมรรถนะของเครื่องเพื่อที่จะประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมต่อไป

3.1.1 การออกแบบและการสร้างเครื่องลอยแร่ [5, 39, 40]

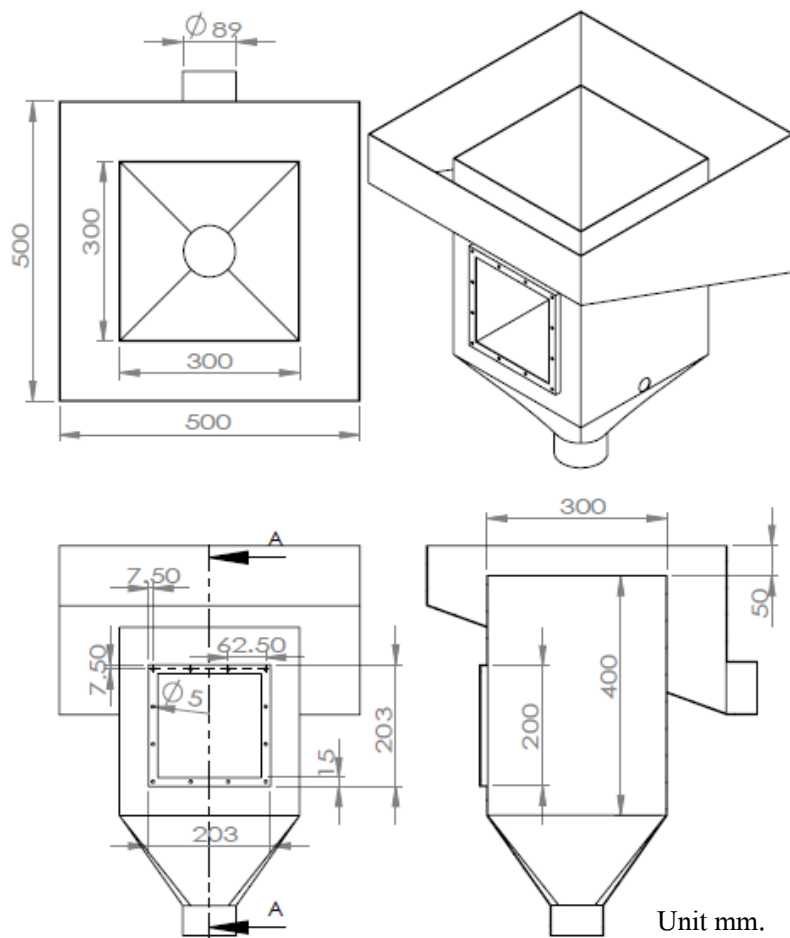
การพัฒนาเครื่องลอยแร่ โดยได้ออกแบบเครื่องลอยแร่ขึ้น มีลักษณะดังรูปที่ 3.1 เพื่อกำหนดตัวแปรที่มีผลต่อการลอยแร่ ดังที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งสามารถแบ่งส่วนประกอบที่ออกแบบไว้เป็น 5 ส่วน คือ ถังลอย (Separation cell) อุปกรณ์การป้อน (Feed slurry inlet) อุปกรณ์ชะลอความเร็วของผสม (Decelerated device) ดาวคัมเมอร์ (Downcomer) อุปกรณ์ปล่อยฟองอากาศ (Babble release device) และถังกวน (Conditioner tank)



รูปที่ 3.1 แบบจำลองแสดงส่วนประกอบเครื่องลอยแร่ที่ออกแบบ

1). ถังลอย

จากรูปที่ 3.2 ได้ออกแบบให้เป็นถังมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมมีความกว้างและความยาว 300 มิลลิเมตร มีความสูง 400 มิลลิเมตร ด้านบนของถังจะประกอบด้วยส่วนเก็บแร่ลอยซึ่งจะมีลักษณะเป็นรางสวมถังลอยเอาไว้ วัสดุของถังลอยจะทำจากเหล็กเคลือบสังกะสีหนา 1.5 มิลลิเมตร ด้านหน้าของถังจะมีช่องสี่เหลี่ยมมีความกว้างและความยาวด้านละ 20 เซนติเมตร ซึ่งจะปิดด้วยแผ่นอะคริลิกใสเพื่อสามารถมองเห็นภายในชัดเจน และด้านล่างภายในถังลอยจะถูกออกแบบไว้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ปล่อยฟองอากาศเอาไว้ดังรูปที่ 3.3

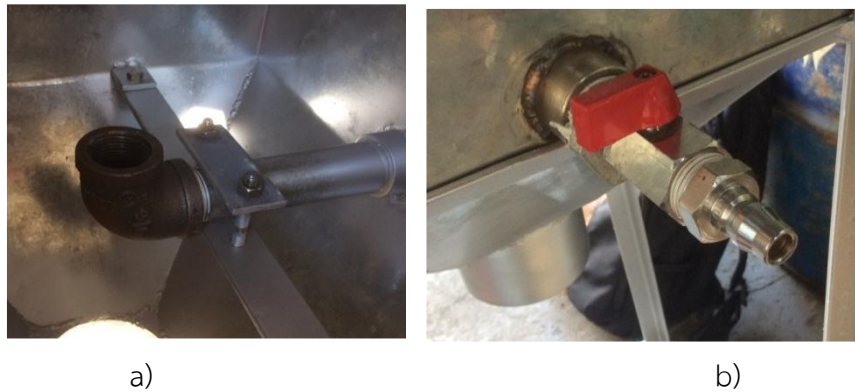


a)



b)

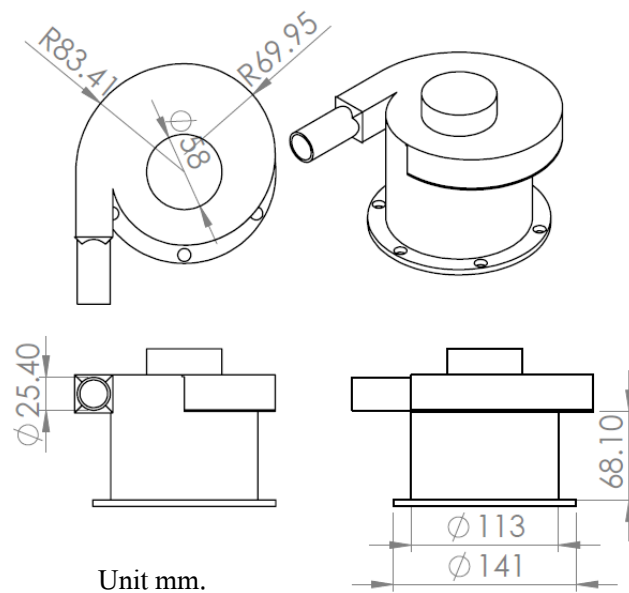
รูปที่ 3.2 ถังลอยแร่ a) แบบแปลนที่ได้ออกแบบไว้ และ b) อุปกรณ์ที่จัดทำขึ้น



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ปล่อยฟองอากาศ ที่ถูกติดตั้งภายในถังลอย a) ท่อลมที่ถูกติดตั้งภายในถังลอยแล้ว b) วาล์วต่อกับปั๊มลม

2). อุปกรณ์การป้อน

จากรูปที่ 3.4 อุปกรณ์การป้อนได้มีการออกแบบให้มีลักษณะแบบกันหอย เมื่อของผสมไหลเข้าไป จะทำให้เกิดการไหลตามแรงเหวี่ยงบริเวณผิวสัมผัสโค้งทำให้เพิ่มโอกาสที่จะทำให้ผิวของเม็ดแร่ผสมเข้ากันกับน้ำยาละลายแร่ได้ดียิ่งขึ้น



a)

รูปที่ 3.4 อุปกรณ์การป้อน a) แบบแปลนที่ได้ออกแบบไว้ b) ที่จัดทำขึ้น

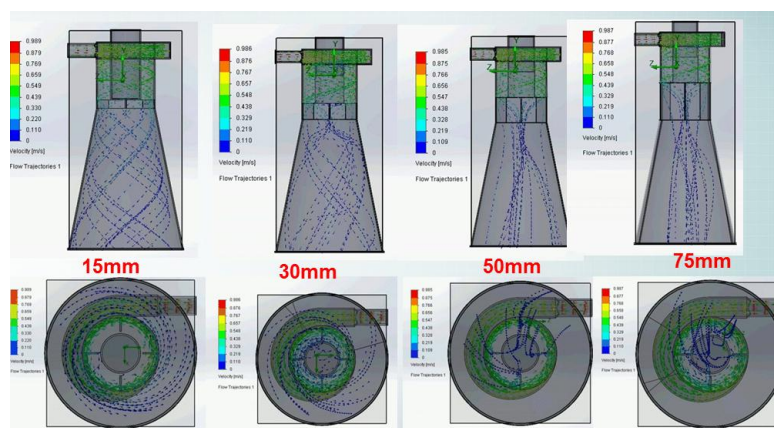


b)

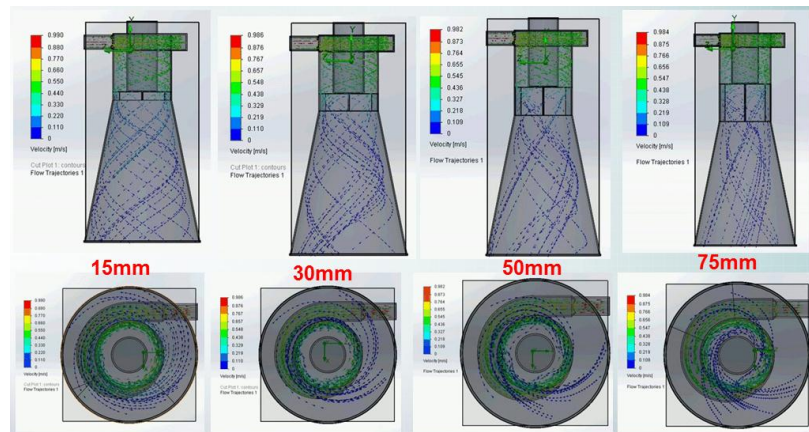
รูปที่ 3.4 (ต่อ) อุปกรณ์การป้อน a) แบบแปลนที่ได้ออกแบบไว้ b) ที่จัดทำขึ้น

3). อุปกรณ์ชะลอความเร็วของผสม

อุปกรณ์ชะลอความเร็วของผสมของการป้อนแร่ที่ได้ทำการออกแบบไว้เพื่อทำหน้าที่ชะลอการไหลของของผสมเพื่อลดแรงปะทะระหว่างของผสมกับผิวน้ำภายในถังลอย ซึ่งจะประกอบเข้ากันกับอุปกรณ์การป้อนแร่ การออกแบบอุปกรณ์ในส่วนนี้ไม่สามารถทราบถึงรูปแบบการไหลของผสมในการป้อนได้ จึงได้ทำการออกแบบและทำการจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม โซลิดเวิร์ค (Solidworks) ในการคำนวณทิศทางการไหลแบบต่าง ๆ เพื่อหาความเหมาะสมหรือลักษณะการไหลและความยาวของครีป โดยออกแบบให้อุปกรณ์ชะลอความเร็วของผสมของการป้อนแร่ มีความยาวท่อเป็น 15, 30, 50 และ 75 มิลลิเมตร มีความยาวของครีปที่ยื่นออกมา เท่ากับ 10 และ 20 มิลลิเมตร และการสมมติใช้ของเหลวที่ใช้เป็นของเหลวเนื้อเดียวกันมีความหนาแน่นเท่ากับ 2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความดันที่ใช้ในการป้อนเท่ากับ 3 บาร์ อัตราการไหล 10 ลิตรต่ออนาที และได้เปรียบเทียบลักษณะการไหลในรูปแบบต่างๆ เพื่อนำไปสู่การสร้างอุปกรณ์ชะลอความเร็วของผสมของการป้อนแร่ ดังรูปที่ 3.5-3.6

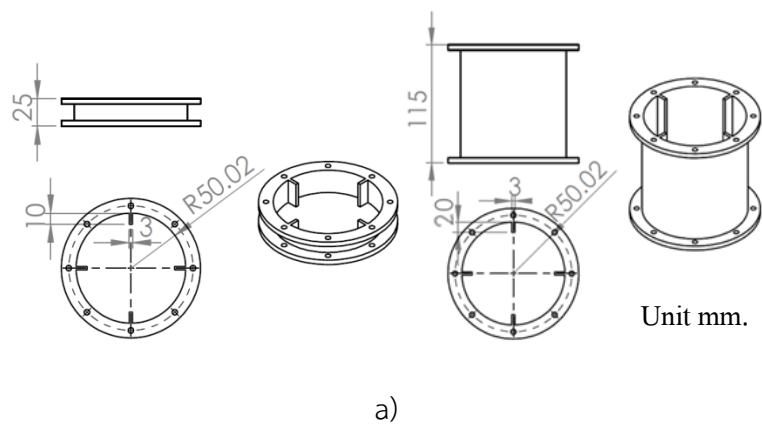


รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบอุปกรณ์ชะลอความเร็วของผสมความยาวของครีป 20 มิลลิเมตร

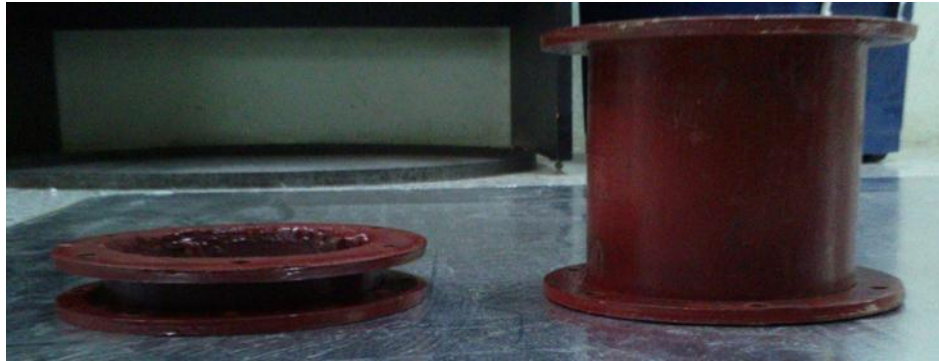


รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบอุปกรณ์ชะลอความเร็วของผสมความยาวของครีบ 10 มิลลิเมตร

จากการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม โซลิดเวิร์ค พบว่าความยาวท่อของอุปกรณ์ชะลอความเร็วของผสมของการป้อนแร่และความยาวของครีบที่ยื่นออกมาส่งผลต่อทิศทางการไหลของของไหล โดยที่ทั้งสองตัวแปรจะจำลองการไหลของของผสมโดยปรับเปลี่ยนความยาวท่อและความยาวของครีบที่ยื่นออกมา เมื่อความยาวของท่อเพิ่มขึ้น จะทำให้ทิศทางการไหลของของไหลนั้นเคลื่อนเข้าสู่จุดกึ่งกลางของดาวคัมเมอร์มากยิ่งขึ้น จึงได้สรุปผลการจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม และได้จัดทำอุปกรณ์ชะลอความเร็วของผสมของการป้อนแร่ขึ้นมา 2 แบบ ดังรูปที่ 3.7 ได้แก่ (1) มีความยาวท่อ 25 มิลลิเมตรและความยาวของครีบที่ยื่นออกมา 10 มิลลิเมตร และ (2) มีความยาวท่อ 115 มิลลิเมตรและความยาวของครีบที่ยื่นออกมา 20 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบเปรียบเทียบลักษณะการไหลระหว่างการไหลที่เกิดขึ้นจริงและการจำลองด้วยโปรแกรม และมีแนวคิดที่จะสร้างอุปกรณ์ชะลอความเร็วของผสมของการป้อนแร่ให้มีลักษณะการไหลแนบไปกับผิวของดาวคัมเมอร์ซึ่งจะทำให้ น้ำยาละลายแร่และผิวของเม็ดแร่สามารถผสมกันได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะส่งผลให้สามารถเก็บแร่ได้เพิ่มสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ชะลอความเร็วของผสมของการป้อนแร่ a) แบบแปลนที่ได้ออกแบบไว้ b) ที่ได้จัดทำขึ้น

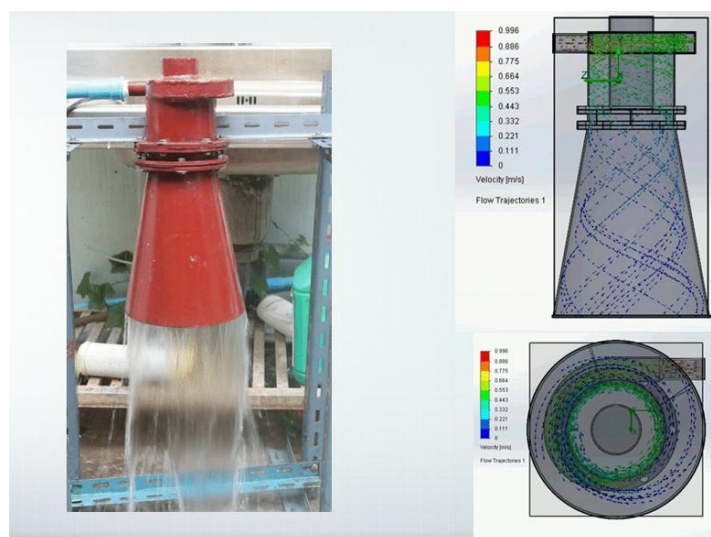


b)

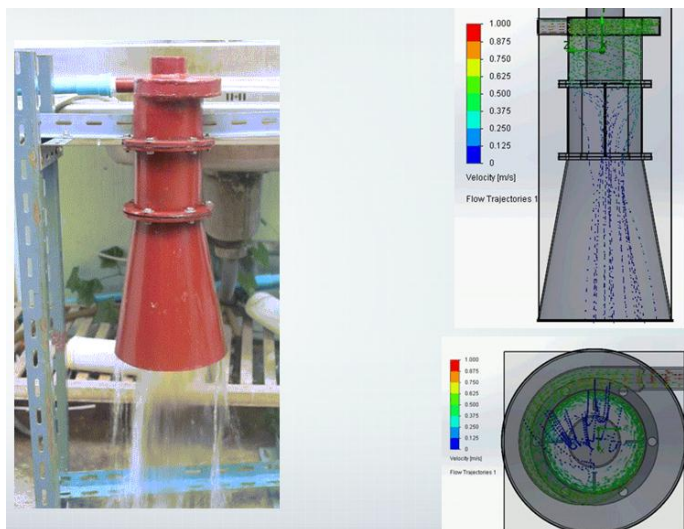
รูปที่ 3.7 (ต่อ) อุปกรณ์ชะลอความเร็วของผสมของการปั่นแร่ a) แบบแปลนที่ได้ออกแบบไว้ b) ที่
ได้จัดทำขึ้น

การเปรียบเทียบข้อมูลจริงกับข้อมูลจากโปรแกรม

หลังจากการออกแบบและจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรมโซลิดเวิร์ค แล้วจึงได้จัดทำ
ขึ้นงานขึ้นเพื่อทดสอบดูว่าเป็นไปตามโปรแกรมที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ โดยใช้น้ำในการปั่นและ
สังเกตลักษณะการไหลของน้ำว่ามีลักษณะการไหลใกล้เคียงกับการไหลในโปรแกรมที่ออกแบบไว้
หรือไม่ และได้ใช้อัตราการไหล 10 ลิตรต่อนาที ความดันที่ใช้น้ำในการปั่นเท่ากับ 3 บาร์ เพื่อ
เปรียบเทียบกับผลการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม ดังรูปที่ 3.8-3.9



รูปที่ 3.8 การไหลของน้ำเมื่อใช้ความยาวท่อ 25 มิลลิเมตร ความยาวของครีป 10 มิลลิเมตร

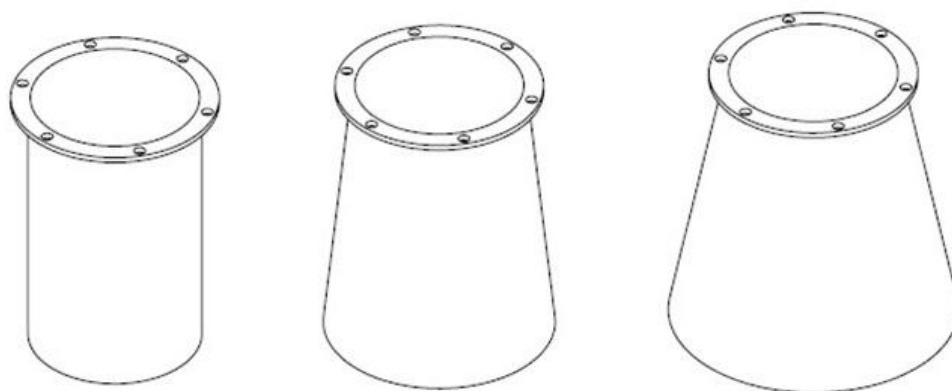
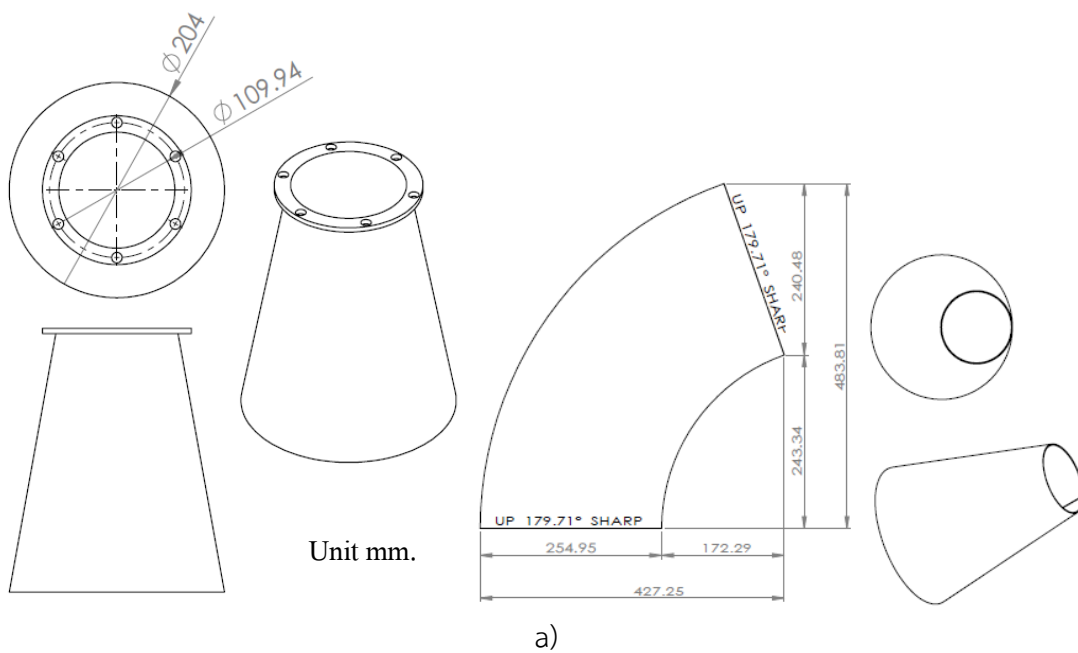


รูปที่ 3.9 การไหลของน้ำเมื่อใช้ความยาวท่อ 115 มิลลิเมตร ความยาวของครีป 20 มิลลิเมตร

จากการทดลองพบว่า ลักษณะการไหล ทั้ง 2 แบบดังกล่าวมีทิศทางและลักษณะการไหลใกล้เคียงกันซึ่งค่าที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรม จะสามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงได้ และได้เลือกใช้อุปกรณ์ที่มีความยาวท่อ 25 มิลลิเมตร ความยาวของครีปที่ยื่นออกมา 10 มิลลิเมตร ในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องลอยแร่

4). ดาวคัมเมอร์

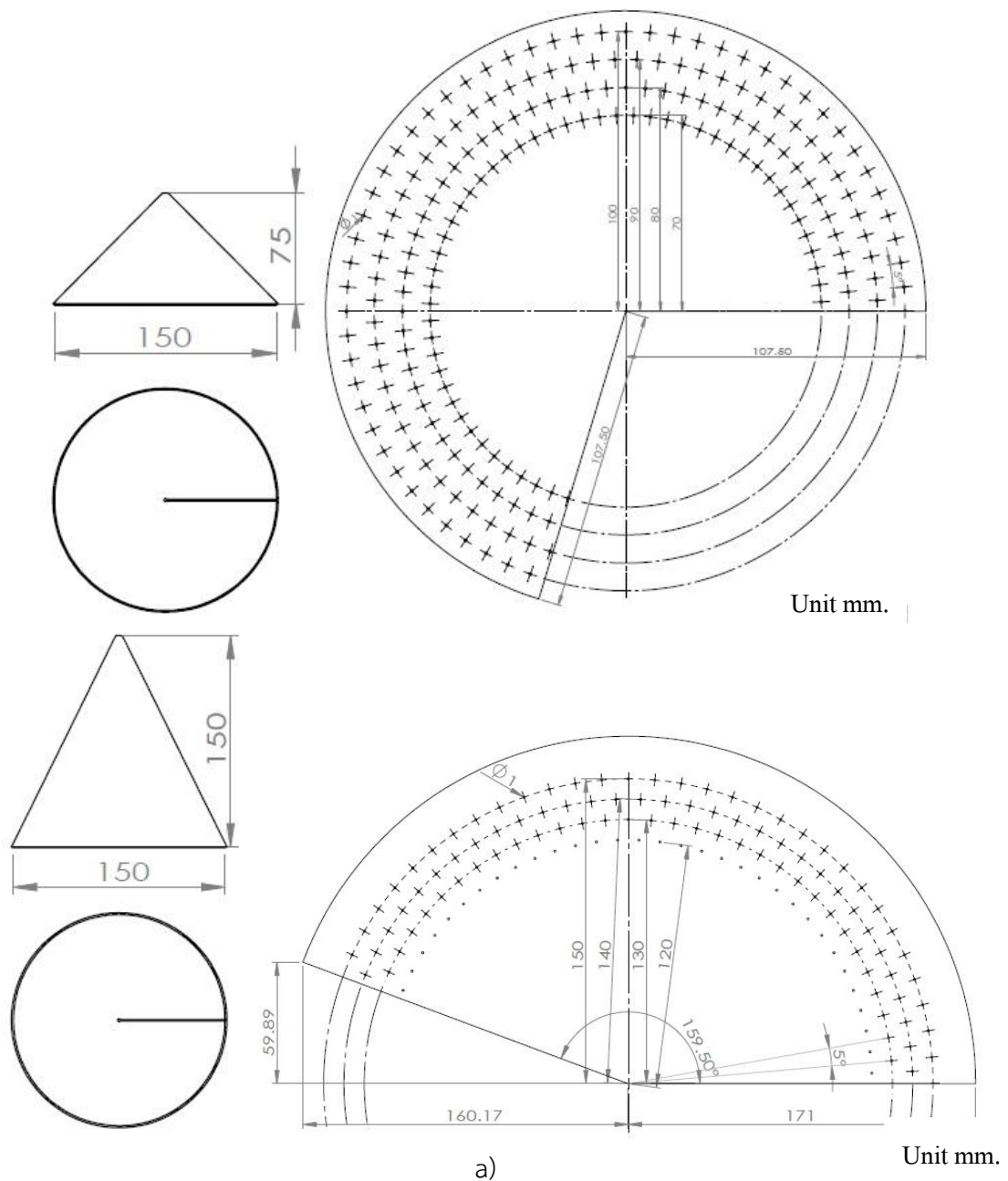
ดาวคัมเมอร์ที่ใช้ในการทดลองจะเป็นชิ้นส่วนที่ต่อเข้ากับอุปกรณ์ชะลอความเร็วของผสม โดยดาวคัมเมอร์จะจุ่มลงไปในถังลอยแร่ ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องระยะจุ่มและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์นี้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในเครื่องลอยแร่หลายๆชนิด จากรูปที่ 3.10 a) การจัดทำขึ้นจะใช้เป็นลักษณะนำแผ่นเหล็ก มาตัดให้ได้ขนาดและม้วนเป็นรูปทรงที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งในการทดลองได้ออกแบบไว้ให้มีความสูงเท่ากันที่ 25 เซนติเมตรแต่จะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน 3 ขนาด คือ 10, 15 และ 20 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.10 b)-c)



รูปที่ 3.10 ดาวคัมเมอร์ a) ขนาดความสูง 25 เซนติเมตร ที่ได้ออกแบบไว้ b) ที่ได้ออกแบบไว้ทั้ง 3 ขนาด c) ที่ได้จัดทำขึ้นทั้ง 3 ขนาด

5) อุปกรณ์ปล่อยฟองอากาศ

อุปกรณ์ปล่อยฟองอากาศจะถูกติดตั้งอยู่ด้านล่างของถังลอยซึ่งได้ออกแบบเป็นลักษณะรูปทรงกรวยเพื่อเป็นการปกป้องไม่ให้แร่เข้ามาอุดตันรูอากาศ ขนาดของรูเจาะ จะมีขนาด 1 มิลลิเมตรโดยได้จัดทำขึ้นมา 2 แบบ ซึ่งมีความสูงของกรวยแตกต่างกันดังรูปที่ 3.11 และสามารถเปลี่ยนใช้แทนกันได้ การใช้งานอุปกรณ์ชิ้นนี้อาศัยหลักการทำงานง่ายๆ คือ เมื่อทำการอัดอากาศเข้าไปด้วยเครื่องอัดอากาศ อากาศภายในจะถูกอัดและถูกฉีดออกกระทบกับผิวน้ำ แรงเฉือนที่เกิดขึ้นทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากเพื่อใช้ในการลอยแร่



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ปล่อยฟองอากาศ a) แบบแปลนที่ได้ออกแบบไว้ b) ที่ได้จัดทำขึ้น



b)

รูปที่ 3.11 (ต่อ) อุปกรณ์ปล่อยฟองอากาศ a) แบบแปลนที่ได้ออกแบบไว้ b) ที่ได้จัดทำขึ้น

การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมปริมาณและความดันของอากาศที่ใช้ในการทดลอง อัตราการไหลของอากาศจะถูกออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนให้คงที่ที่อัตราการไหล 20, 30 และ 40 ลิตรต่อนาที โดยใช้เครื่องวัดอัตราการไหล (Flowmeter) ดังรูปที่ 3.12 และใช้ความดันคงที่ที่ 6 บาร์ โดยใช้เครื่องควบคุมความดัน (Pressure regulator) ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ



รูปที่ 3.13 เครื่องควบคุมความดันของอากาศ

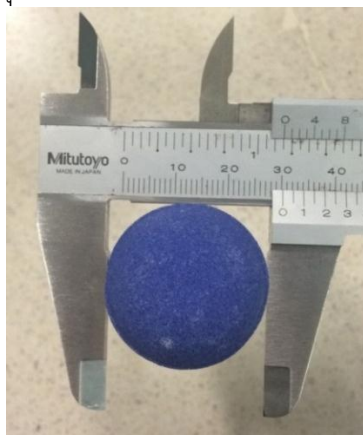
ในเบื้องต้นได้ทดลองล่อยแร่โดยใช้ปริมาณแร่แปรไรต์ 5 กิโลกรัม ในการทดลองเติมสารละลายโซเดียมโอเลิเอตซึ่งเป็นน้ำยาเคลือบผิวแร่ลงไปปริมาณ 200 กรัมต่อตันแร่ เทอร์ฟีนีออล ปริมาณ 20 กรัมต่อตันแร่ ใช้ปริมาณอากาศป้อนให้กับระบบด้วยอัตราการไหล 40 ลิตรต่อนาที ปรับ pH ภายในถังกวนและถังล่อยเท่ากับ 8 ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ ถูกตั้งให้คงที่ที่ 5 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ถูกตั้งไว้ที่ 10 เซนติเมตร อัตราการป้อนแร่ใช้ที่ 10 ลิตรต่อ นาที และใช้อัตราส่วนของผสมไว้ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง

ผลการทดลองพบว่า แร่ที่ล่อยได้ประมาณ 2.6 กิโลกรัม คิดเป็นอัตราส่วน 52 เปอร์เซ็นต์ของแร่ป้อน ซึ่งเป็นปริมาณน้อยมาก แสดงว่าเครื่องล่อยแร่ที่ใช้ไม่สามารถล่อยแร่แปรไรต์ได้ดี จึงได้มีการตั้งสมมุติฐานและสรุปปัญหาดังกล่าวเป็นผลมาจากอุปกรณ์ปล่อยฟองอากาศที่อยู่ในถังล่อย ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งมีพื้นที่ปล่อยฟองอากาศจำกัด ไม่สามารถปล่อยฟองอากาศได้ทั่วพื้นที่ทำให้ไม่สามารถสัมผัสกับผิวแร่ได้ทั้งหมด ดังนั้นแร่ที่ต้องการเก็บบางส่วนจึงไม่สามารถล่อยขึ้นมาได้



รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ปล่อยฟองอากาศในถังล่อย

ดังนั้นจึงได้ทดลองเพิ่มวัสดุปล่อยฟองอากาศ ดังรูปที่ 3.15 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ให้ปล่อยฟองอากาศอย่างง่ายเข้าไปโดยต่อกับปั๊มลมขนาดเล็ก ขนาด 45 วัตต์ มีความดันมากกว่า 0.025 เมกะปาสคาล ยี่ห้อ Hailea รุ่น ACO-318 ดังรูปที่ 3.16 ที่มีอัตราการไหลที่ 70 ลิตรต่อนาที และใช้เก็บแร่ดังรูปที่ 3.17 ผลการทดลองพบว่าสามารถเก็บแร่ได้มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิมมาก จึงได้มีแนวคิดที่จะออกแบบอุปกรณ์ปล่อยฟองอากาศชิ้นใหม่โดยใช้วัสดุปล่อยฟองอากาศแทน



รูปที่ 3.15 วัสดุปล่อยฟองอากาศ

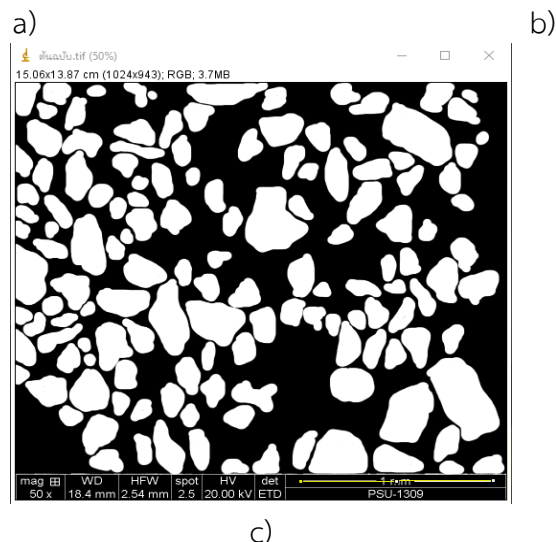
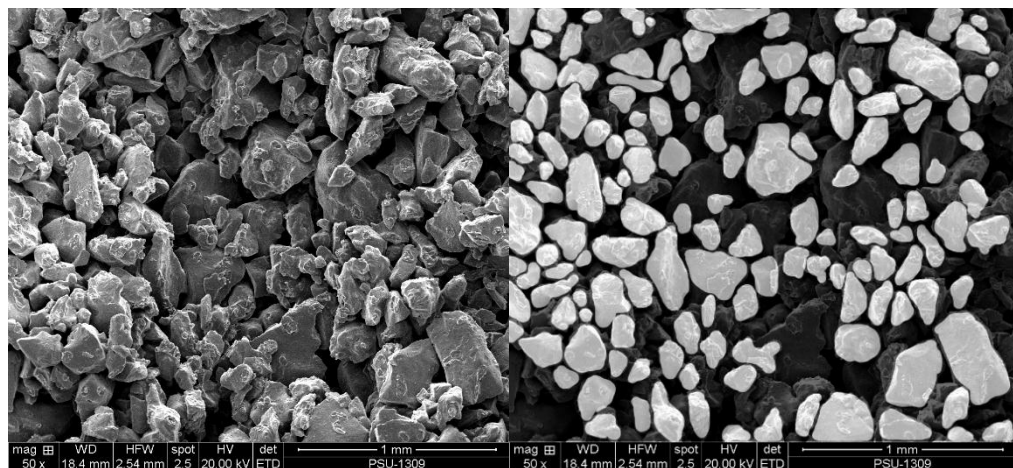


รูปที่ 3.16 ปั๊มลมขนาดเล็ก

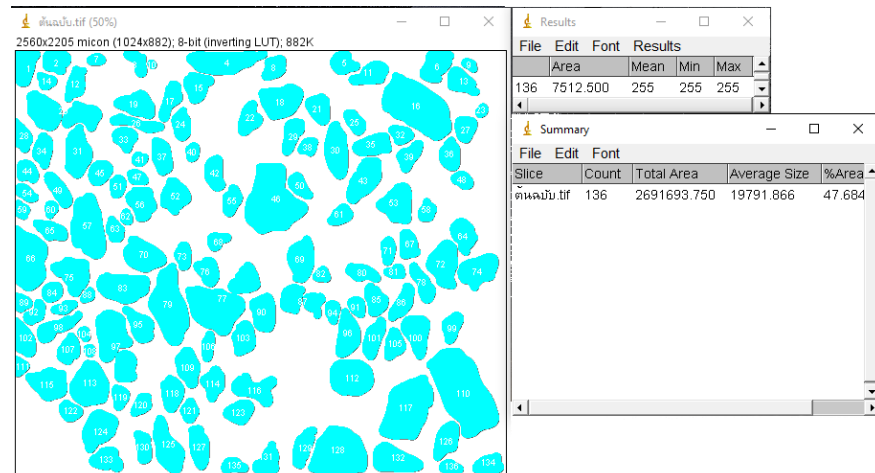


รูปที่ 3.17 การลอยแร่ที่ได้ติดตั้งวัสดุปล่อยฟองอากาศเพิ่ม

เมื่อนำวัสดุปล่อยฟองอากาศมาทำการทดสอบหาสมบัติความพรุน เช่น ขนาดเฉลี่ยของเม็ดทรายและปริมาณความพรุน พบว่าขนาดเฉลี่ยของเม็ดทรายที่ใช้ผลิตวัสดุปล่อยฟองอากาศที่หาได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูปที่ 3.18 a) โดยนำรูปถ่ายไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม อิมเมจเจ (ImageJ) ซึ่งก่อนจะนำไปใช้กับโปรแกรมจำเป็นต้องระบายอนุภาค (ระบายด้วยสีขาว) เพื่อให้ขนาดของเม็ดทรายมีรูปร่างที่ชัดเจนเพื่อความสะดวกในการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ดังรูปที่ 3.18 b) และ c) เมื่อระบายรูปที่ได้เรียบร้อยแล้วตั้งค่าอ้างอิงกับขนาดมาตรฐาน ก่อนที่จะใช้โปรแกรมคำนวณพื้นที่และนับจำนวนเม็ดทรายที่ต้องการ จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม จะได้ผลดังรูปที่ 3.19 ซึ่งโปรแกรมจะนับจำนวนขนาดอนุภาคได้ 136 เม็ด มีพื้นที่ภายในรวมกันทั้งหมด 2,691,693.75 ตารางไมโครเมตร เม็ดทรายมีขนาดพื้นที่ภายในเฉลี่ย 19,791 ตารางไมโครเมตร และคำนวณขนาดเฉลี่ยของเม็ดทรายได้ 79.37 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.18 ภาพถ่าย SEM หัวทรายปล่อยฟองอากาศ a) รูปถ่ายต้นฉบับ b) การระบายเม็ดแรกก่อนนำไปคำนวณด้วยโปรแกรม c) การตั้งค่าสเกลมาตรฐาน

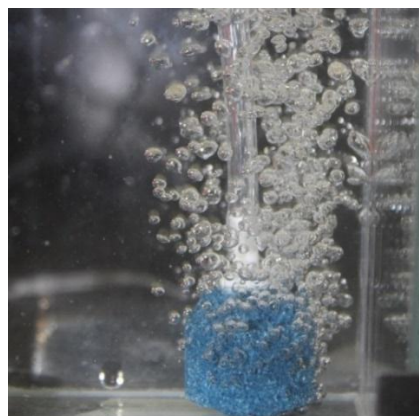


รูปที่ 3.19 การคำนวณโดยใช้โปรแกรมอิมเมจเจ

การหาปริมาณรูพรุนของวัสดุปล่อยฟองอากาศโดยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ

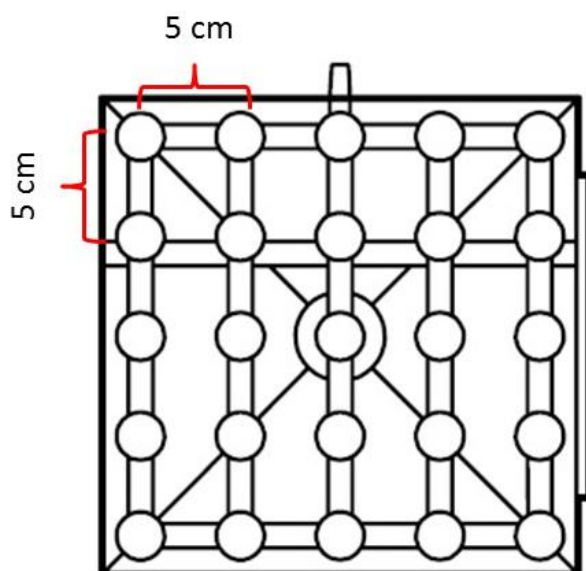
โดยได้นำหัวทรายปล่อยฟองอากาศไปอบไว้ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักของหัวทราย เมื่อบันทึกน้ำหนักแห้งไว้แล้วนำหัวทรายปล่อยฟองอากาศไปแช่น้ำไว้ 24 ชั่วโมง และนำไปชั่งน้ำหนัก ปริมาณความพรุนของวัสดุปล่อยฟองอากาศจะมีค่าเท่ากับ น้ำหนักส่วนต่างของวัสดุปล่อยฟองอากาศที่ถูกแช่ในน้ำกับวัสดุปล่อยฟองอากาศที่ถูกอบให้แห้ง ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ความพรุนของวัสดุปล่อยฟองอากาศจะเท่ากับสัดส่วนปริมาณความพรุนต่อปริมาณทั้งหมดของหัวทรายปล่อยฟองอากาศ พบว่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนมีค่าเท่ากับ 24.75 เปอร์เซ็นต์

เมื่อนำไปทดสอบอัดอากาศเข้าไปด้วยอัตราการไหล 70 ลิตรต่อนาที จะสามารถทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กประมาณ 1 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.20 ขนาดของฟองอากาศจะมีขนาดไม่แตกต่างกันเมื่อเพิ่มหรือลดปริมาณอัตราการไหลของอากาศ

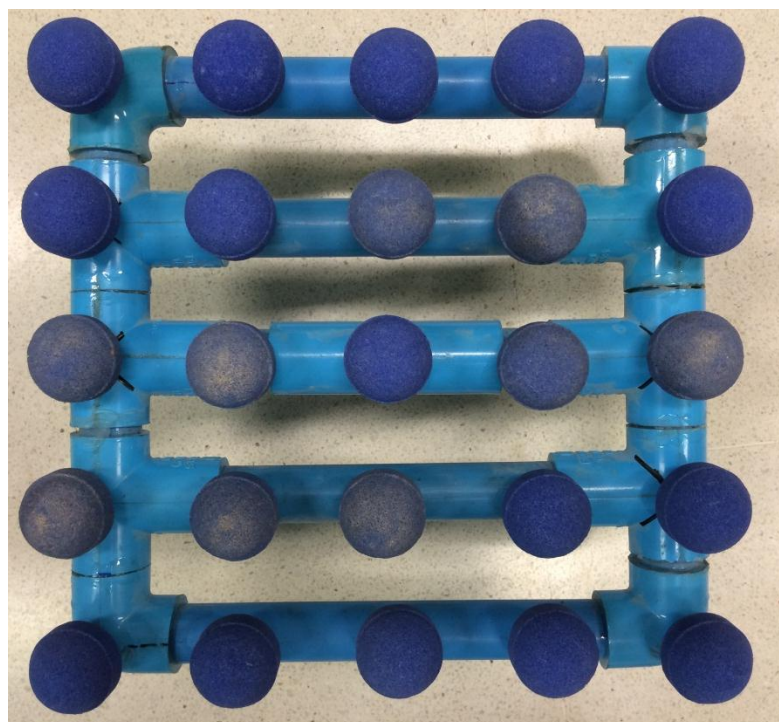


รูปที่ 3.20 ลักษณะฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากวัสดุปล่อยฟองอากาศ

ในการจัดเรียงหัวทรายปล่อยฟองอากาศได้ถูกออกแบบให้มีจำนวนหัวทรายทั้งหมด 25 หัว (5X5) โดยมีระยะห่างเท่าๆกัน 5 เซนติเมตร เนื่องจากหัวทรายปล่อยฟองอากาศแต่ละหัวทำหน้าที่ปล่อยฟองอากาศกระจายรัศมี 5 เซนติเมตร และจัดเรียงในลักษณะควบคุมพื้นที่สี่เหลี่ยมภายในถังลอย และต่อท่ออากาศให้มีลักษณะเหมาะสมที่จะติดตั้งภายในถังลอยได้แสดงดังรูปที่ 3.21-3.23



รูปที่ 3.21 แบบการติดตั้งวัสดุปล่อยฟองอากาศในถังลอย



รูปที่ 3.22 วัสดุปล่อยฟองอากาศและท่อลม

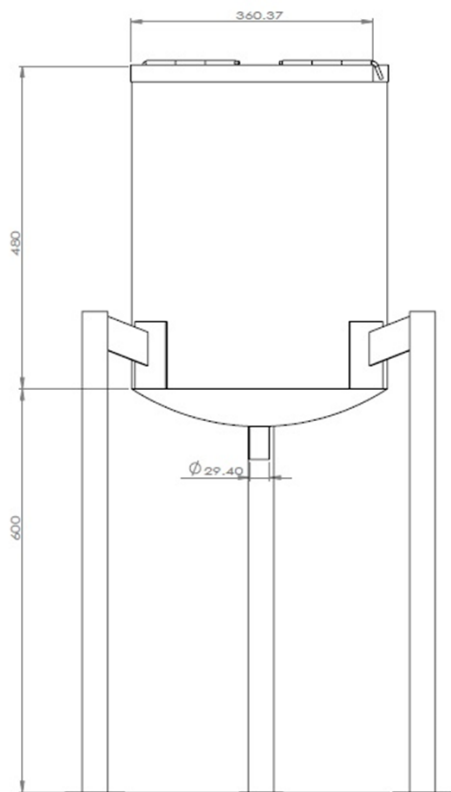


รูปที่ 3.23 ลักษณะฟองอากาศที่ได้

จากรูปที่ 3.23 หลังจากได้ปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ปล่อยฟองอากาศจากทรงกรวยมาเป็นหัวทรายแล้วได้ทดลองลอยแร่แบไรต์เกรดสูง ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับการทดสอบเบื้องต้นโดยใช้ปริมาณแร่แบไรต์ 5 กิโลกรัม เติมสารเคลือบผิวแร่ชนิดโซเดียมโอเลตปริมาณ 200 กรัมต่อตันแร่ และสารเคลือบฟองอากาศชนิดเทอร์พีนอล ปริมาณ 20 กรัมต่อตันแร่ อัตราการไหลของอากาศ 40 ลิตรต่อนาที ปรับ pH 8 ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 5 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ 10 เซนติเมตร อัตราการป้อนแร่ 10 ลิตรต่อนาที และใช้ความเข้มข้นของผสม 10 เปอร์เซ็นต์ของแข็งตามลำดับ พบว่าสามารถลอยแร่แบไรต์ได้มากขึ้นอย่างน่าพอใจ

3.1.2 การสร้างถังกวน

ในการสร้างถังกวนได้ออกแบบให้มีลักษณะเป็นถังทรงกระบอกขนาด 50 ลิตร ดังรูปที่ 3.24 ใช้มอเตอร์ 1 แรงม้า หมุนด้วยความเร็วรอบ 1,250 รอบต่อนาที และได้ปรับลดความเร็วรอบให้เหลือ 395 รอบต่อนาที โดยใช้พูลเลย์ (Pulley) ส่วนใบพัดกวนมีลักษณะเป็นใบพัดปลายเล็ก (Traper paddle) ซึ่งสามารถกวนผสมของเหลวที่มีความหนืดไม่สูงมากนัก ใบพัดกวนถูกออกแบบให้มีใบพัดสามใบพัดทำมุมกัน 120 องศา มีขนาดความยาวด้านละ 50 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.25 หลังจากกวนผสมเสร็จ ของผสมจะถูกดูดด้วยปั๊มแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifugal pump) ขนาด 1 แรงม้า ดังรูปที่ 3.26 เพื่อป้อนเข้าสู่เครื่องลอยแร่



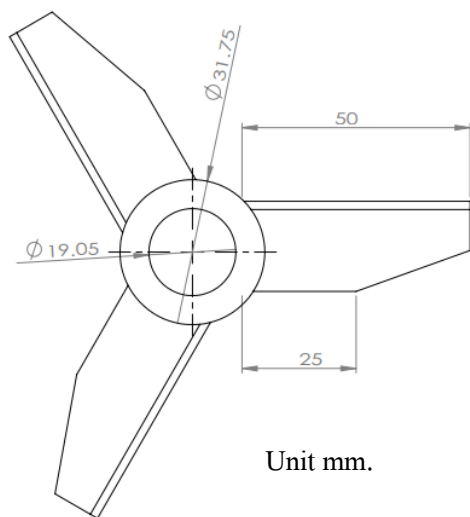
Unit mm.

a)



b)

รูปที่ 3.24 ถังกวนขนาด 50 ลิตร a) ที่ได้ออกแบบ b) ที่ได้จัดทำขึ้น



Unit mm.

a)



b)

รูปที่ 3.25 ใบพัดกวน a) ตามที่ได้ออกแบบไว้ และ b) ที่ได้จัดทำขึ้น



รูปที่ 3.26 ปั๊มหอยโข่งที่ใช้ปั๊มของผสมเข้าสู่เครื่องลอยแร่

3.1.3 การออกแบบระบบน้ำล้าง

เมื่อลอยแร่ขึ้นมาอาจจะมียากหินหรือฝุ่นแร่ที่เราไม่ต้องการอาจจะลอยแร่ติดขึ้นมา กับฟองอากาศด้วย ทำให้จำเป็นต้องมีระบบน้ำล้างเพื่อทำความสะอาดแร่ลอย ในการติดตั้งในระบบ ได้ออกแบบให้ใช้หัวสเปรย์ชนิดฉีดเต็มพื้นที่ (Full cone) ดังรูปที่ 3.27 และใช้ปั๊มน้ำขนาดเล็กดังรูปที่ 3.28 มีอัตราการไหล 5 ลิตรต่อนาที มีแรงดันน้ำคงที่ 6.9 บาร์



รูปที่ 3.27 หัวฉีดสเปรย์น้ำและการติดตั้ง

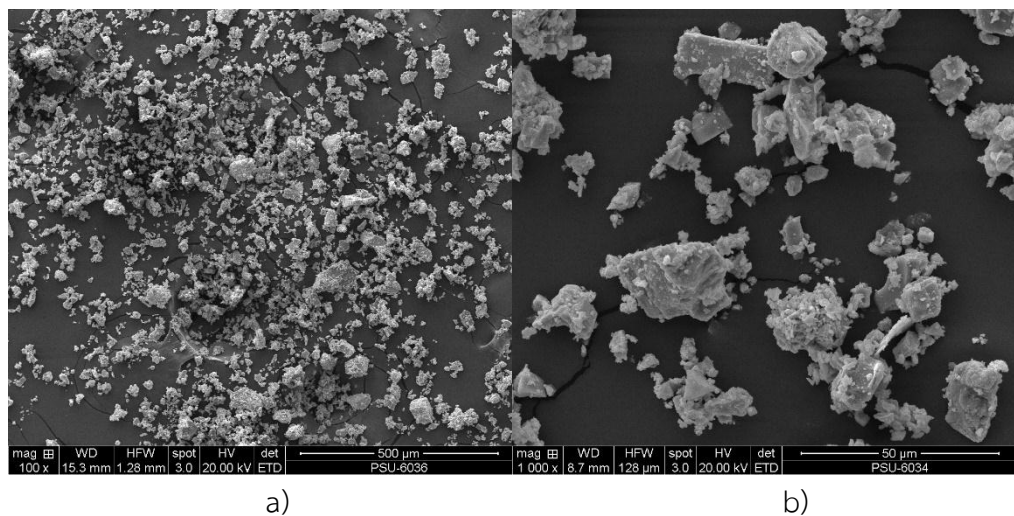


รูปที่ 3.28 ปั้มน้ำที่ใช้สำหรับน้ำล้าง

3.2 วัสดุและอุปกรณ์

3.2.1 ตัวอย่างแร่ที่ใช้ในการทดลอง

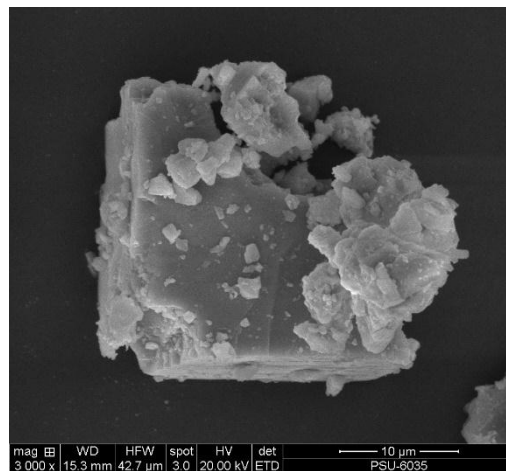
1). แร่แบไรต์เกรดสูง มีขนาด -325 เมช เป็นแร่แบไรต์จากบริษัท พี. แอนด์. เอส. แบไรท์ ไมนิ่ง จำกัด ซึ่งได้นำสินแร่จากแหล่งแร่อำเภอนพพิตำ จังหวัดนครศรีธรรมราช บดแร่แบไรต์ให้มีขนาด -325 เมช เป็นผลิตภัณฑ์เพื่อใช้เป็นโคลนเจาะในอุตสาหกรรมขุดเจาะน้ำมัน ซึ่งแร่มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเล็กน้อย และเมื่อวิเคราะห์จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แร่จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.29 ตัวอย่างแร่ชนิดนี้จะถูกสุมไปวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการกระเจิงของแสง (Laser diffraction) และนำไปทดสอบสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิควิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ และ เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ก่อนนำแร่ไปทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์และตัวแปรภายในเครื่องลอยแร่ที่ได้ออกแบบไว้



a)

b)

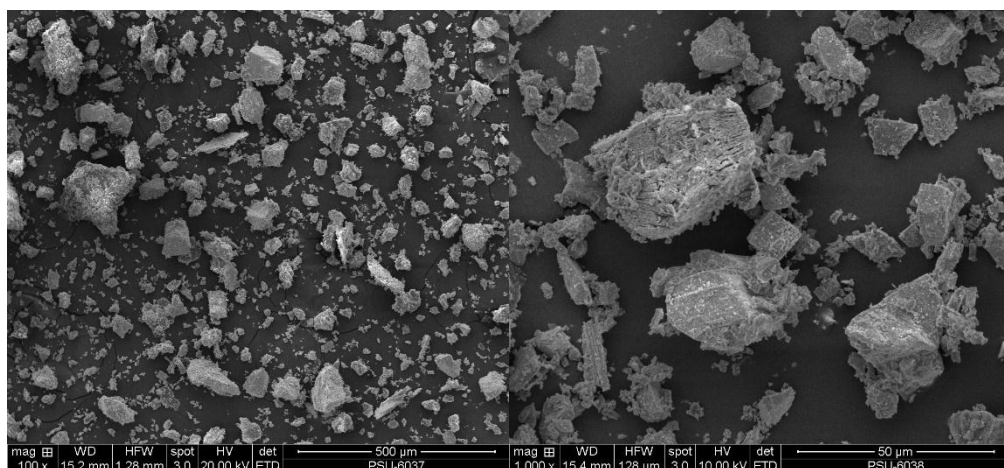
รูปที่ 3.29 ตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดสูง a) กำลังขยาย 100 เท่า และ b) กำลังขยาย 1000 เท่า c) กำลังขยาย 3000 เท่า



c)

รูปที่ 3.29 (ต่อ) ตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดสูง a) กำลังขยาย 100 เท่า และ b) กำลังขยาย 1000 เท่า
c) กำลังขยาย 3000 เท่า

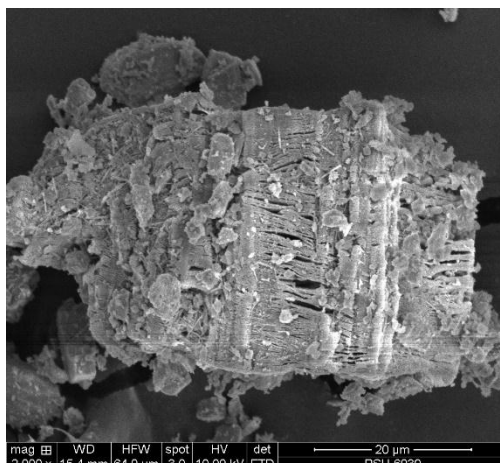
2). ตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดต่ำ ที่มีลักษณะเป็นแร่แบไรต์จะมีลักษณะการเจือปนด้วยแร่ไมก้า ซึ่งสังเกตจากการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูปที่ 3.30 ลักษณะของแร่แล้วทำการสุ่มตัวอย่างไปวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการกระเจิงของแสง และนำไปทดสอบสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิควิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ และ เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องลอยแร่ต่อไป



a)

b)

รูปที่ 3.30 ตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดต่ำ a) กำลังขยาย 100 เท่า และ b) กำลังขยาย 1000 เท่า c) กำลังขยาย 2000 เท่า



c)

รูปที่ 3.30 (ต่อ) ตัวอย่างแร่แปรไรต์เกรดต่ำ a) กำลังขยาย 100 เท่า และ b) กำลังขยาย 1000 เท่า
c) กำลังขยาย 2000 เท่า

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการลอยแร่

- 1). โซเดียมโอเลอเต จากบริษัท Sigma aldrich เป็นกรดไขมันประเภทกรดคาร์บอกซิลิก ความบริสุทธิ์ ≥ 82 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะเป็นผง ในงานวิจัยนี้จะใช้เป็นสารเคลือบผิวแร่
- 2). เทอร์ไพนิออล จากบริษัท Sigma aldrich เลขรหัสสินค้า 86480 สารเคมีมีลักษณะเป็นน้ำมันใส ในงานวิจัยนี้จะใช้เป็นสารเคลือบฟองอากาศ
- 3). โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จากบริษัท Fisher Scientific International Inc. มีลักษณะเป็นเกล็ดของแข็งมีความบริสุทธิ์ ≥ 97.0 เปอร์เซ็นต์ ในงานวิจัยนี้จะใช้เป็นสารปรับสภาพกรดต่างของของผสมและปรับสภาพถังกวน ในการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์และตัวแปรภายในเครื่องลอยแร่ที่ได้ออกแบบไว้
- 4). โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) จากบริษัท J.T.Baker มีลักษณะเป็นเกล็ดของแข็งมีความบริสุทธิ์ ≥ 85.0 เปอร์เซ็นต์ ในงานวิจัยนี้จะใช้เป็นสารปรับสภาพกรดต่างของของผสมและปรับสภาพถังกวน ในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องลอยแร่ที่ได้ออกแบบไว้

3.3 ขั้นตอนการวิจัย

3.3.1 การทดสอบสมรรถนะเครื่องลอยแร่ด้วยแร่แปรไรต์เกรดสูง

ในการทดสอบนี้จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน คือ การทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของผสม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์และระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ การทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการป้อนแร่และอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อ

ปริมาณแร่ที่เก็บได้ และการทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรทั้งหมดที่ส่งผลต่อเกรดของหัวแร่ ทั้ง 3 การทดสอบจะนำแร่แบไรต์เกรดสูงจากบริษัท พี.แอนด์.เอส.แบไรท์ไมน์นิง จำกัด ซึ่งมีขนาด - 325 เมช มาใช้ในการทดสอบจะนำตัวอย่างแร่แบไรต์มาทดสอบสมบัติต่างๆ เบื้องต้น เช่น การหาขนาดเฉลี่ยของเม็ดแร่ด้วยเทคนิคการกระเจิงของแสง การหาชนิดของแร่ที่พบในตัวอย่างด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และการหาองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างด้วยเทคนิควิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

1. การทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของผสม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ และระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ ในการลอยแร่แบไรต์เกรดสูง

จากรูปที่ 3.31 ในการเตรียมของผสมจะใช้ตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดสูง 5 กิโลกรัม ผสมกับน้ำ ควบคุมความเข้มข้นของของผสมเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ตามที่กำหนดไว้ ใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปรับสภาพน้ำให้มีค่า pH เท่ากับ 8 และเติมสารละลายโซเดียมโอเลตซึ่งเป็นเคลือบผิวแร่ปริมาณ 200 กรัมต่อตันแร่ ใช้เทอร์พินอล เป็นสารเคลือบฟองปริมาณ 20 กรัมต่อตันแร่ กวนผสมเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นเติมน้ำที่มีการปรับค่า pH เท่ากับ 8 ผสมเพื่อปรับความเข้มข้นของของผสมให้ได้เท่ากับ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ของแข็งโดยน้ำหนักตามที่ออกแบบไว้ก่อนที่จะป้อนเข้าสู่เครื่องลอยแร่ด้วยอัตราการไหลคงที่ที่ 10 ลิตรต่ออนาที

ภายในเครื่องลอยแร่จะทำการควบคุมอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 40 ลิตรต่ออนาทีในทุกๆ การทดสอบ ในแต่ละการทดสอบจะมีการปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ เท่ากับ 10, 15 และ 20 เซนติเมตร และระยะจุ่มเป็น 5, 10 และ 15 เซนติเมตร หลังจากการลอยแร่จะเก็บแร่ที่ลอยได้และแร่ที่จม น้ำ แล้วคำนวณเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ได้โดยคำนวณจากน้ำหนักของแร่ลอยต่อปริมาณแร่ทั้งหมด

2. การทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการป้อนแร่และอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการเก็บแร่ได้ของการลอยแร่แบไรต์เกรดสูง

จากรูปที่ 3.32 ในการเตรียมของผสมจะนำตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดสูง 5 กิโลกรัม ผสมกับน้ำ ให้ได้ความเข้มข้นของของผสมเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ปรับ pH เท่ากับ 8 โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และเติมสารละลายโซเดียมโอเลตซึ่งเป็นเคลือบผิวแร่ปริมาณ 200 กรัมต่อตันแร่ ใช้เทอร์พินอล เป็นสารเคลือบฟองอากาศปริมาณ 20 กรัมต่อตันแร่ กวนผสมเพื่อปรับสภาพผิวแร่เป็นเวลา 10 นาที และเติมน้ำเพื่อควบคุมความเข้มข้นของของผสมให้เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง เท่านั้นหลังจากกวนผสมเพื่อปรับสภาพผิวแร่อีก 5 นาที จะทำการป้อนเข้าสู่เครื่องลอยแร่ด้วยอัตราการไหลของผสมที่ต่างกันที่ 10, 15 และ 20 ลิตรต่ออนาที

ภายในเครื่องลอยแร่จะใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ให้มีขนาดคงที่ที่ 10 เซนติเมตร และระยะจุ่ม 5 เซนติเมตร และแปรค่าอัตราการไหลของอากาศเป็น 20, 30 และ 40 ลิตรต่ออนาที หลังจากการลอยแร่เสร็จแล้วจะเก็บแร่ลอยและแร่จม เพื่อนำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ได้ โดยคำนวณจากอัตราส่วนน้ำหนักของแร่ที่ลอยต่อน้ำหนักแร่ป้อนทั้งหมดคูณด้วย 100

3. การทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรทั้งหมดที่ส่งผลต่อเกรดของหัวแร่

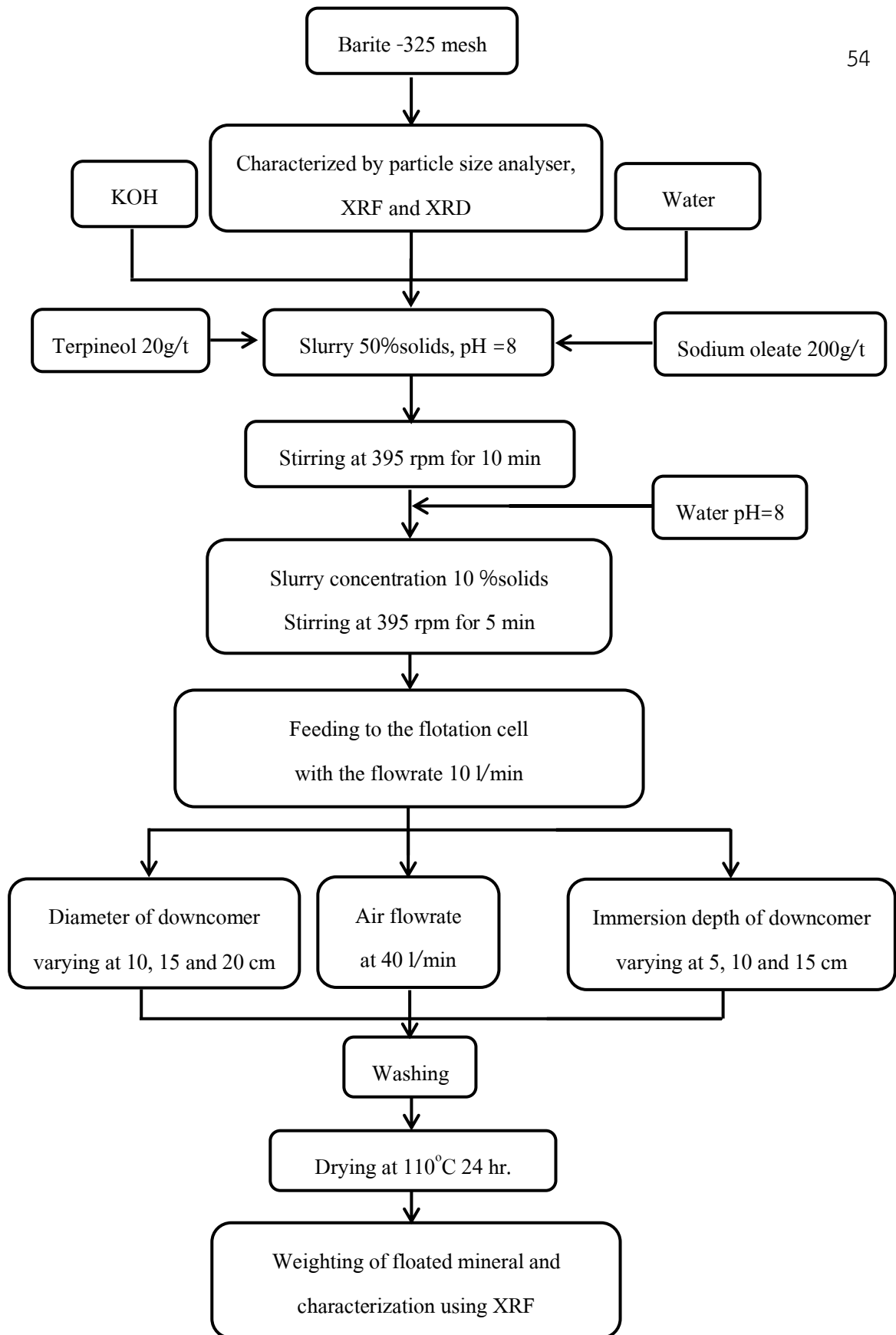
เมื่อทำการทดลองทั้ง 2 การทดลองข้างต้นเสร็จสิ้นแล้ว จะทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่ออธิบายอิทธิพลของตัวแปรแต่ละตัวต่อเกรดของแร่แบไรต์หลังลอยแร่ ซึ่งจะปรับเปลี่ยนตัวแปรใน

การลอยแร่ดังตารางที่ 3.1 เมื่อทำการทดลองลอยแร่ทั้งหมดเรียบร้อยแล้วจะนำไปทดสอบหาปริมาณแบบเรียมซัลเฟต ด้วยเทคนิควิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

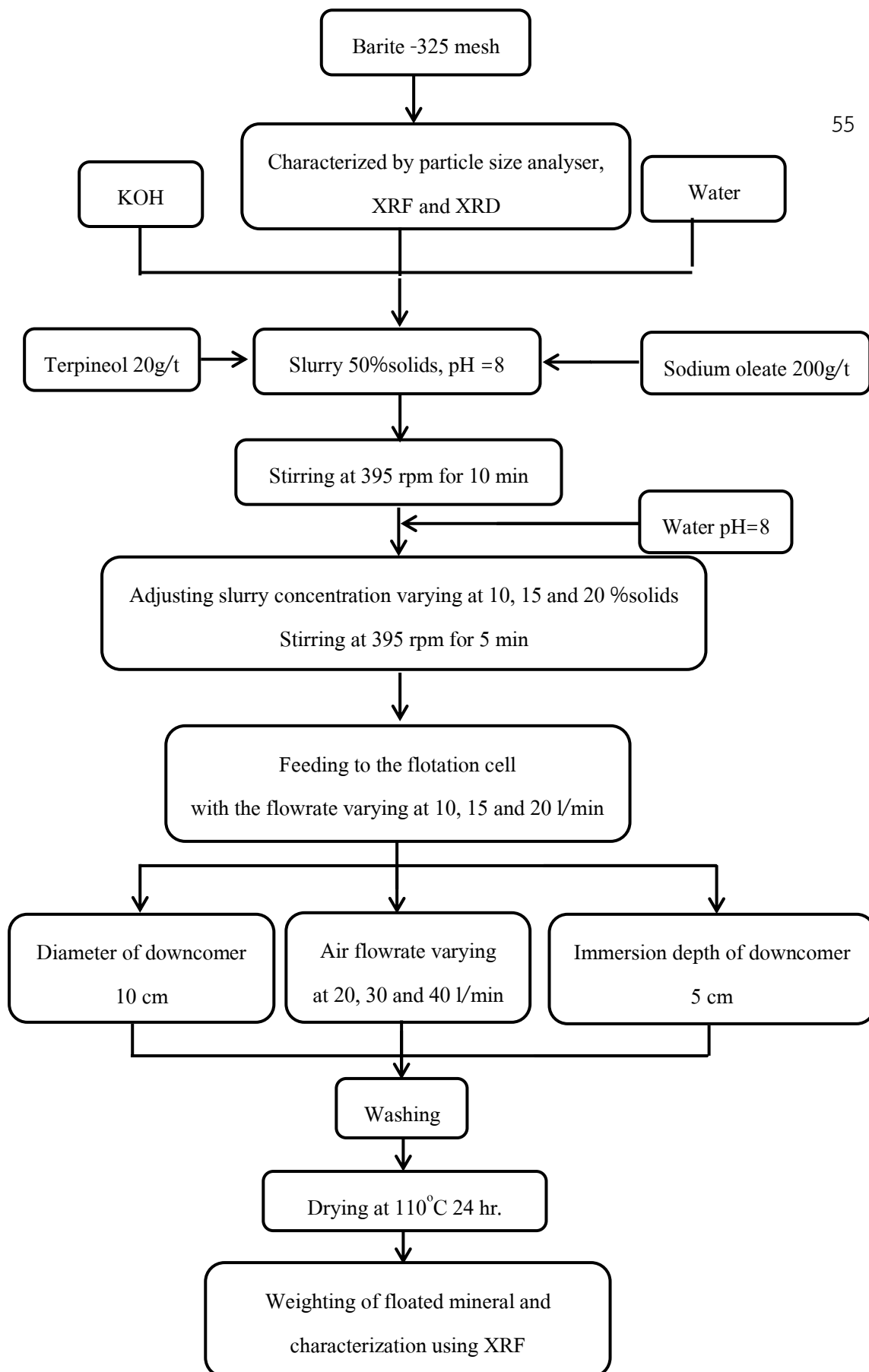
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรทั้งหมดที่ส่งผลต่อเกรดของหัวแร่

| Sample | Air flowrate (l/min) | Slurry flowrate (l/min) | Downcomer diameter (cm) | Immersion depth (cm) | Slurry concentration (%Solids) |
|--------|----------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------------|
| S1 | 40 | 10 | 10 | 15 | 10 |
| S2 | 40 | 10 | 10 | 15 | 15 |
| S3 | 40 | 10 | 10 | 15 | 20 |
| S4 | 40 | 10 | 10 | 5 | 10 |
| S5 | 40 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| S6 | 40 | 10 | 15 | 15 | 10 |
| S7 | 40 | 10 | 20 | 15 | 10 |
| S8 | 40 | 15 | 10 | 15 | 10 |
| S9 | 40 | 20 | 10 | 15 | 10 |
| S10 | 20 | 10 | 10 | 15 | 10 |
| S11 | 30 | 10 | 10 | 15 | 10 |

เมื่อทำการลอยแร่สามารถสรุปและอธิบายได้ว่า ตัวแปรใดไม่มีอิทธิพลส่งผลต่อการลอยแร่ และนำตัวแปรที่สนใจไปทดสอบกับตัวอย่างแร่เกรดต่ำ ทำให้สามารถศึกษาอิทธิพลต่อการลอยแร่ของตัวแปรนั้นๆ ได้มากยิ่งขึ้นและยังสามารถยืนยันผลทดสอบในตัวอย่างแร่ชนิดนี้กับตัวอย่างแร่ชนิดอื่นได้อีกด้วย



รูปที่ 3.31 แผนผังแสดงการทดสอบลอยแร่แบไรต์เกรดสูงเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของผสม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์และระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์

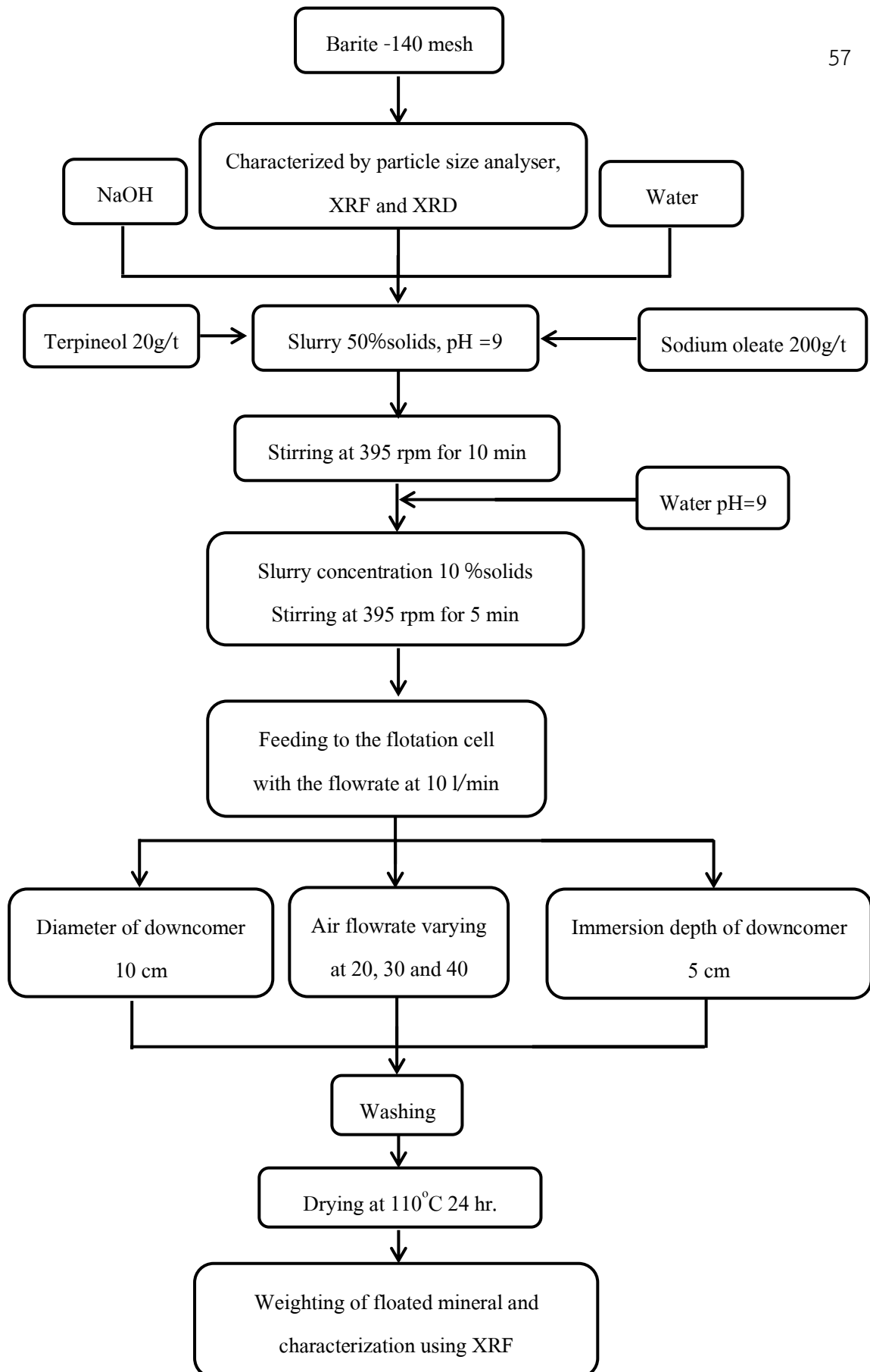


รูปที่ 3.32 แผนผังแสดงการทดสอบลอยแร่แบไรต์เกรดสูงเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการป้อนแร่และอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการเก็บแร่ได้

3.3.2 การทดสอบลอยแร่แบไรต์เกรดต่ำ

เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์และตัวแปรภายในเครื่องลอยแร่แบไรต์เกรดสูง ทำให้ทราบถึงตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการลอยแร่และพบว่า ระยะเวลาของดาวคัมเมอร์จะมีอิทธิพลต่อคุณภาพเกรดของแร่แบไรต์และอัตราการไหลของอากาศที่ป้อนให้กับระบบจะมีอิทธิพลต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้ ดังนั้นในการทดสอบลอยแร่แบไรต์เกรดต่ำจะทำเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรทั้งสองตัวแปรนี้โดยละเอียด

ดังนั้นในการทดสอบนี้จะนำแร่แบไรต์เกรดต่ำ ตรวจสอบขนาดเฉลี่ยด้วยเทคนิคการกระเจิงของแสง และนำไปทดสอบด้วยเทคนิควิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ และเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ นำไปทดสอบหาปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในตัวอย่างด้วยเทคนิควิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เพื่อใช้เป็นค่าเปรียบเทียบของตัวอย่างก่อนลอยแร่และหลังลอยแร่ ดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 แผนผังแสดงการทดสอบลอยแร่จริงด้วยแบไรต์เกรดต่ำ

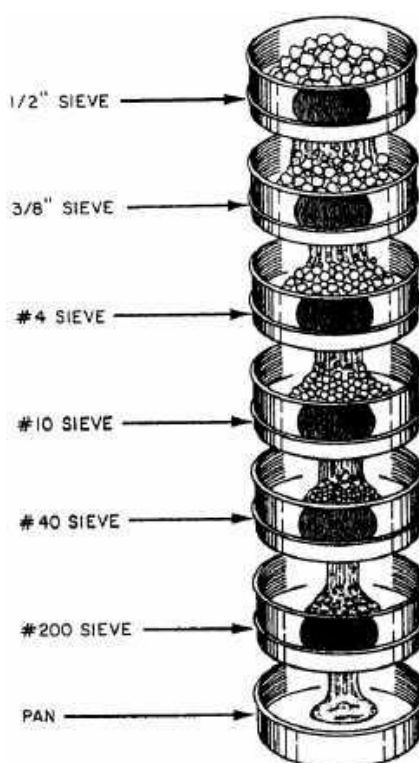
3.4 เทคนิคการวิเคราะห์และตรวจคุณลักษณะต่างๆ

3.4.1 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแร่ [41]

สำหรับการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแร่ได้ใช้เครื่องมือในการทดสอบ 2 เทคนิคด้วยกัน การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยตะแกรงมาตรฐานและเทคนิคการกระเจิงของแสง

1). การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคโดยใช้ตะแกรงมาตรฐาน

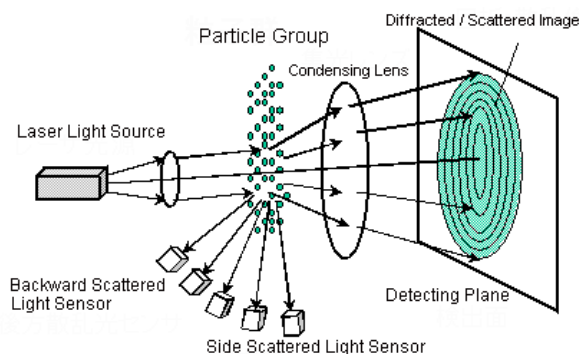
เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว ดังรูปที่ 3.34 เมช (Mesh) ซึ่งเป็นหน่วยใช้อธิบายขนาดช่องตะแกรงที่กำหนดด้วยจำนวนเส้นลวดต่อหน่วยความยาวขนาดรูเปิด (Openig size) แปรผกผันกับขนาดช่องตะแกรงเล็ก หมายถึงขนาดรูเปิดใหญ่ การบอกขนาดช่องตะแกรงที่นิยมใช้ทั่วไป คือบอกเป็นจำนวนเส้นลวดต่อความยาวหนึ่งนิ้ว เช่น ตะแกรงขนาด 200 เมช หมายถึงขนาดของเส้นลวด 200 เส้นต่อนิ้ว หรือระยะระหว่างกึ่งกลางเส้นลวดสองเส้นเป็น 127 ไมโครเมตร โดยที่เส้นลวดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 52 ไมโครเมตร ดังนั้นขนาดรูเปิดคือ 75 ไมโครเมตร การใช้ตะแกรงมาตรฐานในการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคจะใช้กับขนาดที่ใหญ่กว่า 38 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.34 การคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงมาตรฐาน [42]

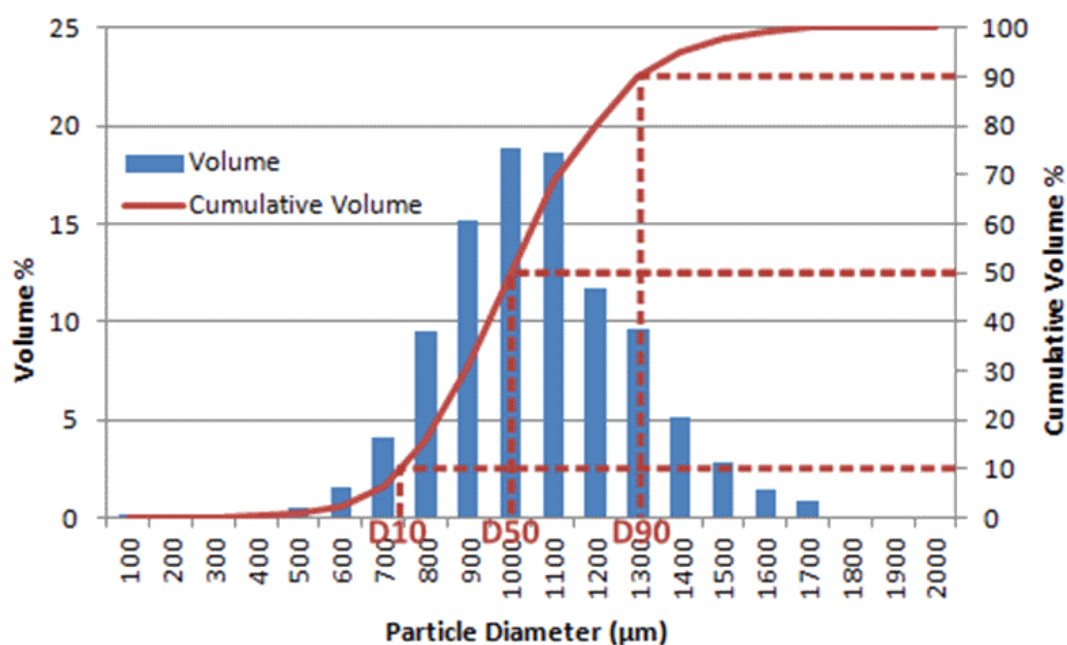
2). วิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการกระเจิงของแสง

เป็นการใช้การกระเจิงของแสง (Light scattering) ในการวิเคราะห์ขนาด โดยอนุภาคถูกทำให้กระจายตัวในของไหลที่เคลื่อนที่ ขนาดของอนุภาคหาได้จากความไม่ต่อเนื่องในของไหลเนื่องจากมีอนุภาคขวางอยู่ ซึ่งอุปกรณ์หรือเครื่องมือจะช่วยในการหาความสัมพันธ์ของช่วงที่ไม่ต่อเนื่องกับขนาดอนุภาค เครื่องมือส่วนใหญ่เป็นเครื่องมืออัตโนมัติ ดังนั้นการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยวิธีนี้จึงเป็นที่นิยมแต่มีราคาแพง เทคนิคนี้จะให้ค่าอัตราส่วนพลวัต (Dynamic ratio) สูง อัตราส่วนพลวัต คืออัตราส่วนของอนุภาคขนาดใหญ่สุดต่อขนาดเล็กสุดซึ่งสามารถวัดได้พร้อมกัน อุปกรณ์สมัยใหม่จะมีตัวรับสัญญาณหลายตัว อัตราส่วนพลวัตอาจมีค่ามากถึง 8000 อย่างไรก็ตามอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่สุดก็สามารถตรวจจับได้ การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคจะใช้หลักการการกระเจิงของแสง การกระเจิงแสงมุมต่ำ (Low angle fraunhofer) ที่ใช้ลำแสงความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic) หรือแสงเลเซอร์เป็นที่นิยมใช้มากสำหรับการวิเคราะห์ขนาดแบบอัตโนมัติ ขนาดของอนุภาคมีผลกระทบต่อความเข้มของแสง (Intensity) และมุมกระเจิง (Angular extent of scattering) ของไหลที่มีอนุภาคกระจายตัวอยู่จะไหลผ่านไปด้านหลังของระบบตรวจจับในรูปที่ 3.41 ข้อมูลของขนาดอนุภาคจะถูกเก็บไว้ในแถวของตัวจับสัญญาณโฟโตไดโอด (Photodiode detector array) เมื่อมีแสงผ่าน มุมของการกระเจิงแปรผกผันกับขนาดอนุภาคดังรูปที่ 3.35 ความเข้มของสัญญาณแปรตามขนาดอนุภาคยกกำลังสอง การวิเคราะห์ความเข้มของสัญญาณและข้อมูลเกี่ยวกับมุมด้วยคอมพิวเตอร์ทำให้ทราบลักษณะการแจกแจงขนาดอนุภาคอัตราส่วนพลวัตมีค่าตั้งแต่ 30 ถึง 500 ขึ้นอยู่กับการออกแบบเครื่องมือที่ใช้กับตัวอย่างเฉพาะหรือเป็นเครื่องมืออัตโนมัติแบบอื่นๆ การกระเจิงของแสงมุมต่ำโดยทั่วไปใช้ได้กับอนุภาคในช่วง 1 ถึง 200 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาคเล็กสุดควรมีขนาดอย่างน้อยสองเท่าของความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์เพื่อการตรวจจับได้ การใช้เทคนิคนี้เหมือนกับวิธีการอื่นๆ ที่ต้องสมมุติให้อนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงกลม การตรวจจับอนุภาคที่เกาะรวมตัวกันทำได้ยาก เนื่องจากเทคนิคที่มีการเก็บข้อมูลง่ายจึงมีการใช้เทคนิคนี้มากในการหาขนาดอนุภาค ในการวิจัยได้ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการกระเจิงของแสง รุ่น Mastersizer Hydro 2000MU ยี่ห้อ Malvern



รูปที่ 3.35 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการกระเจิงของแสง [43]

การทดสอบทั้ง 2 แบบ จัดทำเพื่อเก็บข้อมูลในการศึกษาลักษณะการแจกแจงของขนาดอนุภาค มักเขียนในรูปฮิสโทแกรมหรือกราฟความถี่ที่แสดงจำนวนขนาดอนุภาคในแต่ละขนาด ค่าฐานนิยม (Mode) คือขนาดอนุภาคที่เกิดซ้ำมากที่สุดหรือมีความถี่สูงสุด พิจารณาข้อมูลจากตะแกรงร่อน (Sieving data) ข้อมูลที่ใช้แสดงตัวอย่างน้ำหนักของแร่ในแต่ละชั้นของตะแกรงหลังการเขย่า โดยเริ่มต้นการวิเคราะห์โดยการเปลี่ยนน้ำหนักที่อยู่ในแต่ละตะแกรงเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยการหารน้ำหนักในแต่ละชั้นตะแกรงด้วยน้ำหนักของตัวอย่างทั้งหมด ฮิสโทแกรมสำหรับข้อมูลนี้สร้างโดยการเขียนเปอร์เซ็นต์ในแต่ละตะแกรงกับขนาดรูเปิด ดังรูปที่ 3.36 จะสังเกตว่าขนาดของอนุภาคจะถูกลดลงให้อยู่ในลักษณะสเกลล็อก ทำให้ช่วงความกว้างที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากัน การแจกแจงขนาดอนุภาคสะสมสร้างโดยการเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์ของแต่ละช่วง (Cumulative volume) และเขียนผลที่ได้กับการลดลงของขนาดอนุภาคสะสมสร้างโดยการเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์ของแต่ละช่วง และเขียนผลที่ได้กับการลดของขนาดอนุภาค การเปรียบเทียบการแจกแจงทำได้โดยการเขียนเปอร์เซ็นต์ของแต่ละช่วง และเขียนผลที่ได้กับการลดลงของขนาดอนุภาค การเปรียบเทียบการแจกแจงทำได้โดยการเขียนเปอร์เซ็นต์สะสมเล็กกว่าหรือใหญ่กว่าขนาดที่กำหนด ผลที่ได้จากการวิเคราะห์การร่อนอนุภาคผ่านตะแกรงโดยคำนวณจากน้ำหนักของผงที่เล็กกว่าขนาดที่กำหนด จากนั้นทำการเขียนขนาดอนุภาคสะสมเป็นเส้นโค้งผ่านจุดต่างๆให้มีความสัมพันธ์กับขนาดอนุภาคดังรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.36 ฮิสโทแกรมแสดงปริมาณของการกระจายตัวของขนาดอนุภาคต่างๆ [44]

จากการแจกแจงอนุภาคสะสมที่ผ่านจะแสดงค่ามัธยฐาน (Median) ของขนาด หาได้จากค่าเปอร์เซ็นต์ที่ 50 ส่วนฐานนิยมของขนาดอนุภาคคือขนาดที่มีความถี่มากที่สุดหรือแบ่งที่มียอดสูงที่สุดในการกระจายฮิสโทแกรม ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคคำนวณตามวิธีปกติทั่วไปขนาดเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่สอดคล้องกับขนาดอนุภาค

จากฮิสโทแกรม ขนาดอนุภาคค่าเฉลี่ยทางเลขคณิต D_{am} และค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต D_{gm} คำนวณดังนี้

$$D_{am} = \left(\frac{1}{n}\right) \sum y_i D_i$$

$$\text{Log}(D_{am}) = \left(\frac{1}{n}\right) \sum y_i \log(D_i)$$

เมื่อ D_i คือค่ากลางของแต่ละช่วงขนาด y_i คือความถี่ของการเกิดในแต่ละช่วงขนาด และ N คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด (N คือผลบวกของ y_i ในแต่ละช่วงขนาด) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ คำนวณจากค่าเฉลี่ยเลขคณิตดังนี้

$$\sigma = \left[\frac{1}{N} \sum D^2 y_i - D_{am}^2 \right]^{1/2}$$

โดยทั่วไปในการวิเคราะห์ข้อมูลลำดับการแจกแจงขนาดอนุภาคออกเป็นสามจุดมีชื่อดังนี้ D_{80} , D_{50} และ D_{10} ซึ่งหมายถึงขนาดอนุภาคที่มีเปอร์เซ็นต์การแจกแจงสะสมที่ 80, 50 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

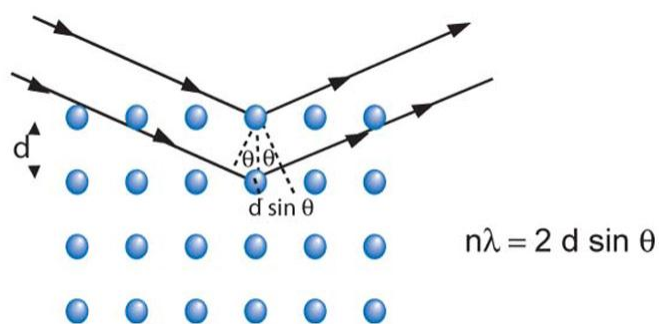
3.4.2 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD)

เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เป็นการวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียวจากแหล่งกำเนิดส่องกระทบทำมุมต่างๆ ในผลึกของตัวอย่าง ขณะที่วัสดุหรือตัวอย่างจะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างมีระเบียบ ซึ่งมีลักษณะเป็นระนาบเส้นขนานกัน ในแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะที่เท่ากันซึ่งระยะห่างนี้จะมีค่าแตกต่างกันในแต่ละโครงสร้างแต่ละผลึกกัน โดยการตกกระทบบนผลึกจะเกิดการแตกกระจายโดยอะตอมเนื่องจากรังสีที่กระจายเป็นมาจากการเร่งและการหน่วงของอิเล็กตรอน การหักเหหรือสะท้อนออกและความเข้มของแสงที่มาจากรังสีเอกซ์จะทำให้เกิดความแตกต่างในระยะทางเคลื่อนที่ซึ่งสามารถวัดมุมที่เกิดการเลี้ยวเบนถูกตรวจจับและบันทึก ซึ่งรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีจะมีลักษณะเฉพาะตัวของโครงสร้างผลึก ซึ่งสามารถระบุลักษณะเฉพาะของตัวอย่างได้ ขนาดผลึกสามารถคำนวณได้จากกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังรูปที่ 3.37

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

| | |
|-----------|-------------------------------|
| d | คือ ขนาดผลึก (นาโนเมตร) |
| λ | คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ |
| n | คือ ค่าคงที่จำนวนเต็ม |
| θ | คือ มุมที่เกิดการเบี่ยงเบน |

ในการวิจัยได้ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ รุ่น X'Pert MPD ยี่ห้อ Phillips แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ $\text{CuK}\alpha$ ความยาวคลื่น (λ) เท่ากับ 1.5405 อังสตรอม (\AA)

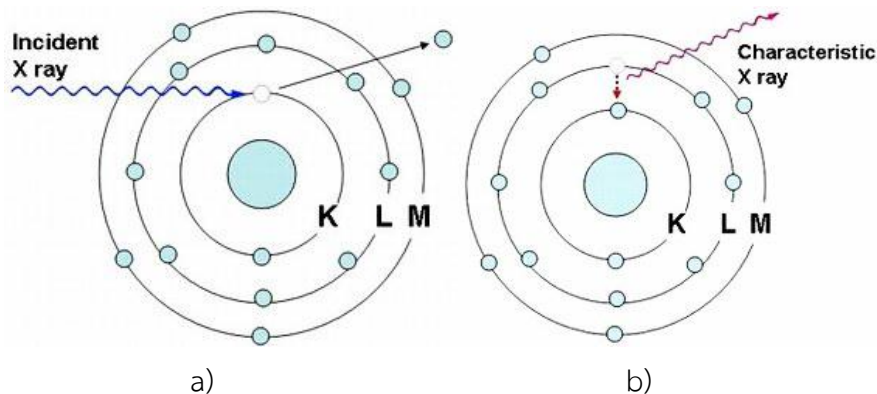


รูปที่ 3.37 กฎของแบรกก์ [45]

3.4.3 การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X ray Fluorescence Spectroscopy, XRF)

เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม จะมีการเปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่า และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (Characteristic X ray) ของแต่ละธาตุ เมื่อวัสดุได้รับการกระตุ้นจากรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงมากพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอน (ชั้น K) หลุดออกมาจากวงโคจร (Ejected core electron) ก็จะทำให้อิเล็กตรอนจากชั้นวงนอกเลื่อนลงมาเติมช่องว่าง โดยอิเล็กตรอนชั้นนอกจะมีการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (Characteristic X-ray) ของแต่ละธาตุ ดังรูปที่ 3.38 จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโฟตอนเปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่างข้อมูลนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแต่ละชนิดได้

ในการวิจัยได้ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ เทคนิควิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ รุ่น PW2400 ยี่ห้อ Philips ใช้กับหลอด Rh



รูปที่ 3.38 ชั้นพลังงานอิเล็กตรอนในตัวอย่าง [46] a) รังสีเอกซ์ทำให้อิเล็กตรอนในชั้น k หลุดออกไปจากวงโคจร b) อิเล็กตรอนในชั้น L ลงมาแทนที่และคายรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะออกมา

3.4.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM)

ในการศึกษาลักษณะรูปร่างหรือผิวสัมผัสของตัวอย่างด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษารูปร่างวัสดุที่มีกำลังขยายสูงและบ่งบอรายละเอียดภาพได้ดีกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงธรรมดา การศึกษารูปร่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) จะทำได้โดยการตรวจจับอิเล็กตรอนบนผิวตัวอย่างทำให้เกิดรูปร่างมีลักษณะเป็น 3 มิติ โดยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนถูกปรับด้วยเลนส์รวมแสงกลายเป็นลำแสงอิเล็กตรอนที่สามารถปรับขนาดลำแสงให้ใหญ่หรือเล็กเพื่อความชัดของรูปแล้วส่องผ่านเลนส์ใกล้วัตถุเพื่อโฟกัสแล้วกระทบลงบนผิววัสดุเกิดเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ซึ่งจะถูกรวบรวมด้วยเครื่องและแปลสัญญาณจนกลายเป็นรูปภาพ ในการวิจัยได้ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ SEM รุ่น FEI Quanta 400 ที่แรงดันเร่ง 20 kV

3.4.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการลอยแร่ [2]

ในการลอยแร่ให้มีประสิทธิภาพสูงจะต้องเก็บแร่ (Recovery) ได้ในปริมาณมากในขณะที่เกรดของแร่หรือคุณภาพของแร่นั้นสูงตามไปด้วย ซึ่งสามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

1). ปริมาณแร่ที่เก็บได้ (Concentrate weight) เป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณแร่ที่ลอยขึ้นต่อปริมาณแร่ป้อนทั้งหมด เขียนได้ดังสมการ

$$\text{Concentrate weight} = 100 \frac{C}{F}$$

เมื่อ F คือ น้ำหนักโดยรวมของแร่ป้อนทั้งหมด

C คือ น้ำหนักของแร่มีค่าที่สามารถเก็บได้

เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ที่บ่งบอกประสิทธิภาพในการลอยแร่ในการเก็บแร่ที่แสดงถึงปริมาณแร่ที่ลอยขึ้นมาต่อน้ำหนักของแร่ป้อนทั้งหมด แต่ละค่าที่ได้จากน้ำหนักของแร่เท่านั้น

2). อัตราส่วนความเข้มข้น (Ratio of concentration) เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของแร่ป้อนต่อน้ำหนักของแร่มีค่าที่สามารถเก็บได้

$$\text{Ratio of Concentration} = \frac{F}{C}$$

เมื่อ F คือ น้ำหนักโดยรวมของแร่ป้อนทั้งหมด

C คือ น้ำหนักของแร่มีค่าที่สามารถเก็บได้

สมการความสัมพันธ์ข้างต้นเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการพิจารณาคุณภาพเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บแร่ภายใต้เงื่อนไขที่ทราบเพียงน้ำหนักของแร่เท่านั้น แต่เมื่อทราบข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการซึ่งจะเป็นข้อมูลเกี่ยวกับเกรดของหัวแร่ ซึ่งสามารถแสดงอัตราส่วนความเข้มข้นในแง่ของการวิเคราะห์แร่ ซึ่งเริ่มคำนวณจากสมการสมดุลมวลและความหมายของอัตราส่วนของความเข้มข้น

$$F = C + T \quad (3.1)$$

$$Ff = Cc + Tt \quad (3.2)$$

เมื่อ F = น้ำหนักโดยรวมของแร่ป้อนทั้งหมด f = เกรดของแร่ป้อน

C = น้ำหนักของแร่มีค่าที่สามารถเก็บได้ c = เกรดของหัวแร่มีค่าที่สามารถเก็บได้

T = น้ำหนักของแร่ไม่มีค่าที่สามารถเก็บได้ t = ความบริสุทธิ์ของไม่มีค่าที่สามารถเก็บได้

เมื่อต้องการกำจัดตัวแปร T ออกจากสมการเพื่อให้เขียนอยู่ในรูปอาศัย อัตราส่วนของความเข้มข้น สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\text{จาก } Ff = Cc + Tt ; F = C + T$$

$$Ff = Cc + (F-C)t \quad (3.3)$$

$$F/C = (c-t)/(f-t) \quad (3.4)$$

3). เปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ (%Recovery) เป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณการเก็บแร่มีค่าได้ต่อปริมาณของแร่ป้อนทั้งหมด สามารถเขียนในรูปแบบสมการ

$$R = 100(Cc)/(Ff) \quad (3.5)$$

เมื่อ R คือ เปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ได้
หรือถ้าต้องการเขียนในรูปแบบใช้เกรดของหัวแร่สามารถเขียนได้

$$R = 100c(f - t)/f(c - t) \quad (3.6)$$

4). อัตราส่วนการเพิ่มมูลค่า (Enrichment Ratio) เป็นอัตราส่วนระหว่างเกรดของหัวแร่มีค่าที่สามารถเก็บได้ต่อเกรดของแร่ป้อน

$$\text{Enrichment Ratio} = c/f \quad (3.7)$$

ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการแต่งแร่จะใช้สมการเหล่านี้ในการวิเคราะห์และสามารถเลือกใช้โดยขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในกระบวนการผลิตเพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์และความคุ้มค่าของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิต

บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผล

4.1 การทดสอบสมบัติของตัวอย่างแร่ก่อนลอยแร่

การทดสอบสมบัติของแร่ก่อนลอย เป็นการศึกษาลักษณะขนาดอนุภาคของตัวอย่างแร่ ว่ามีขนาดและการกระจายตัวมีความเหมาะสมต่อการลอยแร่หรือไม่ แร่ที่ใช้มีแร่ชนิดใดเป็นแร่องค์ประกอบอยู่ในตัวอย่างบ้าง และปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในตัวอย่างแร่ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับปริมาณธาตุที่เปลี่ยนไปทั้งก่อนและหลังการลอย ซึ่งสามารถสรุปและอธิบายได้ว่าตัวแปรใดของเครื่องลอยแร่ที่ออกแบบไว้มีอิทธิพลหรือส่งผลต่อการลอยแร่อย่างไรบ้าง

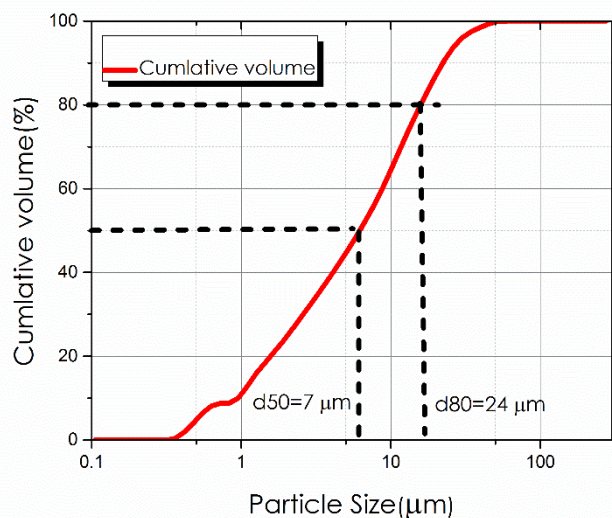
4.1.1 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค

จากการค้นคว้าหาข้อมูลก่อนลอยแร่พบว่า แร่แบไรต์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 45 ไมโครเมตร [47] จะมีความเหมาะสมในการลอยแร่แบไรต์ เนื่องจากอนุภาคของแร่แบไรต์ที่มีขนาดใหญ่จะทำให้มีน้ำหนักรวม และแร่แบไรต์มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าแร่ประกอบหินชนิดอื่น ซึ่งทำให้เป็นอุปสรรคในการลอยแร่ ดังนั้นการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยวิธีนี้เพื่อเป็นการยืนยันว่าแร่แบไรต์มีขนาดเล็กเหมาะสมต่อการลอยแร่และยังสามารถระบุปริมาณการกระจายตัวของอนุภาคขนาดต่างๆ การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการกระเจิงของแสงกับตัวอย่างแร่ที่ใช้ในการวิจัย ดังต่อไปนี้

1). ตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดสูง

ตารางที่ 4.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดสูง

| Size(μm) | Vol% | Cum% | Size(μm) | Vol% | Cum% | Size(μm) | Vol% | Cum% |
|-----------------------|------|-------|-----------------------|------|-------|-----------------------|------|--------|
| 0.36 | 0.00 | 0.00 | 2.19 | 2.50 | 23.60 | 13.18 | 4.91 | 69.33 |
| 0.42 | 0.42 | 0.42 | 2.51 | 2.77 | 26.37 | 15.14 | 4.81 | 74.14 |
| 0.48 | 1.49 | 1.91 | 2.88 | 2.88 | 29.25 | 17.38 | 4.51 | 78.65 |
| 0.55 | 2.16 | 4.07 | 3.31 | 2.94 | 32.19 | 19.95 | 4.25 | 82.90 |
| 0.63 | 2.34 | 6.41 | 3.80 | 3.01 | 35.20 | 22.91 | 4.07 | 86.97 |
| 0.72 | 1.74 | 8.15 | 4.37 | 3.08 | 38.28 | 26.30 | 3.77 | 90.74 |
| 0.83 | 0.60 | 8.75 | 5.01 | 3.18 | 41.46 | 30.20 | 3.13 | 93.87 |
| 0.96 | 0.07 | 8.82 | 5.75 | 3.27 | 44.73 | 34.67 | 2.24 | 96.11 |
| 1.10 | 1.18 | 10.00 | 6.61 | 3.38 | 48.11 | 39.81 | 1.43 | 97.54 |
| 1.26 | 2.83 | 12.83 | 7.59 | 3.55 | 51.66 | 45.71 | 1.02 | 98.56 |
| 1.45 | 3.10 | 15.93 | 8.71 | 3.84 | 55.50 | 52.48 | 0.86 | 99.42 |
| 1.66 | 2.54 | 18.47 | 10.00 | 4.24 | 59.74 | 60.26 | 0.55 | 99.97 |
| 1.91 | 2.63 | 21.10 | 11.48 | 4.68 | 64.42 | 69.18 | 0.03 | 100.00 |



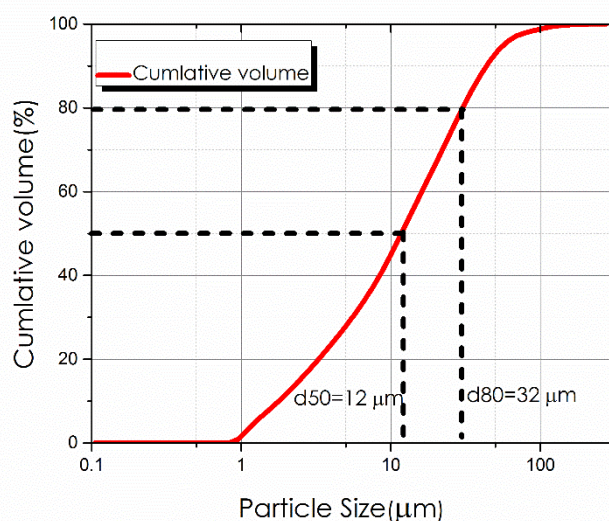
รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของแร่แบโรต์เกรดสูง

จากตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคของแร่แบโรต์เกรดสูง มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.36 ถึง 60.26 ไมโครเมตร และจากรูปที่ 4.1 สามารถสรุปได้ว่า เม็ดแร่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 7 ไมโครเมตร มีปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ และมีเม็ดแร่ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 24 ไมโครเมตร มีปริมาณ 80 เปอร์เซ็นต์

2). แร่แบโรต์เกรดต่ำ

ตารางที่ 4.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของตัวอย่างแร่แบโรต์เกรดต่ำ

| Size(μm) | Vol% | Cum% | Size(μm) | Vol% | Cum% | Size(μm) | Vol% | Cum% |
|----------|------|-------|----------|------|-------|----------|------|--------|
| 0.72 | 0.00 | 0.00 | 5.01 | 2.73 | 27.99 | 34.67 | 4.14 | 84.12 |
| 0.83 | 0.03 | 0.03 | 5.75 | 2.86 | 30.85 | 39.81 | 3.76 | 87.88 |
| 0.96 | 0.87 | 0.90 | 6.61 | 3.03 | 33.88 | 45.71 | 3.25 | 91.14 |
| 1.10 | 2.18 | 3.08 | 7.59 | 3.30 | 37.18 | 52.48 | 2.67 | 93.81 |
| 1.26 | 2.24 | 5.31 | 8.71 | 3.66 | 40.85 | 60.26 | 2.05 | 95.86 |
| 1.45 | 1.81 | 7.12 | 10.00 | 4.07 | 44.92 | 69.18 | 1.32 | 97.18 |
| 1.66 | 1.93 | 9.05 | 11.48 | 4.37 | 49.29 | 79.43 | 0.73 | 97.91 |
| 1.91 | 1.90 | 10.94 | 13.18 | 4.44 | 53.73 | 91.20 | 0.57 | 98.47 |
| 2.19 | 2.16 | 13.10 | 15.14 | 4.34 | 58.06 | 104.71 | 0.53 | 99.01 |
| 2.51 | 2.27 | 15.37 | 17.38 | 4.27 | 62.33 | 120.23 | 0.43 | 99.43 |
| 2.88 | 2.33 | 17.70 | 19.95 | 4.33 | 66.66 | 138.04 | 0.26 | 99.69 |
| 3.31 | 2.42 | 20.12 | 22.91 | 4.45 | 71.12 | 158.49 | 0.13 | 99.82 |
| 3.80 | 2.52 | 22.64 | 26.30 | 4.48 | 75.60 | 181.97 | 0.10 | 99.91 |
| 4.37 | 2.62 | 25.26 | 30.20 | 4.38 | 79.98 | 208.93 | 0.09 | 100.00 |



รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของแร่แบไรต์เกรดต่ำ

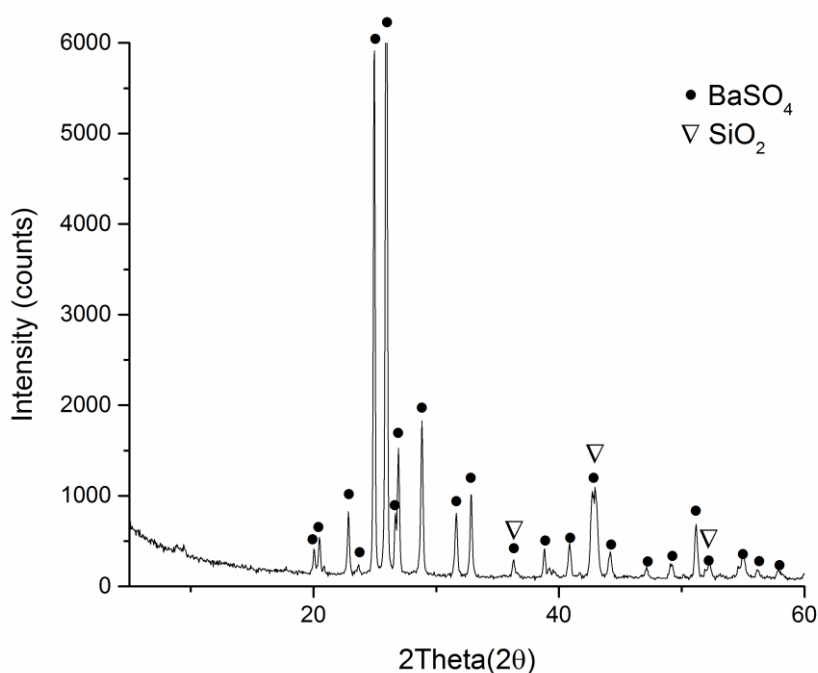
จากตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคของแร่แบไรต์เกรดต่ำ มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.83 ถึง 208.93 ไมโครเมตร และจากรูปที่ 4.2 สามารถสรุปได้ว่า เม็ดแร่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 12 ไมโครเมตร มีปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ และมีเม็ดแร่ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 32 ไมโครเมตร มีปริมาณ 80 เปอร์เซ็นต์

4.1.2 การวิเคราะห์ชนิดของแร่ที่อยู่ในตัวอย่างแร่ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

การทดสอบแร่องค์ประกอบภายในแร่ตัวอย่างมีความสำคัญมาก เนื่องจากจะทำให้ทราบถึงสัดส่วนแร่องค์ประกอบในเบื้องต้น และใช้ประโยชน์จากธรรมชาติของแร่นั้นๆ ทำให้เลือกวิธีการในการแต่งแร่ได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม ในการทดสอบด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ได้ผลดังนี้

1). ตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดสูง

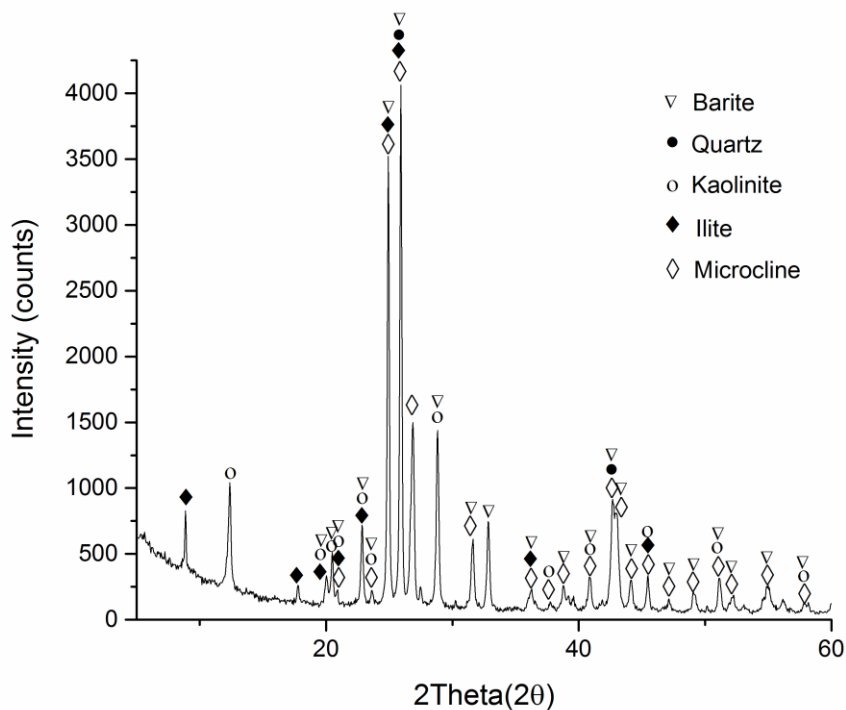
จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดสูง ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่ากราฟแสดงตำแหน่งของแร่แบไรต์และแร่ควอตซ์ สังเกตตำแหน่งกราฟของแร่แบไรต์จะแสดงตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 25.9, 26.9, 28.8 และ 42.7 องศา แสดงถึงระนาบ (210), (102), (211) และ (131, 401) อ้างอิงจากมาตรฐาน JCPDS No.01-080-3265 และแร่ควอตซ์จะแสดงตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 36.3, 42.6 และ 55.0 องศา แสดงถึงระนาบ (110), (021), (112) และ (022) มีค่า Semi quantitative ของแร่แบไรต์ 93 เปอร์เซ็นต์ และแร่ควอตซ์ 7 เปอร์เซ็นต์ อ้างอิงจากมาตรฐาน JCPDS No.01-087-2096



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดสูง

2). ตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดต่ำ

จากรูปที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดต่ำ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่ามีแร่แบไรต์ ควอตซ์ เคโอลิไนต์ อิลไลต์ และไมโครไคลน์ ตำแหน่งกราฟของแร่แบไรต์แสดงตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 25.9, 26.9, 28.8 และ 42.7 องศา แสดงถึงระนาบ (210), (102), (211) และ (131, 401) อ้างอิงจากมาตรฐาน JCPDS No.01-076-0213 แร่ควอตซ์จะแสดงตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 20.9, 26.5, 50.1, และ 60 องศา แสดงถึงระนาบ (100), (011), (112) และ (121) อ้างอิงจากมาตรฐาน JCPDS No.01-075-6052, ตำแหน่งกราฟของแร่เคโอลิไนต์จะแสดงตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 12.3, 24.9, 38.4 และ 39.3 องศา แสดงถึงระนาบ (001), (002), (-202) และ (131) อ้างอิงจากมาตรฐาน JCPDS No.00-058-2005, ตำแหน่งกราฟของแร่อิลไลต์จะแสดงตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 8.8, 17.7, 26.7 และ 45.2 องศา แสดงถึงระนาบ (002), (004), (006) และ (136) อ้างอิงจากมาตรฐาน JCPDS No.00-026-0911 และตำแหน่งกราฟของแร่ไมโครไคลน์จะแสดงตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 21, 26.5, 27.1 และ 27.5 องศา แสดงถึงระนาบ (-201), (220), (-202) และ (020,002) มีค่า Semi quantitative ของแบไรต์ 34 เปอร์เซ็นต์ ควอตซ์ 7 เปอร์เซ็นต์ เคโอลิไนต์ 16 เปอร์เซ็นต์ อิลไลต์ 14 เปอร์เซ็นต์ และไมโครไคลน์ 29 เปอร์เซ็นต์ อ้างอิงจากมาตรฐาน JCPDS No.01-087-1787



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดต่ำ

4.1.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแร่ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

ในการลอยแร่ การทดสอบแร่ตัวอย่างด้วยการวิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์เป็นการทดสอบเพื่อให้ทราบถึงปริมาณธาตุองค์ประกอบที่อยู่ภายในแร่ตัวอย่าง ซึ่งจะสามารถเปรียบเทียบปริมาณธาตุที่เปลี่ยนไปก่อนและหลังการลอย โดยสามารถสรุปและอธิบายได้ว่า ตัวแปรของเครื่องลอยแร่ที่สนใจ มีอิทธิพลหรือส่งผลต่อการลอยแร่อย่างไร

1). ตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดสูง

จากตารางที่ 4.3 ในตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดสูง ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักประกอบด้วย ปริมาณแบเรียมซิลเฟต 85.92 เปอร์เซ็นต์ ซิลิกา 6.90 เปอร์เซ็นต์ และ เพอร์ริกออกไซด์ 3.01 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดสูง

| ที่ | สารประกอบ | ความเข้มข้น(%) | ที่ | สารประกอบ | ความเข้มข้น(%) |
|-----|--------------------------------|----------------|-----|--------------------------------|----------------|
| 1 | Al ₂ O ₃ | 1.15 | 6 | Fe ₂ O ₃ | 3.01 |
| 2 | SiO ₂ | 6.90 | 7 | SrO | 1.88 |
| 3 | K ₂ O | 0.13 | 8 | BaSO ₄ | 85.92 |
| 4 | CaO | 0.09 | 9 | CHNO | 0.67 |
| 5 | MnO | 0.24 | | | |

2). ตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดต่ำ

จากตารางที่ 4.4 ในตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดต่ำ ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก ประกอบด้วย ปริมาณแบเรียมซัลเฟต 63.12 เปอร์เซ็นต์ ซิลิกา 18.22 เปอร์เซ็นต์ และ อะลูมินา 13.49 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดต่ำ

| ที่ | สารประกอบ | ความเข้มข้น(%) | ที่ | สารประกอบ | ความเข้มข้น(%) |
|-----|--------------------------------|----------------|-----|-------------------|----------------|
| 1 | Al ₂ O ₃ | 13.49 | 5 | SrO | 0.99 |
| 2 | SiO ₂ | 18.22 | 6 | BaSO ₄ | 63.12 |
| 3 | K ₂ O | 1.02 | 7 | CHNO | 2.48 |
| 4 | Fe ₂ O ₃ | 0.69 | | | |

4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะการลอยแร่โดยใช้แร่แบไรต์เกรดสูง

เป็นผลการทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการลอยแร่ เช่น อัตราการไหลของอากาศ อัตราการไหลของผสม ความเข้มข้นของของผสม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ และระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ช่วงการทดสอบ

1. การทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุปกรณ์ของเครื่องลอยแร่ที่ส่งผลต่อสมรรถนะของการลอยแร่

เป็นการทดสอบโดยศึกษาอิทธิพลของอุปกรณ์ของเครื่องลอยแร่ต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้ โดยจะศึกษาที่อิทธิพลของการเพิ่มความเข้มข้นของของผสม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ และระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ ที่ส่งผลต่อการลอยโดยควบคุมอัตราการไหลของอากาศ 40 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของผสม 10 ลิตรต่อนาที และควบคุมความเข้มข้นของของผสม 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ 15, 20 และ 25 เซนติเมตร และระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 5, 10 และ 15 เซนติเมตร

จากตารางที่ 4.5 พบว่าเครื่องลอยแร่ที่ได้ออกแบบไว้ สามารถเก็บแร่ได้ประมาณ 70-85 เปอร์เซ็นต์ของแร่ที่ป้อนทั้งหมด การเพิ่มความเข้มข้นของของผสม ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ 10 เซนติเมตร และ ระยะจุ่ม 15 เซนติเมตร เพิ่มขึ้นจาก 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง มีค่า 78.08, 77.06 และ 76.09 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ปริมาณแร่ที่เก็บได้มีแนวโน้มลดลง ซึ่งเกิดจากปริมาณแร่และการกระจายตัวของเม็ดแร่ภายในถังลอยมีมากกว่าปริมาณฟองอากาศที่ใช้ในการลอย ทำให้หัวแร่ลอยขึ้นมาได้ไม่หมด การเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ ที่การใช้ความเข้มข้นของผสม 10 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง และ ระยะจุ่ม 15 เซนติเมตร พบว่าเพิ่มขึ้นจาก 10 ถึง 20 เซนติเมตร มีค่า 78.08, 76.63 และ 76.72 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แร่ที่เก็บได้มีแนวโน้มลดลง และที่การใช้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ที่ 15 และ 20 เซนติเมตร พบว่าไม่มีผลต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้เนื่องจากหัวแร่บางส่วนถูกกักไว้อยู่ภายในดาวคัมเมอร์และไม่สามารถไหลลงสู่รางกักเก็บได้สะดวก ทำให้ปริมาณแร่ที่เก็บได้ลดน้อยลง การเพิ่มระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ที่การใช้ความเข้มข้นของผสม 10 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ 10 เซนติเมตร พบว่าเพิ่มขึ้นจาก 5 ถึง 15 เซนติเมตร มีค่า 85.88, 79.93 และ 78.80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ปริมาณแร่ที่เก็บได้มีแนวโน้มลดน้อยลง เนื่องจากหัวแร่ลอยขึ้นได้ยากยิ่งขึ้นจากการเพิ่มระยะทางและเวลาที่ใช้ในการไหลออกมาจากดาวคัมเมอร์ ทำให้ปริมาณแร่ที่ลอยขึ้นมาสามารถเก็บได้น้อยลง

2. การทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการป้อนแร่และอัตราการไหลของอากาศที่ส่งผลต่อสมรรถนะของการลอยแร่

เป็นการทดสอบโดยศึกษาอิทธิพลของการป้อนแร่และอัตราการไหลของอากาศต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้ โดยจะศึกษาที่อิทธิพลของการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ และการเพิ่มอัตราการไหลของผสม ที่ส่งผลต่อการลอยแร่ โดยกำหนดความเข้มข้นของของผสมของของผสม 10 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ 10 เซนติเมตร และระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 5 เซนติเมตร และควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 20, 30 และ 40 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของผสม 10, 15 และ 20 ลิตรต่อนาที

จากตารางที่ 4.6 พบว่า เครื่องลอยแร่ที่ได้ออกแบบไว้สามารถเก็บแร่ได้ ประมาณ 65-85 เปอร์เซ็นต์ของแร่ที่ป้อนทั้งหมด การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ที่อัตราการไหลของผสม 10 ลิตรต่อนาที พบว่าเพิ่มขึ้นจาก 20 ถึง 40 ลิตรต่อนาที มีค่า 69.90, 77.64 และ 85.88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากทำให้เกิดปริมาณฟองอากาศได้มาก ฟองอากาศจะจับเม็ดแร่ที่แขวนลอยอยู่ภายในถังลอยลอยขึ้นมาได้ง่ายยิ่งขึ้น เนื่องจากมีปริมาณฟองอากาศที่มากพอ ส่วนการเพิ่มอัตราการไหลของผสม ความเข้มข้นของผสม 10 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง พบว่าเพิ่มขึ้นจาก 10 ถึง 20 ลิตรต่อนาที มีค่า 69.90, 68.68 และ 65.14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ปริมาณแร่ที่เก็บได้มี

แนวโน้มน้ำลดลง ซึ่งลักษณะคล้ายกับอิทธิพลของตัวแปรความเข้มข้นของผสม ปริมาณแร่และการกระจายตัวของเม็ดแร่ภายในถังลอยมีมากกว่าปริมาณฟองอากาศที่ใช้ในการลอย

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้

| Samples | Downcomer diameter (cm) | Immersion depth (cm) | %Solids (%) | Concentrate weight (wt%) |
|---------|----------------------------|-------------------------|----------------|-----------------------------|
| 1 | 10 | 5 | 10 | 85.88 |
| 2 | 10 | 5 | 15 | 79.55 |
| 3 | 10 | 5 | 20 | 76.18 |
| 4 | 10 | 10 | 10 | 79.93 |
| 5 | 10 | 10 | 15 | 77.43 |
| 6 | 10 | 10 | 20 | 76.31 |
| 7 | 10 | 15 | 10 | 78.08 |
| 8 | 10 | 15 | 15 | 77.06 |
| 9 | 10 | 15 | 20 | 76.09 |
| 10 | 15 | 5 | 10 | 82.86 |
| 11 | 15 | 5 | 15 | 77.73 |
| 12 | 15 | 5 | 20 | 75.66 |
| 13 | 15 | 10 | 10 | 78.47 |
| 14 | 15 | 10 | 15 | 76.00 |
| 15 | 15 | 10 | 20 | 74.51 |
| 16 | 15 | 15 | 10 | 76.63 |
| 17 | 15 | 15 | 15 | 74.49 |
| 18 | 15 | 15 | 20 | 72.66 |
| 19 | 20 | 5 | 10 | 82.11 |
| 20 | 20 | 5 | 15 | 77.80 |
| 21 | 20 | 5 | 20 | 72.61 |
| 22 | 20 | 10 | 10 | 78.36 |
| 23 | 20 | 10 | 15 | 75.90 |
| 24 | 20 | 10 | 20 | 72.55 |
| 25 | 20 | 15 | 10 | 76.72 |
| 26 | 20 | 15 | 15 | 74.03 |
| 27 | 20 | 15 | 20 | 71.03 |

ตารางที่ 4.6 ผลของอิทธิพลของอัตราการป้อนแร่และอัตราการไหลของอากาศต่อการลอยแร่แบบไรต์เกรดสูง

| Samples | Slurry flowrate (L/min) | Air flowrate (L/min) | Concentrate weight (wt%) |
|---------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 1 | 10 | 20 | 69.90 |
| 2 | 10 | 30 | 77.64 |
| 3 | 10 | 40 | 85.88 |
| 4 | 15 | 20 | 68.68 |
| 5 | 15 | 30 | 76.42 |
| 6 | 15 | 40 | 79.32 |
| 7 | 20 | 20 | 65.14 |
| 8 | 20 | 30 | 74.05 |
| 9 | 20 | 40 | 77.13 |

3. การทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรทั้งหมดที่ส่งผลกระทบต่อเกรดของหัวแร่

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อเกรดของหัวแร่แบบไรต์ ซึ่งจะนำตัวอย่างแร่แบบไรต์หลังลอยแร่ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์และเปรียบเทียบกับตัวอย่างแร่แบบไรต์ก่อนลอยแร่ ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการลอยแร่แบบไรต์เกรดสูงภายใต้ภาวะต่างๆ

| Samples | Chemical compositions (%wt) | | | | | | | |
|---------|--------------------------------|------------------|------------------|------|--------------------------------|------|-------------------|------|
| | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | K ₂ O | CaO | Fe ₂ O ₃ | SrO | BaSO ₄ | CHNO |
| S1 | 0.90 | 4.89 | 0.12 | 0.11 | 2.45 | 2.17 | 89.06 | 0.30 |
| S2 | 0.92 | 4.86 | 0.10 | 0.09 | 2.38 | 2.18 | 89.16 | 0.31 |
| S3 | 0.97 | 5.39 | 0.10 | 0.09 | 2.42 | 2.14 | 88.59 | 0.30 |
| S4 | 1.12 | 5.97 | 0.11 | 0.12 | 3.01 | 2.34 | 86.98 | 0.36 |
| S5 | 1.08 | 5.33 | 0.10 | 0.12 | 2.90 | 2.29 | 87.82 | 0.37 |
| S6 | 0.92 | 5.28 | 0.10 | 0.12 | 2.47 | 2.21 | 88.57 | 0.34 |
| S7 | 1.03 | 5.41 | 0.10 | 0.12 | 2.34 | 2.21 | 88.48 | 0.30 |
| S8 | 1.03 | 5.40 | 0.10 | 0.13 | 2.51 | 2.13 | 88.41 | 0.28 |
| S9 | 0.98 | 5.15 | 0.09 | 0.09 | 2.59 | 2.15 | 88.62 | 0.33 |
| S10 | 0.94 | 4.71 | 0.08 | 0.10 | 2.32 | 2.17 | 89.41 | 0.29 |
| S11 | 0.88 | 4.67 | 0.09 | 0.10 | 2.23 | 2.19 | 89.52 | 0.33 |

หมายเหตุ S1-S11 เป็นเงื่อนไขของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบดังตารางที่ 3.1

จากตารางที่ 4.8 เป็นข้อมูลของการตรวจแร่แบบไรต์หลังลอยแร่ในแต่ละเงื่อนไขที่กำหนด ผลปรากฏว่าหลังลอยแร่ทำให้แร่บริสุทธิ์ขึ้นเล็กน้อย สังเกตจากปริมาณแบเรียมซัลเฟต

(BaSO₄) ในตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดสูงมีค่า 85.90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถลอยให้มีความบริสุทธิ์เพิ่มสูงเป็น 89.52 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นลอยในภาวะที่ดีที่สุดในการทดลองโดยใช้ อัตราการไหลของอากาศ 30 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของผสม 10 ลิตรต่อนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ 10 เซนติเมตร และระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.8 สรุปผลการทดสอบอภิทธิพลของตัวแปรทั้งหมดที่ส่งผลกระทบต่อแร่ลอย

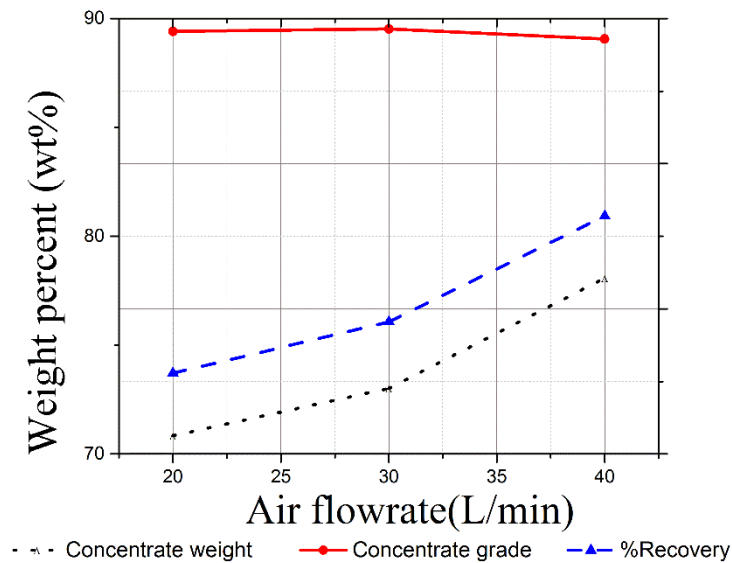
| Samples | Concentrate weight (%wt) | Concentrate grade (%wt) | %Recovery (%) |
|---------|--------------------------|-------------------------|---------------|
| S1 | 78.08 | 89.06 | 80.93 |
| S2 | 76.63 | 89.16 | 79.52 |
| S3 | 76.72 | 88.59 | 79.10 |
| S4 | 85.88 | 86.97 | 86.93 |
| S5 | 79.93 | 87.82 | 81.69 |
| S6 | 77.06 | 88.57 | 79.44 |
| S7 | 76.09 | 88.48 | 78.36 |
| S8 | 75.33 | 88.41 | 77.51 |
| S9 | 74.57 | 88.62 | 76.91 |
| S10 | 70.83 | 89.41 | 73.71 |
| S11 | 73.01 | 89.52 | 76.07 |

หมายเหตุ S1-S11 เป็นเงื่อนไขของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองดังตารางที่ 3.1

จากตารางที่ 4.8 เป็นผลสรุปจากการทดลองโดยแสดงน้ำหนักของแร่ลอยและค่าความบริสุทธิ์ของแบเรียมซัลเฟตเพื่อใช้ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ ซึ่งเมื่อนำไปพล็อตกราฟเพื่อหาแนวโน้มเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ของการลอยแร่ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.5-4.9

4.2.1 ผลของอัตราการไหลของอากาศ

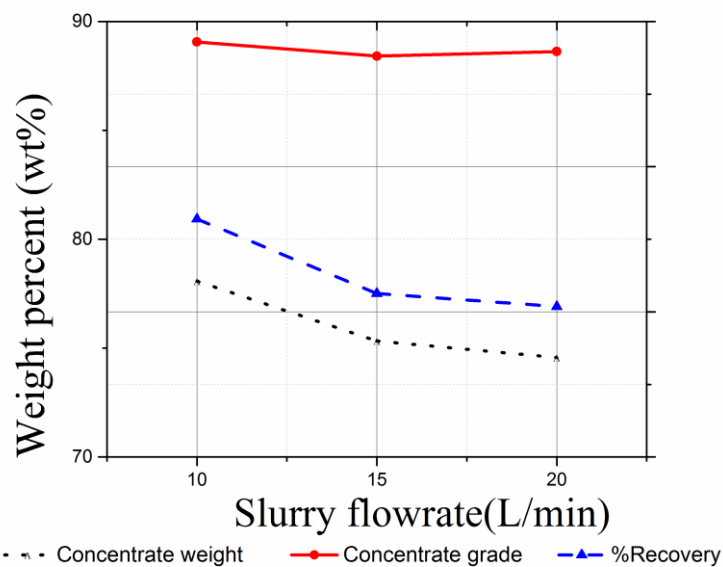
จากรูปที่ 4.5 พบว่าอัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้นจาก 20 ถึง 40 ลิตรต่อนาที ปริมาณแร่ที่เก็บได้ มีค่า 70.84, 73.01 และ 78.08 เปอร์เซ็นต์ และเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ได้ 73.71, 76.07 และ 80.93 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เกรดของหัวแร่มีค่า 89.41, 89.52 และ 89.06 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณฟองอากาศมีมากจนเกินไป ทำให้แร่สามารถเกาะติดกับฟองอากาศลอยขึ้นมาได้มากขึ้น [30, 48, 49]



รูปที่ 4.5 อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้

4.2.2 ผลของอัตราการไหลของผสม

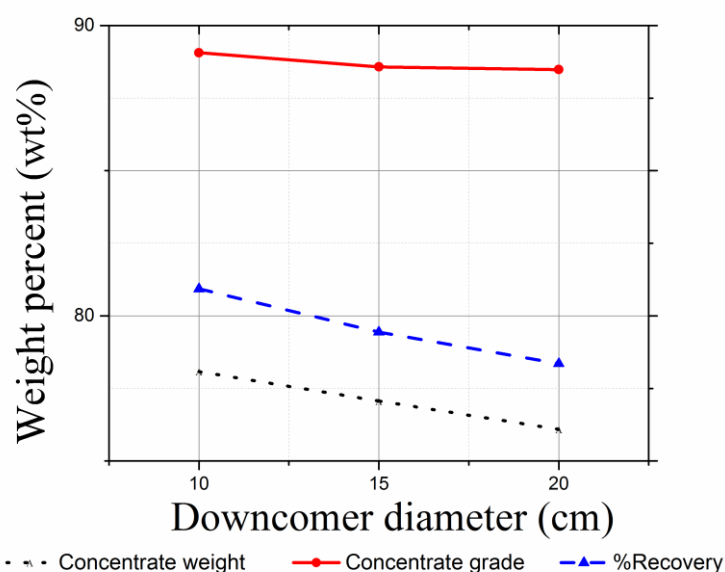
จากรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของผสม เพิ่มขึ้นจาก 10 ถึง 20 ลิตรต่อนาที ปริมาณแร่ที่เก็บได้ มีค่า 78.08, 75.33 และ 74.57 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับโดยมีแนวโน้มลดลงเกรดของหัวแร่ มีค่า 89.06, 88.41 และ 88.62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ มีค่า 80.93, 77.51 และ 76.91 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณแร่ที่แขวนลอยอยู่และการกระจายตัวของเม็ดแร่ภายในถังลอยมีมากกว่าปริมาณฟองอากาศที่ใช้ในการลอย จึงสามารถเก็บแร่ได้ลดน้อยลง [22]



รูปที่ 4.6 อิทธิพลของอัตราการไหลของผสมต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้

4.2.3 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์

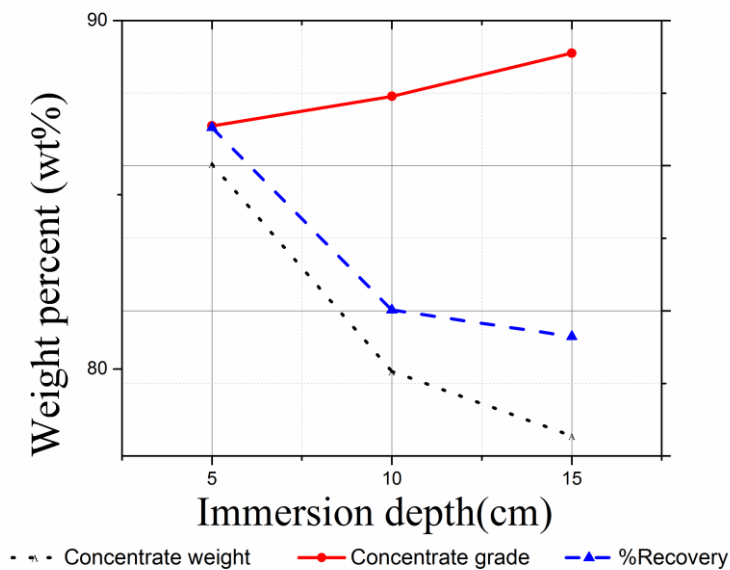
จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ เพิ่มขึ้นจาก 10 ถึง 20 เซนติเมตร ปริมาณแร่ที่เก็บได้ มีค่า 78.08, 77.06 และ 76.09 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่มีค่า 80.93, 79.44 และ 78.36 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มลดลง เกรดของหัวแร่ มีค่า 89.06, 88.57 และ 88.48 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ทำให้หัวแร่บางส่วนถูกกักไว้ อยู่ในดาวคัมเมอร์และไม่สามารถไหลลงสู่รางกักเก็บได้สะดวก นั้นเป็นสาเหตุให้ปริมาณแร่ที่เก็บได้ลดน้อยลง



รูปที่ 4.7 อิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้

4.2.4 ผลของระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์

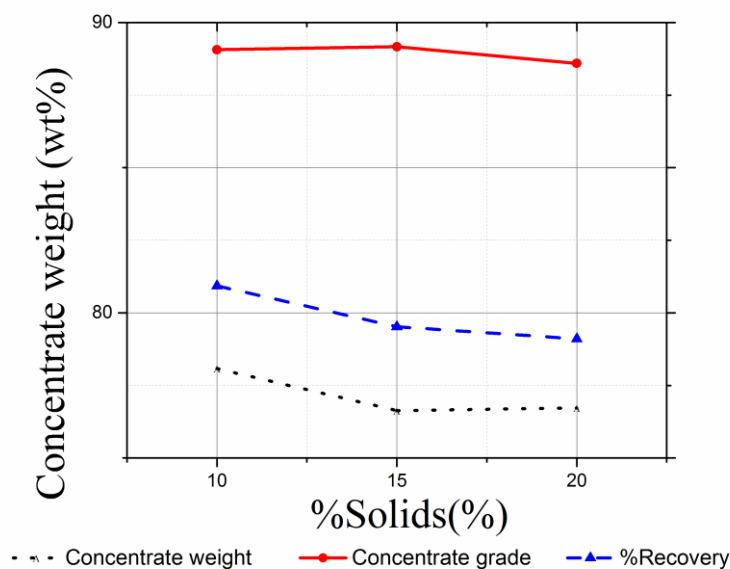
จากรูปที่ 4.8 พบว่าการเพิ่มระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ เพิ่มขึ้นจาก 5 ถึง 15 เซนติเมตร ปริมาณแร่ที่เก็บได้ มีค่า 85.88, 79.93 และ 77.06 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การเก็บแร่มีค่า 86.93, 81.69 และ 79.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มลดลง เกรดของหัวแร่ มีค่า 86.98, 87.82 และ 88.57 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการลอยแร่มากกว่าตัวแปรชนิดอื่นๆ โดยที่เมื่อเพิ่มระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ ปริมาณแร่ที่เก็บได้และเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่มีแนวโน้มลดลง แต่เกรดของหัวแร่กลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มระยะจุ่มทำให้แร่ที่ลอยลอยได้ยากยิ่งขึ้น ซึ่งทำให้แร่ที่เก็บได้และเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ต่ำลง แต่ในขณะที่ระยะจุ่มที่แร่จะไหลออกจากดาวคัมเมอร์ยาวนานขึ้น ทำให้มีโอกาสสัมผัสกับฟองอากาศมากยิ่งขึ้นเป็นผลให้การลอยมีประสิทธิภาพทำให้แร่ที่ลอยได้มีความบริสุทธิ์สูง [30]



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้

4.2.5 ความเข้มข้นของของผสม

จากรูปที่ 4.9 พบว่าความเข้มข้นของของผสม เพิ่มขึ้นจาก 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง เกรดของหัวแร่ มีค่า 89.06, 89.16 และ 88.59 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ มีค่า 80.93, 79.52 และ 76.91 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ปริมาณแร่ที่เก็บได้ มีค่า 78.08, 76.63 และ 76.72 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีอิทธิพลเหมือนกับตัวแปรอัตราการไหลของผสม คือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของของผสมมากขึ้น ทำให้ปริมาณแร่ที่เก็บได้และเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ได้มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณแร่ที่แขวนลอยอยู่และการกระจายตัวของเม็ดแร่ภายในถังลอยมีมากกว่าปริมาณฟองอากาศที่ใช้ในการลอย จึงสามารถเก็บแร่ได้ลดน้อยลง [22]



รูปที่ 4.9 อิทธิพลของความเข้มข้นของของผสมต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้

จากการทดสอบสมรรถนะเครื่องลอยแร่ด้วยแร่แบไรต์เกรดสูง ได้ข้อสรุปว่า ในการลอยแร่แบไรต์เกรดสูง ตัวแปรที่มีผลต่อเกรดของหัวแร่คือ ระยะเวลาจุ่ม โดยการเพิ่มระยะเวลาจุ่มส่งผลทำให้เกรดของหัวแร่เพิ่มสูงขึ้นแต่ปริมาณแร่ที่เก็บได้มีปริมาณลดน้อยลง ส่วนตัวแปรชนิดอื่นมีผลต่อเกรดของแร่เพียงเล็กน้อยเนื่องจากในเครื่องลอยแร่ที่ได้ออกแบบไว้มีกลไกช่วยล้างแร่ลอยจึงช่วยป้องกันการติดขึ้นมากับแร่และการใช้อัตรการไหลของผสมที่ 10 ถึง 20 ลิตรต่อนาทีและความเข้มข้นของผสมที่ 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ของแข็งนั้นมีความเหมาะสมในการลอยแร่ ดังนั้นเกรดของหัวแร่จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์มีผลต่อสมรรถนะเครื่องลอยแร่เล็กน้อย เนื่องจากเมื่อของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์กว้าง ทำให้แร่ที่ลอยขึ้นมาไม่สามารถไหลลงสู่รางกักเก็บได้สะดวก ในการเพิ่มความเข้มข้นของผสมและอัตราการป้อนแร่ทำให้ปริมาณแร่ที่เก็บได้จะมีปริมาณลดน้อยลง เนื่องจากปริมาณแร่และการกระจายตัวของเม็ดแร่ภายในถังลอยมีมากกว่าปริมาณฟองอากาศที่ใช้ในการลอยแร่ ส่วนอัตราการไหลของอากาศและระยะเวลาจุ่มจะมีผลต่อสมรรถนะเครื่องลอยแร่มาก อัตราการไหลของอากาศจะทำให้ปริมาณแร่ที่เก็บได้เพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มระยะเวลาจุ่มทำให้ปริมาณแร่ที่เก็บได้ลดลงแต่เวลาที่ใช้ในการลอยแร่จะมีมากขึ้น ทำให้มีโอกาสสัมผัสกับฟองอากาศมากขึ้น หัวแร่จึงมีเกรดสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการทดลองในการทดสอบสมรรถนะเครื่องลอยแร่ด้วยแร่แบไรต์เกรดต่ำ เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการแต่งแร่ให้มีความบริสุทธิ์สูง

4.3 ผลการทดลองลอยแร่จริงโดยใช้แร่แบไรต์เกรดต่ำ

ในการทดลองลอยแร่จริงโดยใช้ตัวอย่างแร่แบไรต์เกรดต่ำ โดยควบคุมตัวแปรในการทดสอบดังนี้ คือ ความเข้มข้นของของผสมให้เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ความกว้างของ ดาวคัมเมอร์ 10 เซนติเมตร และอัตราการไหลของผสมคงที่ที่ 10 ลิตรต่อนาที และควบคุม อัตราการไหล

ของอากาศให้อยู่ที่ 20, 30 และ 40 ลิตรต่อนาที และให้มีระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 5, 10 และ 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.9 ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ของการทดลองลอยแร่จริงด้วยแร่แบไรต์เกรดต่ำ

| Samples | AF (V/min) | ID (cm) | Chemical composition (%wt) | | | | | | |
|---------|---------------|------------|--------------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|------|-------------------|------|
| | | | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | K ₂ O | Fe ₂ O ₃ | SrO | BaSO ₄ | CHNO |
| Fed ore | - | - | 13.49 | 18.22 | 1.02 | 0.69 | 0.99 | 63.12 | 2.48 |
| 1 | 20 | | 11.00 | 13.45 | 0.65 | 0.51 | 1.05 | 71.19 | 2.14 |
| 2 | 30 | 5 | 11.54 | 13.93 | 0.71 | 0.51 | 1.01 | 69.89 | 2.41 |
| 3 | 40 | | 10.77 | 13.21 | 0.64 | 0.56 | 1.02 | 71.26 | 2.55 |
| 4 | 20 | | 10.88 | 14.71 | 0.72 | 0.52 | 0.98 | 70.03 | 2.17 |
| 5 | 30 | 10 | 10.23 | 12.92 | 0.62 | 0.42 | 1.03 | 72.82 | 1.96 |
| 6 | 40 | | 10.92 | 14.55 | 0.72 | 0.50 | 1.06 | 69.83 | 2.43 |
| 7 | 20 | | 9.53 | 11.38 | 0.57 | 0.41 | 1.20 | 75.21 | 1.70 |
| 8 | 30 | 15 | 5.40 | 6.55 | 0.29 | 0.21 | 1.32 | 85.06 | 1.17 |
| 9 | 40 | | 5.87 | 7.21 | 0.32 | 0.26 | 1.17 | 84.36 | 0.80 |

หมายเหตุ AF คือ Air flowrate และ ID คือ Immersion depth

จากตารางที่ 4.9 และ ตารางที่ 4.10 เป็นข้อมูลของการตรวจแร่แบไรต์หลังลอยแร่ และผลการทดสอบลอยแร่แบไรต์ โดยการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ เพิ่มขึ้นจาก 20 ถึง 40 ลิตร ต่อนาที ที่ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 15 เซนติเมตร ปริมาณแร่ที่เก็บได้ มีค่า 52.18, 54.14 และ 56.70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เกรดของหัวแร่ มีค่า 75.21, 85.06 และ 84.36 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเมื่อถึงจุดหนึ่งเกรดของหัวแร่กลับมีค่าลดลง และเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ มีค่า 62.17, 72.96 และ 75.78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ส่วนการเพิ่มระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ เพิ่มขึ้นจาก 5 ถึง 15 เซนติเมตร ที่อัตราการไหลของอากาศ 40 ลิตรต่อนาที ปริมาณแร่ที่เก็บได้ มีค่า 65.68, 60.44 และ 56.70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีแนวโน้มลดน้อยลง เกรดของหัวแร่ มีค่า 71.26, 69.83 และ 84.36 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ มีค่า 74.14, 66.86 และ 75.78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับเกรดของหัวแร่และปริมาณแร่ที่เก็บได้ เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ทำให้สามารถเก็บแร่ได้มากขึ้นแต่เกรดของหัวแร่กลับลดลง เป็นเพราะฟองอากาศจะลอย แร่มลทินติดขึ้นมาด้วย การเพิ่มระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์นั้นจะมีความสำคัญในการควบคุมเกรดของ หัวแร่ที่ลอยขึ้นมา แต่การใช้ระยะจุ่มที่ไม่เหมาะสมนอกจากจะสามารถเก็บแร่ได้น้อยลงและเกรดของ หัวแร่ก็จะต่ำตามไปด้วย ดังนั้นการควบคุมระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์และอัตราการไหลของอากาศที่ เหมาะสมในการลอยแร่ทำให้ลอยแร่ได้มีประสิทธิภาพ และตัวอย่างที่ 8 สามารถแต่งได้เกรดสูงสุด และมลทินต่างๆ น้อยที่สุด ปริมาณแบเรียมซัลเฟต 85.06 เปอร์เซ็นต์ ที่การลอยแร่ที่สภาวะการ ทดสอบที่มีปริมาณอัตราการไหลของฟองอากาศ 30 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของผสม 10 ลิตรต่อ

นาที่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ 10 เซนติเมตร และระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 15 เซนติเมตร ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการทดสอบสมรรถนะเครื่องลอยแร่ด้วยแร่แบไรต์เกรดสูง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณแบเรียมซัลเฟตก่อนลอยแร่ที่มีค่าเพียง 63.12 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.10 สรุปผลการทดสอบลอยแร่ด้วยแร่แบไรต์เกรดต่ำภายใต้ภาวะต่างๆ

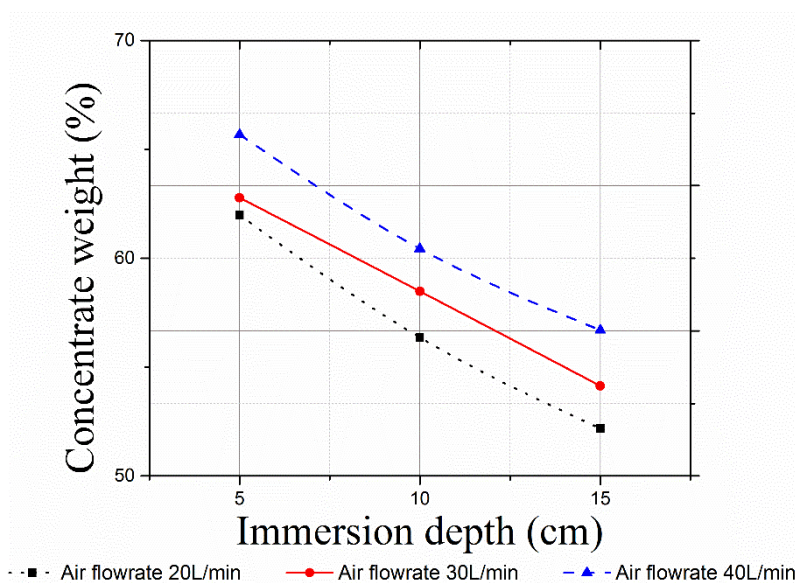
| Samples | AF (l/min) | ID (cm) | Concentrate weight (%wt) | Concentrate grade (%wt) | %Recovery (%) |
|---------|---------------|------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------|
| 1 | 20 | | 61.98 | 71.19 | 69.91 |
| 2 | 30 | 5 | 62.78 | 69.89 | 69.52 |
| 3 | 40 | | 65.68 | 71.26 | 74.14 |
| 4 | 20 | | 56.36 | 70.03 | 62.53 |
| 5 | 30 | 10 | 58.48 | 72.82 | 67.47 |
| 6 | 40 | | 60.44 | 69.83 | 66.86 |
| 7 | 20 | | 52.18 | 75.21 | 62.17 |
| 8 | 30 | 15 | 54.14 | 85.06 | 72.96 |
| 9 | 40 | | 56.70 | 84.36 | 75.78 |

หมายเหตุ AF คือ Air flowrate และ ID คือ Immersion depth, เกรดของแร่ป้อน 63.12 %BaSO₄

จากตารางที่ 4.10 แสดงน้ำหนักของแร่ลอยและค่าความบริสุทธิ์ของแบเรียมซัลเฟตที่ใช้ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ ซึ่งเมื่อนำไปเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและระยะจุ่ม แสดงดังรูปที่ 4.10-4.12

4.3.1 ผลของอัตราการไหลของอากาศและระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ที่มีผลต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้

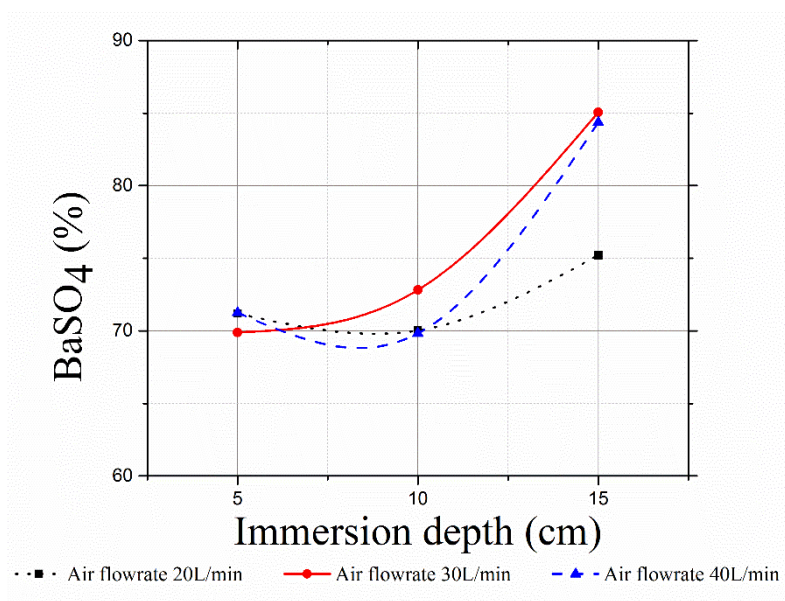
จากรูปที่ 4.10 อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มให้กับระบบและระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ที่มีผลต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณฟองอากาศ ที่ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 15 เซนติเมตร เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 20 ถึง 40 ลิตรต่อนาที ปริมาณแร่ที่เก็บได้มีค่า 52.18, 54.14 และ 56.70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ปริมาณแร่ที่เก็บได้จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ทำให้ปริมาณฟองอากาศมากพอที่จะลอยแร่ภายในถังลอย ดังนั้นแร่สามารถลอยออกมาได้ง่าย และที่อัตราการไหลของอากาศ 40 ลิตรต่อนาที การเพิ่มระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์เพิ่มจาก 5 ถึง 15 เซนติเมตร ปริมาณแร่ที่เก็บได้มีค่า 65.68, 60.44 และ 56.70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ปริมาณแร่ที่เก็บได้จะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ ทำให้แร่ลอยออกมาได้ยากขึ้น ดังนั้นแร่ที่ลอยออกมาได้จึงมีปริมาณน้อยลง [29]



รูปที่ 4.10 อิทธิพลของระยะจุ่มและอัตราการไหลของอากาศต่อปริมาณแร่ที่เก็บได้

4.3.2 ผลของอัตราการไหลของอากาศและระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ที่มีผลต่อเกรดของหัวแร่

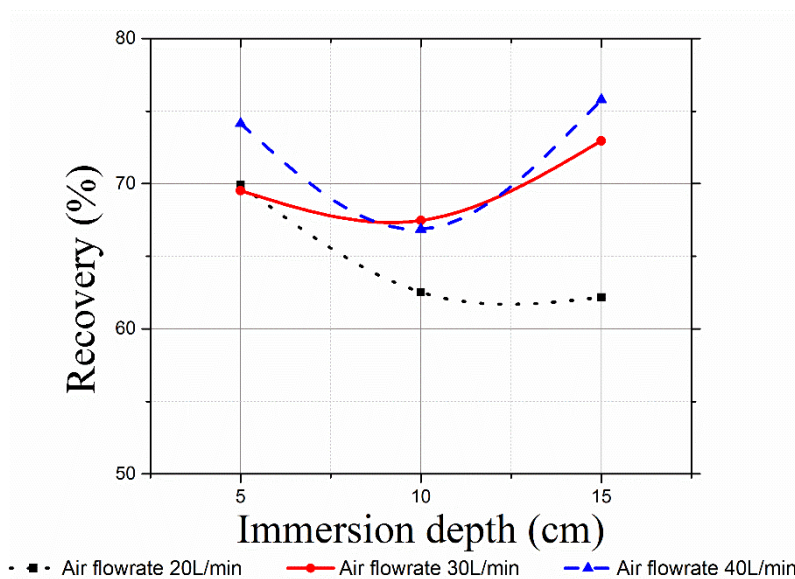
จากรูปที่ 4.11 อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ที่มีผลต่อเกรดของหัวแร่ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณฟองอากาศ ที่ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 15 เซนติเมตร เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 20 ถึง 40 ลิตรต่อนาที เกรดของหัวแร่ที่เก็บได้มีค่า 75.21, 85.06 และ 84.36 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ปริมาณแร่ที่เก็บได้จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง เกรดของหัวแร่กลับลดน้อยลง เนื่องจากซึ่งเกิดจากแร่ลทินที่เกาะติดขึ้นมากับฟองอากาศ แร่ลอยจึงเกิดการปนเปื้อนทำให้เกรดของหัวแร่ลดน้อยลงและที่อัตราการไหลของอากาศ 40 ลิตรต่อนาที การเพิ่มระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์จาก 5 ถึง 15 เซนติเมตร เกรดของหัวแร่ที่เก็บได้มีค่า 71.26, 69.83 และ 84.36 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เกรดของหัวแร่ที่เก็บได้จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่ที่ระยะจุ่ม 5 และ 10 เซนติเมตร เกรดของหัวแร่จะอยู่ที่ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงว่าการใช้ระยะจุ่มที่ 5 และ 10 เซนติเมตร มีผลต่อเกรดของหัวแร่น้อยมาก แต่ที่ระยะจุ่มที่ 15 เซนติเมตรเกรดของหัวแร่มีค่าสูงถึง 84.36 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.11 อิทธิพลของระยะจุ่มและอัตราการไหลของอากาศต่อเกรดของหัวแร่แบไรต์

4.3.3 ผลของอัตราการไหลของอากาศและระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่

จากรูปที่ 4.12 อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มให้กับระบบและระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณฟองอากาศ ที่ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 15 เซนติเมตร และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 20 ถึง 40 ลิตรต่อนาที ปริมาณแร่ที่เก็บได้มีค่า 62.17, 72.96 และ 75.78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การเก็บแร่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากมีปริมาณฟองอากาศมากเพียงพอต่อการลอยแร่ และที่อัตราการไหลของอากาศ 40 ลิตรต่อนาที การเพิ่มระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์จาก 5 ถึง 15 เซนติเมตร เปอร์เซ็นต์การเก็บแร่มีค่า 74.14, 66.86 และ 75.78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ที่ระยะจุ่ม 10 และ 15 เซนติเมตรมีเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ใกล้เคียงกันอยู่ที่ 75 เปอร์เซ็นต์ แต่ที่ระยะจุ่มที่ 10 เซนติเมตร มีเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ต่ำสุดเป็นผลมาจากที่ระยะจุ่ม 5 เซนติเมตร มีปริมาณแร่ที่เก็บได้สูงแต่มีเกรดของหัวแร่ต่ำ ในขณะที่ระยะจุ่ม 15 เซนติเมตร มีปริมาณแร่ที่เก็บได้ต่ำแต่มีเกรดของหัวแร่สูง และที่ระยะจุ่ม 10 เซนติเมตรที่มีปริมาณแร่ที่เก็บได้และเกรดของหัวแร่ต่ำทำให้เปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ต่ำ



รูปที่ 4.12 อิทธิพลของระยะจุ่มและอัตราการไหลของอากาศต่อเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่

อิทธิพลของการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ทำให้สามารถเก็บแร่ได้มากขึ้นแต่เกรดของหัวแร่กลับลดลง เนื่องจากฟองอากาศจะลอยแร่ลทินติดขึ้นมาด้วย การเพิ่มระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์นั้นจะมีความสำคัญในการควบคุมเกรดของหัวแร่ที่ลอยขึ้นมา แต่การใช้ระยะจุ่มที่ไม่เหมาะสมนอกจากจะสามารถเก็บแร่ได้น้อยลงและเกรดของหัวแร่ก็จะต่ำตามไปด้วย ดังนั้นการควบคุมระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์และอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมในการลอยแร่ทำให้ลอยแร่ได้มีประสิทธิภาพสูง

ในงานวิจัยการลอยแร่ในครั้งนี้ ผลที่ได้จากการลอยแร่ด้วยเครื่องลอยแร่ที่ออกแบบไว้ ซึ่งได้กำหนดให้ขนาดของฟองอากาศที่ใช้ในการลอยแร่คงที่ซึ่งอัตราการไหลของอากาศที่สามารถให้ฟองอากาศสูงสุดไม่เกิน 40 ลิตร ต่อนาที และระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์สูงสุด 15 เซนติเมตร ดังนั้นเพื่อให้ได้เกรดของหัวแร่และเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ได้สูงกวานี้ ควรมีการแปรค่าขนาดฟองอากาศ อัตราการไหลของอากาศที่มากขึ้น ตลอดจนแปรค่าระยะจุ่มให้ละเอียดขึ้น ประกอบกับการแปรค่าปริมาณน้ำยาละลายให้เหมาะสมสำหรับแร่แต่ละแหล่ง คาดว่าน่าจะได้ผลการลอยแร่ที่ดียิ่งขึ้น

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยฉบับนี้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องลอยแร่ที่ใช้ลม ถังลอยแร่ที่มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมมีความกว้างและความยาว 30 เซนติเมตร มีความสูง 40 เซนติเมตร มีอุปกรณ์การป้อนที่มีลักษณะแบบก้นหอย เพื่อทำให้เกิดการไหลตามแรงเหวี่ยงบริเวณผิวสัมผัสโค้งทำให้เพิ่มโอกาสที่จะทำให้ผิวของเม็ดแร่ผสมเข้ากันกับน้ำยาลอยแร่ได้ดียิ่งขึ้น มีการออกแบบอุปกรณ์ชะลอความเร็วของผสมมีลักษณะเป็นท่อตรงภายในมีครีบบนออกมาโดยใช้การจำลองการไหลด้วยโปรแกรมโซลิดเวิร์ค พบว่าทั้งความยาวท่อของอุปกรณ์ชะลอความเร็วของผสมของการป้อนแร่และความยาวของครีบบนที่ยื่นออกมาส่งผลต่อทิศทางการไหลของของไหล โดยที่ทั้งสองตัวแปรจะจำลองการไหลของผสมโดยปรับเปลี่ยนความยาวท่อและความยาวของครีบบนที่ยื่นออกมา เมื่อความยาวของท่อเพิ่มขึ้นจะทำให้ทิศทางการไหลของของไหลนั้นเคลื่อนเข้าสู่จุดกึ่งกลางของดาวคัมเมอร์มากขึ้น ในงานวิจัยในครั้งนี้ออกแบบให้ของผสมไหลติดกับผิวของดาวคัมเมอร์ เนื่องจากของผสมจะสามารถไหลลงด้วยความเร็วต่ำและสามารถทำให้การผสมกันระหว่างน้ำยาเคลือบฟองอากาศที่ใช้ในการลอยแร่และเม็ดแร่ได้มากยิ่งขึ้น จึงได้กำหนดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 10 เซนติเมตร ความยาวท่อ 2.5 เซนติเมตร ความยาวของครีบบนที่ยื่นออกมา 1 เซนติเมตรในงานวิจัยในครั้ง นี้ การจัดทำอุปกรณ์ปล่อยฟองอากาศได้ถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นแถวใช้วัสดุปล่อยฟองอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร เรียงกันเป็นแถว 5X5 แถวโดยมีระยะห่างจากกัน 5 เซนติเมตร จัดเรียงในลักษณะควมคุมพื้นที่สี่เหลี่ยมภายในถังลอย วัสดุปล่อยฟองอากาศเป็นวัสดุพูนทำมาจากเม็ดทรายขนาดเฉลี่ย 79.37 ไมโครเมตร ค่าเปอร์เซ็นต์ความพูนของวัสดุปล่อยฟองอากาศมีค่าเท่ากับ 24.75 เปอร์เซ็นต์ ในการป้อนแร่สามารถป้อนของผสมได้สูงสุด 45 ลิตรต่อนาที ปริมาณของฟองอากาศสูงสุด 50 ลิตรต่อนาที ต้นทุนที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องลอยแร่ชนิดนี้ ใช้ต้นทุนประมาณ 90,000 บาท

ในศึกษาการทำงานและประสิทธิภาพของเครื่องลอยแร่ โดยการทดลองอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่คาดว่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพต่อการลอยแร่ ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศที่ป้อนให้กับระบบ อัตราการป้อนของไหลของของผสมที่ป้อนให้กับระบบ ความเข้มข้นของของผสมที่ใช้ป้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ และระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ ซึ่งจากการศึกษาความสัมพันธ์และอิทธิพลของแต่ละตัวแปรได้ดังนี้

อัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มให้กับระบบ ทำให้สามารถเก็บแร่ได้เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณฟองอากาศในระบบมากเกินไปอาจทำให้แร่ลนที่แขวนลอยอยู่ในถังลอยสามารถลอยติดขึ้นมากับฟองอากาศ ซึ่งเป็นเหตุผลทำให้แร่ลอยเกิดปนเปื้อนส่งผลให้แร่ที่ลอยขึ้นมามีความบริสุทธิ์ต่ำลง

การเพิ่มอัตราการไหลของผสมในระบบมากขึ้น ส่งผลให้ทั้งปริมาณแร่ที่เก็บได้และเกรดของหัวแร่มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากในเครื่องลอยแร่ที่ได้ออกแบบไว้มีกลไกช่วยล้างแร่ลอยจึงช่วยป้องกันมลทินติดขึ้นมากับแร่และการใช้อัตราการไหลของผสมที่ 10 ถึง 20 ลิตรต่อนาทีนั้นมีความเหมาะสมในการลอยแร่ ดังนั้นเกรดของหัวแร่จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก และปริมาณแร่ที่แขวนลอยอยู่และการกระจายตัวของเม็ดแร่ภายในถังลอยมีมากกว่าปริมาณฟองอากาศที่ใช้ในการลอย ทำให้สามารถเก็บแร่ได้ลดน้อยลง

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณแร่ที่เก็บได้ เกรดของหัวแร่และเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์กว้าง ทำให้แร่ที่ลอยขึ้นมาไม่สามารถไหลลงสู่รางก็กเก็บได้สะดวก และยังทำให้แร่มลทินบางส่วนไหลออกมาตามน้ำด้วย ซึ่งทำให้เกรดของหัวแร่ลดน้อยลง

ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณแร่ที่เก็บได้จะมีแนวโน้มลดลง แต่เกรดของหัวแร่กลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจาก เมื่อเพิ่มระยะจุ่มทำให้หัวแร่ลอยได้ยาก เนื่องจากแร่ที่จะลอยขึ้นมีระยะทางในการลอยขึ้นมาสู่น้ำเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงใช้เวลาอยู่ในถังลอยยาวนานขึ้นทำให้มีโอกาสสัมผัสกับฟองอากาศมากยิ่งขึ้น ซึ่งทำให้แร่ที่ลอยได้มีความบริสุทธิ์สูง

ความเข้มข้นของของผสมมากขึ้น ทำให้ปริมาณแร่ที่เก็บได้ และเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของผสมที่ 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ของแข็งนั้นมีความเหมาะสมในการลอยแร่ ดังนั้นเกรดของหัวแร่จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก และปริมาณแร่ที่แขวนลอยอยู่และการกระจายตัวของเม็ดแร่ภายในถังลอยมีมากกว่าปริมาณฟองอากาศที่ใช้ในการลอย ทำให้สามารถเก็บแร่ได้ลดน้อยลง เนื่องจากปริมาณแร่ที่แขวนลอยอยู่และการกระจายตัวของเม็ดแร่ภายในถังลอยมีมากกว่าปริมาณฟองอากาศที่ใช้ในการลอย จึงสามารถเก็บแร่ได้ลดน้อยลง

ในการทดลองได้ใช้แปโรต์เกรดสูงที่มีปริมาณแบเรียมซิลเฟต 85.9 เปอร์เซ็นต์ และแปโรต์เกรดต่ำที่มีปริมาณแบเรียมซิลเฟต 63.12 เปอร์เซ็นต์ โดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

ในกระบวนการลอยแร่สามารถแต่งแปโรต์เกรดสูงให้มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นจาก 85.92 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 89.52 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้สภาวะการทดสอบ คือ อัตราการไหลของอากาศ 30 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของผสม 10 ลิตรต่อนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวคัมเมอร์ 10 เซนติเมตร ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ 15 เซนติเมตร และความเข้มข้นของของผสมมีความเข้มข้นที่ 10 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ซึ่งทำให้ทราบว่าตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการลอยแร่คือ ระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์และอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งได้นำผลไปใช้ในการทดลองลอยแร่แปโรต์เกรดต่ำ ทำให้แปโรต์มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นจาก 63.12 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 85.06 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) เครื่องลอยแร่ที่ได้ออกแบบและทำการทดลองในงานวิจัยครั้งนี้ เป็นลอยแร่รอบเดียวซึ่งเป็นการเก็บแร่หายาบ ซึ่งในการลอยแร่นั้นการทำความสะอาดแร่จำเป็นต้องลอยแร่ซ้ำและทำการลอยแร่แบบต่อเนื่องเพื่อเพิ่มทั้งปริมาณแร่ที่เก็บได้และเกรดของแร่ให้สูงขึ้น

2) เนื่องจากในการทดลองครั้งนี้ การใช้อัตราการไหลของอากาศสูงจะทำให้เปอร์เซ็นต์การเก็บแร่เพิ่มสูงขึ้นและการเพิ่มระยะจุ่มของดาวคัมเมอร์ทำให้เกรดของแร่สูงขึ้น ในการเก็บแร่หายาบอาจจะใช้อัตราการไหลของอากาศสูงและระยะจุ่มไม่ลึกมากนัก เพื่อให้สามารถเก็บหัวแร่ได้สูง และลดอัตราการไหลของอากาศและระยะจุ่มในส่วนของ ชุดการเก็บแร่ เซลล์ทำความสะอาดแร่ ซึ่งเป็นการแต่งให้ได้เกรดของหัวแร่เพิ่มสูงขึ้น

3) ในงานวิจัยนี้เน้นไปทางด้าน การออกแบบและสร้างเครื่องลอยแร่ ซึ่งการใช้ปริมาณสารเคมีในการลอยแร่นั้นก็มีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพในการลอยแร่ เช่น การใช้ปริมาณสารเคลือบผิวแร่ ปริมาณสารเคลือบฟอง ค่า pH สารเคมีที่ช่วยในการกัดแร่ลทินและสารช่วยให้การกระจายตัวของแร่ที่เหมาะสมและคุณภาพดีในการลอยแร่ สามารถทำให้ปริมาณแร่ที่เก็บได้และเกรดของหัวแร่เพิ่มสูงขึ้น

4) เครื่องลอยแร่ที่ได้ออกแบบ มีอัตราการไหลของอากาศตั้งแต่ 0 ถึง 50 ลิตรต่อ นาที ซึ่งในการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศสูงขึ้นอาจทำให้สามารถเพิ่มปริมาณของแร่ที่เก็บได้ซึ่งจะทำให้เปอร์เซ็นต์การเก็บแร่เพิ่มสูงขึ้น

5) ในการพิจารณาใช้เครื่องลอยแร่ในด้านอุตสาหกรรม โดยการเพิ่มปริมาณแร่ที่ต้องการในการผลิต สามารถทำได้โดยการเพิ่มขนาดของเครื่องลอยแร่ ซึ่งควรมีการศึกษาในเรื่องของอิทธิพลของอัตราส่วนของตัวแปรภายในเครื่องลอยแร่ (Dimensionless ratio) ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดาวคัมเมอร์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังลอย อัตราการป้อนแร่ต่ออัตราการป้อนฟองอากาศ และอัตราส่วนระหว่างระยะจุ่มกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังลอยแล้ว นอกจากนี้ควรทำการศึกษากลศาสตร์การลอยแร่ด้วย ซึ่งเป็นการศึกษาความเร็วหรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการลอยแร่ ได้แก่ ธรรมชาติและความเข้มข้นของแร่ที่ต้องการจะลอยให้มีความเหมาะสมกับปริมาณสารเคมี อุณหภูมิ อิทธิพลของสารเร่งปฏิกิริยา ระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพผิวแร่ ตลอดจนระยะเวลาที่ใช้ในการลอยแร่ และทำการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างเครื่องลอยแร่ที่ขยายขนาดแล้วและเครื่องลอยแร่ขนาดห้องปฏิบัติการ ทั้งในส่วนของปริมาณแร่ที่เก็บได้และเกรดของหัวแร่ ซึ่งอาจศึกษาจากวิธีการของ A. Yianatos' Method [50] โดยการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะการลอยแร่ระหว่างเครื่องลอยแร่ที่ขยายขนาดกับเครื่องลอยแร่ขนาดห้องปฏิบัติการ โดยการนำข้อมูลในด้านระยะเวลาที่ใช้ในการลอยแร่และเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการอย่างง่ายเพื่อสะดวกในการใช้งาน

บรรณานุกรม

- [1] G. J. Jameson, "A new concept in flotation column design," Column flotation, vol. 88, pp. 281-286, 1988.
- [2] T. Napier-Munn and B. A. Wills, Wills' mineral processing technology,"An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery," Elsevier, 2006.
- [3] S. Kawatra, "Flotation Fundamentals," Available: <http://www.chem.mtu.edu/>
- [4] R. R. Klimpel, "The influence of frother structure on industrial coal flotation," Society for mining, metallurgy, and exploration, Inc., Littleton, CO (United States), 1995.
- [5] เล็ก สีคอง และ สภาพร บุญล้อม, "การออกแบบและสร้างเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์," ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และโลหะวิทยา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2535.
- [6] I. Grewal, "Mineral processing introduction," Available: <http://met-solve.com/>
- [7] J. Finch, "Column flotation: a selected review—part IV: novel flotation devices," Minerals engineering, vol. 8, pp. 587-602, 1995.
- [8] S. Kawatra and T. Eisele, "Studies relating to removal of pyritic sulfur from coal by column flotation," Column flotation, vol. 88, pp. 213-220, 1988.
- [9] D. Wheeler, "Historical view of column flotation development," Column flotation, pp. 3-4.
- [10] K. V. Sastry, "Column flotation'88," Society of mining engineers of AIME, Littleton, CO, 1988.
- [11] J. Yianatos, J. Finch, and A. Laplante, "Selectivity in column flotation froths," International journal of mineral processing, vol. 23, pp. 279-292, 1988.
- [12] J. Yianatos, "Column flotation: modeling and technology," In proceedings of international colloquium: developments in froth flotation, vol. 2, pp. 1-30, 1989.
- [13] J. Yianatos, R. Espinosa-Gomez, J. Finch, A. Laplante, and G. Dobby, "Effect of column height on flotation column performance," Minerals and metallurgical process, pp. 11-14, 1988.
- [14] R. Espinosa-Gomez, J. Finch, and N. Johnson, "Column flotation of very fine particles," Minerals engineering, vol. 1, pp. 3-18, 1988.

- [15] R. Espinosa-Gomez, J. Finch, J. Yianatos, and G. Dobby, "Flotation column carrying capacity: particle size and density effects," *Minerals engineering*, vol. 1, pp. 77-79, 1988.
- [16] R. Espinosa-Gomez, J. Yianatos, J. Finch, and N. Johnson, "Carrying capacity limitations in flotation columns," *Column flotation*, vol. 88, pp. 143-148, 1988.
- [17] J. Yianatos, M. Marchese, S. Hutchinson, and R. Wiles, "Characterization of gas sparging media in the flotation column," In *processing of complex ores: proceedings of the international symposium on processing of complex ores*, Halifax , August 20-24, 1989, p. 359. Elsevier, 2013.
- [18] X. Manqiu and J. Finch, "Effect of sparger type and surface area on bubble size in a flotation column," *Can. metall. Q.*, vol. 28, pp. 1-6, 1989.
- [19] C. Feeley, C. Landolt, J. Miszczak, and W. Steenburgh, "Column flotation at INCO's matte separation plant," in *89th Annual General Meeting of CIM*, 1987.
- [20] G. Dobby and J. Finch, "Particle collection in columns—gas rate and bubble size effects," *Canadian metallurgical quarterly*, vol. 25, pp. 9-13, 1986.
- [21] G. Luttrell, A. Weber, G. Adel, and R. Yoon, "Microbubble flotation of fine coal," *Column flotation*, vol. 88, pp. 205-212, 1988.
- [22] D. Foot, J. McKay, and J. Huiatt, "Column flotation of chromite and fluorite ores," *Canadian metallurgical quarterly*, vol. 25, pp. 15-21, 1986.
- [23] G. Kosick, "Column flotation of galena at the polaris concentrator," In *20 th annual meeting of the canadian mineral processors*, pp. 366-383, 1988.
- [24] B. Parekh, J. Groppo, W. Stotts, and A. Bland, "Recovery of fine coal from preparation plant refuse using column flotation," *Column flotation*, vol. 88, pp. 227-233, 1988.
- [25] M. Misra and R. Harris, "Column flotation of fine coal from waste coal refuse," In *soc of mining engineers of AIME*, 1988.
- [26] G. Harbort, B. Jackson, and E. Manlapig, "Recent advances in Jameson flotation cell technology," *Minerals engineering*, vol. 7, pp. 319-332, 1994.
- [27] G. Harbort, J. Cowburn, and E. Manlapig, "Recovery interactions between the froth zone, pulp zone and downcomer within a Jameson cell," In *10th australian coal preparation conference*, Australian, 2004.
- [28] L. HUYNH, "Benefits of high performance flotation technology," *World coal*, vol. 19, pp. 16-20, 2010.
- [29] J. Cowburn, G. Harbort, E. Manlapig, and Z. Pokrajcic, "Improving the recovery of coarse coal particles in a Jameson cell," *Minerals engineering*, vol. 19, pp. 609-618, 2006.

- [30] H. Hacifazlioglu and I. Toroglu, "Optimization of design and operating parameters in a pilot scale Jameson cell for slime coal cleaning," Fuel processing technology, vol. 88, pp. 731-736, 2007.
- [31] A. Murphy, R. Honaker, E. Manlapig, D. Lee, and G. Harbort, "Breaking the boundaries of Jameson Cell capacity," MIM process technologies, Australia, 2000.
- [32] H. Hacifazlioglu and I. TOROĞLU, "Flotation of bituminous coal slimes in the cyclojet cell and a comparison of cyclojet cell and Jameson cell in terms of their flotation performance," Min. J, vol. 47, pp. 3-12, 2008.
- [33] H. Hacifazlioglu, I. Kursun, and M. Terzi, "Beneficiation of low-grade feldspar ore using cyclojet flotation cell, conventional cell and magnetic separator," Physicochemical problems of mineral processing, vol. 48, pp. 381-392, 2012.
- [34] ปิยนันท์ อำนาจสกุลฤทธิ, "คุณภาพแร่แบไรต์เพื่องานอุตสาหกรรม," สำนักวิเคราะห์วิจัยทรัพยากรธรณี ,กรมทรัพยากรธรณี, 2556.
- [35] G. Bhaskar Raju, S. Prabhakar, and S. S. Rao, "Studies on the beneficiation of barite," pp. 322-330, 2004.
- [36] R. Kulkarni and P. Somasundaran, "Flotation chemistry of hematite/oleate system," Colloids and surfaces, vol. 1, pp. 387-405, 1980.
- [37] G. B. Raju, S. Ratchambigai, M. A. Rao, N. Vasumathi, T. V. Kumar and S. Prabhakar., "Beneficiation of barite dumps by flotation column; Lab-scale studies to commercial production," Transactions of the indian institute of metals, vol. 69, pp. 75-81, 2016.
- [38] A. Vidyadhar, N. Kumari, and R. Bhagat, "Flotation of quartz and hematite: adsorption mechanism of mixed cationic/anionic collector systems," pp. 244-251, 2012.
- [39] เชษฐพงษ์ พุ่มเกลี้ยง และ สมโชค หยูเอียด , "การออกแบบและสร้างเครื่องลอยแร่แบบเจมสันเซลล์," ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และโลหวิทยา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2536.
- [40] เหวง อนันตกุล, "การศึกษาและทดสอบสมรรถนะของเครื่องลอยแร่แบบเจมสัน," ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และโลหวิทยา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2538.
- [41] นภิสพร มีมงคล, "โลหกรรมวัสดุผง (Powder Metallurgy)," เทคโนโลยีการศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2553.
- [42] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนพานนท์, " Sieve analysis", Available: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1303/sieve-analysis>

- [43] S. Corporation., "Particle size distribution calculation method", Available: <http://www.shimadzu.com/an/powder/support/practice/p01/lesson22.html>
- [44] T. Ervasti. , "Particle size distribution," Available: www.innopharmalabs.com
- [45] wikipremed. , "Bragg's law," Available: <http://wikipremed.com/>
- [46] สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย, "การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์," Available: <http://www.nst.or.th/article/article494/article49418.htm>
- [47] K. Marinakis and H. Shergold, "The mechanism of fatty acid adsorption in the presence of fluorite, calcite and barite," International journal of mineral processing, vol. 14, pp. 161-176, 1985.
- [48] M. Çınar, O. Şahbaz, F. Çınar, Ş. Kelebek, and B. Öteyaka, "Effect of jameson cell operating variables and design characteristics on quartz-dodecylamine flotation system," Minerals engineering, vol. 20, pp. 1391-1396, 2007.
- [49] A. Taşdemir, T. Taşdemir, and B. Öteyaka, "The effect of particle size and some operating parameters in the separation tank and the downcomer on the jameson cell recovery," Minerals engineering, vol. 20, pp. 1331-1336, 2007.
- [50] Yianatos, J. B., L. G. Bergh, and J. Aguilera, "Flotation scale up: use of separability curves," Minerals engineering, vol. 16(4), pp. 347-352, 2003.

ผลงานทางวิชาการที่ได้จากงานวิจัยนี้

บทความทางวิชาการที่ตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

N. Demeekul, L. Sikong, M. Masniyom, “Influence of Air Flow Rate and Immersion Depth of Designed Flotation Cell on Barite Beneficiation,” In Materials Science Forum, Vol. 867, pp. 66-70, 2016. (ฐาน SCOPUS)

อนุสิทธิบัตร (อยู่ระหว่างการดำเนินการ)

ชื่อการประดิษฐ์ เครื่องลอยแร่ ผู้ประดิษฐ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มนูญ มาศนิยม, รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง และ นาย นันทวัฒน์ เตมีย์กุล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตามเลขที่ใบคำขอ 1503001826.