บทที่ 2
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การพัฒนาเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์

Piere Boutin (1988) ได้ประดิษฐ์เครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ในปี ค.ศ. 1960 เพื่อใช้ในวงจรการลอยแร่ซิลิกาออกจากแร่เหล็กในขั้นตอนการลอยหยาบ (Rougher – Scavenger) ซึ่งให้ผลการลอยดีกว่าการลอยแร่แบบดั้งเดิม และจากนั้นได้มีการพัฒนาคอลัมน์ให้มีขนาดโตขึ้นจากเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว เป็น 12 นิ้ว แบบกึ่งควบคุมอัตโนมัติในการลอยสินแร่ของบริษัทในแคนาดา และต่อมานำมาใช้ลอยแร่ซัลไฟด์โดย Canadian Copper Producer ได้ทดลองอย่างได้ผลกับคอลัมน์เส้นผ่านศูนย์กลาง 18 นิ้วและได้นำไปทดลองลอยแร่ต่าง ๆ อย่างได้ผล แต่ก็ยังมีขนาดเล็กอยู่ถ้าเปรียบเทียบกับความต้องการในการผลิตขั้นอุตสาหกรรม จึงพยายามสร้างขนาดที่โตขึ้นโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถึง 72 นิ้วและในปี ค.ศ. 1980 บริษัท Mine Gaspe ได้นำคอลัมน์ขนาด 18 และ 36 นิ้ว ไปลอยแร่โมลิบดินัม ซึ่งเป็นแร่พลอยได้ในขั้นละเอียด และเป็นการนำเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ มาใช้ในอุตสาหกรรมเป็นครั้งแรก กล่าวคือ การเก็บแร่ได้ เพิ่มเป็น 2 เท่า เครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์เริ่มแพร่หลายมากขึ้นโดยนำไปทดลองใช้ในประเทศชิลี แอฟริกา และยุโรป

Wheeler D.A (1988) ได้สรุปข้อดีของคอลัมน์ไว้ดังนี้

1. สามารถควบคุมอัตโนมัติได้เต็มที่ ที่ภาวะการทำงานต่าง ๆ ข้อมูลที่บันทึก ได้จากการไหล จะทำให้สามารถควบคุมทางเคมีโดยผ่านโอเปอเรเตอร์ และคอมพิวเตอร์
2. ให้เกรดของหัวแร่และ การเก็บแร่ได้สูงขึ้น
3. ลอยแร่ได้เร็วกว่าเซลล์ลอยแร่
4. อากาศที่ใช้ประมาณ 10 – 15 % ของอากาศที่ใช้ในเซลล์ลอยแร่ และไม่มีส่วนเคลื่อนไหว ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำกว่า
5. ใช้พื้นที่แนวราบน้อยกว่า
6. ซ่อมบำรุงนาน ๆ ครั้ง เพราะวัสดุที่ใช้ทำคอลัมน์ทนทาน
7. ค่าใช้จ่ายในการลอยแร่ต่ำกว่าเซลล์ลอยแร่

G.S. Dobby และ J.A. Finch (1986) ได้เสนอวิธีการใช้ข้อมูลที่ได้จากการลอยแร่โดยคอลัมน์ขนาดห้องปฏิบัติการ สำหรับคอลัมน์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นที่ใช้ในอุตสาหกรรม จะใช้จลนศาสตร์โมเดล ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการสำหรับคอลัมน์ขนาดยาว 2 เมตร โดยนำผลที่ได้จากการศึกษาทดลองมาสร้างคอลัมน์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 นิ้ว ไปใช้ทดลองที่ Gibraltar Mines ในการลอยแร่ทองแดงขั้นสะอาด ต่อมา M.H. Moys และ J.A. Finch (1988) ได้นำเสนอวิธีควบคุมการลอยแร่แบบคอลัมน์โดยสรุปว่าการวัด Interface level และอัตราการไหลของ

น้ำทั้งหมด โดยวัดการกระจายของความร้อนใน froth phase จากการเติมน้ำล้างจะให้ผลที่แม่นยำ จุดประสงค์ของการควบคุมการลอยแร่ในเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์เพื่อให้เครื่องทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ตัวแปรที่จะต้องควบคุมได้แก่ ระดับของ interface level จะต้องเป็นค่าเฉพาะที่เหมาะสม (ถ้าสูงเกินไป cleaning volume และเกรดของหัวแร่จะลดลง แต่ถ้าต่ำเกินไป collecting volume และการเก็บแร่จะลดลง) อัตราการไหลของน้ำล้าง ขนาดของฟองอากาศ และอัตราการไหลของอากาศ

J.B. Yianatos และคณะ (1988) ได้ศึกษาการลอยแร่โมลิบดีนัมในขั้นสะอาดด้วยเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ขนาดอุตสาหกรรม โดยเน้นศึกษา selectivity ใน froth zone ด้วยโมเดล และสรุปว่า froth ลึกกว่า 1 เมตร จะทำให้ การเก็บแร่ได้สูงขึ้น 10 – 15 % แต่ถ้าน้อยกว่า 0.5 เมตร จะไม่มี selectivity เนื่องจากน้ำล้าง

ได้มีนักวิจัยหลายคน เสนอโมเดลทางคณิตศาสตร์ และใช้คอมพิวเตอร์ simulate ข้อมูลเพื่อควบคุมการทำงานของคอลัมน์อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ

ต่อมาเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ได้ถูกพัฒนาออกเป็นรูปร่างต่าง ๆ เพื่อให้สามารถใช้กับงานเฉพาะมากยิ่งขึ้น ทำให้ระบบของการลอยแร่โดยวิธีนี้ถูกพัฒนาไปพร้อม ๆ กัน David C. Yang (1988) ได้พัฒนาระบบลอยแร่แบบ froth bed ที่มีการไหลของน้ำ ซึ่งใช้ได้อย่างดีกับอนุภาคขนาดละเอียดในระบบนี้ทำให้อนุภาคและฟองอากาศเกาะติดกันใน packed bed ข้อดีของระบบนี้นอกจากจะใช้ได้กับแร่ละเอียดแล้วยังให้ผลผลิตที่สูง ต้องการพลังงานต่ำ ควบคุมง่ายและคาดว่าสามารถใช้ได้กับสินแร่หลายชนิด ตลอดจนถ่านหิน

J.X. Chneider และ G. Van Weert (1986) ได้ออกแบบ Hydrochem flotation column ที่มีลักษณะพิเศษที่มีการกวนในคอลัมน์ โดยระดับการกวนจะน้อยลงจากส่วนฐานสู่ส่วนบนของคอลัมน์ โดยมีแนวคิดให้เกิดฟองอากาศขนาดใหญ่ที่ส่วนบนของคอลัมน์และเล็กลงไปเมื่อลึกสู่ฐานของคอลัมน์ฟองอากาศขนาดเล็กประมาณ 0.5 – 1.5 มิลลิเมตร เมื่อป้อนของผสมเข้าสู่ส่วนบนของคอลัมน์ อนุภาคขนาดโตจะเกาะติดกับฟองอากาศซึ่งมีขนาดโต และสามารถลอยขึ้นสู่ด้านบนได้ในขณะที่ระดับลึกลงไป อนุภาคเล็กจะเกาะติดกับฟองอากาศที่เล็กกว่า ซึ่งเกิดจากการกวนที่ความเร็วสูงกว่า

G. Bhaskar Raju และคณะ (1988) ได้ดัดแปลงคอลัมน์ โดยใช้เทคนิคของ electrolytic cell โดยมี electrode คือ เหล็กกล้า เป็น anode และทองแดงเป็น cathode ประกอบที่ส่วนล่างของคอลัมน์ เพื่อก่อกำเนิดฟองอากาศที่มีขนาดเล็กมาก สำหรับลอยแร่ที่มีขนาดละเอียดมาก และได้ศึกษาเปรียบเทียบกับคอลัมน์ทั่วไป นอกจากนั้นยังได้ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ในการลอยแร่ด้วยต่อมา Graeme J.Jameson (1988) แห่งมหาวิทยาลัยนิวคาสเซิล รัฐนิวเซาท์เวลส์ ประเทศออสเตรเลีย ร่วมกับบริษัท Mount Isa Mines Limited ได้ประดิษฐ์เครื่องมือที่ใช้ในการลอยแร่แบบใหม่ขึ้นในปี ค.ศ. 1987 ซึ่งดัดแปลงการทำงานมาจากคอลัมน์ โดยสร้างให้มีความสูงลดลงเพื่อที่จะลดปริมาตร

ของ collection zone ให้น้อยลงที่สุดและ เครื่องลอยแร่แบบนี้เรียกว่า เครื่องลอยแร่แบบ Jameson cell ซึ่งมีลักษณะที่สำคัญคือ ของผสมป้อนและฟองอากาศสัมผัสและผสมกันในส่วนบนของ downcomer ส่วนผสมของอากาศและน้ำไหลลงสู่ด้านล่างเพื่อดันลอยตัวขึ้นในคอลัมน์ซึ่งมีข้อได้เปรียบต่อคอลัมน์แบบเก่าคือจะลดขนาดของพื้นที่การติดตั้งเพราะว่าส่วนสูงลดลง ในขณะที่ขนาดเท่าเดิม จากการทดลองใช้ Jameson cell ซึ่งมี downcomer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เมตร สูง 1.1 เมตร ในการลอยแร่ตะกั่วสังกะสี ที่ Mount Isa Mines Limited เปรียบเทียบกับ คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตร สูง 10 เมตร ปรากฏว่าหัวแร่แต่งได้มีคุณภาพ ใกล้เคียงกัน แต่ residence time ใน Jameson cell เพียง 10 วินาที ขณะที่ในคอลัมน์นานถึง 10 นาที ในปัจจุบัน Jameson cell ก็เป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมแต่งแร่มาก

Finch และ Dobby (1990) ได้คิดค้นโมเดลในการเพิ่มความจุในการลอยแร่ โดยได้สมการ $C_a = Kd_{80}Pp$ เมื่อ C_a คือ capacity ของเครื่องลอยแร่ K คือค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง d_{80} คือ 80% passing ของแร่ลอย Pp คือความหนาแน่นของแร่ ซึ่งจากสมการจะทำให้การออกแบบมีแนวทางไปตามที่คาดหวังได้

หลักการทำงานของ Jameson cell คือการสูบของผสมลงสู่ downcomer (รูปที่ 2.1) ภายใต้ความดันสูงซึ่งของผสมจะผ่าน cleaning zone และผ่าน nozzle โดยจะมีความเร็วของของผสมสูง Evans และคณะ (1994) ได้รายงานว่า อากาศที่เข้า downcomer จะเข้าส่วนบนเหนือ nozzle ซึ่งเป็นอากาศในบรรยากาศ ความดันสุญญากาศใน downcomer จะดูดอากาศภายนอกเข้ามาสู่ Jameson cell และ Readett (1992) ได้กล่าวว่า เมื่อน้ำที่ผ่าน nozzle มาลงสู่น้ำใน Jameson cell อากาศจะผสมกับน้ำในถังโดยเกิดแรงเฉือนและความปั่นป่วนขึ้น ทำให้ของผสมเกิดเป็นฟองอากาศละเอียดมาก (<0.4 mm) ใช้ในการลอยแร่ได้

2.1.1 การลอยแร่โดยใช้เครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์

ในปี ค.ศ. 1981 ได้มีการนำคอลัมน์มาใช้ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่เป็นครั้งแรกในการลอยแร่โมลิบดีนัมขั้นสะอาด และพบว่าได้ผลดีเยี่ยม กล่าวคือ คอลัมน์จำนวน 3 ตัว สามารถใช้แทนเซลล์ลอยแร่ได้ถึง 13 เซลล์ อีกทั้งยังได้หัวแร่ที่มีเกรดและการเก็บแร่ได้ สูงกว่าการลอยแร่ด้วยเซลล์ลอยแร่อีกด้วย

J.D. Mckay และคณะ (1986) แห่ง U.S Bureau of Mines ได้ใช้คอลัมน์ลอยสินแร่โครไมต์ (Montana Chromite ore) ศึกษาเปรียบเทียบกับเซลล์ลอยแร่ปรากฏว่า การลอยแร่ด้วยคอลัมน์ให้ผลดีกว่าเซลล์ลอยแร่กล่าวคือ ทั้งเกรดและการเก็บแร่ได้สูงกว่า ในขณะที่ความหนาแน่นของผสมในคอลัมน์ใช้ได้ตั้งแต่ 3 – 20 % solid และใช้เวลาน้อยกว่า

G.A. Kosick และคณะ (1988) ได้ใช้เครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์ 2 ตัว แทนเซลล์ลอยแร่เพื่อแก้ปัญหาต่าง ๆ ในการลอยแร่กาลีนาที่ Polaris Concentrator ในรัฐ Quebec ประเทศ

แคนาดาโดยสามารถลอยแร่ได้เกรดและการเก็บแร่ได้สูงขึ้น กล่าวคือ เกรดของหัวแร่เพิ่มขึ้นจากเดิม 76 % เป็น 79.3 % โดยการเก็บแร่ได้เพิ่มขึ้นจาก 91 % เป็น 91.3 %

K.N. (Mani) Subramanian และคณะ (1988) ได้เสนอใช้คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เมตร ในการลอยแร่ทอง (Gold bearing sulfide) จากมลทินที่ Habour Lights Mine ใน Leonora, Westem Australia อย่างได้ผล

G.H Luttrel และคณะ (1989) ได้ศึกษาไฮโดรไดนามิคส์ระหว่างอนุภาคละเอียดและฟองอากาศ ขนาดเล็ก (ขนาด 70 – 250 ไมครอน) และพบว่าขนาดของฟองอากาศและ residence time จะมีผลต่อสมรรถนะของคอลัมน์ การลดขนาดของฟองอากาศสามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์การเก็บแร่ได้ S.K.Kawatra และ T.C. Eisele (1989) ได้ใช้คอลัมน์ลอยไพไรต์ออกจากถ่านหินถึง 70 – 85 % ด้วย การเก็บแร่ได้ 80 – 85 % แต่สำหรับไพไรต์ละเอียดที่ฝังกระจายอยู่ในถ่านหิน จะใช้วิธีกำจัดด้วยแบคทีเรีย B.K. Parekh และคณะ (1989) ได้ใช้คอลัมน์ขนาดห้องปฏิบัติการ เพื่อเก็บถ่านหินจากน้ำทิ้งของโรงแต่งถ่านหินที่ Kentucky ซึ่งส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่า 100 เมช และมีเถ้าสูงถึง 30 – 35% โดยสามารถลดให้เหลือเพียง 2 – 8 % ด้วยการเก็บแร่ได้เกือบ 90 % ในทำนองเดียวกัน M. Misra และ R. Harris (1989) ที่สามารถลอยถ่านหินโดยมีเกรดสูงขึ้นกล่าว คือ เถ้าลดลงเหลือ 10 % จาก 60 % ด้วยการเก็บแร่ได้มากกว่า 80 % K.S. Narasimhan และคณะ (1989) ได้เปรียบเทียบการลอยถ่านหินโดยใช้คอลัมน์ขนาด 500 ตันต่อชั่วโมงกับเซลล์ลอยแร่ Yosry A. Attia และ Shaning Yu (1989) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการแยก coal flocs ด้วยคอลัมน์ ได้สรุปว่าการทำการก่อกลุ่มของเถ้าละเอียดนั้นจะเป็นประโยชน์ต่อการลอยแร่ด้วยคอลัมน์

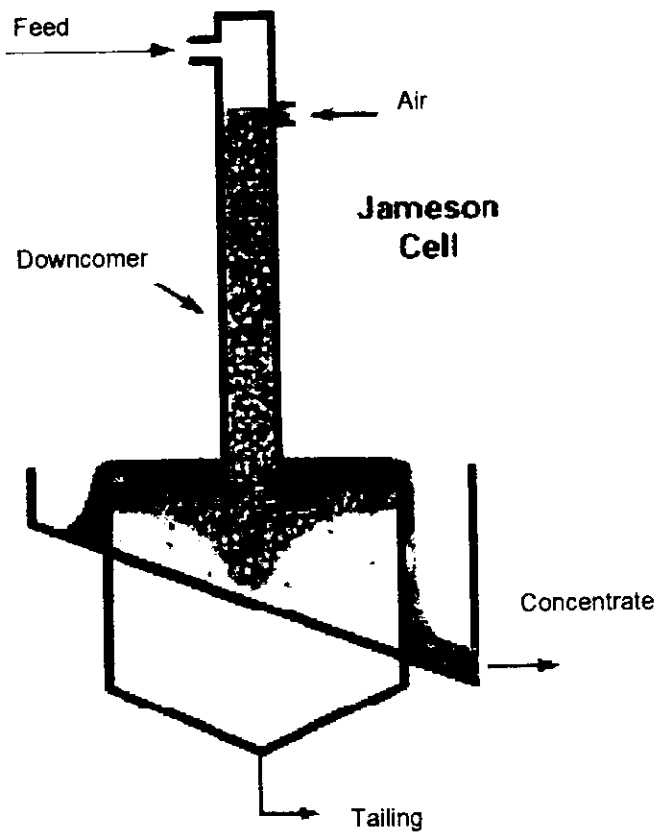
2.2 การพัฒนาการลอยแร่ด้วยเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์สั้นโดยภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เชษฐพงษ์ พุ่มเกลี้ยงและสมโชค หยูเอียด (2536) ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์สั้น ขนาดโรงประลองขึ้นมาเพื่อศึกษาหลักการทำงาน โดยได้ทำการออกแบบและสร้างเซลล์เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 50x50x65 เซนติเมตร ทำด้วยแผ่นอะคริลิกใส สามารถปรับเปลี่ยนความลึกของ downcomer ได้ มีความจุของเซลล์ 2–3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และได้ทำการศึกษาหลักการทำงาน โดยทำการศึกษาตัวแปรที่น่าสนใจคือ ความลึกของ downcomer ปริมาณน้ำล้างและอัตราการป้อนแร่ ผลการศึกษาโดยการทดลองลอยแร่ไพไรต์ปนทรายที่สภาวะการลอยแร่ที่เหมาะสม ปรากฏว่าให้เกรดของหัวแร่สูง 81.68 % และเก็บแร่ได้ 59.56 %

เชวง อนันตกูล (2538) ได้ทำการศึกษาและทดสอบสมรรถนะของเครื่องลอยแร่ตัวเดิม โดยได้ทำการศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือ ความลึกของ downcomer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ downcomer และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ผลการศึกษาโดยการทดลองลอยแร่ไพไรต์ปน

ทรายที่สภาวะการลอยแร่ที่เหมาะสม ปรากฏว่าได้เกรดของหัวแร่สูงถึง 90.8 % โดยที่เก็บแร่ได้ 72.4 %

ชาญวิทย์ จันทะมณี (2543) ได้ทำการศึกษาและทดสอบสมรรถนะของเครื่องลอยแร่ที่สร้างขึ้นใหม่ โดยได้ทำการศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือ ความลึกของ downcomer และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ downcomer ผลการศึกษาโดยการทดลองลอยแร่ไพไรต์ปนทรายที่สภาวะการลอยแร่ที่เหมาะสม ปรากฏว่าได้เกรดของหัวแร่สูงถึง 75.33 % โดยที่เก็บแร่ได้ 66.14 %



รูปที่ 2.1 เครื่องลอยแร่แบบคอลัมน์สั้น (Evans และคณะ : 1994)