

อิทธิพลของความเอียงต่อการเก็บกู้สินแร่ดีบุกด้วยโต๊ะสั่นแบบแห้ง

สิวโรตม์ ศิริลักษณ์¹

บทคัดย่อ

โต๊ะสั่นแบบแห้ง อาศัยหลักการความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะสามารถแต่งสินแร่ดีบุกออกจากทรายได้ตามกระบวนการทางวิศวกรรมเหมืองแร่ โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ การเคลื่อนไหวที่สัมพันธ์กับความเอียงของโต๊ะ แรงเสียดทานระหว่างเม็ดแร่และผิวของโต๊ะ แนวลูกชิ้น กระบวนการSegregation ซึ่งผลการทดลองพบว่าความเอียงตามแนวแกนX,Y = 3,5 องศาเป็นการทดลองที่ให้ผลเปอร์เซ็นต์การเก็บกู้สินแร่ดีบุกมากที่สุด ผลการทดลอง ถูกนำมาสร้างแบบจำลองสมการปริภูมิสามมิติ เพื่อใช้ในการสร้างแผนผังกระบวนการการไหลของโปรแกรมต่อไปในอนาคต โดยจะพัฒนาให้สามารถใช้พร้อมกันหลายชุด สำหรับการแต่งแร่ดีบุกที่มีปริมาณมากขึ้น โดยจะควบคุมโต๊ะสั่นด้วยระบบแม่เหล็กไฟฟ้าในท้ายที่สุด

คำสำคัญ : โต๊ะสั่น ดีบุก แต่งแร่ เหมืองแร่

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50300

ผู้ติดต่อ, อีเมล: siwarote@hotmail.com

Effects of Slope on Dry Shaking Table to Recovery Tin Ore

Siwarote Siriluck¹

Abstract

Dry shaking table is used to separate tin ore from sand. In this research, the segregation effect, friction between ore and surface, the table angles, riffle levels are observed. The results showed that the X-Y angles at 3,5 degrees gave the best of %tin ore recovery. All experiments were simulated by mathematic model in 3D equations to use in the program flowchart. The future work, the multiple shaking tables with various interval size levels will test on the pilot scale. And the electromagnetic system will be used to adjust slope on the dry shaking tables.

Keywords : Shaking table, Tin ore, mineral processing, mining

¹ Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Amphur Muang, Chiangmai 50300²

* Corresponding author, E-mail: siwarote@hotmail.com

1. บทนำ

การแต่งแร่ด้วยความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ เป็นการแต่งแร่ด้วยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ประวัติศาสตร์อันยาวนานในการร่อนทองตามแม่น้ำ ตั้งแต่ 2700 ปีก่อนคริสตกาล ในยุคอียิปต์โบราณพบว่ามีหลักฐานถึง 250 หน่วยงานแต่งแร่ที่แถบอาราเบีย-นูเบียในประเทศอียิปต์ [1] ส่วนแร่อื่นๆ เช่นการแยกตะกั่วเงินออกจากทราย มีหลักฐานในยุค 475-400 ปีก่อนคริสตกาลในเมืองแอตติกา(ปัจจุบันแถบกรุงเอเธนส์)ในกรีซ [2]การแต่งแร่จะทำการบดแร่ให้มีขนาดที่เหมาะสม ประโยชน์เพื่อให้หัวแร่และหางแร่แยกออกจากกัน ขนาดของแร่แยกออกจากกัน(Liberated size) ถ้าแร่หลุดออกจากกันที่ขนาดหยาบนับเป็นเรื่องที่ดีเพราะจะประหยัดค่าใช้จ่ายในการบดได้ [3]

ทฤษฎีการแต่งแร่ด้วยความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ (Gravity Concentration) โดยแร่ที่ต่างชนิดกันเมื่อมีขนาดเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน แร่ที่มีความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) สูงจะมีน้ำหนักมากกว่าแร่ที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ ด้วยน้ำหนักที่แตกต่างกันนี้สามารถนำไปแยกแร่เหล่านั้นออกจากกันได้ แต่การที่จะแยกแร่ให้ได้ผลดีนั้นขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะของแร่ต่างๆด้วย [4] กล่าวคือ ถ้าอนุภาคของแร่สองชนิดซึ่งมีความถ่วงจำเพาะแตกต่างกันมากและขนาดอนุภาคใหญ่ ก็สามารถแต่งแร่ออกจากกันได้ง่าย

ในงานวิจัยนี้จะทำการแต่งแร่ด้วยโต๊ะสั่นแต่งแร่แบบแห้งที่ยกตัวด้วยแรงแม่เหล็ก(Maglev) โดยแร่ที่นำมาแต่งนั้นเป็นแร่สาธิตขนาด 0.25 มิลลิเมตร หัวแร่ใช้สินแร่ดิบบุกออกไซด์ หางแร่ใช้ทรายแม่น้ำวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อหาความสัมพันธ์ของ

ความสามารถในการเก็บกู้แร่กับความเอียงของโต๊ะตามแนวแกน X- Y การศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการใช้งานของโต๊ะสั่นแต่งแร่แรงเสียดทานต่ำขนาดสาธิต โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ศึกษาจะถูกใช้งานต่อไป เพื่อเป็นพื้นฐานของการควบคุมการทำงานด้วยระบบอัตโนมัติของการแต่งแร่ด้วยโต๊ะสั่นพร้อมกันหลายชุด รูปแบบระบบขนาดใหญ่ของเงื่อนไขการแต่งแร่จะถูกเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบซึ่งจะถูกนำมาออกแบบสร้างชุดควบคุมอัตโนมัติ(Automatic controller) ด้วยเครือข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network : ANN)

2. ความรู้เกี่ยวกับทฤษฎี สมการที่เกี่ยวข้อง และเครื่องจักร

เกณฑ์พิจารณาความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ (Concentration Criterion, C.C.) เป็นสูตรคำนวณอย่างง่ายที่ถูกใช้เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการแต่งแร่ด้วยวิธีของสมบัติที่แตกต่างกันของความถ่วงจำเพาะระหว่างหัวแร่และหางแร่ในตัวอย่างต่างๆ [5] ดังสมการที่ (1)

$$CC = \frac{S.G.H.M. - S.G.Me.}{S.G.Me. - S.G.Le.} \quad (1)$$

โดย

$S.G.H.M.$ คือ ความถ่วงจำเพาะของแร่หนัก ในงานวิจัยนี้คือ สินแร่ดิบบุกมีช่วง ถ.พ.6.8-7.1 [6]

$S.G.L.M.$ คือ ความถ่วงจำเพาะของแร่เบา ใน

งานวิจัยนี้คือ ทราชม้วนน้ำมีช่วง ถ.พ.2.5-2.75 [7]

S.G._{M.c} คือ ความถ่วงจำเพาะของตัวกลาง โดยปกติถ้าเป็นน้ำ คือ ถ.พ.เป็น 1.00 ส่วนในงานวิจัยชิ้นนี้ตัวกลางคืออากาศซึ่ง ถ.พ.เป็น 0.00121 [8]

ส่วนค่าของ C.C. เป็นการบ่งบอกว่าอยู่ในขอบเขตของการแต่งแร่ด้วยความถ่วงจำเพาะได้หรือไม่ ค่าของ C.C. มีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เส้นขอบเขตของความเป็นไปได้ในการแต่งแร่ด้วยวิธีความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ [9]

ค่า C.C. ที่มากกว่า 2.5 หรือมากกว่านั้น สามารถแยกแร่ได้ตั้งแต่ขนาดใหญ่มจนถึงขนาด 74 ไมครอน (200 Mesh)

ค่า C.C. ระหว่าง 2.5 – 1.75 สามารถแยกแร่ได้ตั้งแต่ขนาดใหญ่มจนถึงเล็กที่สุดที่สามารถแยกได้ที่ขนาด 149 ไมครอน (100 Mesh)

ค่า C.C. ระหว่าง 1.75 – 1.50 สามารถแยกแร่ได้ตั้งแต่ขนาดใหญ่มจนถึงเล็กที่สุดที่สามารถแยกได้ที่ขนาด 1.68 มิลลิเมตร (10 Mesh)

ค่า C.C. ระหว่าง 1.50 – 1.25 สามารถแยกแร่ได้ตั้งแต่ขนาดใหญ่มจนถึงเล็กที่สุดที่สามารถแยกได้ที่ขนาด 6.35 มิลลิเมตร (0.25 นิ้ว)

ค่า C.C. น้อยกว่า 1.25 ไม่สมควรแต่งแร่ด้วยคุณสมบัติความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ ควรใช้คุณสมบัติอื่นเพื่อแต่งแร่ [9]

จากการคำนวณจะได้ค่า C.C.ของการแต่งแร่ดิบในตัวกลางน้ำอยู่ในช่วง 4.07 – 3.31 และ C.C.ของการแต่งแร่ดิบในตัวกลางที่เป็นอากาศอยู่ในช่วง 2.84 – 2.47 ซึ่งสามารถแต่งแร่ได้โดยความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ

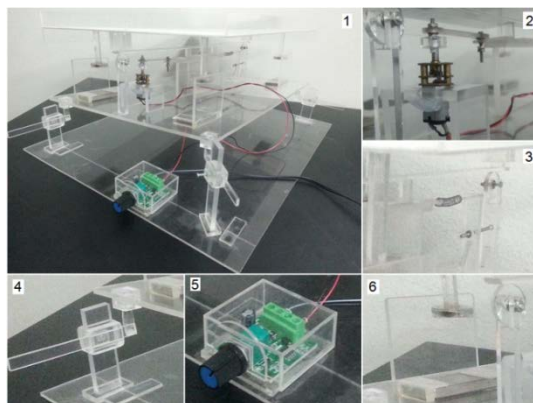
เครื่องมือแต่งแร่เริ่มจากจานร่อนแร่ในน้ำด้วยแรงคน ในยุคต้นทองที่แคลิฟอร์เนีย ในปี 1848 ได้ทำให้การแยกทองออกจากทรายด้วยวิธีการแยกด้วยความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะถูกพัฒนาจนมีการจดสิทธิบัตรมากมายเกี่ยวกับการแต่งแร่ทองคำโดยไม่ใช้น้ำ ได้ะแต่งแร่แบบแห้งมีการพัฒนาจาก ของ Mcdonald, 1983 [10] จนมาถึงของ Pneumatic shaking table ของ Thomson ในปี 1978 ซึ่งเป็นการพัฒนาให้เกิด Oliver gravity separator ในปัจจุบัน [11] ซึ่งใช้แยกแร่ทองคำ

นอกจากมลทินที่มีความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะมาก และมีความสม่ำเสมอของเม็ดแร่

การรีไซเคิลวัสดุอุตสาหกรรมที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันจากกระบวนการที่มีมาตรฐานการผลิตอย่างการแยกพลาสติก Polypropylene, PP ความถ่วงจำเพาะ 0.9 g/cm³ ออกจาก Polyvinyl chloride, PVC ความถ่วงจำเพาะ 1.4 g/cm³ ได้ถูกทดลองแต่งด้วย โต๊ะลม(Air Tabling) ที่มีลมพัดด้านล่างผ่านรูพรุนของตัวโต๊ะสั่น ซึ่งรูนี้จะมีขนาดเล็กกว่า วัสดุเม็ดพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง ที่ 2.38-3.36 mm โดย คีอจิบา และ พูจิตะในปี 2005 [12] นักวิจัยจากมหาวิทยาลัยโคเกียะ ผลการทดลองออกมาพบว่า ที่ช่องวัสดุเบาพบพลาสติกPP มากกว่า90% และในช่องวัสดุหนัก จะพบ พลาสติกPVC มากกว่า 90% ซึ่งหากเอาไปแยกด้วยตัวกลางน้ำที่มี ถ.พ. 1.0 อาจจะเป็นอีกวิธี แต่ตัวสดุนั้น จะเปียกหลังกระบวนการ

3. เครื่องมือและแร่ที่ใช้ในการทดลอง

โต๊ะแต่งแร่สร้างจาก Poly-Methyl-methacrylate (PMMA) เป็น Thermo-Setting Plastic ขาโต๊ะทั้งสี่ลอยอยู่บนอากาศด้วยอำนาจของแม่เหล็กถาวรชนิดไดนามิก โดยหันขั้วเดียวกันเข้าหากันที่ส่วนที่เคลื่อนที่ได้ (Dynamic Desk, DD.) และส่วนที่ไม่ขยับคือส่วนฐาน (Static Base, SB.) การปรับองศาของโต๊ะปรับที่การตั้งขาในส่วนของ SB. การขยับของส่วน DD. ใช้มอเตอร์กระแสตรงขับโดยทำระบบข้อเหวี่ยงและสปริงโดยใช้ความถี่ที่ 300 รอบต่อนาที ช่วงชักที่ 6 มิลลิเมตร



รูปที่ 2 โต๊ะสั่นแต่งแร่แบบแห้งที่ใช้ในการทดลอง 1) โต๊ะแต่งแร่ขนาดทดลองแสดงส่วนประกอบที่สำคัญ 2) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12V ที่ติดตั้งกับข้อเหวี่ยง 3) สปริงที่ใช้ดึงช่วงชัก 4) แท่นปรับระดับส่วนสูงได้ ซึ่งสามารถปรับได้อิสระทั้ง 4 มุมของโต๊ะสั่น 5) วงจรปรับรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อใช้ในการปรับความเร็วรอบที่เหมาะสม 6) แท่นแม่เหล็กชนิดสี่เหลี่ยมที่ติดตั้งส่วน SB. และแม่เหล็กถาวรชนิดกลมแบบที่ติดตั้งที่ส่วน DD.

แร่ที่ใช้ขนาด -40+60 เมช โดยหัวแร่คือ สีนแร่ดิบจาก ประเทศเมียนมาร์ ส่วนหางแร่คือทรายแม่น้ำ

4. ขอบเขตการทดลอง วิธีการทดลอง การคำนวณร้อยละของการเก็บกู้สินแร่ดิบในหัวแร่ การวิเคราะห์หัวแร่และหางแร่

หัวแร่และหางแร่ มาจากคนละแหล่ง ไม่มีแร่ลูกคาบ ไม่มีฝุ่นแร่ เม็ดแร่ทุกเม็ดเป็นอิสระต่อกัน เม็ดแร่ทุกชนิดมีขนาดใกล้เคียงกันจากการคัดขนาดตะแกรง

นำหัวแร่ทั้งหมดบรรจุลงในปริมาตรทรงกระบอก เติมแร่จนเต็มปริมาตร เกลี่ย ชั่งน้ำหนัก ทำการทดลองซ้ำจนได้ ค่าการกระจายตัวของข้อมูลน้อยกว่า 3% จากนั้นทำกับหางแร่เช่นกัน จากนั้นแร่ป้อนที่ใช้ในการเริ่มต้นมีสัดส่วน หัวแร่:หางแร่ เป็น 50:50 % โดยน้ำหนัก

การคำนวณร้อยละของการเก็บกู้สินแร่ดิบในหัวแร่ คัดจากสมการที่ 2

$$\%Recovery = \frac{C \times c}{F \times f} \times 100 \quad (2)$$

โดย

C คือ น้ำหนักของหัวแร่ , กรัม

c คือ เปอร์เซ็นต์เกรดของสินแร่ดิบในหัวแร่หลังแต่งได้ , เปอร์เซ็นต์

F คือ น้ำหนักของแร่ป้อน โดยในงานวิจัยนี้ผสมขึ้นมาใช้ครั้งละ 10.00 กรัมต่อการทดลอง

f คือ เปอร์เซ็นต์เกรดของสินแร่ดิบในแร่ป้อนก่อนทำการแต่งแร่ ในงานวิจัยนี้ผสมขึ้นมาได้เป็น 50%

5. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองในงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโตะสั้นในพารามิเตอร์ของความลาดเอียงที่มีผลในการแต่งแร่ จากนั้นจะนำไปสู่การหาผลสรุปของตรรกะการเลือกพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการแต่งแร่ด้วยโตะสั้นเพื่อใช้ในการออกแบบอัลกอริทึม เพื่อนำมาออกแบบสร้างชุดควบคุมอัตโนมัติ (Automatic controller) ด้วยเครือข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network : ANN) ซึ่งแบ่งออกเป็น ส่วนที่ 1 คือ ผลการทดลองจากโตะสั้น ส่วนที่ 2 ผลการทดลองจากเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ Non-linear regression method ด้วยชุดอัลกอริทึมของ Generalized Reduced Gradient

Algorithm (GRG Algorithm) และ ส่วนที่ 3 แผนผังกระบวนการการไหลของโปรแกรม (Program flow chart) เมื่อจะใช้งานจริงต่อไปกับแร่อื่น ๆ กับโตะสั้น

5.1 ผลการทดลองจากการแต่งแร่ด้วยโตะสั้น

หลังการเตรียมแร่ โดยจะทำการป้อนแร่ทั้งหมด 10 กรัม เข้าสู่เครื่องแต่งแร่ด้วยโตะสั้นเพื่อหามุมลาดเอียงที่เหมาะสมที่สุด โดยมุมเอียงตามแกน X ที่ 1 2 3 และ 4 องศา และแกน Y ที่ 3 4 5 และ 6 องศา จากนั้นส่วนของหัวแร่และส่วนของหางแร่จะถูกนำมาชั่งน้ำหนัก โดยส่วนของหัวแร่จะนำมาเทียบค่า%สินแร่ดิบในหัวแร่ ด้วยสมการความสัมพันธ์ของน้ำหนักในหนึ่งหน่วยปริมาตรที่สัมพันธ์กับ %ความบริสุทธิ์ของสินแร่ดิบในตัวอย่าง สุดท้ายจะนำไปเข้าสู่กระบวนการประมวลผล เพื่อคำนวณหา%การเก็บกู้สินแร่ดิบ ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดได้แสดงไว้ดังนี้ ผลของน้ำหนักหัวแร่ที่มุมเอียงตามแกน X-Y ที่ (1,3) (1,4) (1,5) (1,6) (2,3) (2,4) (2,5) (2,6) (3,3) (3,4) (3,5) (3,6) (4,3) (4,4) (4,5) และ (4,6) แสดงในตารางที่ 1

น้ำหนักของหัวแร่ที่มากที่สุดพบว่า มุมเอียงตามแนวแกน X-Y เป็น 3 และ 5 องศา น้ำหนักของหัวแร่ที่น้อยที่สุดพบว่ามุมเอียงตามแนวแกน X-Y เป็น 1 และ 3 องศา โดยค่าเฉลี่ยของน้ำหนักหัวแร่เป็น 4.39 กรัม ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 0.82 กรัม สัมประสิทธิ์ของความผันแปรของข้อมูลเป็น 18.8% ชุดข้อมูลนี้จะมีจุดสูงสุดที่ 5.33 กรัมแล้วมีแนวโน้มที่ลดลง

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักหัวแร่ในหน่วยกรัม ที่มุมเอียงตามแนวแกน X-Y ที่ค่าต่างๆ

น้ำหนักหัวแร่(g)	X=1°	X=2°	X=3°	X=4°
Y=3°	2.82	3.14	4.21	4.87
Y=4°	4.52	4.35	5.15	4.96
Y=5°	4.82	5.11	5.33	4.96
Y=6°	3.06	3.42	4.61	4.93

%สินแร่ดีบุกในหัวแร่ที่มากที่สุดพบว่า มุมเอียงตามแนวแกน X-Y เป็น 2 และ 4 องศา น้ำหนักของหัวแร่ที่น้อยที่สุดพบว่ามุมเอียงตามแนวแกน X-Y เป็น 1 และ 6 องศา โดยค่าเฉลี่ยของ%สินแร่ดีบุกในหัวแร่เป็น 65.69 % ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 6.01 % สัมประสิทธิ์ของความผันแปรของข้อมูลเป็น 9.15% โดยชุดข้อมูลนี้มีค่าน้อยที่สุดที่ตำแหน่งความลาดเอียงX-Y ที่ 1,6 องศา จากนั้นก็มีค่ามากในทุกๆพิสัยที่ทำการทดลอง

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ของ%สินแร่ดีบุกในหัวแร่ที่มุมเอียงตามแนวแกน X-Y ที่ค่าต่างๆ

%สินแร่ดีบุกในหัวแร่	X=1°	X=2°	X=3°	X=4°
Y=3°	62.0 6	62.1	72.3 3	66.9 4
Y=4°	64.3 8	73.7 6	67.0 9	66.6 3
Y=5°	66.7	68.5 2	71.4 8	68.8 5
Y=6°	52.4 8	52.7 8	67.6 8	67.2 4

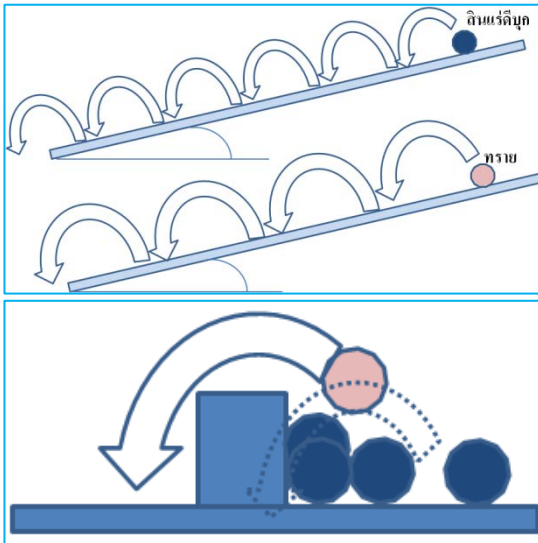
%การเก็บกู้สินแร่ดีบุกที่มากที่สุดพบว่า มุมเอียงตามแนวแกน X-Y เป็น 3 และ 5 องศา น้ำหนักของหัวแร่ที่น้อยที่สุดพบว่ามุมเอียงตามแนวแกน X-Y เป็น 1 และ 6

องศา โดยค่าเฉลี่ยของ%การเก็บกู้สินแร่ดีบุกเป็น 58.4 % ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 14.2 % สัมประสิทธิ์ของความผันแปรของข้อมูลเป็น 24.4% โดยชุดข้อมูลนี้มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยบริเวณตอนกลางของข้อมูลส่วนรอบนอกนั้นจะมีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยโดยรอบในการทดลอง

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ของ%การเก็บกู้สินแร่ดีบุกที่มุมเอียงตามแนวแกน X-Y ที่ค่าต่างๆ

%การเก็บกู้สินแร่ดีบุก	X=1°	X=2°	X=3°	X=4°
Y=3°	35.0	39.2	60.9	65.2
Y=4°	58.2	64.2	69.1	66.1
Y=5°	64.3	70.0	76.2	68.3
Y=6°	32.1	36.1	62.4	66.3

จากการสังเกตถึงการเคลื่อนที่ของเม็ดแร่จากการทดลองจะพบว่า การเคลื่อนที่ของโต๊ะสั่นแบบไปกลับจะทำให้เกิดการชนระหว่างโต๊ะกับเม็ดแร่ ซึ่งเม็ดแร่ขนาดเดียวกันจะได้รับการถ่ายโอนปริมาณโมเมนตัมต่อพื้นที่จากโต๊ะสั่นในปริมาณที่เท่ากัน แต่การที่เม็ดสินแร่ดีบุกที่มีถ.พ.มากกว่าเม็ดแร่ทราย ซึ่งทั้งสองมีปริมาตรที่เท่ากันจึงทำให้มวลต่ออนุภาคของเม็ดสินแร่ดีบุกมีค่ามากกว่าทรายโดยการทดลองนี้จะมีความแตกต่างประมาณ 2.5 เท่า จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ความเร็วของเม็ดแร่ที่เป็นความเร็วหลังการรับการถ่ายโอนโมเมนตัมจากโต๊ะที่ส่งมาให้สินแร่ดีบุกนั้นที่มีทิศทางออกจากพื้นผิวของโต๊ะสั่นแล้วกระโดดออกจากพื้นผิวโต๊ะได้น้อยกว่ากรณีของเม็ดแร่ทราย และเมื่อตกกระทบสู่พื้นโต๊ะอีกครั้งก็จะมีรูปแบบเดิมไปดังที่กล่าวมาจนกระทั่งตกสุดท้ายออกจากพื้นที่ของโต๊ะสั่นข้างต้นซึ่งอธิบายได้ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 บน) การเคลื่อนไหวยของเม็ดแร่ดิบและเม็ดแร่ทรายบนพื้น โตะสั่นที่มีความเอียง (ล่าง) สิ้นแร่ดิบที่ถูกดูดขึ้นซึ่งสะสมตัวและการเคลื่อนตัวของเม็ดทรายที่เหยียบสิ้นแร่ดิบข้ามแนวลูกขึ้นได้

เมื่อทราบกลไกของการเคลื่อนไหวยของเม็ดแร่นั้นจึงได้ออกแบบลูกขึ้นที่มีลักษณะทางการเดินทางของเม็ดแร่นั้นเอง เพราะประโยชน์ของลูกขึ้นโดยแท้ที่จริงคือการสร้างการหน่วงขวางดักเม็ดแร่ที่มีถ.สูงให้ไม่สามารถกระโดดข้ามลูกขึ้นได้แล้วติดอยู่ที่ลูกขึ้นและสะสมตัวอยู่บริเวณนั้น ในขณะที่เดียวกันความสูงของมันต้องต่ำกว่าระดับการกระโดดข้ามของเม็ดทรายเช่นกัน ดังนั้นองศาของแกน X ในการทดลองนี้จะเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์ดังนี้ เมื่อความลาดเอียงมากเวลาที่ใช้ในการเดินทางของเม็ดแร่สุดทางโตะตามแนวแกน X จะน้อยตามไปด้วย เมื่อความลาดเอียงมากลูกขึ้นที่ถูกออกแบบไว้จะมีความสามารถป้องกันการกระโดดข้ามของสิ้นแร่ดิบได้น้อย แต่ถ้าความลาดเอียง

น้อยโอกาสของเม็ดทรายก็จะมีโอกาสที่กระโดดไม่ข้ามลูกขึ้นด้วย เช่นเดียวกับความเอียงของโตะสั่นตามแนว Y ที่มีความสัมพันธ์กับการคายหัวแร่ที่ถูกดักไว้ตามแนวของลูกขึ้นด้วย ถ้ามีการสะสมตัวของแร่ดิบที่ฐานลูกขึ้นก็จะทำให้เม็ดแร่อื่นเหยียบเม็ดแร่ที่ติดบริเวณฐานแล้วกระโดดข้ามพื้นไปได้ ซึ่งผลการทดลองที่ให้ค่า % การเก็บกู้สิ้นแร่ดิบที่มีความมากที่สุดจึงต้องมีมุมเอียงที่มีค่าเหมาะสมต่อ การถ่ายเทปริมาณ โม่เมนตัมต่อพื้นที่ของโตะที่ให้กับเม็ดแร่เพื่อให้มีความเร็วต้นที่เหมาะสมของการเคลื่อนที่ของสิ้นแร่ดิบและเม็ดแร่ทราย ส่วนพารามิเตอร์อื่นเช่นความสูงของลูกขึ้น ความเร็วรอบไปกลับในการเคลื่อนที่ของแผ่นพื้น โตะสั่น ความยาวความกว้างของโตะสั่นจะเป็นตัวแปรควบคุม

5.2 การวิเคราะห์วงจรรอบกระบวนการของการแต่งแร่ด้วยโตะสั่นแยกแร่แบบแห้ง

ผลที่ดีที่สุดได้ทำการทดลองอีกครั้งพร้อมทั้งบันทึกวิดีโอโดยใช้แกน X, Y = 3, 5 องศา ถู้นำมาวิเคราะห์รูปแบบของการทดลองของการคัดแยกแร่ตามเวลาสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อทำการป้อนแร่แล้วที่มุมขาบนของโตะสั่น แร่ที่มีความบริสุทธิ์ 50% สิ้นแร่ดิบสีดำเลื่อมซึ่งปนกับทรายเม็ดสีน้ำตาลทั้งสิ้น 10 กรัม จะถูกสั่นในขณะนี้จะเห็นว่ามีส่วนกระโดดข้ามลูกขึ้นลำดับที่ 1 ไปแล้วซึ่งโดยมากเป็นเม็ดทราย ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การทดลองแต่งแร่ด้วยโต๊ะสั่น ที่วินาทีที่ 1

ในวินาทีที่ 4 เม็ดทรายจะสามารถกระโดดข้ามลูกชั้นที่ 1 ได้โดยที่สินแร่ดิบยังคงติดอยู่ที่ลูกชั้นที่ 1 เป็นจำนวนมากโดยส่วนใหญ่ ที่ลูกชั้นที่ 1 นี้กำลังเกิด Segregation effect คือ กระบวนการแยกชั้นของอนุภาคที่มีความแตกต่างกันของความถ่วงจำเพาะเมื่อเกิดการสั่นแนวราบแบบไปกลับอย่างต่อเนื่อง โดยสินแร่ดิบจะแทรกซึมตัวลงไป ในปริมาตรรวม (Percolation mechanism) อยู่ด้านล่างแล้วทำให้เม็ดทรายเสมือนว่าดันขยับพาตัวเองขึ้นมาอยู่ชั้นด้านบน (Convection mechanism) และการตั้งกองหลังลูกชั้นที่ 1 ก็จะแผ่ฐานออกไปด้านล่างซึ่งจะขึ้นกับชนิดของแร่ด้วยโดยมีปัจจัยของมุมเสถียรภาพตั้งกองของวัสดุ (Angle of repose) เข้ามาเกี่ยวข้องอีกด้วย [13] ทั้งยังมีการขยับตัวและมุมเอียงในทิศแกน Y พาอนุภาคลงไปด้านล่างอีกด้วยดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การทดลองแต่งแร่ด้วยโต๊ะสั่น ที่วินาทีที่ 4

ในวินาทีที่ 8 เม็ดทรายจำนวนหนึ่งก็ยังเดินทางแบบกระโดดเข้าสู่แนวของลูกชั้นที่ 3 ส่วนเม็ดทรายจำนวนที่มากกว่าได้กระโดดข้ามมายังแนวลูกชั้นที่ 2 แล้ว บริเวณด้านหลังของแนวลูกชั้นที่ 1 การตั้งกองที่สูงเกินไปทำให้สินแร่ดิบกระโดดข้ามมายังลูกชั้นแนวที่ 2 ได้ ในช่วงกระบวนการนี้ที่ด้านหลังลูกชั้นก็จะพบ Segregation

effect เป็นผลให้พบทรายเสมือนว่าดันตัวขึ้นมาเป็นชั้นบนสุดแล้วก็จะกระโดดไปที่แนวลูกชั้นถัดไป [13] อย่างไรก็ตามพบว่ามีสินแร่ดิบจำนวนมากประปรายเหยียบฐานสินแร่ดิบด้านล่างกระโดดมาเช่นกัน ในเรื่องของการตั้งกองสูงและอัตราการกระจายตัวของอนุภาคบนพื้นผิวโต๊ะหลังลูกชั้นนั้นมีปัจจัยเรื่องของ แรงเสียดทาน (Friction force) ที่เพิ่มมากขึ้นจากการซ้อนทับของชั้นแร่แล้วกดทับ และปัจจัยของค่าคงที่ของแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวโต๊ะกับผิวของแร่ (Coefficient friction) โดยในขณะนี้พบว่า ที่หลังแนวลูกชั้นที่ 4 และ 5 มีเม็ดทรายจำนวนหนึ่งตกพื้นที่หน้าโต๊ะลงไปแล้วตามแนวแกน Y โดยพบว่า ปริมาตรแร่นั้นมีสีน้ำตาลเป็นส่วนใหญ่โดยที่พบสินแร่ดิบที่มีสีดำปนเจือในส่วนนี้



รูปที่ 6 การทดลองแต่งแร่ด้วยโต๊ะสั่น ที่วินาทีที่ 8

ในวินาทีที่ 12 พื้นที่ในการแยกแร่ถูกใช้ไปจนถึงแนวหลังของลูกชั้นที่ 5 ซึ่งเป็นบริเวณที่ทรายค่อนข้างบริสุทธิ์ที่กระโดดมาไกล ส่วนสินแร่ดิบที่มีความบริสุทธิ์พบที่บริเวณแนวหลังลูกชั้นที่ 1 กระบวนการของ Segregation effect ก็จะเพิ่มพื้นที่โดยไปเกิดบริเวณแนวหลังลูกชั้นที่ 2 อีกด้วย ส่วนแนวหลังลูกชั้นที่ 3 จะเริ่มมีการสะสมตัวของแร่ทั้งสองชนิด ปริมาณส่วนใหญ่ของทรายที่กระโดดไปเร็วจะเริ่มตกพื้นที่โต๊ะและถูกจัดเป็นหางแร่โดยมีจำนวนสะสมมากขึ้น หางแร่ที่

สะสมตัวจะเป็นสีดำชัดเจนมากขึ้นที่แนวหลังของลูกชั้นที่ 1 ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การทดลองแต่งแร่ด้วยโต๊ะสั่น ที่วินาทีที่ 12

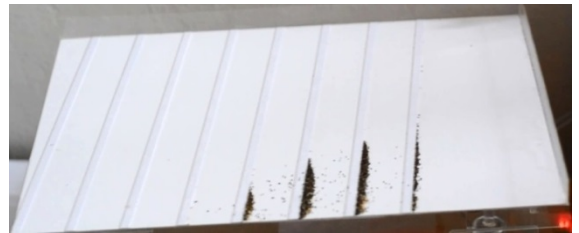
ในวินาทีที่ 16 สิ้นแร่ดิบที่มีความบริสุทธิ์พบที่บริเวณแนวหลังลูกชั้นที่ 1 และ 2 กระบวนการของ Segregation effect ก็จะเพิ่มพื้นที่โดยไปเกิดบริเวณแนวหลังลูกชั้นที่ 3 และ 4 อีกด้วย หัวแร่ที่มีความบริสุทธิ์เริ่มพบได้ในปริมาณที่มากขึ้นดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การทดลองแต่งแร่ด้วยโต๊ะสั่น ที่วินาทีที่ 16

ในวินาทีที่ 20 แร่ทรายทั้งหลายได้กระโดดออกไปช่วงหลังของแนวลูกชั้นที่ 4 ไปในปริมาณมาก ส่วนที่ยังถูกดัก คัดด้านหลังของแนวลูกชั้นที่ 1 2 3 และ 4 เมื่อนำมารวมกันแล้ว นำมาวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของสินแร่ดิบในตัวอย่างแล้วจะพบประมาณ 70% และจะได้น้ำหนักหัวแร่คิดเป็น 5.33 กรัมจาก 10 กรัมป้อน เมื่อคำนวณออกมาในปริมาณของ % การเก็บสินแร่ดิบมีค่า 76.2% นั่นหมายถึงกระบวนการนี้สินแร่ดิบได้ปะปนไปกับหางแร่ประมาณ 23.8% ซึ่งปริมาณนี้เราสามารถนำมารวมกับ การป้อนครั้งที่ 2 แล้ว ป้อนแร่เพื่อ

ทำการคัดขนาดอีกเพื่อการเก็บแร่ที่สมบูรณ์แบบมากยิ่งขึ้น หรือถ้าต้องการความบริสุทธิ์ที่มากขึ้น ก็สามารถนำหัวแร่มาใช้เป็นแร่ป้อนอีกครั้งก็ได้ ซึ่งสามารถทำให้ความบริสุทธิ์มากขึ้นกว่า 70% ได้ตามกระบวนการที่กล่าวมา



รูปที่ 9 การทดลองแต่งแร่ด้วยโต๊ะสั่น ที่วินาทีที่ 20

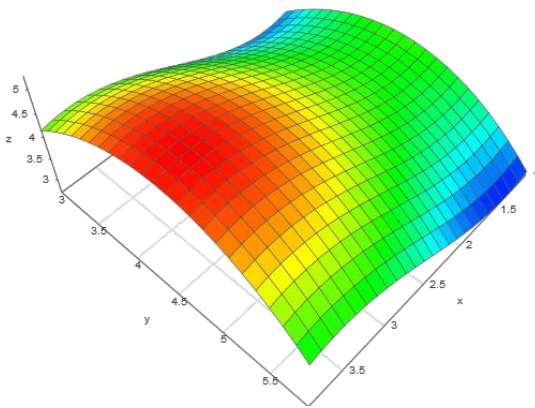
จากกระบวนการทั้งหมดตั้งแต่เริ่มต้นจนครบรอบกระบวนการ การป้อนแร่สู่การเก็บหัวแร่ได้ใช้เวลา ที่ 22 วินาทีสำหรับแร่ทั้งหมด 10 กรัม

5.3 ผลการหาสมการเพื่ออธิบายพฤติกรรมจาก Generalized Reduced Gradient Algorithm (GRG Algorithm)

การสร้างระนาบปริภูมิสามมิติจากผลการทดลองจากหัวข้อที่ 4.1 โดยใช้วิธี GRG Nonlinear solving method โดยใช้เงื่อนไขของการเลื่อนเข้าหาบรรจบกันที่ 0.0001 (Convergence factor) วิธีการทดสอบค่าใช้วิธี Forward derivatives ไปเรื่อยๆ และจำนวนในการทดสอบของค่ามีจำนวน (Population size) ที่ 10000 ค่าโดยเงื่อนไขที่ตรวจสอบของพารามิเตอร์ทั้งหมด เพื่อดำเนินการหาค่าคงที่จากสมการ พหุนามกำลังสาม ซึ่งมีรูปสมการปกติเป็น

$$Z = ax^3 + by^3 + cx^2 + dy^2 + ex + fy + g$$

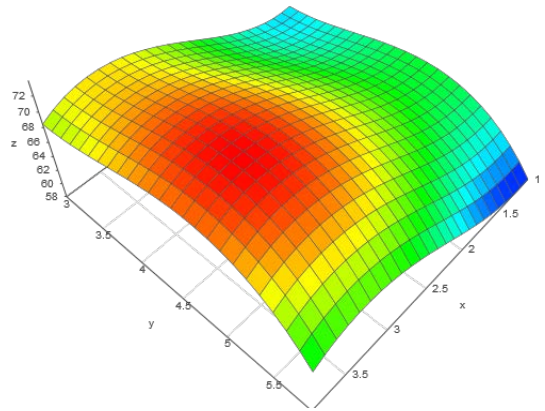
ค่าคงที่ในสมการนี้คือ a, b, c, d, e, f และ g ทั้งหมดจะถูกนำมาหาค่า เพื่อจะทำสมการความสัมพันธ์ของน้ำหนักหัวแร่ที่ได้กับความสัมพันธ์ขององศามุมเอียงของแกน X และแกน Y ของโต๊ะต้นจะได้ตามความสัมพันธ์ดังรูปที่ 10 โดยจุดที่สูงที่สุด มุมเอียงแกน X, Y จะเป็น (3,5) องศา



$$Z_1 = -0.23x^3 - 0.04y^3 + 1.69x^2 - 0.03y^2 - 3.28x + 2.62y - 1.64$$

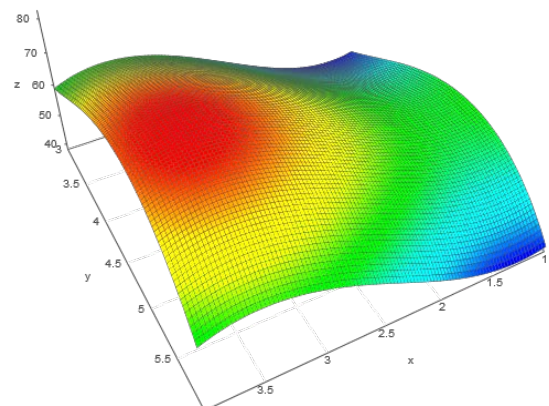
รูปที่ 10 สมการและระนาบปริภูมิของความสัมพันธ์ของน้ำหนักหัวแร่ (Z_1) ที่สัมพันธ์กับ มุมเอียงของแกน X และแกน Y, $R^2 = 82\%$

ซึ่งสมการความสัมพันธ์ของ%สินแร่ดีบุกในหัวแร่และ%การเก็บกู้สินแร่ดีบุก กับความสัมพันธ์ขององศามุมเอียงของแกน X และแกน Y ของโต๊ะต้นก็มีผลการทดลองเหมือนกับน้ำหนักหัวแร่ ดังรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับ



$$Z_2 = -1.66x^3 - 1.37y^3 + 11.14x^2 + 15.78y^2 - 18.91x - 57.50y + 138.53$$

รูปที่ 11 สมการและระนาบปริภูมิของความสัมพันธ์ของ%สินแร่ดีบุกในหัวแร่ (Z_2) ที่สัมพันธ์กับ มุมเอียงของแกน X และแกน Y, $R^2 = 64\%$



$$Z_3 = -4.19x^3 - 2.76y^3 + 30.04x^2 + 28.58y^2 - 55.78x - 83.49y + 136.86$$

รูปที่ 12 สมการและระนาบปริภูมิของความสัมพันธ์ของ%การเก็บกู้สินแร่ดีบุก (Z_3) ที่สัมพันธ์กับ มุมเอียงของแกน X และแกน Y, $R^2 = 81\%$

เมื่อพิจารณาถึงการแต่งแร่เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าจึงควรพิจารณาถึงเรื่องของ %การเก็บกู้สินแร่ดีบุกสูงสุดมากกว่าที่จะพิจารณาเรื่องของ %สินแร่ดีบุกในหัวแร่ซึ่งบอกถึงความบริสุทธิ์ของสินแร่ในตัวอย่างเพราะจะเป็น

การทั้งสินแร่ดิบถูกไว้ในหางแร่ ดังนั้นการหาจุดสูงสุดของ%การเก็บกู้สินแร่ดิบ จะใช้กระบวนการอนุพันธ์ทางคณิตศาสตร์ (Differentiate) ของ สมการ

$$Z_3 = -4.19x^3 - 2.76y^3 + 30.04x^2 + 28.58y^2 - 55.78x - 83.49y + 136.86$$

$$\frac{dz_3}{dx} = -12.57x^2 + 60.08x - 55.78 = 0$$

โดยได้ค่า x ที่ความชันเป็น 0 ที่ 3.61 และ 1.23

$$\frac{dz_3}{dy} = -8.28x^2 + 57.16x - 83.49 = 0$$

โดยได้ค่า y ที่ความชันเป็น 0 ที่ 4.80 และ 2.09

ดังนั้นคู่อันดับที่จะแทนค่าใน Z_3 คือ (3.61,4.80) โดยคู่อันดับนี้ให้ค่า Z_3 %การเก็บกู้แร่สูงสุดที่ 82% ($R^2=81\%$) จากการคำนวณ และ (1.23,2.09) แต่คู่อันดับที่ 2 เป็นความชันเป็นศูนย์ในลักษณะกราฟพาราโบลาคว่ำจึงจะให้ค่าต่ำสุดออกมาที่%การเก็บกู้แร่สูงสุดที่ 31%

จากพฤติกรรมดังกล่าวจึงทำให้ทราบว่า การที่โตะสั้นเอียงน้อย จะทำให้การส่งแรงจากโตะสั้นไปที่อนุภาคน้อยทำให้กระโดดข้ามลูกชั้นได้ไม่ดีและมีแนวโน้มที่จะใช้เวลานานบนโตะสั้น ดังนั้นการเริ่มต้นเพื่อทดสอบค่าตามแนวแกน X ควรเริ่มจากค่ามุมเอียงที่ 2 องศาเป็นต้นไป และตามแนวแกน Y ควรเริ่มจากค่ามุมเอียงที่ 3 องศาเป็นต้นไป เพราะเมื่อหางแร่กระโดดไม่พ้นลูกชั้น จึงทำให้หัวแร่และหางแร่สะสมตัวบริเวณลูกชั้น จึงพบว่าแร่มีความบริสุทธิ์น้อย เมื่อโตะสั้นเอียง

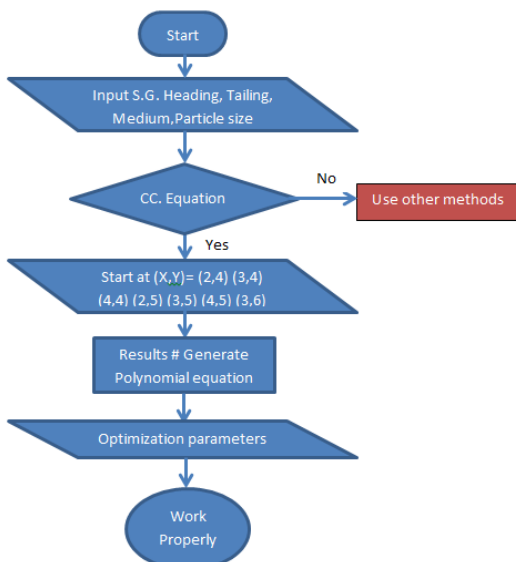
มากจะทำให้อนุภาคน้อยใช้แรงปฏิกิริยาจากโตะสั้นที่มีต่ออนุภาคน้อยทำให้กระโดดข้ามลูกชั้นได้ง่ายเกินไป และมีแนวโน้มที่จะใช้เวลาน้อยเกินไปเพื่อทดสอบค่าตามแนวแกน X ควรใช้ค่ามุมเอียงที่น้อยกว่า 4 องศา และตามแนวแกน Y ควรเริ่มจากค่ามุมเอียงที่น้อยกว่า 6 องศา เพราะจะทำให้ทั้งหัวแร่และหางแร่กระโดดพ้นลูกชั้นไปทั้งหมด จึงพบว่าแร่ที่สะสมตัวบริเวณลูกชั้นมีปริมาณน้อย การหาความเอียงที่เหมาะสมจึงเป็นเรื่องที่มีความละเอียดอ่อน และต้องใช้ผู้มีประสบการณ์สูงในการตั้งค่าการสั่นและการปรับเปลี่ยน

จากสมการปกติที่เลือกใช้ในการทดลองนี้ยังจัดว่ามีค่าคงที่ 7 ตัว ยังจัดว่าเป็นสมการที่ใช้ยาก แต่ในลักษณะของการใช้งานด้วยแร่ชนิดเดียวและขนาดของแร่ขนาดเดียว ยังพบว่ามีความห่างไกลที่จะพบสมการ Universal of concentration separation หรือ Empirical equation สำหรับโตะสั้นแต่งแร่สำหรับแร่ทุกชนิด แต่จากการจำลองรูปแบบการทดลองออกมาเป็น โมเดลทางคณิตศาสตร์ในครั้งนี้ก็ยังมีส่วนดีที่พบ ค่าของมุมเอียงที่ดีที่สุดในการแต่งแร่ด้วยโตะสั้น ซึ่งนำไปสู่การเลือกใช้ค่ามุมเอียงที่เหมาะสมในแร่อื่นๆ และขนาดอื่นๆอีกด้วย ตามแผนผังกระบวนการไหลของโปรแกรม

5.4 แผนผังกระบวนการการไหลของโปรแกรม (Program flow chart)

แผนผังกระบวนการ จะเริ่มจากการหาค่าความถ่วงจำเพาะของหัวแร่ หางแร่ ตัวกลางที่ใช้ในการแต่งแร่ และ ขนาดของอนุภาคที่ใช้ในการแต่งแร่ จากนั้นนำมาคำนวณบริเวณที่เป็นไปได้ของการแต่งแร่ด้วยวิธีใช้ความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ ถ้าไม่อยู่ในพื้นที่ก็จะเสนอให้ใช้วิธีการแต่งแร่อื่น ถ้าอยู่ในพื้นที่ที่จะทำการ

ทดสอบแร่เหล่านั้ โดยความลาดเอียงของแกน X จะอยู่ ในช่วง 2 – 4 องศา และความลาดเอียงตามแนวแกน Y จะอยู่ในช่วง 4-6 องศา เมื่อได้ค่าของ %การเก็บกู้แร่ จะนำมาหาสมการพหุนามเพื่อหาค่าคงที่ทั้ง 7 ตัว แล้วหาจุดที่ให้ค่า%การเก็บกู้แร่ ที่สูงสุดจากนั้นก็จะนำมาใช้ตั้งค่าความเอียงของโตะ สันแต่งแร่ โดยสามารถแสดงแผนผังได้ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 แผนผังกระบวนการการไหลของโปรแกรม

6. งานพัฒนาในภาคหน้า

พารามิเตอร์ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของเม็ดแร่ เช่น ความสูงของลูกชั้น ช่วงชัก ความถี่ จะยังมีการศึกษาต่อไปในอนาคต วัสดุที่ใช้เป็นผิวของโตะที่ต้องสัมผัสกับแร่โดยตรง

ขาโตะในงานนี้ที่ใช้เป็นแม่เหล็กถาวรทั้ง DD และ SD จะถูกพัฒนาเพื่อใช้กับแม่เหล็กไฟฟ้า การควบคุมความสูงต่ำของโตะ ความเอียงองศาของโตะ จะเกิดจากการปล่อยกระแสไฟฟ้ามากขึ้นจากการควบคุม ณ จุด

เดียว สปริงและข้อเหวี่ยงที่ใช้ในการขับเคลื่อนของโตะ จะถูกพัฒนาด้วย แรงผลักแม่เหล็กความถี่ต่ำด้วยการควบคุมกระแสไฟฟ้าด้วยระบบวงจรควบคุมความถี่

การปรับจูนความเอียงของโตะจะทำการเช็คจากสีหัวแร่ที่ไหลออกมาในช่องหัวแร่จาก Color sensor และจะมีการปรับมุมมองตามแผนผังของกระบวนการไหลของโปรแกรมในข้อ 5.3 ซึ่งจะทำให้ได้หัวแร่ที่มีสีค่ามากขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งพบจุดเหมาะสม

สมการ Polynomial กำลังสาม ที่มีตัวแปร 7 ตัวจะยังคงมองหาชุดสมการที่มีความคล่องตัวมากกว่านี้ในอนาคต

การเพิ่มความเร็วของอนุภาคตามแนวแกน X และ Y สามารถนำมาใช้ร่วมกับพัลส์ที่มีความเร็วของลมในการพัฒนาอนุภาคในการเดินทางด้วยสำหรับแร่ที่มีมูลค่ามาก แต่แนวคิดนี้จะไม่คุ้มค่ากับแร่ที่มีราคาถูกเพราะจะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น

สุดท้ายการควบคุมความลาดเอียง ของโตะ สันจำนวนหลายตัวเพื่อการแต่งแร่ที่ขนาดแตกต่างกันในเวลาเดียวกันด้วย ระบบแหล่งจ่ายไฟเดียว มีแผนผังกระบวนการการไหลของโปรแกรมรูปแบบเดียว และมีการใช้คนควบคุมจำนวนน้อยโดยเป็นระบบโตะแต่งแร่ที่ไม่ใช้น้ำในการแต่งแร่ จะตอบสนองกับการออกแบบโรงแต่งแร่ที่ใช้กับชุดแต่งแร่ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Mobile plant) เพื่อให้ชาวบ้านได้สามารถลงทุนได้เพื่อการพัฒนาแหล่งแร่อย่างยั่งยืนกับภาคประชาชนท้องถิ่น หลังจากนั้นเจ้าของเหมืองรายใหญ่ก็จะรับซื้อหัวแร่จากชาวบ้าน เพราะปัจจุบันการแต่งแร่ในปัจจุบันนายทุนจะได้ประโยชน์มากกว่าชาวบ้านในสายตานักสิ่งแวดล้อม

7. สรุปผลการทดลอง

การแต่งแร่ด้วยวิธีใช้ความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะด้วยเครื่องโตะสั่นแบบแห้งสามารถแต่งแร่สารัตถ์ได้ออกจากทรายได้ กลศาสตร์การเคลื่อนตัวแบบกระโดดของเม็ดแร่บนโตะที่มีความเกี่ยวข้องกับวัสดุที่ผิวของโตะสั่นกับเม็ดแร่ ยังพบว่าเม็ดทรายจะมีการเคลื่อนไหลไปสุดทางเร็วกว่าเม็ดดินซึ่งอธิบายได้ด้วยคุณสมบัติความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างและโมเมนตัมของเม็ดแร่หลังการชน

การติดตั้งแนวลูกขึ้นบนพื้นโตะตามแนวแกน Y จะพบปรากฏการณ์ Segregation effect บริเวณหลังการแนวลูกขึ้น ซึ่งเกิดจากผลของ Percolation mechanism และผลของ Convection mechanism ของเม็ดแร่ดินกับเม็ดทราย

การทดลองป้อนแร่ที่ 7 มุมเอียงตามแนวแกน X, Y = 3,5 องศา เป็นการทดลองที่ให้ผลดีที่สุด พบว่าจากการป้อนแร่ 10 กรัม น้ำหนักของหัวแร่เก็บได้ 5.33 กรัม คิดเป็น 53.3% ของแร่ป้อน โดยเปอร์เซ็นต์สินแร่ดินในหัวแร่ถูกปรับปรุงขึ้นมาจาก 50% เป็น 71.48% และเปอร์เซ็นต์การเก็บกู้สินแร่ดินเท่ากับ 76.2%

ระนาบปริภูมิสามมิติจากผลการเก็บกู้สินแร่ดินทุกการทดลอง ถูกนำมาสร้างสมการพหุนามกำลังสามโดยใช้ GRG Nonlinear solving method พบว่า มีค่า $R^2 = 81\%$ ความยุ่งยากของค่าคงที่ 7 ตัวยังคงเป็นเรื่องยากสมการนี้ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการหาความเอียงตามแนวแกน X-Y เพื่อให้ได้ค่า Z (%การเก็บกู้สินแร่ดิน) ที่ดีที่สุดตามแผนผังกระบวนการไหลของโปรแกรมต่อไปในอนาคต เมื่อใช้พร้อมกันหลายชุด สำหรับการ

แต่งแร่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยจะควบคุมโตะสั่นด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าในท้ายที่สุด

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับสินแร่ดินที่ใช้ในการทดลองถูกบริจาคจาก ผู้ประกอบการซึ่งไม่ประสงค์ออกนาม จากแหล่งแร่มาจือ (Mawchi) สหพันธรัฐเมียนมาร์ ส่วนโตะแต่งแร่ที่ถูกสร้างจากวางแผน ออกแบบ คำนวณ และควบคุมการผลิตโดย นายคิวโรดม ศิริลักษณ์ ขอบคุณเป็นอย่างสูงในส่วนของงานผลิตที่ทำด้วยความตั้งใจและมีฝีมืออันประณีตโดย นายภิเชก ศรีบุญเรือง

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณจรัสชัย รัตนาลดาวัลย์ และ ภคศิริ ศิริลักษณ์ ซึ่งเปิดโอกาสให้ใช้เวลาทุ่มเททำงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนคอยช่วยเหลือผู้วิจัยเสมอมาจนเสร็จสิ้น

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Klemm, R. Klemm and A. Murr, "Gold of the Pharaohs--6000 years of gold mining in Egypt and Nubia," *Journal of African Earth Sciences*, pp. 643--659, 2001.
- [2] H. U. Sverdrup and P. Schlyter, "Modeling the survival of Athenian owl tetradrachms struck in the period from 561-42 BC from then to the present.," in *Proceedings of the 30th international conference of the system dynamics society*, St. Gallen, Switzerland, 2012.

- [3] S. Siriluck, "Neodymium magnet and mineral processing engineering," *Engineering Journal, Chiangmai University*, pp. 1-9, 2013.
- [4] S. Siriluck and A. Chomseang, "Dressing Concentrated Iron-Ore from Iron-Ore Tailing Using High Alumina Jig Ragging By Concentrator Jig," in *The 1st National Conference on Engineering Research for Thailand Development*, Chiangmai, Thailand, 2011.
- [5] S. Roy, "Recovery improvement of fine iron ore particles by multi gravity separation," *The Open Mineral Processing Journal*, pp. 17--30, 2009.
- [6] F. Aplan, "Gravity concentration," *Fuerstenau, MC E Han, KN (Ed.). Principles of Mineral Processing. SME*, pp. 185-219, 2003.
- [7] M. A. El-Reedy, "Concrete and Materials tests," in *Advanced Materials and Techniques for Reinforced Concrete Structures*, Boca Raton, CRC Press , 2015, p. 137.
- [8] J. M. MOFFATT, "Hydrostatics," in *The Book of Science: A Familiar Introduction to the Principles of Natural Philosophy, Adapted to the Comprehension of Young People, Comprising ... Optics, Electricity, Galvanism, Magnetis*, London, Andesite Press, 2015, p. 152.
- [9] A. Gupta and D. S. Yan, *Mineral processing design and operations: an introduction*, Amsterdam in Netherlands: Elsevier B.V, 2006.
- [10] E. H. H. Macdonald, *Alluvial mining: the geology, technology, and economics of placers*, London: Chapman and Hall., 1983.
- [11] J. Thomas, "Principles of gravity separation in Gravityseparation technology," in *Summarizes the design and operationof the Oliver Gravity separator.*, Colorado, Oliver Manufacturing Company, Rocky Ford, CO. , 1978, p. 19.
- [12] G. Dodbiba and T. Fujita, "Separation of Plastics for Recycling," in *7th World Congress on Recovery, Recycling and Re-integration*, Beijing, China , 2005.
- [13] A. Jain, M. J. Metzger and B. Glasser, "Effect of particle size distribution on segregation in vibrated systems," *Powder technology*, pp. 543-553, 2013.