



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.

UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

การศึกษาสมการความน่าจะเป็นในการแตกหักสำหรับเครื่องย่อยแร่แบบแผ่นคู่ขนาดเล็ก The Study of the Breakage Probability Functions for Small Jaw Crusher

ศิริโรตม์ ศิริลักษ์^{1*}¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300Siwarote Siriluck^{1*}¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Muang, Chiang Mai 50300

* Corresponding author.

E-mail: siwarote@rmutl.ac.th; Telephone: 0 4535 3319.

วันที่รับบทความ 4 มกราคม 2561; วันแก้ไขบทความครั้งที่ 1 15 กุมภาพันธ์ 2561; วันแก้ไขบทความครั้งที่ 2 26 มีนาคม 2561; วันแก้ไขบทความครั้งที่ 3 9 พฤษภาคม 2561; วันที่ตอบรับบทความ 18 มิถุนายน 2561

บทคัดย่อ

เครื่องย่อยแร่แบบแผ่นคู่ (jaw crusher) ขนาดทดลองได้ถูกศึกษา การย่อยแร่ที่ขนาดของการตั้งปากทางออกที่แตกต่างกันจากผลการทดลองพบว่า การย่อยแร่ที่ปากทางออกที่มีขนาดเล็ก แร่หลังบดจะได้มีขนาดละเอียดมากกว่าและทำให้ความน่าจะเป็นของการถูกบดมีค่าเพิ่มขึ้น ผลของการบดแร่ได้นำมาทดสอบกับสมการความน่าจะเป็นของการแตกหัก 5 แบบจำลอง โดยดูผลจากค่าความสมรूपกับข้อมูล (R^2) ที่ดีที่สุด และค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมรูปร่างของแบบจำลองจะถูกค้นหาด้วยการคำนวณโดยวิธี GRG nonlinear ผลพบว่า สมการของ Nikolov (2002) เป็นสมการที่เหมาะสมที่สุด โดยการศึกษาครั้งนี้จะไปใช้เพื่อเป็นข้อมูลในการสร้างเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับวงจรบดแร่ต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ

เครื่องย่อยแร่ ความน่าจะเป็น การบดแร่ การแต่งแร่

Abstract

A laboratory jaw crusher was investigated on the different discharge gap parameters. The results found that a small gap has finer particle size distribution and higher breakage probability. Five mathematic models were tested to find the best regression coefficient. Furthermore, computing the shape parameter sensitivity was examined by GRG nonlinear method. The Nikolov (2002) model was the best for this experiment. These results lead to the ANN of the mineral comminution circuit in the future.

Keywords

crusher; breakage probability; comminution; mineral processing.

1. บทนำ

การบดหยาบในขั้นต้น เพื่อจุดประสงค์ในการลดขนาดของแร่ เพื่อนำไปทำการคัดขนาด หรือ บดละเอียดต่อไป เครื่องแต่งแร่ที่ใช้ในการบดหยาบที่นิยม คือ เครื่องย่อยแร่แบบแผ่นคู่ เครื่องบดปฐมภูมิถูกคาดหวังถึง ความแน่นอนในการใช้งาน ประหยัดเวลา ทนทาน ประหยัดค่าใช้จ่าย บำรุงรักษาง่าย กำลังการผลิตสูง [1-3] การศึกษาและพัฒนาดำเนินมาอย่างต่อเนื่อง แง่ของการทำนาย การวิเคราะห์ และการเพิ่มประสิทธิภาพ ของวงจรในการบดได้ศึกษาโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลการศึกษาเหล่านั้นได้นำไปสู่ทางออกที่ดี การตรวจสอบติดตามเมื่อเทียบกับแบบจำลอง มีผลลัพธ์ที่ดีโดยบางเรื่องนั้นเป็นสิ่งที่ปรับแก้ได้ในระบบได้ทันทีและไม่มีค่าใช้จ่ายที่มากขึ้นเลย เช่น การวิเคราะห์พบถึงสาเหตุของกำลังการผลิตที่น้อยเนื่องจากการสั่นไถลของสายพานส่งกำลัง [4] สาเหตุการสึกของตลับลูกปืนที่แกนหมุนของเครื่องย่อยแร่แบบแผ่นคู่ เพราะอุณหภูมิที่สูงเนื่องจากใช้จารบีผิดประเภท จนเกิดการสะสมความร้อนแล้วนำไปสู่การสึกหรอของตลับลูกปืนแล้วทำให้เกิดแรงเสียดทานสูงแกนหมุน [5] เรื่องเหล่านี้ถ้ามีการติดตามดูแลอย่างเป็นระบบ (monitoring system) จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบด และลดค่าใช้จ่ายลงไปได้มากขึ้น

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายและวิเคราะห์การทำงานของเครื่องย่อยแร่แบบแผ่นคู่ในขนาดห้องปฏิบัติการ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ศึกษาคือ สมการความน่าจะเป็นในการแตกหัก (breakage probability function) 5 แบบ แบบจำลองเหล่านี้ จะถูกนำมาวิเคราะห์ว่าแบบใดเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด งานในอนาคตพื้นฐานของการควบคุมวงจรการบดที่ถูกเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบจะถูกนำมาออกแบบสร้างชุดควบคุมอัตโนมัติ (automatic controller)

ด้วยเครือข่ายประสาทเทียม (artificial neural network : ANN) ในอนาคต [6]

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการลดขนาดวัสดุ

การลดขนาดของแร่ (mineral comminution) ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ความสนใจจะถูกมุ่งไปยังสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ สมการการกระจายตัวของแร่ป้อน และแร่หลังบด (particle size distribution of feed and product particles function) สมการแสดงการแตกหัก (breakage function) และสมการแสดงความน่าจะเป็นในการแตกหัก (probability breakage function) ซึ่งสามสมการนี้จะถูกนำมาคำนวณย้อนไปมาได้ตาม มวลสมดุลเชิงเมตริกซ์ (matrix mass balance model) [7] โดยหลักการถ้าแร่ถูกบดทุกขนาดในอุดมคติสามารถเขียนรูปแบบ [8] ได้เป็น

$$P = C \cdot F$$

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \vdots \\ P_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & C_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & C_N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix}$$

โดย P คือ การกระจายขนาดของอนุภาคของผลิตภัณฑ์หลังย่อย (product particles PSD) เมตริกซ์ $1 \times N$ ของทุกการกระจายตัวของน้ำหนักแร่ที่ถูกบดในทุกช่วง N ขนาดของช่วงตะแกรงที่ทำการศึกษา

F คือ การกระจายขนาดของอนุภาคของแร่ป้อนก่อนย่อย (feed particles PSD) เมตริกซ์ $1 \times N$ ของทุกการกระจายตัวของน้ำหนักแร่ป้อนในทุกช่วง N ขนาดของช่วงตะแกรงที่ทำการศึกษา

C คือ ฟังก์ชันการคัดเลือก (selection function) หรือ ฟังก์ชันความน่าจะเป็น (probability function) เมตริกซ์ทแยง $N \times N$ สมาชิกในเมตริกซ์จะแสดงความน่าจะเป็นของแต่ละช่วงชั้นที่จะถูกบด [8]

2.1 สมการความน่าจะเป็นของการแตกหัก (The breakage probability function, $C_i(d_i)$)

ความน่าจะเป็นของการแตกหักได้ถูกศึกษาอย่างแพร่หลาย หนึ่งในงานที่ถูกอ้างอิงมาก คือ แบบจำลองความน่าจะเป็นของการบด ของ Austin และ Luckie [9] ในปี 1972 การทดลองแบบเป็นชุด ๆ ด้วยการบดระยะสั้น เพื่อศึกษาอัตราการบดและความน่าจะเป็นที่แร่ถูกบดในแต่ละขนาด ได้ถูกนำเสนอด้วยสมการ (1)

$$C_i(d_i) = C_1 \left(\frac{d_i}{d_1} \right)^\phi \quad (1)$$

โดย $C_i(d_i)$ คือ ฟังก์ชันของค่าความน่าจะเป็นของการถูกบดของแร่แต่ละขนาด d_i คือขนาดของแร่ C_1 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ d_1 เป็นแร่ขนาดที่เล็กที่สุดในการบด ϕ คือ ตัวแปรกำหนดรูปร่าง (shape parameter) ของสมการ

จากนั้น ในปี 1979 การพัฒนาโมเดลถูกศึกษาและนำเสนอโดย Whiten และ White [10] ในการศึกษาครั้งนั้นเป็นการบดที่ทำการทดลองกับเครื่องย่อยแร่แบบแผ่นคู่และเครื่องย่อยแร่แบบลูกกลิ้ง (roller crusher) ซึ่งเป็นการบดซึ่งไม่ขึ้นกับเวลา เมื่อเปรียบเทียบกับกรบดอย่างเครื่องบดแร่ด้วยท่อนเหล็ก (rod mill) หรือเครื่องบดแร่ด้วยลูกบอล (ball mill) สมการที่ได้นำเสนอคือ (2)

$$C_i(d_i) = 1 - \left(\frac{d_i - k_2}{k_1 - k_2} \right)^\beta \quad (2)$$

โดย ขนาดของปากเครื่องย่อยแร่แบบแผ่นคู่ส่วนล่างที่ถูกตั้งไว้ในจุดที่แคบที่สุด และแร่ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในการบดแร่ เป็นตัวแปร k_1 และ k_2 ตามลำดับ ลักษณะของกราฟจะถูกกำหนดด้วย β ซึ่งเป็นตัวแปรกำหนดรูปร่างของแบบจำลอง ในปี 2017 Segura และทีมงานได้ศึกษาแบบจำลองนี้ด้วยเครื่องบดแบบ vertical shaft ได้พบว่า ค่านี้มีนัยสำคัญกับอัตราการบดที่ทางเข้า และความเร็วในการหมุนของแกนบด แต่ไม่ได้สรุปจนถึงหน่วยของตัวแปรนี้ได้ ด้วยเหตุเป็นที่นิยม

เพราะว่า ทั้ง ตัวแปร k_1 และ k_2 ต่างก็สามารถวัดออกมาได้ โดยที่เครื่องไม่ต้องอยู่ในสถานะหยุดงาน [11] และสมการนี้ไม่มีตัวแปรใด มีความเกี่ยวข้องกับค่าความแข็งแรงของวัสดุเชิงกลศาสตร์หรือพลังงานที่ใช้ต่อต้านในการบดวัสดุ ซึ่งแตกต่างจากแบบจำลองในงานวิจัยของ Attou และทีมงาน (1999) ที่ได้ประยุกต์นำมาคำนวณด้วย [12]

การพัฒนาโมเดลให้ประจักษ์ใช้ง่าย (empirical) แต่ทรงประสิทธิภาพ เป็นเรื่องที่ทางภาคอุตสาหกรรมต้องการ ในปี 2002 โมเดลของ Nikolov [13] ได้นำเสนอฟังก์ชันของค่าความน่าจะเป็นที่กระชับกว่า Whiten และ White (1979) [14] โดยสมการ Nikolov (2002) แสดงดังสมการที่ (3)

$$C_i(d_i) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d_i - d_{\min}}{d_{\min}} \right)^\mu \right] \quad (3)$$

โดย d_{\min} คือ แร่ที่มีขนาดเล็กที่สุดที่สามารถถูกบดได้ในสภาพการเดินเครื่องบด ซึ่งกรณีเครื่องย่อยแร่แบบแผ่นคู่แทนค่าด้วยระยะห่างของส่วนปากบดแคบนั้นเอง และในกรณีของเครื่องย่อยแร่แบบลูกกลิ้งแทนค่าด้วย ขนาดของช่องว่างส่วนที่แคบที่สุดระหว่างลูกกลิ้งทั้งสอง และ μ คือ ตัวแปรกำหนดรูปร่างของกราฟ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราการบด และปัจจัยอื่น ๆ

การพัฒนาโมเดลของความน่าจะเป็นในการกระแทกด้วยความเร็วที่แตกต่างกันเพื่อลดขนาดของวัสดุประเภท brittle materials ถูกศึกษาในปี 2004 โดย Vogel และ Peukert ด้วยเครื่องเหวี่ยงอนุภาคด้วยการหมุนเพื่อให้กระแทกจนแตก [15] ได้ถูกประยุกต์นำมาใช้กับการทดลอง

$$C_i(d_i) = 1 - \exp \left[-f_{\text{mat}} d_i (W_k - W_{k,\min}) \right] \quad (4)$$

โดย $C_i(d_i)$ คือ ฟังก์ชันของค่าความน่าจะเป็นของการแตกหักของแร่ที่มีขนาดเท่ากับ d_i พลังงานจลน์ของอนุภาคที่ถูกเหวี่ยงออกมาจากเครื่องเหวี่ยงอนุภาคมีค่า W_k และพลังงานจลน์ขีดเริ่มที่อนุภาคแตกหักคือ W_{\min} ค่าจำเพาะของแต่ละอนุภาคแทนด้วย f_{mat} โมเดลนี้ก็ยังมีตัวแปรนี้ที่ยังพบว่า แม้หินปูน หินแกรนิต อนุภาคเหล่านี้มาจากโรงงานเดียวกันซึ่ง

ใช้แหล่งเดียวกันค่านี้ก็ไม่เท่ากันเพราะมีความแตกต่างของขนาด ซึ่งน่าจะทดแทนด้วยค่าของ d_i ไปแล้ว โมเดลนี้จากการทดลองพบว่าลักษณะในการบดจะไม่เหมือนกับ การบดเครื่องย่อยแร่แบบแผ่นคู่และเครื่องย่อยแร่แบบลูกกลิ้งซึ่งมีการฉีกและการกดเพื่อลดขนาดอนุภาคเป็นส่วนใหญ่ แต่การลดขนาดในการทดลองนี้จะลดขนาดด้วยการที่อนุภาควิ่งไปด้วยความเร็วสูงแล้วไปการกระทบ (impact) กับแผ่นเหล็กแล้วเกิดการแตกหัก ซึ่งมีความสัมพันธ์กับมวลและความเร็วของอนุภาคก่อนที่จะกระทบจึงแตกหัก ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับพลังงานจลน์ที่ใช้และพลังงานจลน์ขีดเริ่ม (threshold kinetic energy) ที่เป็นพลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถจะทำให้อนุภาคแตกหักได้พอดี และตัวอย่างในการใช้เพื่อการทดลองใช้ปริมาณน้อย [16] จึงจัดว่าเป็นโมเดลที่ได้รับความนิยมเมื่อตัวอย่างมีปริมาณน้อย

สมการ 4 ตัวแปรแบบโลจิสติก (four parameter logistic (4PL) function) เป็นโมเดลที่ใช้กันในด้านการศึกษาแพทย์ [17] และเภสัชศาสตร์ [18] เพื่อศึกษาเรื่องของปริมาณต่อครั้งของยาที่ได้รับต่อครั้งในมนุษย์ เป็นสมการที่ไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear function) ที่มีขอบเขตจำกัดและมีความชัดเจนมาก โดยสมการ (5) แสดงโดย

$$C_i(d_i) = \text{Max} + \left(\frac{\text{Min} - \text{Max}}{1 + \left(\frac{d_i}{\text{Mid}} \right)} \right) \quad (5)$$

โอกาสของแร่ที่จะแตกหักมากที่สุดที่จะเป็นไปได้ในช่วงขนาดที่สนใจคือ ตัวแปร Max โอกาสของแร่ที่จะแตกหักน้อยที่สุดที่จะเป็นไปได้ในช่วงขนาดที่สนใจ คือ ตัวแปร Min ซึ่งในกรณีของการบดแร่มีขนาดใหญ่ โอกาสที่จะถูกบดก็คือ ร้อยละ 100 และแร่ที่มีขนาดเล็กกว่าช่องว่างปากขณะจับแร่ก็คือ ร้อยละ 0 เพราะลดช่องว่างไปได้โดยไม่โดนบด ตัวแปร Mid คือ ค่ากลางของขนาดแร่ป้อนที่นำมาทดลอง α คือ ตัวแปรตัวแปรควบคุมรูปร่างของกราฟ [19]

3. เครื่องจักรและแร่ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องย่อยแร่แบบแผ่นคู่ยี่ห้อ เดนเวอร์ (Denver) โมเดล 201678 ตัวเครื่องเป็นเหล็กหล่อ ส่วนหน้าฟันของสามารถทำได้ขนาดเล็กที่สุดและปรับขนาดกว้างที่สุด พร้อมทั้งกำลังการผลิตแปรผันตามช่องปากทางออก คือ 17.4–25.4 mm (11/16" – 1") เป็น 1 และ 1.5 ตันต่อชั่วโมง ตามลำดับ กำลังขับโดยมอเตอร์ 5 แรงม้า 3 เฟส ถูกใช้ขับสายพานที่แกนลูกเบี้ยวของมูเล่ขนาดหน้ากว้าง 4.5" และเส้นผ่านศูนย์กลาง 18" [20] หินปูนที่ใช้ทดลองเป็นหินปูนเกรดก่อสร้าง ตัวกระทบเป็นเหล็กผสมแมงกานีส ขนาด 5 นิ้ว × 6 นิ้ว ที่ปากทางเข้าอยู่ด้านบน ส่วนปากทางออกอยู่ด้านล่าง

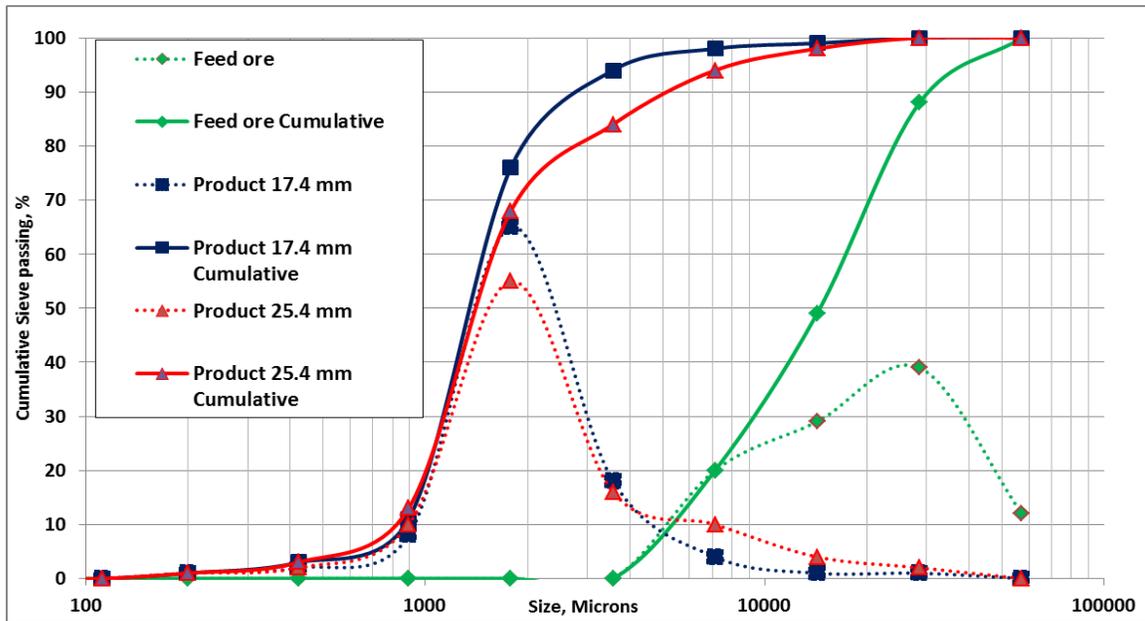
4. วิธีการทดลอง

แร่ป้อนที่ใช้คือ หินปูน โดยทำการวิเคราะห์ขนาดด้วยตะแกรงคัดขนาด แล้ว ได้ทำการชั่งตัวอย่างเป็น 2 ตัวอย่าง ตัวอย่างละเท่า ๆ กัน ด้วยวิธีการชั่งตัวอย่างด้วยวิธีโคนทรงกรวยแบ่งสี่กอง (cone quartering) ซึ่งตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 ตั้งขนาดปากทางออกที่ 25.4 และ 17.4 mm. ตามลำดับ นำแร่หลังบดทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์ขนาดอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งแสดงในรูปที่ 1

5. ผลการทดลอง

แร่ที่ถูกบดนำมาวิเคราะห์ขนาดพบว่า การตั้งปากทางออกของเครื่องย่อยแร่แบบแผ่นคู่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ออกมามีขนาดเล็กกว่าโดยปริมาณน้ำหนักของแต่ละช่วงขนาดจะถูกนำมาคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นซึ่งแสดงในตารางที่ 1 โดยความน่าจะเป็นของแร่ที่ถูกบดจะพบว่าที่แร่มีขนาดใหญ่จะมีโอกาสการถูกบดมากกว่าแร่ที่มีขนาดเล็ก การตั้งปากที่มีขนาดเล็กกว่าจะทำให้โอกาสที่แร่จะถูกบดมีค่ามากกว่า

ในทางทฤษฎี การตั้งขนาดช่องว่าง ณ. ปากทางออกจะสัมพันธ์กับโอกาสในการบดนั่นเอง กล่าวคือ ถ้าปากแคบจะมีโอกาสสูงที่จะมีโอกาสบดแร่ ยกตัวอย่างเช่นการตั้งปาก



รูปที่ 1 การวิเคราะห์ขนาดของแร่ป้อน และแร่หลังบดที่ตั้งปากทางออก 17.4 และ 25.4 mm.

ทางออกให้มีขนาด 25.4 mm ถ้าแร่ที่มีขนาดใหญ่กว่า 25.4 mm จะต้องถูกบดหมดร้อยละ 100 แต่ในทางปฏิบัตินั้นการบดจนแร่มีรูปร่างแบนก็จะหลุดปากทางออกได้เช่นกัน เมื่อนำไปวิเคราะห์ขนาดจึงพบว่าค่าังตะแกรงเช่นกัน การคำนวณความน่าจะเป็นแสดงดังต่อไปนี้

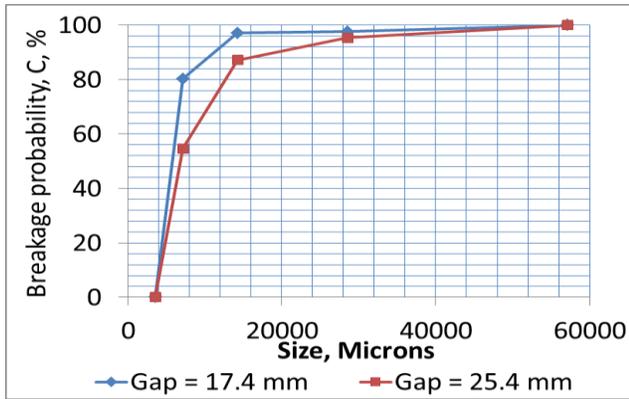
ที่ขนาด 28.55 mm ที่แร่ป้อน มีตัวอย่างอยู่ร้อยละ 39 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านปากทางออกที่ 25.4 mm เหลือค่า

ตะแกรงร้อยละ 2 คิดเป็น ถูกบดทั้งหมด $39 - 2 = 37$ หน่วย จาก 39 หน่วย คำนวณได้ $(37 \div 39) \times 100 = 95.31\%$

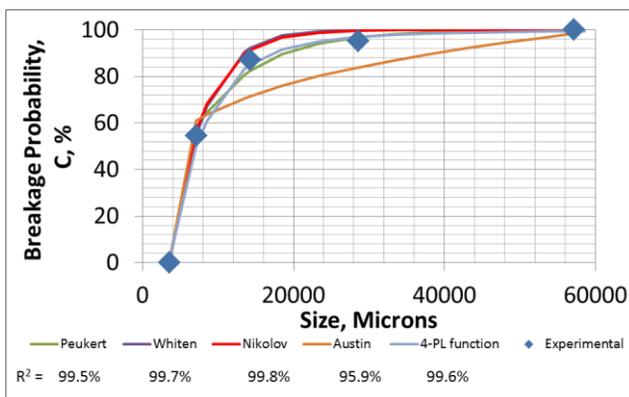
ที่ขนาด 3.57 mm มีช่วงตะแกรง 4.76-2.38 mm โดยที่แร่ป้อน มีตัวอย่างอยู่ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านปากทางออกที่ 25.4 mm พบว่าแร่หลังบด เหลือค่าังตะแกรง 2.38 mm ที่ร้อยละ 16 คือแร่ขนาดนี้มีขนาดเล็กเกินกว่าจะถูกบดได้จากปากเปิดที่มีขนาด 25.4 mm ดังนั้นแร่ที่เกิดขึ้นในส่วนของ

ตารางที่ 1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของแร่ป้อน แร่ที่บดได้ทีผ่านตะแกรงในแต่ละช่วง ความน่าจะเป็นของแร่ที่ถูกบดในแต่ละชั้น ซึ่งปากทางออกถูกตั้งที่ขนาด 25.4 และ 17.4 mm

ช่วงขนาด, mm	\bar{x} , mm	Feed, %	P _{25.4} , %	P _{17.4} , %	C ₁ , %	C ₂ , %
0.25 - pan	0.19	0	1	1	0	0
0.59 - 0.25	0.42	0	2	2	0	0
1.19 - 0.59	0.89	0	10	8	0	0
2.38 - 1.19	1.78	0	55	65	0	0
4.76 - 2.38	3.57	0	16	18	0	0
9.51 - 4.76	7.14	20	10	4	55	80
190 - 9.51	14.2	29	4	1	87	97
38.1 - 19.0	28.55	39	2	1	95	98
76.2 - 38.1	57.15	12	0	0	100	100



รูปที่ 2 ความน่าจะเป็นของแร่ที่ขนาดต่าง ๆ ที่มีความสัมพันธ์กับระยะห่างของปากทางออก

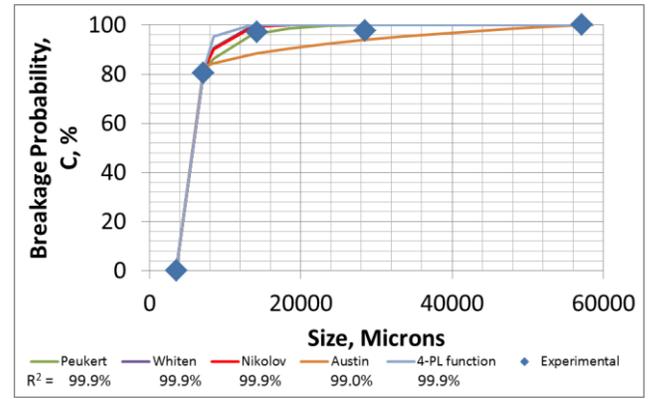


รูปที่ 3 ผลการใช้โมเดลทั้ง 5 ในเงื่อนไขระยะห่างของปากทางออก Jaw crusher ที่ 1 นิ้ว (25.4 mm)

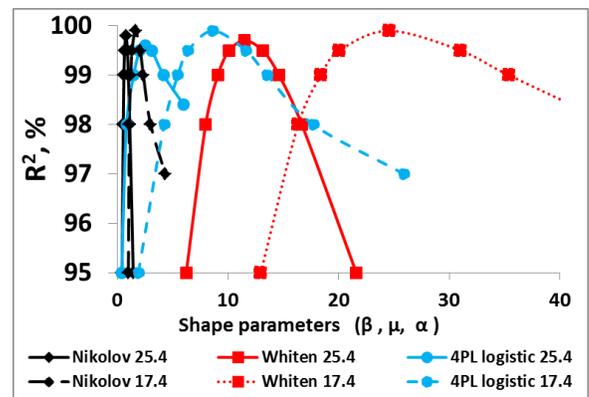
ผลิตภัณฑ์นี้เกิดจากแร่ที่ถูกบดมันเอง หรือ ลอดมาโดยไม่มี การถูกบด (ความน่าจะเป็นในการถูกบดเป็นร้อยละ 0) ใน ลักษณะเดียวกัน แร่ที่มีขนาดเล็กกว่านี้ก็สามารถลอดได้หมด มันเอง ซึ่งความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นในการถูกบด และ ขนาดของแร่ เมื่อมีการตั้งปากเปิดที่ 25.4 และ 17.4 mm. ถูก แสดงดังรูปที่ 2

ข้อมูลนี้ได้ถูกนำมาแสดงผลด้วยกราฟเพื่อหาแบบจำลองที่ เหมาะกับการนำไปใช้เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด ใน การทดลองใช้ทั้งสิ้น 5 แบบจำลอง โดยระยะห่างของปากทางออก ที่ 25.4mm. และ 17.4 mm. ถูกแสดงดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

จากผลการทดลองทั้งสองจะพบว่า โมเดลที่สามารถใช้ได้ดี 4 อันดับแรกจะเป็นของ $R^2 > 99\%$ คือ โมเดลของ Nikolov



รูปที่ 4 ผลการใช้โมเดลทั้ง 5 ในเงื่อนไขระยะห่างของปากทางออก Jaw crusher ที่ 11/16 นิ้ว (17.4mm)



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ของ ค่าตัวแปรควบคุมรูปร่างที่มีความสัมพันธ์กับค่า R^2 ของทั้งสามแบบจำลอง ณ. ระยะห่างของปากทางออกที่ต่างกัน โดยเส้นทึบเป็น 25.4mm และเส้นประเป็น 17.4 mm

(2002) Whiten และ White (1979) 4PL และ Vogel และ Peukert (2004) แต่ทว่าจากการทดลองต้นแบบแล้ว แบบจำลองของ Vogel และ Peukert (2004) มีการทดสอบใน ลักษณะการเหวี่ยงอนุภาคตัวอย่างทดสอบมากกระทกกับเป้า ซึ่งต่างจากการทดลองการบดด้วยเครื่องย่อยแร่แบบแผ่นคู่และ ค่า R^2 น้อยกว่าแบบอื่น จึงไม่พิจารณาเป็นโมเดลที่จะนำไปใช้ งานต่อ

ส่วนโมเดลทั้งสามที่เหลือนั้น โมเดลของ Nikolov (2002) จะมีจุดเด่นคือ สามารถนำพารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการนั้นมาจากการวัดระยะของเครื่องจักรได้เลย ในส่วนของ Whiten และ White (1979) และ 4PL จะมีทั้งการนำพารามิเตอร์ของ เครื่องจักร และขนาดของแร่ป้อนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดมาใช้

อย่างไรก็ตาม ทั้งสามโมเดลนี้ก็จำเป็นที่จะต้องใช้ ตัวแปรควบคุมรูปร่างของกราฟทั้งสามโมเดล จากการทดลองที่ใช้แร่ขนาด เครื่องจักร และรอบหมุนของมอเตอร์เดียวกัน เราจะพบได้ว่า ค่าของตัวแปรควบคุมรูปร่างของกราฟมีแนวโน้มจะสูงขึ้นเมื่อขนาดของปากทางออกแคบลง ในทุกโมเดล

6. การทดสอบความไวของตัวแปรควบคุมรูปร่างในสมการของแบบจำลอง

จากนั้นโมเดลทั้งสาม จะถูกนำมาหาค่าความไว (sensitivity) ของ R^2 ที่มีผลกับตัวแปรควบคุมรูปร่างมีค่าเปลี่ยนไป โดยจะมีการทดสอบที่ค่า R^2 เป็นจุดที่ให้ค่าดีที่สุดร้อยละ 99.5 99.0 98.0 และ 95.0 จากผลการทดลองของการใช้ปากบดระยะห่าง 25.4 mm จะพบว่า การพิสัยของตัวแปรควบคุมรูปร่างของ Whiten และ White (1979) model มีค่ามากที่สุดเป็น 15 หน่วย และโมเดลของ Nikolov (2002) จะมีพิสัยแคบที่สุด ที่ 1 หน่วย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานก็สอดคล้องกัน โดย Whiten และ White (1979) และ Nikolov (2002) มีค่า 4.8 และ 0.3 หน่วยตามลำดับ และในรูปของเส้นประ คือ การทดลองของการใช้ปากบดทางออกที่ระยะแคบที่ 17.4 mm ก็จะทำให้ผลการทดสอบของตัวแปรควบคุมรูปร่างที่เป็นไปทิศทางเดียวกับ การทดลองที่ใช้ปากบดทางออกที่ห่าง ซึ่งผลของการศึกษาแสดงในรูปที่ 5

จากการกระจายตัวของตัวแปรควบคุมรูปร่างของทั้งสามแบบจำลอง จะพบว่าแบบจำลองของ Nikolov (2002) มีการกระจายตัวน้อยที่สุด และด้วยความสะดวกของการกำหนดพารามิเตอร์ ที่ใช้ในสมการที่สามารถวัดได้จากเครื่องจักร จึงทำให้ โมเดลของ Nikolov (2002) เหมาะสำหรับความน่าจะเป็นในการแตกหักของเครื่องย่อยแร่แบบแผ่นคู่ขนาดห้องปฏิบัติการ โดยในการทดลองนี้ สำหรับระยะปากทางออกที่ 25.4 mm ที่สมการที่ (6) และสำหรับระยะปากทางออกที่ 17.4 mm ที่สมการที่ (7) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$C_i(d_i) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d_i - 3500 \mu m}{3500 \mu m} \right)^{0.82} \right] \quad (6)$$

$$C_i(d_i) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d_i - 3500 \mu m}{3500 \mu m} \right)^{1.62} \right] \quad (7)$$

7. สรุปการทดลอง และแนวทางของงานในอนาคต

การทดลองย่อยแร่ด้วยเครื่องย่อยแร่แบบแผ่นคู่ขนาดห้องปฏิบัติการ โดยตั้งค่าปากทางออกที่แตกต่างกัน พบว่าที่เงื่อนไขการย่อยแร่ที่ปากทางออกมีขนาดเล็ก แร่หลังบดจะมีขนาดละเอียดมากกว่า และทำให้ความน่าจะเป็นของการถูกบดมีค่าเพิ่มมากขึ้น

แบบจำลองความน่าจะเป็นของการแตกหักที่สามารถใช้ในงานได้มี 4 แบบจำลองคือ Nikolov (2002) Whiten และ White (1979) 4PL และ Vogel และ Peukert (2004) และแบบจำลองที่มีการตั้งค่าคงที่ในแบบจำลองโดยคำนึงถึงปัจจัยของเครื่องจักรคือ Nikolov (2002)

จากการเปรียบเทียบของ 3 แบบจำลอง คือ Nikolov (2002) Whiten และ White (1979) และ 4PL แบบจำลองที่มีความไวมากและช้าต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมรูปร่าง ตามลำดับคือ Nikolov (2002) 4PL และ Whiten และ White (1979)

จากปัญหาความแม่นยำต่ำจากการคาดการณ์เพื่อเตรียมหิน 0.75 นิ้ว เพื่อการก่อสร้าง แล้วเกิดหินฝุ่นมากเกินความต้องการของตลาด และปัญหาในการระบาย กองแร่รอขาย ฯลฯ ในอดีตแก้ได้โดยการใช้ประสบการณ์ในการตั้งค่าเครื่องจักรของผู้ปฏิบัติงานในโรงโม่หิน แต่ในอนาคตแบบจำลองของความน่าจะเป็นในการบดด้วยเครื่องย่อยแร่แบบแผ่นคู่นี้ โดยจะถูกนำไปศึกษาต่อ และ ผสมเข้ากับเครื่องจักรอื่น คือ ตะแกรงร่อนคัดขนาด เครื่องบดแร่ด้วยลูกบอล ซึ่งการศึกษาของ การกระจายตัวของแร่หลังบด สมการความน่าจะเป็นในการบด และสมการการแตกหักของแร่ จะถูก

นำมารวมกัน เพื่อใช้ประโยชน์ในการเดินวงจรการบดแร่ เพื่อที่จะได้ แร่หลังบดที่มีขนาดที่ต้องการให้ตรงกับความต้องการของผู้ซื้อ และเกิดขนาดของแร่หลังบดที่ไม่ต้องการน้อยลง เพื่อเป็นการอนุรักษ์ทรัพยากรแร่

สุดท้ายข้อมูลทั้งหมดจะถูกนำมาเขียนโปรแกรมเพื่อสร้างเครือข่ายประสาทเทียม เพื่อทำการเลือกใช้พารามิเตอร์ที่ดีที่สุด เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ในเวลาอันสั้นที่สุด ฯลฯ โดยโครงสร้างของการทำงานจะถูกพัฒนาให้สั้นที่สุดไปเรื่อย ๆ โดยผู้พัฒนาการเรียนรู้ของปัญญาประดิษฐ์จะสามารถสอนให้โปรแกรมพัฒนาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สมบูรณ์แล้ว ได้อีกหลายร้อยหลายพันรอบได้ จนเจอหนทางที่ดีที่สุดได้ แล้วเมื่อมีความต้องการในการผลิตจริง ผู้ปฏิบัติงานสามารถตั้งค่าเครื่องจักรและทำตามคำแนะนำของโปรแกรมได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยแนวคิดใหม่ ๆ จากการประสิทธิ์ประสาทวิชาของ ศ.ดร.โมจทาบกา กาฮ์ดีรี อดีตที่ปรึกษาฯ ฐนิพนธ์ ณ มหาวิทยาลัยแห่งลีดส์ สหราชอาณาจักร ขอขอบคุณ ผู้บริหาร คณาจารย์ เจ้าหน้าที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา สำนักงานผู้ดูแลนักเรียนในประเทศสหราชอาณาจักร สำนักงานคณะกรรมการข้าราชการพลเรือน กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้สนับสนุนค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการศึกษาเล่าเรียนในการศึกษาระดับปริญญาเอกที่ประเทศอังกฤษซึ่งเป็นพื้นฐานของการจดประกายทางความคิดที่จะนำมาประยุกต์เป็นงานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณจรัสชัย รัตนาลดาวัลย์ และคุณภคศิริ ศิริลักษณ์ ซึ่งเปิดโอกาสให้ใช้เวลาทุ่มเททำงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนคอยช่วยเหลือผู้วิจัยเสมอมาจนเสร็จสิ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] Barabady J, Kumar U. Reliability analysis of mining equipment: A case study of a crushing

plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran. *Reliability engineering & system safety*. 2008; 93(4): 647–653.

- [2] Peng CL, Scorpio DE, Kibert CJ. Strategies for successful construction and demolition waste recycling operations. *Construction Management & Economics*. 1997; 15(1): 49–58.
- [3] Barabady J, Kumar U. Reliability characteristics based maintenance scheduling: a case study of a crushing plant. *International Journal of Performability Engineering*. 2007;3(3): 319–328.
- [4] Gaskin HL, Lordi AC. Features of Pacific Cement & Aggregates' Moveable Quarry Rock Crushing Plants and Overland Conveyor System. *IEEE Transactions on Industry and General Applications*. 1971; (5): 588–601.
- [5] Briggs CA, Bearman RA. An investigation of rock breakage and damage in comminution equipment. *Minerals Engineering*. 1996; 9(5): 489–497.
- [6] Bearman RA, Barley RW, Hitchcock A. The development of a comminution index for rock and the use of an expert system to assist the engineer in predicting crushing requirements. *Minerals Engineering*. 1990; 3(1,2): 117–127.
- [7] Campbell GM, Bunn PJ, Webb C, Hook SCW. On predicting roller milling performance: Part II. *The breakage function*. *Powder Technology*. 2001; 115(3): 243–255.
- [8] Gupta A, Yan DS. Mineral processing design and operations: an introduction. 2nd ed. *Elsevier*. 2016.
- [9] Austin LG, Luckie PT. Methods for determination of breakage distribution parameters. *Powder Technology*. 1972; 5(4): 215–222.

- [10] Whiten WJ, Walter GW, White ME. A breakage function suitable for crusher models. *Fracture at Work*. 1979.
- [11] Segura-Salazar J, Barrios GP, Rodriguez V, Tavares LM. Mathematical modeling of a vertical shaft impact crusher using the Whiten model. *Minerals Engineering*. 2017; 111: 222–228.
- [12] Attou A, Clepkens O, Gustin R. Modelisation de la fragmentation de matiere solide dans un concasseur a chocs a axe horizontal. *CTP Report TP*. 1999; 909: 19–28.
- [13] Nikolov S. A performance model for impact crushers. *Minerals Engineering*. 2002; 15(10): 715–721.
- [14] Whiten WJ, White ME. Modelling and simulation of high tonnage crushing plants. Proc. In: 12th Int. Mineral Processing Cong. Sao Paulo. 1979; 2: p. 148–158.
- [15] Vogel L and Peukert W. Determination of material properties relevant to grinding by practicable lab-scale milling tests. *International Journal of Mineral Processing*. 2004; 74: S329–S338.
- [16] Vogel L, Peukert W. From single particle impact behaviour to modelling of impact mills. *Chemical Engineering Science*. 2005; 60(18): 5164–5176.
- [17] Wang D, Burton RL, Nahm MH, Soong SJ. A four-parameter logistic model for estimating titers of functional multiplexed pneumococcal opsonophagocytic killing assay. *Journal of biopharmaceutical statistics*. 2008; 18(2): 307–325.
- [18] Prinz H. Hill coefficients, dose–response curves and allosteric mechanisms. *Journal of chemical biology*. 2010; 3(1):37–44.
- [19] Mukhopadhyay SK and Setaputra R. The role of 4PL as the reverse logistics integrator: Optimal pricing and return policies. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 2006; 36(9): 716–729.
- [20] Denver Equipment Company. *Denver Equipment Index*. 2nd ed. Denver Equipment Company. Colorado: Denver Equipment Company. 1947.