



ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการ บดด้วยโม่บด (ตอนที่ ๑)

Ball Mill: How to consider factors to its performance

>>> โดย วิรัช เลิศพรหม

วศ.บ. (วิศวกรรมเซรามิก) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิศวกรประจำแผนกเตรียมวัตถุดิบ บริษัท สยามซานิทารีแวร์ อินดัสทรีส์ จำกัด

๑ บทนำ

ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมเซรามิกหรืออุตสาหกรรมอื่นๆ ที่มีความต้องการลดขนาดอนุภาคของวัตถุดิบลงจากวัตถุดิบตั้งต้นขนาด 5 - 250 มิลลิเมตร^[1] โดยให้มีขนาดเล็กอยู่ในระดับไมโครเมตร ก็คงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้องใช้กระบวนการบดย่อยด้วย “Ball Mill” หรือ โม่บด เนื่องจากเป็นเครื่องจักรที่ประดิษฐ์ขึ้นได้ง่าย มีการใช้งานที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งยังคุ้มค่าแก่การลงทุน โดยทั่วไปโม่บดสามารถบดวัตถุดิบให้มีขนาดเล็กได้ในระดับ 10 - 300 ไมครอน^{[1],[11]}

หลักการทั่วไปของการบดย่อยวัตถุดิบด้วยโม่บดคือ การให้วัตถุดิบถูกกระทบ

(Catacrating/Impact grinding force) และ/หรือขัดสี (Abrasion/Attrition grinding force) ด้วยลูกบด จนเกิดการแตกและสลายตัวเล็กลงจนได้ขนาดตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตามด้วยการพัฒนาทาง วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสมัยใหม่ ทำให้การลดขนาดวัตถุดิบด้วยโม่บดนั้นกำลังจะหมดไป โดย เทคโนโลยีที่ว่ามีนี้ได้แก่ BARMAC และ MAXMILL^[2] หากแต่โรงงานเซรามิกในประเทศได้ลงทุนใน การสร้างโม่บดไว้แล้ว ครั้นจะให้เปลี่ยนไปลงทุนในเทคโนโลยีใหม่ ๆ เห็นว่าจะเป็นเรื่องที่เป็นไปได้ยาก เนื่องจากสถานะเศรษฐกิจปัจจุบัน ที่ไม่เอื้อต่อการลงทุนติดตั้งเครื่องจักรใหม่ ๆ

ดังนั้น หากเราเป็นผู้ใช้งานโม่บดอยู่ แต่อยากทราบว่าโม่บดที่มีอยู่นั้นถูกควบคุมให้ทำงานได้ อย่างเต็มประสิทธิภาพหรือไม่ ในบทความนี้อาจเป็นส่วนหนึ่งที่จะช่วยท่านผู้อ่านได้แนวทางในการ ศึกษาโม่บดและทำให้โม่บดนั้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทความนี้จะกล่าวถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการบด เพื่อเป็นแนวทางที่สามารถปรับปรุง กระบวนการบดได้ อย่างไรก็ตามข้อมูลทั้งหมดนี้ได้ถูกรวบรวมและเรียบเรียงขึ้นจากบทความหลาย ๆ บทความ อีกทั้งจากประสบการณ์การทดลองโดยตรงของผู้เขียน ซึ่งอาจไม่ครอบคลุมทั้งหมดของราย ละเอียด แต่ก็เพียงพอที่จะเป็นแนวทางในการนำไปปรับปรุงพัฒนากระบวนการบดให้ดีขึ้นได้

๒ ตัวแปรหลักในการพิจารณาถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพของโม่บด

โดยทั่วไปโม่บดสามารถทำการบดได้ใน 2 ลักษณะคือ การบดแบบเปียก (Wet grinding) และ การบดแบบแห้ง (Dry grinding) โดยในบทความนี้จะนำเสนอในรายละเอียดของการบดแบบเปียก มากกว่าการบดแบบแห้ง เนื่องจากอุตสาหกรรมเซรามิกส่วนใหญ่จะเป็นการบดแบบนี้ และการบดแบบ เปียกนั้นมีรายละเอียดปลีกย่อยมากกว่าการบดแบบแห้ง

ขั้นแรกของการพิจารณาถึงประสิทธิภาพของโม่บดนั้นต้องทราบว่า ด้วยปริมาตรทั้งหมดของโม่ สามารถใส่ลูกบดได้ประมาณร้อยละ 50 โดยภายในลูกบดนี้จะส่งผลให้เกิดช่องว่างหรือ Void Fraction โดยอัตโนมัติประมาณร้อยละ 40 ดังนั้นก็จะเหลือพื้นที่ในการใส่วัตถุดิบและน้ำอีกประมาณร้อยละ 30^[1]

ในบทความนี้ไม่ขอกล่าวถึงอิทธิพลของลูกบด เนื่องจากอุตสาหกรรมเซรามิกส่วนใหญ่จะใช้ลูก บดอะลูมินาอยู่แล้ว (Hi-Density Alumina Grinding Media) ซึ่งเป็นลูกบดที่ให้ประสิทธิภาพการบดดี โดยปกติลูกบดอะลูมินาจะมีความหนาแน่นประมาณ 3.55 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตรและมีการขึ้นรูปอยู่ 2 ลักษณะคือ 1) การขึ้นรูปแบบกลิ้ง(Rolling Forming) และ 2) การขึ้นรูปแบบอัด (Pressed forming) ซึ่งความสามารถในการบดเหมือนกัน แต่แตกต่างกันในเรื่องอัตราการสึกหรอของลูกบดที่การขึ้นรูป แบบกลิ้งจะมีอัตราการสึกหรอที่ต่ำกว่า แต่ในขณะเดียวกันก็มีราคาต่อหน่วยลงทุนที่สูงกว่าเช่นกัน^[2]

นอกจากข้อมูลในข้างต้นที่กล่าวมานี้ ยังมีตัวแปรอีกหลายตัวต้องนำมาพิจารณา เพื่อให้เกิดการ บดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวแปรเหล่านี้ประกอบด้วย

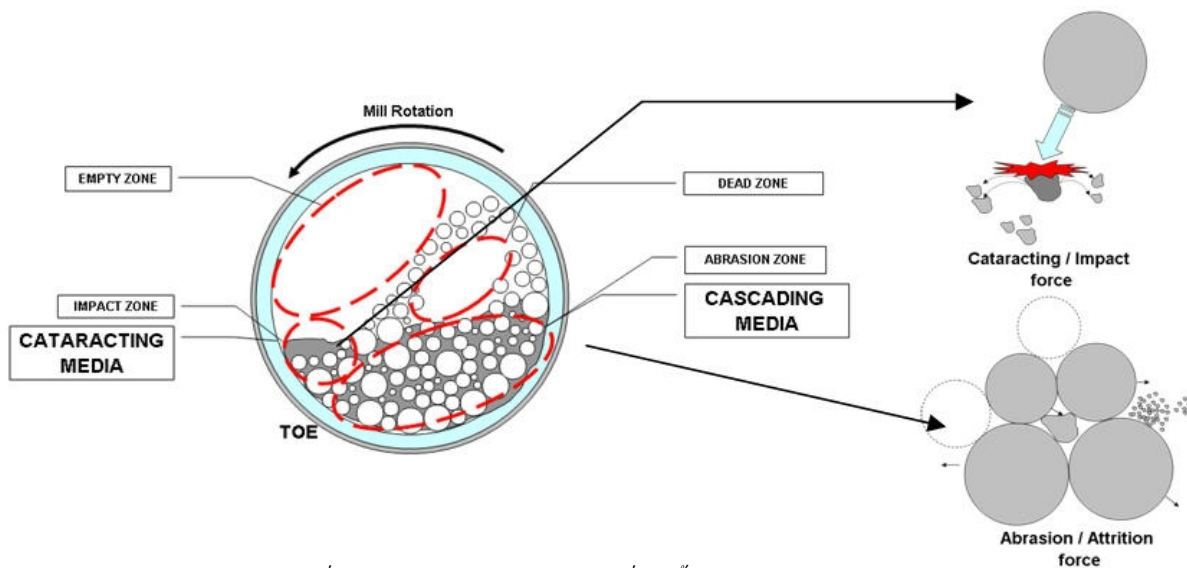
1. คุณสมบัติเฉพาะตัวของวัตถุดิบ (Raw Materials Characterization) เช่น แหล่งกำเนิด ขนาดและความสามารถในการแตกตัว (Source Size and grindability)

2. ความเร็วรอบโม่บด (Mill Rotational Speed)
3. ปริมาณลูกบดและการกระจายขนาดอนุภาคของลูกบด (Grinding media charging quantity and their size distribution)
4. ขนาดของวัตถุดิบต่อลูกบด (Raw Materials Size to grinding media size)
5. ค่าความหนาแน่นและความหนืดของวัตถุดิบที่ใช้ในการบดสำหรับการบดแบบเปียก (Raw materials slurry viscosity and concentration)
6. อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบในโม่บด (Raw materials suspension ratio)

การปรับปรุงการบดต้องพิจารณาในทุกหัวข้อประกอบกัน เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงที่สุดและตัวแปรดังกล่าวไม่ได้เรียงตามลำดับความสำคัญ ในความเห็นของผู้เขียนเห็นว่า ตัวแปรแต่ละตัวส่งผลต่อประสิทธิภาพการบดเท่ากัน ไม่มีตัวแปรใดที่สำคัญที่สุดและไม่มีตัวแปรใดที่สำคัญน้อยที่สุดเช่นกัน ดังนั้นจึงต้องนำทุก ๆ ตัวแปรมาพิจารณาร่วมกัน

๓ หลักการทำงานของโม่บด

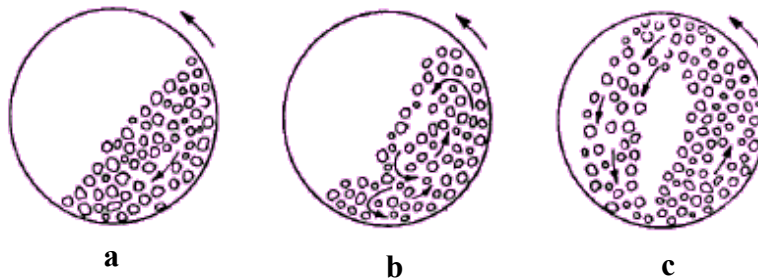
เมื่อโม่บดทำงาน จะทำให้เกิดกลไกต่าง ๆ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ภาพแสดงกลไกการทำงานที่เกิดขึ้นภายในโม่บด (วิรัช, 2008)

เมื่อโม่บดหมุนจนได้รอบตามที่กำหนดไว้ จะสามารถอธิบายกลไกภายในโม่บดได้ดังนี้ กระบวนการบดที่เกิดขึ้นภายในประกอบด้วย 2 แรงกระทำคือ 1) การบดที่เกิดจากการตกกระทบของลูกบด (Cataracting Media) กับวัตถุดิบป้อนบริเวณ Impact Zone 2) การบดที่เกิดจากแรงขัดสีของลูกบด (Cascading Media) กับวัตถุดิบป้อนบริเวณ Abrasion Zone นอกจากนี้หากปราศจากตัวแปรอื่น ๆ เช่น ความเข้มข้นของ Slurry และแรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อลูกบดแล้ว ในการบดครั้งหนึ่ง ๆ จะมีส่วนที่เป็นช่องว่างหรือ Dead Zone ซึ่งเป็นจุดที่ไม่เกิดการบดใด ๆ โดยอัตโนมัติ ในส่วนของ Empty

Zone จะเกิดขึ้นเอง (เมื่อพิจารณาที่ความเร็วรอบ 60-80% ของความเร็ววิกฤติ) จะมีปริมาณมากหรือน้อยนั้นก็ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของโม่บด เช่น หากให้อัตราส่วนความเร็วรอบต่อความเร็ววิกฤติ (N_{op}/N_c) มากขึ้นก็จะทำให้เกิด Empty Zone ได้น้อยลง เนื่องจากลูกบดสามารถวิ่งขึ้นไปได้สูงกว่าเดิม ในขณะเดียวกันก็จะสามารถเพิ่ม Impact Zone ได้มากขึ้นด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 2 ภาพแสดงการเคลื่อนที่ของลูกบดภายในโม่บดที่มีความเร็วรอบที่แตกต่างกัน
a. ความเร็วรอบต่ำ b. ความเร็วรอบปานกลาง และ c. ความเร็วรอบสูง (Cullen, 1947)

อย่างไรก็ตามวัสดุบดบางชนิดไม่ต้องการ การบดแบบแรงตกกระทบ เนื่องจากขึ้นอยู่กับขนาดตั้งต้นของวัสดุบดป้อนว่ามีขนาดใหญ่หรือเล็กเพียงใด เพราะวัสดุบดที่มีขนาดเล็กอาจใช้การบดด้วยแรงแบบขัดสี ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพการบดที่ดีกว่า ดังนั้นหากตั้งคำถามว่า การบดที่ดีต้องให้เกิดการบดด้วยแรงแบบใด ระหว่างการบดใน Impact Zone หรือ Abrasion Zone สามารถอธิบายในภาพกว้างได้ว่าขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุบดป้อนว่ามีขนาดเท่าใด

ในส่วนของการละเอียดของการบดที่เกิดขึ้นด้วยแรงขัดสี หากพิจารณาในรายละเอียดก็สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ว่าการแตกตัวของวัสดุบดประกอบด้วย 2 กลไกคือ Chipping และ Abrasion กล่าวคือ Chipping เป็นการบดที่ทำให้เกิดอนุภาคหยาบหลุดออกมาจากเม็ดวัสดุบดป้อนขนาดใหญ่ใหญ่ แต่ Abrasion คือ การบดที่ทำให้เกิดอนุภาคเล็ก ๆ จากอนุภาคหยาบอีกต่อหนึ่งหรืออาจกล่าวรวมกันได้ว่ากระบวนการบดด้วยแรงขัดสีนั้นรวมกันเรียกว่า Attrition

ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของทั้ง 6 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบดด้วยโม่บดว่ามีที่มาที่ไปอย่างไร โดยผู้เขียนไม่ได้เรียงตามลำดับความสำคัญของแต่ละหัวข้อ ดังนั้นผู้อ่านเองสามารถเริ่มอ่านจากหัวข้อใดก่อนก็ได้

1. คุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุบด (Raw Materials Characterization) เช่น แหล่งกำเนิด ขนาดและความสามารถในการแตกตัว (Source Size and grindability)

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงผลของคุณลักษณะเฉพาะตัวของวัสดุบดแต่ละชนิดที่ส่งผลต่อการบด เช่น แหล่งกำเนิด ขนาดก่อนเข้าบดของวัสดุบดป้อน (Feeding Size) และความสามารถในการแตกตัว (Grindability) แต่จะไม่ขอกกล่าวถึงรายละเอียดของแหล่งกำเนิดวัสดุบด เนื่องจากบางครั้งเราจำเป็นต้องใช้วัสดุบดแหล่งนั้น เพราะต้นทุนหรือเหตุผลอย่างอื่น แต่สิ่งที่สามารถหาคำตอบเพื่อปรับปรุงกระบวนการบดได้ คือ ขนาดของวัสดุบดป้อนและความสามารถในการแตกตัว

โดยทั่วไปหากกล่าวถึงขนาดตั้งต้นของวัตถุดิบที่ต้องการบดด้วยโม่บดนั้น ควรมีขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร^[4] หรือหากมีขนาดใหญ่กว่านี้ก็สามารถบดได้เช่นกัน แต่ต้องทำการปรับปรุงที่ตัวแปรอื่นๆ เช่น ขนาดของลูกบดหรือความเร็วรอบ เป็นต้น แต่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพที่อาจต่ำลง รายละเอียดของขนาดวัตถุดิบและลูกบดที่เหมาะสมนั้นจะขอกกล่าวในหัวข้อถัดไป

ค่าความสามารถในการแตกตัวของวัตถุดิบ สามารถหาได้จากการทดสอบค่า Grindability ของวัตถุดิบแต่ละชนิดได้ โดยอยู่ในหน่วย g/revolution^[5] หรืออาจอยู่ในรูปของดัชนีงาน (Working Index) ซึ่งอยู่ในหน่วย kWh/Ton^[6]

คุณสมบัติเฉพาะของวัตถุดิบป้อน ได้ถูกอธิบายด้วยทฤษฎีหลายทฤษฎี ซึ่งกล่าวถึงความสามารถในการบดในที่นี้ขอยกตัวอย่างในรูปแบบของ Working Index ได้แก่ Griffith's fracture theory, Bond's theory, Rittinger's theory, Kick's theory และ Hukki's theory ซึ่งทฤษฎีที่แพร่หลายที่สุดเห็นจะเป็น **Bond Theory** โดย Bond ได้เสนอสมการการหาค่า Working Index ไว้ดังนี้^[6]

$$E = 100E_i \left(\frac{1}{\sqrt{X_p}} - \frac{1}{\sqrt{X_f}} \right) \text{ ----- (1)}$$

เมื่อ E คือ พลังงานที่ใช้ในการบดวัตถุดิบ

E_i คือ Bond Working Index

X_p คือ ขนาดของวัตถุดิบหลังการบด (μm)

X_f คือ ขนาดของวัตถุดิบป้อน (μm)

$$E_i = 2.50C_s / \rho_s \text{ ----- (2)}$$

เมื่อ C_s คือ Impact Crushing Resistance (ft.lb/in)

ρ_s คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของวัตถุดิบป้อน

Working Index สามารถหาได้จากการบดในโม่บดขนาดทดลอง แต่ในบทความนี้จะไม่ขออธิบายในส่วนของการหา Working Index แต่ได้แสดงไว้ในตารางด้านล่าง

นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่าง Working Index กับ Grindability สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$W_i = \frac{4.45}{P_i^{0.22} G^{0.8} (P^{0.5} - F^{0.5})} \text{ ----- (3)}$$

เมื่อ W_i คือ Working Index

P_i คือ ขนาดของตะแกรงที่พิจารณา (μm)

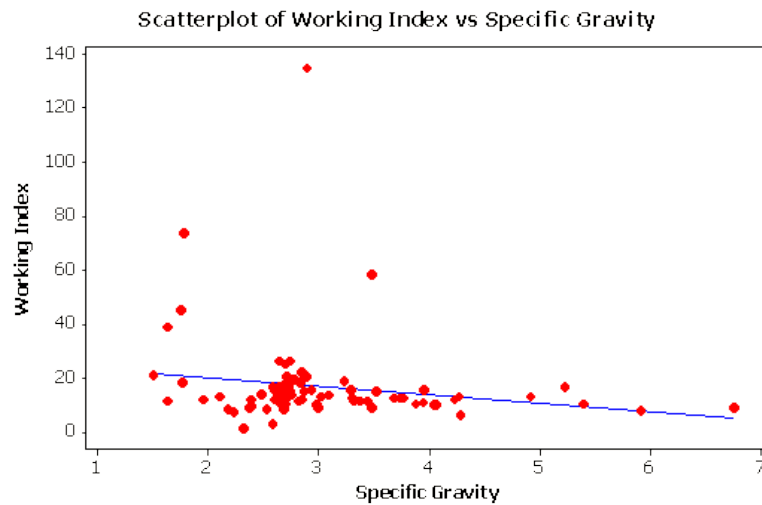
G คือ Grindability (g/rev.)

P คือ ขนาดของวัตถุดิบที่ผ่านการบด (80%) (μm)

F คือ ขนาดของวัตถุดิบป้อน (80%) (μm)

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสมการที่ (2) จะเห็นว่า Working Index ขึ้นอยู่กับความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, ρ_s) เมื่อความถ่วงจำเพาะมีค่ามากขึ้น จะทำให้ E_i มีค่าต่ำลงและจากการวิเคราะห์

ผลทางสถิติพบว่า Working Index จะมีค่าน้อยลงเมื่อความถ่วงจำเพาะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อวัตถุดิบป้อนมีความถ่วงจำเพาะสูงก็จะสามารถแตกตัวดีกว่าวัตถุดิบป้อนที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ



กราฟที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Working Index และ Specific Gravity (วีรัช, 2009)

ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่า Working Index ของวัตถุดิบชนิดต่างๆ ^[7]

Material	No. of tests	Specific gravity	Work index†	Material	No. of tests	Specific gravity	Work index†
All materials tested	2088	—	13.81	Taconite	66	3.52	14.87
Andesite	6	2.84	22.13	Kyanite	4	3.23	18.87
Barite	11	4.28	6.24	Lead ore	22	3.44	11.40
Basalt	10	2.89	20.41	Lead-zinc ore	27	3.37	11.35
Bauxite	11	2.38	9.45	Limestone	119	2.69	11.61
Cement clinker	60	3.09	13.49	Limestone for cement	62	2.68	10.18
Cement raw material	87	2.67	10.57	Manganese ore	15	3.74	12.46
Chrome ore	4	4.06	9.60	Magnesite,	1	5.22	16.80
Clay	9	2.23	7.10	Mica	2	2.89	134.50
Clay, calcined	7	2.32	1.43	Molybdenum	6	2.70	12.97
Coal	10	1.63	11.37	Nickel ore	11	3.32	11.88
Coke	12	1.51	20.70	Oil shale	9	1.76	18.10
Coke, fluid petroleum	2	1.63	38.60	Phosphate fertilizer	3	2.65	13.03
Coke, petroleum	2	1.78	73.80	Phosphate rock	27	2.66	10.13
Copper ore	308	3.02	13.13	Potash ore	8	2.37	8.88
Coral	5	2.70	10.16	Potash salt	3	2.18	8.23
Dolomite	18	2.82	11.31	Pyrite ore	4	3.48	8.90
Emery	4	3.48	58.18	Pyrrhotite ore	3	4.04	9.57
Feldspar	8	2.59	11.67	Quartzite	16	2.71	12.18
Ferrochrome	18	6.75	8.87	Quartz	17	2.64	12.77
Ferromanganese	10	5.91	7.77	Rutile ore	5	2.84	12.12
Ferrosilicon	15	4.91	12.83	Sandstone	8	2.68	11.53
Flint	5	2.65	26.16	Shale	13	2.58	16.40
Fluorspar	8	2.98	9.76	Silica	7	2.71	13.53
Gabbro	4	2.83	18.45	Silica sand	17	2.65	16.46
Galena	7	5.39	10.19	Silicon carbide	7	2.73	26.17
Garnet	3	3.30	12.37	Silver ore	6	2.72	17.30
Glass	5	2.58	3.08	Sinter	9	3.00	8.77
Gold ore	209	2.86	14.83	Slag, iron blast furnace	6	2.39	12.16
Graphite	6	1.75	45.03	Sodium silicate	3	2.10	13.00
Gravel	42	2.70	25.17	Spodumene ore	7	2.75	13.70
Gypsum rock	5	2.69	8.16	Syenite	3	2.73	14.90
Ilmenite	7	4.27	13.11	Tile	3	2.59	15.53
Iron ore	8	3.96	15.44	Tin ore	9	3.94	10.81
Hematite	79	3.76	12.68	Titanium ore	16	4.23	11.88
Oolitic	6	3.32	11.33	Uranium ore	20	2.70	17.93
Limanite	2	2.53	8.45	Zinc ore	10	3.68	12.42
Magnetite	83	3.88	10.21				

†Caution should be used in applying the average work index values listed here to specific installations, since individual variations between materials in any classification may be quite large.

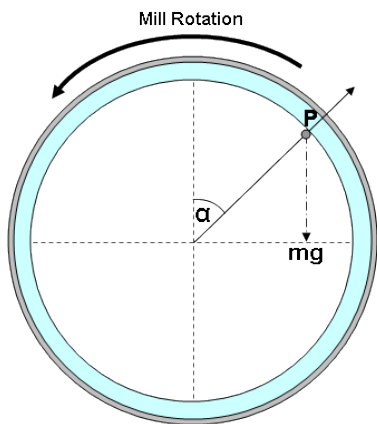
2. ความเร็วรอบโม่บด (Mill Rotational Speed)

ในโรงงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไปได้ให้ความสำคัญในเรื่องความเร็วรอบมากขึ้น เพราะในปัจจุบันสามารถปรับหาความเร็วรอบที่เหมาะสมได้ง่าย ด้วยวิธีการใช้ Variable Speed Drive เข้ามาช่วยทดสอบเพื่อหาความเร็วที่เหมาะสม ก่อนการปรับระบบเชิงกลอย่างอื่น

อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่า การปรับเปลี่ยนความเร็วรอบนั้นบางครั้งก็ไม่ใช่คำตอบเดียวเสมอไปที่จะทำให้การบดเกิดประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากเหตุผลทางด้านการใช้พลังงานหรืออัตราการสึกหรอของเครื่องจักรที่อาจเพิ่มสูงขึ้น ในหัวข้อนี้จะแสดงวิธีการคำนวณหาความเร็ววิกฤติว่ามีที่ไปที่มาอย่างไรและควร

การคำนวณค่าความเร็ววิกฤติ ความเร็ววิกฤติหมายถึง ความเร็วรอบที่ทำให้ลูกบอลถูกเหวี่ยงติดไปกับผนังตลอดเวลา ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการบดแบบ Cataracting/Impact Grinding หรือเกิดน้อยมาก ซึ่งสภาพนี้เกิดจากการที่ลูกบอลมีความเร็วเท่ากับความเร็วหนีศูนย์กลางหรือ Gravimetric /Centrifuging Speed ดังนั้นจะเรียกความเร็วนี้ว่า ความเร็ววิกฤติ (Critical Speed) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

เมื่อกำหนดให้	R	คือ	เส้นผ่าศูนย์กลางของโม่บด
	N	คือ	จำนวนรอบในการหมุน
	P	คือ	จุดที่แรงกระทำจากแรงโน้มถ่วงเท่ากับแรงหนีศูนย์กลาง
	m	คือ	มวลของลูกบด



ภาพที่ 3 แสดงแรงที่กระทำต่อลูกบดขณะเกิด Critical Speed (วีรัช, 2008)

ดังนั้น

แรงกระทำเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

$$P = mg \quad \text{----- (1)}$$

แรงหนีศูนย์กลาง

$$F_c = mV^2/R \quad \text{----- (2)}$$

เมื่อลูกบดอยู่ในสถานะของความเร็ววิกฤติ คือ แรงหนีศูนย์กลางเท่ากับ แรงกระทำจากแรงโน้มถ่วง

$$\frac{mV^2}{R} = mg \cos \alpha \quad \text{----- (3)}$$

$$V = 2 \pi R N / 60 \quad (\text{m. /sec.}) \quad \text{----- (4)}$$

แทนค่า (4) ลงในสมการที่ (3) จะได้ความสัมพันธ์

$$\cos \alpha = \frac{4 \pi^2 N^2 R}{60^2 g} \quad \text{----- (5)}$$

จากสมการที่ (5) สามารถหาค่าคงที่ได้

$$\cos \alpha = 0.0011 N^2 R \quad \text{----- (6)}$$

แต่เนื่องจากลูกบดก็มีรัศมีด้วยเช่นกันดังนั้นจึงต้องนำรัศมีของลูกบดมาคิดด้วย แต่เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ จึงคิดค่า R จากเส้นผ่าศูนย์กลาง คือ $R = D/2$

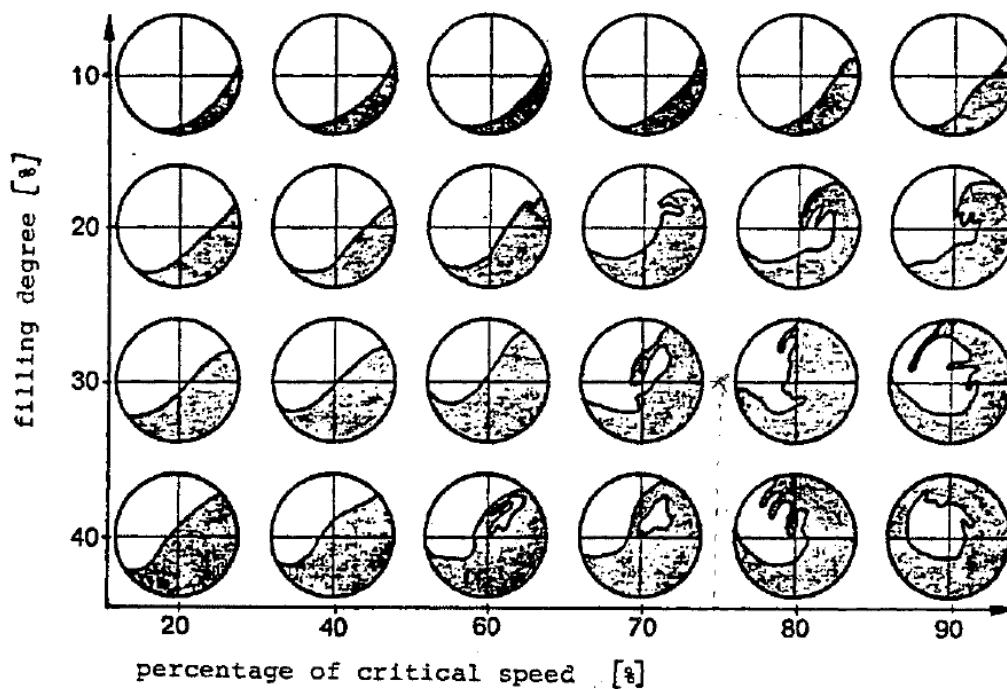
แทนค่า $\cos \alpha = 0.0011 \frac{N^2 (D-d)}{2}$ ----- (7)

เมื่อ D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของโม่บด
d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของลูกบด

ที่จุดความเร็ววิกฤต คือ ความเร็วที่ทำให้ลูกบดติดผนังไปตลอดนั้นคือมุม $\alpha = 0$ หรือ $\cos \alpha = 1$ และ $N = N_c$ ดังนั้นเมื่อทำการแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ (7) จะได้สมการความเร็ววิกฤตดังนี้

$$\text{ความเร็ววิกฤต } (N_c) = \frac{42.3}{(D-d)^{1/2}}$$

ในทางปฏิบัติแล้วความเร็วของโม่บด N_{op} จะอยู่ในช่วง 65 – 80 % N_c ทั้งนี้ก็เป็นเพราะว่าผลของ Filling Degree, f หมายถึงปริมาตรของลูกบดต่อปริมาตรของโม่บด ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวจะส่งผลต่อกำลังงานของมอเตอร์ขับ โดยมอเตอร์จะมีแรงขับเต็มประสิทธิภาพที่ f เท่ากับ 40-45 % [12]



ภาพที่ 4 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f และความเร็ววิกฤต (N_c)

นอกจากตัวแปรทั้งสองนี้แล้วยังเหลืออีก 4 ตัวแปรที่จะขอกกล่าวถึงในตอนที่ 2

เอกสารอ้างอิง

1. Rodjana Phreamhom, Adisak Saleesri and Anantaya Srisang, “Construction of Large Ball mill and Efficiency Test Compared with Small Ball Mill” Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, 2003.
2. “Consider the following factors when selecting your grinding media”, Union Process Inc., OH 44313-4896
3. EIRICH GmbH & Co KG, Posrfach 1160 74732 Germany
4. Dr. Ibrahim Ismail and Dr. Ahmed Sherif, “*Principle of Mechanical Unit Operation Report on Ball Mill*”, Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Cairo University, 2008
5. -----, Grindability and Working Index Determination, Chemical Engineering, Mahidol University, p.7#5
6. Ross W. Smith, Ph. D, “*Size Reduction: Handbook of Chemical Engineering*”, Department of Chemical and Metallurgical Engineering, University of Nevada at Reno, p.468
7. -----, Size Reduction of Particulate Material, Copyright © 2003 Gordon Young, Licensed to ERPT, p.1
8. Bond, *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.*, 193, 484 (1952)
9. Dynamics of Balls and Liquid in a Ball Mill , MODELING SEMINAR SUMMER TERM 2000, Department of Mathematics, University of Kaiserslautern.
10. Andrzej HEIM, Tomasz P. OLEJNIK, AGNIESZKA PAWLAK, “*THE EFFECT OF THE NUMBER OF CONTACTPOINTS BETWEEN GRINDING ELEMENTS ON THE RATE OF GRINDING IN BALL MILLS Physicochemical Problems of Mineral Processing, 38 (2004) 147-155*”, Technical University of Lodz, Faculty of Process and Environmental Engineering, June 15, 2004
11. ดร.วีระยุทธ์ ลอประยูร, เอกสารประกอบการเรียนรายวิชา Powder Technology, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 2546
12. “Holderbank” Cement Seminar 1997, Process Technology — Tube Mill, Holderbank Management&Consulting 1997