บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ในปัจจุบันการบดละเอียดมีความสำคัญในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ มีหลายสิ่งที่ต้องอาศัยกรรมวิธีการบดละเอียดก่อนที่จะมาเป็นผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ กระดาษ เรซิน ยา เครื่องสำอาง สี ผงหมึกสำหรับถ่ายเอกสาร พลาสติก ดินปืน ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อาหาร และ เซรามิก เป็นต้น (Seishin, 1991)

แร่หลายชนิดถูกผ่านเข้ากระบวนการบดละเอียดก่อนกลายเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ต่างๆ อาจนำไปใช้โดยตรงหรืออยู่ในรูปของตัวเติม (Filler) และตัวเคลือบ (Coating) ในอุตสาหกรรมยาง สี และพลาสติก เป็นต้น แร่ที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเติมในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ในอุตสาหกรรมสีและการเคลือบ ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกต (Calcium silicate) เคโอลิน (Kaolin) ไมกา (Mica) และโวลลาสโทไนต์ (Wollastonite) แร่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) และเคโอลิน แร่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาและถ้วยชามได้แก่ ไพโรฟิลไลต์ (Pyrophyllite) โวลลาสโทไนต์ นีฟีลีน (Nepheline) และสยีไนต์ (Syenite) แร่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมกระเบื้องมุงหลังคา ได้แก่ โบลินไกต์ (Bowlingite) คลอไรต์ (Chlorite) และไมกา แร่บางชนิดสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในหลายด้าน ยกตัวอย่างเช่น ทัลก์ (Talc) ใช้เป็นเม็ดสีขาว ช่วยการกระจายตัวของสีเพื่อยืดอายุการใช้งานและป้องกันการแตกของสี เป็นตัวเติมในอุตสาหกรรมเซรามิกผสมเพื่อให้ได้สีที่สว่างขึ้น เพิ่มความหนาแน่น เป็นตัวเติมในอุตสาหกรรมกระดาษเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำหมึก เป็นตัวเติมในอุตสาหกรรมเครื่องมุงหลังคาเพื่ออุดรอยรั่ว กันน้ำ ปรับปรุงค่าความแข็ง ต้านทานความร้อน เป็นตัวเติมในอุตสาหกรรมยางและพลาสติกเพื่อเป็นฉนวนให้กับสายไฟฟ้า ปรับปรุงสมบัติต่างๆ เพิ่มอายุการใช้งาน เป็นตัวเติมในอุตสาหกรรมสิ่งทอเพิ่มความสดใสและความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ ทนความร้อน ทนกรดทนด่าง และยังใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ยา และยาฆ่าแมลงอีกด้วย (Yantang and Luping, 2000)

ไพโรฟิลไลต์และโบลินไกต์มีสมบัติและโครงสร้างผลึกคล้ายกับทัลก์ โดยเฉพาะไพโรฟิล-ไลต์ซึ่งมีสมบัติทางฟิสิกส์คล้ายกันใช้แทนกันได้ในอุตสาหกรรมกระดาษ สี ยาง พลาสติก และเครื่องสำอาง แต่ไพโรฟิลไลต์มีไม่มากมายเท่ากับทัลก์ ไม่สามารถใช้แทนทัลก์ได้โดยสมบูรณ์

จากค่าความแข็งและไม่มีสีขาวเหมือนทัลก์ ส่วนโบลินไกต์สามารถใช้แทนทัลก์ที่คุณภาพต่ำ ซึ่งใช้ในวัสดุมุงหลังคา และยาฆ่าแมลง (Yantang and Luping, 2000)

หินปูนเป็นหนึ่งในแร่ที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมกระดาษมี 2 ประเภท คือ Heavy หรือ Ground calcium carbonate (GCC) ผลิตจากการบดหยาบ (Crushing) และบดละเอียด (Grinding) ส่วน Light หรือ Precipitated calcium carbonate (PCC) ผลิตจากการเผา (Burning) การย่อย (Digestion) การลดคาร์บอน (Carbonising) ทำให้แห้ง (Drying) บดละเอียด (Grinding) และคัดขนาดด้วยตะแกรง พิจารณาคุณภาพจากขนาดที่บดได้ กล่าวคือ Ground calcium มีขนาด 3 ไมครอน Fine calcium มีขนาด 1 – 3 ไมครอน Superfine calcium มีขนาด 0.5 – 0.9 ไมครอน เนื่องจากปัจจุบันเทคโนโลยีเกี่ยวกับเครื่องบดละเอียดพัฒนาไปมากทำให้สามารถผลิต GCC ที่มีขนาดละเอียดถึง 1 ไมครอน จากแร่หลังการบดมากกว่า 90% เป็นเกรดสำหรับใช้ในการเคลือบหรือเป็นตัวเติมในงานที่ต้องการคุณภาพสูง (Yantang and Luping, 2000)

อนุภาคขนาดละเอียดที่ใช้สำหรับเป็นตัวเติมในกระดาษ ขนาดที่บดได้ 70% ต้องเล็กกว่า 2 ไมครอน และถ้าใช้ในด้านของการเคลือบกระดาษ ขนาดที่บดได้ 90 – 97% ต้องเล็กกว่า 2 ไมครอน (Schwarz, 1998)

ตัวเติมสำหรับเคลือบ (Coated filler) สามารถเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ ซึ่งทำให้สินค้ามีราคาแพงกว่าที่ไม่ได้ใช้เป็นตัวเติม (Uncoated filler) ความแตกต่างทางด้านราคาของทั้งสองอยู่ที่ 30 – 100% ขึ้นอยู่กับประเภทของการใช้งาน ตัวเติมขนาดละเอียด (Ultrafine mineral filler) โดยทั่วไป ได้แก่ ทัลก์ ซิลิเกต และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium hydroxides) (Schwarz, 1998)

การพัฒนากระบวนการบดละเอียดเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าของอุตสาหกรรมแร่ ที่ใช้วิธีทางฟิสิกส์หรือทางเคมีหรือทั้งสองอย่าง หลายบริษัทเชื่อว่าสามารถทำให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยต้องควบคุม การกระจายตัวของขนาดอนุภาค และปราศจากสิ่งปนเปื้อน เมื่อรวมทั้งสองปัจจัยเข้าด้วยกัน จะเป็นจุดมุ่งหมายของกระบวนการบดละเอียดของอุตสาหกรรมแร่

เนื่องจากมีความต้องการอนุภาคขนาดละเอียด (Submicron) เพิ่มมากขึ้นในอุตสาหกรรมหลายประเภทดังได้กล่าวมาแล้วในขั้นต้น จึงได้มีการค้นคว้าและพัฒนากระบวนการบดเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูงขึ้น มีการปนเปื้อนจากการบดน้อยที่สุด ปัจจุบันเครื่องบดละเอียดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ บอลมิลล์ โรลเลอร์มิลล์ เครื่องบดแบบสั่น (Vibration mills) Ang mill และ Planetary ball mill เครื่องบดเหล่านี้มีข้อเสียในเรื่องของการสึกหรอ การปนเปื้อนจากเครื่องบด โดยเฉพาะเมื่อบดวัสดุที่มีความแข็งสูง จึงทำให้มีการนำ Jet mill มาใช้บดวัสดุหลายอย่างที่บดได้ยากและต้องระมัดระวังเรื่องความสะอาด ได้แก่ เซรามิกชนิดต่างๆ เป็นต้น

(Seishin, 1991) เครื่องบดละเอียดแบบ Jet mill เป็นอีกหลักการหนึ่งที่อัดอนุภาคด้วยอากาศอัดที่มีความดันสูงให้เข้าไปชนกันเองหรือชนกับผนังเครื่องบดที่มีความแข็งสูง ทำให้เกิดการลดขนาดด้วยการชนอย่างแรง และอนุภาคที่ถูกลดขนาดแล้วจะผ่านเข้าสู่กระบวนการคัดขนาดด้วยลมต่อไป ระบบนี้มีข้อดีหลายอย่าง เช่น การบดเกือบจะสมบูรณ์ในทันทีทันใด ใช้กับวัสดุที่ไวต่อความร้อนได้ ไม่มีการปนเปื้อนในการบด ลดการจับตัวเป็นก้อน อนุภาคที่ได้จะมีการกระจายตัวในช่วงที่แคบ การสึกหรอต่ำ บำรุงรักษาง่ายเนื่องจากไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหว และบดได้อย่างต่อเนื่อง (Seishin, 1991)

สำหรับในประเทศไทยยังไม่มีการใช้เครื่องบดชนิดนี้ในอุตสาหกรรมและยังไม่มีองค์ความรู้ในการควบคุมตัวแปรและภาวะต่างๆของการใช้เครื่องชนิดนี้ ตลอดจนการประยุกต์ใช้กับการบดวัสดุต่างๆ ว่าสามารถทำได้ในระดับใด มีข้อจำกัดในการใช้อย่างไร ดังนั้นภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จึงได้สนใจศึกษาการบดละเอียดโดยใช้เครื่อง Jet mill ที่ประกอบขึ้นเอง เพื่อให้เข้าใจหลักการควบคุมภาวะการบด ตลอดจนความสามารถของเครื่องมือในการบดแร่และวัสดุต่างๆ

ในการบดแร่ละเอียดมากๆ อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Sikong et al, 1990) เมื่อได้รับแรงกดที่กระทำซ้ำๆกัน เช่น ลักษณะแรงที่เกิดขึ้นในเครื่องบดแบบบอลมิลล์ หรือ โรลเลอร์มิลล์ (Sikong et al, 1991) Rumpf (1973) ได้แสดงให้เห็นว่าถึงแม้ว่าเป็นวัสดุเปราะก็มีแนวโน้มที่จะเกิดการเสียรูปแบบพลาสติก เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลงมาก เช่น ที่เกิดกับอนุภาคควอรตซ์ขนาด 1.7 ไมครอน ซึ่งก็เป็นสิ่งสำคัญที่สรุปว่าเป็นพิกัดของการบดโดยใช้แรงกด พฤติกรรมการแตกของอนุภาคเปราะขนาดเล็กจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีขนาดเล็กลงมากๆ จากพฤติกรรมดังกล่าวทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อน(Agglomeration)เมื่อบดเป็นเวลานานขึ้นทำให้อนุภาคมีขนาดโตขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับข้อสรุปของ Ho และ Hersey (1979) แต่การจับตัวเป็นก้อนนี้จะถูกชะลอได้ด้วยการใช้สารเติมช่วยบด (Grinding aids) (Hartley et al, 1978) เพราะมีกลไกการเคลือบอนุภาคเล็กๆไม่ให้จับตัวเป็นก้อน วิธีการนำแร่หรืออนุภาคที่ถูกบดแล้วออกจากโซนการบดทันที ก็ช่วยไม่ให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นในการศึกษาการบดละเอียดโดยการใช้ Jet mill ครั้งนี้ จึงได้ศึกษาถึงผลการบดว่าจะเกิดการจับตัวเป็นก้อนของอนุภาคที่บดแล้วหรือไม่ด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษากลไกของเครื่องบดละเอียดแบบ Jet mill ในเทอมของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการบดแร่ เช่น ความดัน ความแข็งของแร่หรือวัสดุ อัตราการป้อน และขนาดของแร่ป้อน

1.2.2 เพื่อให้ทราบถึงข้อจำกัดของการบดแร่ชนิดต่างๆว่าสามารถบดให้ละเอียดได้ในระดับใด แร่ที่ถูกบดแล้วมีรูปร่างและการกระจายตัวของขนาดเป็นอย่างไร

1.2.3 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดที่บดได้กับตัวแปร เช่น ความดัน ความแข็งของแร่หรือวัสดุ อัตราการป้อน และขนาดของแร่ป้อน

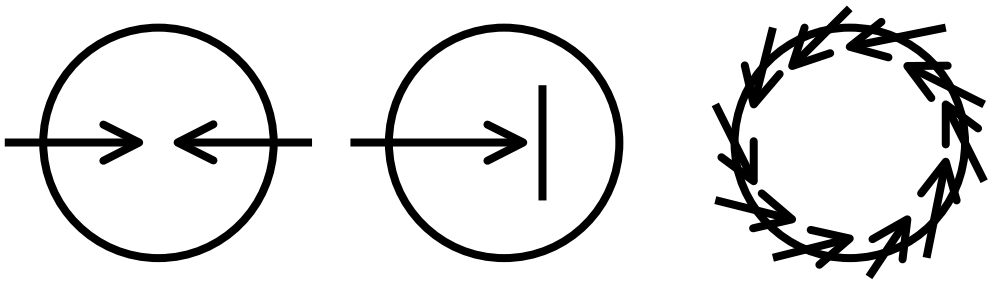
1.3 การตรวจเอกสาร

โดยมากเมื่อกล่าวถึงการบดละเอียดจะต้องนึกถึงเครื่องบดแบบบอลมิลล์ (Ball mill) โรล-เลอร์มิลล์ (Roller mill) เครื่องบดแบบสั่น (Vibration mill) Attrition mill และ Jet mill เป็นต้น ลักษณะแรงที่กระทำต่ออนุภาคที่บดในเครื่องบดแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน เช่น ในเครื่องบดแบบโรลเลอร์มิลล์จะเป็นแรงกด(หรืออัด) ในเครื่องบดแบบบอลมิลล์จะเป็นแรงกระแทกหรือแรงเสียดทานแล้วแต่การออกแบบความเร็วรอบของเครื่อง (Meric, 1978) ในขณะที่ลักษณะแรงที่เกิดขึ้นของเครื่องบดแบบบอลมิลล์ ก็เป็นแรงกระแทกและแรงเสียดสีเช่นเดียวกับ Jet mill แต่จะมีการสึกหรอและการปนเปื้อนสูงกว่าเครื่องบด Jet mill เมื่อใช้บดวัสดุที่มีความแข็งสูงๆ (Arai, 1996) เพราะเครื่องบด Jet mill มีการบุผนังหม้อบดด้วยวัสดุที่มีความแข็งสูง เช่น เซรามิก หรือ ทังสเตน-คาร์ไบด์ ทำให้ค่าบำรุงรักษาเครื่องบดน้อยกว่าแบบบอลมิลล์ จากเหตุผลดังกล่าว Jet mill จึงถูกนำมาใช้บดวัสดุหลายประเภทที่บดได้ยากและต้องระมัดระวังในเรื่องความสะอาด ได้แก่ เซรามิก เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ ซิลิกอนไนไตรด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ แบเรียมไททาเนต ไมกา แมกนีเซียเฟอร์ไรต์ และกราไฟต์ เป็นต้น (Seishin, 1991) ตัวอย่างข้อมูลการบดวัสดุเซรามิกด้วยเครื่องบดแบบ Jet mill แสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 การใช้เครื่องบดแบบ Jet mill บดวัสดุเซรามิก (Russell, 1989)

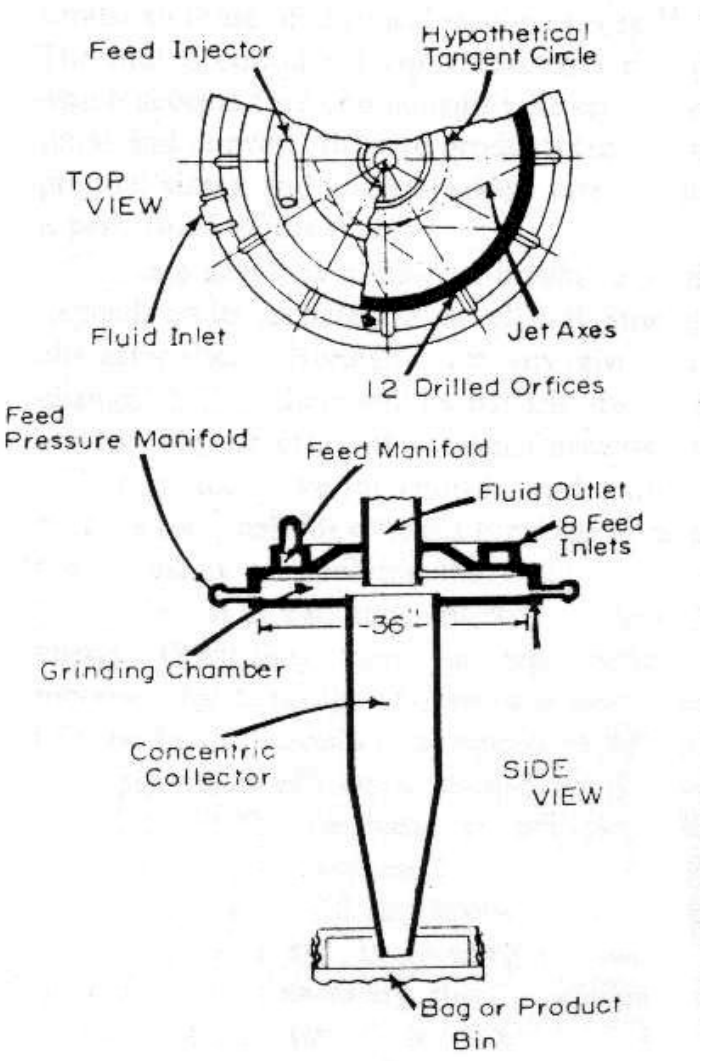
Material	Mill diameter (cm)	Grinding fluid	Material feed rate (kg/hr)	Average particle size (micron)
Al_2O_3	20.3	Air	6.8	3
TiO_2	76.2	Steam	1020	<1
TiO_2	106.7	Steam	1820	<1
MgO	20.3	Air	6.8	5

เครื่องบด Jet mill เครื่องแรกถูกประดิษฐ์ขึ้นในช่วงปี ค.ศ.1880 และได้มีการเปลี่ยนแปลงพัฒนาต่อมา มีหลักการทำให้อนุภาคเกิดการชนใน 3 ลักษณะ ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 ประเภทหลักๆ คือ 1.) Spiral jet mill 2.) Opposed jet mill 3.) Target jet mill 4.) Fluidised – bed opposed jet mill



รูปที่ 1.1 หลักการเคลื่อนที่ของอนุภาคเพื่อทำให้เกิดการบดในเครื่องบดแบบ Jet mill
a) Opposed principle b) Impact principle c) Spiral principle
(Thaler, 2000)

1.) Spiral jet mill หรือ Circular chamber mill เป็นรูปแบบที่เก่าแก่ที่สุดของ Jet mill และยังมีใช้จนถึงทุกวันนี้ โดยเฉพาะใช้ในอุตสาหกรรมยา ในเครื่องบดประเภทนี้อากาศจะถูกอัดด้วยความดันสูงและและถูกปล่อยผ่านช่องที่อยู่รอบๆห้องบดตามแนวเส้นรอบวง (รูปที่ 1.2)



รูปที่ 1.2 เครื่องบดละเอียด Sturtevant Micronizer (Masuda et al,1997)

เมื่ออากาศถูกฉีดออกมาด้วยความเร็วสูงเข้าเครื่องบด ทำให้เกิดแรงอัดบดแร่ที่ถูกป้อนเข้ามาเหนือบริเวณอากาศอัดในบริเวณผนังโดยรอบของเครื่องบด และแร่บดจะออกจากเครื่องบดบริเวณตรงกลางของเครื่องบดเพื่อคัดขนาดต่อไป ขนาดที่ยังใหญ่อยู่จะถูกพัดพามาป้อนใหม่เพื่อบดซ้ำอีกครั้ง (Buckley, 1983) ตัวอย่างการใช้เครื่อง Micronizer บดแร่และวัสดุประเภทต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 การประยุกต์เครื่อง Micronizer บดแร่และวัสดุประเภทต่างๆ

(Perry and Chilton, 1973)

Materials	Product 50% passing Size (μm)	Feed size (μm)	Feed rate (kg/hr)	Grinding fluid used (kg fluid per kg product)
Graphite	2	5600	90	8.5 (stream)
Cryolite	3	250	410	4.0 (stream)
Limestone	3.5	200	450	4.0 (stream)
Hard talc	3.5	700	450	4.0 (stream)
Soft talc	6.5	700	815	2.5 (stream)
Barytes	3.5	400	815	2.2 (stream)
Sulphur	3.5	5600	590	3.5 (air)

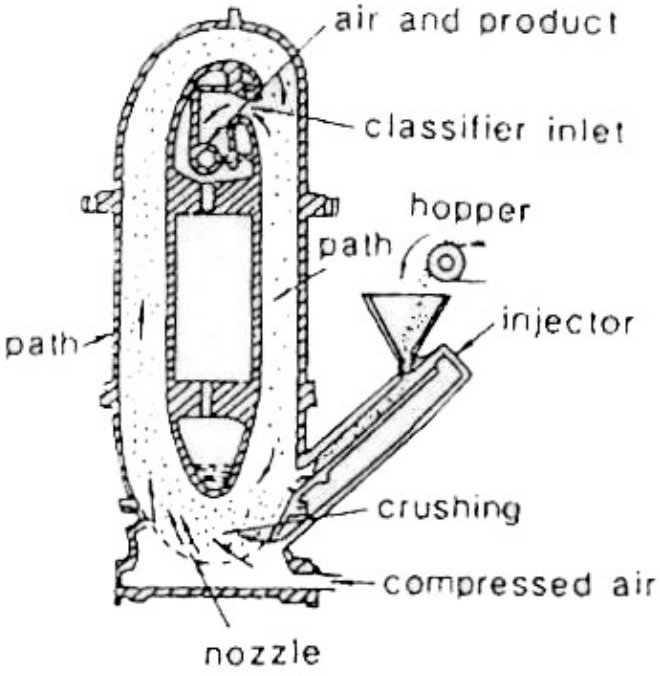
Jet mill ประเภทนี้มีชื่อแตกต่างกันตามบริษัทที่ผลิต เช่น Micronizer Reductionizer Jet – O – Mizer และ Jet Pulverizer เป็นต้น

การหมุนของก๊าซจะเป็นส่วนที่ช่วยพาอนุภาคขนาดเล็กเข้าสู่ศูนย์กลาง อนุภาคหยาบจะโดนเหวี่ยงด้วยแรงหนีศูนย์กลางทำให้เกิดการบดซ้ำอีก (Thaler, 2000) เครื่องบด Micronizer ผลิตโดยบริษัท Sturtevant Mill Corp.มีค่าความจุระหว่าง 0.5 lb/hr ถึง 2 tph ซึ่งคล้ายกับ Jet Pulverizer ที่ผลิตโดยบริษัท Jet Pulverizer Company สำหรับเครื่องบด Jet – O – Mizer ที่ผลิตโดยบริษัท The Fluid Energy Processing & Equipment Company จะมีส่วนสำหรับป้อนอนุภาคยื่นออกมาจากห้องบดที่มีลักษณะเป็นท่อวงกลม บริเวณตรงกลางเป็นทางออกของอนุภาคขนาดละเอียด โดยมากแล้วเครื่องบด Jet – O – Mizer (รูปที่ 1.3) สามารถผลิตอนุภาคขนาด 0.25 – 3 ไมครอน เช่นเดียวกับเครื่องบด Micronizer

ปัญหาจากการไม่สามารถผลิตอนุภาคละเอียดได้เพียงพอกับความต้องการของตลาดจึงมีการพัฒนาและออกแบบเครื่องบดละเอียดแบบ Jet mill ที่เรียกว่า PMT Spiral jet mill SJ50 ซึ่งใช้บดแร่ที่อ่อนและเป็นแผ่น เช่น กราไฟต์ (Graphite) ไมกา (Mica) แบไรต์ (Barite) ทัลก์ (Talc) คาโอลิน (Kaolin) และไดอะโทไมต์ (Diatomite) เป็นต้น โดยเครื่องบดชนิดนี้ไม่ได้เปลี่ยนสมบัติของอนุภาค ได้อนุภาคขนาดแน่นอน ลดการใช้พลังงานในการบดลงได้ 30 % ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น สามารถป้อนแร่ได้อย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วคงที่ สามารถปรับเพื่อให้ได้อนุภาคที่มีความละเอียดที่ต้องการได้ บดแร่ที่มีค่าความแข็งมากๆ เช่น ควอรตซ์ (Quartz) ได้การใช้งานเชื่อถือได้ และใช้งานในระดับอุตสาหกรรมได้ (Thaler, 2000)

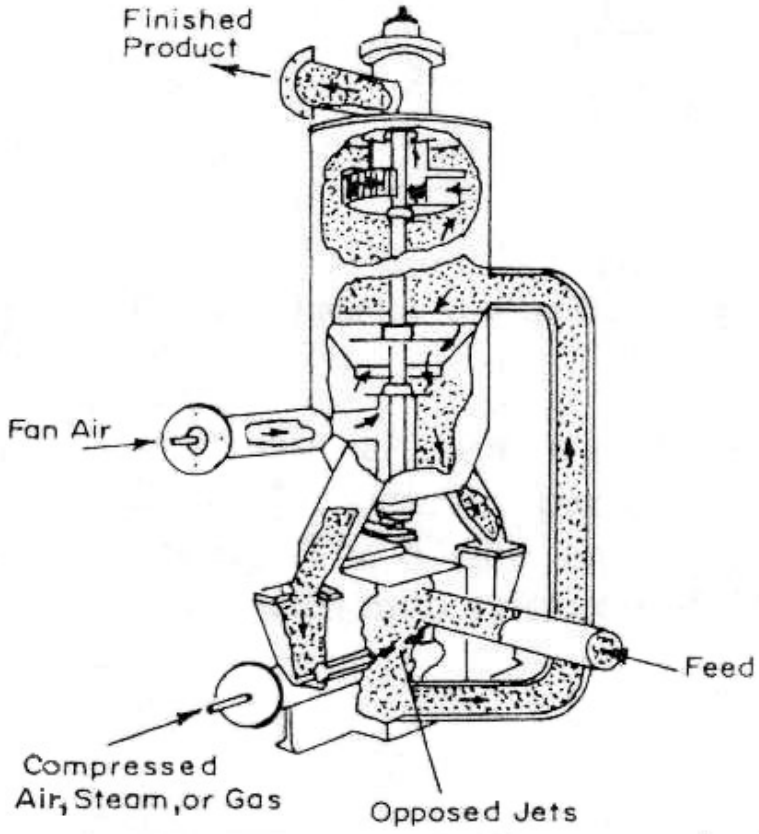
Gommeren et al (2000) ได้เสนอวิธีควบคุมการทำงานของเครื่องบด Spiral jet mill ที่ต่อเป็นวงจรปิดกับเครื่องคัดขนาดอนุภาค โดยใช้หลักการวิเคราะห์ขนาดด้วย Laser diffraction

ในวงจร เพื่อทำให้การใช้พลังงานของกระบวนการลดลง คณะผู้วิจัยได้สร้างพลศาสตร์โมเดล (Dynamic model) ของวงจรการบดขึ้นมา และได้ทำการทดลองเพื่อหาสมการมาอธิบายพฤติกรรมของโมเดล โดยได้ปรับตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อโมเดลการบดนี้ ซึ่งได้แก่ อัตราการป้อน ความดันของก๊าซ และความเข้มข้นของของแข็งที่มีผลต่อขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (X_{50}) ที่บดได้ กล่าวคือ X_{50} มีแนวโน้มแปรตามอัตราการป้อนและแปรผกผันกับความดันของก๊าซ และแนะนำว่าโมเดลนี้สามารถใช้ในการออกแบบโรงบดให้มีสเกลใหญ่ขึ้นได้



รูปที่ 1.3 เครื่องบดละเอียดแบบ Fluid energy mill หรือ Jet - O - Mill (Masuda et al, 1997)

2.) Oppossed jet mill มีการออกแบบที่ทันสมัยกว่าเครื่องบด Spiral jet mill และคล้ายกับเครื่องบด Target jet mill มีลักษณะเฉพาะ คือ มีการเร่งอนุภาคภายในท่อหัวฉีดด้วย ตัวอย่างเครื่องบดชนิดนี้ คือ Majec jet pulverizer ผลิตโดยบริษัท Mikro Pul. (รูปที่1.4) ข้อเสียของประเภทนี้ คือ ความซับซ้อนและความยุ่งยากของการป้อนแร่เข้าสู่ระบบ จะเกิดการพัดพามากองไว้ และในบางครั้งใช้พลังงานสูงมาก ตัวอย่างการใช้เครื่อง Majec jet pulverizer บดแร่และวัสดุประเภทต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1.3 จึงได้มีการพัฒนามาเป็น FP Opposed jet mill โดยบริษัท Oy Finnpulva AB. ที่เครื่องมีเทคโนโลยีการป้อนแบบ 2 เฟส ทำให้ก๊าซและอนุภาคถูกเร่งด้วยความเร็วสูงภายในท่อฉีด อนุภาคจะพุ่งตรงเข้าชนกับอนุภาคตัวอื่นในพื้นที่เล็กๆ ยังผลให้มีประสิทธิภาพสูง สามารถลดการใช้พลังงานในโรงงานได้ถึง 70%



รูปที่ 1.4 เครื่องบดละเอียดแบบ Majac jet pulverizer (Austin and Rogers, 1985)

เครื่องบดละเอียดแบบ Jet mill ระบบนี้ใช้ได้ดีกับแร่ที่มีความแข็งตามสเกลของโมฮส์มากกว่า 4 และมีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ (Cubic) หรือแร่ที่มีลักษณะเป็นแผ่น ใช้ผลิตวัตถุดิบสำหรับ อุตสาหกรรมยา ตัวเติม สี และเซรามิก ข้อดีของเครื่องบดประเภทนี้ คือ เกิดการชนของอนุภาคด้วยกันเองไม่ไปชนกับผนังของเครื่องบดและปราศจากการเจือปนของเหล็ก

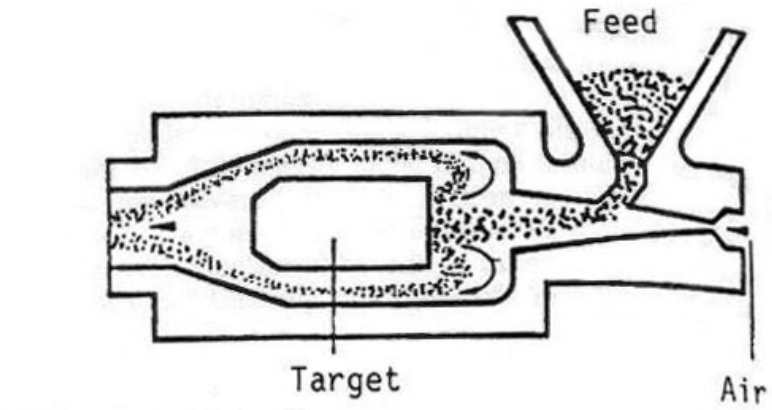
ตารางที่ 1.3 การประยุกต์เครื่อง Majec jet pulverizer บดแร่และวัสดุประเภทต่างๆ (Perry and Chilton, 1973)

Mineral	Product size	Production (kg/hr)	Grinding fluid used
Alumina	100% - 75 μm 50% - 3 μm	5,500	2,850 kg/hr steam at 100 psig (=7,000

			kPa) and 400 °C
Feldspar and silica	90% - 75 μm	3,600	80 m^3/min air at 100 psig and 20 °C
Graphite	90% – 10 μm	25	2 m^3/min air at 100 psig and 20 °C
Mica	95% - 75 μm	725	20 m^3/min air at 100 psig and 425 °C
Rare - earth ore	60% - 1 μm	180	20 m^3/min air at 100 psig and 425 °C

Eskin et al (1999) ได้ศึกษาโมเดลเพื่อที่จะอธิบายถึงกลไกที่อนุภาควิ่งกระทบแผ่นกั้นเรียบ เพื่อศึกษาถึงทิศทางของการวิ่งของอนุภาค ขนาดของความเร็วของอนุภาคขนาดต่างๆที่พุ่งเข้าชน โดยมีความเร็วของก๊าซเริ่มต้นที่ 112 เมตร/วินาที พบว่าแรงหนืดจากของไหล (ก๊าซ) ทำให้ความเร่งของอนุภาคลดลง และถ้าอนุภาคยิ่งเล็กลงก็จะทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ใกล้ๆแผ่นกั้นที่ปะทะจะยิ่งต่ำลง ทำให้สรุปได้ว่า ถ้าขนาดอนุภาคที่ป้อนลดลง ความเข้มข้นของอนุภาคที่เคลื่อนที่ลดลง และการวิ่งชนผนังหม้อบดหรือแผ่นกั้น จะมีรูปแบบเหมือนกับที่เกิดขึ้นใน Opposed jet mill ที่อนุภาควิ่งเข้าชนกันและทำให้เกิดการบดขึ้น คณะผู้ศึกษายังได้เสนอโมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับการเคลื่อนที่ของส่วนผสมระหว่างก๊าซกับอนุภาคภายใน Jet mill และแรงเสียดทานของอนุภาคที่เคลื่อนที่ที่ผนังของหัวฉีด (Nozzle wall) ต่อมา Eskin and Vorapayev (2001) ได้เสนอวิธีวิเคราะห์กระบวนการของ Opposed jet mill โดยได้พิจารณาถึงความเร่งของอนุภาคในหัวฉีดและที่พวยก๊าซ (Jet) ตลอดจนอันตรกิริยาระหว่างพวยก๊าซและพวยอนุภาค เขาได้เสนอวิธีคำนวณประสิทธิภาพของระบบนี้ด้วย และได้หาขนาดแร่ป้อนที่ทำให้การทำงานของเครื่องบดมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยได้สรุปว่าประสิทธิภาพในการเร่งอนุภาคที่โตกว่า 100 ไมครอนจะค่อนข้างต่ำเมื่ออัตราการป้อน 9 ตัน/ชั่วโมง ที่ความดันของก๊าซที่ยอมรับได้สูงสุดในช่วง 6 – 8 บาร์ และในโซนที่เกิดการบดจะเป็นบริเวณที่มีอนุภาคหนาแน่นและเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันด้วยความเร็วต่ำจะถูกพวยของก๊าซความเร็วสูงเข้าวิ่งชน ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กจะไม่สามารถทะลุทะลวงเข้าไปได้ลึกนัก จึงถูกแยกออกจากโซนนี้ด้วยก๊าซ

3.) Target jet mill หรือ Impact jet mill หรือเรียกว่า Nippon jet mill (รูปที่1.5) มีหลักการ คือ อนุภาคถูกเร่งด้วยความเร็วสูงเพื่อให้พุ่งเข้าชนกับแผ่นเป้า ซึ่งผลิตจากวัสดุเซรามิกที่มีค่าความแข็งสูง เช่น โบรอนคาร์ไบด์ เครื่องบดแบบนี้จะแตกต่างกันไปตามตำแหน่งและลักษณะการออกแบบของแผ่นเป้า สามารถใช้กับวัสดุที่มีค่าความแข็งตามสเกลของโมฮส์ 4 – 10 เมื่อบดวัสดุที่มีความแข็งมากๆ ก็ต้องมีแผ่นเป้าหลายๆ แผ่น ในกรณีนี้จะไม่มีการปนเปื้อนของเหล็ก

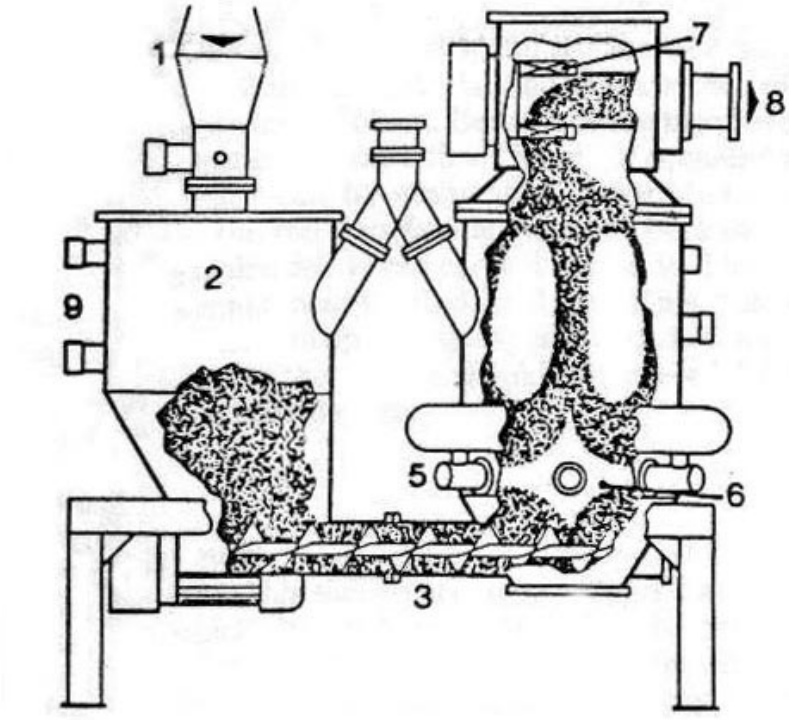


รูปที่ 1.5 เครื่องบดละเอียดแบบ Nippon target jet mill (Russell, 1989)

ได้มีนักวิจัยหลายคนได้เคยศึกษาถึงการตกกระทบบนแผ่นเป้า บ้างก็ใช้กับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ (2-3 มิลลิเมตร) ที่ความเร็วต่ำกว่า 30 เมตร/วินาที (Yuregir et al, 1986) บางกลุ่มก็ศึกษาอิทธิพลของมุมตกกระทบของพวยอนุภาค (Jet of particle) (Salman et al, 1995 และ Vervoorn and Austin, 1990)

Lecoq et al (1999) ได้ศึกษาถึงการแตกของอนุภาคขนาดประมาณ 100 ไมครอน ที่ถูกเร่งด้วยความเร็วสูงถึง 400 เมตร/วินาที ในพวยอากาศที่วิ่งกระทบเป้า เพื่อทำให้เข้าใจพฤติกรรมของการกระแทกและสามารถประเมินความสัมพันธ์ระหว่าง Morphology และ ความแข็งแรงของอนุภาคอะลูมินาที่แคลไซน์และไม่แคลไซน์ คณะผู้วิจัยได้สรุปว่า Hydragillite และอะลูมินามีพฤติกรรมที่แตกต่างกัน โดย Hydragillite จะแตกแบบ Chipping และแตกตาม Cleavage ในขณะที่อะลูมินาเป็นแบบแรกแบบเดียว สำหรับ Hydragillite รูปร่างที่เป็นแผ่นจะต้านทานต่อการบดและการแตก

4.) Fluidized – bed opposed – jet mill เป็นเครื่องบดที่รวมเอาหลักการ 2 หลักการไว้ด้วยกันของ Opposed – jet mill และ Fluidized – bed ที่พัฒนาขึ้นมาโดย Alpine Aktiengesellschaft AG of Ausburg ในประเทศสหพันธรัฐเยอรมันนี ซึ่งมีส่วนทางเข้าของอากาศผ่านหัวฉีดและอนุภาคป้อนในทิศตรงกันข้ามกัน เกิดการลดขนาดจากการพ่นให้อนุภาคชนกันเอง อนุภาคที่ถูกบดแล้วจะถูกพัดพาไปทางด้านบนเพื่อคัดขนาด อนุภาคที่ยังมีขนาดหยาบอยู่จะถูกหมุนเวียนกลับมาบดใหม่ (รูปที่ 1.6) เครื่องบดชนิดนี้สามารถผลิตอนุภาคละเอียดมากๆ ในขณะที่ใช้พลังงานต่ำกว่าประเภทอื่นๆ โดยเฉพาะเมื่อใช้บดแร่ ทัลก์ (Talc) และไมกา (Mica) (Russell, 1989) ตัวอย่างการใช้เครื่อง AFG Fluidized – bed opposed – jet mill บดแร่และวัสดุประเภทต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1.4



Alpine AFG jet mill schematic

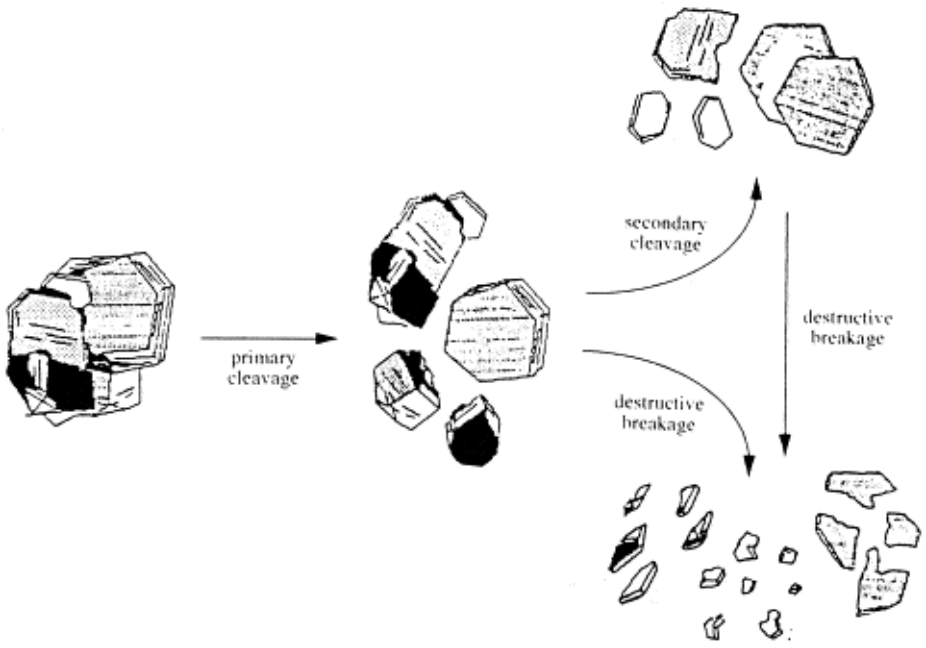
1. flap valve 2. product storage bin 3. feed rating screw 5. opposed nozzles 6. grinding bin 7. classifier 8. fines discharge.

รูปที่ 1.6 เครื่องบดละเอียดแบบ Alpine AFG jet mill (Russell, 1989)

ตารางที่ 1.4 การประยุกต์เครื่อง AFG Fluidized – bed opposed – jet mill บดแร่และวัสดุประเภทต่างๆ (Russell, 1989)

Material	Feed material fineness	Required end fineness	Throughput Model 400 AFG
Bentonite	56 μm	d_{97} = 15 μm	190 kg/hr
Quartz	100 μm	d_{97} = 7 μm	45 kg/hr
Whetstone	15 μm	d_{97} = 6.5 μm	150 kg/hr
Talcum	8 μm 10 μm	d_{97} = 1.7 μm d_{97} = 3 μm	130 kg/hr 330 kg/hr
Wollastonite	87 μm 87 μm	d_{97} = 6 μm d_{97} = 9.5 μm	80 kg/hr 150 kg/hr
Zircon silicate	140 μm	d_{97} = 24 μm	120 kg/hr
Zircon sand	240 μm 240 μm	d_{97} = 4.5 μm d_{97} = 24 μm	15 kg/hr 175 kg/hr

เครื่องบดประเภทนี้ถูกใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น อุตสาหกรรมยา แร่ และเกษตรกรรมมามากกว่า 10 ปี Vogel (1991) ได้อธิบายถึงข้อดีของเทคโนโลยีนี้ที่เหนือกว่า Jet mill ชนิดอื่นๆ ดังนี้ คือ การสึกหรอต่ำ ขนาดเล็กมีการแตกสูง เสียงเบาและใช้พลังงานน้อยกว่า (ต่ำกว่า Micronizer ประมาณ 3 เท่า) ถึงแม้จะมีการใช้งานเครื่องบดชนิดนี้มานาน แต่มีการศึกษาเครื่องมือชนิดนี้ไว้ไม่มาก โดย Epstein (1948) ได้ศึกษาถึงโมเดลของการแตกหักของอนุภาคและฟังก์ชันการเลือกบด ซึ่งต่อมาได้ถูกพัฒนาโดย Reid (1965) และ Austin (1971) ต่อมา Berthiaux and Dodds (1999) ได้ศึกษาและพัฒนาโมเดลนี้เพื่อศึกษาสมรรถนะของ Fluidized bed jet mill (Alpine 100 AFG) ด้วยการทดลองหาจลนศาสตร์อย่างง่ายของการบด (Batch grinding) โดยได้ใช้เกณฑ์ของ “ The residual fraction ” (ส่วนที่ไม่ถูกบด) จากการบด Hydragillite พบว่า ฟังก์ชันการแตกไม่ได้เป็นการกระจายตัวตามปกติ ซึ่งจะใช้อธิบายกลไกการแตกของอนุภาคที่มี Cleavage ขนาดใหญ่ และการแตกของ Cleavage เป็นอนุภาคขนาดเล็ก (รูปที่ 1.7)



รูปที่ 1.7 กลไกการแตกของ Hydragillite ซึ่งมี Cleavage ขนาดใหญ่ ถูกทำให้แตกตาม Cleavage และถูกบดให้เล็กลงด้วยเครื่องบด Fluidized bed jet mill รุ่น Alpine 100 AFG (Berthiaux and Dodds, 1999)

ในทางปฏิบัติการคัดขนาดจะต้องประกอบเข้าไปในเครื่องบดแบบ Jet mill เพื่อทำการแยกขนาดละเอียดและหมุนเวียนขนาดใหญ่กลับไปบดใหม่ Berthiaux et al (1999) จึงได้พัฒนาโมเดลรวมของ Air jet mill กับ Air classifier ของ Alpine 100 AFG mill เพื่อทำนายสมรรถนะโดยรวมของเครื่องบด

เครื่องบดประเภท Fluidized bed jet mill มีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับ Jet mill ประเภทอื่นๆ เช่น การสึกหรอต่ำมาก การใช้พลังงานต่ำ มีระดับการบดสูงสุด และเสียงเบา อย่างไรก็ตามยังไม่มีใครเข้าใจอย่างดี การออกแบบและการทำนายสมรรถนะก็ใช้เพียงสูตรหยาบๆจากประสบการณ์เท่านั้น Tasirin และ Geldart (1999) จึงได้ศึกษาผลของความเร็วอิสระของพวยก๊าซ ระยะทางในการวิ่งชนกันระหว่างหัวฉีดเดี่ยวที่อยู่ตรงกันข้าม 2 คู่ (ด้วยความเร็วสำหรับหัวฉีดแต่ละหัวฉีดที่มีทั้งหมด 4 หัวฉีด) และรูปร่างทางเรขาคณิตต่ออัตราการบดช่วงแรก (Initial rate of grinding) ของ Cracking catalyst ขนาดหยาบ โดยมีขนาดเฉลี่ย 140 ไมครอน พบว่าอัตราการป้อนแร่เพิ่มขึ้นและขนาดเฉลี่ยของแร่ที่ผลิตได้มีขนาดเล็กลงเมื่อความเร็วอิสระของพวยก๊าซเพิ่มขึ้น และสมการของอัตราการบดจะเป็นฟังก์ชัน Power law กับความเร็วอิสระของพวยก๊าซ ดังนี้

$$R_{gr} \quad \alpha \; U^{2-3} \qquad \text{.....(1.1)}$$

เมื่อ R_{gr} คือ อัตราการบด

U คือ ความเร็วอิสระของพวยก๊าซ

และพบว่าการวิ่งชนกันระหว่างอนุภาค เป็นกลไกทำให้เกิดการพุ่งชนเป้าของอนุภาค ซึ่งคิดเป็นประมาณ 20% ของระบบการบดแบบนี้

สามารถใช้สมการ(1.2) เพื่อแสดงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด (d) ของอนุภาคที่สามารถออกจากห้องบดได้ (ASM, 1991) แสดงไว้ดังสมการ

$$d \quad = \quad \sqrt{\frac{18 U_r \mu}{\rho r \omega^2}} \qquad \text{.....(1.2)}$$

เมื่อ μ คือ ความหนืดของของไหล (The viscosity of the fluid)

ω คือ ความเร็วเชิงมุมของอนุภาคหาได้จากอัตราการไหลของของไหลแรงดันสูง (The angular velocity of the particle determined by the volumetric flow rate of high-pressure fluid supplied to the jets)

r คือ รัศมีของแร่ป้อน (The radial of feed size)

ρ คือ ผลต่างของความหนาแน่นระหว่างอนุภาคกับของไหล (The density difference between the particle and fluid)

U_r คือ ความเร็วเชิงรัศมีหาได้จากความดันของของไหลที่พ่นเข้าไป (The radial velocity determined by the fluid entry pressure and velocity)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วสามารถสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพของเครื่อง Jet mill ขึ้นอยู่กับความเร็วของอนุภาคและขนาดของอนุภาค (Eskin et al ,1999และ Tasirin and Geldart, 1999) มุมที่อนุภาควิ่งชนกัน (Salman et al, 1995,Vervoorn and Austin, 1990 และ Kurten et al, 1970) โซนการบด (Milling zone) (Eskin and Vorapayev, 2001) อัตราการป้อนและความดันของก๊าซ (Gommeren et al, 2000 และ Ramanujam and Venkateswarlu, 1969) สมบัติของแร่

เช่น ความแข็งของผิวและพฤติกรรมการแตก (Lecoq et al, 1999 และ Berthiaux and Dodds, 1999) การคัดขนาด (Godet-Morand et al, 2002 และ Zhen et al, 1998) และรูปร่างและขนาดของหัวฉีด (Nozzle) (Gregor and Schonert, 1983, Midoux et al, 1999 และ Wang et al, 1998)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เข้าใจกลไกการบดของเครื่อง Jet mill ทราบถึงตัวแปรที่ต้องควบคุม การทำงานของเครื่องบด ตลอดจนขีดจำกัดต่างๆของเครื่องบด

1.4.2 ใช้เป็นข้อมูลสำหรับการบดวัสดุที่แตกต่างกันตามค่าความแข็งและสมบัติที่แตกต่างกัน

1.4.3 สามารถเผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับการบดโดยใช้ Jet mill เพื่อทำให้ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมรู้จัก และจะนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป

1.5 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยในครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายในการศึกษาการบดละเอียด โดยใช้เครื่องบดละเอียดแบบ Jet mill ในการทดลองจะใช้แร่และวัสดุตัวอย่าง 5 ชนิด ที่มีค่าความแข็ง (Hardness) ที่แตกต่างกัน คือ แบไรต์ (Barite) ยิปซัม (Gypsum) อิลเมไนต์ (Ilmenite) เฟอโรซิลิคอน (Ferrosilicon) และควอรตซ์ (Quartz) โดยการแปรค่าอัตราการป้อน ความดัน และขนาดของแร่ป้อน ผลจากการทดลองที่ได้จะนำไปวิเคราะห์ขนาดเพื่อดูการกระจายตัวของอนุภาค รูปร่างของอนุภาค และสิ่งเจือปน เป็นต้น รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลหาความสัมพันธ์ต่างๆ เพื่อเป็นพื้นฐานในการใช้เครื่องบดละเอียดแบบ Jet mill ให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด