

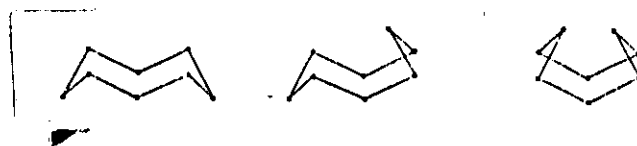
บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

กำมะถัน (sulphur)

วัตถุดิบที่มีความสำคัญมากในกระบวนการผลิตสำหรับอุตสาหกรรมเคมีคือกำมะถัน เป็นธาตุอโลหะมีสีเหลือง มีความวาวแบบซีมิ่ง อาจเกิดเป็นผลึกแต่โดยทั่วไปจะพบเป็นก้อนเป็นเม็ด มีค่าความแข็ง 1.5-2.5 ความถ่วงจำเพาะ 1.9-2.1 น้ำหนักอะตอมเท่ากับ 32.064 เปราะแตกได้ง่าย กำมะถันจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 113 องศาเซลเซียส โดยมีเปลวไฟสีน้ำเงินและเกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ขึ้น กำมะถันไม่ละลายในน้ำและในกรดเกือบทุกชนิด แต่ละลายในคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS₂) หรือในคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl₄) เป็นตัวนำความร้อนที่เลวและไม่นำไฟฟ้า พบในธรรมชาติใน 2 ลักษณะคือ อยู่ในสถานะอิสระ (native sulphur, S) และ รวมอยู่กับแร่ชนิดอื่นเช่น ไพไรต์ (pyrite; FeS₂) ส่วนแหล่งกำมะถันในปัจจุบันมีมาจากแหล่งต่าง ๆ หลายทางด้วยกันคือ

1. แหล่งกำมะถันในโดมหินเกลือ (salt domes)
2. กำมะถันจากแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) ในแก๊สธรรมชาติ และได้จากโรงกลั่นน้ำมัน เฉพาะในสหรัฐอเมริกาผลิตกำมะถันได้มากกว่าหนึ่งล้านตันต่อปี
3. กำมะถันจากผลพลอยได้จากการกลั่นแร่ซัลไฟด์ของตะกั่ว สังกะสี และทองแดง
4. กำมะถันจากถ่านหิน ซึ่งอาจจะได้จากไพไรต์ของโรงแต่งแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ อันเป็นผลพลอยได้จากการผลิตถ่านโค้ก และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการเผาถ่านหินในโรงงานผลิตไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง
5. จากแหล่งยิบซัมและแอนไฮไดรต์ (gypsum, anhydrite deposits)



รูปที่ 2.1 ลักษณะของโมเลกุลกำมะถัน (S₈)

ที่มา : Roland Mayer, 1977

ปกติกำมะถัน (S_8) ที่ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมมีความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 99 โดยโมเลกุลของกำมะถันเป็นรูปร่างแหวนของอะตอมแปดอะตอม เรียกว่า คาเทนนาออกตาซัลเฟอร์ (catena-octasulfur) เป็นผลึกที่มีรูปร่างของโมเลกุลคล้ายมงกุฎ ดังรูปที่ 2.1 เล็กขรภาพที่อุณหภูมิห้องจนถึง 95 องศาเซลเซียส

แหล่งแร่กำมะถัน

ประเทศสหรัฐอเมริกาในรัฐเท็กซัส และรัฐหลุยส์เซียนา ลินแร่กำมะถันอยู่ในหินตะกอนและส่วนบนโดมหินเกลือ แต่ผลผลิตส่วนใหญ่ได้มาจากแหล่งที่เป็นโดมหินเกลือ วิธีการทำเหมืองในสหรัฐส่วนมากผลิตจากกระบวนการที่เรียกว่า แฟรช (Frasch)

แหล่งกำมะถันที่ประเทศอิตาลี เกิดอยู่ในหินภูเขาไฟซึ่งมีองค์ประกอบของกำมะถันประมาณร้อยละ 20 ในประเทศนอร์เวย์ ปอร์ตุเกส และสเปน มีการผลิตกำมะถันจากแร่ไพไรต์โดยวิธีออร์กตา (Orkla process) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้แก๊สผ่านเข้าไปในหินให้ทำปฏิกิริยากับแร่ไพไรต์ จะได้แก๊สกำมะถันออกมา แต่จะมีแก๊สอาร์เจนนิคซึ่งเป็นแก๊สพิษเกิดขึ้นด้วยประมาณร้อยละ 0.14

ในประเทศสวีเดนมีการผลิตกำมะถันจากผลพลอยได้ของเหมืองหินน้ำมัน ส่วนประเทศอินโดนีเซียแหล่งกำมะถันอยู่ในบริเวณที่เป็นภูเขาไฟ กำมะถันมีความบริสุทธิ์ตามธรรมชาติถึงร้อยละ 93-98 และมีก่อกองอยู่กับแหล่งน้ำมัน ในประเทศฝรั่งเศสกำมะถันผลิตจากแก๊สธรรมชาติ ซึ่งแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มีกำมะถันเจือปนอยู่ประมาณร้อยละ 15

ที่ญี่ปุ่นมีการผลิตกำมะถันบนเกาะฮอนชูและฮอกไกโด จากแร่ไพไรต์ซึ่งจัดว่าเป็นผลพลอยได้ที่สำคัญ เพราะสามารถผลิตกำมะถันได้ถึงหนึ่งในสามของผลผลิตทั้งหมดในประเทศ แหล่งแร่กำมะถันแบบอื่น ๆ ได้แก่กำมะถันที่อยู่ตามบริเวณภูเขาไฟต่าง ๆ แหล่งกำมะถันที่สำคัญอีกแบบหนึ่งได้จากผลพลอยได้ของการถลุงโลหะทองแดง ตะกั่วและสังกะสี ที่สำคัญอยู่ที่รัฐเทนเนสซีในสหรัฐอเมริกา และรัฐควิเบกในแคนาดา

ในประเทศไทยพบกำมะถันอยู่ตามแหล่งขีปนํ้า และอยู่ในรูปของหนุแร่ซัลไฟด์ต่าง ๆ ข้อมูลแหล่งกำมะถันที่มีอยู่ในปัจจุบัน จัดว่ายังไม่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจเลย แนวโน้มในอนาคตของกำมะถัน ถ้าหากมีน้ำจะได้จากผลพลอยได้ในกระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติหรือการกลั่นน้ำมัน การเผาถ่านหิน แหล่งขีปนํ้าหรือจากการถลุงตะกั่วและสังกะสีมากกว่าที่จะเป็นแหล่งกำมะถันโดยตรง

การใช้ประโยชน์กำมะถัน

1. ทำกรดกำมะถันซึ่งเป็นกรดที่สำคัญในวงการอุตสาหกรรมเคมี โดยนำไปใช้ทำปฏิกิริยาเคมีเป็นต้นว่า ทำปุ๋ยวิทยาศาสตร์ แก๊สธรรมชาติ กลั่นน้ำมันไฮโดรเลียม และใช้เตรียมกรดชนิดอื่น กำมะถันที่ใช้ทำกรดนี้มีปริมาณกว่าครึ่งของผลผลิตกำมะถันทั้งหมด

2. ทำวัตถุระเบิด ทำสี ฝ้าย
3. ใช้ในอุตสาหกรรมทอผ้า
4. เป็นส่วนผลิตทำยารักษาโรคในโรงงานเภสัชกรรม
5. ใช้ทำยาฆ่าแมลง
6. ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ เป็นตัวทำละลายสารที่ไม่ใช่เยื่อไม้ (fibre, cellulose)
7. ในอุตสาหกรรมยาง ทำให้ยางแข็งและมีจุดหลอมละลายสูงขึ้น ในการวัลคาไนเซชัน
8. ใช้เป็นสารถนอมอาหารหรือยากันบูด

ประมาณร้อยละ 40 ของผลผลิตโลก นำมาใช้ในการผลิตปุ๋ย และอีกประมาณร้อยละ 20 ใช้ผลิตยาปราบศัตรูพืช เช่น ยาฆ่าแมลง และยาฆ่าเชื้อรา ในส่วนภาคอุตสาหกรรมและสถาบันการศึกษาต่าง ๆ พยายามวิจัยเพื่อหาแนวทางใหม่จากการใช้ประโยชน์กัมมะถัน เช่น เป็นสารเติมแต่งในยางแอสฟัลต์ ผลิตเป็นปูนและคอนกรีต ผลิตแบตเตอรี่ sulfur-alkali

การทำเหมืองแร่และการผลิตกัมมะถัน

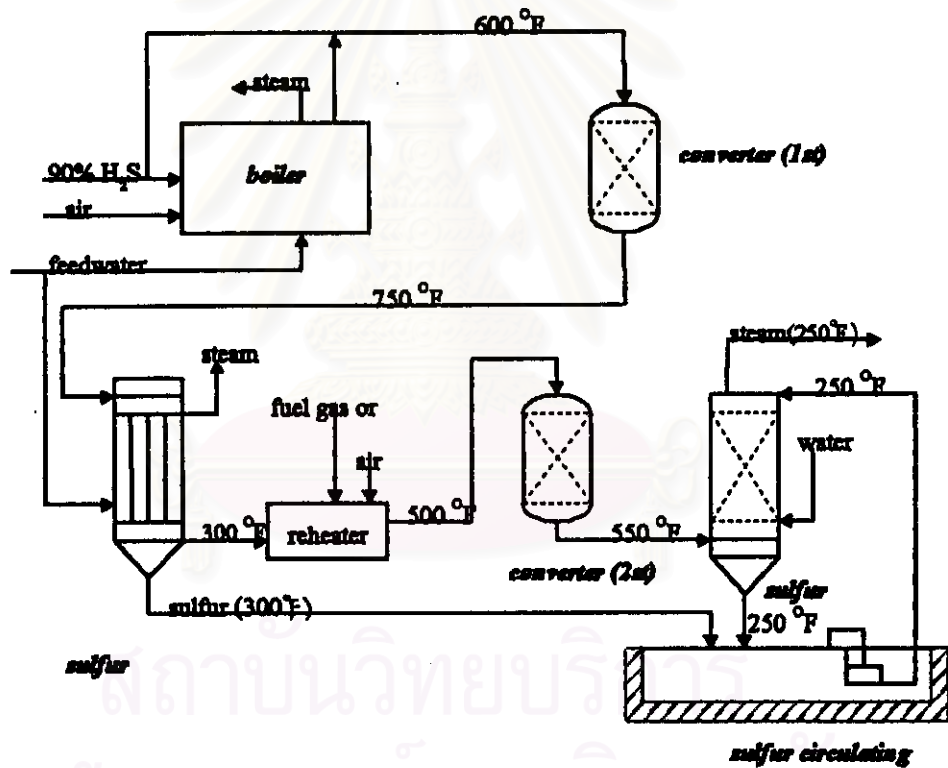
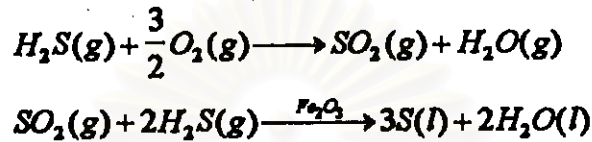
กระบวนการแฟรช (Frasch process)

ในปี 1890 Herman Frasch ได้ออกแบบวิธีการที่จะหลอมละลายแร่กัมมะถันจากใต้ดิน หรือใต้ทะเล และดึงขึ้นมาสู่พื้นดิน เครื่องมือจากบ่อน้ำมันถูกนำมาเจาะชั้นดินให้เป็นโพรงลงสู่ด้านล่างที่มีชั้นแร่กัมมะถันใต้ดินเป็นระยะทางลงไปจากพื้นดิน 500-2,500 ฟุต ท่อโลหะสามขนาดที่สวมทับกันโดยมีจุดศูนย์กลางร่วมกันมีขนาดจาก 8 - 1.25 นิ้ว และมีปลอกโลหะอยู่ด้านล่างสุดของท่อ ท่อด้านบนสุดเจาะผ่านลงไปในพื้นที่ใต้ดินที่มีกัมมะถันอยู่ ท่อขนาด 8 นิ้วที่ลึกลงไปเหนือปลอกวงแหวนจะมีรูจำนวนมากที่ยอมให้น้ำร้อนผ่านออกไปได้ รวมทั้งบริเวณด้านล่างที่เป็นปลอกวงแหวนก็เจาะรูให้กัมมะถันที่หลอมละลายไหลผ่านเข้ามาด้านในได้

น้ำร้อนที่ใช้มีอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ผ่านลงไปในช่วงว่างวงแหวนระหว่างท่อขนาด 8 นิ้วและขนาด 4 นิ้วที่สวมทับกันอยู่ โดยจะทะลุผ่านออกทางรูที่เจาะไว้ตรงบริเวณด้านล่างของบ่อนแร่กัมมะถันในชั้นใต้ดินที่ถูกรอบ ๆ จะทะลุผ่านรูของปลอกวงแหวนเข้ามาด้วยน้ำร้อนที่ไหลเวียนในระบบ เพราะกัมมะถันถูกเพิ่มอุณหภูมิถึงจุดหลอมเหลวที่ 119 องศาเซลเซียส กัมมะถันเหลวที่ผ่านรูของปลอกวงแหวนที่ไหลไปยังท่อขนาด 4 นิ้ว จะถูกน้ำร้อนเข้าแทนที่เพื่อไม่ให้ฐานเจาะบ่อนเกิดการยุบตัวลง กัมมะถันเหลวจะเคลื่อนที่ขึ้นไปประมาณครึ่งทางของความสูงท่อด้วยแรงดันจากน้ำร้อน จึงมีการอัดอากาศร้อนลงไปจากท่อขนาด 1.25 นิ้วที่อยู่ด้านบนสุด ทำให้กัมมะถันเหลวไหลขึ้นสู่พื้นดิน กัมมะถันเหลวที่ได้จะนำไปแยกน้ำออก โดยได้น้ำเย็นกลับมาใช้

กำมะถันจากแก๊สธรรมชาติ

แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้จากการกำจัดออกของขั้นตอนทำความสะอาดแก๊สธรรมชาติ แก๊สจากการเผาไหม้ถ่านหิน และจากโรงกลั่นน้ำมัน ซึ่งอยู่ในรูปสารละลาย potassium carbonate หรือ ethanolamine ไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกเผาไหม้ในเตาที่สร้างโดยเฉพาะ จนได้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สำหรับผลิตกรดกำมะถัน และอาจเปลี่ยนต่อไปจนได้กำมะถันเหลว ตามปฏิกิริยาดังนี้ ส่วนขั้นตอนการผลิตแสดงดังรูปที่ 2.2



Approximate utilities per long ton sulfur:		Products:	
Electric power	75 kWh	Sulfur	2200 lb
Boiler feedwater	780 gal	150 psig steam	4400 lb
Fuel gas	70,000 Btu	35 psig steam	700 lb
Labor	1 worker per shift		

รูปที่ 2.2 การนำกำมะถันกลับคืนจากไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยกระบวนการ Claus
ที่มา : Shreve, 1977

กำมะถันจะเป็นส่วนประกอบหนึ่งในแหล่งเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ เช่น ถ่านหิน น้ำมันดิบ น้ำมันดิน และน้ำมันหินดินดาน ได้มีความพยายามจะลดปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการเผาไหม้ ถ่านหินที่จะเป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่สำคัญในอนาคตชนิดหนึ่ง โดยใช้เทคโนโลยีการทำความสะอาดถ่านหินที่มีไฮโดรไดรอกซ์อยู่ประมาณครึ่งหนึ่งของกำมะถันที่ประกอบอยู่ในถ่านหิน ส่วนกำมะถันที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ต้องกำจัดออกโดยวิธี gasification, liquefaction และ hydrogenation เท่านั้น

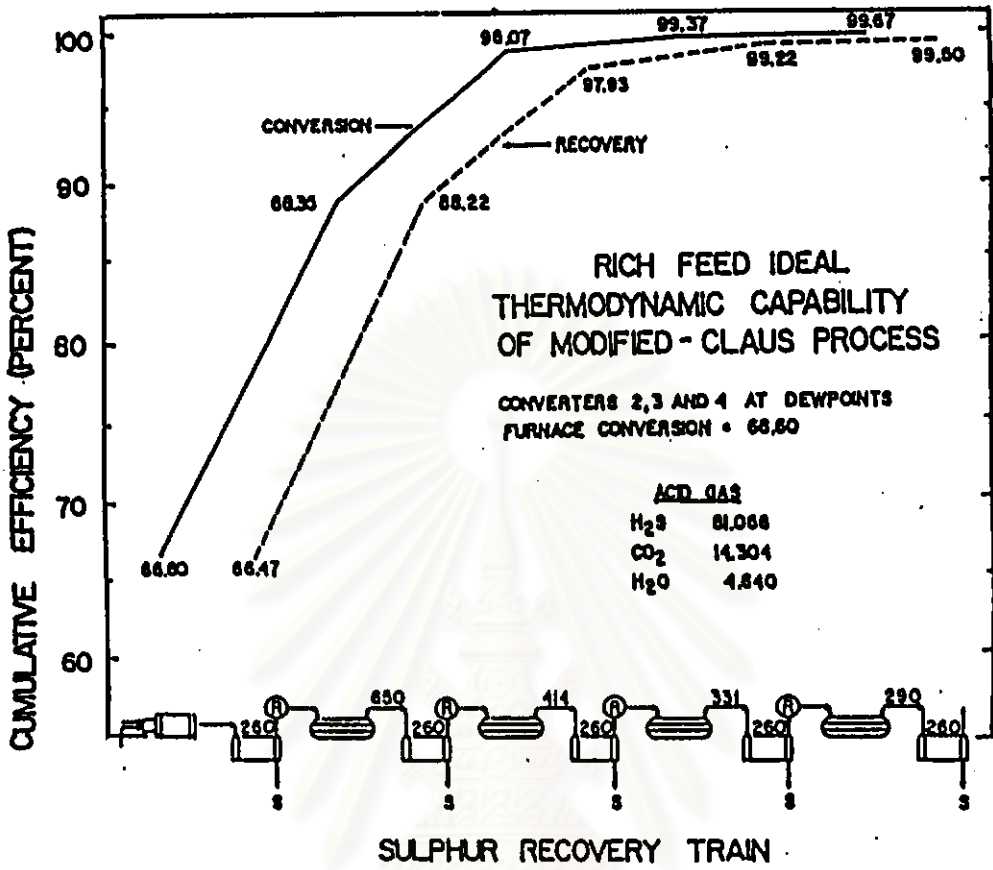
กำมะถันจากแร่ที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ

ในการหลอมแร่โลหะซัลไฟด์ (Iron pyrites) หรือแร่ซัลไฟด์ที่ไม่มีโลหะประกอบ จะสามารถเปลี่ยนซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไปเป็นกรดกำมะถันได้ หรือเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์เหลว ตามปกติ การหลอมแร่ทองแดงมีข้อจำกัดในการนำกำมะถันกลับคืนมา เพราะปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ได้ต่ำเกินไปที่จะผลิตกรดกำมะถันได้ในด้านเศรษฐศาสตร์ จึงมีการสร้างเผาหลอมที่สามารถเพิ่มปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้เพียงพอ เพื่อผลิตกรดกำมะถันได้คุ้มค่า วิธี Orkla และวิธี Noranda

การผลิตกำมะถันภายในประเทศไทย

ประเทศไทยไม่มีสินแร่ของธาตุกำมะถันที่สามารถผลิตได้ในเชิงการค้า แต่มีแหล่งแก๊สธรรมชาติ และน้ำมันไฮโดรเจน ที่สามารถผลิตเป็นธาตุกำมะถันได้ จากของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติหรือการกลั่นน้ำมัน โดยใช้กระบวนการ claus ที่ทำให้แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เปลี่ยนไปเป็นกำมะถัน ซึ่งอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ในโรงกลั่นน้ำมันของบริษัทไทยออยล์ จำกัด จะมีหน่วยนำกำมะถันกลับคืน (sulphur recovery unit, SRU) จากแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มาจากกระบวนการผลิตน้ำมัน โดยควบคุมค่าสัดส่วนระหว่าง แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์กับอากาศในเตาเผาหลัก แก๊สจะถูกเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส แก๊สส่วนที่เหลือในเตาเผาหลักจะถูกทำปฏิกิริยาต่อในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งใช้เวลารวมในเครื่อง 0.8-1 วินาที กำมะถันที่เกิดขึ้นจะถูกควบแน่นที่อุณหภูมิ 160-170 องศาเซลเซียส ส่วนที่ยังเป็นแก๊สอยู่จะถูกเพิ่มอุณหภูมิเป็น 240 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นถูกส่งไปยังเครื่องปฏิกรณ์ตัวถัดไปที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ปกติใช้ alumina) ซึ่งเกิดปฏิกิริยาต่อจนให้กำมะถันอีกแล้วนำไปควบแน่น ถ้ายังมีแก๊สเหลืออีกก็จะทำกระบวนการเช่นเดิม โดยกำมะถันเหลวทั้งหมดถูกส่งไปยังบ่อเก็บที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 150 องศาเซลเซียส ทางบริษัทสามารถผลิตกำมะถันดังกล่าวประมาณ 48 ตันต่อวัน ประสิทธิภาพการนำกำมะถันกลับคืนแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงประสิทธิภาพการนำกำมะถันกลับคืน
ที่มา : บริษัทไทยออยล์ จำกัด, 1996

การลดขนาด

การลดขนาดเป็นกระบวนการที่สำคัญสำหรับกระบวนการต่าง ๆ ที่มีอยู่ในอุตสาหกรรม โดยที่อนุภาคของของแข็งนั้นจะถูกทำให้แตกออกกลายเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ ด้วยวิธีการต่าง ๆ เพื่อจุดประสงค์ต่าง ๆ กันเช่น ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ สินแร่ส่วนใหญ่จะถูกลดขนาดลงเพื่อที่จะแยกเอาแร่ที่มีค่าออกจากส่วนที่เป็นเมตทินด้วยเครื่องขยอยและเครื่องบดตามลำดับ หรือในอุตสาหกรรมเคมีพวกสารเคมีสังเคราะห์จะถูกบดให้เป็นผงในเครื่องบด

เครื่องขยอยและเครื่องบดจึงเป็นชนิดของเครื่องมือที่ใช้ในการลดขนาด โดยหลักการก็คือเครื่องมือทั้งสองชนิดควรจะให้กำลังการผลิตสูง พลังงานที่ต้องใช้ต่อหนึ่งหน่วยของผลิตภัณฑ์ก็ควรจะน้อย รวมทั้งผลิตภัณฑ์ที่ได้ควรมีขนาดเดียวหรือมีช่วงของขนาดที่ต้องการ ปกติแล้วการลดขนาด

อนุภาคใหญ่ให้เล็กลงนั้น ไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดยใช้เครื่องมือชนิดเดียว จำเป็นต้องใช้เครื่องมือหลายชนิดด้วยกัน ซึ่งแต่ละชนิดก็ถูกออกแบบเพื่อใช้ในการลดขนาดอนุภาคตั้งต้นขนาดต่าง ๆ กันได้แก่ เครื่องย่อยเป็นเครื่องมือที่ใช้ลดขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ และเครื่องบดเป็นเครื่องมือลดขนาดอนุภาคขนาดเล็กกว่า โดยทั่วไปแล้วเครื่องย่อยนั้นจะไม่มีปัญหาเนื่องจากพลังงานที่ใช้และต้นทุนการผลิตไม่สูง แต่อุปสรรคที่พบส่วนใหญ่จะเนื่องมาจากเครื่องจักรคือ ต้องมีความแข็งแรงมากสำหรับทนแรงที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ในการย่อยอนุภาคขนาดใหญ่ ในทางตรงกันข้าม เครื่องบดที่ต้องการบดอนุภาคให้ละเอียดนั้นต้องใช้พลังงานมาก และอาจนำไปถึงการสึกหรอของเครื่องจักรที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นในการบดอนุภาคให้ละเอียดนั้น ยังมีปัญหาทางด้านวิชาการและด้านเทคนิค ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะมุ่งประเด็นการวิจัยไปที่ปัญหาเหล่านี้

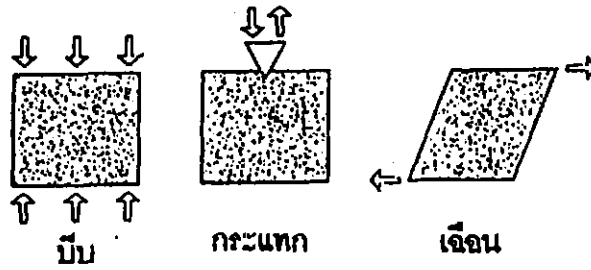
ก่อนที่จะกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการลดขนาดนั้น ควรทราบถึงกฎเบื้องต้นทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการลดขนาดของอนุภาคนี้ ซึ่งเกี่ยวกับกลไกการแตกของอนุภาค เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดที่เหมาะสมซึ่งเป็นจุดประสงค์ของการลดขนาดนี้

หลักการของการลดขนาด

เนื่องจากอนุภาคของแข็งต้องมีการแตกออกจากกัน จึงทำให้มีขนาดลดลงได้ซึ่งอนุภาคจะเกิดการแตกออกจากกันนั้นได้ จะต้องเกิดจากแรงภายนอกที่มากกระทำต่ออนุภาคของแข็งนั้น ทำให้อนุภาคของแข็งเกิดแรงต้านทานภายในขึ้น ถ้าแรงต้านทานภายใน (stress) มีค่าน้อยกว่าแรงภายนอกที่มากกระทำต่ออนุภาคของแข็งนั้น ของแข็งก็จะเกิดการแตกออกจากกัน ถ้ามาพิจารณาถึงโครงสร้างของของแข็ง โดยส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างเป็นผลึก (crystalline) โดยมีอะตอมเรียงตัวในรูป 3 มิติ การจัดเรียงของอะตอมของของแข็งนี้สามารถทำให้แยกแตกออกจากกันโดยใช้แรงดึง (tensile stress) แรงบีบ (compressive stress) หรือแรงเฉือน (shear stress) ดังรูปที่ 2.4

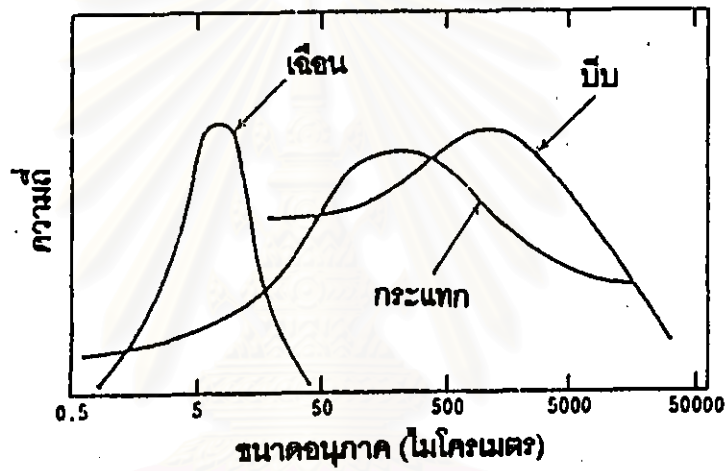
ผลจากแรงทั้ง 3 ที่สามารถเกิดขึ้นในระหว่างเกิดการบดได้แสดงดังรูปที่ 2.5 อนุภาคหลังการบดที่ละเอียดมาก ๆ จะมีค่าการกระจายขนาดในช่วงแคบเนื่องจากแรงเฉือนเป็นหลัก มันเป็นการยากที่จะใช้แรงบีบเพื่อให้ได้ผลเช่นเดียวกับการแรงเฉือน เพราะแนวโน้มของค่าการกระจายขนาดจะกว้างออกไปในช่วงขนาดอนุภาคที่ละเอียดมาก ส่วนการบดโดยให้แรงกระแทกเป็นหลัก จะให้ค่าการกระจายขนาดช่วงปานกลางระหว่างแรงเฉือนและแรงบีบ

เนื่องจากในเนื้อของแข็งโดยทั่วไปนั้นจะประกอบด้วยตำหนิ (flaw) ซึ่งเป็นจุดอ่อนที่เกิดรอยแตกขึ้นก่อนภายในเนื้อของแข็ง เมื่อมีแรงมากกระทำบนอนุภาคของแข็งนั้นความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นในเนื้อของแข็งจะกระจุกตัวตามรอยตำหนิก่อนเกิดการแตกกว้างมากขึ้นในบริเวณดังกล่าว



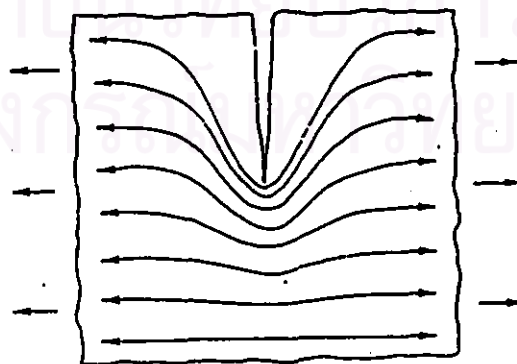
รูปที่ 2.4 แสดงแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการลดขนาดวัตถุแข็ง

ที่มา : Yasuo Aral, 1996



รูปที่ 2.5 แสดงการกระจายขนาดของอนุภาคที่ถูกลดขนาดโดยแรงทั้ง 3

ที่มา : Yasuo Aral, 1996



รูปที่ 2.6 แสดงความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นตรงบริเวณรอยแตก

ที่มา : ภิญญ มี่จ่านะ, 2538

การศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของความต้านทานนี้ในรอยตำหนิจะผันแปรโดยตรงกับรากที่สองของความยาวของรอยแตก ซึ่งตั้งฉากกับความต้านทานภายในที่เกิดขึ้น ดังนั้นจะมีค่าความเครียดวิกฤต (critical stress) สำหรับรอยแตกความยาวหนึ่ง ๆ จะสูงมาก พอที่จะทำให้การเกาะตัวของอะตอมของวัสดุเหล่านั้นเกิดการแตกได้ ซึ่งการแตกนี้ก็จะเป็ผลให้ความยาวของรอยแตกดังกล่าวเพิ่มขึ้นไป ความต้านทานภายในหรือความเครียดจะเกิดมากขึ้นตรงบริเวณรอยแตกเพิ่มขึ้นไปอีก ทำให้ของแข็งเกิดการแตกอย่างรวดเร็ว สามารถพิจารณาการแตกตรงบริเวณตำหนิดังกล่าวในรูปที่ 2.6

ถ้าของแข็งมีการแตกหัก พลังงานที่สะสมภายในของแข็งบางส่วนจะเปลี่ยนเป็นพลังงานผิวอิสระ (free surface energy) ซึ่งเป็นพลังงานศักย์ของอะตอมของของแข็งตรงบริเวณพื้นผิวของของแข็งที่เกิดใหม่ เนื่องจากมีการเกิดและเพิ่มขึ้นของพลังงานผิวบนของแข็งนี้ จะพบว่าผิวที่เกิดขึ้นใหม่นี้มักจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ผิวได้ง่ายกว่าปกติ เช่น ในการลอมของแข็งที่เป็นแร่ พบว่าผิวแร่ที่เกิดใหม่นี้จะทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่ใช้ลอมแร่ได้ดี หรือผิวแร่อาจถูกออกซิไดส์ได้ง่าย เป็นต้น

เนื่องจากรูปร่างของของแข็งที่เกิดตามธรรมชาติเองมักไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นแรงที่กระทำต่อของแข็งก็จะกระจายไปไม่สม่ำเสมอ แต่จะกระทำต่อของแข็งตรงจุดต่าง ๆ เป็นพื้นที่น้อย ๆ การแตกของของแข็งจะเกิดจากแรงกด แรงกระแทก แรงขั้วดี และแรงเฉือน

ในการลอมของแข็งให้แตกด้วยแรงกระแทกนั้น แรงที่กระทำนั้นเกิดขึ้นทันทีทันใด ดังนั้นความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นในของแข็งจะมากกว่าปกติ ทำให้ของแข็งแตกออกอย่างรวดเร็ว ของแข็งที่ผ่านการลอมด้วยวิธีนี้มักมีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกัน

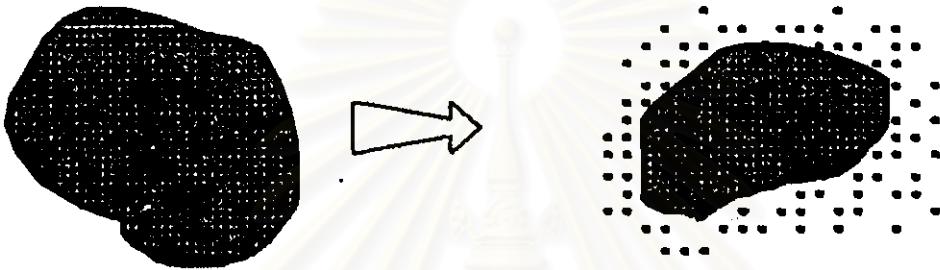
สำหรับแรงจากการเสียดสี นั้นทำให้ออนุภาคที่ได้มีขนาดละเอียดเป็นจำนวนมาก ซึ่งเกิดจากการที่ของแข็งขั้วดีกันเอง (interparticle comminution) ส่วนใหญ่แล้วในการบดของเครื่องที่เรียกว่าเครื่องบดแบบบดด้วยตัวเอง (autogenous grinding mill) นั้นจะมีแรงขั้วดีมากเมื่อเทียบกับแรงประเภทอื่น ๆ ทำให้ออนุภาคที่ได้มีขนาดละเอียดมากกว่าการบดในเครื่องบดบอลมิลล์ธรรมดา

หลังจากการลดขนาดวัสดุแล้ววัสดุจะแตกออกมีขนาดเล็กลง อัตราส่วนของการลดขนาด (reduction ratio) จะเท่ากับอัตราส่วนระหว่างขนาดวัสดุที่ป้อนก่อนการลอมหรือบดกับขนาดของวัสดุหลังการลอมหรือบดของแข็ง

กลไกการแตกของแข็ง

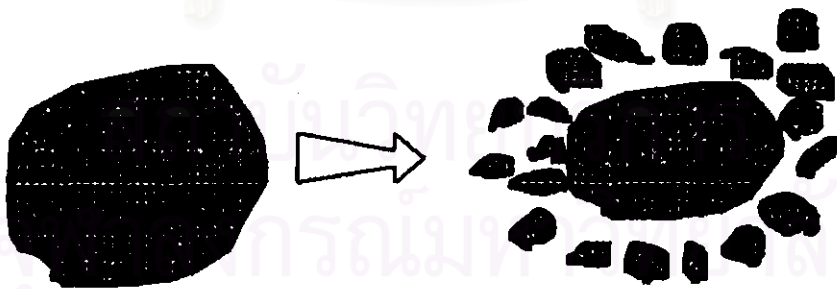
กลไกการแตกของก้อนของแข็งที่เกิดขึ้นจากกระบวนการลดขนาด สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลไก คือ

1 การขัดสี (abrasion) เป็นกลไกการลดขนาดก้อนของแข็งโดยอาศัยแรงเสียดสีกันระหว่างก้อนของแข็งที่กำลังเคลื่อนที่อยู่ ทำให้บริเวณพื้นผิวของก้อนหลุดออกมาเป็นผงขนาดเล็ก ซึ่งยังคงเหลือก้อนของแข็งหลักอยู่ แสดงดังรูปที่ 2.7



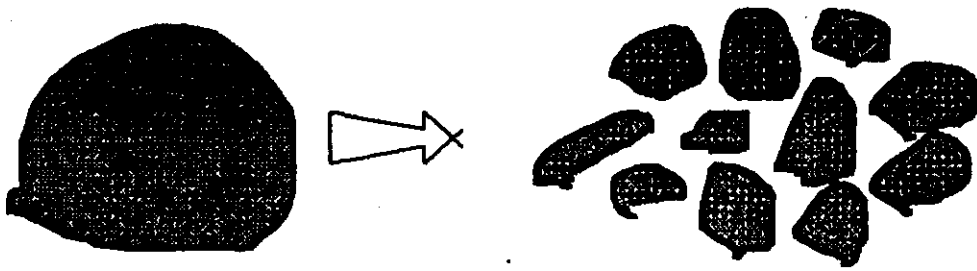
รูปที่ 2.7 แสดงกลไกการแตกของแข็งแบบขัดสี

2 การกระแทะ (chipping) เป็นกลไกการลดขนาดก้อนของแข็งโดยอาศัยแรงกระแทกหรือแรงเฉือนจากก้อนของแข็งด้วยกันเอง หรือจากเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการลดขนาด มากระทบกับก้อนของแข็ง ทำให้บริเวณผิวของก้อนถูกกระแทะหลุดเป็นชิ้นของแข็งขนาดเล็ก โดยยังคงเหลือก้อนของแข็งหลักอยู่ แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงกลไกการแตกของแข็งแบบกระแทะ

3 การแตกหักก้อน (disintegrative fracture) เป็นกลไกที่เกิดขึ้นคล้ายกับการกระแทะ แต่แรงกระทำที่มากกระทบกับก้อนของแข็งมีมากพอ ที่จะทำให้ก้อนของแข็งแตกออกทั้งก้อน โดยไม่คงเหลือก้อนของแข็งหลักอยู่อีก แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงกลไกการแตกของแข็งแบบการแตกหักก้อน

มีนักวิทยาศาสตร์ได้นิยามอัตราการสึกกร่อนสำหรับก้อนของแข็ง ด้วยพื้นฐานของ ปริมาตรโดยสมมูลกับรัศมีของรูปทรงกลมไว้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{อัตราการสึกกร่อน} &\propto \text{ปริมาตร} \\ \text{อัตรามวลที่สึกกร่อน} &= \kappa \rho V \\ &= \kappa \rho 4\pi r^{2+\Delta} \end{aligned} \quad (2.1)$$

โดย ρ คือความหนาแน่น ส่วน κ คือค่าคงที่ของอัตราการสึกกร่อน และ Δ คือค่าคงที่ขึ้น กับชนิดของการสึกกร่อน ซึ่งอัตราการลดลงของรัศมีก้อนของแข็งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\text{อัตรามวลที่สึกกร่อน} = \rho 4\pi r^2 \frac{dr}{dt} \quad (2.2)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \rho 4\pi r^2 \frac{dr}{dt} &= \kappa \rho 4\pi r^{2+\Delta} \\ \frac{dr}{dt} &= \kappa r^\Delta \end{aligned} \quad (2.3)$$

จากสมการที่ 2.3 ถ้า $\Delta = 0$ แสดงว่าอัตราการสึกกร่อนของมวลของแข็งแปรผันตรงกับ พื้นที่ผิว เป็นกฎการสึกกร่อนของ Bond ค่าคงที่ที่เกิดขึ้นจึงเรียกว่า อัตราการสึกกร่อนแบบ Bond ใช้สัญลักษณ์เป็น κ_b โดยมีหน่วยเป็น ความยาวต่อเวลา

แต่เมื่อ $\Delta = 1$ แสดงว่าอัตราการสึกกร่อนของมวลของแข็งแปรผันตรงกับมวล เป็นกฎการสึกกร่อนของ Davis ค่าคงที่ที่เกิดขึ้นจึงเรียกว่า อัตราการสึกกร่อนแบบ Davis ใช้สัญลักษณ์เป็น κ_d โดยมีหน่วยเป็น เวลา⁻¹

กลไกการแตกแบบขั้วสี่และกระแทะ สามารถอธิบายได้โดยใช้อัตราการสึกกร่อนแบบ Bond หรือ Davis ส่วนกลไกการแตกแบบ disintegrative fracture ทำให้ $\Delta = 1$ นั่นคืออัตรามวลที่

สีกร่อนของก้อนแปรผันตรงกับมวล เมื่อพิจารณาขอบเขต (boundary) ของก้อนวัตถุมีรัศมี r_1 ที่เวลา t_1 และก้อนวัตถุมีรัศมี r_2 ที่เวลา t_2

อินทิเกรตสมการ (2.3)

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \int_{t_1}^{t_2} \kappa dt$$

$$\ln r \Big|_{r_1}^{r_2} = \kappa t \Big|_{t_1}^{t_2}$$

$$\ln \frac{r_2}{r_1} = \kappa(t_2 - t_1)$$

ดังนั้น

$$\ln \frac{r(t_2)}{r(t_1)} = \kappa(t_2 - t_1) \quad (2.4)$$

พิจารณา $r(t_2)$ คือรัศมีของก้อนที่เวลา t_2 จะมีค่าน้อยกว่า $r(t_1)$ คือรัศมีของก้อนที่เวลา t_1 เสมอ ค่าที่ได้จาก $\ln \left[\frac{r(t_2)}{r(t_1)} \right]$ จึงน้อยกว่า 0 หรือติดลบเสมอ ดังนั้น κ จึงมีค่าติดลบ

$$\frac{r(t_2)}{r(t_1)} = e^{-\kappa(t_2-t_1)} \quad (2.5)$$

$$\frac{\rho(4\pi r^2) r(t_2)}{\rho(4\pi r^2) r(t_1)} = e^{-\kappa(t_2-t_1)}$$

$$\frac{w_i(t_2)}{w_i(t_1)} = e^{-\kappa(t_2-t_1)} \quad (2.6)$$

โดย $w(t_1)$ และ $w(t_2)$ เป็นสัดส่วนน้ำหนักของขนาดก้อนของแข็ง (I) ซึ่งเหลืออยู่ในแต่ละช่วงเวลา t_1 และ t_2 ตามลำดับ ถ้าให้อัตราจำเพาะการแตกลักษณะ disintegrative fracture $(S) = \kappa$ ดังนั้น

$$\frac{w_i(t_2)}{w_i(t_1)} = e^{-S_1(t_2-t_1)} \quad (2.7)$$

$$S_1 = -\frac{2.303}{(t_2 - t_1)} \log \frac{w_i(t_2)}{w_i(t_1)} \quad (2.8)$$

เครื่องมือที่ใช้ลดขนาด

เครื่องมือในการลดขนาดวัตถุให้แตกออกเป็นส่วน ๆ โดย เครื่องย่อย (crusher) เครื่องบด (grinder) เครื่องบดละเอียด (ultrafine grinder) และเครื่องตัดหิน (cutting machine) ซึ่งเครื่องย่อยทำให้วัตถุของแข็งขนาดใหญ่แตกเป็นก้อนที่เล็กลง จึงเป็นเครื่องมือลดขนาดในขั้นตอนของเหมือง

แต่ สามารถลดขนาดได้ถึง 150-250 มิลลิเมตร ในขั้นที่สองได้ขนาดประมาณ 6 มิลลิเมตร แล้วป้อนเข้าสู่เครื่องบดเพื่อทำเป็นผงต่อไป ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะผ่านตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช ส่วนเครื่องบดละเอียดต้องใส่วัตถุดิบที่มีขนาดไม่เกิน 6 มิลลิเมตร และผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีขนาดในช่วง 1-50 ไมโครเมตร เครื่องตัดให้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดและรูปร่างที่แน่นอนในช่วง 2-10 มิลลิเมตร

เครื่องมือที่ใช้ลดขนาดวัตถุแบ่งออกเป็นชนิดที่สำคัญดังนี้

1 เครื่องย่อย (crushers) ใช้ความเร็วต่ำสำหรับลดขนาดแบบหยาบ ๆ ของวัตถุแข็งที่ขนาดใหญ่ หลักในการทำงานจะใช้การบีบอัดจนทำให้ก้อนวัตถุขนาดใหญ่แตกออก ซึ่งจะใช้เป็นกระบวนการลดขนาดในขั้นต้นและขั้นที่สองสำหรับก้อนหินหรือก้อนสินแร่ต่าง ๆ ชนิดของเครื่องย่อย คือ

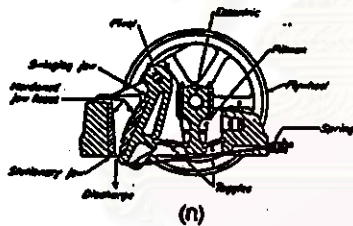
1.1 เครื่องย่อยแบบกราม (jaw crushers)

1.2 เครื่องย่อยแบบหมุน (gyratory crushers)

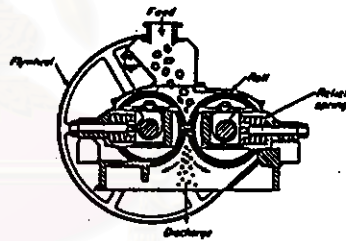
1.3 เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้ง (crushing rolls) มี 2 ชนิด

1.3.1 เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งผิวเรียบ (smooth-roll crushers)

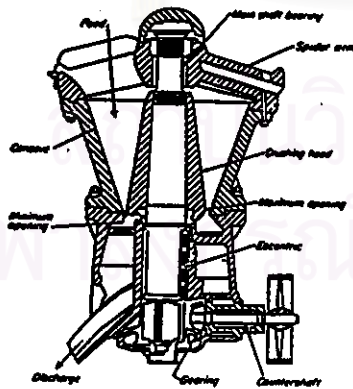
1.3.2 เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งเป็นซี่ฟัน (toothed-roll crushers)



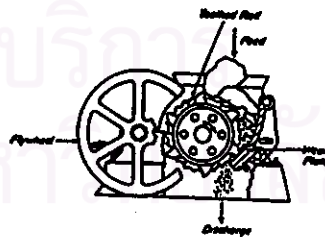
(ก)



(ค)



(ข)



(ง)

รูปที่ 2.10 เครื่องย่อยต่าง ๆ (ก) แบบกราม, (ข) แบบหมุน, (ค) แบบลูกกลิ้งผิวเรียบ และ (ง) แบบลูกกลิ้งซี่ฟัน

ที่มา : McCabe, 1993

2 เครื่องบด (grinders) สามารถลดขนาดปานกลางจนถึงละเอียด เป็นเครื่องที่ใช้ในการลดขนาดวัตถุในขั้นตอนที่สอง นั่นคือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องย่อยจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องบด เพื่อลดขนาดจนได้เป็นผงละเอียด ชนิดของเครื่องบดคือ

2.1 เครื่องบดแบบค้อน (hammer mills; impactors)

2.2 เครื่องบดแบบหมุนบีบ (rolling-compression mills) มี 2 ชนิด

2.2.1 เครื่องบดแบบชาม (bowl mills)

2.2.2 เครื่องบดแบบลูกกลิ้ง (roller mills)

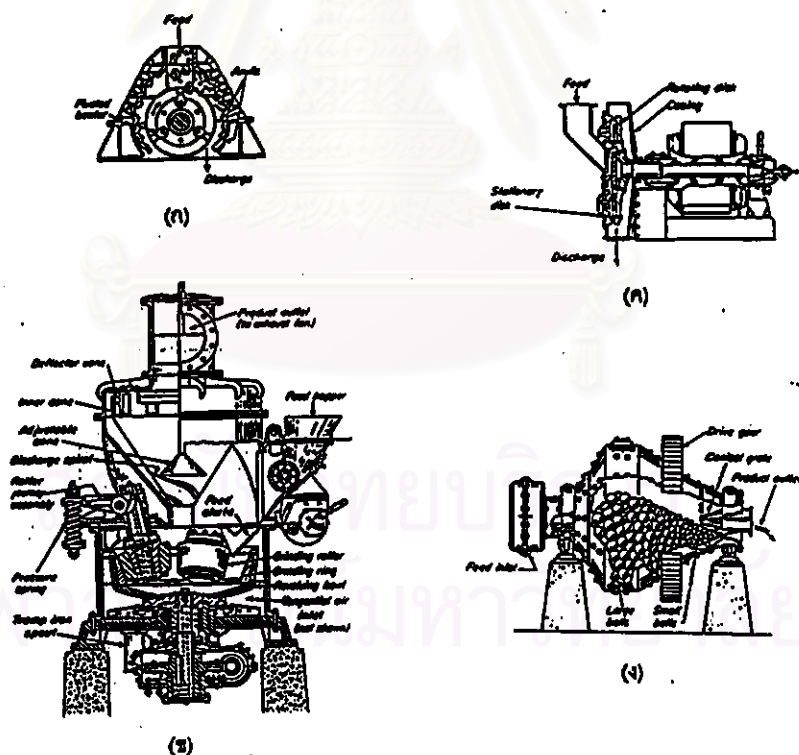
2.3 เครื่องบดแบบขัดสี (attrition mills)

2.4 เครื่องบดแบบถ่วงหมุน (tumbling mills) มีลูกบด 3 ชนิด

2.4.1 ลูกบดแบบแท่งยาว (rod mills)

2.4.2 ลูกบดแบบลูกบอลหรือก้อนกรวด (ball mills; pebble mills)

2.4.3 ลูกบดแบบหลอด (tube mills ; compartment mills)



รูปที่ 2.11 เครื่องบดต่าง ๆ (ก) แบบค้อน, (ข) แบบลูกกลิ้ง, (ค) แบบขัดสี และ (ง) แบบถ่วงหมุน

ที่มา : McCabe, 1993

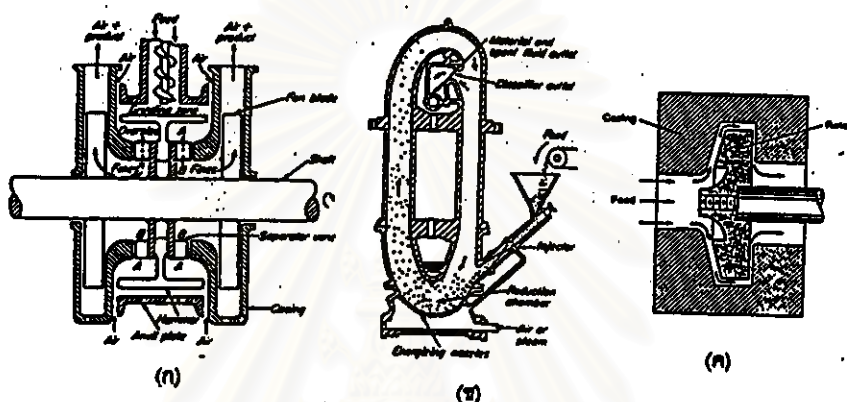
3. เครื่องบดละเอียด (ultrafine grinders) ขนาดของอนุภาคที่เป็นผงที่ใช้ในเชิงการค้ามีขนาดเฉลี่ย 1-100 ไมโครเมตร นั่นคืออนุภาคต้องผ่านช่องตะแกรงร่อนกว้าง 44 ไมโครเมตร (325 เมช) เครื่องที่ทำให้อนุภาคได้ขนาดดังกล่าวคือเครื่องบดละเอียด

3.1 เครื่องบดแบบค้อนความเร็วสูง (high-speed hammer mills)

3.2 เครื่องบดแบบการไหล (fluid-energy mills)

3.3 เครื่องบดแบบการกวน (agitated mills)

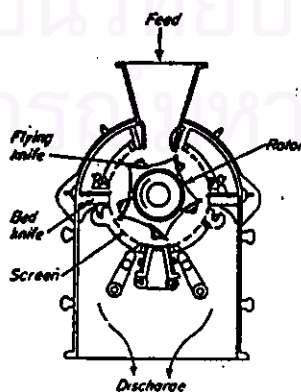
3.4 เครื่องบดสารแขวนลอย (colloid mills)



รูปที่ 2.12 เครื่องบดละเอียดต่าง ๆ (ก) แบบค้อนภายใน, (ข) แบบการไหล และ (ค) แบบคอลลอยด์
ที่มา : McCabe, 1993

4. เครื่องตัด (cutting machines) ในกระบวนการลดขนาดพบปัญหาของก้อนวัตถุเริ่มต้นที่ป้อนเข้าสู่เครื่องลดขนาดชนิดต่าง ๆ โดยก้อนวัตถุถูกทำให้ได้ขนาดเหมาะสมก่อน ซึ่งต้องใช้เครื่องมือที่สามารถตัด ฝ่า ฉีก หรือฉีกก้อนวัตถุให้ได้ลักษณะตามต้องการ ชนิดของเครื่องตัด คือ

4.1 เครื่องตัดแบบใบมีด (knife cutters)



รูปที่ 2.13 แสดงเครื่องตัดแบบใบมีด
ที่มา : McCabe, 1993

กลไกการทำงานของเครื่องมือชนิดต่างๆ มีลักษณะที่ต่างกันอย่างชัดเจนคือ การบีบอัดเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในเครื่องย่อย ส่วนเครื่องบดใช้การกระแทก การเสียดสีและในบางครั้งก็มีการบีบอัดรวมอยู่ด้วย สำหรับเครื่องบดละเอียดจะใช้หลักการเสียดสี

เครื่องบดแบบถึงหมุน (tumbling mills)

รูปที่ 2.11(ง) แสดงถึงเครื่องบดแบบถึงหมุนชนิดหนึ่ง มีลักษณะเครื่องเป็นทรงกระบอกที่หมุนในแนวราบ โดยเดิมวัตถุที่ต้องการบดประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาตรเครื่องบด ตัวเครื่องทำจากวัสดุได้หลายชนิดเช่น เหล็กกล้า โลหะที่มีค่าคาร์บอนสูง เซรามิก หรือหินซิลิกา ส่วนลูกบดมีรูปร่างหลายแบบเช่น เป็นแท่งเสี้ยวยาวในเครื่องบดแบบลูกบดเป็นแท่งยาว (rod mills) หรือรูปร่างทรงกลมอาจทำจากโลหะ ยาง หรือไม้ ในเครื่องบดแบบลูกบดเป็นลูกบอล(ball mills) และใช้ก้อนกรวดขนาดต่าง ๆ ก้อนเซรามิกในเครื่องบดแบบลูกบดเป็นก้อนกรวด (pebble mills) เป็นเครื่องมือที่ใช้ลดขนาดได้เป็นผงละเอียด โดยการเสียดสีกันระหว่างวัตถุของแข็งกับลูกบดเช่นลูกบอลบด ในกระบวนการลดขนาดที่ต้องการขนาดละเอียดมากเครื่องบดแบบถึงหมุนจะเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม

ปกติการป้อนวัตถุดิบกระทำแบบต่อเนื่อง แต่เครื่องบดแบบถึงหมุนสามารถทำงานได้ทั้งแบบต่อเนื่องหรือแบบกะ ในสภาพการทำงานแบบกะควรป้อนก้อนวัตถุที่ขนาดสม่ำเสมอ เพื่อให้เสร็จพร้อมกันแล้วนำออกจากเครื่องในครั้งเดียว มิฉะนั้นต้องเปิด-ปิดเครื่องบ่อยเพื่อนำผลิตภัณฑ์ออกมาหลายครั้ง ส่วนการทำงานแบบต่อเนื่องต้องมีก้อนวัตถุดิบป้อนเข้าสม่ำเสมอ

เครื่องบดแบบถึงหมุนที่ใช้ลูกบดแบบแท่งเสี้ยวยาว ทำให้การลดขนาดก้อนวัตถุโดยการถึงและบดอัดจากลูกบด แล้วเกิดการเสียดสีของลูกบดที่เคลื่อนที่ขึ้นลงกับลูกบดอื่น ๆ ที่อยู่รอบ ๆ ภายในห้องบด จนได้ผลิตภัณฑ์ขนาด 10 ไมครอน

ในเครื่องบดแบบลูกบดเป็นบอลและเครื่องบดแบบลูกบดเป็นก้อนกรวด ใช้หลักในการกระแทกของลูกบดที่ตกลงจากด้านบนของห้องบดเป็นกระบวนการลดขนาด ขนาดเครื่องบดแบบลูกบดเป็นบอลที่ใหญ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ยาว 4.25 เมตร ลูกบอลที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25-125 มิลลิเมตร ส่วนก้อนกรวดที่ใช้ในเครื่องบดแบบลูกบดเป็นก้อนกรวดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50-175 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพการบดสูงที่จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นผงละเอียดมาก พลังงานที่ใช้ก็เหมาะสม ภายในห้องบดแบ่งออกเป็นช่อง โดยช่องแรกมีลูกบอลขนาดใหญ่อยู่ ช่องถัดมามีขนาดเล็กลงและห้องสุดท้ายมีก้อนกรวดขนาดเล็กอยู่ การแยกขนาดของลูกบดเป็นไปโดยน้ำหนักของลูกบดเองเป็นพื้นฐาน พบว่าส่วนใหญ่ลูกบอลโลหะขนาดใหญ่จะทำให้ก้อนวัตถุของแข็งแตกออก โดย

ไม่ค่อยมีผลต่ออนุภาคขนาดเล็ก ส่วนลูกบอลขนาดเล็กจะทำให้ก้อนวัตถุของแข็งขนาดเล็กแตกออกเท่านั้น ไม่สามารถทำให้ก้อนวัตถุของแข็งขนาดใหญ่แตกออกได้

การแบ่งส่วนภายในห้องบดเป็นช่อง ๆ คือลักษณะของเครื่องบดแบบลูกบดเป็นบอล รูปทรงกรวยแสดงดังรูปที่ 2.11(ง) โดยก้อนวัตถุทางกรวยมุม 60 องศาทางด้านซ้ายของเครื่องบด เพื่อเข้าสู่เขตการลดขนาดชั้นแรกบริเวณของห้องบดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้ไหลออกทางช่องเปิดรูปกรวยมุม 30 องศาทางด้านขวาของเครื่องบด เมื่อเครื่องบดที่บรรจุลูกบอลให้หลายขนาดถูกทำให้หมุน จะทำให้ลูกบอลขนาดใหญ่เคลื่อนที่ไปยังส่วนของห้องบดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด ส่วนลูกบอลขนาดเล็กลงมาจะเคลื่อนที่ไปยังส่วนที่อยู่ถัดไปที่มีช่องเปิดออกสำหรับผลิตภัณฑ์ และมีลูกบอลบางส่วนเคลื่อนที่ไปทั่วทั้งห้องบด การแตกออกครั้งแรกของวัตถุที่ป้อนเข้าจะเกิดจากลูกบอลขนาดใหญ่ตกลงด้วยระยะทางที่มากที่สุดสำหรับก้อนวัตถุขนาดใหญ่ ส่วนก้อนวัตถุขนาดเล็กจะถูกบดโดยลูกบอลขนาดเล็กซึ่งตกลงมาในระยะทางที่น้อยลง

การทำงานของเครื่องบดแบบฉัฏพุน

ลูกบดในเครื่องบดแบบลูกบดเป็นบอลหรือแบบหลอด (tube mill) ที่สภาพหยุดนิ่ง จะมีลูกบดบรรจุอยู่ครึ่งหนึ่งของปริมาตรเครื่องบด ลูกบดชนิดลูกบอลเมื่อพิจารณาเป็นมวลจะมีสัดส่วนช่องว่างอยู่ 0.4 โดยการบดอาจกระทำแบบแห้ง แต่โดยทั่วไปจะป้อนก้อนวัตถุในสภาพแฉวและลอยอยู่ในน้ำ จะเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องบด ส่วนบริเวณทางออกต้องเปิดช่องให้เหมาะสมเพื่อควบคุมระดับของเหลวภายในห้องบด ถ้าบดในสภาพที่ก้อนวัตถุแฉวและลอยค่าสัดส่วนช่องว่างระหว่างลูกบอลจะเพิ่มขึ้น

ขณะที่เครื่องบดหมุนลูกบอลจะเคลื่อนตัวขึ้นไปตามผนังจนใกล้ด้านบนของห้องบด ซึ่งการแตกของวัตถุเกิดขึ้นเมื่อลูกบอลตกลงสู่ด้านล่างห้องบด และเกิดซ้ำอีกโดยลูกบอลเคลื่อนตัวขึ้นไปตามผนังห้องบดและตกลงมา แรงหมุนเหวี่ยงคือแรงที่ทำให้ลูกบอลเคลื่อนตัวขึ้นไปตามผนังห้องบด ในขณะที่ลูกบอลเคลื่อนตัวขึ้นไปตามผนังจะมีการเสียดสีกันระหว่างลูกบอลทำให้เกิดการบดได้ แต่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการกระแทกที่เกิดจากลูกบอลตกลงสู่ด้านล่างไปกระทบลูกบอล ก้อนวัตถุ หรือผนังห้องบด

การที่เครื่องบดถูกหมุนด้วยความเร็วรอบสูงขึ้น ทำให้ลูกบอลเคลื่อนตัวขึ้นไปตามผนังห้องบดได้มากขึ้นจนถึงจุดสูงสุดของห้องบด ซึ่งต้องใช้พลังงานมากขึ้น แต่มีประโยชน์เพราะลูกบอลเคลื่อนตัวไปได้สูงขึ้น จะเพิ่มแรงกระแทกในขณะตกลงมาด้านล่างของห้องบด ทำให้ประสิทธิภาพของการบดเพิ่มขึ้น แต่ถ้าใช้ความเร็วรอบมากกว่านี้ลูกบอลจะเหมือนถูกยึดติดไปกับผนังห้องบด เพราะไม่มีการตกลงมาด้านล่างห้องบด ความเร็วดังกล่าวเรียกว่าความเร็ววิกฤต ทำให้การบดเกิดได้

น้อยมากหรือไม่เกิดเลย ดังนั้นในทางปฏิบัติควรใช้ความเร็วให้น้อยกว่าความเร็ววิกฤต เครื่องบดแบบกังหมุนควรทำงานที่ร้อยละ 65-80 ของความเร็ววิกฤต และใช้ค่าที่ต่ำกว่านี้เมื่อทำงานในสภาพเปียกหรือของเหลวที่มีวัตถุแขวนลอย

ประสิทธิภาพและพลังงานที่ใช้ของเครื่องบดแบบฉัฏหมุน

พลังงานสูงสุดที่ต้องการให้ก้อนวัตถุลดขนาดลง สามารถคำนวณได้จากมวลของลูกบด ความเร็วรอบ และระยะสูงสุดของการตก โดยในทางปฏิบัติใช้พลังงานน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ และระบบการทำงานทั้งหมดต้องให้พลังงานมาก จะมีพลังงานจำนวนมากที่สูญเสียไปกับอนุภาคของแข็งที่ถูกบดให้ละเอียดเพียงพอแล้ว แต่ลูกบดยังเคลื่อนที่โดยไม่เกิดกระบวนการลดขนาดอีก ดังนั้นในการออกแบบที่ดีต้องทำให้พลังงานเกิดการสูญเสียให้น้อยที่สุด เครื่องบดแบบลูกบดเป็นแห่งขามีอัตราการผลิต 1-50 ตันต่อชั่วโมง โดยผลิตภัณฑ์มีปริมาณร้อยละ 70-90 ที่ผ่านตะแกรง 200 เมช พลังงานทั้งหมดที่ใช้ไปในกระบวนการอยู่ที่ 4-10 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตัน

เครื่องบดแบบการกวน (agitated mills)

เป็นเครื่องบดละเอียดชนิดหนึ่งขนาดเล็ก โดยไม่มีการหมุนของห้องบด ประกอบด้วยลูกบดแข็งเช่น ลูกบอลโลหะ หรือก้อนกรวด โดยห้องบดเป็นภาชนะกลวงในแนวตั้ง มีน้ำเป็นตัวทำให้เกิดการแขวนลอยของลูกบด ในบางชนิดออกแบบโดยใช้การกวนจากใบพัดกวน โดยเฉพาะการบดวัตถุที่แข็งมากเช่น จีลิกา หรือไทเทเนียมไดออกไซด์ ใช้การสั่นสะเทือนที่ 20 เฮิรซ์ร่วมด้วย ของไหลที่มีทั้งของแข็งและของเหลวถูกป้อนเข้ามาจากด้านบน โดยให้ผลิตภัณฑ์รวมทั้งของเหลวผ่านตะลุดตะแกรงที่อยู่ด้านล่าง เครื่องบดแบบการกวนใช้เมื่อต้องการผลิตภัณฑ์ขนาด 1-10 ไมโครเมตร

วิธีวิเคราะห์ขนาดอนุภาค

หลังการย่อยและการบดจะมีการวิเคราะห์ขนาด (particle size analysis) ซึ่งเป็นกระบวนการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งในที่นี้จะอธิบายการวิเคราะห์ขนาดออกเป็น 2 วิธีคือ

1. การวิเคราะห์ขนาดด้วยวิธีตะแกรงมาตรฐาน (sieve analysis)

การวิเคราะห์ขนาดด้วยวิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันมาก การใช้ตะแกรงมาตรฐานมักใช้กับวัสดุที่มีขนาดค่อนข้างหยาบถึงปานกลาง เพราะหากใช้กับวัสดุที่มีขนาดละเอียดมาก ๆ แล้วมักเกิด

ปัญหาการถอดต้นของวัสดุในรูตะแกรง โดยเฉพาะเม็ดวัสดุที่มีขนาดใกล้เคียงกับรูตะแกรง การใช้ตะแกรงมาตรฐานอาจใช้วิธีแห้งหรือเปียกก็ได้

ตะแกรงมาตรฐานที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วยเส้นลวดนำมาสานกันทำให้เกิดเป็นช่องสี่เหลี่ยม และมีกบอกขนาดเป็นเมช ตะแกรงขนาด 10 เมช ซึ่งหมายถึงระยะความยาว 1 นิ้ว จะมีช่องรูตะแกรงจำนวน 10 ช่อง และช่องหนึ่งจะมีความกว้าง 0.1 นิ้ว หักออกเลียดด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด ดังนั้นคำว่า เมช จึงยังไม่ได้บอกขนาดที่แท้จริงของอนุภาคที่ผ่านลวดรูตะแกรง จนกว่าจะทราบขนาดของเส้นลวดที่โรงงานต่าง ๆ นำมาใช้สานทำตะแกรง

ตะแกรงชุดหนึ่ง ๆ มักจะมีกฎเกณฑ์ขนาดของรูลดหลั่นกันลงไป สมมติว่าถ้าจะใช้หลักการก้าวหน้าทางเลขคณิต (arithmetic series) อย่างง่ายคือ มีขนาด 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2 และ 1 นิ้ว ตามลำดับ จะเห็นว่าหลักการนี้ไม่เหมาะสม เพราะว่าวัสดุขนาด 1 นิ้วและ 2 นิ้ว มีขนาดแตกต่างกันมาก ซึ่งตรงกันข้ามกับวัสดุขนาด 9 และ 10 นิ้ว ซึ่งดูแล้วเกือบจะไม่เห็นความแตกต่าง ดังนั้นจึงมีผู้คิดค้นใหม่โดยหาตัวคูณที่มากคูณ เช่น ใช้ $\frac{1}{2}$ เป็นตัวคูณ ตัวเลขจะออกมาเป็น 8, 4, 2, 1, $\frac{1}{2}$ นิ้ว เป็นต้น ซึ่งอยู่ในระบบความก้าวหน้าทางเรขาคณิต (geometric series) แต่ต่อมาแก้ไขให้ $\sqrt{2}$ เป็นตัวคูณและกลายเป็นมาตรฐานของตะแกรงที่ใช้กันในประเทศสหรัฐอเมริกาในปัจจุบัน ในงานค้นคว้าบางงานใช้ $\sqrt{2}$ เป็นตัวคูณ และทางบริษัทผู้ผลิตได้ยึดเอาตะแกรงขนาด 200 เมชเป็นมาตรฐาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 75 ไมครอน หรือ 0.075 มิลลิเมตร ตะแกรงมาตรฐานที่ใช้ในการคัดขนาดสำหรับงานทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 3 เมช ถึง 400 เมช เป็นส่วนใหญ่ โดยขนาด 400 เมช เท่ากับขนาดของรูตะแกรง 38 ไมครอน (1 ไมครอน = $\frac{1}{1,000}$ มิลลิเมตร = $\frac{1}{1,000,000}$ เมตร)

การคัดขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐานนี้ ทำได้โดยการนำของแข็งที่ผ่านการลดขนาดแล้วมาผ่านบนตะแกรงที่มีขนาดต่าง ๆ กัน การคัดขนาดโดยใช้มืออาจใช้คัดขนาดวัสดุ ซึ่งต้องการคัดขนาดเพียงขนาดเดียว หรือ 2-3 ขนาด แต่ถ้าหากต้องการคัดขนาดออกมาหลาย ๆ ขนาดก็ต้องวางชุดตะแกรงเป็นหลาย ๆ ชั้นตามรูปที่ 2.14(ก) ซึ่งการคัดขนาดแบบนี้โดยไม่ใช่เครื่องมือช่วยเลยนั้นจะต้องใช้เวลานาน และผิดพลาดได้ง่าย ดังนั้นจึงใช้เครื่องคัดขนาดแบบลั่นดังแสดงตามรูปที่ 2.14(ข) โดยนำเอาชุดของตะแกรงซึ่งมีขนาดต่าง ๆ มาเขย่าบนเครื่องดังกล่าว

ตะแกรงที่ใช้คัดขนาดจะติดอยู่กับส่วนล่างของโลหะทองเหลืองรูปกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั่วไปประมาณ 8 นิ้ว สูงประมาณ 2 นิ้ว ตะแกรงชุดหนึ่งประกอบด้วยตะแกรงขนาดต่าง ๆ มีฝาปิดครอบตะแกรงชั้นบนสุด และชั้นล่างสุดจะเป็นภาตรองรับ มีรูปร่างลักษณะคล้ายกับตะแกรงทั่วไป แต่ข้างล่างแทนที่จะมีลวดเป็นตะแกรง กลับเป็นโลหะที่บสำหรับรองรับอนุภาคที่ผ่านรูตะแกรงชั้นที่เหนือกว่าไว้ตามรูปที่ 2.14(ก) หลังจากการคัดขนาดจะมีวัสดุค้างอยู่บนตะแกรง เรียกว่าอนุภาคโตเกินขนาด (oversize)

สิ่งที่ควรระวังในการวัดขนาดก็คือ อย่าใช้ตัวอย่างมากเกินไปในการทดลองครั้งหนึ่ง ๆ เพราะเม็ดอนุภาคจะเกิดการอุดตันในชุดตะแกรงมาก และอาจจะทำให้เกิดไฟฟ้าสถิต ซึ่งจะทำให้อนุภาคเม็ดเล็ก ๆ เกิดรวมตัวกันเป็นก้อน ทำให้ได้ผลลัพท์ผิดไป นอกจากนี้ความชื้นต้องมีน้อยที่สุด

2. การวิเคราะห์ขนาดด้วยวิธีที่ไม่ใช่ตะแกรงมาตรฐาน (sub sieve techniques)

การวิเคราะห์ขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐานมักใช้ตะแกรงที่มีขนาดเล็กประมาณ 400 เมช การวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่านี้จะใช้เทคนิคเฉพาะ ในที่นี้จะแสดงวิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยสังเขป ซึ่งได้แก่เครื่องวัดการกระจายของขนาด โดยใช้หลักการตกทวนของของไหล ได้แก่ simple elutriator ตามรูปที่ 2.15(ก) หรือใช้หลักการตกตะกอน โดยวิธี beaker decantation ตามรูปที่ 2.15(ข) และ andreason pipette ตามรูปที่ 2.15(ค) ซึ่งหลักการเหล่านี้จะใช้ Stokes' Law ตามสมการในการวัดขนาดดังนี้

$$v_i = \frac{gd^2(D_s - D_f)}{18\eta} \quad (2.9)$$

โดยที่ v_i = ความเร็วปลายของอนุภาควัสดุ (เมตรต่อวินาที)

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดอนุภาค โดยสมมติให้เม็ดมีทรงกลม (เมตร)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาที²)

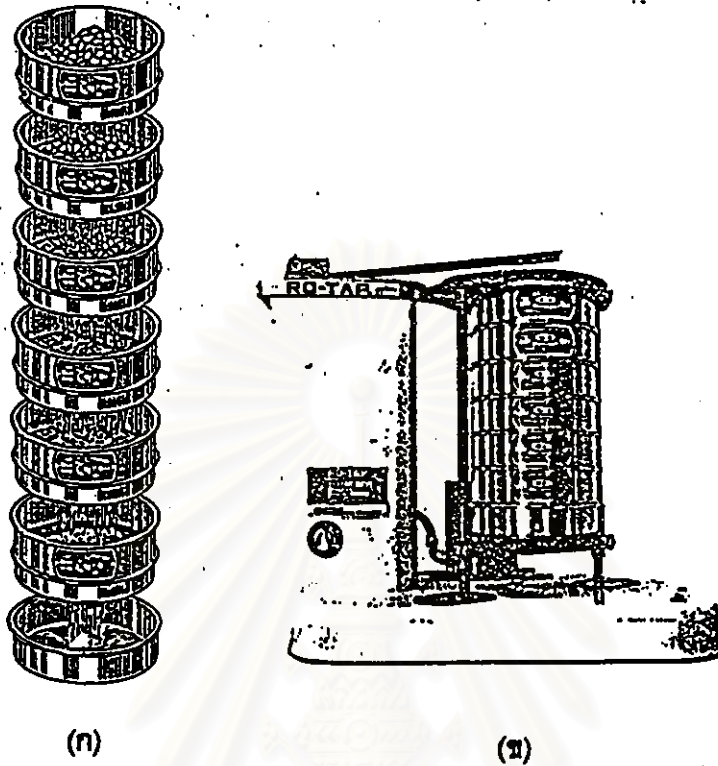
D_s = ความหนาแน่นของเม็ดอนุภาค (กิโลกรัมต่อเมตร³)

D_f = ความหนาแน่นของตัวกลางของไหล (กิโลกรัมต่อเมตร³)

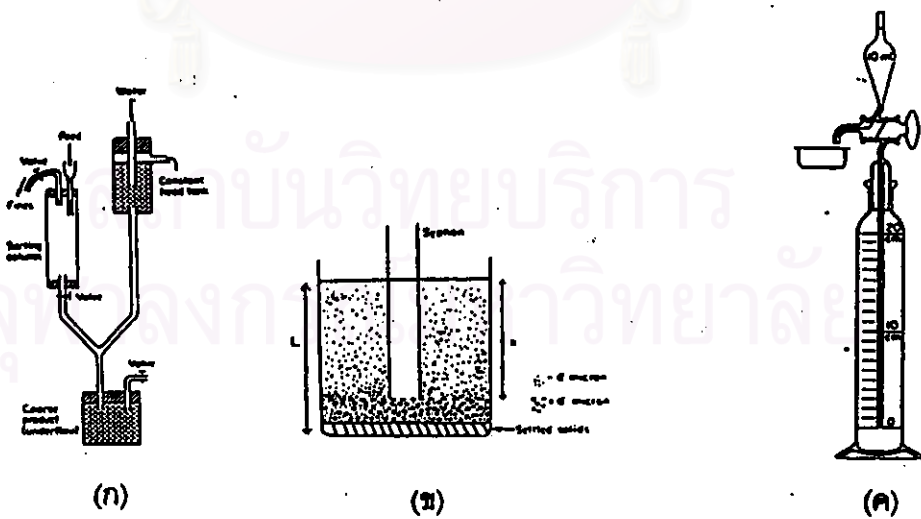
η = ความหนืดของของไหล (นิวตัน วินาทีต่อเมตร²)

สูตรของ Stokes' Law ตามสมการ (2.9) นี้ จะใช้ได้เมื่อค่า $N_{zs} = \frac{v_i d D_f}{\eta} \leq 0.2$ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 40 มิลลิเมตรเท่านั้น

นอกจากนี้แล้วยังมีเทคนิคการวัดขนาดของเม็ดอนุภาคขนาดเล็ก ๆ ได้แก่ การวัดขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน การวัดขนาดและการกระจายของขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการวัดความต้านทานไฟฟ้าหรือใช้ลำแสงเลเซอร์ และยังมีวิธีอื่น ๆ อีก



รูปที่ 2.14 แสดง (ก) ตะแกรงคัดขนาดอนุภาค และ (ข) เครื่องคัดขนาดแบบสั่น
ที่มา : ภิญโญ, 1995



รูปที่ 2.15 เครื่องวัดการกระจายขนาดต่าง ๆ (ก) simple elutriator (ข) beaker decantation และ
(ค) andreason pipette
ที่มา : ภิญโญ, 1995

การแสดงผลการกระจายของเมล็ดขนาดอนุภาค

เมื่อวัดได้ผ่านการลดขนาดแล้ว หลังจากทำการวัดการกระจายขนาดตามวิธีที่กล่าวข้างต้น จะสามารถแสดงผลของการกระจายขนาดได้ 2 แบบ

1. การแสดงผลของการกระจายขนาดแบบตาราง มีหลายวิธีที่สามารถแสดงผลการกระจายขนาด ตารางที่ 2.1 เป็นตัวอย่างการแสดงผลการวิเคราะห์ขนาดของแร่ที่ผ่านการย่อยมาแล้วด้วยตะแกรงมาตรฐาน

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างตารางแสดงผลวิเคราะห์การกระจายขนาดวัตถุที่ผ่านการลดขนาด
ที่มา : ภิญโญ, 1995

ขนาดตะแกรง		รูตะแกรงเจ็ดย (มิลลิเมตร)	รูตะแกรงที่ระบุ (มิลลิเมตร)	น้ำหนักวัตถุ		ร้อยละน้ำหนักที่สะสม	
เมฆ	มิลลิเมตร			กรัม	%	ผ่านตะแกรง	บนตะแกรง
						100.00	0.00
	+9.50	11.65		0.81	0.03	99.97	0.03
	-9.50 +6.80	8.15	9.50	11.61	0.43	99.54	0.46
	-6.80 +4.75	5.78	6.80	54.81	2.03	97.51	2.49
	-4.75 +3.40	4.08	4.75	112.59	4.17	93.34	6.66
-8	+8 -3.40 +2.36	2.88	3.40	188.19	6.97	86.37	13.63
-8	+12 -2.36 +1.70	2.03	2.36	258.83	9.59	76.78	23.22
-12	+16 -1.70 +1.18	1.44	1.70	296.38	10.84	65.84	34.16
-15	+20 -1.18 +0.85	1.02	1.18	291.80	10.80	55.04	44.96
-20	+30 -0.85 +0.80	0.725	0.850	287.57	9.91	45.13	54.87
-30	+40 -0.60 +0.425	0.512	0.600	227.34	8.42	36.71	63.29
-40	+50 -0.425 +0.300	0.362	0.425	192.24	7.12	29.59	70.41
-50	+70 -0.300 +0.212	0.257	0.300	164.70	6.10	23.49	76.51
-70	+100 -0.212 +0.150	0.181	0.212	141.21	5.23	18.26	81.74
-100	+140 -0.150 +0.106	0.128	0.150	118.26	4.38	13.88	86.12
-140	+200 -0.106 +0.075	0.090	0.106	103.95	3.85	10.03	89.97
-200	+270 -0.075 +0.053	0.064	0.075	78.57	2.91	7.12	92.88
-270	+400 -0.053 +0.038	0.045	0.053	57.78	2.14	4.98	95.02
-400		0.019	0.038	134.46	4.98	0.00	100.00
รวม				2700.0	100.00		

2. การแสดงผลการกระจายขนาดด้วยการเขียนกราฟ ผลของการวิเคราะห์ขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐานมักแสดงไม่เพียงแต่ในรูปตารางเท่านั้น แต่มักแสดงให้เห็นด้วยกราฟ

2.1 การเขียนแบบเลขคณิต (arithmetic plot) เป็นการเขียนระหว่างขนาดเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ (arithmetic mean) ของรูตะแวง กับร้อยละของน้ำหนักที่ค้างบนแต่ละตะแวง (% weight retained) โดยขนาดเฉลี่ยอยู่ตามแกน X และร้อยละของน้ำหนักที่ค้างบนแต่ละตะแวงเป็นแกน Y โดยใช้สเกลแบบเลขคณิต แสดงดังรูปที่ 2.16(ก) โดยเมื่อเชื่อมจุดกึ่งกลางของ histogram เหล่านั้นจะได้เส้นโค้งต่อเนื่อง ข้อเสียของการพล็อตแบบนี้คือ มีความแออัดของข้อมูลที่ขนาดเล็ก ๆ

2.2 การเขียนแบบเซมิล็อก (semi-log plot) หรือการเขียนแบบความถี่ (frequency plot) เป็นการเขียนระหว่างขนาดเฉลี่ย โดยใช้สเกลแบบล็อก (log scale) กับร้อยละของน้ำหนักที่ค้างบนแต่ละตะแวง โดยใช้สเกลแบบเลขคณิต (arithmetic scale) แสดงดังรูปที่ 2.16(ข) จะเห็นว่า การเขียนแบบนี้จะทำให้ขนาดของเม็ดอนุภาคในแนวแกน X ถูกเฉลี่ยออกไปให้มีช่วงขนาดเป็นช่อง histogram ที่เท่า ๆ กัน ที่เกิดเป็นเช่นนี้เพราะ ขนาดของเม็ดอนุภาคที่ผ่านการลดขนาดมาแล้วมีอยู่ในระบบความก้าวหน้าทางเรขาคณิต (geometric series) จะทำให้ข้อมูลมีการกระจายที่ดีขึ้น มีข้อเสียคือจะมีความแออัดของข้อมูลที่ขนาดใหญ่

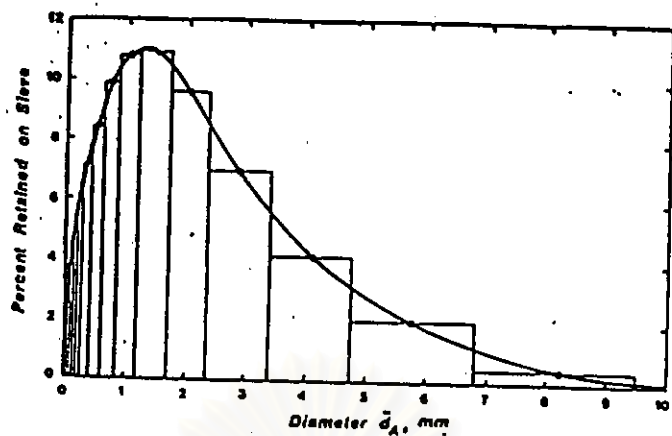
2.3 การเขียนค่าสะสมโดยตรง (cumulative direct plot) เป็นการเขียนระหว่างขนาดที่ระบุ กับร้อยละของน้ำหนักที่สะสมบนตะแวงที่ระบุ (cumulative % passing) โดยขนาดที่ระบุใช้สเกลล็อก ส่วนน้ำหนักที่สะสมบนตะแวงที่ระบุใช้สเกลแบบเลขคณิต ซึ่งนิยมใช้กับอนุภาคที่ผ่านการลดขนาดมาแล้ว โดยที่อนุภาคที่ผ่านการลดขนาดจะเขียนได้เส้นโค้งเป็นรูปตัว S (S-curve) แสดงดังรูปที่ 2.16(ค)

ข้อมูลของค่าการกระจายขนาดสำหรับระบบอนุภาค สามารถอธิบายโดยค่าสัดส่วนอนุภาคในช่วงขนาดที่พิจารณา จำนวนอนุภาคทั้งหมดอาจใช้เป็นตัวกำหนดหลัก (basis) บางอย่าง เช่น ปริมาตรทั้งหมด, พื้นที่ทั้งหมด หรือจำนวนทั้งหมดของอนุภาคในระบบ และให้รูปร่างอนุภาคเป็นแบบเดียวกันทั้งหมด

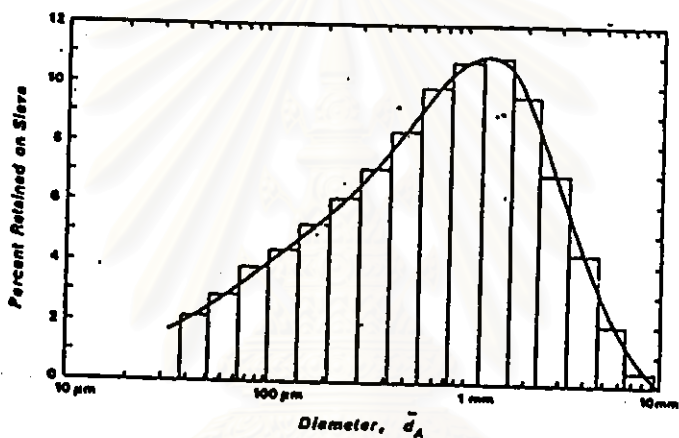
การแสดงผลการกระจายขนาดด้วยกราฟระหว่างสัดส่วนมวลหรือปริมาตร กับสัดส่วนระหว่างอนุภาคแต่ละขนาดกับขนาดเฉลี่ย โดยกราฟอาจเป็นชนิดรูปแท่งหรือเส้นโค้งที่เขียนจุดตลอดของค่าการกระจายขนาด ส่วนกราฟที่แสดงค่าการกระจายแบบสะสม จะเขียนจุดจากค่าสัดส่วนมวลหรือปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคตั้งแต่ค่าน้อยที่สุด กับขนาดของอนุภาคหรือสัดส่วนขนาดอนุภาค ซึ่งขนาดกลางของอนุภาคในระบบ จะสามารถหาได้ที่ร้อยละ 50 ของกราฟดังกล่าว ส่วนขนาดเฉลี่ยอนุภาคหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$D_p = \frac{\sum D^p f_n}{\sum D^q f_n^{(q-p)}} \quad (2.10)$$

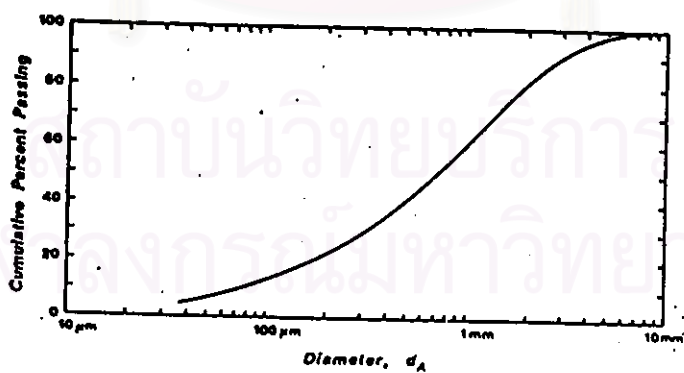
เมื่อค่าของ p และ q ขึ้นกับชนิดของค่าเฉลี่ยที่ต้องการ ดังแสดงในตารางที่ 2.2



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.16 แสดงการเขียนการกระจายขนาดของวัตถุที่ผ่านการลดขนาดทั้ง 3 แบบ (ก) แบบเลขคณิต,

(ข) แบบเซลิติก และ (ค) แบบการสะสมโดยตรง

ที่มา : ภิญโญ, 1995

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าตัวแปรสำหรับสมการที่ 2.10

ชื่อขนาดเฉลี่ย, D_p	q	p
Geometric mean	0	0
Linear mean or Number mean	1	0
Surface	2	0
Volume mean	3	0
Surface to diameter	2	1
Volume to diameter	3	1
Sauter mean (volume to surface)	3	2
De Brouckere (mass mean)	4	3

ความสัมพันธ์ของการกระจาย สามารถใช้อธิบายสิ่งที่จะเกิดขึ้นในระบบได้ โดยความสัมพันธ์ของการกระจายแบบปกติ หรือ Gaussian ได้ว่า

$$F = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(D - \bar{D})^2}{2s^2}\right] \quad (2.11)$$

รูปแบบของความสัมพันธ์การกระจายแบบ log-normal คือ

$$F = \frac{1}{\ln s \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln D - \ln \bar{D})^2}{2\ln^2 s}\right] \quad (2.12)$$

ส่วนรูปแบบอื่น ๆ ของความสัมพันธ์การกระจาย เช่น Rosin-Rammler และ Nukiyama-Tanasawa เป็นต้น และได้มีการพัฒนาความสัมพันธ์การกระจายจากทฤษฎีความน่าจะเป็น ซึ่งเสนอโดย Mugelc และ Evans ดังสมการ

$$F = \frac{\delta}{\sqrt{\pi}} \exp\left[-\delta^2 \left(\ln \frac{aD^n}{D_m^n - D^n}\right)^2\right] \quad (2.13)$$

เมื่อ $0 \leq D \leq D_m$ และ δ คือตัวคูณของค่าการกระจาย

a คือค่าคงที่ไร้มิติ

n คือตัวเลข 1, 2 หรือ 3 (ขึ้นกับหลัก basis)

D_m คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่สุด

ขนาดอนุภาคใหญ่สุด (D_m) อาจประมาณจากข้อมูลสัดส่วนที่พิจารณา เช่น กราฟเส้นโค้งที่เขียนจุดระหว่าง D และสัดส่วนมวลสะสม จากรูปกราฟดังกล่าวสามารถหาค่า D_{10} , D_{50} และ D_{90} ที่ร้อยละ 10, 50 และ 90 ตามลำดับ

$$\frac{D_m}{D_{50}} = \frac{D_{90}(D_{90} + D_{10}) - 2D_{90}D_{10}}{D_{90}^2 - D_{90}D_{10}} \quad (2.14)$$

และ

$$a = \frac{D_m - D_{50}}{D_{50}}$$

ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[D/(D_m - D)]$ กับสัดส่วนมวลหรือปริมาตรของแต่ละขนาดอนุภาคเป็นค่าของ δ

การกวน (agitation)

เป็นกระบวนการที่ทำให้ของไหลรวมเป็นเนื้อเดียวกัน หรือทำให้ของแข็งที่แขวนลอยอยู่แตกออกและละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นการเหนี่ยวนำให้สารเกิดการเคลื่อนไหว เช่น การหมุนเป็นวงกลมภายในภาชนะที่บรรจุเป็นต้น การกวนมีวัตถุประสงค์เพื่อ

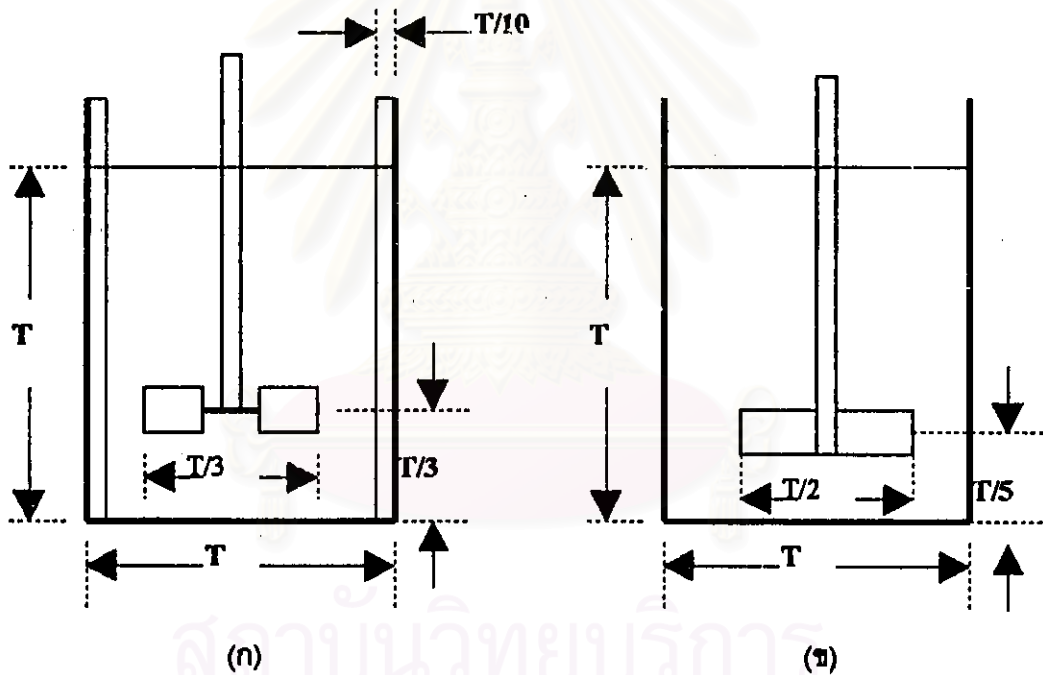
1. กระจายกลุ่มอนุภาคของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในของเหลว ให้แตกออกจนเป็นของผสมที่มีลักษณะสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน หรือกระจายแก๊สในของเหลว ให้อยู่ในรูปของฟองอากาศเล็ก ๆ
2. ทำให้ของเหลวรวมกันเป็นเนื้อเดียว เช่น แอลกอฮอล์กับน้ำ หรือกระจายของเหลวชนิดที่สองที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับชนิดแรก ให้อยู่ในรูปของ suspension หรือ emulsion
3. ช่วยให้การถ่ายโอนความร้อนเป็นไปได้ดีขึ้น เช่น ระหว่างของเหลวกับขดลวดให้ความร้อน

ของเหลวส่วนใหญ่จะกวนในถังหรือภาชนะ ที่เป็นรูปทรงกระบอกตั้งอยู่บนแนวตั้ง ส่วนบนของถังอาจเปิดหรือปิดก็ได้ ชนิดของถังที่ชนิดส่วนใหญ่มักขึ้นอยู่กับสภาพของวัสดุที่จะกวน แบบที่ใช้กันมักจะมีก้นกลมไม่แบนราบ เพื่อที่จะกำจัดขอบที่คมหรือส่วนที่ของไหลไม่อาจผ่านไปได้ ระดับความลึกของของเหลวจะประมาณเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง ใบพัดกวนจะติดตั้งบนแกนที่ขึงลงไปกลางถัง โดยใช้แรงขับเคลื่อนนี้ด้วยมอเตอร์ ซึ่งบางครั้งก็ต่อโดยตรง แต่มีโดยตรงผ่านทางชุดเกียร์ลดความเร็ว นอกจากนี้ยังมีการต่อท่อสำหรับให้ของเหลวไหลเข้าออก ขดท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ปลอกครอบ (jacket) และรูเจาะสำหรับเทอร์โมมิเตอร์ หรือเครื่องวัดอื่นร่วมด้วย

ถังกวนใช้กันมากในการกวนผสมสาร หรือในลักษณะเครื่องปฏิกรณ์เคมี เพื่อกระบวนการผลิตต่างๆ ทั้งนี้เพราะการสร้างและการควบคุมทำได้ง่าย ถังกวนมาตรฐานแบ่งได้สองแบบแสดงดังรูปที่ 2.17

1 ถังกวนแบบมีคิริบ (baffled tank) ใช้ในการกวนของเหลวที่ต้องการไหลกวนอย่างรุนแรง ปกติจะมีคิริบ 4 อัน ความกว้างเป็น $1/10$ หรือ $1/12$ เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง ถ้าต้องการถังสูงประมาณเท่าเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง ถ้าต้องการถังสูงก็ใช้ใบพัดหลายใบเป็นจำนวน เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของถังนั้นขึ้นไป ใบพัดมีขนาด $1/3$ ของถัง และตั้งห่างจากพื้นถัง $1/3$ ถึง $1/2$ ของขนาดถัง

2 ถังกวนแบบไม่มีคิริบ (unbaffled tank) ใช้เมื่อไม่ยากให้ของแข็งเกาะตามคิริบ หรือ เมื่อต้องการกวนในความเร็รรอบของใบพัดต่ำ ๆ การกวนในถังชนิดนี้จะเกิดผิวเว้าลงไป (free vortex) ในแนวแกนของใบพัด ยิ่งความเร็วสูงผิวของของเหลวยิ่งต่ำลงมากใกล้ใบพัด จึงมีขีดจำกัดในการกำหนดความเร็วของใบพัด เวลาที่ใช้กวนผสมจึงมากกว่าถังแบบมีคิริบ ใบพัดที่ใช้กับถังกวนแบบไม่มีคิริบมักเป็นชนิดใบพาย



รูปที่ 2.17 ถังกวนมาตรฐาน (ก) แบบมีคิริบ และ (ข) แบบไม่มีคิริบ

ที่มา : เพียรพรรค, 2534

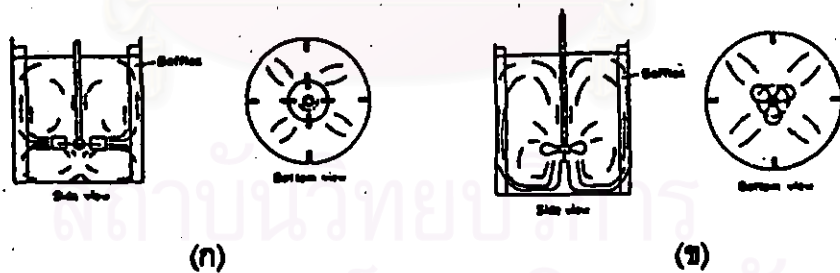
รูปแบบการไหลในถังกวน

แสดงดังรูปที่ 2.18 ชนิดการไหลในถังกวนขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกวน ลักษณะของของไหล ขนาดและสัดส่วนของถัง แบบเฟล็ด และความเร็วรอบของเพลลา ความเร็วของของไหลที่จุดใด ๆ ในถัง ประกอบด้วย ความเร็วประกอบ 3 ชนิด และรูปแบบของการไหลขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของความเร็วประกอบเหล่านี้ จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง

- ความเร็วประกอบในแนวรัศมี เป็นความเร็วในแนวตั้งฉากกับเพลารองตัวกวน
- ความเร็วประกอบในแนวแกน เป็นความเร็วในแนวขนานกับเพลารองตัวกวน
- ความเร็วประกอบในแนวสัมผัส เป็นความเร็วในแนวสัมผัสรอบ ๆ เพลารองตัวกวน

ถ้าเพลารองตัวกวนในแนวตั้ง ความเร็วประกอบในแนวรัศมีและในแนวสัมผัสจะอยู่ในระนาบในแนวระดับ และความเร็วประกอบในแนวแกนจะอยู่ในแนวตั้ง ความเร็วประกอบในแนวรัศมีและแนวแกน เป็นความเร็วประกอบที่จำเป็นสำหรับการไหลที่ทำให้เกิดการผสม เมื่อเพลารองตัวกวนในแนวตั้งและตั้งอยู่ตรงกลางของถัง ความเร็วในแนวสัมผัสจะทำให้เกิดผลเสียต่อการผสม เพราะทำให้เกิดกระแสนวนที่ผิวหน้าของของไหล และทำให้ของไหลเกิดการแยกชั้นที่ระดับต่าง ๆ กัน โดยปราศจากการไหลในแนวตั้งระหว่างระดับเหล่านี้ ถ้าเป็นกรณีที่เป็นอนุภาครองของแข็งปรากฏอยู่ในของไหล กระแสนวนวันนี้จะเหวี่ยงอนุภาครองของแข็งออกไปปะทะกับผนังของถัง อนุภาครองของแข็งจะเคลื่อนตัวลงตามผนังของถังและมารวมกองอยู่ที่กึ่งกลางของก้นถัง ดังนั้นแทนที่จะเกิดการผสมกลับเกิดขึ้นของไหลที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน

เนื่องจากการไหลหมุนวนของของไหลจะเคลื่อนที่ในทิศทางของการเคลื่อนที่ของใบพัดของตัวกวน ทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างใบพัดและของไหลลดลง ดังนั้นกำลังงานที่ใบพัดให้แก่ของไหลจึงถูกจำกัดลง ในถังที่ไม่มีแบบเฟิลแล้วตัวกวนชนิดใด ๆ ก็ทำให้เกิดการหมุนวนของของไหลได้ ถ้าตัวกวนมีความเร็วรอบสูง กระแสนวนอาจจะมีผลจนเราสามารถเห็นตัวกวนโผล่ออกมาจากของไหล แก๊สที่อยู่เหนือของไหลจะถูกดูดเข้าไปในของไหล



รูปที่ 2.18 แสดงรูปแบบการไหล (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน

ที่มา : เพียรพรรค, 2534

ใบกวน

เป็นโครงสร้างรูปแบบการไหลในระบบ ทำให้ของเหลวไหลหมุนเวียนรอบภาชนะและไหลเข้าสู่ใบพัด วนเวียนไปมาเช่นนี้ ใบพัดกวนแบ่งออกเป็นสองชนิดตามการทำงาน คือชนิดที่ทำงานให้กระแสไหลในแนวที่ขนานกับแกนหมุน เรียกว่าชนิด axial-flow impellers เช่นใบพัดเรือ (propeller)

เป็นต้น และอีกชนิดหนึ่งที่ทำงานให้กระแสไหลในแนวที่ตั้งฉากกับแกน หรือในแนวรัศมีเรียกว่าชนิด radial-flow impellers เป็นใบกวนที่ทำให้เกิดการไหลของของไหลในแนวรัศมีหรือแนวสัมผัส เช่น พวกใบพาย (paddle) และพวกเทอร์ไบน์ (turbine) เป็นต้น แต่ก็มีกรอกแบบให้เกิดการไหลทั้งสองรูปแบบได้ด้วย เช่นพวกเทอร์ไบน์ใบเอียง (pitched-blade turbine) โดยทั่วไปแบ่งใบกวนเป็น 3 แบบใหญ่ ๆ คือ

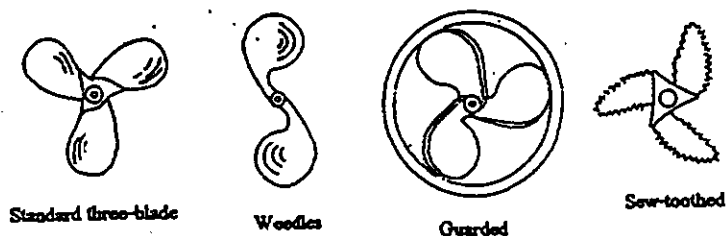
ใบพัดเรือ แสดงดังรูปที่ 2.19(ก) เป็นตัวกวนแบบไหลตามแนวแกน และเป็นตัวกวนที่มีรอบความเร็วสูงมากเหมาะสำหรับของไหลที่มีความหนืดสูง โดยปกติเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกวนแบบนี้จะไม่เกิน 20.3 เซนติเมตร เมื่อใบพัดเรือหมุนจะทำให้ของไหลเคลื่อนที่เป็นรูปกันหอย (helix) การหมุนหนึ่งรอบจะทำให้ของไหลเคลื่อนที่ไปตามแนวแกนเป็นระยะทางหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของใบพัดเรือ

ใบพาย ประกอบด้วยใบพัดแบนรูปใบพายหมุนอยู่บนเพลลา โดยทั่วไปตัวกวนแบบนี้จะมีใบพัดอยู่ 2-4 ใบดังรูปที่ 2.19(ข) ใบพายหมุนด้วยความเร็วช้าถึงความเร็วปานกลาง และจะผลัดของไหลออกไปในแนวรัศมีและแนวสัมผัส ความยาวของใบพายประมาณร้อยละ 50 ถึง 80 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง ความกว้างของใบพัดประมาณ 1/6 ถึง 1/10 ของความยาวของใบพัด ใบพายที่ความเร็วรอบสูงจำเป็นจะต้องคิดแบฟเฟิล (baffle) ในถัง มิฉะนั้นแล้วของไหลจะได้แต่ไหลหมุนวนแต่เกิดการผสมกันน้อยมาก

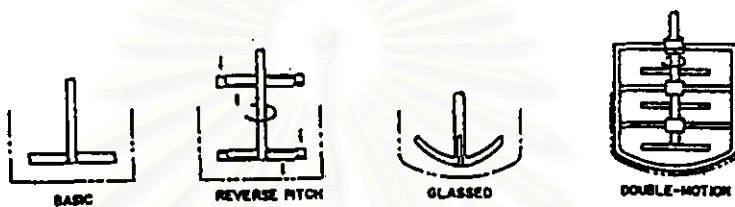
ใบเทอร์ไบน์ แสดงในรูปที่ 2.19(ค) ตัวกวนอาจอยู่ในลักษณะเปิดคือ แผ่นรับของใบพัดบางส่วนจะยื่นออกมาจากจานประกับ (shroud) ส่วนในลักษณะกึ่งปิดคือ รัศมีของใบพัดเท่ากับรัศมีของจานประกับ ด้านหนึ่งของตัวกวนจะเป็นใบพัด อีกด้านหนึ่งจะเป็นจานประกับ หรือตัวกวนในลักษณะปิดคือมีจานประกับสองแผ่นประกบใบพัดไว้ข้างใน เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกวนจะอยู่ระหว่างร้อยละ 30-50 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง ใบเทอร์ไบน์ใช้ได้ดีกับความหนืดในพิสัยกว้าง ๆ ถ้าใช้กับของไหลที่มีความหนืดต่ำ ทำให้เกิดกระแสน้ำวนอย่างรุนแรงของไหลตลอดถัง ใกล้เคียง ๆ กับตัวกวนนี้จะเป็นบริเวณที่เกิดกระแสการไหลอย่างรวดเร็ว และมีความปั่นป่วนสูง กระแสหลักที่เกิดจากการกระทำของใบเทอร์ไบน์คือ กระแสการไหลในแนวรัศมีและแนวสัมผัส แรงประกอบในแนวสัมผัสจะทำให้เกิดกระแสและการหมุนวน ซึ่งอาจจะหยุดได้ด้วยการใช้แบฟเฟิลหรือ diffuser ring

นอกจากนี้ยังมีใบพัดกวนที่ใช้งานเฉพาะอย่างและไม่อาจจัดอยู่ใน 3 กลุ่มแรก

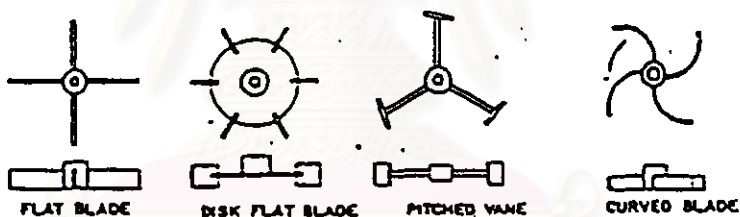
ใบกวนอัตราเฉือนสูง (high shear impellers) เป็นใบกวนทำให้เกิดการเฉือนได้สูง ดังรูปที่ 2.20 ซึ่งหมุนด้วยความเร็วสูง เพื่อการกระจายให้ของแข็งจิ๋ว หรือการกระจายของเหลวชนิดหนึ่งให้เป็นหยดละเอียดในของเหลวอีกชนิดหนึ่งเรียกว่าอิมัลชัน ใบพัดกวนพวกนี้ เช่น Disk type, Modified disk, Modified cone, Modified turbine, Saw-tooth edge เป็นต้น



(ก)

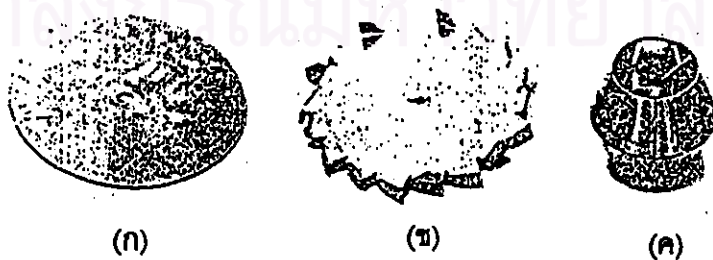


(ข)



(ค)

รูปที่ 2.19 ใบกวนชนิดต่าง ๆ (ก) ใบพัดเรือ (ข) ใบพาย และ (ค) ใบเทอร์ไบน์
ที่มา : เพียรพรรค, 2534



รูปที่ 2.20 ใบกวนอัตราเร็วสูงชนิดต่าง ๆ (ก) disk (ข) modified disk และ (ค) modified cone
ที่มา : เพียรพรรค, 2534

การอบแห้ง

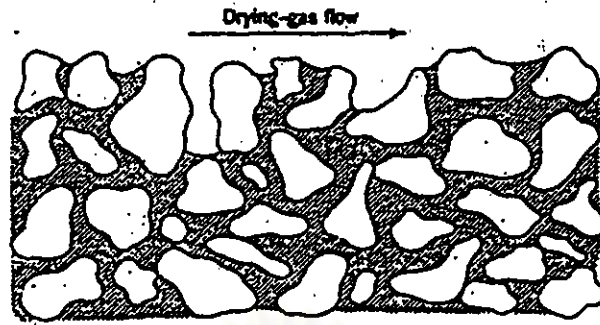
การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายโอนโดยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย ความร้อนที่ใช้เป็นความร้อนแฝงของการระเหย ข้อสำคัญของ การอบแห้งคือ การถ่ายโอนความร้อนไปยังจุดอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด แต่ตามความเป็นจริงไม่ต้องการให้ความร้อน ก็สามารถทำให้วัสดุนั้นแห้งได้ด้วยวิธีฝังลม หรือใช้พัดลมเป่าผ่านวัสดุ นั้นนาน ๆ อากาศที่พัดผ่านก็จะช่วยพาเอาน้ำหรือของเหลวหลุดติดไปด้วย

จุดประสงค์ในการอบแห้งเพื่อเอาน้ำออกจากของที่ต้องการทำให้แห้ง ส่วนมากทำการอบแห้งของแข็ง ของแข็งที่เปียกจะมีน้ำอยู่ผิวหน้าและภายในเนื้อ ดังนั้นในช่วงแรกของการอบแห้งของแข็ง ความชื้นที่มืออยู่จะปรับตัวให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของอากาศร้อน อัตราการอบแห้งในช่วงนี้ จึงต่ำ และน้ำที่อยู่บริเวณผิวหน้าจะค่อย ๆ ระเหยออกมาโดยการพา ซึ่งอัตราการระเหยของน้ำในช่วงนี้ จะคงที่เรียกว่า constant rate drying period ส่วนความชื้นที่อยู่ภายในเนื้อของวัสดุ จะเคลื่อนมายังบริเวณผิวหน้าอย่างช้า ๆ และแรงดึงผิวของของเหลวมีมาก ทำให้อัตราการระเหยในช่วงนี้น้อยลง เรียกว่า falling rate period และเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นความชื้นจะลดลง แต่การให้ความชื้นหมดไปนั้นยากมาก

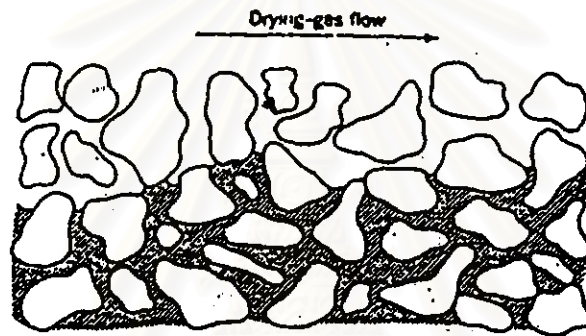
กลไกที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง

วัสดุขึ้นตั้งทิ้งไว้ในห้องที่มีความชื้นไม่สูงมาก ลักครู่จะสังเกตเห็นว่าผิวหน้าของวัสดุนั้นแห้ง โดยไม่ต้องให้ความร้อนหรือใช้พัดลมเป่า ที่เป็นเช่นนี้เพราะโมเลกุลของน้ำที่เกาะติดอยู่บนผิวหน้าค่อย ๆ ระเหยกลายเป็นโมเลกุลไอน้ำ แล้วลอยแทรกตัวขึ้นไปอยู่ในระหว่างโมเลกุลของอากาศ ทั้งนี้เกิดขึ้นได้เพราะในอากาศยังมีความชื้นไม่สมบูรณ์ โมเลกุลของน้ำค่อย ๆ ระเหยไปที่ละชั้นจนถึงเนื้อของวัสดุ พอน้ำบนผิวหน้าของวัสดุเริ่มหมด น้ำที่อยู่ภายในช่องว่างในเนื้อวัสดุก็จะค่อย ๆ ระเหยออกมา จนถึงเนื้อในซึ่งจะมีน้ำค้างอยู่เล็กน้อย ทั้งนี้เพราะว่ามีความสมดุลระหว่างความดันไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ซึ่งเรียกว่าวัสดุอยู่ในภาวะที่มีความชื้นสมดุล สามารถพิจารณาเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้จากรูปที่ 2.21 การอบแห้งแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ

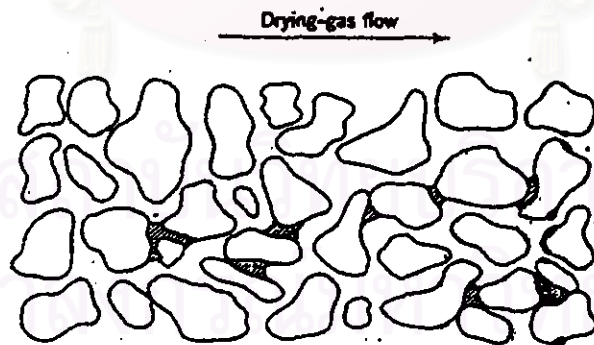
1. ช่วงให้ความร้อนเบื้องต้น
2. ช่วงอบแห้งที่ความเร็วคงที่
3. ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง



ช่องให้ความร้อนเบื้องต้น



ช่วงอบแห้งที่ความเร็วคงที่



ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง

รูปที่ 2.21 แสดงน้ำในวัสดุระเหยออกไป

ที่มา : เพียรพรรค, 2534

ที่ผิวของวัสดุที่เปียกชื้น ความชื้นนั้นจะอยู่ในรูปของน้ำ ถ้าเอาวัสดุนั้นมาอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่คงที่ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของกระแสลมร้อน ช่วงเวลาที่วัสดุใช้เพิ่มอุณหภูมิจนถึงค่านี้คือช่วงที่ 1 ส่วนช่วงที่ 2 อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ประมาณอุณหภูมิกระเปาะเปียก ตราบใดที่มีความชื้นเหลืออยู่ ในรูปของน้ำที่ผิวของวัสดุ ความร้อนทั้งหมดที่วัสดุได้รับในช่วงนี้ จะถูกใช้ในกากระเหยเท่านั้น อัตราส่วนของความชื้นเฉลี่ยของวัสดุ จะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในช่วงที่ 2 นี้ ดังนั้นความเร็วของการระเหยมีค่าคงที่ เรียกว่า constant drying rate ในช่วงที่ 3 ความชื้นในรูปของน้ำของวัสดุจะระเหยหมดไป เพราะการถ่ายโอนในรูปของน้ำจากส่วนในของวัสดุ เกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยที่ผิวหน้า ดังนั้นผิวหน้าของวัสดุจึงอยู่ในสภาพแห้ง และอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มสูงขึ้น ในขณะที่ความเร็วของการอบแห้งจะค่อย ๆ ลดลง ทั้งนี้เพราะปริมาณความร้อนที่วัสดุได้รับนอกจากจะลดลงแล้ว ยังต้องใช้ความร้อนนี้ในการระเหยความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุ

อัตราการอบแห้ง

1. อัตราการอบแห้งแบบคงที่ วัสดุที่นำมาอบแห้งนั้นส่วนใหญ่มีความชื้นสูงถึงร้อยละ 60 ดังนั้นโมเลกุลของน้ำจึงมีแทรกอยู่ทั้งภายในและบนผิวของวัสดุนั้น โมเลกุลของน้ำเหล่านี้มีโอกาสระเหยเป็นไอได้ง่าย น้ำตรงบริเวณผิวหน้าและส่วนที่ลึกเข้าไปในเนื้อไม่มาก จะมีอัตราการระเหยอย่างสม่ำเสมอ

แต่ถ้าเป็นวัสดุที่มีรูพรุน น้ำที่ระเหยมาจากภายในวัสดุ การกระจายความชื้นที่ผิวหน้าวัสดุ จะมีค่าคงที่ นั่นแสดงว่าอัตราการระเหยของความชื้นที่ผิวหน้ามีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในภาที่ผิวหน้า ฉะนั้นตัวควบคุมให้อัตราการอบแห้งคงที่ จะเป็นอัตราการระเหยของความชื้นที่ผิวหน้าของวัสดุเท่านั้น

2. อัตราการอบแห้งไม่คงที่ เมื่อวัสดุมีความชื้นลดลงถึงจุดหนึ่งแล้ว น้ำที่ค้างอยู่ในวัสดุจะเป็นส่วนที่อยู่ลึกจากผิวหน้าเข้าไป น้ำจำนวนนี้จะได้รับความร้อนจากภายนอกได้ยากและจำนวนน้อย จึงทำให้อัตราการระเหยของน้ำภายในเนื้อของวัสดุลดลง จากระยะเริ่มต้นอย่างสม่ำเสมอ

ดังนั้นอัตราการแพร่ของเหลว เป็นตัวควบคุมอัตราการอบแห้งกับวัสดุประเภทใดก็ตามที่ความชื้นออกได้ยาก การเคลื่อนที่ของความชื้นภายในเนื้อวัสดุมาสู่ภายนอก จะมีลักษณะคล้ายกับการนำความร้อน

เวลาในการอบแห้ง

เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกันออกไป จึงทำให้อัตราการอบแห้งไม่เหมือนกัน วัสดุบางชนิดทำให้เกิดอัตราการอบแห้งน้อยลงเป็นสองระยะเป็นต้น ดังนั้นการคำนวณหาเวลาสำหรับการอบแห้งวัสดุจึงมีความสำคัญ อาจแบ่งการคำนวณเวลาเป็น 2 ระยะคือ ระยะแรกเป็นการอบแห้งแบบอัตราคงที่ ระยะที่สองเป็นการอบแห้งที่อัตราไม่คงที่

1. เวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่อัตราคงที่ เป็นช่วงเวลาที่ความชื้นของวัสดุเปลี่ยนจากจุดเริ่มต้น (W_1) จนถึงจุดที่มีความชื้นวิกฤต (W_c) จากสมการของอัตราการอบแห้ง

$$\frac{\text{อัตราการอบแห้ง}}{\text{หนึ่งหน่วยพื้นที่}} = \frac{(\text{ความชื้นเริ่มต้น} - \text{ความชื้นวิกฤต}) \times (\text{น้ำหนักวัสดุ})}{(\text{เวลาอบแห้ง}) \times (\text{หนึ่งหน่วยพื้นที่})}$$

$$\begin{aligned} \frac{dW}{dt} = R &= \frac{m_s (W_1 - W_c)}{(t \cdot A)} \\ t_1 &= \frac{m_s (W_1 - W_c)}{(R \cdot A)} \end{aligned} \quad (2.15)$$

2. เวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่อัตราไม่คงที่ โดยปกติช่วงเวลาของการอบแห้งที่อัตราไม่คงที่จะยาวกว่าช่วงเวลาการอบแห้งอัตราคงที่เสมอ คงเป็นเพราะแต่ละเวลาจะมีปริมาณความชื้นระเหยออกมาไม่เท่ากัน การคำนวณหาเวลาที่แน่นอนก็คำนวณไม่ได้ ต้องอาศัยผลรวมที่วัดได้แล้วนำมาเขียนลงในกราฟ ผลรวมที่คำนวณได้จากกราฟนำมาหาค่าเฉลี่ยอีกครั้งดังสมการการคำนวณ

$$t_2 = \frac{m_s}{A} \int_{W_c}^{W_3} \frac{dW}{R} \quad (2.16)$$

เทอมในเครื่องหมายอินทิเกรตนั้นไม่สามารถหาได้โดยตรง และค่า R เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ไม่สามารถนำค่าออกจากเครื่องหมายอินทิเกรตได้ จึงต้องนำผลการทดลองที่คำนวณได้ระหว่าง ค่าความชื้นในอากาศ มาเขียนกับค่าส่วนกลับของ R ในกราฟ จะได้พื้นที่ใต้กราฟเป็นค่ารวมของ $\int_{W_c}^{W_3} \frac{dW}{R}$ สามารถแทนค่าลงในสมการที่ 2.16 จะคำนวณหาค่าเวลาในการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งน้อยลง

$$\begin{array}{ccc} \text{เวลาการอบแห้ง} & = & \text{เวลาอบแห้งในช่วง} \\ \text{ทั้งหมด} & & \text{อัตราคงที่} \\ & & + \\ & & \text{เวลาอบแห้งในช่วง} \\ & & \text{อัตราไม่คงที่} \end{array}$$

งานวิจัยในอดีต

Tasakorn (1977) ศึกษาการแตกกระจายของหยดของเหลวชนิดหนึ่ง ที่แขวนลอยในช่องของเหลวอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งกลไกการแตกของหยดของเหลวในถังกวน สามารถกระทำได้ 2 วิธีใหญ่ ๆ คือ การฉีกของเหลวด้วยหัวฉีกขนาดเล็กลงในช่องเหลวอีกชนิดหนึ่ง โดยการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ให้เป็นพลังงานจลน์ ส่วนอีกวิธีคือ ทำให้ช่องเหลวที่อยู่กับช่องเหลวอีกชนิดหนึ่งเกิดพลังงานจลน์ แล้วเกิดการแตก เช่นทำให้เกิดกระแสปั่นป่วนอย่างต่อเนื่องของของไหล ในถังกวนที่ใช้ใบกวนชนิดต่าง ๆ เพราะของเหลวมีแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดเป็นหยดของเหลวได้ จึงต้องใช้แรงหรือพลังงานที่จะทำให้หยดของเหลวแยกตัวออกจากกัน ซึ่งปัจจัยที่เป็นตัวควบคุมการแตกที่เกิดขึ้น นอกจากการแรงตึงผิวแล้วยังมีความหนาแน่นของหยดของเหลวต่อช่องเหลวอีกชนิดหนึ่ง หรืออัตราส่วนระหว่างของเหลวทั้งสองชนิดในถังกวน และความหนืดของหยดของเหลว

จากการทดลองพบว่า ขนาดหยดของเหลวถูกกำหนดโดยกลไกการแตกเพียงอย่างเดียวเท่านั้น สำหรับหยดของเหลวที่ไม่ทำปฏิกิริยาในช่องเหลวอีกชนิดหนึ่ง และเมื่อเกิดการแตกออกของหยดของเหลวจะไม่กลับมารวมตัวกันอีก ซึ่งค่าการกระจายปริมาณหยดของเหลวส่วนใหญ่คล้ายกัน แม้ว่าของเหลวที่ใช้จะแตกต่างกัน โดยสัดส่วนของเหลวทั้งสองที่ 0.05 และ 0.95 จะให้การกระจายในแบบปกติตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$F_v \left(\frac{d}{D_{32}} \right) = \frac{1}{0.34\sqrt{2\pi}} \exp \left[-4.33 \left(\frac{d}{D_{32}} - 1.14 \right)^2 \right]$$

เมื่อ F_v คือฟังก์ชันสัดส่วนโดยปริมาตร ส่วน d คือขนาดหยดของเหลว และ D_{32} คือขนาดเฉลี่ยหยดของเหลว

Austin (1986) และคณะ มีทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์กลไก abrasion แบบกะในภาวะไม่คงที่ (unsteady-state) ของการป้อนวัสดุผ่านตะแกรง กล่าวว่าความสัมพันธ์อันดับหนึ่งของการแตกมีความสำคัญมากกว่ากลไกแบบขั้วสี่ สมการเชิงอนุพันธ์จึงรวมความสัมพันธ์อันดับหนึ่งของการแตกกับกลไกการขั้วสี่ สำหรับค่าการกระจายขนาดวัสดุที่ป้อน ค่าตอบของสมการแสดงอย่างชัดเจนว่าความสัมพันธ์อันดับหนึ่งของการแตกมีความสำคัญมาก ทำให้อัตราการเกิดกลไกการขั้วสี่ มีความสัมพันธ์น้อยกว่าความสัมพันธ์อันดับหนึ่งของการแตก และสมการยังแสดงค่าโดยรวมของอัตราจำเพาะของการแตกได้ ดังสมการ

$$\frac{w_1(t)}{w_0(t)} = (1 - \psi) \exp(-\bar{S}_1 t) + \psi \exp(-\bar{S}_2 t)$$

เมื่อ S_{1f}, S_{1b} คืออัตราจำเพาะโดยรวมของการแตกของวัตถุอย่างรวดเร็ว และที่ช้ากว่าตามลำดับ
 ψ เท่ากับ 0.72 สำหรับอัตราจำเพาะการแตกที่ 0.03 นาที⁻¹
 $w_1(t), W_0(t)$ คือสัดส่วนน้ำหนักของวัตถุแต่ละขนาดที่เวลาเริ่มต้น และที่เวลาใด ๆ

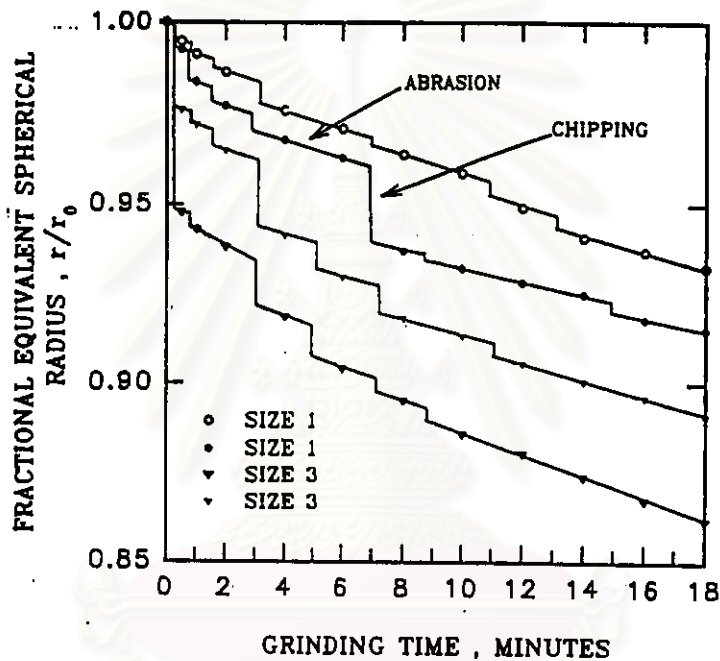
ข้อมูลการทดลองแสดงจลนพลศาสตร์ของการบดแบบเกิดขึ้นเองเป็นกะ สามารถทำเป็นสัดส่วนระหว่างอัตราการแตกที่รวดเร็วรวมกับอัตราการขดสีที่ช้ากว่า และสัดส่วนที่เหลืออยู่ ซึ่งแสดงถึงอัตราการแตกอย่างช้า ๆ รวมกับอัตราการขดสีที่ช้ากว่า ค่าคงที่ต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับการบดประเภท

Austin (1987) และคณะ แบบจำลองเบื้องต้นของอัตราจำเพาะการแตกในแต่ละขนาดด้วยเครื่องบด ซึ่งมีผลจากลูกบอลและก้อนกรวดขนาดใหญ่ถูกนำมาศึกษา กลไกการแตกทั้งสามคือ แบบปกติ โดยการแตกของวัตถุขนาดเล็กโดยลูกบอลและก้อนกรวดขนาดใหญ่ แบบกะเพาะจากวัสดุเริ่มต้นจะได้เป็นก้อนกรวดกลมที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ก้อน และการขดสีจะได้จากพื้นผิวของก้อนกรวด เทคนิคการ tracing ถูกพัฒนาเพื่อศึกษาการแตกที่เกิดขึ้นเองในการบดแบบกะ พบว่าการเพิ่มขึ้นของผงวัตถุเป็นตัวดำเนินการกะเพาะระหว่างก้อนกรวดกับก้อนกรวด และลูกบอลกับก้อนกรวด สมการความสัมพันธ์ชั้นสูงถูกพัฒนาให้อธิบายผลกระทบจากการดำเนินการบด และยังทำให้ทราบว่าการกะเพาะเป็นความสัมพันธ์อันดับหนึ่ง สำหรับเวลาสั้น ๆ ของการบด แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การแตกของก้อนกรวดขนาดใหญ่ และกลไกการกะเพาะจะถูกนำมาใช้ โดยคำนึงถึงวัตถุเริ่มต้นว่าผสมระหว่างการแตกอย่างเร็วและช้า อัตราการแตกและการแตกเริ่มต้นของการทดสอบแบบกะกับก้อนสินแร่ ถูกใช้ทำนายสิ่งที่เกิดขึ้นในเครื่องบด mill ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8 เมตร และยังไม่เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากสินแร่ชนิดอื่นด้วย

Tangsathikul (1989) การบดที่ลดลงเป็นผลจากอัตราการแตกที่ลดลง เพราะผงละเอียดที่เกิดขึ้นในเครื่องบด ball mill ถูกศึกษาในภาวะของผสมระหว่างของเหลวกับของแข็ง พบว่าการแตกที่ลดลงของทุก ๆ ขนาดอนุภาค เกิดจากความหนาแน่นของของผสม โดยใช้สมการที่ทำสมมูลมวลของการบดแบบกะ วิธีในการพัฒนาเพื่อเขียนแบบค่าการกระจายขนาดของผลิตภัณฑ์ ในช่วงที่การบดลดลง

Suglyama (1993) ผลของการบดแบบผสมของ $Y_2O_3, BaCO_3$ และผง CuO โดยใช้ planetary ball mill ซึ่งไม่เป็นโครงสร้างของผลึกและสมบัติการนำไฟฟ้า (superconducting) พบว่าการลดขนาดของผง CuO เกิดในช่วงแรกของการบด จากนั้นจะเกิดการลดขนาดของอนุภาคต่าง ๆ แทน การผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันจะมีมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาการบด ส่วนอุณหภูมิวิกฤตจะไม่ขึ้นกับระยะเวลาการบดเลย

Tangsrpongkul (1993) ศึกษากระบวนการแตกของก้อนผลึกควอทซ์ขาว ที่เกิดขึ้นใน autogenous mill แบ่งเป็น 3 กลไก คือ การขัดสี, การกระแทะ และ การแตกทั้งก้อน โดยผลการทดลองที่แสดงถึงกลไกการแตกแบบขัดสีและกระแทะ ดังรูปที่ 2.22 ซึ่งนำหนักของควอทซ์แต่ละก้อนที่เขียนสีไว้แต่ละช่วงเวลาถูกนำมาคำนวณ โดยให้สมมูลเป็นรัศมีทรงกลมกับเวลาการบดที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 2.22 การขัดสี (abrasion) ให้เป็นเส้นตรงที่ลดลงของรัศมีต่อเวลาบด ส่วนการกระแทะ (chipping) เป็นส่วนที่มีการลดลงอย่างมากระหว่าง 2 ช่วงเวลาของการลดลงน้อยของการขัดสี ในการทดลองจะพบปัญหาของสีที่เขียนไว้ไม่ปรากฏอยู่หลังการบด ทำก้อนควอทซ์หลักที่เหลือจากการกระแทะอาจถูกกำหนดเป็นการแตกทั้งก้อนได้



รูปที่ 2.22 แสดงการเปลี่ยนแปลงรัศมีรูปทรงกลมกับเวลาบดของควอทซ์แต่ละขนาด

ที่มา : Barahona, 1984

จากกลไกการแตกแบบขัดสี เมื่อใช้กฎการสึกกร่อนของ Bond ดังสมการที่ 2.3 เมื่อ $\Delta = 0$ แล้วการเปลี่ยนแปลงรัศมีต่อเวลาคือ

$$\frac{\Delta r}{\Delta t} = -K_B$$

นั่นคืออัตราการสึกกร่อนแบบ Bond ไม่ขึ้นกับขนาดก้อนควอทซ์ แต่เมื่อใช้กฎการสึกกร่อนแบบ Davis คือให้ $\Delta = 1$ ได้ว่า

$$\left(\frac{1}{r}\right) \frac{\Delta r}{\Delta t} = -K_D$$

ดังนั้นกลไกการแตกแบบขั้วดี โดยใช้อัตราการลึกร่อนของ Davis จะขึ้นกับขนาดของ
ก้อนควอท

สำหรับข้อมูลจากการกะเทาะ สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ในลักษณะเดียวกับการขั้วดี ดังนั้นจะเห็นว่า การลดลงของขนาดก้อน เป็นจุดสำคัญที่จะทำให้เกิดการขั้วดีและการกะเทาะ โดยเกิดขึ้นของหินขนาดเล็ก ๆ รอบแกนของก้อนหิน และความสัมพันธ์ทั่วไปสามารถหาการแตกของควอทที่เกิดขึ้นจากการขั้วดีและการกะเทาะ จึงทำการรวมอัตราการแตกจากการขั้วดีและการกะเทาะ เพื่อคำนวณอัตราการแตกรวม โดยใช้อัตราการลึกร่อนแบบ Davis แล้วหาความสัมพันธ์จากข้อมูลได้ดังนี้

$$K_D = K_0 e^{-a} + (1 - e^{-a}) K_f \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.17 ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดคลื่นใจ (R^2) ไม่ดีเท่าที่ควร ส่วนกลไกการแตกแบบการแตกทั้งก้อน พบว่าอัตราส่วนน้ำหนักของควอทลดลงตามระยะเวลาบด ในช่วงเวลาแรกจะลดลงอย่างรวดเร็วและลดลงอย่างช้า ๆ ในช่วงเวลาหลัง และเมื่อนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาอัตราจำเพาะการแตกแบบการแตกทั้งก้อน (disintegrative fracture) โดยใช้สมการที่ 2.8 พบว่าอัตราการแตกของก้อนควอทขนาดใหญ่จะต่ำกว่าก้อนควอทขนาดเล็ก เป็นเพราะแรงกระแทกที่ก้อนควอทขนาดเล็กได้รับเพียงพอต่อการแตกออกทั้งก้อนมากกว่าจากก้อนควอทขนาดใหญ่กว่า

Fillo (1994) และคณะ ศึกษาการบดแบบเปียกและแห้งของฝุ่น โดยมีส่วนประกอบหลักคือ คาร์บอน และอะลูมิเนียมซิลเฟต กับสารประกอบโลหะบางชนิด ซึ่งใช้เครื่องบด mill 3 ชนิด พบว่าการรวมตัวกันของอนุภาคจะพบในการบดแบบแห้งโดยการเพิ่มเวลาการบด ในขณะที่การลดขนาดอย่างต่อเนื่องของตัวอย่างพบในการบดแบบเปียก การบดแบบแห้งทำให้โครงสร้างของฝุ่น เปลี่ยนจากสารประกอบโลหะผลึกไปเป็นรูปร่างอสัณฐาน ส่วนการละลายสารประกอบวาเนเดียมในน้ำจะเพิ่มขึ้นภายใต้ภาวะของตัวอย่างที่บดแบบแห้ง โดยเพิ่มเวลาในการบดขึ้น (ความเข้มข้นสูงสุดของสารประกอบวาเนเดียมประมาณ 5-6 เท่าจากเดิม) ในขณะที่สารประกอบนิกเกิลและเหล็กจะไม่ขึ้นกับเวลาการบด ส่วนการบดแบบเปียกจะไม่ช่วยเพิ่มในการละลายของสารประกอบโลหะ

Zheng (1995) การเปลี่ยนแปลงของขนาดและค่าการกระจายขนาดของเม็ดแป้งภายใต้ภาวะ extrusion ได้ถูกศึกษาโดยใช้เครื่อง extruder แบบเกลียวเดี่ยว หลังงานกลที่ป้อนและเวลาในการทดลองกับวัตถุ เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการลดขนาดของเม็ดแป้ง ในกระบวนการ extrusion ที่แรงเฉือนสูง (อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส) สามารถลดขนาดของเม็ดแป้งลงจาก 12.4 ไมโครเมตร เป็น 1-2 มิลลิเมตร (ขนาดเฉลี่ยโดยน้ำหนัก) ในขณะที่ใช้แรงเฉือนต่ำ ๆ (อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส) พบว่าขนาดเม็ดแป้งลดลงมาประมาณ 7 ไมโครเมตร อนุภาคที่ละเอียดมาก (มากกว่าหรือเท่ากับ 0.5)

พบทั้งที่ใช้แรงเฉือนสูงและต่ำ ซึ่งพบถึงร้อยละ 7.6 ของน้ำหนักโดยน้ำหนักสำหรับแรงเฉือนสูงโดยใช้ เวลาทดลองนาน ส่วนแรงเฉือนต่ำพบเพียงร้อยละ 5 โดยใช้เวลาดทดลองสั้น ในระหว่างกระบวนการ ลดขนาดจุดยอดของค่าการกระจายขนาดเม็ดแป้ง จะเลื่อนจากช่วงขนาดใหญ่ไปถึงขนาดช่วงปาน กลาง และสุดท้ายจุดยอดของค่าการกระจายขนาดจะแคบลงที่ช่วงขนาดเล็ก ๆ ทำให้กระบวนการ extrusion สามารถใช้ลดขนาดเม็ดแป้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Verma and Rajamani (1995) ความหนาแน่นของของผลระหว่างของแข็งกับของเหลว และการบดมีผลต่ออัตราการแตก ผลของตัวแปรเหล่านี้เกี่ยวข้องกับภาวะในการบดของเครื่องบด mill ซึ่งอัตราการแตกเป็นปริมาณที่ประมาณได้ โดยสามารถประมาณอัตราการแตกของทุกขนาด และเป็นกราฟเส้นอย่างง่าย โดยทั่วไปอัตราการแตกของอนุภาคที่หยาบจะเพิ่มขึ้นแล้วปรากฏเป็นวง ละเอียด การบดของผลระหว่างของแข็งในร้อยละที่มากกว่าของเหลว จะให้อัตราการบดเปลี่ยน พฤติกรรมจากไม่แน่นอนไปเป็นแบบปกติ

Mingwei and Eric (1995) การเลียนแบบกระบวนการบดแบบ ultra-fine มีหลายงานวิจัย ใช้แบบจำลองการบดโดยเครื่อง ball mill ชนิดแนวนอน โดยใช้สมมติฐานการแตกแบบความสัมพัทธ์ อันดับหนึ่ง ซึ่งไม่มีผลต่อการบดและความแตกต่างของกลไกการแตกเมื่อใช้เครื่อง ball mill โดยใน งานวิจัยนี้จะพิจารณาค่าความแตกต่างระหว่างเครื่องบด ball mill กับเครื่องบด mill ชนิดกวน แบบ จำลองของขนาดและพลังงานถูกตั้งขึ้น เพื่อใช้เลียนแบบการกระทำของเครื่องบด mill ชนิดกวน ค่า การกระจายขนาดของผลิตภัณฑ์ที่ต่ำกว่า 10 ไมโครเมตร จะถูกเลียนแบบโดยแบบจำลองที่แน่นอน ใช้ตัวแปร 2 ตัว และยังใช้ทดสอบกับภาวะที่แตกต่าง สำหรับเครื่องบด mill ชนิดกวน

Frances (1996) และคณะ ศึกษาอิทธิพลความหนาแน่นของของผลระหว่างของแข็งกับ ของเหลวต่อการบด alumina hydrate โดยใช้เครื่อง ball mill แบบกะ และไม่พิจารณากภาวะต่าง ๆ ของการทำงาน พบว่ากระบวนการลดขนาดจะดำเนินไปอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 20 นาทีแรก และ หลังจาก 1-2 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์จะมีขนาดสุดท้ายเป็นแบบ asymptotic อัตราการบดช่วงแรกจะสูง กว่าและขนาดเฉลี่ยจะน้อยกว่าการบดแบบเจือจาง (มีน้ำถึงร้อยละ 50-80) ซึ่งแสดงถึงภาวะการ ทำงานที่เหมาะสม แต่เมื่อของผลมีน้ำอยู่ร้อยละ 20 อัตราของกระบวนการบดจะเพิ่มขึ้นได้โดยเติม โซเดียมเมตาฟอสเฟต 2-10 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะทำให้เกิดการแขวนลอย การกระจาย ขนาดของผลิตภัณฑ์สามารถอธิบายได้โดยการใช้สมการ Rosin-Rammier ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างลักษณะของขนาดการกระจายต่อเวลา และต่อปริมาณน้ำ