บทที่ 2

ทฤษฎีเบื้องต้นและแนวความคิดที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวความคิดของการจำลองแบบ

วงจรการบดแร่ที่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและได้ขนาดละเอียดตามความต้องการ โดยทั่วไปแล้วจะต้องเป็นแบบวงจรปิด(Close Circuit) ซึ่งจะประกอบด้วยหน่วยกระบวนการที่สำคัญในวงจร 2 หน่วยกระบวนการ คือ หน่วยกระบวนการลดขนาดแร่ และหน่วยกระบวนการคัดขนาดแร่ ซึ่งวงจรการบดแร่ของบริษัทผาแดงอินดัสทรีจำกัด ที่ได้นำเอาตัวอย่างการวิเคราะห์มาประกอบการศึกษานี้ หน่วยกระบวนการลดขนาดแร่ คือ เครื่องบดแบบกึ่งการบดด้วยตัวเอง (Semi-autogenous Mill) หน่วยกระบวนการคัดขนาดแร่ คือ ไฮโดรไซโคลน โดยไฮโดรไซโคลนจะทำหน้าที่ในการคัดขนาดเพื่อให้ผลที่ได้(Product)จากวงจรมีขนาดละเอียดตามความต้องการ และแร่ที่มีขนาดหยาบเกินต้องการกลับไปเข้าหม้อบด เพื่อบดซ้ำใหม่

เครื่องบดแบบกึ่งการบดด้วยตัวเอง(Semi-autogenous Mill) เป็นเครื่องบดที่ผสมการทำงานของเครื่องบด 2 ชนิด คือ

- เครื่องบดแบบบดด้วยตัวเอง(Autogenous Mill) ซึ่งเป็นการบดโดยไม่ต้องใช้ตัวกลางในการบดเลย แร่ที่ออกจากหน้าเหมือง ขนาดประมาณ 200-300 มม.ก็จะป้อนเข้าสู่หม้อบดโดยตรง หรืออาจใช้เครื่องย่อยแร่ให้มีขนาด 150-200 มม. ก่อนที่จะป้อนเข้าสู่หม้อบด ช่องป้อนแร่ก็จะต้องกว้างพอที่จะไม่เกิดการอุดตันได้ ก้อนแร่ที่โตที่สุดจะบดแร่ที่มีขนาดรองลงมาและแร่ที่มีขนาดละเอียดตามลำดับ ดังนั้น แร่ที่เหมาะกับการบดชนิดนี้จึงควรจะเป็นแร่ที่บดได้ง่าย เปราะ สามารถบดได้ด้วยแรงกระแทกและขัดสีโดยตัวเอง

- เครื่องบดแบบลูกกลม(Ball Mill) เป็นเครื่องบดที่ใช้ตัวกลางในการบดแร่ เป็นลูกเหล็กกลม ลูกเหล็กเหล่านี้ป้อนเข้าไปได้พร้อมๆกับแร่ และโดยปกติแล้วจะทำงานได้ติดต่อกันตลอดเวลาเป็นเดือนๆ โดยไม่ต้องหยุดชะงัก

ในการออกแบบวงจรหรือการเปลี่ยนการจัดเรียงวงจรเพื่อทดสอบสภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยการทดลองทำในวงจรจริงนั้น เป็นสิ่งที่ต้องใช้เวลาและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงแต่งแร่ที่กำลังทำงาน การจัดเรียงวงจรแทบจะเปลี่ยนแปลงไม่ได้ การเลียนแบบกระบวนการจึงอำนวยประโยชน์ในการเรียนรู้การทำงานของวงจรที่สภาวะต่างๆและช่วยในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสม ทั้งในแง่การปรับระดับตัวแปรและการจัดเรียงวงจรใหม่ ถ้าหากมีความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์ การประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการเรียนแบบกระบวนการ (Digital Simulation) เป็นวิธีที่เปรียบเสมือนการทดลองขบวนการในสภาวะต่างๆ โดยอุปกรณ์แต่ละหน่วยจะถูกจำลองแบบอยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ที่มีผลลัพธ์เป็นที่เชื่อถือได้ ทำให้สามารถจัดเรียงอุปกรณ์หรือเปลี่ยนแปลงสภาวะต่างๆ เพื่อหาการทำงานที่ดีที่สุดได้ สะดวกขึ้น

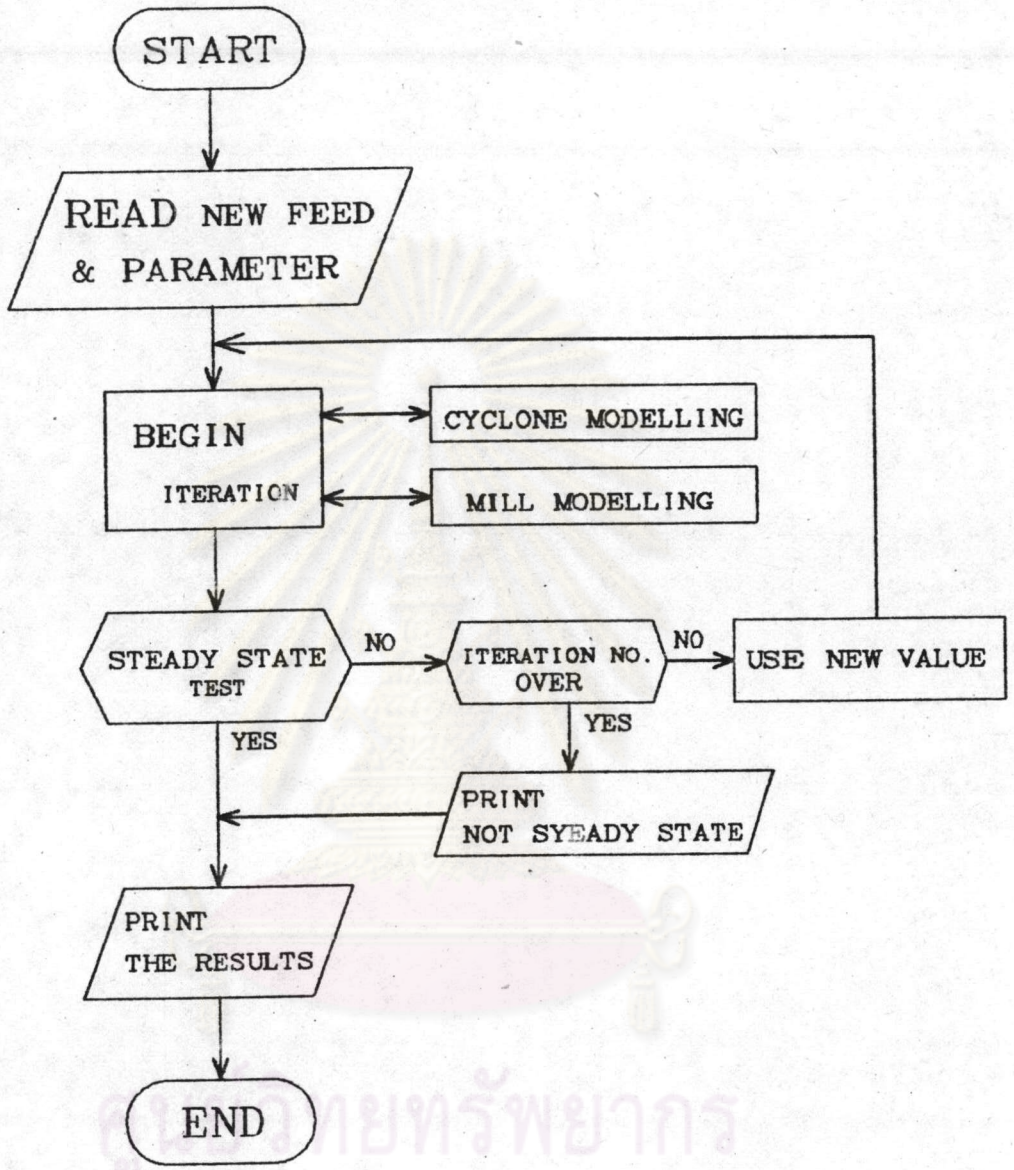
แบบจำลอง(Model) คือตัวแทนของอุปกรณ์ต่างๆ ที่สามารถแสดงสภาวะต่างๆได้เหมือนของจริงซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1) แบบจำลองทางกายภาพ(Physical Model) เป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กกว่าของจริงแต่ต้องมีความคล้าย(Similitude) กับของจริง เพื่อสะดวกในการทดลองศึกษาพฤติกรรมต่างๆแทนของจริง ซึ่งในทางวิศวกรรมนิยมใช้กันมาก เช่น โรงงานขนาดทดลอง(Pilot Plant) เป็นแบบจำลองทางกายภาพของโรงแต่งแร่

2) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์(Mathematical Model) เป็นรูปแบบของความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของหน่วยกระบวนการใดๆ ที่แสดงถึงการทำงานของหน่วยนั้นๆ ซึ่งสามารถแบ่งตามพื้นฐานของที่มาได้เป็น 2 แบบ คือ

- แบบจำลองที่ได้จากข้อมูลในทางปฏิบัติ (Empirical Model) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ป้อนเข้า(Input) กับผลลัพธ์ที่ได้(Output) โดยใช้หลักการทางสถิติพัฒนาข้อมูลขึ้นมาเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งอาจอยู่ในรูปของเส้นตรงหรือไม่ก็ได้(Linear or Non-linear Regression) ซึ่งมักจะถูกจำกัดอยู่ในขอบเขตของการทดลองแบบหนึ่งๆ

- แบบจำลองที่ได้จากพฤติกรรมทางทฤษฎี (Phenomenological Model) พัฒนามาจากสมมติฐาน หรือหลักการอนุรักษ์ของมวล พลังงาน โมเมนตัม และปริมาณของวัสดุ จึงมีความยืดหยุ่นและแม่นยำกว่าแบบแรก แต่ก็จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากการทดลองเข้ามาเป็นตัวแปร(Parameter)ด้วย



รูปที่ 2.1 แผนผังโปรแกรมการเลียนแบบจำลองวงจรการบดแร่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 แบบจำลองของการบดแร่(Grinding Modelling)

แบบจำลองของการบดแร่ มีแนวทางพื้นฐานอยู่ 2 แบบใหญ่ๆ คือ

- การใช้ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับการลดขนาด ซึ่งเป็นแบบจำลองเบื้องต้นของการบดแร่
- การใช้กลไกการแตกหักของแร่ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของแร่ป้อนกับแร่ที่ได้จากการบด

1) การใช้ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับการลดขนาด การบดแร่นั้นเป็นขบวนการที่ต้องใช้พลังงานมากเพื่อให้แร่เกิดการแตกหัก การศึกษากระบวนการบดแร่ใน ระยะแรกจึงใช้การอ้างอิงพลังงาน(Energy Approach)โดยอาศัยพลังงานที่ใช้ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะของแร่ที่ได้จากการบดเป็นพื้นฐาน ซึ่งได้แก่แบบจำลองของ Rittinger(1857), แบบจำลองของ Kick(1883), แบบจำลองของ Bond(1952) ซึ่งเป็นการศึกษาในแง่ของความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้กับปริมาณของพื้นที่ผิวใหม่ที่เกิดขึ้นจากการบดแร่, ปริมาณของแร่ที่ถูกบด และขนาดของแร่ที่ได้จากการบด ตามลำดับ โดย Kapur(1971) ได้เขียนเป็นสมการทั่วไปว่า

$$dE = -K.dx/x^n$$

ซึ่งเมื่อให้ n มีค่าเปลี่ยนเป็น 1,2 และ 1.5 ตามลำดับ แล้วอินติเกรต (Integrate) จะได้

เมื่อ n = 1 :แบบจำลองของ Kick

$$E = K.\ln(x_1/x_2)$$

เมื่อ n = 2 :แบบจำลองของ Rittinger

$$E = K.(1/x_2 - 1/x_1)$$

เมื่อ n = 1.5 :แบบจำลองของ Bond

$$E = 2.K.(1/\sqrt{x_2} - 1/\sqrt{x_1})$$

เมื่อ E = พลังงานที่ใช้

K = ค่าคงที่

x_1 และ x_2 = ขนาดของแร่ป้อนและแร่ที่ได้จากการบดตามลำดับ

สำหรับแบบจำลองของ Bond เป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการคำนวณ

เกี่ยวกับพลังงานในการบดแร่ ซึ่งอาจเขียนได้เป็น

$$W = 10.Wi.[1/\sqrt{x_2} - 1/\sqrt{x_1}]$$

เมื่อ W = พลังงานที่ใช้ หน่วยเป็น กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตัน (kw.hr./short ton)

Wi= Work Index หมายถึงพลังงานที่ใช้ในการลดขนาดแร่ 1 ตัน จากขนาดไม่จำกัดลงจนมีขนาดเท่ากับ -100 ไมครอนไม่น้อยกว่า 80 %

x_1 และ x_2 = ขนาดที่มีแร่ลอดผ่านได้ 80% หน่วยเป็นไมครอนของแร่ป้อนและแร่ที่ได้จากการบดตามลำดับ

นอกจากนี้ยังมีผู้ศึกษาและปรับปรุงสมการไปเป็นแบบอื่นๆออกไปอีกบ้าง เช่น Hukki(1961) กำหนดรูปแบบสมการใหม่เป็น

$$dE = -K.dX/X$$

แต่แบบจำลองที่ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับการลดขนาดนี้ มีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ได้แก่

- ขนาดของแร่ได้จากการคำนวณเป็นขนาดเดียวที่ขนาดลอดผ่านได้ 80% (80% Passing) ซึ่งไม่เป็นตัวแทนของการกระจายตัวของแร่อย่างแท้จริง
- ไม่มีการหาความสัมพันธ์ของมวลสมดุล(Mass Balance)
- ไม่มีการรวมผลจากการคัดขนาด
- พลังงานที่ใช้ในการลดขนาดน้อยกว่าความเป็นจริง เพราะจะต้องมีการสูญเสียไปในรูปของเสียง ความร้อน และการขับเคลื่อนหม้อบดมากกว่าพลังงานที่ใช้ในการบด

2) การใช้กลไกการแตกหักของแร่ ผู้ที่สร้างแนวทางนี้ขึ้นมาได้แก่ Epstine (1948) ซึ่งได้อธิบายกลไกการบดแร่ไว้ว่า "ขบวนการบดแร่คือ การทำซ้ำของการแตกหักของแร่ ซึ่งในการทำแต่ละครั้งจะมี 2 ขบวนการใหญ่ๆเกิดขึ้นคือ (1)โอกาสที่แร่จะถูกคัดเลือกให้ถูกบด และ (2)การแตกหัก ของแร่ที่ถูกบดลงไปเป็นขนาดต่างๆเล็กลงไป"

แนวคิดนี้เป็นพื้นฐานของแบบจำลองที่อิงกลไกการแตกหัก (Mechanistic Approach) Broadbend และ Callcott (1957) ได้ประยุกต์แนวคิดนี้ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ โดยอาศัยหลักการดังนี้ :

โอกาสที่แร่จะถูกคัดเลือกให้บดอยู่ในรูปของ Diagonal Matrix เรียกว่า "Selection Function" (S)

การแตกหักของแร่ที่ถูกบดลงเป็นขนาดเล็กๆลงไปอยู่ในรูปของ Lower Triangular Matrix เรียกว่า "Breakage Function" (B)

จะได้สมการพื้นฐานของมวลสมดุล ซึ่งเป็นสมการกลไกการแตกหักในแต่ละครั้งของการบดดังนี้

$$P = (B.S+I-S).f$$

เมื่อ P และ f = เวคเตอร์ของแร่ที่ขนาดต่างๆกัน ของแร่ที่ได้จากการบดและแร่ป้อนตามลำดับ

I = Unit Matrix

สมการข้างต้นนี้ได้มาจาก

แร่ที่ถูกคัดเลือกให้บด = S.f-ผลรวมของแร่จากการบด = B.S.f

และแร่ที่ไม่ถูกคัดเลือกให้บด = f-(S.f)-(I-S).f

ดังนั้นผลรวมของแร่ในขณะใดๆในหม้อบด=ผลของแร่ที่ได้จากการบดรวมกับแร่ที่ไม่ถูกบด

ซึ่งก็คือ B.S.f+(I-S).f = (B.S+I-S).f

สำหรับในหม้อบดที่มีการบดแบบต่อเนื่อง(Continuous Grinding) จะมีตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือ พฤติกรรมการไหลของแร่ภายในหม้อบด ได้แก่

- การไหลผ่านหม้อบด(Flow through Mill)
- การผสมในหม้อบด(Mixing within The Mill)
- การไหลออกจากหม้อบด(Discharge from Mill)

ซึ่งมีการตั้งสมมติฐานเป็นหลายแบบได้แก่ การไหลออกมาทีเดียว(Plug Flow)ของ Finch Ramirez และ Castro การผสมเข้ากันอย่างสมบูรณ์ (perfect Mixing) ของ Smith และผู้ร่วมงาน และการไหลแบบผสมของ 2 แบบแรก(Residence Time Distribution) ของ Levenspiel

ส่วนโอกาสที่แร่จะถูกคัดเลือกให้บด(S) จะอยู่ในรูปของ "อัตราการแตกตัวของแร่ (Breakage Rate), R"

ในกรณีที่หม้อบดทำงานสม่ำเสมอต่อเนื่องกันจนอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady State) ถือว่าพฤติกรรมการไหลในหม้อบดเป็นแบบการผสมโดยสมบูรณ์ จะได้สมการของมวลสมดุลในหม้อบดเป็น

$$(f-R.s)+B.R.s-D.s = 0$$

เมื่อ f และ s = เวคเตอร์ของแร่ที่ขนาดต่างๆกันของแร่ป้อนและแร่ที่อยู่ในหม้อบดตามลำดับ

R = อัตราที่แร่แต่ละขนาดถูกบดให้เล็กลง(Breakage Rate) จะอยู่ในรูปของ Diagonal Matrix

D = อัตราที่แร่แต่ละขนาดไหลออกจากหม้อบด (Discharge Rate) จะอยู่ในรูปของ Diagonal Matrix

B = พฤติกรรมที่แร่ส่วนที่ถูกบดแล้วกระจายอยู่ในช่วงขนาดอื่นที่เล็กลงกว่าเดิม(Breakage Function)

สมการข้างต้นนี้ได้มาจาก ;

แร่ในหม้อบดที่ถูกเลือกให้ถูกบด = R.s-แร่ที่ได้จากการบด = B.R.s

แร่ที่เหลือจากการคัดเลือกโดยไม่ถูกบด = f-R.s

แร่ที่ไหลออกจากหม้อบด(P) = D.s

ดังนั้นผลรวมของแร่ในหม้อบดในขณะใดๆ = แร่ที่เหลืออยู่โดยไม่ถูกบด + แร่ที่ได้จากการบด - แร่ที่ไหลออกจากหม้อบด

= (f-R.s)+B.R.s-D.s

สำหรับหม้อบดแบบ Overflow Mill หรือแบบ Grate Discharge Mill จะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$d_i = d^*.4.V/(d^2.1)$$

เมื่อ d^* = ค่าคงที่ มีค่าใกล้ 1 เป็นผลจากการเปลี่ยนอัตรา

ส่วนการป้อนแร่

V = ปริมาตรของแร่ปนน้ำที่ป้อนเข้าไปในหม้อบด

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของหม้อบด

l = ความยาวของหม้อบด

ในกรณีที่ปริมาณแร่หรือส่วนประกอบในหม้อบดไม่สามารถรู้หรือวัดได้(ซึ่งโดยปกติจะเป็นเช่นนี้) ค่าของ D/R หรือเขียนในรูปส่วนย่อยเป็น d_1/r_1 จะเป็นค่าที่มีความหมายมากกว่าค่าของ d_1 และ r_1 เอง เพราะค่าของ d_1 ไม่ขึ้นกับขนาดของแร่ซึ่งอาจถือได้ว่าเป็นค่าคงที่ ในกรณีนี้การกระจายขนาดของแร่ที่ออกจากหม้อบดจึงนิยมใช้ค่าของ D/R นี้มากกว่า ดังนั้นสมการเพื่อหาการกระจายขนาดของแร่จากหม้อบดอาจเขียนได้เป็น

$$P = D.R^{-1}(I-B)^{-1}.(f-p)$$

ในการบดแร่เป็นแบบกึ่งการบดด้วยตัวแร่เอง (Semi-autogenous Mills) ซึ่งแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับพฤติกรรมการบดแร่แบบนี้ คือแบบจำลองการผสมเข้ากันอย่างสมบูรณ์ (Perfect Mixing Model) เมื่อ ;

f,p = การกระจายของขนาด(Size Distribution)ของแร่ป้อน(Feed)และผลที่ได้(Product) ของขบวนการลดขนาดแร่ อยู่ในรูปของ n * 1 เมตริกซ์

A = สัมประสิทธิ์การแตกหักของแร่ที่ปรากฏอยู่ในขนาดต่างๆ(Appearance Function) ในแบบจำลองการผสมเข้ากันอย่างสมบูรณ์ อยู่ในรูปของ n * 1 เมตริกซ์

R = สัมประสิทธิ์การเลือกการแตกหักของแร่(Breakage Function) ในแบบจำลองการผสมเข้ากันอย่างสมบูรณ์ อยู่ในรูปของ n * n ไดอะโกนอลเมตริกซ์

D = สัมประสิทธิ์การไหลออกของแร่(Discharge Rate Function) ในแบบจำลองการผสมเข้ากันอย่างสมบูรณ์ อยู่ในรูปของ n * n ไดอะโกนอลเมตริกซ์

s = การกระจายของขนาดแร่ในหม้อบด

t = เวลาในการบดแร่

จะได้แบบจำลองการผสมเข้ากันอย่างสมบูรณ์(Perfect Mixing Model) ดังนี้

$$ds/dt = (A.R-R).s+f-p$$

ความสัมพันธ์ระหว่างแร่ในหม้อบด(Content)กับผลที่ได้(Product)

$$p = D.s$$

ดังนั้น

$$ds/dt = (A.R-R-D).s+f$$

และที่สภาวะสมดุล(Steady state condition)

$$(A.R-R-D).s+f = 0$$

ซึ่งถ้ารู้หรือประมาณค่า A ได้ และรู้ f,s,p ทั้งค่า R และ D จะสามารถคำนวณได้ ถ้าไม่รู้ค่า s จะไม่สามารถแยกคำนวณค่า R และค่า D ได้ แต่จะสามารถคำนวณได้ในรูปของ D/R ถ้ารู้ค่าของ f และ p ในทั้งสองแบบนี้จะใช้ในการศึกษาการเลียนแบบ(Simulation)ของการบดกึ่งการบดด้วยตัวแร่เอง(Semi-autogenous mills) โดยในแบบที่รู้ค่า s (Mill content) จะสามารถศึกษาแบบจำลองได้ตามต้องการอย่างสมบูรณ์ ส่วนแบบที่ไม่รู้ค่า s จะสามารถใช้ทำนายขนาดของผลที่ได้(Product size) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง อัตราการป้อนแร่(Feed rate) หรือขนาดของแร่ป้อน(Feed size)

2.3 แบบจำลองของไฮโดรไซโคลน(Hydrocyclone Modelling)

ไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์คัดขนาดที่สำคัญมากในการคัดขนาดแร่ปนน้ำ จึงได้มีผู้ศึกษาถึงประสิทธิภาพของการแยกแร่ของไซโคลนที่สัมพันธ์กับมิติต่างๆของไซโคลน(รูปที่ 2.2) ได้แก่ ;

- ความยาวของไซโคลน(D)
- ความยาวของทรงกระบอก(DL)
- ขนาดของทางเข้าแร่ป้อน(DI)

- ขนาดของทางออกแร่ละเอียด(DV)
- ขนาดของทางออกแร่หยาบ(DS)
- มุมกรวย(ANG)

และสภาวะการทำงานอื่นๆได้แก่;

- ความดันของการป้อนแร่(P)
- ความถ่วงจำเพาะของแร่ป้อน(S.G.)
- ความเข้มข้นของแร่ป้อน(%Solid)
- อัตราการไหลเข้าทางป้อนแร่โดยปริมาตร(Q)

โดยที่ประสิทธิภาพของการแยกแร่นั้นจะแสดงอยู่ในลักษณะของเส้นโค้งประสิทธิภาพ (Efficiency Curve) ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ ;

- ขนาดแห่งการคัดขนาด(d_{50})
- ความหมดจดของการคัดขนาด(a)
- ค่าปริมาณน้ำที่ขนาดเท่ากับศูนย์(Water Split)

สำหรับไซโคลนตัวหนึ่งๆตัวแปร(Parameter) เหล่านี้จะแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะการทำงาน เช่น

- ขนาดแห่งการคัดขนาดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อความเข้มข้นของแร่ป้อนเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าปริมาณน้ำในส่วนแร่หยาบ(Water Split)คงที่
- ขนาดแห่งการคัดขนาดจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของทางออกแร่ละเอียด (Vortex Finder) เพิ่มขึ้น หรือเมื่อขนาดของทางออกแร่หยาบ(Spigot)ลดลง
- ขนาดแห่งการคัดขนาดจะเพิ่มขึ้นช้าๆตามขนาดของไซโคลน
- ปริมาณน้ำในส่วนแร่หยาบเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าของขนาดของทางออกแร่หยาบ
- สำหรับอัตราการป้อนแร่คงที่ ถ้าไซโคลนมีขนาดใหญ่ขึ้นก็จะใช้ความดันการป้อนแร่ลดลง

ซึ่งลักษณะของความสัมพันธ์ต่างๆเหล่านี้ ได้มีผู้ทำการทดลองเก็บข้อมูลสร้างขึ้นเป็นชุดของสมการทางคณิตศาสตร์แบบเอมไพริกัล โดยการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล (Regression) ทำให้สามารถคำนวณหาพารามิเตอร์และทำนายผลที่ได้จากการคัดขนาดเมื่อสภาวะเปลี่ยนไปได้ แต่ก็ต้องทราบค่าคงที่ต่างๆของ

ไซโคลนตัวหนึ่งๆซึ่งจะได้จากการเก็บข้อมูลในสภาวะการทำงานใดๆมาแทนค่าลงในสมการ เพื่อหาค่าคงที่

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของไฮโดรไซโคลนที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 แบบคือ แบบจำลองของ Lynch และ Rao (1965) และแบบจำลองของ Plitt (1976) ซึ่งประกอบไปด้วยสมการของเส้นโค้งประสิทธิภาพที่แก้ไขแล้ว(Corrected Efficiency Curve) และสมการของเส้นโค้งประสิทธิภาพปกติ (Actual Efficiency Curve) ซึ่ง สามารถแสดงได้เป็น

$$C_i = R_f+(1-R_f).Y_i$$

เมื่อ C_i = ค่าประสิทธิภาพปกติ

R_f = ค่าปริมาณน้ำในส่วนแร่หยาบ(Water Split)

Y_i = ค่าประสิทธิภาพที่แก้ไขแล้ว

สำหรับสมการของเส้นโค้งประสิทธิภาพที่แก้ไขแล้ว แสดงได้เป็น

$Y_i = (\exp[a(d/d50)]-1)/(\exp[a.d/d50]+\exp[a]-2)$ (Lynch และ Rao)

$Y_i = (1-\exp[-0.693(d/d50)^m])$ (Plitt)

เมื่อ d = ขนาดของแร่

a และ m = พารามิเตอร์ที่แสดงลักษณะของเส้นโค้ง หรือความหมดจดของการคัดขนาด

ส่วนสมการของตัวแปร(Parameter) ของเส้นโค้งประสิทธิภาพของแต่ละแบบจำลองก็มีรายละเอียดต่างกันไป ซึ่งแบบจำลองของ Nageswara Rao ซึ่งพัฒนาต่อจากแบบ จำลองของ Lynch และ Rao ประกอบด้วย

$$P^{-0.5} = K_\alpha.D^2.R^{-0.5}.Q^{-1}.V^{0.6}.I^{0.45}.L^{0.2}.A^{-0.1}.D^{-0.15}$$

$$B = Al/(1-Al)^3$$

$$G = P/(R.g.D)$$

$$d_{50} = K_d.D.B^{0.93}.G^{-0.22}.V^{0.52}.S^{-0.47}.I^{-0.5}.L^{0.2}.A^{0.15}.D^{-0.65}$$

$$1-c = K_w.B^{0.26}.G^{-0.53}.V^{-1.19}.S^{2.39}.I^{-0.5}.L^{0.22}.A^{-0.24}$$

$$Q_u/Q = K_v .G^{-0.31}.V^{-0.94}.S^{-1.83}.I^{-0.25}.L^{0.22}.A^{-0.24}$$

เมื่อ Al = สัดส่วนโดยปริมาตรของแร่ในแร่ป้อน

R = ความหนาแน่นของแร่

P = ความดันในการป้อนแร่

Q = อัตราการไหลเข้าทางป้อนแร่โดยปริมาตร

Q_u = อัตราการไหลออกทางแร่หยาบโดยปริมาตร

ตัวแปรจากการออกแบบไฮโดรไซโคลน(ดูรูปที่ 2.2)

D = ขนาดของไซโคลน

V = สัดส่วนของทางออกของแร่หยาบต่อขนาดไซโคลน(DV/D)

S = สัดส่วนของทางออกของแร่ละเอียดต่อขนาดไซโคลน(DS/D)

A = มุมกรวย

I = สัดส่วนของทางเข้าแร่ป้อนต่อขนาดไซโคลน(DI/D)

L = สัดส่วนของความยาวทรงกระบอกต่อขนาดไซโคลน(DL/D)

และ g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก

K_a, K_d, K_w, K_v = ค่าคงที่

และจะได้สมการแสดงประสิทธิภาพของการคัดขนาดเป็น

$$E = c(\exp[a]-1)/(\exp[a.s/d50]+\exp[a]-2)$$

เมื่อ E = ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน(Efficiency of Hydrocyclone)

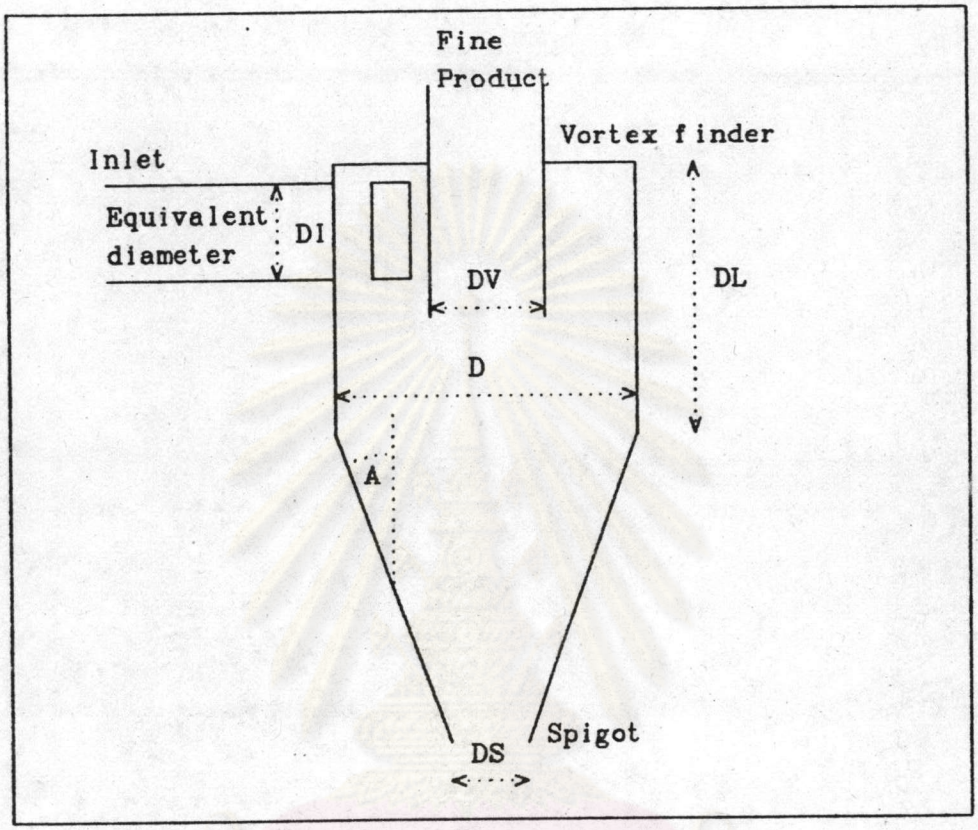
c = ค่าปริมาณน้ำที่ขนาดเท่ากับศูนย์(Water Split to Overflow)

a = ความหมดจดของการคัดขนาด

s = ขนาดเฉลี่ยของเม็ดแร่, ไมครอน(Arithematic Mean Size)

d50 = ขนาดแห่งการคัดขนาด

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 ขนาดของไฮโดรไซโคลน ซึ่งเป็นตัวแปรจากการออกแบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย