

ไฮโดรไซโคลนกับการแยกอนุภาคและคัดขนาด

ดร. อภิชัย เทอดเทียนวงษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ศุภชัย ทูมมา

นักวิทยาศาสตร์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เกรียงไกร ไตรคุ้มกัน

นายช่างเทคนิค

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

ไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่มีประโยชน์มากในทางอุตสาหกรรม และมีการนำไปใช้งานในหลายหน้าที่ อาทิเช่น การใช้แยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลว ซึ่งเครื่องไฮโดรไซโคลนที่ถูกสร้างเพื่อวัตถุประสงค์นี้จะมีชื่อเรียกเฉพาะว่า Hydrocyclone thickeners นอกจากนี้ไฮโดรไซโคลนยังนิยมนำมาใช้งานสำหรับการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของแข็งหรือที่เรียกว่า งานคัดแยก ไฮโดรไซโคลนที่ใช้งานประเภทหลังมีชื่อเรียกว่า เครื่องคัดแยกไฮโดรไซโคลน

ได้มีการพัฒนารูปแบบจำลองทางทฤษฎีขึ้นจำนวนมากเพื่อนำมาออกแบบไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลว แต่อย่างไรก็ตามหลักความคิดในการออกแบบไฮโดรไซโคลนสำหรับงานคัดจำพวกนี้ไม่มีทฤษฎีพื้นฐานที่เข้าใจมากพอ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการออกแบบและสร้างไฮโดรไซโคลนขึ้นตามคำแนะนำของ Rietema จากนั้นทำการศึกษาการใช้งานทั้งในแง่ของการแยกและการคัดขนาด ผลของการศึกษาพบว่า เครื่องไฮโดรไซโคลนที่สร้างขึ้นสามารถปฏิบัติงานการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวได้เป็นอย่างดี โดยให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งถึง 100% และสำหรับการใช้งานคัดขนาดพบว่า ขนาดของอนุภาคที่ออกจากตอนบนและตอนล่างของไฮโดรไซโคลนมีความแตกต่างกันพอสมควร แต่ความคมชัดของอนุภาคที่แยกออกจากกันยังต้องได้รับการปรับปรุงโดยการศึกษาถึงตัวแปรหลักที่มีผลต่อการทำงานของไฮโดรไซโคลน ตลอดจนขนาดและสัดส่วนที่เหมาะสมของไฮโดรไซโคลนที่จะใช้กับงานคัดขนาดต่อไป

Hydrocyclone for Separation and Classification

Dr. Apichai Therdthianvong

Assistant Professor

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering, Khon Kaen University

Suppachai Thumma

Scientist

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering, Khon Kaen University

Kreangkrai Traikumgun

Technician

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering, Khon Kaen University

Abstract

Hydrocyclones are found to be widely used in a variety areas of industry. Their main applications may be divided into two categories : 1) hydrocyclone thickeners which is a straightforward separation of solid from liquid and 2) hydrocyclone classifiers which is used for material classification purpose.

Many theoretical models have been developed to design hydrocyclone used for solid-liquid separation. However the design concept of hydrocyclone for classification work has not been clearly well defined. Thus in this work the hydrocyclone was constructed according to the suggestion of Rietema. Both separation and classification performances of hydrocyclone were tested. It was found that this hydrocyclone can successfully separate solid from liquid. The efficiency of solid removal is about 100%. For the classification test, the particle size of solid in underflow is larger than that in overflow. Nevertheless, the best sharpness of cut size of particle was not observed. The effect of main operating parameters and relative geometrical proportions of hydrocyclone on classification performance have to be further studied to obtain a new design for solid-solid separation purpose.

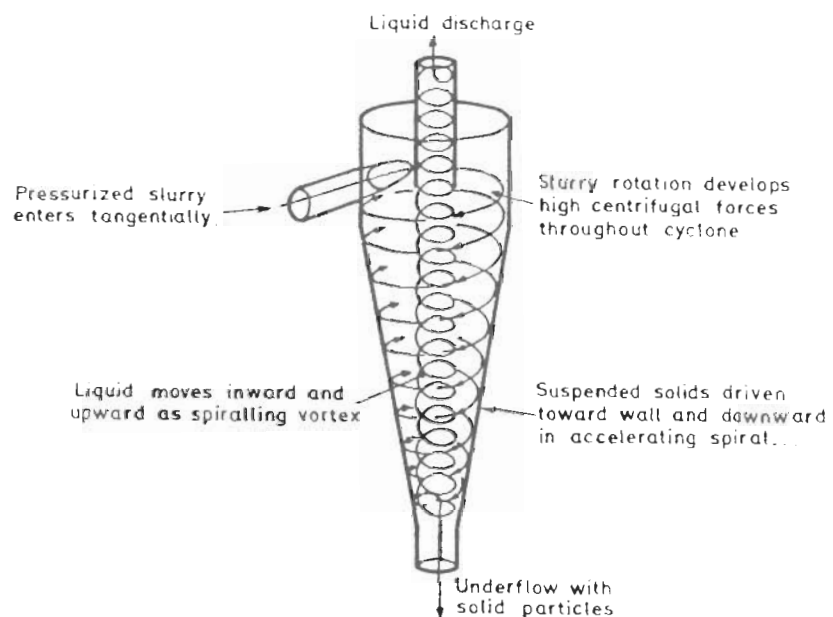
บทนำ

ไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์แรกที่ถูกพิจารณาใช้ในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลว และใช้เป็นตัวป้องกันไม่ให้อนุภาคหลงติดเข้าไปในอุปกรณ์ที่มีการทำงานด้วยความเร็วรอบสูง เพราะอนุภาคดังกล่าวอาจก่อให้เกิดการขัดสี และทำให้อุปกรณ์นั้นเกิดการสึกกร่อนได้ นอกจากนี้ไฮโดรไซโคลนยังช่วยให้การตกตะกอนของอนุภาคเกิดได้เร็วขึ้น ช่วยลดภาระงานของเครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และเครื่องกรอง ทั้งนี้เพราะไฮโดรไซโคลนจะช่วยเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคได้ถึง 90%

ประกอบกับอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนสามารถสร้างได้ง่ายและมีราคาถูก จึงเป็นเหตุผลทำให้ไฮโดรไซโคลนถูกพิจารณาเป็นอุปกรณ์แยกในขั้นต้น

หลักการทำงานของไฮโดรไซโคลน

ไฮโดรไซโคลนถูกนำมาใช้แยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง หลักการทำงานจะคล้ายคลึงกับไซโคลนที่ใช้แยกอนุภาคของแข็งออกจากก๊าซ โดยปกติไฮโดรไซโคลนประกอบด้วยท่อทรงกระบอกทางตอนบน และทางตอนล่างจะมีรูปทรงกรวย ท่อทางเข้าของไฮโดรไซโคลนจะติดตั้งอยู่ทางตอนบนโดยอยู่ในแนวเส้นสัมผัสของท่อทรงกระบอก ท่อทางออกของสารจะมีอยู่ 2 ทาง คือ ทางตอนล่าง (underflow) กับท่อทางออกทางตอนบน (overflow) โดยมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน ท่อทางออกของสารทางตอนบนจะมีส่วนหนึ่งของท่อยื่นเข้าไปในเครื่องเพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคของแข็งเกิดการไหลล้นดวงจรหลุดติดออกไปทางตอนบนทันที โดยปกติส่วนที่ยื่นเข้าไปภายในของท่อทางออกจะอยู่ในระดับเดียวกับท่อป้อนสาร (ดังแสดงในรูปที่ 1)



รูปที่ 1 ไฮโดรไซโคลน

สารละลายชั้น (slurry) ที่มีความดันสูง จะถูกป้อนเข้าทางท่อป้อนสารในแนวเส้นสัมผัส ก่อให้เกิดการไหลแบบหมุนวนเป็นวงกลมลงมาทางตอนล่าง ลักษณะการไหลวนจะก่อให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง อนุภาคของแข็งที่แขวนลอยอยู่จะถูกแรงกระทำจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางนี้ผลักให้ไหลติดไปกับผนังภายในเครื่องและหมุนติดผนังไปเรื่อยๆ จนถึงท่อทางออกที่อยู่ตอนล่างของไฮโดรไซโคลอน อนุภาคของแข็ง (ที่มีปริมาณของเหลวอยู่น้อย) จะหลุดไปทางท่อตอนล่างโดยอิทธิพลของความเฉื่อยของตัวอนุภาค ส่วนของเหลวจะเปลี่ยนทิศทางการไหลโดยหมุนวนขึ้นทางตอนบนเป็นชั้นหมุนวนทางตอนใน (ดูรูปที่ 1 ประกอบ)

การใช้งานของไฮโดรไซโคลอน

- ใช้ในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวได้ เช่น
 - การแยกอนุภาคของแข็งออกจากน้ำมันในกระบวนการผลิตน้ำมัน
 - การแยกอนุภาคแข็งออกจากน้ำแป้ง
 - การแยกอนุภาคของแข็งออกจากโคลนขุดเจาะ
 - การแยกสินแร่จากสารละลายแขวนลอยในกระบวนการแต่งแร่
- ใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคของแข็งให้สูงขึ้น และการทำให้ของไหลใสขึ้น ได้แก่
 - การทำให้สารละลายแขวนลอยมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นก่อนจะส่งไปเข้ากระบวนการดีเอชเอของเหลวออก (deliquoring) อาทิเช่น การผลิตโพลีเมอร์ ถ่านหิน และ ยูเรีย
 - การทำให้สารละลายแขวนลอยที่ได้จากการตกผลึกมีความเข้มข้นมากขึ้น อาทิเช่น อุตสาหกรรมผลิตกรดอะดิปิก (adipic acid) และการผลิตแอมโมเนียมซัลเฟต
- ใช้ในการคัดจำพวกของอนุภาค ซึ่งการใช้ไฮโดรไซโคลอนในงานประเภทนี้ อนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กจะติดออกไปกับของเหลวทางตอนบน ส่วนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าจะหลุดออกไปทางตอนล่างได้แก่
 - การแยกอนุภาคที่หนักและหยาบ ซึ่งไม่ต้องการออกจากเหยื่อกระดาษในอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษ
 - การแยกขนาดอนุภาคที่ใหญ่เกินออกเช่น อุตสาหกรรมผลิตปูนขาว ดินขาว และเซรามิกส์
 - การแยกเอาวัตถุที่ละเอียดออกจากสารละลายแขวนลอยในการผลิตแร่โปแตช และอื่นๆ
 - การคัดขนาดอนุภาคในกระบวนการตกผลึกสาร โดยปกติไฮโดรไซโคลอนจะถูกนำมาใช้แยกอนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ 4-600 ไมครอน ข้อดีอีกอย่างหนึ่งที่เห็นได้ชัดของ

ไฮโคลนคือ การที่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนไหวจึงทำให้ไฮโดรไฮโคลนมีราคาถูก ติดตั้งได้ง่าย และเสียค่าบำรุงรักษาน้อย

วิธีการดำเนินการวิจัย

การออกแบบและจัดสร้างไฮโดรไฮโคลนตามแบบของ Rietema

Rietema ได้แนะนำการออกแบบไฮโดรไฮโคลน โดยใช้ความสัมพันธ์ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2 เครื่องไฮโดรไฮโคลนที่ออกแบบตามสัดส่วนในรูปที่ 2 นี้ จะมีปริมาณของเหลวที่ออกทางตอนล่างเท่ากับ 10% ส่วนที่เหลือ 90% จะออกไปทางตอนบนของไฮโดรไฮโคลน

Rietema ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง d_{pc} และ $\dot{Q}$ สำหรับไฮโดรไฮโคลนที่แสดงไว้ในรูปที่ 2 ในเทอมของกลุ่มไร้นิติยว ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\left[\left(\frac{d_{pc}}{\mu} \right)^2 (\rho_p - \rho) \Delta P \right] = 0.177 \left[\frac{D_c \sqrt{\rho \Delta P}}{\mu} \right]^{0.85} \quad (1)$$

$$\left[\dot{Q} \left(\frac{\rho}{\mu} \right)^2 \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \right] = 0.2 \left[\frac{D_c \sqrt{\rho \Delta P}}{\mu} \right]^{1.85} \quad (2)$$

เมื่อ

d_{pc} = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่สามารถถูกแยกได้เท่ากับ 50%

$\dot{Q}$ = อัตราการไหลของของเหลว, m^3/s

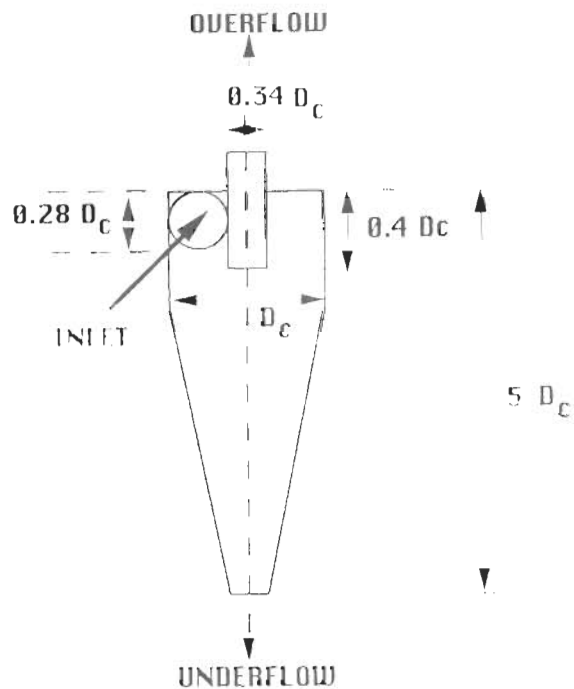
D_c = เส้นผ่าศูนย์กลางของไฮโดรไฮโคลน, m

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว, kg/m^3

ρ_p = ความหนาแน่นของอนุภาค, kg/m^3

μ = ความหนืดของของไหล, $kg/m.s$

ΔP = ค่าความดันลด, N/m^2



รูปที่ 2 การออกแบบไฮโดรไซโคลนตามคำแนะนำของ Rietema

จากการใช้สมการ (1) และ (2) ตลอดจนค่าสัดส่วนตามรูปที่ 2 โดยเลือกสารละลายแขวนลอยอนุภาคของแข็งเป็นทรายที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางในช่วง 20-325 mesh (หรือ 45-850 μm) ในน้ำพบว่า ขนาดไฮโดรไซโคลนที่สร้างสำหรับการทดสอบสมรรถนะทางการแยกอนุภาคออกจากของเหลว และที่ใช้ทดสอบสำหรับงานการคัดขนาดมีค่าดังแสดงในตารางที่ 1

การทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย ถังผสมสารละลายแขวนลอยระหว่างน้ำและทราย ตรงแกนกลางของถังผสมมีการติดตั้งใบกวน ภายในถังมีการติดตั้งแผ่นกั้นจำนวน 4 แผ่นที่ผนังด้านใน เพื่ย ๕ พรเกิ ๖ ๗ ๘ ๙ ๑๐ ภายในถังผสม สารละลายแขวนลอยจะถูกปั๊มออกจากถังเพื่อป้อนเข้าไฮโดรไซโคลนโดยปั๊มแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 3

สารละลายที่ไหลออกทางตอนล่างและตอนบนของไฮโดรไซโคลนจะถูกเก็บแยกไว้คนละถัง การวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคของแข็งจะกระทำโดยใช้ตะแกรงมาตรฐาน Tyler สหรัฐอเมริกา ซึ่งอนุภาคทรายที่ใช้ในการทดสอบมีการกระจายตัวของขนาดดังแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 1

ขนาดและสัดส่วนของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนที่ใช้ทดสอบ

ขนาดและสัดส่วนต่างๆ ของไฮโดรไซโคลน	ไฮโดรไซโคลนที่ใช้สำหรับ	ไฮโดรไซโคลนที่ใช้
	การทดสอบการแยกอนุภาคออกจากของเหลว	สำหรับการทดสอบการคัดขนาดอนุภาค
- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน (D_c), cm	9.4	4.0
- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อทางออกตอนบน, cm	3.2	1.8
ขนาดกว้าง x ยาว ของท่อทางเข้า, (cm x cm)	2.5x3.8	2.2x1.6
ความสูงทั้งหมดของไฮโดรไซโคลน, cm	47	21
- ความยาวของท่อทางออกตอนบนที่ยื่นเข้าไปในไฮโดรไซโคลน, cm	3.8	1.6

หมายเหตุ : ขนาดสัดส่วนของท่อทางเข้าของไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในการทดสอบจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากขนาดสัดส่วนตามคำแนะนำของ Rietema เพราะท่อทางเข้าที่สร้างมีรูปร่างเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะเป็นที่กลม

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

การทดสอบการใช้ไฮโดรไซโคลนกับงานแยกอนุภาคของแข็งจากของเหลว

ในการทดสอบการแยกอนุภาคของแข็งออกจากน้ำโดยใช้ไฮโดรไซโคลนนี้ ได้ทำการทดสอบโดยใช้สารละลายแขวนลอย (ทราย + น้ำ) ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน และทำการทดลองกับไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.4 cm ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่าไฮโดรไซโคลนสามารถับภาระงานที่แตกต่างกันได้ ผลการทดสอบถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 2

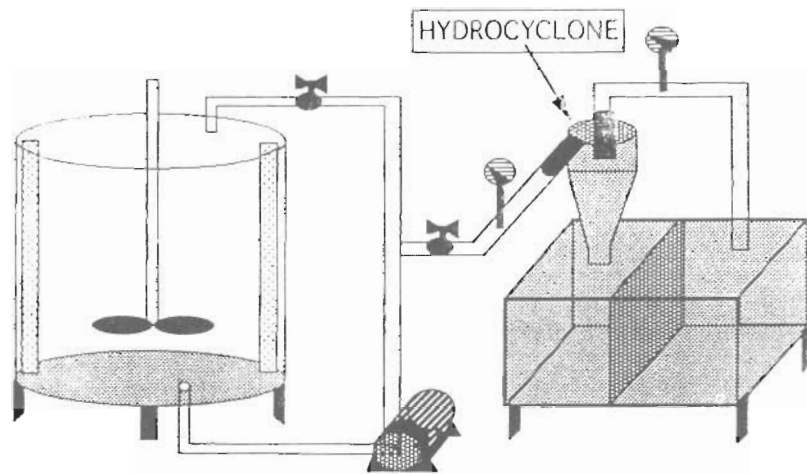
ขนาดต่างๆ ของอนุภาคทรายที่ใช้ในการทดสอบ

เบอร์เมช (Mesh)	ขนาดรูเปิดของ ตะแกรง, mm	ขนาดเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค $\bar{D}_{pi}$ (mm)	สัดส่วนมวลของอนุภาค ที่ค้างบนตะแกรง
16	1.170	-	0
20	0.850	1.010	0.047
30	0.600	0.725	0.088
35	0.500	0.550	0.091
40	0.425	0.462	0.091
45	0.355	0.390	0.108
50	0.300	0.328	0.227
70	0.212	0.256	0.174
100	0.150	0.181	0.073
140	0.106	0.128	0.063
200	0.075	0.091	0.024
270	0.053	0.064	0.012
325	0.045	0.049	0.002

ตารางที่ 3

ผลการทดลองใช้ไฮโดรไซโคลนในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากน้ำ

คุณสมบัติ	การทดลองครั้งที่			
	1	2	3	4
ค่าความเข้มข้นของสารละลายแขวนลอย, kg/m ³	14	30	137	150
อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายแขวนลอย, cm ³ /s	1207	1187	2143	1041
อัตราการไหลของสารตรงทางออกตอนบนของไฮโดรไซโคลน				
อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ, cm ³ /s	936	885	1804	932
อัตราการไหลเชิงมวลของทราย, kg/s	0.0	0.0	0.0	0.0
อัตราการไหลของสารตรงทางออกตอนล่างของไฮโดรไซโคลน				
อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ, cm ³ /s	264	288	228	49
อัตราการไหลเชิงมวลของทราย, kg/s	0.0163	0.0354	0.2939	0.1559
ค่าความดันลดผ่านไฮโดรไซโคลน (ΔP), kg/cm ²	0.4	0.32	0.7	0.2
เปอร์เซ็นต์ของน้ำที่ออกทางตอนล่างของไฮโดรไซโคลนเทียบกับน้ำทั้งหมด, %	22	24	11	5
ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งของไฮโดรไซโคลน, %	100	100	100	100



รูปที่ 3 ชุดอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในการทดสอบ

จากการทดสอบสมรรถนะในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวของไฮโดรไซโคลนที่จัดสร้างตามแบบของ Rietema พบว่าไม่ว่าความเข้มข้นของสารละลายแขวนลอยมีค่าสูงหรือต่ำ จะไม่มีอนุภาคของแข็งติดปนไปกับของไหลที่ออกทางตอนบนของไฮโดรไซโคลนเลย นั่นคือประสิทธิภาพในการแยกมีค่าเท่ากับ 100 และถึงแม้ในการเพิ่มค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายแขวนลอยจะเพิ่มจาก $1,041 \text{ cm}^3/\text{s}$ (การทดลองที่ 4) เป็น $2,143 \text{ cm}^3/\text{s}$ (การทดลองที่ 3) ก็ยังพบว่าไฮโดรไซโคลนยังคงสามารถทำหน้าที่ในการแยกได้อย่างดี

หากพิจารณาในแง่ความดันลด ค่าความดันลดของไฮโดรไซโคลนที่ทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง $0.2-0.7 \text{ kg/cm}^2$ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ในทางอุตสาหกรรม โดยปกติไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมมักมีค่าความดันลดอยู่ในช่วง $1.4-4.0 \text{ kg/cm}^2$ โดยการเปรียบเทียบการทดลองที่ 3 และ 4 ซึ่งมีค่าความเข้มข้นของสารละลายแขวนลอยที่ใกล้เคียงกัน แต่จะเห็นว่าที่ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายแขวนลอยที่สูงกว่าจะก่อให้เกิดค่าความดันลดที่มากกว่า

ในการทดลองที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นการทดลองที่ความเข้มข้นของสารละลายแขวนลอยมีค่าต่ำ พบว่าเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่ออกมาทางตอนล่างของไฮโดรไซโคลนมีค่าสูงกว่าที่แนะนำโดย Rietema แต่เมื่อค่าความเข้มข้นของสารละลายแขวนลอยมีค่าสูงขึ้น กลับพบว่าเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่ออกมาทางตอนล่างของไฮโดรไซโคลนมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 5-11% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบการทดลองครั้งที่ 3 และ

4 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายแวนลอยขึ้น ปริมาตรของน้ำที่ออกทางตอนล่างของไฮโดรไซโคลนมีค่าสูงขึ้นตาม ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อความเร็วของน้ำที่ไหลในไฮโดรไซโคลนมีค่าสูงขึ้น ค่าความเฉื่อยของของเหลวก็มีค่าสูงขึ้นตาม ทำให้ของเหลวหรือน้ำยังคงรักษาทิศทางเดิมและพุ่งออกมาตรงทางออกแทนที่จะวกเปลี่ยนทิศทางเป็นชั้นหมุนวนในแล้วไหลขึ้นไปทางตอนบน ส่วนเหตุผลที่ว่าทำไมที่ความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้น ปริมาณน้ำที่ออกทางตอนล่างมีค่าลดลง เราสามารถอธิบายได้ดังนี้ การที่อนุภาคมีความเข้มข้นสูง จะทำให้ตรงทางออกตอนล่างของไฮโดรไซโคลนถูกครอบครองด้วยอนุภาคของแข็ง ทำให้ของเหลวส่วนใหญ่วกเปลี่ยนทิศทางการไหลพุ่งขึ้นและออกไปทางตอนบนของไฮโดรไซโคลน

การทดสอบการใช้ไฮโดรไซโคลนกับงานคัดขนาดอนุภาคของแข็ง

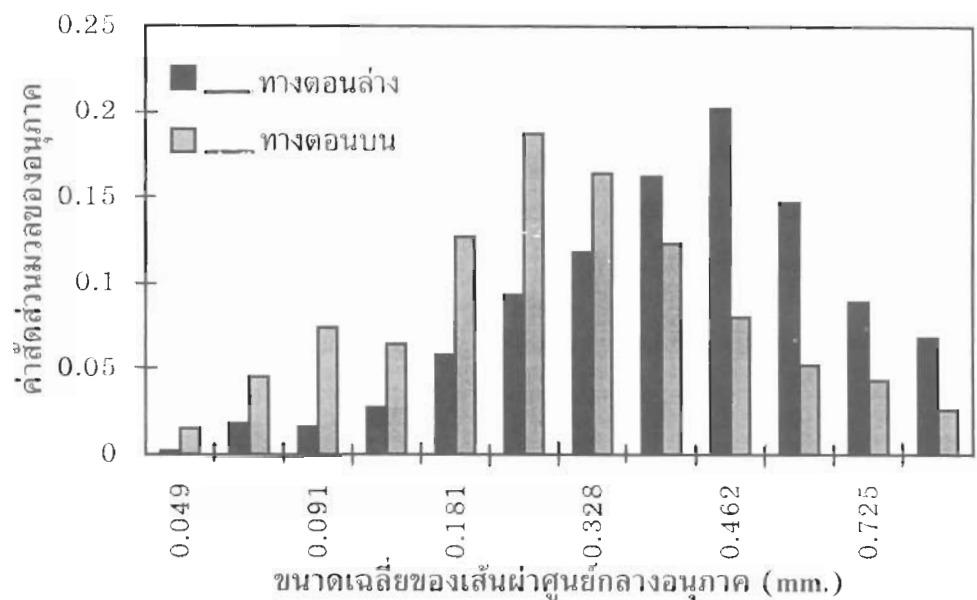
งานคัดจำพวกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ การคัดขนาดและงานแยกชนิด การคัดขนาดจะเป็นการแยกประเภทของแข็งตามขนาด ในขณะที่งานแยกชนิดจะเป็นการแยกโดยอาศัยความแตกต่างของค่าความหนาแน่น ในการทดสอบครั้งนี้จะเป็นงานคัดขนาดซึ่งจะกระทำโดยใช้ไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 4.0 cm และใช้ค่าความเข้มข้นของสารละลายแวนลอยเท่ากับ 72 kg/m^3 แต่ทำการเปลี่ยนอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายแวนลอยให้มีค่าเท่ากับ 538 และ $1,874 \text{ cm}^3/\text{s}$ ผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 4 ส่วนค่าการกระจายตัวของอนุภาคที่ออกทางตอนบนและตอนล่างของไฮโดรไซโคลนถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ก และ ข ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวได้ถูกนำมาพล็อตเป็นกราฟดังแสดงไว้ในรูปที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4

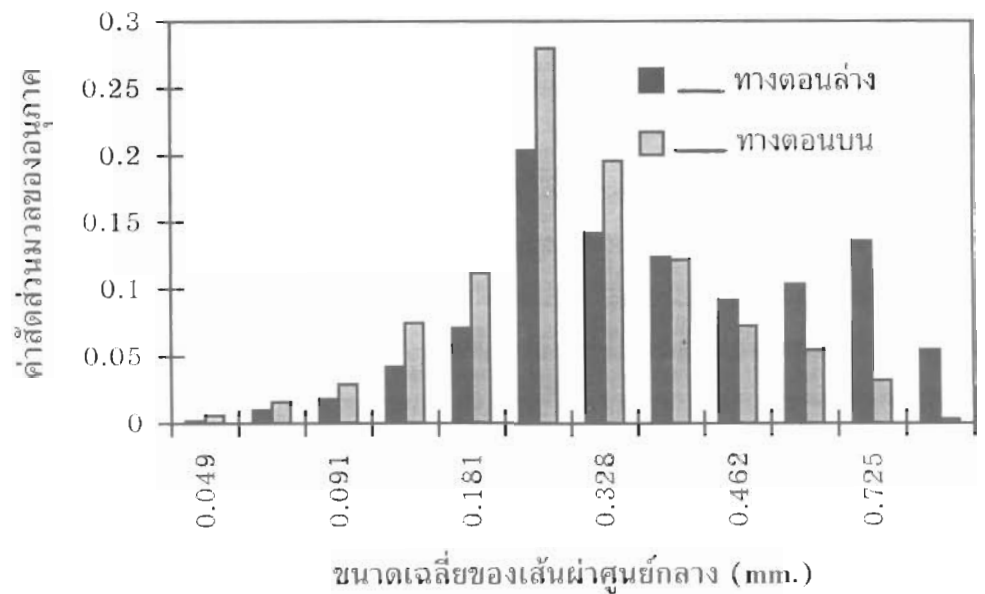
ผลการทดลองใช้ไฮโดรไซโคลนในการคัดขนาดอนุภาคของแข็ง

คุณสมบัติ	อัตราการไหลของสารละลายแวนลอย (cm^3/s)	
	538	1874
ค่าความเข้มข้นของสารละลายแวนลอย, kg/m^3	72	72
อัตราการไหลของสารตรงทางออกตอนบนไฮโดรไซโคลน		
อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ, cm^3/s	246	1424
อัตราการไหลเชิงมวลของทราย, kg/s	0.0087	0.0471
อัตราการไหลของสารตรงทางออกตอนล่างไฮโดรไซโคลน		
อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ, cm^3/s	277	401
อัตราการไหลเชิงมวลของทราย, kg/s	0.031	0.0822
ค่าความดันลดผ่านไฮโดรไซโคลน (ΔP), kg/cm^2	0.3	0.5
เปอร์เซ็นต์ของน้ำที่ออกทางตอนล่างของไฮโดรไซโคลนเทียบกับน้ำทั้งหมด, %	53	22

เส้นกราฟในรูปที่ 4 และ 5 แสดงถึงค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่ออกทางตอนบนและตอนล่างของไฮโดรไซโคลนที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายแขวนลอยเท่ากับ 538 และ 1,874 cm^3/s ตามลำดับ ที่อัตราการไหลของสารละลายแขวนลอยที่ต่ำกว่า (538 cm^3/s) เส้นกราฟค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของของไหลที่ออกทางตอนบนและตอนล่างดูเหมือนว่าจะแยกออกเป็น 2 โดม โดยที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่มีค่าสัดส่วนมวลสูงสุดในของไหลทางตอนบนและล่างมีค่าเท่ากับ 0.256 และ 0.462 mm ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามสำหรับที่ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายแขวนลอยมีค่าสูงขึ้น (1,874 cm^3/s) การแยกออกจากกันของเส้นกราฟค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคจะเห็นได้ไม่ชัดเจน และพบว่าจุดสูงสุดของเส้นกราฟจะเกิดที่ตำแหน่งเดียวกับที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคเท่ากับ 0.256 mm ทั้งนี้เกิดจากการที่เมื่ออัตราการไหลของของไหลในไฮโดรไซโคลนมีค่าสูงขึ้น ความปั่นป่วนภายในย่อมมีมากขึ้น โอกาสที่อนุภาคขนาดใหญ่จะติดไปกับของไหลทางตอนบนย่อมมีค่าสูงขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะคล้ายคลึงกับการพัดพาอนุภาคติดไปกับก๊าซ หรือที่เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า re-entrainment ในอุปกรณ์ไฮโดรโคลนเมื่อความเร็วของก๊าซมีค่าสูงเกินกว่า 1.25 เท่าของ saltation velocity



รูปที่ 4 เส้นกราฟค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่ออกทางตอนบนและตอนล่างของไฮโดรไซโคลนที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายแขวนลอยเท่ากับ 538 cm^3/s



รูปที่ 5 เส้นกราฟค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่ออกทางตอนบนและตอนล่างของไฮโดรไซโคลอน
ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายแขวนลอยเท่ากับ 1874 cm³/s

ในการพิจารณาการแยกขนาดอนุภาคโดยใช้ไฮโดรไซโคลอน นอกจากจะพิจารณาจากเส้นกราฟการกระจายตัวของอนุภาคแล้ว ข้อมูลที่สำคัญอีกอันหนึ่งที่เราพิจารณาคือปริมาณของอนุภาคขนาดต่างๆ ที่ถูกแยกออกทางตอนบนและตอนล่างของไฮโดรไซโคลอนนั้นๆ และข้อมูลนี้สามารถอธิบายได้ในเทอมของ %recovery ซึ่งมีนิยามดังนี้

% Recovery ของผลิตภัณฑ์ที่ออกทางตอนล่างของไฮโดรไซโคลอน

$$= \frac{\text{ปริมาณของอนุภาคนขนาด } \bar{D}_{pi} \text{ ที่ออกทางตอนล่างของไฮโดรไซโคลอน}}{\text{ปริมาณของอนุภาคนขนาด } \bar{D}_{pi} \text{ ที่ทางเข้าของไฮโดรไซโคลอน}} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} & \text{ปริมาณของอนุภาคนขนาด } \bar{D}_{pi} \text{ ที่ออกทางตอนล่างของไฮโดรไซโคลอน} \\ &= \text{อัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคที่ออกทางตอนล่างของไฮโดรไซโคลอน} \times \\ & \quad \text{สัดส่วนของอนุภาค } \bar{D}_{pi} \text{ ในผลิตภัณฑ์ทางตอนล่างไฮโดรไซโคลอน} \end{aligned}$$

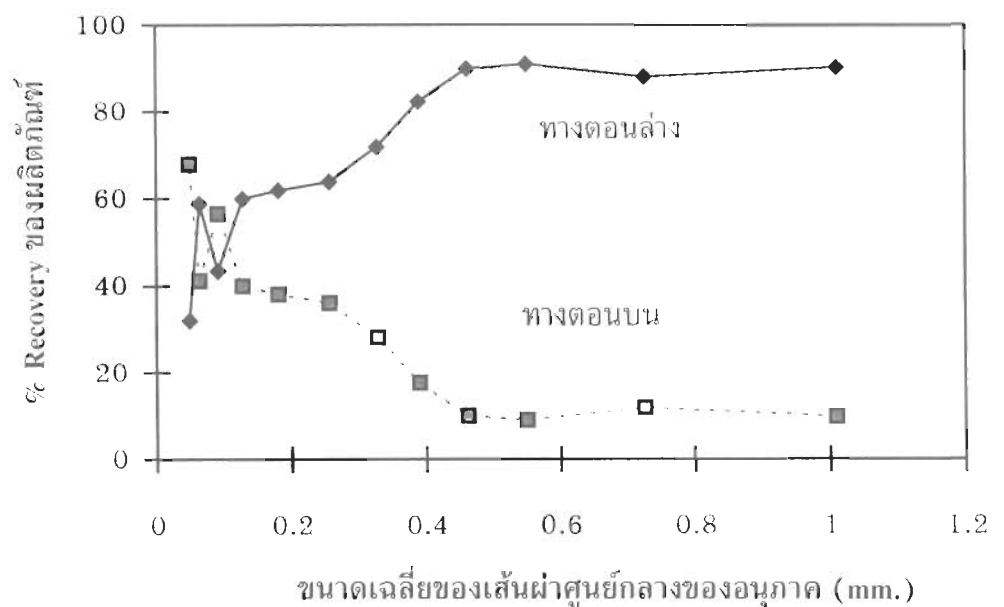
(4)

และ

$$\begin{aligned} & \text{ปริมาณของอนุภาคขนาด } \bar{D}_{pi} \text{ ที่ทางเข้าของไฮโดรไซโคลน} \\ & = \text{ผลรวมของปริมาณอนุภาค } \bar{D}_{pi} \text{ ที่ออกจากตอนล่างและตอนบนของไฮโดรไซโคลน} \end{aligned}$$

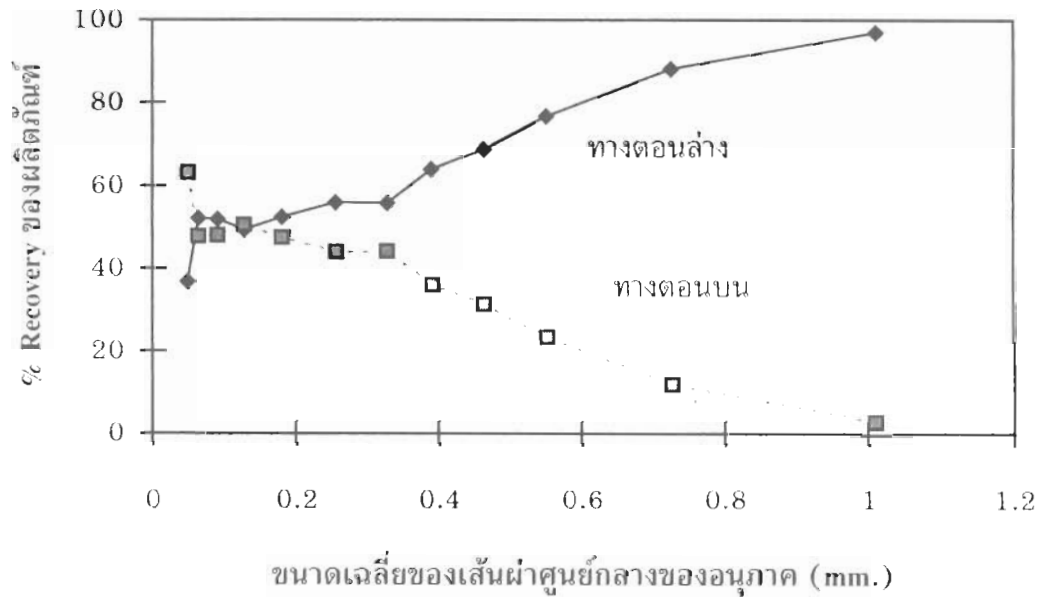
ในทำนองเดียวกันปริมาณของอนุภาคขนาด $\bar{D}_{pi}$ ที่ออกจากตอนบนของไฮโดรไซโคลนสามารถคำนวณโดยใช้รูปแบบเดียวกับสมการข้างต้น

%Recovery ของอนุภาคขนาดต่างๆ ที่ออกจากตอนบนและตอนล่างของไฮโดรไซโคลนได้ถูกคำนวณตามสมการข้างต้น โดยแสดงผลการคำนวณไว้ในตารางภาคผนวก ก และ ข และพล็อตกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 สำหรับกรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายแขวนลอยมีค่า 538 และ 1874 cm^3/s ตามลำดับ จากผลการทดลองที่ทั้งสองค่าอัตราการไหลพบว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าจะไหลออกจากตอนล่างของไฮโดรไซโคลน (ดังจะเห็นได้จากการที่ค่า %Recovery ของอนุภาคขนาดใหญ่ในของไหลที่ไหลออกจากตอนล่างมีค่าสูงกว่าในของไหลที่ออกจากตอนบน) ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กจะไหลวกขึ้นทางตอนบนและไหลออกจากทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลน



รูปที่ 6 %Recovery ของอนุภาคต่างๆ ที่ออกจากตอนบนและตอนล่างของไฮโดรไซโคลน
ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายแขวนลอยมีค่าเท่ากับ 538 cm^3/s

ข้อมูล %Recovery นี้เป็นอีกหลักฐานหนึ่งที่ยืนยันว่าที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายแขวนลอยที่ต่ำกว่าจะก่อให้เกิดการแยกขนาดของอนุภาคที่ดีกว่า เพราะจะเห็นว่าในกราฟรูปที่ 6 ขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0.45 mm ขึ้นไปจะออกไปทางตอนล่างของไฮโดรไซโคลอน (%Recovery ของผลิตภัณฑ์ทางตอนล่างมีค่ามากกว่า 80%) ในขณะที่ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายแขวนลอยเท่ากับ 1,874 cm^3/s (ในรูปที่ 7) อนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0.4-1.0 mm จะมีการคละเคล้าและออกไปทั้งทางตอนบนและตอนล่างของไฮโดรไซโคลอน



รูปที่ 7 % Recovery ของอนุภาคต่าง ๆ ที่ออกทางตอนบนและตอนล่างของไฮโดรไซโคลอน
ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายแขวนลอยมีค่าเท่ากับ 1874 cm^3/s

ข้อสังเกตอีกอย่างหนึ่งคือ สำหรับที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายแขวนลอยเท่ากับ 1874 cm^3/s อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.4 mm จะมีโอกาสหลุดออกไปทั้งทางตอนบนและตอนล่างได้เท่าๆ กัน แต่สำหรับที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายแขวนลอยเท่ากับ 538 cm^3/s เฉพาะอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 mm เท่านั้นที่จะมีโอกาหลุดออกไปทั้งทางตอนบนและตอนล่างของไฮโดรไซโคลอนได้เท่าๆ กัน

สรุปผลการทดลอง

ไฮโดรไซโคลนที่ออกแบบตามหลักของ Rietema สามารถนำมาใช้ในงานแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวได้เป็นอย่างดี โดยสามารถให้ประสิทธิภาพการแยกได้สูงถึง 100% ทั้งนี้ไม่ว่าสารละลายจะมีค่าความเข้มข้นเท่าไร หรือสารป้อนเข้าไฮโดรไซโคลนจะมีค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายแขนลอยมากหรือน้อย โดยทั้งนี้ค่าอัตราการไหลดังกล่าวต้องไม่เกินจากภาระงานสูงสุดที่ได้รับการออกแบบของไฮโดรไซโคลนแต่ละตัว นอกจากนี้ยังพบว่าอนุภาคที่มีขนาด 0.049-1.0 mm ก็จะสามารถถูกแยกหรือกักโดยใช้ไฮโดรไซโคลนที่ได้รับการออกแบบนี้ได้

ในแง่ของการใช้ไฮโดรไซโคลนสำหรับงานคัดขนาดอนุภาคพบว่า ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายแขนลอยที่ต่ำกว่าจะให้ผลในการคัดขนาดของอนุภาคที่ดีกว่า โดยอนุภาคที่ออกทางตอนบนของไฮโดรไซโคลนจะมีอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.4 mm ติดออกไปเพียงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามพบว่าความคมชัดของขนาดอนุภาคที่ออกทางตอนบนและตอนล่างไม่แยกตัวออกจากกันมากพอ ดังนั้นการหาขนาดสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับงานคัดขนาดของไฮโดรไซโคลน อาทิเช่น การลดค่าความยาวของไฮโดรไซโคลน การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางออกตอนบนของไฮโดรไซโคลน และการเพิ่มค่าความยาวท่อทางออกของไฮโดรไซโคลนที่ยื่นเข้าไปในไฮโดรไซโคลน ควรได้รับการศึกษาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. Lydersen, A.L., **"Fluid Flow and Heat Transfer"** John Wiley & Sons, New York, 1979.
2. Schweitzer, P.A., **"Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers"**, 2nd Ed., McGraw-Hill Book company, 1988.
3. Svarovsky, L., **"Solid-Liquid Separation"**, 2nd Ed., Butterworths, 1981.
4. Stanley, M.W., **"Chemical Process Equipment : Selection and Design"**, Butterworth-Heinemann, 1990.
5. Woods, D.R., **"Process Design and Engineering Practice"**, PTR Prentice Hall, 1995.

6. Sinnott, R.K., **“Chemical Engineering, An Introduction to Chemical Engineering Design”**, vol. 6, Pergamon Press, 1983.

7. อภิชาติ เทอดเทียนวงศ์, **“เทคโนโลยีขนาดและกระบวนการแยกเชิงกล”**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2532.

ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบการใช้ไฮโดรไซโคลนในการคัดขนาดอนุภาคที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายแขวนลอยเท่ากับ 538 cm³/s

ขนาดเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาค $\bar{D}_{pi}$ (mm)	ค่าสัดส่วนมวลของอนุภาคที่ออกทางตอนล่าง	ค่าสัดส่วนมวลของอนุภาคที่ออกทางตอนบน	% Recovery ของผลิตภัณฑ์ทางตอนล่าง	% Recovery ของผลิตภัณฑ์ทางตอนบน
1.01	0.068	0.026	90.3	9.7
0.725	0.089	0.043	88.1	11.9
0.550	0.147	0.052	91.0	9.0
0.462	0.202	0.080	90.0	10.0
0.390	0.162	0.123	82.4	17.6
0.328	0.118	0.164	71.9	28.1
0.256	0.093	0.187	63.9	36.1
0.181	0.058	0.127	61.9	38.1
0.128	0.027	0.064	60.0	40.0
0.091	0.016	0.074	43.5	56.5
0.064	0.018	0.045	58.8	41.2
0.049	0.002	0.015	32.1	67.9

ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบการใช้ไฮโดรไซโคลนในการคัดขนาดอนุภาค

ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายแขวนลอยเท่ากับ $1874 \text{ cm}^3/\text{s}$

ขนาดเฉลี่ยของ เส้นผ่าศูนย์กลาง อนุภาค $\bar{D}_{p1}(\text{mm})$	ค่าสัดส่วนมวล ของอนุภาคที่ออก ทางตอนล่าง	ค่าสัดส่วนมวล ของอนุภาคที่ออก ทางตอนบน	% Recovery ของ ผลิตภัณฑ์ทางตอน ล่าง	% Recovery ของ ผลิตภัณฑ์ทางตอน บน
1.01	0.055	0.003	97.0	3.0
0.725	0.136	0.032	88.1	11.9
0.550	0.104	0.055	76.7	23.3
0.462	0.092	0.073	68.7	31.3
0.390	0.124	0.122	64.0	36.0
0.328	0.142	0.196	55.8	44.2
0.256	0.204	0.280	56.0	44.0
0.181	0.071	0.112	52.5	47.5
0.128	0.042	0.075	49.4	50.6
0.091	0.018	0.029	52.0	48.0
0.064	0.010	0.016	52.2	47.8
0.049	0.002	0.006	36.8	63.2