การศึกษาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนที่ต่อแบบอนุกรมสำหรับการแยกอนุภาคซิลิก้าออกจากของเหลว

The Study of Efficiency of Hydrocyclone in Series for Separating Silica Particles from Liquid

กฤษดา อาภาทองรัตน์[1], คณาวุฒิ ศรีระหงส์[2], ธนิต สวัสดิ์เสวี[3], ประธาน วงศ์ศริเวช[4*]

Kritsada A-Phathongrat[1], Kanawut Srirahong[2], Thanit Sawasdisevi[3], Pratarn Wongsarivej[4*]

Received : 15 October 2012 ; Accepted : 10 December 2012

บทคัดย่อ

ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคซิลิก้าออกจากของเหลวโดยชุดทดลองไฮโดรไซโคลนที่ต่อแบบอนุกรม ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ อัตราการไหล ขนาดอนุภาค และปริมาณอนุภาค จากการทดลองพบว่าอัตราการไหลมากส่งผลถึงประสิทธิภาพการแยกดีกว่าอัตราการไหลน้อย อนุภาคที่มีขนาดใหญ่มีผลทำให้ประสิทธิภาพการแยกดีกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ปริมาณอนุภาคน้อยส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกต่ำเมื่อเทียบกับปริมาณอนุภาคมาก

คำสำคัญ: การแยก, ประสิทธิภาพ, อนุกรม, อนุภาค, ไฮโดรไซโคลน

Abstract

The factors affecting the separation efficiency of silica particles from liquid by experimental hydrocyclone connected in series were investigated. Studied factors were the flow rate, particle size and particle concentration. From experimental results, it was found that the higher flow rate results in better separation efficiency than a lower flow rate. The large particles caused better separation efficiency than the small ones. The low particle concentration affected the lower separation efficiency when compared with the high particle concentration.

Keywords: Separation, Efficiency, Series, Particle, Hydrocyclone

บทนำ

ไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกของผสมในอุตสาหกรรม การทำงานของไฮโดรไซโคลนจะใช้กลไกแยกสารโดยอาศัยหลักการเคลื่อนที่แบบหมุนให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง หลักในการแยกสารอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นหรือขนาดของสาร (ในกรณีของแข็ง) ที่เคลื่อนที่โดยแรงเหวี่ยงร่วมกับการออกแบบรูปร่างของไฮโดรไซโคลน แรงเหวี่ยงเกิดจากความเร็วของของผสมด้านทางเข้าของไฮโดรไซโคลนด้วยความเร็วสูงระดับหนึ่งโดยที่ไฮโดรไซโคลนไม่เคลื่อนที่ ในระบบที่มีของแข็งปนอยู่กับของเหลว สารที่เป็นของเหลวหรือสารที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าจะเคลื่อนที่ในทิศทางหมุนเข้าสู่ศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนโดยไหลออกทางด้านบน (overflow) ส่วนของแข็งหรือสารที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะเคลื่อนที่ในทิศทางหมุนออกจากศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนโดยไหลออกทางด้านล่าง (underflow)[1]

[1] *นิสิตปริญญาโท, [3] ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140*

[2] *ผู้ช่วยนักวิจัย, [4] นักวิจัย, ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปทุมธานี 12120*

[1] *Master's degree student, [3] Assist. Prof., Faculty School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand.*

[2] *Assist. Researcher, [4] Researcher, National Nanotechnology Center, National Science and Technology Development Agency, Pathumthani 12120, Thailand.*

[*] *Corresponding author; Pratarn Wongsarivej, National Nanotechnology Center, National Science and Technology Development Agency, Pathumthani 12120, Thailand. pratarn@nanotec.or.th*

อดีตไฮโดรไซโคลนคิดค้นขึ้นมาเพื่อใช้แยกพวกแร่ กรวด หิน ดิน ทรายและโคลนออกจากน้ำ ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ นอกจากไฮโดรไซโคลนจะใช้แยกของผสมระหว่างของแข็งกับของเหลวแล้ว ยังสามารถแยกของผสมระหว่างของเหลวกับของเหลว เช่น น้ำกับน้ำมันดิบ รวมทั้งของแข็งที่มีขนาดและน้ำหนักต่างกัน และได้มีการศึกษาโครงสร้างที่มีผลต่อประสิทธิภาพการคัดแยก เช่น ขนาดของ Vortex finder ที่เหมาะสม[2] ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสมของท่อทางเข้าและทางออกต่าง ๆ เป็นต้น อีกทั้งยังมีการศึกษาถึงปัจจัยอื่น เช่น ความดันลด ความเข้มข้นของตัวอย่างที่ป้อนเข้า[3] ปัจจุบันไฮโดรไซโคลนได้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคมี ปิโตรเคมี อาหารและยา ตัวอย่างเช่น กระบวนการแยกน้ำออกจากน้ำมันดิบ แยกกรวดทรายออกจากอุตสาหกรรมเซรามิค อุตสาหกรรมการผลิตยีสต์ รวมถึงการแยกสารกัดกร่อนในโรงงานนิวเคลียร์ เป็นต้น ไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่เหมาะกับอุตสาหกรรมในประเทศไทย เนื่องจากกลไกการแยกสารไม่ซับซ้อน ราคาไม่แพง เสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงน้อย และยังมีความปลอดภัยค่อนข้างสูงอีกด้วย อย่างไรก็ตามการรั่วไหลของสาร อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากการผุกร่อนของอุปกรณ์ (จากการกัดกร่อนของสารบางชนิด) ดังนั้นจึงต้องมีการป้องกันและการออกแบบที่ดีก่อนการใช้งาน[4]

Kraipech[5] ศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบไฮโดรไซโคลน สมการการออกแบบจะสามารถนำมาใช้ในการออกแบบได้ต้องอาศัยข้อมูลจากการทดลอง ได้แก่ ค่าคงที่ต่าง ๆ ในระบบไฮโดรไซโคลน ซึ่งปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องในกระบวนการนี้ ได้แก่ ความดันลด อัตราการไหล ขนาดของไฮโดรไซโคลน และ คุณสมบัติการไหลของสารป้อน

Svarovsky[6] กล่าวถึงการออกแบบไฮโดรไซโคลนนั้นต้องพิจารณาปัจจัยหลายอย่างซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิผลในการแยกของผสม เช่น การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลน (Vortex finder) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิผลในการแยก แต่จะมีผลทำให้ใช้สารป้อนได้ปริมาณน้อยลง นอกจากนี้ Svarovsky ได้เสนอถึงการนำไฮโดรไซโคลนหลาย ๆ ตัว มาต่อเข้าด้วยกันเป็นอนุกรม และระบบที่มีการนำของผสมกลับมาแยกใหม่ (Recycle) พบว่าทั้งสองระบบสามารถเพิ่มประสิทธิผลในการแยกของผสมได้ดีขึ้น

การศึกษาครั้งนี้ มีแนวคิดที่จะพัฒนาชุดทดลองไฮโดรไซโคลนที่ต่อแบบอนุกรมสำหรับแยกของแข็งออกจากของเหลวให้มีประสิทธิภาพในด้านการแยกอนุภาคดียิ่งขึ้นกว่าการใช้ไฮโดรไซโคลนเพียงตัวเดียว โดยมีตัวแปรสำคัญในการศึกษาคือ อัตราการไหลของของไหล ขนาดของอนุภาค และร้อยละของปริมาณอนุภาคในของผสม

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

ขนาดของไฮโดรไซโคลน

Figure 1 แสดงลักษณะโครงสร้างของไฮโดรไซโคลนสำหรับไฮโดรไซโคลนที่ใช้สำหรับทดลองการแยกของแข็งออกจากของเหลวนั้นได้ออกแบบโดยใช้สัดส่วนตามงานวิจัยของ Wongsarivej et al.[7] โดยมีความสัมพันธ์ตามอัตราส่วนในการออกแบบและรูปแบบของไฮโดรไซโคลนดังแสดงใน Table 1 และFigure 2

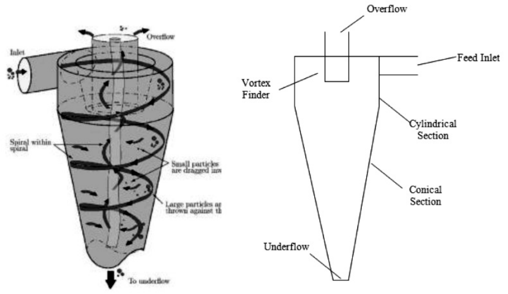

Figure 1 Structure of hydrocyclone

Table 1 Hydrocyclone proportion followed by Wongsarivej et al.[7]

D_i/D_c	D_o/D_c	D_u/D_c	l/D_c	L/D_c	Cone angle degree
0.2	0.16	0.2	1.0	7.68	7.68

D_c คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน
D_i คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า
D_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านบน
D_u คือ เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง
L คือ ความยาวของไฮโดรไซโคลน
l คือ ความยาวของทางออกด้านบนไฮโดรไซโคลน

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นซิลิก้าผงที่ใช้แทนอนุภาคของของแข็ง งานวิจัยนี้ใช้ซิลิก้าในการทดลองทั้งหมด 3 ชนิด คือ FB-12D, FB-8S และ FB-5D ซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่ กลาง และเล็ก ตามลำดับ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับงานวิจัยได้แก่ ไฮโดรไซโคลนขนาด 40 มม. จำนวน 2 ชุด ดังแสดงใน Figure 3 ซึ่งมีส่วนประกอบ คือ ปั๊ม อินเวอร์เตอร์ใช้ปรับอัตราการไหลของปั๊ม เกจวัดความดัน ท่อ PVC ขนาด 1 นิ้ว เกจวาล์วและบอลวาล์ว ขนาด 1 นิ้ว โครงสร้างสำหรับติดตั้งและอุปกรณ์อื่น ๆ ได้แก่ ถังอะคริลิก ใบพัดกวนสาร นาฬิกาจับ

เวลา ชุดหล่อเย็น ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ กระบอกตวงขนาด 100, 500 และ 1,000 ลบ.ซม.

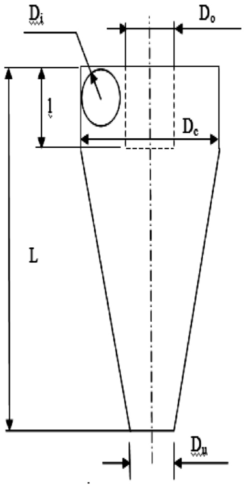

Figure 2 Hydrocyclone proportions

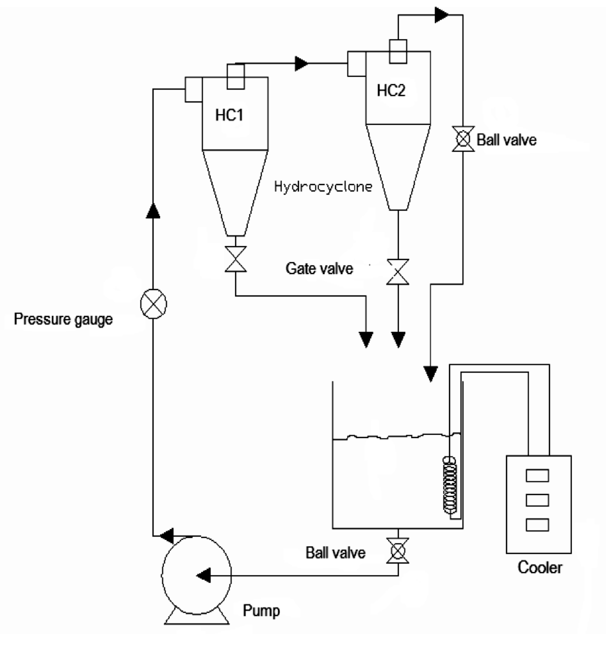

Figure 3 Flow diagram of tested hydrocyclone connected in series

ทำการวัดการกระจายขนาดของอนุภาคทั้ง 3 ขนาด และทำการวัดการกระจายขนาดอนุภาคอีกครั้งหลังการแยกด้วยไฮโดรไซโคลน โดยวัดขนาดและน้ำหนักของอนุภาคทั้งในส่วนที่ออกทางด้านบนและส่วนที่ออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 ตัว การหาน้ำหนักของอนุภาคทำได้โดยวิธีการระเหยน้ำออกและชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำข้อมูลของน้ำหนักและการกระจายขนาดอนุภาคที่ได้มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยก ศึกษาผลของอัตราการไหล ศึกษาผลของขนาดอนุภาค และผลของร้อยละของปริมาณอนุภาคที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยก

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่าง

การกระจายตัวของอนุภาคแสดงให้เห็นถึงขนาดของอนุภาคขนาดต่างๆที่แขวนลอยอยู่ในของเหลว โดยการวัดการกระจายขนาดอนุภาคนั้นจะใช้เครื่องวัดการกระจายอนุภาค Mastersizer 2000 ซึ่งในการวัดนี้ต้องทราบค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง (Refractive index) ด้วยจึงจะได้ผลการวัดที่แม่นยำและถูกต้อง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าเท่ากับ 1.5014 จากผลการวัดขนาดอนุภาค อนุภาคทั้ง 3 ตัวอย่างมีความแตกต่างในด้านของขนาดดังแสดงใน Figure 4

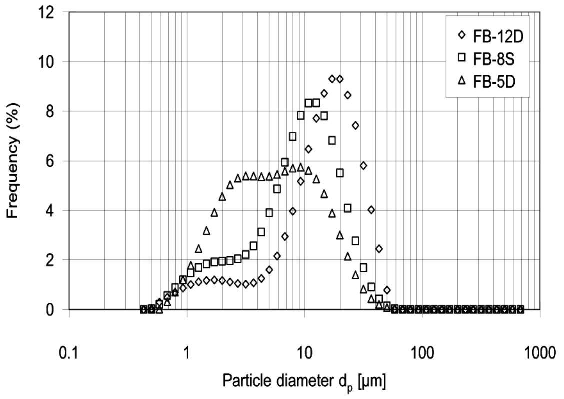

Figure 4 Particle size distribution of feed silica

อนุภาคทั้ง 3 ขนาด มีการกระจายตัวของอนุภาคและความถี่สูงสุดแตกต่างกัน โดยขนาดเฉลี่ย (mean) ของอนุภาค FB-12D, FB-8S และ FB-5D มีค่าเท่ากับ 14.029, 8.705, และ 5.518 ไมโครเมตร ตามลำดับ และมีค่าความถี่สูงสุด (mode) ของอนุภาค FB-12D, FB-8S และ FB-5D เท่ากับ 20.0, 12.61 และ 9.28 ไมโครเมตร ตามลำดับ ขนาดของอนุภาคที่ผสมกันอยู่จะสามารถแยกออกจากกันได้โดยใช้ไฮโดรไซโคลน ขนาดของอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะไหลออกทางด้านบนของไฮโดรไซโคลนชุดที่ 2 ส่วนขนาดของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าจะออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลนชุดที่ 1 และ 2

การกระจายขนาดอนุภาคเมื่อผ่านการแยกด้วยไฮโดรไซโคลน

Figure 5 แสดงผลของการกระจายขนาดของอนุภาคในแต่ละส่วนที่ผ่านการแยกด้วยไฮโดรไซโคลน โดยทำการทดลองที่อัตราการไหล 1 ลบม./ชม. ปริมาณของอนุภาคร้อยละ 0.5 และใช้อนุภาคขนาด FB-8S จากผลการวัดการกระจายขนาดอนุภาคพบว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะแยกตัวออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลนตัวที่ 1 ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะแยกออกทางด้านบนของไฮโดรไซโคลนชุดที่ 1 แล้วถูกแยกต่อไปในไฮโดรไซโคลนตัวที่ 2 อนุภาคที่มีขนาดใหญ่

ที่ผ่านการแยกของไฮโดรไซโคลนตัวที่ 2 จะแยกตัวออกทางด้านล่างส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะแยกตัวออกทางด้านบนของไฮโดรไซโคลนตัวที่ 2 ค่าความถี่สูงสุดของอนุภาคที่แยกออกทางด้านบนและด้านล่างของไฮโดรไซโคลนตัวที่ 1 มีขนาด 4.31 และ 12.62 ไมโครเมตร และ ค่าความถี่สูงสุดของอนุภาคที่แยกออกทางด้านบนและด้านล่างของไฮโดรไซโคลนตัวที่ 2 มีขนาด 3.70 และ 5.86 ไมโครเมตร ตามลำดับ

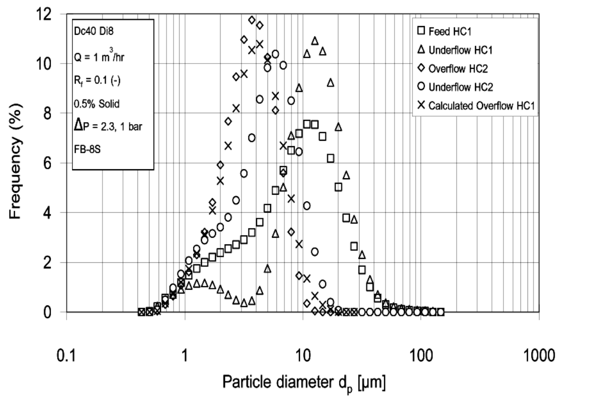

Figure 5 Particle size distribution of FB-8S after separating by hydrocyclone

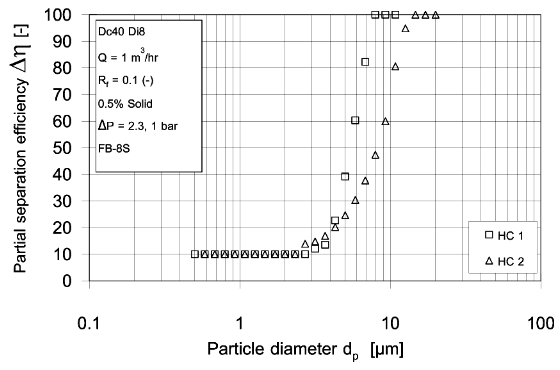

Figure 6 Separation efficiency of both hydrocyclones

Figure 6 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลนทั้งสองตัว จะเห็นได้ว่าไฮโดรไซโคลนตัวที่ 1 มีประสิทธิภาพการแยกอนุภาคได้ดีกว่าไฮโดรไซโคลนตัวที่ 2 โดยมีค่า cut size, d_{50} ที่ 5.5 และ 8.0 ไมโครเมตร ตามลำดับ ไฮโดรไซโคลนตัวที่ 1 สามารถแยกอนุภาคขนาด 8 ไมโครเมตรได้ทั้งหมด ในขณะที่ไฮโดรไซโคลนตัวที่ 2 สามารถแยกอนุภาคขนาด 14 ไมโครเมตรได้ทั้งหมดเช่นเดียวกัน สาเหตุที่ประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลนตัวที่ 2 ต่ำกว่าไฮโดรไซโคลนตัวที่ 1 เนื่องจากความเร็วของของเหลวที่ไหลเข้าไฮโดรไซโคลนตัวที่ 2 มีความเร็วน้อยกว่าความเร็วแรกเริ่มที่ไหลเข้าไฮโดรไซโคลนตัวที่ 1 เมื่อของเหลวไหลผ่านไฮโดรไซโคลนตัวแรกจะเกิดแรงเสียดทานหรือเกิดความดันลดซึ่งจะทำให้ความดันที่จะเข้าไฮโดรไซโคลนตัวที่ 2 มีค่าความดันลดน้อยลง ความดันที่น้อยลงนี้จะทำให้เกิดแรงเหวี่ยงแยกที่น้อยลง ดังนั้นในการออกแบบขนาดไฮโดรไซโคลนที่จะนำมาต่อแบบอนุกรมกันจำเป็นต้องคำนึงถึงความเร็วที่จะเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนตัวที่ 2 ด้วย

ผลของอัตราการไหลที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค

ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค นอกจากรูปแบบของไฮโดรไซโคลนที่ออกแบบแล้ว อัตราการไหลของของเหลวที่ไหลเข้าไฮโดรไซโคลนก็เป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญและส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค

จากการทดลองเปรียบเทียบอัตราการไหลเมื่อทดลองด้วยอนุภาค FB-8S พบว่าที่อัตราการไหล 1.25, 1.00 และ 0.75 ลบม./ชม. ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนชุดที่ 1 มีค่าร้อยละ 82, 68 และ 66 ตามลำดับ ในขณะที่ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนชุดที่ 2 มีค่าร้อยละ 26.13, 23.96 และ 22.39 ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 7 สำหรับไฮโดรไซโคลนตัวที่ 1 เมื่ออัตราการไหลมีค่าสูงขึ้นประสิทธิภาพการแยกก็จะมีค่าสูงขึ้นด้วยเนื่องจากความเร็วของของเหลวที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดแรงเหวี่ยงแยกที่เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีไฮโดรไซโคลนตัวที่ 2 จะพบว่าเมื่ออัตราการไหลมีค่าสูงขึ้นประสิทธิภาพการแยกจะมีค่าน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราการไหลที่สูงอนุภาคจะถูกไฮโดรไซโคลนตัวที่ 1 แยกออกในปริมาณมากส่งผลให้เหลือปริมาณอนุภาคที่จะเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนตัวที่ 2 มีปริมาณน้อยลง ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลที่ต่ำกว่าจึงแสดงค่าประสิทธิภาพการแยกที่น้อยกว่า

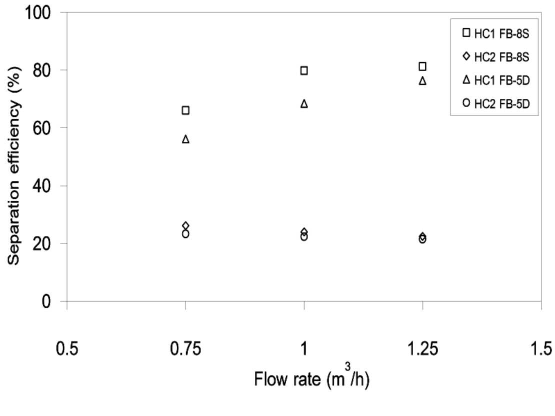

Figure 7 Effect of flow rate on separation efficiency

ในทำนองเดียวกันเมื่อทำการทดลองโดยใช้อนุภาค FB-5D ก็จะได้ผลของประสิทธิการแยกเช่นเดียวกับผลของอนุภาค FB-8S ซึ่งเป็นการยืนยันผลการทดลองอีกครั้งหนึ่ง

ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค

เมื่อนำอนุภาคของแข็งทั้ง 3 ขนาดมาทำการทดลองการแยกด้วยไฮโดรไซโคลนที่อัตราการไหล 1.0 ลบม./ชม. พบว่าอนุภาคชนิด FB-12D, FB-8S และ FB-5D เมื่อทำการแยกผ่านไฮโดรไซโคลนตัวที่ 1 จะมีค่าประสิทธิภาพการแยกร้อยละ 85.65, 77.30 และ 64.47 ตามลำดับ และเมื่อทำการแยกผ่านไฮโดรไซโคลนตัวที่ 2 จะมีค่าประสิทธิภาพการแยกร้อยละ 25.26, 21.19 และ 20.01 ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 8 จะสังเกตได้ว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคจะทำได้ดีกว่าการแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะได้รับแรงที่กระทำต่ออนุภาคมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ด้วยเหตุนี้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะแยกได้ง่ายกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก นอกจากนี้หากทำการเปรียบเทียบผลของขนาดอนุภาคที่ได้จากการทดลองที่อัตราการไหลต่างๆ ในรูปที่ 7 ก็จะได้ผลของขนาดอนุภาคในทิศทางเดียวกันอีกด้วย

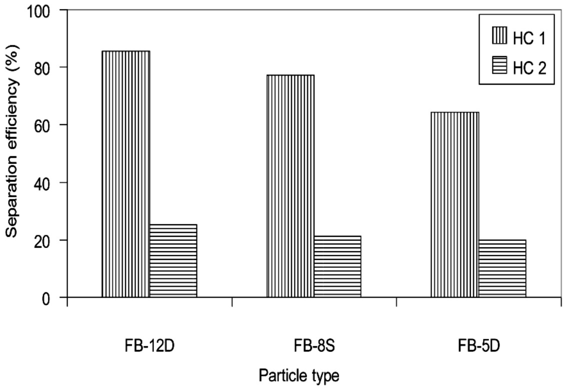

Figure 8 Effect of particle size on separation efficiency

ผลของปริมาณอนุภาคที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค

Figure 9 แสดงผลของปริมาณอนุภาคที่มีต่อประสิทธิภาพการแยก พบว่าที่ปริมาณของอนุภาคต่ำจะให้ค่าประสิทธิภาพการแยกต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณอนุภาคที่สูงขึ้น เนื่องจากในกรณีที่อนุภาคมีปริมาณน้อย ผลของการตกค้างหรือสะสมของอนุภาคในระบบจะมีอิทธิพลสูงกว่าในกรณีที่อนุภาคมีปริมาณมาก ทำให้มีอนุภาคเหลือในการคัดแยกที่น้อยกว่า เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคในระบบให้มีปริมาณเพิ่มขึ้นจะส่งผลในการตกค้างหรือสะสมของอนุภาคในระบบด้วยเช่นกันแต่ยังคงเหลืออนุภาคสำหรับการแยกมากพอในระบบ เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลนตัวที่ 1 และ 2 พบว่าให้ผลเช่นเดียวกัน กล่าวคือประสิทธิภาพการแยกจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณอนุภาคมีค่าสูงขึ้น

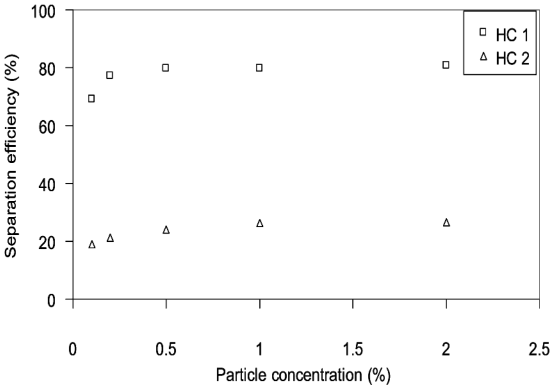

Figure 9 Effect of particle concentration on separation efficiency

สรุป

ปัจจัยอื่นๆ นอกเหนือจากรูปร่างและขนาดของไฮโดรไซโคลนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกได้แก่อัตราการไหล ขนาดและปริมาณของอนุภาค อัตราการไหลที่สูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการแยกเพิ่มขึ้นในไฮโดรไซโคลนตัวที่ 1 แต่จะลดลงในไฮโดรไซโคลนตัวที่ 2 อนุภาคที่มีขนาดใหญ่สามารถแยกได้ง่ายกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกสูงขึ้นตามไปด้วย ปริมาณอนุภาคที่มากกว่ามีผลทำให้ประสิทธิภาพการแยกมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากลดผลกระทบจากการตกค้างหรือสะสมในระบบ ดังนั้นในการใช้งานและออกแบบไฮโดรไซโคลนจึงควรให้ความระมัดระวังและรอบคอบต่อปัจจัยเหล่านี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

1. สมรัตน์ มโนรส, มนู ภู่พานิชเจริญกุล. การออกแบบไฮโดรไซโคลนขนาดเล็กมาก. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2538.
2. Martinez LF, Lavin AG, Mahamud MM, Bueno JL. Vortex finder optimum length in hydrocyclone separation. Chemical Engineering and Processing Journal. 2008;47:192-199.
3. Saengchan K. Effect of apex diameter on thetapioca starch efficiency of the hydrocyclone. Master of engineering thesis. Food engineering program. Faculty of engineering. King Mongkut's University of Technology Thonburi. 2005;1-50.
4. อภิชัย เทิดเทียนวงษ์. ไฮโดรไซโคลนกับการแยกอนุภาคและคัดขนาด. วิศวกรรมสาร. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2540;25(2):77-93.

5. Kraipech W. Study of the performance of industrial hydrocyclones. Ph.D.Thesis. UMIST. England. (2002).
6. Svarovsky L. Efficiency of separation of particles from fluids. In: Solid-liquid Separation. third ed. Butterworths. London(Chapter 3). 1990.
7. Wongsarivej P. Tanthapanichakoon W. Yoshida H.Classification of silica fine particles using a novel electric hydrocyclone. Science and Technology of Advanced Materials. 2005;6:364-369.