

ผลของความยาววอร์เท็กไฟเดอ์และแบบจำลองการถดถอยของอัตราส่วนการไหลของน้ำกับความยาวทรงกระบอกและความยาวกรวยของไฮโดรไซโคลน

สัจฉิตา รัตนพันธุ์¹ ธนิต สวัสดิ์เสวี²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

พิชัย สร้อยสน³ และ ประธาน วงศ์ศรีเวช⁴

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาสัดส่วนความยาวของวอร์เท็กไฟเดอ์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกโดยใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มม. ทำการศึกษาผลของความยาววอร์เท็กไฟเดอ์ขนาด 24 32 และ 40 มม. สารผสมที่ใช้ในการทดลอง คือ ฟงซิลิกาผสมน้ำที่มีขนาดเฉลี่ย 9 ถึง 10 ไมโครเมตร ที่ความเข้มข้นของของแข็ง 0.5 % w/v ใช้อัตราการไหลเข้า 1 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อัตราส่วนการไหลเท่ากับ 0.1 จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการแยกสูงขึ้นเมื่อความยาวของวอร์เท็กไฟเดอ์ยาวขึ้นที่ความยาววอร์เท็กไฟเดอ์ 40 มม. ความยาวทรงกระบอก 60 มม. และความยาวกรวย 200 มม. ให้ประสิทธิภาพการแยกดีที่สุดถึงร้อยละ 84.06 ส่วนที่สองของงานวิจัยเป็นการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายอัตราส่วนการไหลของน้ำจากความยาวทรงกระบอกและความยาวกรวย โดยนำข้อมูลจากการทดลองในส่วนแรกพร้อมกับข้อมูลของงานวิจัยก่อนหน้าทั้งหมด 75 การทดลอง เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของไฮโดรไซโคลนกับอัตราส่วนการไหลของน้ำ ด้วยวิธีสมการถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ สามารถหาค่าคงที่ $k_1 = 2.14 \times 10^{14}$ และสัมประสิทธิ์การถดถอย n_2, n_3, n_4 และ n_5 เท่ากับ 0.983, 1.167, 2.248 และ -2.993 ตามลำดับ

คำสำคัญ : ความยาววอร์เท็กไฟเดอ์ / แบบจำลองการถดถอย / อัตราส่วนการไหลของน้ำ / ไฮโดรไซโคลน

* Corresponding author : E-mail: pratarn@nanotec.or.th, Tel: +66 2 1176564, Fax: +66 2 1176702

1 นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

2 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

3 ผู้ช่วยวิจัย ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

4 นักวิจัย ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

Effect of Vortex Finder Length and Regression Model of Water Flow Ratio as Correlated with Cylindrical and Conical Lengths of a Hydrocyclone

Santita Rattanaphan¹ Thanit Swasdisevi²

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkhru, Bangkok 10140

Pichai Soison³ and Pratarn Wongsarivej^{4*}

National Nanotechnology Center, National Science and Technology Development Agency, Pathumthani 12120

Abstract

This research was divided in two parts. The first part was the study of the effect of the proportion of vortex finder length on the separation efficiency of a 40-mm hydrocyclone. The effects of vortex finder lengths of 24, 32 and 40 mm were investigated. The test suspension was a mixture of silica and water. The silica particles had an average size of 9 to 10 micrometer at a solids concentration of 0.5% w/v. The feed flow rate of 1 m³/h was used at a flow ratio of 0.1. It was found that the longer the vortex finder length, the higher separation efficiency. A vortex finder length of 40 mm, cylindrical length of 60 mm and cone length of 200 mm resulted in the best separation efficiency up to 84.06 percent. The second part of the study involved the construction of a model to predict the water flow ratio from the cylindrical and conical lengths of a hydrocyclone. The data obtained from the experiments in the first part and the data of an earlier research, 75 data sets in total, were used to construct a relationship between the proportion of hydrocyclone and the water flow ratio. By using multiple linear regression method, it was found that the constants, k_1 was 2.14×10^{14} and the regression coefficient, n_2, n_3, n_4 and n_5 were 0.983, 1.167, 2.248 and -2.993, respectively.

Keywords : Vortex finder length / Regression model / Water flow ratio / Hydrocyclone

* Corresponding author : E-mail: pratarn@nanotec.or.th, Tel: 66 2 1176564, Fax: +66 2 1176702

¹ Master of Engineering Student, Department of Energy Technology, Faculty of Energy Environment and Materials.

² Assistant Professor, Department of Thermal Technology, Faculty of Energy Environment and Materials.

³ Assistant Researcher, National Nanotechnology Center, National Science and Technology Development Agency.

⁴ Researcher, National Nanotechnology Center, National Science and Technology Development Agency.

1. บทนำ

ไฮโดรโซโคลนเป็นอุปกรณ์ประสิทธิภาพสูงที่ถูกออกแบบให้ใช้งานกับของเหลวโดยเฉพาะ ส่วนใหญ่นำไปใช้ในกระบวนการแยกของแข็งออกจากของเหลว สามารถใช้แยกอนุภาคได้สะดวกและรวดเร็ว โดยสามารถแยกของแข็งที่มีความละเอียดระดับไมโครเมตรได้ หลักในการแยกสารอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นหรือขนาดของสารที่เคลื่อนที่ด้วยแรงเหวี่ยงร่วมกับการออกแบบรูปร่างของไฮโดรโซโคลนที่เหมาะสม

เนื่องจากไฮโดรโซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับของเหลว การออกแบบไฮโดรโซโคลนจึงต้องคำนึงถึงกลไกการเคลื่อนที่ของของไหล จากการศึกษาการทำงานของไฮโดรโซโคลนพบว่าสัดส่วนของไฮโดรโซโคลนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยก ดังนั้นการออกแบบสัดส่วนไฮโดรโซโคลนที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งที่ส่งผลต่อกลไกการไหลของสารผสมภายในไฮโดรโซโคลน หนึ่งในส่วนประกอบของไฮโดรโซโคลนที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของสารผสมที่ถูกแยกคือ รัศมีวอร์เท็กซ์ไฟนเดอร์ (Vortex finder length, l) ซึ่งวอร์เท็กซ์ไฟนเดอร์เป็นท่อที่ต่อยื่นลงมาจากทางออกด้านบนของไฮโดรโซโคลน สัดส่วนที่เหมาะสมของวอร์เท็กซ์ไฟนเดอร์จะช่วยลดปรากฏการณ์การไหลลัดวงจร (Short circuit) ของสารผสมได้ ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการแยกเพิ่มขึ้น

ในอดีตมีผู้ศึกษาสัดส่วนของไฮโดรโซโคลนมาบ้างแล้ว คือ Martínez et al. [1, 2] ทำการวิจัยโดยแยก CaCO_3 ออกจากน้ำ พบว่าอัตราส่วน $l/L = 0.1$ ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการแยกสูงสุด และอัตราส่วน $l/L = 0.2$ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกต่ำที่สุด ซึ่งผู้วิจัยได้ให้เหตุผลว่าระยะที่เหมาะสมของวอร์เท็กซ์ไฟนเดอร์คือจะต้องทำให้มีโอกาสเกิดปรากฏการณ์การไหลลัดวงจรของสารผสมให้น้อยที่สุด ต่อมา Chu et al. [3] ได้ศึกษาผลกระทบของสัดส่วนทรงกระบอกของไฮโดรโซโคลน พบว่าการเพิ่มความยาวของทรงกระบอกเป็น $2.0D_c$ จะให้ประสิทธิภาพการแยกมีค่าสูงสุดซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Jun et al. [4] กล่าวคือที่ระยะทรงกระบอก $0.4D_c$ และ $2.0D_c$ จะให้ค่าขนาดตัด (Cut size) เล็กที่สุด

ในส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสมการสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำมาใช้ทำนายผลการทดลองที่เงื่อนไขอื่นๆ ได้ ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยของ Orrasin et al. [5] ทำการศึกษาแบบจำลองการถดถอยความดันลดของไฮโดรโซโคลนชนิดของแข็ง-ของเหลว ขนาด 50 มม. ด้วยวิธีสมการถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับสมการถดถอยของอัตราส่วนการไหลของน้ำของไฮโดรโซโคลนได้อธิบายไว้ในส่วนของทฤษฎี

2. วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อศึกษาผลกระทบของความยาววอร์เท็กซ์ไฟนเดอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกในการแยกอนุภาคซิลิกา ออกจากน้ำโดยใช้ไฮโดรโซโคลน และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าอัตราส่วนการไหลของน้ำกับสัดส่วนของไฮโดรโซโคลน ผลที่ได้จากงานวิจัยสามารถใช้ต่อยอดเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของไฮโดรโซโคลนอื่นๆ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการออกแบบ และการขยายขนาดไฮโดรโซโคลนในงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ต่อไปในอนาคต

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ประสิทธิภาพการแยก

ประสิทธิภาพการแยกคือ อัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคของแข็งที่แยกออกมาได้ทางด้านล่างของไฮโดรโซโคลนต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคของแข็งที่ผ่านท่อทางเข้า ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (1) [6]

$$E = \frac{m_{u,s}}{m_{f,s}} \quad (1)$$

สำหรับความหมายของตัวแปรต่างๆ ในสมการให้ดูตารางสัญลักษณ์ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงรายการสัญลักษณ์

C_v	ความเข้มข้นของสารผสมที่ทางเข้า (%)
C_{vu}	ความเข้มข้นของสารผสมที่ท่อทางออกด้านล่าง (%)
D_c	เส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone diameter)
D_i	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า (Inlet diameter)
D_o	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านบน (Overflow diameter)
D_u	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (Underflow diameter)
E	ประสิทธิภาพการแยก (Separation efficiency)
h	ความสูงอิสระ ($L-l$)
K	ค่าคงที่
k	จำนวนตัวแปรอิสระ
k_1	ค่าคงที่
L	ความยาวทั้งหมดของไฮโดรไซโคลน (Total length)
L_1	ความยาวทรงกระบอก (Cylindrical length)
L_2	ความยาวทรงกรวย (Conical length)
l	ความยาวท่อวอร์เท็กซ์ไฟนด์ (Vortex finder length)
MSE	ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean square error)
$m_{f,s}$	อัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคของแข็งที่ผ่านท่อทางเข้า (Feed)
$m_{u,s}$	อัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคของแข็งที่ถูกแยกผ่านทางด้านล่าง (Underflow)
$n_1 - n_k$	สัมประสิทธิ์การถดถอย
z	จำนวนชุดข้อมูล
Q_f	อัตราการไหลที่ท่อทางเข้า
Q_u	อัตราการไหลที่ท่อทางออกด้านล่าง
R_w	อัตราส่วนการไหลของน้ำ
R^2	สัมประสิทธิ์ของการกำหนด (Coefficient of determination)
SSE	Sum Square error
SSR	Regression sum of square
SST	Total sum square
$X_1 - X_k$	ตัวแปรอิสระ
X_{ki}	ค่าของตัวแปรตัวที่ k ใดๆ ซึ่งอยู่ในชุดข้อมูลชุดที่ i
Y	ตัวแปรตาม
Y_i	ค่าของตัวแปรซึ่งอยู่ในข้อมูลชุดที่ i ใดๆ
\bar{Y}	ค่าเฉลี่ยของ Y
\hat{Y}	ค่าของตัวแปรตามที่ประมาณได้จากสมการถดถอยเส้นตรงพหุคูณ
θ	มุมทรงกรวยของไฮโดรไซโคลน

3.2 อัตราส่วนการไหลของน้ำ

อัตราส่วนการไหลของน้ำ (Water flow ratio, R_w) ถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการพิจารณาประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลน โดยอัตราส่วนการไหลของน้ำจะหมายถึงปริมาณน้ำที่ไหลออกจากด้านล่างของไฮโดรไซโคลนต่อปริมาณน้ำที่ทางเข้า ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$R_w = \frac{Q_u(1-C_{vu})}{Q_f(1-C_v)} \quad (2)$$

Svarovsky [7] ได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการไหลของน้ำโดยใช้ไฮโดรไซโคลนของ Rietema ดังแสดงในสมการต่อไป

$$R_w = 1218 \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^{4.75} Eu^{-0.30} \quad (3)$$

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ในสมการที่ (3)

Constant	Hydrocyclone		
	Rietema	Bradley	Demco 4H
K	1218	1.21×10^6	0.127
m_1	4.75	2.63	0.78
m_2	-0.30	-1.12	0.00

สมการที่ (4) สามารถใช้สำหรับกรณีไฮโดรไซโคลนมีขนาดและสัดส่วนที่ต่างกันได้ ซึ่งถือเป็นข้อได้เปรียบและพัฒนาขอบเขตการใช้งานให้กว้างขึ้นกว่าสมการที่ (3)

3.3 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์และการถดถอย

ในการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม บ่อยครั้งที่จำนวนตัวแปรอิสระที่สนใจในการศึกษามีมากกว่า 1 ตัวแปร ถ้ากำหนดให้ Y เป็นตัวแปรตาม และ X_1, X_2, \dots, X_k เป็นตัวแปรอิสระจำนวน k ตัวแปร เราสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้ด้วยสมการถดถอย (Regression equation) ซึ่งนอกจากจะทำให้ทราบรูปแบบของความสัมพันธ์แล้วยังสามารถทำนายค่าของตัวแปรตามหากทราบค่าของตัวแปรอิสระได้อีกด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง

ต่อมา Autunes and Medronho [8] และ Azevedo et al. [9] ได้ทำการศึกษาและทดลองโดยใช้ไฮโดรไซโคลนของ Bradley และ Demco 4H โดยสรุปค่าคงที่ของสมการที่ (3) แสดงได้ดังตารางที่ 2 แต่สมการที่ (3) มีข้อจำกัดคือสามารถใช้ทำนายได้เฉพาะไฮโดรไซโคลนที่มีสัดส่วนเดียวกันเท่านั้น หลังจากนั้น Coelho and Medronho [10] ได้นำข้อมูลของไฮโดรไซโคลนของ Rietema Bradley และ Demco 4H มาประยุกต์กับไฮโดรไซโคลนที่มีสัดส่วนและขนาดต่างกันทั้งหมด 160 การทดลอง โดยสามารถแสดงสมการสหสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$R_w = 1.18 \left(\frac{D_c}{D_o} \right)^{5.97} \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^{3.10} Eu^{-0.54} \quad (4)$$

ตัวแปรตาม Y กับตัวแปรอิสระ X ที่มากกว่า 1 ตัวขึ้นไป โดยเลือกใช้วิธีสมการถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ (Multiple linear regressions) เนื่องจากมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริง การเพิ่มตัวแปรอิสระที่เกี่ยวข้องเข้าในการวิเคราะห์จะส่งผลให้สัมประสิทธิ์ของการกำหนด (Coefficient of determination, R^2) เพิ่มสูงขึ้นและค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean square error, MSE) มีค่าลดลง ซึ่งสมการทั่วไปสามารถเขียนได้อยู่ในรูป

$$Y = a_o + n_1 X_1 + n_2 X_2 + \dots + n_k X_k \quad (5)$$

ในการเลือกชุดตัวแปรอิสระที่เหมาะสมของสมการ ให้พิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยก่อนโดยเลือกค่าน้อยที่สุด และต่อมาให้พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนด โดยเลือกค่าที่มากที่สุดหรือค่าที่ใกล้เคียงค่าสูงสุด โดยที่

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \tag{6}$$

$$SSR = \sum (\hat{Y} - \bar{Y})^2 \tag{7}$$

$$SST = \sum (Y - \bar{Y})^2 \tag{8}$$

$$SSE = SST - SSR \tag{9}$$

$$MSE = \frac{SSE}{n - k - 1} \tag{10}$$

$$\begin{bmatrix} z & \sum_{i=1}^n X_{1i} & \sum_{i=1}^n X_{2i} & \dots & \sum_{i=1}^n X_{ki} \\ \sum_{i=1}^n X_{1i} & \sum_{i=1}^n X_{1i}X_{1i} & \sum_{i=1}^n X_{1i}X_{2i} & \dots & \sum_{i=1}^n X_{1i}X_{ki} \\ \sum_{i=1}^n X_{2i} & \sum_{i=1}^n X_{1i}X_{2i} & \sum_{i=1}^n X_{2i}X_{2i} & \dots & \sum_{i=1}^n X_{2i}X_{ki} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n X_{ki} & \sum_{i=1}^n X_{1i}X_{ki} & \sum_{i=1}^n X_{2i}X_{ki} & \dots & \sum_{i=1}^n X_{ki}X_{ki} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n Y_i \\ \sum_{i=1}^n X_{1i}Y_i \\ \sum_{i=1}^n X_{2i}Y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n X_{ki}Y_i \end{bmatrix} \tag{13}$$

จากนั้นนำค่าที่ได้แทนกลับเข้าไปในสมการที่ (11) จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์อยู่ในรูปสมการกำลัง

3.4 การสร้างสมการถดถอย

เนื่องจากต้องการสร้างสมการอัตราส่วนการไหลของน้ำให้อยู่ในรูปของสมการกำลัง ซึ่งแสดงสมการได้ดังนี้

$$Y = k_1 X_1^{n_1} X_2^{n_2} \dots X_k^{n_k} \tag{11}$$

แต่รูปแบบของสมการถดถอยพหุคูณเส้นตรงมีรูปแบบตามสมการที่ (5) ซึ่งทั้งสองสมการมีรูปแบบไม่เหมือนกัน ดังนั้นจึงต้องแปลงรูปสมการที่ (11) ให้อยู่ในรูปแบบสมการที่ (5) โดยการประยุกต์ลอการิทึมธรรมชาติ (Natural logarithm) ในสมการที่ (11) จะได้สมการดังนี้

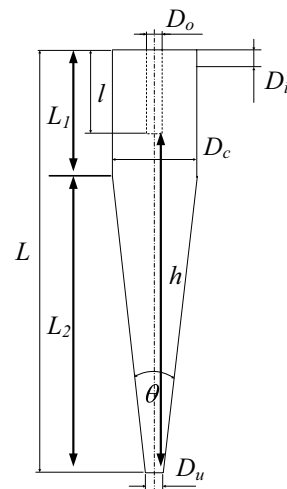
$$\ln(Y) = \ln(k_1) + n_1 \ln(X_1) + n_2 \ln(X_2) + \dots + n_k \ln(X_k) \tag{12}$$

สำหรับการหาค่าคงที่ k_1 และสัมประสิทธิ์การถดถอย $n_1 - n_k$ ในสมการที่ (12) จะสามารถหาได้โดยการแก้สมการที่ (13) แล้วทำการเทียบสัมประสิทธิ์จาก

4. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

4.1 อุปกรณ์

ไฮโดรโซโคลนชนิดที่ใช้ในการทดลองแยกซิลิกาออกจากน้ำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มม. ออกแบบตามสัดส่วนของ Wongsarivej et al. [11] ดังแสดงสัดส่วนขนาดต่างๆ ตามรูปที่ 1 และอัตราส่วนต่างๆ ตามตารางที่ 3 และ 4



รูปที่ 1 สัดส่วนขนาดต่างๆ ของไฮโดรโซโคลน

ตารางที่ 3 อัตราส่วนขนาดต่างๆ ของไฮโดรไซโคลน

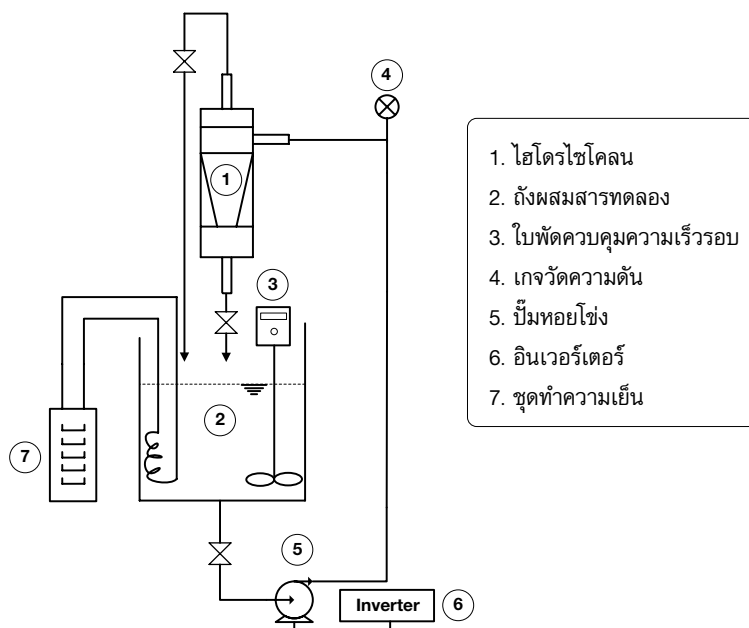
D_f/D_c	D_o/D_c	D_w/D_c	l/D_c	L/D_c	Cone angle (°)
0.14	0.19	0.09	0.80	8.00	8.136

ตารางที่ 4 สัดส่วนความยาวของไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในงานวิจัย

Geometric	length (mm)		
Vortex finder (l)	24	32	40
Cylinder (L_1)	60	80	100
Cone (L_2)	200	240	280

วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นซิลิกาผงซึ่งใช้แทนอนุภาคของแข็งโดยมีขนาด $FB-8S$ ($9-10 \mu m$) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ไฮโดรไซโคลน บั้ม (NIKUNI 40KWD37Z) อินเวอร์เตอร์ใช้ปรับอัตราการไหลของบั้ม

(Mitsubishi FR-F720) เกจวัดความดันขนาด 6 บาร์-บอลวาล์ว โครงสร้างสำหรับติดตั้ง ถังอะคริลิก ใบพัดกวนสาร (IKA 20 RW Digital) นาฬิกาจับเวลา ชุดหล่อเย็นด้วยน้ำ และดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ ดังแสดงแผนภาพชุดทดลองในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพชุดทดลองไฮโดรไซโคลน

4.2 วิธีการทดลอง

4.2.1 ขั้นตอนการเตรียมสารผสม

เตรียมของเหลวผสมกับของแข็งใสในถังอะคริลิก โดยให้ความเข้มข้นสารแขวนลอยซิลิกาเข้าที่ 0.5% w/v สำหรับในการทดลองใช้น้ำปริมาณ 6 ลิตรต่อซิลิกาผง 30 กรัม

4.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

ติดตั้งไฮโดรไซโคลนและอุปกรณ์ต่างๆ จากนั้นเปิดปั๊มเริ่มการทำงานเพื่อดูดของเหลวผสมเข้าสู่ระบบควบคุมให้อัตราการไหลที่ทางเข้า 1 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ปรับค่าอัตราส่วนการไหลโดยการปรับวาล์วให้เท่ากับ 0.1 ทำการควบคุมอุณหภูมิของน้ำในถังให้คงที่ โดยแลกเปลี่ยนความร้อนกับชุดหล่อเย็น จากนั้นทำการทดลองเช่นเดิมโดยเปลี่ยนสัดส่วนไฮโดรไซโคลนให้เป็นขนาดต่างๆ

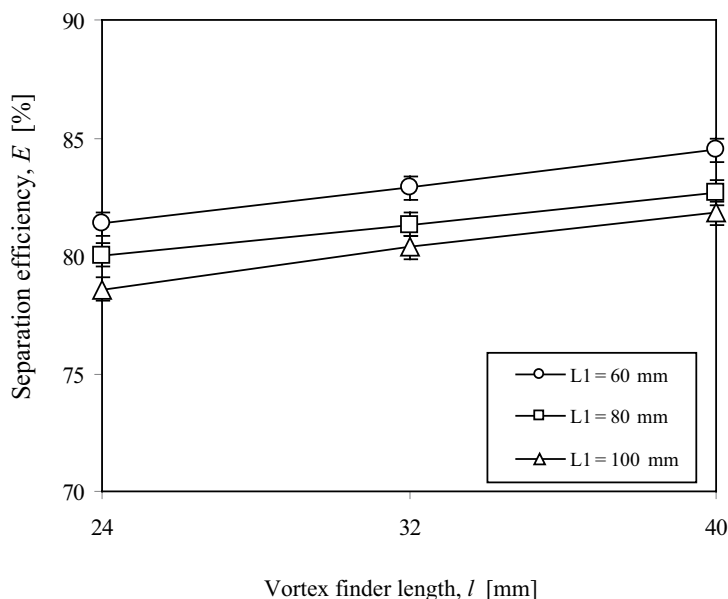
4.2.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

เก็บตัวอย่างการทดลอง 3 ส่วนด้วยกันคือ ของผสมที่ถูกแยกออกด้านบน (Overflow) ของผสมที่ถูกแยกออกด้านล่าง (Underflow) และสารที่ป้อนเข้า (Feed) นำสารผสมที่แยกออกได้มาตรวจวัดอนุภาคด้วยเครื่อง Mastersizer 2000 เพื่อวิเคราะห์และหาขนาดอนุภาคเพื่อใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพการแยกต่อไป ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อยสภาวะละ 3 ครั้งเพื่อความถูกต้องของข้อมูล จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อวิเคราะห์ผลต่อไป

5. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

5.1 เปรียบเทียบระยะวอร์เทกฟายเดอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยก

เมื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพการแยกซิลิกาออกจากน้ำโดยใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 40 มม. ที่อัตราการไหลทางเข้า 1 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ความเข้มข้นของซิลิกา 0.5 % w/v ควบคุมอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนการไหล 0.1 โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกที่ระยะวอร์เทกฟายเดอร์ต่างกัน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3

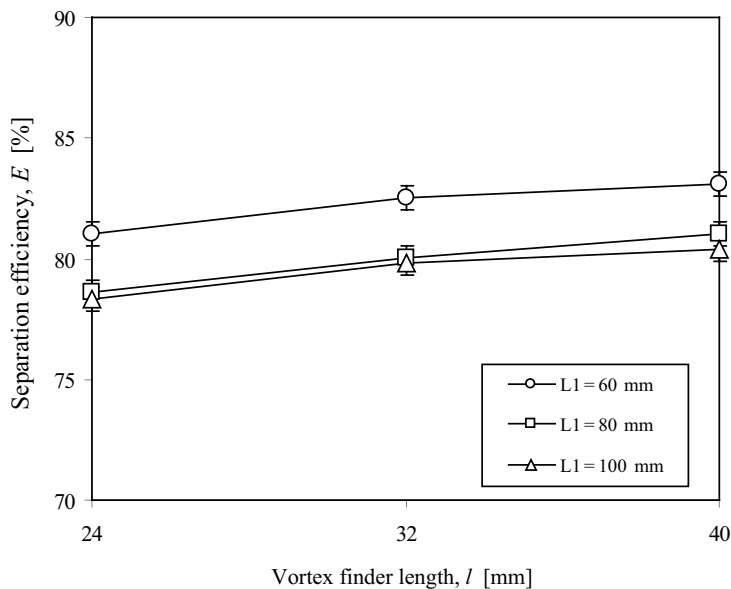


รูปที่ 3 ประสิทธิภาพการแยกที่ระยะวอร์เทกฟายเดอร์ต่างๆ ที่ความยาวทรงกระบอก (L1) 60 80 และ 100 มม. และความยาวกรวย 200 มม.

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อกำหนดให้ความยาวกรวยที่ 200 มม. โดยพิจารณาระยะวอร์เท็กซ์ไฟเดอร์ที่แตกต่างกัน 3 ระยะคือ 24 32 และ 40 มม. พบว่าประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลอนเมื่อวอร์เท็กซ์ไฟเดอร์ยาวขึ้นจะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย โดยระยะวอร์เท็กซ์ไฟเดอร์ที่ 40 มม. เป็นระยะที่ทำให้มีประสิทธิภาพการแยกสูงสุดเหมือนกันทั้ง 3 ระยะความยาวทรงกระบอก เมื่อเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยของ Martínez et al. [1,2] พบว่าผลการทดลองมีลักษณะที่คล้ายตามกันกล่าวคือ ความยาววอร์เท็กซ์ไฟเดอร์ที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกสูงควรมีปลายท่ออยู่ด้านล่างช่องทางเข้าเป็นระยะ 10 มม. แต่ไม่ควรใกล้กับกับรอยต่อระหว่างทรงกระบอกกับทรงกรวย

เนื่องจากมีความปั่นป่วนสูง ซึ่งส่งผลให้เกิดการไหลลัดวงจรของอนุภาคขนาดใหญ่ที่จะหลุดออกทางด้านบนได้ ซึ่งในการทดลองที่ระยะวอร์เท็กซ์ไฟเดอร์ 40 มม. ถือเป็นระยะที่มีความเหมาะสม กล่าวคือปลายท่อวอร์เท็กซ์ไฟเดอร์จะอยู่บริเวณครึ่งหนึ่งของความยาวทรงกระบอก ซึ่งมีความยาวมากพอที่จะหลีกเลี่ยงการหลุดออกของอนุภาคขนาดใหญ่ออกทางด้านบนได้ และไม่ยาวมากเกินไปจนยื่นลงไปในส่วนทรงกรวย

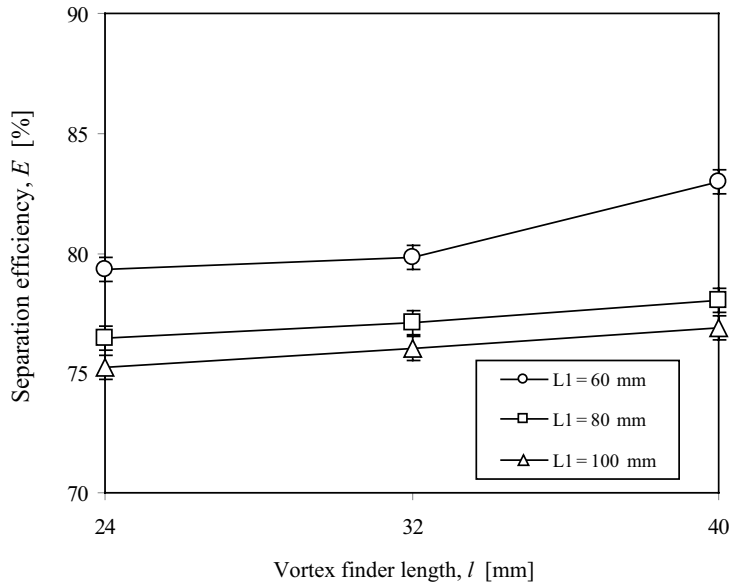
เมื่อเปรียบเทียบโดยกำหนดให้ความยาวกรวยที่ 240 มม. ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4 พบว่าผลการทดลองที่ได้มีลักษณะคล้ายตามรูปที่ 3 คือที่ระยะวอร์เท็กซ์ไฟเดอร์ 40 มม. ในทุกระยะความยาวทรงกระบอก ประสิทธิภาพการแยกจะมีค่าสูงสุดเช่นเดิม



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการแยกที่ระยะวอร์เท็กซ์ไฟเดอร์ต่างๆ ที่ความยาวทรงกระบอก ($L1$) 60 80 และ 100 มม. และความยาวกรวย 240 มม.

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกโดยกำหนดให้ความยาวกรวยที่ 280 มิลลิเมตร ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 5 พบว่าที่ระยะวอร์เท็กซ์พายเดอร์ 40 มม.

และความยาวทรงกระบอก 60 มม. ยังคงให้ประสิทธิภาพการแยกสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวทรงกระบอกทั้ง 3 ระยะ



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการแยกที่ระยะวอร์เท็กซ์พายเดอร์ต่างๆ ที่ความยาวทรงกระบอก (L1) 60 80 และ 100 มม. และความยาวกรวย 280 มม.

จากผลการทดลองทั้ง 3 รูปแสดงให้เห็นชัดเจนว่าแม้ความยาวกรวยจะเปลี่ยนแปลงก็ตามระยะวอร์เท็กซ์พายเดอร์ที่เหมาะสมก็ยังคงเป็น 40 มม. ซึ่งเป็นระยะที่ปลายท่ออยู่บริเวณช่วงกึ่งกลางของทรงกระบอก

5.2 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์และการถดถอยของอัตราส่วนการไหลของน้ำกับสัดส่วนต่างๆ ของไฮโดร-ไซโคลอน

ระเบียบวิธีนี้จะทำการสร้างสมการถดถอยโดยการเพิ่มตัวแปรอิสระเข้ามาในสมการที่ละตัวจนครบ

ทุกตัว ดังนั้นรูปแบบของสมการที่เป็นไปได้ทั้งหมดคือ 2^k ในงานวิจัยนี้มีตัวแปรอิสระ 5 ตัวที่สัมพันธ์กับอัตราส่วนการไหลของน้ำคือ $\frac{D_c}{L-l}, \frac{D_c}{L_1}, \frac{D_c}{L_2}, \frac{D_u}{D_c}$ และ Eu ดังนั้นมีรูปแบบของสมการทั้งหมด 25 รวมเป็น 32 กรณีที่สามารถเป็นไปได้ ดังแสดงในตารางที่ 5 และสามารถเขียนอยู่ในสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$R_w = k_1 \left(\frac{D_c}{l-l} \right)^{n_1} \left(\frac{D_c}{L_1} \right)^{n_2} \left(\frac{D_c}{L_2} \right)^{n_3} \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^{n_4} Eu^{n_5} \quad (14)$$

ตารางที่ 5 ชุดตัวแปรอิสระที่เป็นไปได้ทั้งหมดในสมการถดถอย 32 กรณี

Cases	Number of parameters	Parameters	R^2	MSE
1	0	-	-	-
2	1	$\frac{D_c}{L-l}$	0.008	0.211
3	1	$\frac{D_c}{L_1}$	0.153	0.180
4	1	$\frac{D_c}{L_2}$	0.008	0.211
5	1	$\frac{D_u}{D_c}$	0.784	0.046
6	1	Eu	0.352	0.138
7	2	$\frac{D_c}{L-l}, \frac{D_c}{L_1}$	0.161	0.181
8	2	$\frac{D_c}{L-l}, \frac{D_c}{L_2}$	0.127	0.188
9	2	$\frac{D_c}{L-l}, \frac{D_u}{D_c}$	0.794	0.045
10	2	$\frac{D_c}{L-l}, Eu$	0.547	0.098
11	2	$\frac{D_c}{L_1}, \frac{D_c}{L_2}$	0.160	0.181
12	2	$\frac{D_c}{L_1}, \frac{D_u}{D_c}$	0.808	0.041
13	2	$\frac{D_c}{L_1}, Eu$	0.368	0.136
14	2	$\frac{D_c}{L_2}, \frac{D_u}{D_c}$	0.786	0.046
15	2	$\frac{D_c}{L_2}, Eu$	0.472	0.114
16	2	$\frac{D_u}{D_c}, Eu$	0.857	0.031
17	3	$\frac{D_c}{L-l}, \frac{D_c}{L_1}, \frac{D_c}{L_2}$	0.161	0.183
18	3	$\frac{D_c}{L-l}, \frac{D_c}{L_1}, \frac{D_u}{D_c}$	0.809	0.042
19	3	$\frac{D_c}{L-l}, \frac{D_c}{L_1}, Eu$	0.607	0.086
20	3	$\frac{D_c}{L-l}, \frac{D_c}{L_2}, \frac{D_u}{D_c}$	0.804	0.043

ตารางที่ 5 ชุดตัวแปรอิสระที่เป็นไปได้ทั้งหมดในสมการถดถอย 32 กรณี (ต่อ)

Cases	Number of parameters	Parameters	R^2	MSE
21	3	$\frac{D_c}{L-l}, \frac{D_c}{L_2}, Eu$	0.562	0.096
22	3	$\frac{D_c}{L-l}, \frac{D_u}{D_c}, Eu$	0.883	0.026
23	3	$\frac{D_c}{L_1}, \frac{D_c}{L_2}, \frac{D_u}{D_c}$	0.809	0.042
24	3	$\frac{D_c}{L_1}, \frac{D_c}{L_2}, Eu$	0.636	0.080
25	3	$\frac{D_c}{L_1}, \frac{D_u}{D_c}, Eu$	0.864	0.030
26	3	$\frac{D_c}{L_2}, \frac{D_u}{D_c}, Eu$	0.869	0.029
27	4	$\frac{D_c}{L-l}, \frac{D_c}{L_1}, \frac{D_c}{L_2}, \frac{D_u}{D_c}$	0.809	0.042
28	4	$\frac{D_c}{L-l}, \frac{D_c}{L_1}, \frac{D_c}{L_2}, Eu$	0.638	0.080
29	4	$\frac{D_c}{L-l}, \frac{D_c}{L_1}, \frac{D_u}{D_c}, Eu$	0.903	0.021
30	4	$\frac{D_c}{L-l}, \frac{D_c}{L_2}, \frac{D_u}{D_c}, Eu$	0.890	0.024
31	4	$\frac{D_c}{L_1}, \frac{D_c}{L_2}, \frac{D_u}{D_c}, Eu$	0.910	0.020
32	5	$\frac{D_c}{L-l}, \frac{D_c}{L_1}, \frac{D_c}{L_2}, \frac{D_u}{D_c}, Eu$	0.910	0.020

การเลือกชุดตัวแปรอิสระที่เหมาะสมในสมการให้พิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ก่อนโดยเลือกค่าน้อยที่สุดและต่อมาพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดโดยเลือกค่าที่มากที่สุดหรือใกล้เคียงค่าสูงสุดจากตารางที่ 5 พบว่ากรณีที่ 31 เป็นชุดตัวแปรอิสระที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งมีค่า MSE เท่ากับ 0.020 และค่า R^2 เท่ากับ 0.910 โดยอัตราส่วนการไหลของน้ำเป็นฟังก์ชันกับตัวแปรอิสระ 4 ตัว สามารถลดรูปจากสมการที่ (14) เขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$R_w = k_1 \left(\frac{D_c}{L_1} \right)^{n_2} \left(\frac{D_c}{L_2} \right)^{n_3} \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^{n_4} Eu^{n_5} \quad (15)$$

สำหรับการหาค่าคงที่ k_1 และสัมประสิทธิ์การถดถอย $n_2 - n_5$ ใช้วิธีที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นในหัวข้อที่ 3.4 โดยสามารถแทนค่าให้อยู่ในรูปเมตริกซ์เพื่อให้สามารถแก้สมการได้ง่ายขึ้น จากผลการทดลองในหัวข้อ 5.1 จำนวน 59 ครั้ง และผลการทดลองของ Orrasin et al. [5] จำนวน 16 ครั้ง รวมเป็น 75 ครั้งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} 75 & -47.700 & -135.188 & -183.867 & 685.290 \\ -47.700 & 33.375 & 85.928 & 116.397 & -434.380 \\ -135.188 & 85.928 & 244.865 & 331.597 & -1234.789 \\ -183.867 & 116.397 & 331.597 & 452.035 & -1680.502 \\ 685.290 & -434.380 & -1234.789 & -1680.502 & 6262.777 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ n_2 \\ n_3 \\ n_4 \\ n_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -194.296 \\ 120.885 \\ 350.610 \\ 480.267 \\ -1777.821 \end{bmatrix} \quad (16)$$

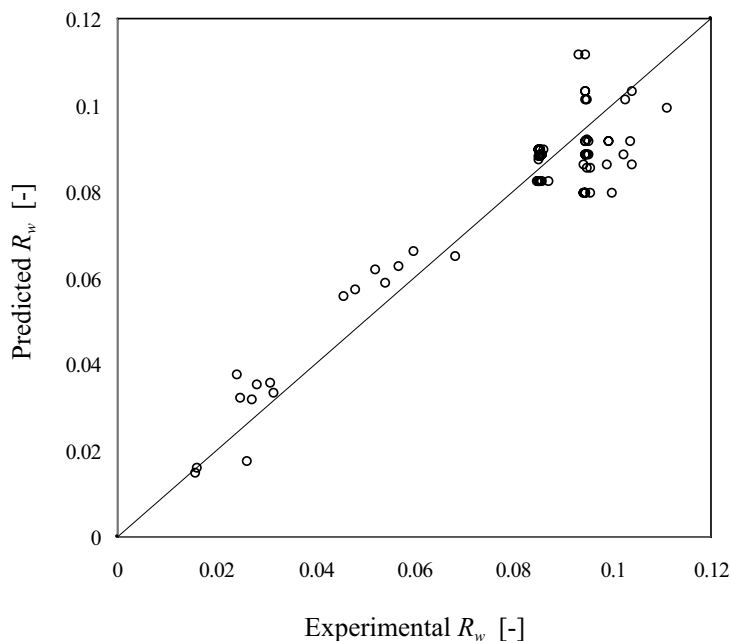
ซึ่งสามารถคำนวณค่าคงที่ต่างๆ ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ n_2 \\ n_3 \\ n_4 \\ n_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 32.995 \\ 0.983 \\ 1.167 \\ 2.248 \\ -2.993 \end{bmatrix} \quad (17)$$

โดยค่าคงที่ $k_1 = e^{32.995} = 2.14 \times 10^{14}$ และสัมประสิทธิ์การถดถอย $n_2 = 0.983$, $n_3 = 1.167$, $n_4 = 2.248$ และ $n_5 = -2.993$ เมื่อแทนค่าลงไปในสมการที่ (15) จะได้สมการถดถอยที่สามารถทำนายค่าอัตราส่วนการไหลของน้ำกับสัดส่วนของไฮโดรไฮโคลนได้ดังนี้

$$R_w = 2.14 \times 10^{14} \left(\frac{D_c}{L_1} \right)^{0.983} \left(\frac{D_c}{L_2} \right)^{1.167} \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^{2.248} Eu^{-2.993} \quad (18)$$

จากสมการที่ (18) แสดงให้เห็นว่าความยาวของวอร์เท็กซ์พายเดอร์ไม่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนการไหลของน้ำหรือมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนการไหลของน้ำน้อยมากจนสามารถตัดออกได้จากสมการได้ นอกจากนี้สมการยังสามารถบอกถึงอิทธิพลของสัดส่วนไฮโดรไฮโคลนที่มีผลต่ออัตราส่วนการไหลของน้ำได้อีกด้วยโดยพิจารณาจากค่าของเลขชี้กำลัง ตัวเลขขอยเลอร์ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางออกด้านล่าง ความยาวกรวย และความยาวทรงกระบอก มีอิทธิพลต่อค่าอัตราส่วนการไหลของน้ำจากมากไปหาน้อยตามลำดับ ($Eu > D_u > L_2 > L_1$)



รูปที่ 6 ค่าสัดส่วนอัตราการไหลของน้ำที่ทำนายได้จากสมการถดถอยเปรียบเทียบกับที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 6 เป็นการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการไหลของน้ำที่ทำนายได้จากสมการถดถอยกับค่าอัตราส่วนการไหลของน้ำที่ได้จากการทดลอง พบว่าสมการถดถอยที่สร้างมานั้นเมื่อ เปรียบเทียบกับผลการทดลองจะได้ค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดเท่ากับ 0.910 และความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย 0.020

6. สรุปผลการทดลอง

การแยกซิลิกาออกจากน้ำโดยใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 40 มม. ให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ความยาววอร์เท็กซ์เพายเดอร์ 40 มม. ความยาวทรงกระบอก 60 มม. และความยาวกรวย 200 มม. โดยมีประสิทธิภาพการแยกดีที่สุดถึงร้อยละ 84.06 ในส่วนของการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของสัดส่วนไฮโดรไซโคลนกับอัตราส่วนการไหลของน้ำโดยใช้วิธีสมการถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ พบว่าความยาววอร์เท็กซ์เพายเดอร์ไม่มีผลต่ออัตราส่วนการไหลของน้ำซึ่งเห็นได้จากสมการสหสัมพันธ์ที่ (18) ซึ่งมีค่าคงที่ $k_1 = 2.14 \times 10^{14}$ และสัมประสิทธิ์การถดถอย $n_2 = 0.983$, $n_3 = 1.167$, $n_4 = 2.248$ และ $n_5 = -2.993$ อย่างไรก็ตามระยะวอร์เท็กซ์เพายเดอร์เป็นระยะที่มีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแยกอย่างมาก

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่เอื้อเฟื้อเครื่องวัดขนาดอนุภาคและให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

8. บรรณานุกรม

1. Martínez, L.F., Lavín, A.G., Mahamud, M.M. and Bueno, J.L., 2007, "Improvements in hydrocyclone design flow lines stabilization", Powder Technology, Vol. 176, pp. 1–8.
2. Martínez, L.F., Lavín, A.G., Mahamud, M.M. and Bueno, J.L., 2008, "Vortex finder Optimum Length in Hydrocyclone Separation", Chemical Engineering and Processing, Vol. 47, pp. 192-199.

3. Chu, L.Y., Chen, W.M. and Lee, X.Z., 2000, "Effect of structural modification on hydrocyclone Performance", Separation Purification Technology, Vol. 21, pp. 71–86.
4. Jun, H., Lian-suo, A. and Zhi-quan, W., 2009, "Study on Application and Operation Optimization of Hydrocyclone for Solid-liquid Separation in Power Plant", Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, pp. 1-6.
5. Orrasin, N., Swasdisevi, T. and Wongsarivej, P., 2014, "Regression model for pressure drop of 50 mm solid-liquid", KMUTT Research and Development Journal, Vol. 1, pp. 29-41. (In Thai)
6. Heiskanen, K., 1993, Particle Classification, Chapman&Hall, London. pp. 71-74.
7. Svarovsky, L., 2000, *Solid-liquid Separation*, Holt, Rinehart & Winston, London, 4th edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, p. 214.
8. Antunes, M. and Medronho, R.A., Bradley hydrocyclone: 1992, design and performance analysis, in: Svarovsky, M.T. Thew (Eds.), Hydrocyclones: Analysis and Applications, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 3-13.
9. Azevedo, R., Veloso, C.O., Medronho, R.A., 1990, "Performance dehidrociclones CBV-Demco 4H, in: Proceedings of the XXII Brazilian congress on particulate systems", Friburgo, Brazil, pp. 481-488.
10. Coelho, M.A.Z., Medronho, R.A., 2001, "A model for performance prediction of hydrocyclones", Chemical engineering journal, Vol. 84, pp. 7-14.
11. Wongsarivej, P., Tanthapanichakoon, W., Yoshida, H. and Fukui, K., 2005, "Classification of Silica Fine Particles Using a Novel Electric Hydrocyclone", Science and Technology of Advanced Materials, Vol. 6, No. 3-4, pp. 364-369.