

การศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของผลของขนาดมุมกรวยต่อประสิทธิภาพการแยกของ ไฮโดรไซโคลนของเหลว-ของเหลว-ของแข็งแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกัน

A Computational fluid dynamics study of effect of varying angles of cones on separation efficiencies of two-concurrent-cone liquid-liquid-solid hydrocyclone

สุทธิศักดิ์ พรหมทอง¹และ สรล ศาลากิจ ^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนน พญาไท

แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

*ติดต่อ: E-mail: Saran.s@chula.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: +66(2)-218-6622

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปไฮโดรไซโคลนถูกใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมเหมืองแร่ และ อุตสาหกรรมปิโตรเลียม เป็นต้น เหตุผลที่ไฮโดรไซโคลนได้รับความนิยมคือสามารถออกแบบได้ง่าย ค่าซ่อมบำรุงต่ำและมีราคาไม่แพงมากนัก ไฮโดรไซโคลนชนิดแยกก๊าซ-ของเหลว-ของแข็งมีการศึกษาและพัฒนาอย่างแพร่หลาย ในขณะที่การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับไฮโดรไซโคลนชนิดแยกของเหลว-ของเหลว-ของแข็งยังมีอยู่อย่างจำกัด

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงมุมของทรงกรวยสองชั้นต่อกันของไฮโดรไซโคลนชนิดแยก ของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง โดยทำการศึกษาผ่านแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ซึ่งประสิทธิภาพการแยกที่ได้จากแบบจำลองค่อนข้างสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นอย่างดี โดยทรงกรวยสองชั้นต่อกันของไฮโดรไซโคลน 3 รูปทรงที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีมุมของทรงกรวยบนและทรงกรวยล่าง คือ 18.26°-13.3°, 20°-10° และ 22.2°-9.52° พบว่าการเปลี่ยนแปลงมุมของทรงกรวยไม่ค่อยมีผลต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน แต่มีผลกระทบมากกับการแยกเม็ดทรายอย่างมีนัยสำคัญ

คำหลัก: ไฮโดรไซโคลน; พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ; เครื่องแยกสารแบบ ของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง; ทรงกรวยสองชั้นเชื่อมต่อกัน.

Abstract

Hydrocyclone is generally used in many fields of industries such as chemical, mineral, petroleum, and coal industries. It is because of its simple design, durability, and cost effectiveness. There are widely studies of gas-liquid-solid hydrocyclone, but the studies of liquid-liquid-solid hydrocyclone are still limited in research field.

In this research, effects of different angles of two-concurrent-cone to flows in liquid-liquid-solid hydrocyclone were studied by CFD model. Separation efficiency obtained from simulation results shows good agreement with experimental data from literature. Three studied two-concurrent-cone hydrocyclone geometries were used in this studies where the angles of top-cone and bottom-cone

are 18.26° - 13.3° , 20° - 10° and 22.2° - 9.52° . The results show that variation of cone angle does not significantly affect the oil separation efficiency while it significantly affects the sand separation efficiency.

Keywords: Hydrocyclone; CFD; Liquid-Liquid-Solid Separator; Double-Cone.

1. บทนำ

ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ใช้ในการแยกสารที่มีการผสมกันของสารหลายเฟส ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมโดยสมัยก่อนนั้น ไฮโดรไซโคลนจะถูกใช้แยก พวกแร่, หิน, ทราย, โคลน, ออกจากน้ำ ปัจจุบัน ไฮโดรไซโคลน ได้ถูกใช้อย่างแพร่หลาย ในอุตสาหกรรมเคมี, ปิโตรเคมี, อาหารและยา เป็นต้น ตัวอย่างเช่น กระบวนการแยกน้ำออกจากน้ำมันดิบ แยกกรดทรายออกจากน้ำอ้อย ในอุตสาหกรรมน้ำตาล, แม้กระทั่งการแยกสารกีดกร่อนในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ไฮโดรไซโคลน ค่อนข้างจะเป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากกลไกการแยกสารไม่ซับซ้อน ราคาไม่แพง และค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงไม่สูงมากนัก และยังมีความปลอดภัยค่อนข้างสูง

หลักในการแยกสาร คือ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ทำให้การเคลื่อนที่ของสารที่มีความหนาแน่นหรือขนาดไม่เท่ากันมีลักษณะต่างกันโดยแรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นมาจากการป้อนสารเข้าไปในไฮโดรไซโคลนด้วยความเร็ววนจากนั้นรูปร่างของไฮโดรไซโคลนก็มีผลต่อการแยกด้วย

งานวิจัยที่เป็นพื้นฐานและน่าสนใจควรค่าต่อการค้นคว้าหาความรู้มีหลายรูปแบบ ซึ่งมักจะทำการศึกษากับไฮโดรไซโคลนแบบแยกสารสองเฟส แต่งานวิจัยการแยกสารผสมแบบสามเฟสนั้นมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นจากเดิมทำให้ต้องมีการศึกษาทดลองโดยใช้หลักการพื้นฐานการแยกสารแบบสองเฟสมาเป็นหลักในการศึกษาเพื่อการพัฒนา โดยต้องศึกษาทำความเข้าใจรูปแบบในการผสมกันของสารที่มีการผสมกันแบบสามเฟส

1.1 ไฮโดรไซโคลนที่มีการแยกสารแบบสามเฟส

Liu และคณะ [1] ได้ทำการรวบรวมงานศึกษาการแยกสารแบบสามเฟสของไฮโดรไซโคลนโดยจะมีการแบ่งกลุ่มของสารผสมสามเฟสที่มีการผสมกันอยู่โดยมีรูปแบบของสารผสมอยู่ที่นิยมในการแยกสารมี 3 ชนิดคือ เช่น ก๊าซ-ของเหลว-ของแข็ง, ของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง และ ก๊าซ-ของเหลว-ของเหลว เป็นต้นซึ่งทั้งสามรูปแบบมีความยากง่ายแตกต่างกันไปเนื่องจากมาจากความแตกต่างของสารผสมที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันทำให้ประสิทธิภาพในการแยกสารของแต่ละรูปแบบสารผสมมีความแตกต่างกันด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่าการศึกษาไฮโดรไซโคลนแบบ ของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง มีความนิยมในการศึกษาน้อยที่สุดเนื่องจากความยากในการศึกษาเพราะว่ามีความแตกต่างของความหนาแน่นของสารค่อนข้างต่ำทำให้ประสิทธิภาพการแยกสารของอุปกรณ์น้อยกว่าแบบอื่นๆ จึงได้รับความนิยมในการศึกษาวิจัยค่อนข้างต่ำ

การใช้งานหลักของการแยกสารแบบของเหลว-ของเหลว-ของแข็งการแยกน้ำมันออกจากทรายน้ำมันซึ่งการใช้งานแบบนี้มีการใช้งานในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับธุรกิจน้ำมันและก๊าซ ทำให้มีความน่าสนใจในปรับปรุงประสิทธิภาพของต้นแบบไฮโดรไซโคลนแบบของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง

1.2 แนวทางการศึกษาไฮโดรไซโคลนเพื่อแยกของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง

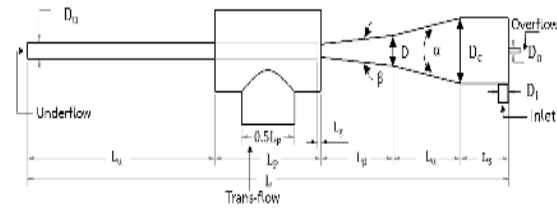
เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่ารูปร่างของไฮโดรไซโคลนมีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกมากจึงมีความสำคัญเป็น

อย่างที่จะต้องเข้าใจผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไฮโดรไซโคลนต่อประสิทธิภาพการแยก แต่จากที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ว่าการศึกษาเกี่ยวกับไฮโดรไซโคลนแบบของเหลว-ของเหลว-ของแข็งมีอยู่อย่างจำกัด การศึกษาเพื่อหาแนวทางการปรับปรุงรูปร่างไฮโดรไซโคลนแบบของเหลว-ของเหลว-ของแข็งในงานวิจัยนี้จึงอาศัยหลักการศึกษาไฮโดรไซโคลนแบบสองเฟสเป็นหลักในการอ้างอิง

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวไฮโดรไซโคลน Yu และคณะ [3] โดยมีข้อสรุปที่น่าสนใจคือ การปรับปรุงส่วนทรงกรวยของไฮโดรไซโคลนนั้นสามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการแยกของสารได้

การศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงช่องออกด้านบน (vortex finder) ของตัวไฮโดรไซโคลนโดย Yu และคณะ [4] ได้ทำการเพิ่ม-ลด ขนาด และความยาวของ ช่องระบายด้านบน (vortex finder) และทำการศึกษาการปรับเปลี่ยนความยาวของส่วนของทรงกระบอกและทรงกรวยของไฮโดรไซโคลน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการแยกสารซึ่งผลการทดลองก็บ่งบอกถึงผลการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการแยกอย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและปรับปรุงแบบรูปร่างของไฮโดรไซโคลนแบบของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง ซึ่งพัฒนาโดย Changirwa และ คณะ [2,3,4] แสดงในรูปที่ 1 โดยจะเน้นที่การปรับเปลี่ยนมุมของทรงกรวยสองชิ้นติดกัน เพื่อศึกษาว่ามีผลต่อการประสิทธิภาพการแยกอย่างไรโดยทำการศึกษาด้วยทำการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการคำนวณโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Reynolds Stress Model เพื่อใช้ในการทำนายลักษณะการไหล



รูปที่ 1 โครงสร้างและขนาดของไฮโดรแบบสามเฟสที่มีกรวยสองชิ้นต่อกันออกแบบโดย Changirwa et al. [2] ซึ่งจะมีช่องทางออกทางด้านบน ด้านข้างและทางออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลน สำหรับแยกน้ำมัน เม็ดทราย และน้ำตามลำดับ

2. ทฤษฎีและสมการที่เกี่ยวข้อง

รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนในสามมิตินั้น จะกำหนดสมมติฐานไว้คือการไหลจะอยู่ในสภาวะคงตัว ชนิดอัดตัวไม่ได้ และคุณสมบัติต่างๆ ของของไหลจะมีค่าคงที่ตลอดทั้งขอบเขตที่ทำการพิจารณา [7]

2.1 สมการไหลแบบปั่นป่วน

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนนั้นจะมีความซับซ้อนกว่าการไหลแบบราบเรียบ โดยต้องพิจารณาเป็นค่าเฉลี่ยและค่าการผันผวนตลอดระยะการไหล โดยสมการการเคลื่อนที่นั้นจะประกอบไปด้วย สมการความต่อเนื่อง สมการอนุรักษ์โมเมนตัมและสมการอนุรักษ์พลังงาน จะทำการเขียนในรูปแบบเทนเซอร์ได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j'}{\partial x_j} \quad (2)$$

โดยมีค่า Viscous stress tensor ที่คำนวณจากสมการ

$$\bar{\sigma}_{ij} = 2\mu \bar{S}_{ij} \quad (3)$$

และค่า Strain tensor จาก

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\rho u_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \overline{u_j' T'} \right) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ij} = 2\mu \frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \frac{\partial u_j'}{\partial x_k} \quad (12)$$

2.2 แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Reynolds Stress Model

แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Reynolds Stress Model จะเป็นการแก้ปัญหาโดยตรงโดยใช้ transport equation และหลักเชิงสมมุติฐาน isotropic viscosity และใช้แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Reynolds Stress Model เหมาะสำหรับการแก้ปัญหาคาร์ไหลวนตัวเลือก แรงกดดันรูปทรงที่เหลี่ยมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ shear flows

สมการ Reynolds Stress Model (RSM)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u_i' u_j'}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \overline{u_k' u_i' u_j'}) = P_{ij} + F_{ij} + D_{ij}^T + \Phi_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (6)$$

Stress production (P_{ij})

$$P_{ij} = - \left(R_{im} \frac{\partial U_j}{\partial x_m} + R_{jm} \frac{\partial U_i}{\partial x_m} \right) \quad (7)$$

Rotation production (F_{ij})

$$\Omega_{ij} = -2\omega_k (R_{jm} e_{ikm} + R_{im} e_{jkm}) \quad (8)$$

 ω_k คือ rotation vectorTurbulent diffusion (D_{ij}^T)

$$D_{ij}^T = \frac{\partial J_{ijk}}{\partial x_k} \quad (9)$$

$$J_{ijk} = \overline{u_i' u_j' u_k'} + \overline{p' (\delta_{jk} u_i' + \delta_{ik} u_j')} \quad (10)$$

 ν_t คือ Turbulent kinematic viscosityPressure Strain (Φ_{ij})

$$\Phi_{ij} = -p' \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

P คือ Pressure

Dissipation (ε_{ij})

3. วิธีการคำนวณ

งานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT เป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์ที่ประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method) เข้าใช้ในการแก้ปัญหาในการไหล โดยการประมาณค่าพจน์การ Pressure-Velocity Coupling โดยเลือกใช้ Scheme และเลือกใช้ระเบียบวิธี Phase Coupled SIMPLE ในการหาค่าความดันและความเร็วที่สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง [7,8]

3.1 แบบจำลองไฮโดรไฮโคลนและคุณสมบัติของสาร

การศึกษาประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไฮโคลนของเหลว-ของเหลว-ของแข็งแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกัน โดยทำการเปรียบเทียบการศึกษาเชิงตัวเลขกับผลการทดลองของ Changirwa et al. [2] ซึ่งจะทำให้การจำลองการไหลในสามมิติ เพื่อทำการศึกษาด้านประสิทธิภาพการ

ตารางที่ 1 ขนาดของไฮโดรไฮโคลนที่ออกแบบโดย Changirwa et al. [2]

ประเภท	ขนาด (มิลลิเมตร)	ประเภท	ขนาด (มิลลิเมตร)
D	40	L_s	80
L	1,600	L_∞	112
D_c	80	L_β	120
D_i	14	L_p	176
D_o	5.6	L_g	12
D_u	20	L_u	1,120

มุมของทรงกรวย (Cone Angles): $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 10^\circ$

แยกของทรายและน้ำมันของไฮโดรไฮโคลน โดยโครงสร้างและรายละเอียดของไฮโดรไฮโคลนสามเฟส

แบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันถูกออกโดย Changirwa et al. [2] แสดงในรูปที่ 1 และตารางที่ 1 ตามลำดับ

จากตารางที่ 1 ช่องทางออก D_o คือช่องทางออกด้านบนหรือ Overflow เป็นช่องทางออกที่ต้องการให้หยดน้ำมันไหลออก และ ช่องทางออกที่ตำแหน่ง L_g คือช่องทางออกที่ต้องการด้านข้างหรือ Trans-flow ที่ต้องการให้เม็ดทรายไหลวนออกทางช่องดังกล่าว โดยตัวแปรที่มีความสำคัญในการศึกษาประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลอนนั้นของคุณสมบัติของสาร โดยคุณสมบัติของสารจะมีรายละเอียดตามตารางที่ 2 และ 3 เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ ในงานวิจัยนี้กำหนดคุณสมบัติของสารขนาดของหยดน้ำมันและเม็ดทรายเท่ากับค่าเฉลี่ยคือ 140 ไมโครเมตร และ 75 ไมโครเมตรตามลำดับ

นอกเหนือจากรายละเอียดของโครงสร้างที่แสดงในตารางที่ 1 และคุณสมบัติทางกายภาพของสารที่แสดงในตารางที่ 2 คุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคืออัตราส่วน

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของคุณสมบัติของสาร

ประเภทของสาร	ค่าความหนืด ที่ 20 องศาเซลเซียส	ค่าความโน้มถ่วงเฉพาะ (Specific Gravity)
น้ำมัน	0.00332	0.83
เม็ดทราย	-	2.65
น้ำ	0.001003	1

ตารางที่ 3 ขนาดและเปอร์เซ็นต์ของเม็ดทราย

ขนาด(ไมโครเมตร)	เปอร์เซ็นต์
>140	10
80-140	36
45-80	42
9-45	10

การแยกของไฮโดรไซโคลอนแบบสามเฟส (Split Ratios In Three-Phase Hydrocyclone) เนื่องจากไฮโดรไซโคลอนที่ใช้ศึกษานั้นมีช่องทางออกหลายช่องทางทำให้การ

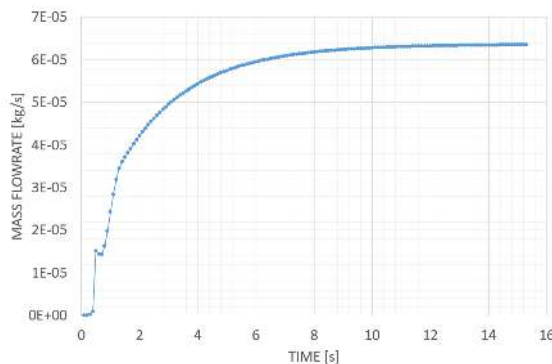
ควบคุมอัตราการไหลของแต่ละช่องทางหรืออัตราส่วนการแยกสาร (Split Ratio, Λ) มีความสำคัญ งานวิจัยที่ใช้ในการอ้างอิงนั้นได้ทำการทดลองโดยใช้วาล์วคอยควบคุมอัตราการไหลที่ช่องทางออกด้านบนและช่องทางออกด้านล่างของตัวอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอน โดยอัตราส่วนการแยกสองชนิดของช่องทางออกที่มีอยู่ โดยอัตราส่วนของช่องทางออกด้านบนต่อช่องทางออกด้านล่าง Λ_o และ อัตราส่วนของช่องทางออกด้านข้างต่อช่องทางออกด้านล่าง Λ_s โดยสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$Q_u = \frac{Q}{1 + \Lambda_o + \Lambda_s} \quad (11)$$

ในงานวิจัยนี้ กำหนดอัตราส่วน Split Ratio Λ เท่ากับ 0.2 ของช่องทางออกด้านบนต่อด้านล่าง (Λ_o) และทางออกด้านบนต่อด้านข้าง (Λ_s) ซึ่งค่าดังกล่าวจะใช้ในการกำหนดขอบเขตการไหลสำหรับทุกเงื่อนไขที่แสดงต่อจากนี้

3.2 อิทธิพลของจำนวนกริด (Mesh Refinement Analysis)

การตรวจสอบ Mesh Refinement Analysis เพื่อหาความเหมาะสมในการสร้างกริด (Grid generation) เพื่อใช้ในการตรวจสอบการแยกสารแบบสามเฟสของไฮโดรไซโคลอนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยมีเงื่อนไขที่ใช้สำหรับการตรวจสอบ Mesh Refinement Analysis ที่ความเร็วขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 3.608 เมตรต่อวินาที กำหนด Volume Fraction ของน้ำมันและทรายเท่ากับ 0.1 เปอร์เซนต์ โดยใช้แบบจำลองแบบ Eulerian Model



รูปที่ 2 อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำมันที่ช่องทางออกด้านบน (Overflow) ต่อเวลา

รูปที่ 2 แสดงผลการคำนวณจากแบบจำลองในช่วง 16 วินาทีแรก จะเห็นว่าอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำมันที่ช่องทางออกเริ่มที่จะเข้าสู่สภาวะคงตัวตั้งแต่วันที่ 10 วินาที การตรวจสอบเรื่องอิทธิพลของจำนวนกริดที่เหมาะสมดังตารางที่ 4 และผลของแบบจำลองทั้งหมดต่อจากนี้จึงใช้ค่าที่ได้จากการจำลองผลที่ 10 วินาที และใช้ค่าเฉลี่ยตลอด 0.5 วินาทีสุดท้ายในการเปรียบเทียบผลการผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบกริดแสดงในรูปที่ 3 โดยทำการคำนวณจากการนำค่าจากการทดลองของกรณีที่มี Grid Number ที่มีค่ามากที่สุดทำการเปรียบเทียบดังสมการในการคำนวณดังต่อไปนี้

$$E_{j,i} = \frac{|\dot{m}_{j,4} - \dot{m}_{j,i}|}{|\dot{m}_{j,4}|} \quad (12)$$

โดยที่ตัวห้อย i หมายถึงลำดับของกรณีของกริดที่ใช้ในการตรวจสอบดังแสดงในตารางที่ 4 และ j หมายถึงตำแหน่งของช่องทางออก

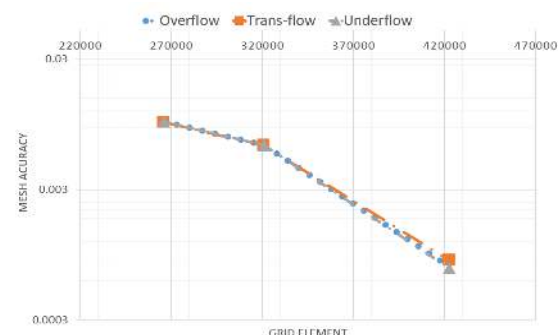
รูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนจากสามชุดข้อมูลของสารผสม (Mixture) คือน้ำ น้ำมันและทราย ที่ช่องทางออกทั้งสองช่องทางด้านบน (Overflow) ด้านข้าง (Trans flow) และช่องทางด้านล่าง (Under flow) โดนจะมีกรณี 4 เทียบกับกรณี 1, 2 และ 3 คือ 266,032 321,216 และ 422,726 จากรูปที่ 2 เห็นว่ากรณีที่สามนั้นจะมี

ตารางที่ 4 ตารางเปรียบเทียบจำนวนกริดและขนาดของกริด

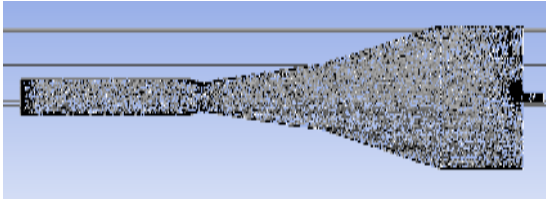
กรณี (i)	Grid Size (mm)	Grid Number
1	7.5	266,032
2	5.5	321,216
3	3.5	422,746
4	1.5	662,435

คลาดเคลื่อนของค่าต่ำมากที่สุด 0.001 เมื่อเทียบกับกรณีก่อนหน้า ที่ 0.01 หรือต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ขนาดกริดที่ 422,726 เหมาะสมที่จะนำไปทำการเปรียบเทียบไฮโดรไดนามิกส์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการแยกสาร โดยมี Element size เฉลี่ย เท่ากับ 3.5 มิลลิเมตรค่าตัวเลขต่างๆ กับผลการทดลองของ Changirwa et al. [2] และรูปแบบตัวอย่างจำลองที่ไฮโดรไดนามิกส์ที่มีการสร้างกริดตามรูปที่ 4

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปที่ 1 และรูปที่ 4 จะพบว่ามีรูปร่างแตกต่างกันโดยตัดส่วนที่ไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์การไหลและประสิทธิภาพการแยกของหยดน้ำมันและเม็ดทรายออกไปคือส่วนกักเก็บเม็ดทรายของช่องทางออกตรงกลางและความยาวของช่องทางออกด้านล่าง เนื่องมาจากจะช่วยประหยัดหน่วยความจำและระยะเวลา



รูปที่ 3 ผลต่างของอัตราการไหลออกแต่ละช่องที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองที่ใช้กริดขนาดต่างๆกันเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่ใช้กริดขนาดเล็กที่สุด



รูปที่ 4 โครงสร้างไฮโดรไซโคลนที่มีการสร้างกริดเพื่อใช้ในการคำนวณสำหรับการแก้ปัญหาคณิตศาสตร์

ในการคำนวณของโปรแกรมที่ต้องเสียไปเมื่อต้องทำการคำนวณ

3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

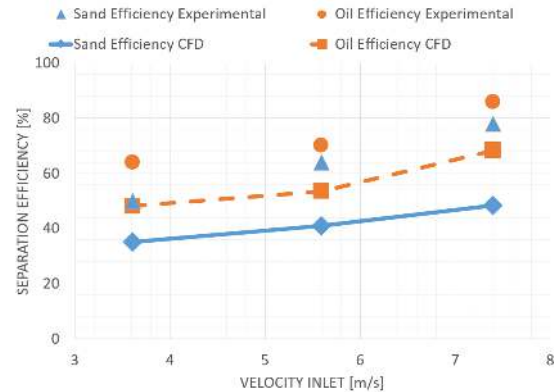
เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้การคำนวณรูปแบบระเบียบวิธีเชิงตัวเลข จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยการเปรียบเทียบผลกับผลการทดลองจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ผลที่ได้จากการคำนวณถูกต้องและนำแบบจำลองของโปรแกรมห้มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาต่อไป โดยการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมนั้นจะกำหนดคุณสมบัติของสารตามตารางที่ 2 ตามเงื่อนไขการทดลองตามงานวิจัยอ้างอิงของ Changirwa et al. [2] และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน และเม็ดทรายที่ต้องการให้หยดน้ำมันแยกออกที่ช่องทางออกด้านบนและเม็ดทรายแยกออกที่ช่องทางออกด้านล่างโดยการคำนวณประสิทธิภาพการแยกของน้ำมันตามสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{s,oil} = \frac{|\dot{m}_{Oil, Overflow}|}{|\dot{m}_{Oil, Inlet}|} \times 100 \quad (13)$$

และคำนวณประสิทธิภาพการแยกของเม็ดทรายตามสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{s,sand} = \frac{|\dot{m}_{Sand, Trans-flow}|}{|\dot{m}_{Sand, Inlet}|} \times 100 \quad (14)$$

รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการแยกของหยดน้ำมันและเม็ดทรายของอุปกรณ์การแยกสารไฮโดรไซโคลนของเหลว-ของเหลว-ของแข็งแบบทรงกรวยสองชิ้นต่อกัน



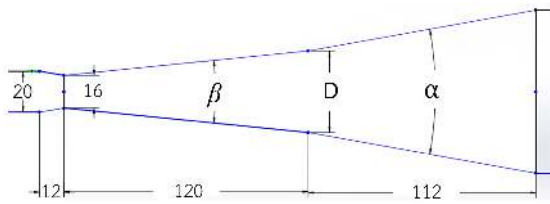
รูปที่ 5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกสารน้ำมันและเม็ดทรายของไฮโดรไซโคลนที่ความเร็วขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 3.608 , 5.593 ,และ 7.398 เมตรต่อวินาที

กรวยสองชิ้นต่อกันจากการทดลองของ Changirwa et al. [2] และการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะสังเกตได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มความเร็วของสารผสมทางด้านขาเข้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการแยกของหยดน้ำมันและเม็ดทรายเพิ่มขึ้นตามไปด้วยซึ่งจะสอดคล้องกับผลการทดลองตามงานวิจัยอ้างอิงของ Changirwa et al. [2]

4. ผลของขนาดมุมกรวยต่อประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลน

4.1 แบบจำลองไฮโดรไซโคลนที่มีการปรับเปลี่ยนมุมทรงกรวยสองชิ้นต่อกัน

การศึกษาประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลนของเหลว-ของเหลว-ของแข็งแบบทรงกรวยสองชิ้นต่อกันหลังจากทำการเปรียบเทียบการศึกษาเชิงตัวเลขกับผลการทดลองของ Changirwa et al. [2] ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมจากการปรับปรุงแบบจำลองของไฮโดรไซโคลนของงานวิจัย Changirwa et al. [2] โดยทำการปรับเปลี่ยนมุมของทรงกรวยโดยการเพิ่มและลดขนาดของระยะกลางกรวย (D) ดังที่แสดงรายละเอียดในรูปที่ 6

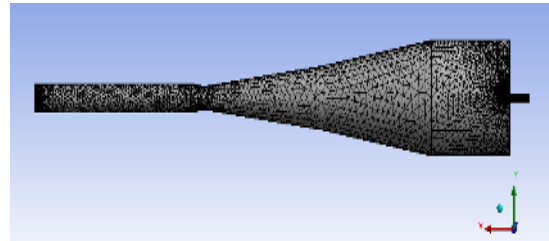


รูปที่ 6 รายละเอียดโครงสร้างและขนาดของไฮโดรแบบสามเฟสที่มีกรวยสองชิ้นต่อกันถูกออกโดย Changirwa et al. [2]

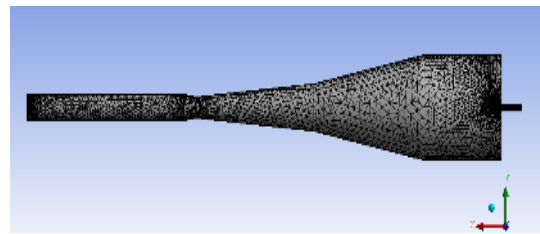
การเลือกที่จะปรับเปลี่ยนระยะกลางกรวยนั้น เนื่องจากไฮโดรไซโคลอนของ Changirwa et al. [2] มีจุดเด่นอยู่ที่การนำกรวยสองชิ้นที่มีมุมต่างกันคือ $\alpha = 20^\circ$ และ $\beta = 10^\circ$ มาต่อกันโดยมีระยะกลางกรวยร่วมกันเป็น 40 มิลลิเมตร การเพิ่มลดขนาดของระยะกลางกรวยมีผลทำให้มุมของกรวยทั้งสองเปลี่ยนแปลงเท่านั้น แต่จะไม่ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปลาย (ขาเข้ากรวยที่ 80 มิลลิเมตร และขาออกกรวยที่ 16 มิลลิเมตร) และความยาวโดยรวมของกรวยสองชิ้นต่อกันเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ทำให้การปรับปรุงเพื่อการติดตั้งในอุตสาหกรรมทำได้สะดวก โดยงานวิจัยนี้ศึกษาการปรับระยะกลางกรวยจาก 40 มิลลิเมตร เป็น 44 มิลลิเมตร และ 36 มิลลิเมตร ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ โดยเมื่อระยะกลางกรวยเป็น 44 มิลลิเมตร จะได้มุมของทรงกรวยคือ $\alpha = 18.26^\circ$ และ $\beta = 13.3^\circ$ และโดยเมื่อระยะกลางกรวยเป็น 36 มิลลิเมตร จะได้มุมของทรงกรวยคือ $\alpha = 22.22^\circ$ และ $\beta = 9.52^\circ$

4.2 การเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพการแยกสารของแบบจำลองไฮโดรไซโคลอนที่มีการปรับเปลี่ยนมุมทรงกรวยกับแบบจำลองไฮโดรไซโคลอนอ้างอิง

สำหรับการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงมุมของทรงกรวยสองชิ้นต่อกันของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอนเพื่อใช้แยกสารแบบสามเฟสนั้นจะทำการศึกษาที่ความเร็วขาเข้าของ



รูปที่ 7 รูปโครงสร้างไฮโดรไซโคลอนที่มีการสร้างกริดเพื่อใช้ในการคำนวณของไฮโดรไซโคลอนที่มีมุม $\alpha = 18.26^\circ$, $\beta = 13.3^\circ$



รูปที่ 8 รูปโครงสร้างไฮโดรไซโคลอนที่มีการสร้างกริดเพื่อใช้ในการคำนวณของไฮโดรไซโคลอนที่มีมุม $\alpha = 22.22^\circ$, $\beta = 9.52^\circ$

สารผสมเท่ากับ 7.398 เมตรต่อวินาทีเนื่องจากที่ความเร็วดังกล่าวให้ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันและเม็ดทรายสูงที่สุดจากการคำนวณของแบบจำลองการไหลและการทดลองของ Changirwa et al. [2] ดังนั้นเพื่อทำการศึกษาผลของประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลอนที่ได้รับการปรับเปลี่ยนมุมของทรงกรวยสองชิ้นต่อกันของแบบจำลองทั้งสองชิ้นกับแบบจำลองพื้นฐานจากงานวิจัยอ้างอิงโดยการคำนวณประสิทธิภาพการแยกของหยดน้ำมันและเม็ดทรายเปรียบเทียบกับผล Percentage deviation จากประสิทธิภาพการแยกของหยดน้ำมันและเม็ดทราย Original Geometry หรือระยะ D เท่ากับ 40 มิลลิเมตร ตามสมการดังต่อไปนี้

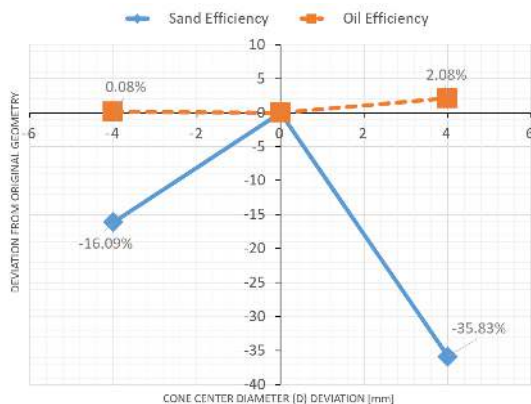
การคำนวณ Percentage deviation ของหยดน้ำมันตามสมการ

$$\delta_{s,oil,Dxx} = \frac{\eta_{s,oil,Dxx} - \eta_{s,oil,D40}}{\eta_{s,oil,D40}} \times 100 \quad (14)$$

การคำนวณ Percentage deviation ของเม็ดทรายตามสมการ

$$\delta_{s,sand} = \frac{\eta_{s,sand,Dxx} - \eta_{s,sand,D40}}{\eta_{s,sand,D40}} \times 100 \quad (15)$$

รูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมของทรงกรวยที่ระยะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางกรวย เท่ากับ 36 และ 44 มิลลิเมตรเมื่อทำการเปรียบเทียบกับระยะ D เท่ากับ 40 มิลลิเมตรที่มีต่อผลของประสิทธิภาพการแยกสารของหยดน้ำมันและเม็ดทราย พบว่าการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการแยกสารของหยดน้ำมันไม่มีความแตกต่างที่เป็นนัยสำคัญ โดยทั้งการขยายและลดขนาดของระยะกลางกรวยทำให้ผลของการแยกหยดน้ำมันดีขึ้นเล็กน้อย แต่การเปลี่ยนแปลงมุมกรวยมีผลต่อประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายเป็นอย่างมาก โดยการเพิ่มระยะกลางกรวยเป็น 44 มิลลิเมตรทำให้ประสิทธิภาพการแยกทรายลดลงถึงเกือบ 36% น่าจะ



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบผลของ Percentage deviation จาก Original geometry ที่ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณประสิทธิภาพการแยกของน้ำมันและเม็ดทรายของไฮโดรไดรไซโคลนที่ทำการเปลี่ยนแปลงมุมโดยการเปลี่ยนแปลงระยะกลางกรวย จาก 40 มิลลิเมตรเป็น 36 และ 44 มิลลิเมตรตามลำดับโดยกำหนดความเร็วขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 7.398 เมตรต่อวินาที

เป็นเพราะว่ามุมของกรวยล่าง ซึ่งติดกับช่องทางออกด้านข้างที่ออกแบบไว้เป็นช่องทางออกเม็ดทรายกว้างขึ้นเมื่อเทียบกับกรวยอ้างอิงเดิม มีผลให้แรงเหวี่ยงของเม็ดทรายลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายโดยรวมลดลง ในขณะที่การลดระยะกลางกรวยมีผลทำให้ผลต่างของกรวยทั้งสองมีค่าต่างกันมากขึ้น $\alpha = 22.22^\circ$ กับ $\beta = 9.52^\circ$ เมื่อเทียบกับมุมของกรวยเดิมคือ $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 10^\circ$ ทำให้ความเร็วในการหมุนวนเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทำให้สูญเสียแรงเหวี่ยงบางส่วนในกรวยที่สอง ถึงแม้ว่ามุมของกรวยที่สองจะน้อยกว่ากรวยอ้างอิงก็ตาม แต่อย่างไรก็ตามการลดขนาดของระยะกลางกรวยมีผลต่อการแยกเม็ดทรายน้อยกว่าการเพิ่มขนาดของระยะกลางกรวย

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของไฮโดรไซโคลนของเหลว-ของเหลว-ของแข็งแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันที่มีต้นแบบมาจากการวิจัยของ Changirwa [2] ด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent โดยได้ทำการวิเคราะห์อิทธิพลของจำนวนกริดและตรวจสอบความถูกต้องกับการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง แบบจำลองที่ทำการพัฒนาขึ้นได้นำไปใช้ในการศึกษาผลของขนาดมุมกรวยต่อประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลนของเหลว-ของเหลว-ของแข็งแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยการทำการเปลี่ยนแปลงระยะกลางกรวย ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงมุมทั้งสองของกรวยโดยไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวโดยรวมของกรวยสองชั้นต่อกันเดิม ผลที่ได้พบว่าการเปลี่ยนแปลงมุมกรวยส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกของเม็ดทรายอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่ค่อยส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกของน้ำมันมากนัก

เนื่องงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นผลเบื้องต้นว่าการเปลี่ยนแปลงมุมกรวยมีผลต่อประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายอย่างมีนัยสำคัญ จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะทำการศึกษา

ผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไฮโดรไซโคลอนเพิ่มเติมต่อไป โดยเป็นที่น่าสนใจที่จะเพิ่มกรณีศึกษาให้ละเอียดขึ้น เช่น ขยายขอบเขตการศึกษาโดยการเพิ่ม-ลดระยะกลางกรวยของกรวยสองชั้นต่อกัน เพื่อให้ได้แนวโน้มที่ละเอียดขึ้น นอกจากนั้นยังน่าสนใจที่จะศึกษาวิเคราะห์ลักษณะการไหลภายในโดยละเอียด เช่น ศึกษาการกระจายตัวของสัดส่วนเม็ดทรายและหยดน้ำมันภายในไฮโดรไซโคลอน รวมถึงการศึกษาความเร็วภายในไฮโดรไซโคลอนที่ส่งผลต่อการแยกเม็ดทรายและหยดน้ำมัน เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เลิศนุวัฒน์ รองศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ วรรณโสภากย์ที่ให้คำแนะนำและสนับสนุนการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Liu, Q. Cheng, B. Zhang, and F. Tian, "Three-phase hydrocyclone separator- A review", Chemical Engineering Research and Design, vol. 100, pp. 554-560, 2015.
- [2] R. M. M. Changirwa, "Phenomenological Separation in a Three-Phase Hydrocyclone", Ph.D Dissertation, Dept. of Minerals and Metallurgical eng., Technical University of Nova Scotia, Canada, 1997.
- [3] R. Changirwa, M. C. Rockwell, S. Frimpong, and J. Szymanski, "Hybrid simulation for oil-solids-water separation in oil sands production", Minerals engineering, vol. 12, 1999.
- [4] R. Changirwa, M. C. Rockwell, and D. K. Mutua, "Mathematical modelling multiple-cone concurrent three-phase (CTP) hydrocyclone

separation", Journal of Canadian Petroleum Technology, vol. 38, pp. 1459-1468, 1999.

- [5] A. B. Yu, and B. Wang., "Numerical study of particle-fluid flow in hydrocyclones with different body dimensions", Minerals Engineering, vol. 19, pp. 1022-1033, 2006.
- [6] A. B. Yu, and B. Wang., "Numerical study of the gas-liquid-solid flow in hydrocyclones with different configuration of vortex finder", Chemical Engineering Journal, vol. 135, pp. 33-42, 2008.
- [7] ANSYS FLUENT, Theory Guide Release 15.0, November 2013
- [8] ปราโมทย์ เตชะอำไพ. พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และไฟไนต์วอลุ่ม. 1000, 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.