การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18
18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัดขอนแก่น

การศึกษาผลของความสูงทรงกระบอกและทรงกรวยของไซโคลนที่มีผลต่อลักษณะการไหลภายในไซโคลนโดยใช้กระบวนการคำนวณทางจลนพลศาสตร์

A study of the effect of the cyclone geometry on its flow behavior by using CFD method

วสันต์ ศรีเมือง[1*] วรรณวิไล ไกรเพ็ชร์[2] และ อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง[1]

[1]โครงการความร่วมมือทางวิชาการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กับ กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โทรศัพท์ (622) 0 3732 2609 โทรสาร (662) 0 3732 2609 E-mail: wasan_srimuang@yahoo.com[1*], asuksang@crma.ac.th[1]

[2]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120
โทรศัพท์ (662) 0 2664 1000 โทรสาร 0 3773 2260 E-mail: wanwilai@swu.ac.th[2]

Wasan Srimuang[1*] Wanwilai Kraipech[2] and Anothai Suksangpanomrung[1]

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University and Department of Mechanical Engineering, Chulachomklao Royal Military, Academy Joint Graduated Program, Thailand.
Tel (622) 0 3732 2609 Fax (662) 0 3732 2609 E-mail: wasan_srimuang@yahoo.com[1*], asuksang@crma.ac.th[1]

[2]Department of Chemical Engineering, Srinakharinwirot University, Ongkhaluk, Nakornnayok, 26120, Thailand.
Tel: (662) 0 2664 1000 Fax 0 3773 2260 E-mail: wanwilai@swu.ac.th[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้กระบวนการทางจลน์พลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) จำลองการไหลภายในอุปกรณ์ไซโคลน แบบ 3 มิติ โดยวิธีการคำนวณแบบปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume Method, FVM) ในการหาผลเฉลยสมการค่าเฉลี่ยเรโลด์นาเวีย-สโตกส์ (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations, RANS) ได้ทำการประมาณค่าภายในด้วยแบบระเบียบวิธีผลต่างควิก QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics) ร่วมกับกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation Consistent) และแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน RSM (Reynolds Stresses model) เพื่อศึกษาผลกระทบต่อลักษณะการไหลจากการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่าง (ความสูงทรงกระบอกและความสูงทรงกรวย) ของไซโคลน จากการศึกษาพบว่าขนาดของไซโคลนมีผลต่อการแยก ซึ่งลักษณะการไหลภายในไซโคลนจะไม่สมมาตร เมื่อขนาดของไซโคลนต่างกันทำให้ขนาด รูปร่างและตำแหน่งของกระแสไหลวนของอากาศเปลี่ยนไป

Abstract

An application of Computational Fluid Dynamics (CFD) technique to simulation the flow within a cyclone using the CFD commercial code, FLUENT 6.0, has been carried out in this work. The 3D-unstructured grid and Finite Volume Method (FVM) were applied. The Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS) were solved by using Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics schemes (QUICK) and Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation Consistent (SIMPLEC) algorithm. Turbulent characters were modeled by the Reynolds Stresses model (RSM). An effect of cyclone geometry (the height of cylindrical and conical parts) on the flow behavior was studied as it effect the separation performance. It can be seen that the flow in cyclone is asymmetry flow and the difference in cyclone geometry leads the difference in the size and the location of recirculation or separation zone.

1. บทนำ

ไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมเพื่อแยกฝุ่นละอองออกจากอากาศ ไซโคลนทำงานโดยอาศัยแรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าและรูปร่างของไซโคลนเอง อากาศที่ผสมอยู่กับฝุ่นจะหมุนลงด้านล่างแล้วย้อนกลับสู่ด้านบน แรงเหวี่ยงทำให้ฝุ่นที่เคลื่อนที่มากับอากาศเกิดการแยกตัวออกและตกลงสู่ด้านล่าง ลักษณะการไหลภายในไซโคลนนั้น จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน การวิจัยเกี่ยวกับไซโคลนนั้น ได้มีการทำมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในไซโคลนเพื่อที่จะนำไปสู่การปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคให้ดีขึ้น

Van Den Akker และคณะ (1999) [1] ได้ทำการจำลองแบบระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยใช้โปรแกรม FLUENT 4.47 เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่วัดโดย Laser-Doppler Velocimetry (LDV) ซึ่งแสดงความเร็วในแนวแกนและความเร็วในแนวสัมผัส จากงานวิจัยนี้พบว่า ผลจากการทำนายลักษณะการไหลภายในไซโคลน โดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\varepsilon$ และ RNG ไม่สอดคล้องกับการทดลอง แต่พบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน RSM มีเหตุผลที่ยอมรับได้ Park และคณะ (2000) [2] ได้ศึกษาสมรรถนะของไซโคลนเมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของกรวยและอัตราการไหลที่เข้าไซโคลน เขาได้ทดลองโดยการเปลี่ยนขนาดของกรวย 3 ขนาดที่อัตราการไหลแตกต่างกัน 4 ค่า ผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนขนาดของกรวยไม่มีผลต่อสมรรถนะของไซโคลน แต่ทำให้ collection efficiency เพิ่มขึ้น Vassilis G.Karanikolis (2001) [3] ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ลักษณะการไหลภายในไซโคลน โดยใช้แบบจำลองจำลองการไหลแบบปั่นป่วนต่างๆ ภายในโปรแกรม FLUENT ช่วยในการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลจากการทดลอง ในขั้นแรกใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\varepsilon$ พบว่าไม่เหมาะสมสำหรับใช้จำลองลักษณะการไหลภายในไซโคลน จากนั้นจึงได้ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน RSM ทำการจำลอง ผลการจำลองพบว่าแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนนี้เหมาะสมสำหรับใช้จำลองลักษณะการไหลภายในไซโคลน เนื่องจากเมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้กับการทดลอง พบว่าความเร็วในแนวสัมผัสและแนวแกนสอดคล้องกันเป็นอย่างดี Griffiths และ Boyson (1995) [4] ได้ทำการวิจัยเพื่อประเมินความมีประสิทธิภาพของกระบวนการทาง CFD ที่ใช้โปรแกรม FLUENT โดยทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของไซโคลนที่มีการออกแบบ 3 ทฤษฎี คือ ทฤษฎีของ Barth ทฤษฎีของ Iozia และทฤษฎีของ Leith กับการทดลอง จากการวิจัยพบว่า โปรแกรม FLUENT สามารถให้ผลการทำนายสอดคล้องกับการทดลองได้ดี คือ ลักษณะของกราฟสมรรถนะมีความคล้ายคลึงกับการทดลองเป็นอย่างดี

วสันต์และ คณะ [5] ได้ทำการจำลองการไหลภายในไซโคลนโดยใช้โปรแกรม FLUENT 6.0 เขาพบว่าการใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน RSM และใช้การประมาณค่าภายในด้วยวิธี QUICK ร่วมกับการใช้กระบวนการหาคำตอบด้วยวิธี SIMPLEC ให้ผลการการทำนายการไหลสอดคล้องกับการทดลองมากกว่าเทคนิคอื่นๆ จะเห็นได้ว่างานวิจัยต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น โดยส่วนใหญ่ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของรูปทรงไซโคลนต่อลักษณะการไหลภายในไซโคลน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของไซโคลน

2. สมการควบคุมการไหลแบบปั่นป่วน

สมการที่ใช้สำหรับปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนที่เป็นการไหลแบบสภาวะคงตัวและอัดตัวไม่ได้ ประกอบไปด้วย สมการความต่อเนื่องและสมการนาเวียร์-สโตค ของปริมาณเฉลี่ย, ($\bar{}$)

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho \bar{u}_i\right) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\rho \bar{u}_i \bar{u}_j = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{u_i' u_j'}\right) \tag{2}$$

จากระบบสมการดังกล่าว เพื่อทำให้ปัญหาเป็นแบบปิด (closure problem) จึงต้องใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนในการหาค่าความเค้นเรโนลด์ (Reynolds stresses, $-\rho\overline{u_i' u_j'}$)

3. แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนในงานวิจัยนี้ ได้ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน RSM [6] ในการคำนวณ ซึ่งสมการที่ใช้ในการหาค่าความเค้นเรโนลด์ มีรูปแบบสมการเป็นดังนี้

$$\frac{D\overline{u_i' u_j'}}{Dt} = P_{ij} + \psi_{ij} - \frac{2}{3}\varepsilon\delta_{ij} + D_{ij}^{T} + \frac{\partial}{\partial x_i}\ \mu\ \frac{\partial}{\partial x_i}\ \frac{\overline{u_i' u_j'}}{Dt} \tag{3}$$

ซึ่งพจน์แรกทางขวามือของสมการคือ ผลคูณความเค้น (P_{ij}) โดยที่

$$P_{ij} = -\left(\overline{u_i' u_k'}\frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} + \overline{u_i' u_k'}\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}\right) \tag{4}$$

สำหรับพจน์ความเครียดจากความดัน (ψ_{ij}) สามารถประมาณได้จาก

$$\psi_{ij} = -C_1\ \frac{\varepsilon}{k}\left(\overline{u_i' u_j'} - \frac{2}{3}\delta_{ij,k}\right) - C_2\left(P_{ij} - \frac{2}{3}\delta_{ij}P\right) \tag{5}$$

โดยที่ตัวแปร k และ P มีค่าเป็น

$$k = \frac{\overline{u_i' u_j'}}{2} \quad \text{และ} \quad P = \frac{P_{ij}}{2}$$

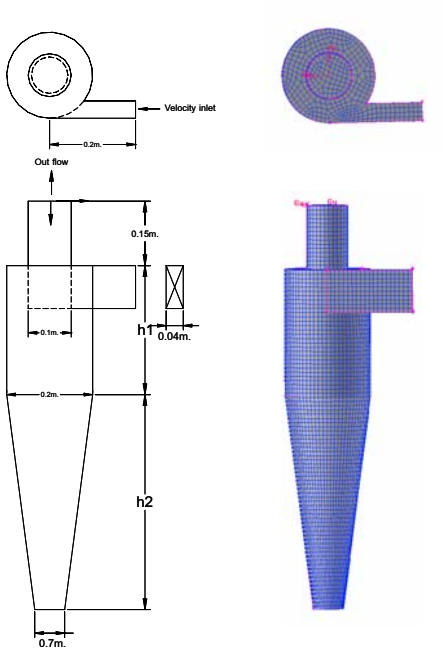
สำหรับพจน์การแพร่ของการปั่นป่วน (D_{ij}^{T}) คำนวณได้จาก

$$D^{T}{}_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k}\mu_t \frac{\partial}{\partial x_k}\overline{u_i' u_j'} \tag{6}$$

โดยที่ตัวแปร $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ส่วน k และ ε มีความสัมพันธ์แบบเดียวกันกับที่ใช้ในแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\varepsilon$ สำหรับค่าคงที่ C_1 และ C_2 ในสมการนิยมใช้เช่น 1.8 และ 0.6 [6, 7] ตามลำดับ

4. การคำนวณเชิงตัวเลข

การคำนวณระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนั้น ได้ใช้วิธีการคำนวณแบบปริมาตรสืบเนื่อง ด้วยโปรแกรม FLUENT 6.0 ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยใช้เทคนิคการคำนวณที่เหมาะสมในการจำลองการไหลภายในไซโคลนเช่นเดียวกับ วสันต์และคณะ [5] ส่วนขนาดของไซโคลนแสดงดังรูปที่ 1



(ก) (ข)

รูปที่ 1 ขนาด พารามิเตอร์ต่างๆ และลักษณะกริดของไซโคลน
(ก) ขนาดและพารามิเตอร์ต่างๆ (ข) ลักษณะของกริด

จากสมการที่ (1) และ (2) ทำการดีสครีต (discretization) โดยการอินติเกรตสมการควบคุม ตลอดทั้งปริมาตรควบคุม ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$\sum_{f}^{N_{face}} \rho \phi_n A_f = 0 \qquad (7)$$

$$a_P \phi_P = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + \sum p A_f + S \qquad (8)$$

โดยที่ ϕ เป็นค่าตัวแปรที่พิจารณา ตัวห้อย nb หมายถึง ปริมาตรข้างเคียง a_P และ a_{nb} เป็นสัมประสิทธิ์ของการทำให้อยู่ในรูปเชิงเส้น สำหรับตัวแปร ϕ_P และ ϕ_{nb} ตามลำดับ p คือ ความดัน A_f คือ พื้นผิวของด้านที่พิจารณา S คือ แหล่งกำเนิดอื่นๆ ที่ปราศจากการกระจายความดัน สำหรับการประมาณค่าในเทอมการพานั้นจะใช้ระเบียบวิธีผลต่างควิก ซึ่งหาค่าพื้นผิวได้จาก 2 กริดข้างเคียงที่อยู่ปลายลม และอีก 1 กริดที่อยู่ต้นลม มีสมการดังนี้

$$\phi_e = \frac{3}{8}\phi_E + \frac{3}{4}\phi_P - \frac{1}{8}\phi_W \qquad : F_e > 0 \qquad (9)$$

$$\phi_e = \frac{3}{8}\phi_P + \frac{3}{4}\phi_E - \frac{1}{8}\phi_{EE} \qquad : F_e < 0 \qquad (10)$$

เพื่อให้ค่าความดันและความเร็วในสมการโมเมนตัมและสมการความต่อเนื่องสอดคล้องกันเราจะใช้กระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLEC มาทำการหาผลเฉลย ดังนั้นสมการการที่ (8) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$a_P \phi_P^* = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb}^* + (p_w^* - p_e^*) + S \qquad (11)$$

เราจะสมมุติค่า p^* เพื่อให้ได้ค่า ϕ^* โดยที่ความสัมพันธ์ $p = p^* + p'$ และ $\phi = \phi^* + \phi'$ ซึ่ง p' เป็นค่าตรวจสอบความดัน ดังนั้นสมการที่ (11) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\phi_P = \frac{d_P}{1 - \sum a_{nb} / a_P}(p'_w - p'_e) \qquad (12)$$

โดยที่ $d_P = \frac{A_P}{a_P}$ จากนั้นนำค่า ϕ ที่ได้ไปแทนในสมการ (7) เพื่อตรวจสอบให้ค่าที่ได้สอดคล้องกัน

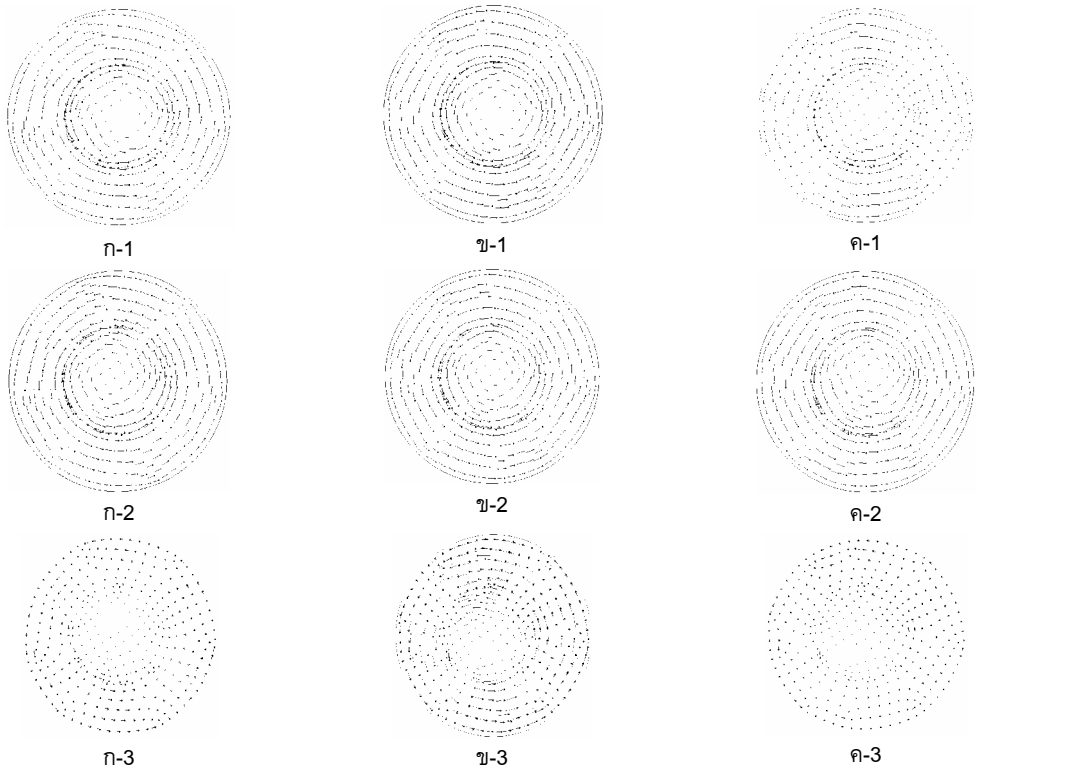
ในงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองไซโคลนโดยใช้โปรแกรม GAMBIT 2.04 ซึ่งลักษณะกริดเป็นแบบสี่เหลี่ยม มีจำนวนทั้งหมด 44,504 กริด อากาศที่ไหลเข้าในไซโคลนมีอัตราการไหล 0.08 m^3/s มีความหนาแน่น 1.225 kg/m^3 และความหนืดจลน์ 1.789×0^{-5} m^2/s โดยทางเข้าไซโคลนถูกกำหนดให้เป็นความเร็วคงที่สม่ำเสมอและทางออกเป็นแบบ out flow

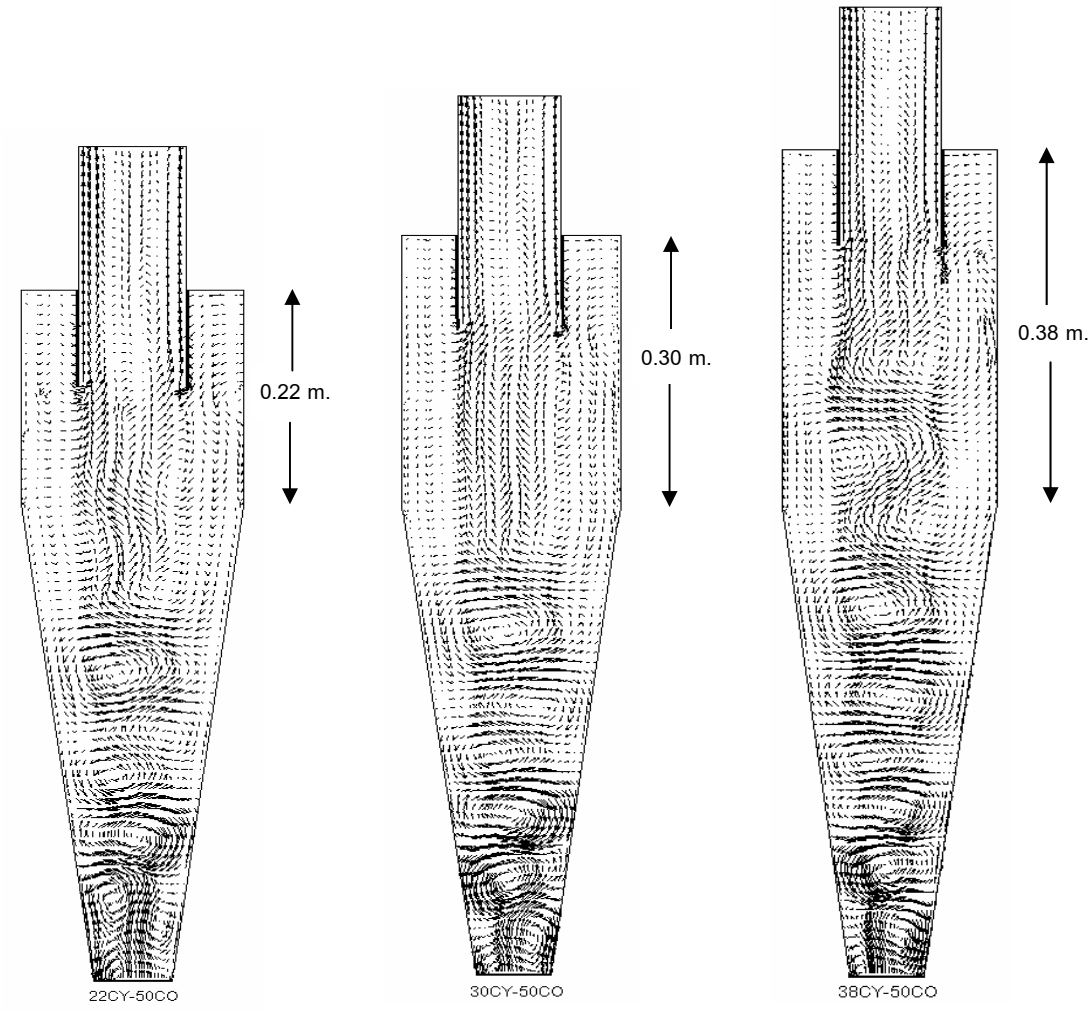
5. ผลการคำนวณและการวิจารณ์

ในการคำนวณนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงความสูงของไซโคลนจากขนาดมาตรฐาน โดยแยกเป็นการเปลี่ยนแปลงความสูงของทรงกระบอกและความสูงของทรงกรวย ในกรณีทรงกระบอกนั้นได้ทำการลดความสูงของทรงกระบอกจากเดิม 030 m.เป็น 0.22, 0.24, 0.26 และ 0.28 m. และเพิ่มความสูงเป็น 0.32, 0.34, 0.36 และ 0.38 m. ส่วนการเปลี่ยนแปลงความสูงของทรงกรวยนั้น ได้ทำการลดความสูงจากเดิม 0.50 m. เป็น 0.42, 0.44, 0.46 และ 0.48 m. และเพิ่มความสูงเป็น 0.52, 0.54, 0.56 และ 0.58 m. ผลจากการคำนวณได้แสดงการเปรียบเทียบเวคเตอร์ความเร็วดังรูปที่ 2 และ 3 แสดงการเปรียบเทียบ contour ความเร็วดังรูปที่ 4 และ 5

5.1 การเปลี่ยนแปลงความสูงทรงกระบอก

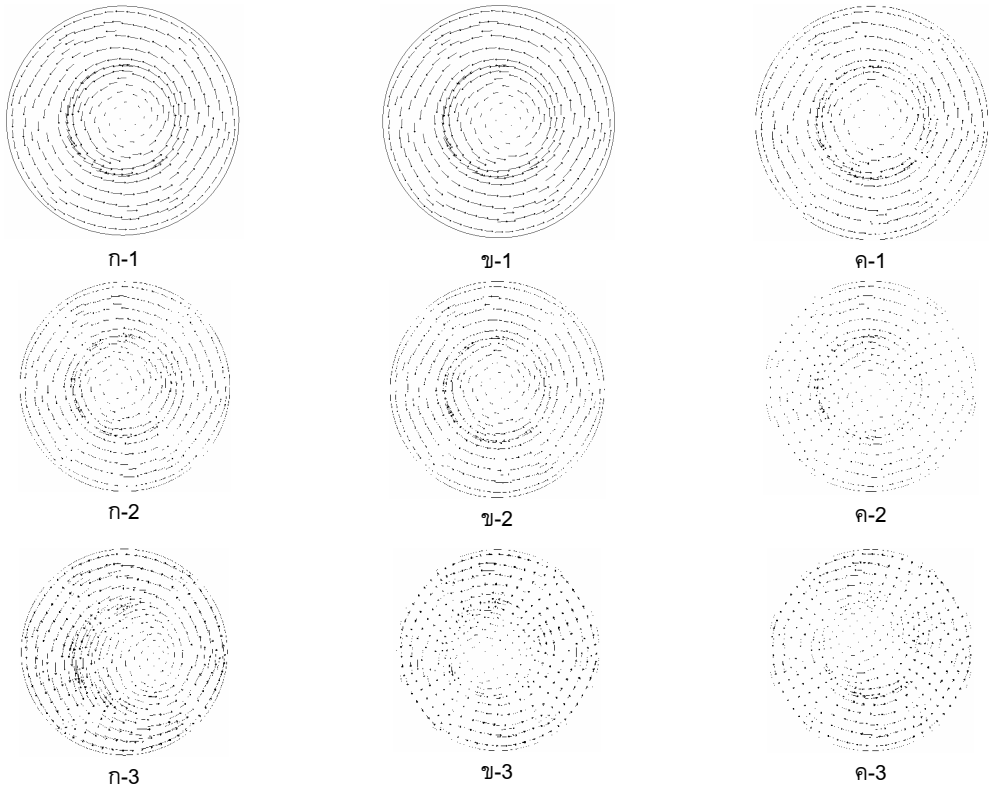
ผลจากการคำนวณเมื่อลดความสูงของทรงกระบอก จากรูปที่ 2 (ก) จะเห็นว่าลักษณะการไหลของอากาศจะมีกระแสไหลวนเพิ่มขึ้นบริเวณใต้ vortex finder ซึ่งทำให้อากาศบางส่วนของกระแสไหลวนชั้นใน (inner upward vertex) ไหลย้อนกลับ จากรูปที่ 4 (ก) จะเห็นได้ว่า แกนกลางความดันต่ำ (low pressure core) มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของกระแสไหลวนบริเวณทรงกรวยเปลี่ยนไป ผลการคำนวณเมื่อความสูงของทรงกระบอกเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 2 (ค) จะเห็นว่า มีกระแสไหลวนเพิ่มขึ้น 2 ตำแหน่งที่บริเวณทรงกระบอก จากรูปที่ 4 (ค) จะเห็นว่า แกนกลางความดันต่ำบริเวณทรงกระบอกเกิดการไม่เสถียร ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้นและบริเวณทรงกรวยยังเกิดการแตกตัวของกระแสไหลวน (vortex brake down) ขึ้น ซึ่งส่งผลดีต่อการผสมแต่ไม่ดีต่อการแยก

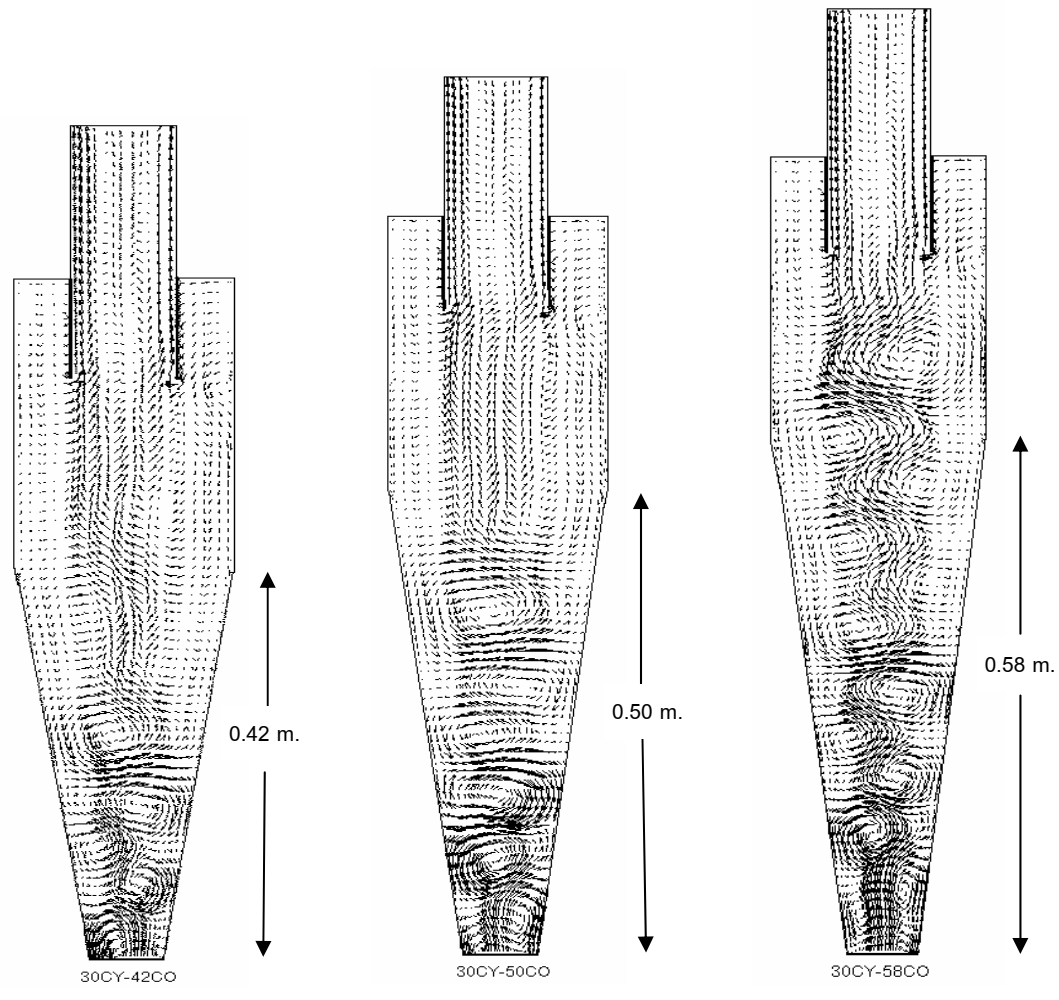




(ก) (ข) (ค)

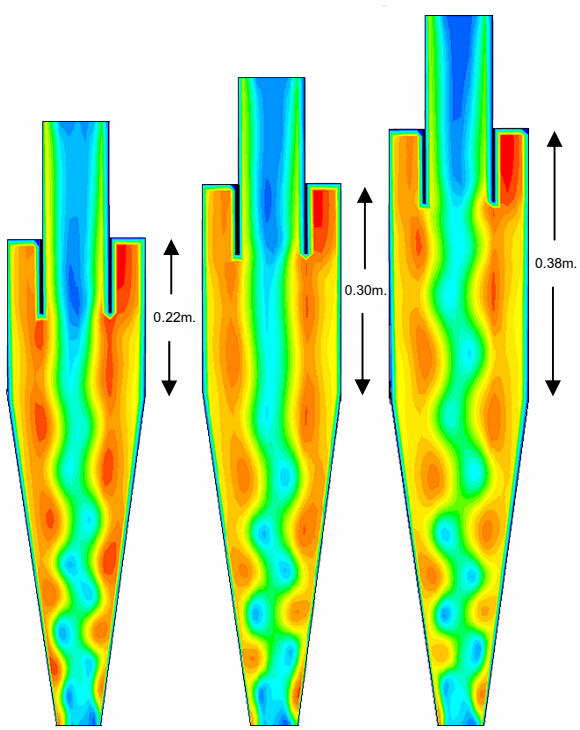
รูปที่ 2 เวคเตอร์ความเร็วของการไหลเมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงทรงกระบอก ที่ระนาบ r-θ และ r-z บริเวณใต้ vertex finder (ก-1,ข-1,ค-1) บริเวณเปลี่ยนจากทรงกระบอกเป็นทรงกรวย (ก-2,ข-2,ค-2) และบริเวณกึ่งกลางทรงกรวย (ก-3,ข-3,ค-3) (ก) h1=0.22 m.(ข) h1=0.30 m. (ค) h1=0.38 m.





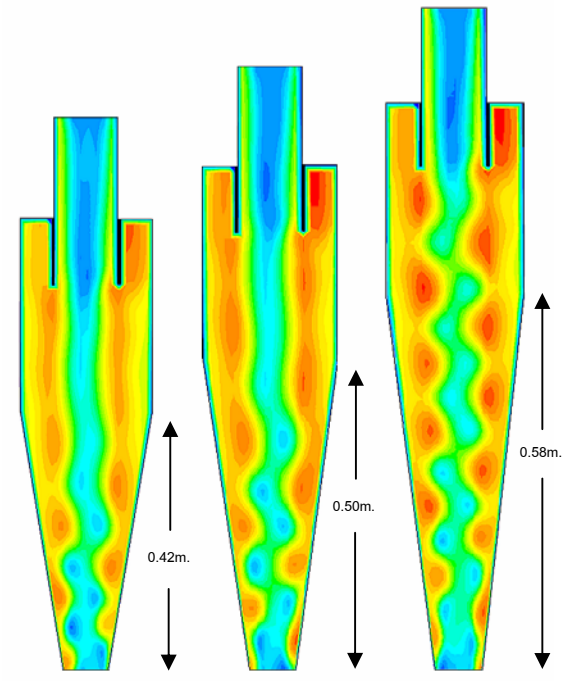
(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 3 เวคเตอร์ความเร็วของการไหลเมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงทรงกรวยที่ระนาบr-θและr-z บริเวณใต้ vertex finder (ก-1,ข-1,ค-1) บริเวณเปลี่ยนจากทรงกระบอกเป็นทรงกรวย (ก-2,ข-2,ค-2) และบริเวณกึ่งกลางทรงกรวย (ก-3,ข-3,ค-3) (ก) h2=0.42 m.(ข) h2=0.50 m. (ค) h2=0.58 m.



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 4 เปรียบเทียบ contour ความเร็วการไหลเมื่อเปลี่ยนความสูงทรงกระบอก (ก) h1=0.22 m.(ข) h1=0.30 m.(ค) h1=0.38 m.



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 5 เปรียบเทียบ contour ความเร็วการไหลเมื่อเปลี่ยนความสูงทรงกรวย (ก) h2=0.42 m.(ข) h2=0.50 m. (ค) h2=0.58 m.

5.2 การเปลี่ยนแปลงความสูงทรงกรวย

ผลจากการคำนวณเมื่อความสูงทรงกรวยลดลง รูปที่ 3 (ก) จะเห็นว่า ลักษณะการไหลของอากาศภายในไซโคลนและตำแหน่งของกระแสไหลวนเปลี่ยนไป โดยเฉพาะบริเวณทรงกรวยจำนวนของกระแสไหลวนจะลดลง รูปที่ 5 (ก) จะเห็นได้ว่า ลักษณะของแกนกลางความดันต่ำจะต่างกับเดิมเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อความสูงของทรงกรวยเพิ่มขึ้น รูปที่ 3 (ค) จะเห็นว่า จำนวนการเกิดกระแสไหลวนจะเพิ่มขึ้นจาก 6 จุดเป็น 10 จุด โดยเฉพาะบริเวณทรงกระบอกจะแตกต่างจากเดิมมาก จากรูปที่ 5 (ค) จะเห็นว่า แกนกลางความดันต่ำเกิดการไม่เสถียรอย่างรุนแรงมากกว่ากรณีเพิ่มความสูงของทรงกระบอก ทำให้มีการไหลแบบปั่นป่วนมากขึ้นและยังเกิดการแตกตัวของกระแสไหลวนขึ้น 2 ตำแหน่งที่บริเวณทรงกระบอกและทรงกรวย

6.สรุป

จากการศึกษาผลกระทบต่อลักษณะการไหลจากการเปลี่ยนความสูงของไซโคลน โดยใช้โปรแกรม FLUENT 6.0 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความสูงของไซโคลนทำให้ลักษณะการไหล ขนาด รูปร่างและตำแหน่งของกระแสไหลวนของอากาศเปลี่ยนไป โดยการเพิ่มความสูงทรงกระบอกและทรงกรวยทำให้การไหลมีความปั่นป่วนมากขึ้นและการลดความสูงของทรงกรวยมีแนวโน้มจะทำให้การแยกดีกว่าขนาดเดิม แต่อย่างไรก็ตามควรจะทำการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องอีกต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

[1] H.E.A. Van Den Akker, A.J Hoekstra, J.J. Derksen, “An experimental and numerical study of turbulent weirling flow in gas cyclones”. Krners Laboratiorium voor Fysische Technologie. J.M. Burgers Centre for Fluid Mechanics, Delft University of Technology., 1999.

[2] S.H. Park, Ongbiao Xiang, K.W. Lee, “Effects of cone dimension on cyclone performance”, Department of Environmental Science and Engineering, Kwangju Institute of Science and Technology, South Korea., 2000.

[3] Vassilis G.Karanikolis, “CFD Analysis of a cyclone separator using FLUENT”, Department of Mechanical Aerospace and Manufacturing Engineering, University of Manchester of Science and Technology., 2001.

[4] W.D.Griffiths & F.Boyson, “Computational fluid dynamics and empirical modeling of the performance of a number of cyclone samplers”, Journal of Aerosol Science, p281- 304., 1996.

[5] วสันต์และคณะ “การคำนวณระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของการไหลภายในไซโคลน”, การประชุมวิชาการองค์กรเครือข่ายวิศวกรรมการบินและอวกาศครั้งที่ 2 จังหวัดเชียงใหม่, 2547.

[6] H.K. Versteeg and W. Malalasekera, “An Introduction to Computational fluid dynamics”, England, The Finite Volume Method, Longman Scientfic & Technical, Longman Group Limited., 1995.

[7] FLUENT User’s Guide version 6.0, USA., 2001.