

## ผลของจำนวนกริดและคุณภาพของกริดต่อความแม่นยำในการคำนวณทาง CFD ของ การไหลในไซโคลน

### Effect of Number of Grid and Grid Quality for calculate accuracy Using CFD of Flow inside Cyclone

นเรศ เจริญขวัญ<sup>1\*</sup>, พีระพงศ์ ทีฆสกุล<sup>1</sup> และธวัชชัย ชรินพานิชกุล<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

\* อีเมล [pejit@hotmail.com](mailto:pejit@hotmail.com) [perapongt@psu.ac.th](mailto:perapongt@psu.ac.th) และ [ctawat@chula.ac.th](mailto:ctawat@chula.ac.th) โทร 0-7428-7036 โทรสาร 0-7421-2893

#### บทคัดย่อ

ไซโคลนเป็นอุปกรณ์ดักจับฝุ่น โดยเมื่ออากาศที่มีฝุ่นละอองไหลเข้าไปในไซโคลน ในแนวสัมผัส จะเกิดกระแส

หมุนวนภายในไซโคลน ทำให้ฝุ่นละอองถูกเหวี่ยงไปชนกับผนังด้านข้าง ฝุ่นละอองจึงตกลงสู่ด้านล่าง ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการไหลในไซโคลน ด้วย กระบวนการทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) โดยวิธีการคำนวณแบบปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method, FVM) ซึ่งเป็นการคำนวณจากสมการควบคุมที่คำนวณผ่านปริมาตรควบคุมหรือกริด เพื่อทำนายการไหลของของไหลในบริเวณที่ศึกษา ซึ่งการคำนวณแบบนี้กริดเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการคำนวณ ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของ กริด โดยการจำลองการไหลภายในไซโคลน 3 มิติ เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยของ Slack et al. [1] โดยศึกษาจำนวนของกริดที่ 80,478, 84,015, 89,310, 125,301 และ 163,371 กริด ซึ่งคุณภาพของกริดในการคำนวณแต่ละจำนวนนั้นมีคุณภาพไม่ต่ำกว่า 80 % ของคุณภาพกริดทั้งหมดในแบบจำลอง ซึ่งผลการคำนวณพบว่าเมื่อจำนวน กริดเพิ่มขึ้น ผลการคำนวณเข้าใกล้การทดลองมากกว่าผลการคำนวณของ Slack et al. [1]

**คำหลัก:** กริด คุณภาพกริด ไซโคลน

#### Abstract

Cyclone is an aerosol particle collection device generally used as a pre-cleaner to remove large particles. When the dust-laden gas flow into the cyclone in tangential direction, a swirl motion takes place. Large particles having high inertia are collected at the inside wall due to centrifugal force. In this work, a Computational Fluid Dynamics employing Finite Volume Method was used to calculate velocities in the cyclone. Number of grid used is an important variable affecting calculation accuracy. Then the accuracy of grid was studied and comparison was made with results from experiment and simulation. The number of grid used in this work was set at 80,478, 84,015, 89,310, 125,301 and 163,371. In each case grid quality from calculation was greater than 80 % of total grid quality in the model. Results show that in-

creasing the number of grid increases accuracy of calculations. Results from the current work are generally in better agreement with the experimental results than those from the literature.

**Keywords:** Grid, Grid Quality, Cyclone

## 1. บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมในประเทศไทย มีความสำคัญอย่างมาซึ่งเป็นผลมาจากความเจริญก้าวหน้าทางอุตสาหกรรม และปัญหาจากฝุ่นละอองในอากาศก็ถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญ การควบคุมฝุ่นละอองในอากาศสามารถทำได้ โดยใช้อุปกรณ์ดักฝุ่น เช่น ไซโคลน แผ่นใยกรอง เป็นต้น ไซโคลน เป็นอุปกรณ์สำหรับแยกอนุภาคออกจากอากาศ โดยใช้แรงหนีศูนย์กลาง ซึ่งเกิดจากการทำให้กระแสอากาศหมุนวน (vortex) จึงสามารถแยกอนุภาคออกจากอากาศได้ ซึ่งไซโคลนสามารถสร้างง่าย ราคาถูก คัดแยกอนุภาคฝุ่นได้ในปริมาณที่มาก ๆ ได้ดี ไม่ต้องการดูแลรักษามากนักเนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ แต่ไซโคลนโคลนก็มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถดักอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ ไม่สามารถดักหรือแยกอนุภาคฝุ่นที่มีสภาพเปียกได้ และความดันสูญเสียของอากาศที่ผ่านไซโคลนมีค่าค่อนข้างมาก [2] จากข้อจำกัดเหล่านี้จึงได้มีการศึกษาและพัฒนาไซโคลน โดยการผสมผสานของกลไกการดักจับ เช่น ไซโคลนสกรับเบอร์ ที่เอาหลักการของหยดน้ำจับอนุภาคขนาดเล็กที่ไซโคลนไม่สามารถดักได้ เพื่อให้สามารถจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้ด้วยหยดน้ำ และไฮโดรไซโคลน เป็นการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลว [3,4]

การศึกษาสมรรถนะของไซโคลน สามารถทำได้ทั้งในแง่การทดลองและการจำลองการไหล ซึ่งการจำลองการไหล สามารถทำได้โดย การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ซึ่ง เป็นกระบวนการแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation) และวิธีนี้ยังสามารถช่วยให้ทราบโปรไฟล์การไหลของของไหล โดยเป็นประโยชน์กับงานวิจัยอย่างมากที่จะทำการพัฒนาไซโคลน ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมเป็นอย่างมาก

Jolius et al. [5] ได้ทำการศึกษานาตรกรวยของไซโคลน ที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะการ

เคลื่อนที่ในไซโคลน และลักษณะของการเคลื่อนที่ โดยทำการจำลองการไหลแบบ Turbulent ที่เป็นแบบ re-normalization group,  $RNG\ k-\epsilon$  กับ Reynolds stress equation model (RSM) ในไซโคลน 3 ขนาดที่มีการเปลี่ยนแปลงทรงกรวยของไซโคลน พบว่าการจำลองการไหลแบบ Reynolds stress equation model (RSM) ให้ผลของ Pressure drop และระดับของประสิทธิภาพการดักจับอนุภาค และอนุภาคตัดไม่เบี่ยงเบนจากการทดลองมากนัก Chuah et al.[6] ได้ทำการศึกษาแนวโน้มของ Pressure drop ต่ออุณหภูมิและความเร็วที่เข้าไปในไซโคลน โดยประยุกต์ใช้วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) และทำการจำลองการไหลแบบ Turbulent ที่เป็นแบบ renormalization group,  $RNG\ k-\epsilon$  และ Reynolds stress equation model (RSM) โดยทดลองกับรูปร่างของไซโคลน 2 แบบ คือ Stairmand high efficiency และ Bohnet พบว่า การจำลองแบบ Reynolds stress equation model (RSM) ให้ผลใกล้เคียงมากที่สุดกับการทดลอง กับปนาท [7] ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของของไหลและอนุภาคขนาดเล็กกว่าระดับไมครอน และความดันสูญเสียไซโคลน โดยประยุกต์ใช้วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) พบว่า ประสิทธิภาพดักจับอนุภาคและความดันลด ที่ได้จากการจำลองมีความใกล้เคียงเป็นอย่างดี กับผลการทดลองของ Dirgo and Leith [8] และ Yoshida [9] โดยการใช้แบบจำลอง Reynold Stress Model (RSM) จะให้ผลการจำลองที่สอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่าใช้แบบจำลอง Turbulent standard  $k-\epsilon$  และ  $RNG-k-\epsilon$  ทรงฤทธิ์ [10] ได้ทำการศึกษาการจำลองเชิงตัวเลขของการไหล โดยจำลองการไหลแบบ Turbulent ในการคำนวณ โดย Turbulent ผ่านเครื่องกำเนิดการหมุนวนแบบท่อหมุน รอบแนวแกน แบ่งการคำนวณออกเป็นสองบริเวณ ที่ต่อเนื่องกัน ผลที่ได้คือ การหมุนแบบอ่อน สำหรับแบบจำลอง Rey-

nolds stress equation model (RSM) ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าแบบจำลอง Turbulent standard  $k-\varepsilon$  และแบบจำลอง Reynolds stress equation model (RSM) แสดงโปรไฟล์ความเร็วที่สอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดี

แต่การคำนวณทางจลนพลศาสตร์ของไหลนี้ จะมีความถูกต้องแม่นยำก็ยิ่งขึ้นอยู่กับหลาย ๆ อย่าง เช่น กริด แบบจำลองการไหล กระบวนการหาคำตอบ และการประมาณค่าภายในโดยแบบระเบียบวิธีผลต่าง ซึ่งล้วนแต่จะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสม กับแบบจำลองที่จะจำลอง โดยในช่วงต้นนี้ งานวิจัยจึงได้ศึกษาผลของกริดที่ผลต่อความแม่นยำในการคำนวณแบบกระบวนการทางพลศาสตร์ของไหล ซึ่งทำการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Slack et al. [1]

## 2. สมการควบคุมการไหลแบบปริมาตร

สมการที่ใช้ในงานวิจัยเป็นปัญหาของการไหลปั่นป่วนในสถานะคงตัว (steady state) และอัดตัวไม่ได้ แบบ 3 มิติโดยวิธี SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) ซึ่งเป็นวิธีที่หาค่าความดันและความเร็วในสมการโมเมนตัมและสมการความต่อเนื่อง เพื่อให้สอดคล้องกัน โดยการสมมติความดันและความเร็วของปัญหาการไหล ที่พิจารณาเพื่อนำค่าความเร็วที่คำนวณได้ไปหาค่าความดันอีกครั้งโดยวิธี pressure correction ในการคำนวณที่ถูกต้อง จากนั้นนำค่าความดันมาคำนวณค่าของความเร็ว แล้วทำซ้ำตามขั้นที่ได้กล่าวมาจนผลเฉลยเข้าสู่ค่าที่กำหนด และ ระเบียบวิธีไฟไนต์โวลุ่ม (Finite Volume) ที่เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่อาศัยการอินทิเกรตสมการการอนุรักษ์บนปริมาตรควบคุมที่ประกอบด้วยสมการ ความต่อเนื่อง และสมการ นาเวียร์-สโตค ดังแสดงต่อไปนี้

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

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

## 3. แบบจำลองการไหลแบบปริมาตร

ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองการไหล แบบปั่นป่วน RSM ในการคำนวณ เพราะแบบจำลองนี้สามารถทำนายการไหลวนของอากาศได้ดี ซึ่งเหมาะสมกับการคำนวณการไหลในไซโคลน โดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho U_k \bar{u}_i \bar{u}_j) = D_{ij} + P_{ij} + \Pi_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

$D_{ij}$  คือ การแพร่การปั่นป่วน โดยที่

$$D_{ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \overline{\rho u_i u_j u_k} + (\bar{p} u_j) \delta_{ik} + (\bar{p} u_i) \delta_{jk} - \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} \right) \right] \quad (4)$$

$P_{ij}$  คือ ผลคูณความเค้นความดัน

$$P_{ij} = -\rho \left[ \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_i} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right] \quad (5)$$

$\Pi_{ij}$  คือ ความเครียดจาก

$$\Pi_{ij} = p \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

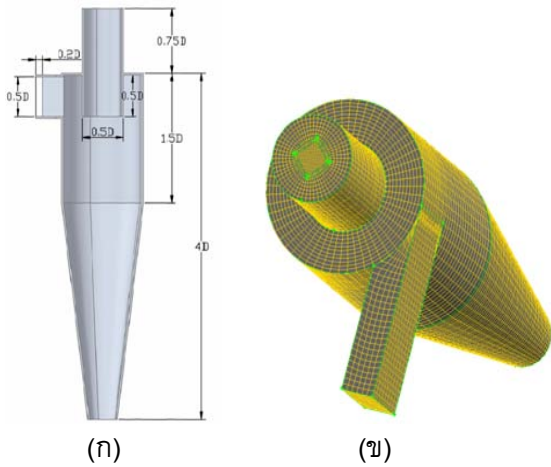
$\varepsilon_{ij}$  คือ อัตราการแพร่กระจาย

$$\varepsilon_{ij} = -2\mu \overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k}} \quad (7)$$

## 4. เงื่อนไขการจำลอง

การคำนวณในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Fluent 6.3.26 โดยใช้ขนาดไซโคลนของ Slack et al. [1] เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณของ Slack et al.[1] กับผลการทดลอง โดยขนาดของไซโคลนแสดงดังรูปที่ 1 โดย รูปที่ 1 (ก) แสดงขนาดที่  $D = 205$  m. และรูปที่ 1 (ข) แสดงลักษณะกริดบนแบบจำลอง โดยทำการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม GAMBIT 2.2.30 ลักษณะของกริดเป็นสี่เหลี่ยมทั้งหมดในแบบจำลองซึ่งลักษณะของกริดในแบบจำลองในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างเหมือนแบบจำลองของ Slack et al.[1] และจากนั้นทำการเช็คคุณภาพของกริด โดยตรวจสอบการ

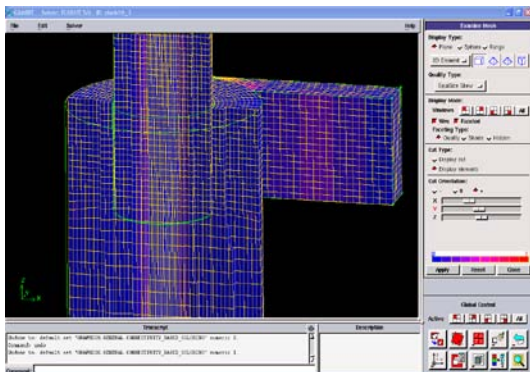
เรียงตัวของกริดภายในแบบจำลองดังรูปที่ 2 แถบสี่ด้านขวามือของรูปที่ 2 จะบอกคุณภาพ ซึ่งสีน้ำเงินแสดง กริดที่มีคุณภาพมากที่สุด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ในงานวิจัยนี้ใช้ลักษณะการเรียงตัวและรูปร่างของกริดไม่ต่ำกว่า 80% ของคุณภาพกริดทั้งหมดในแบบจำลอง โดยจำนวนของกริดที่ใช้คำนวณนั้นมี 80,478, 84,015, 89,310, 125,301 และ 163,371 กริด เพื่อเปรียบเทียบผลของ Slack et al.[1] ที่มีจำนวน 40,000 กริด ที่เงื่อนไขเดียวกันทั้งหมด



รูปที่ 1 ขนาดและลักษณะกริดของไซโคลน

(ก) ขนาดของไซโคลน (ข) ลักษณะของไซโคลน

อากาศที่ไหลเข้าในไซโคลน มีความหนาแน่น  $1.225 \text{ kg/m}^3$  มีอัตราการไหล  $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$  โดยทางเข้าไซโคลนถูกกำหนดให้  $\square$  ความเร็วเฉลี่ยคือ  $19.04 \text{ m/s}$  และทางออกเป็นแบบ outflow



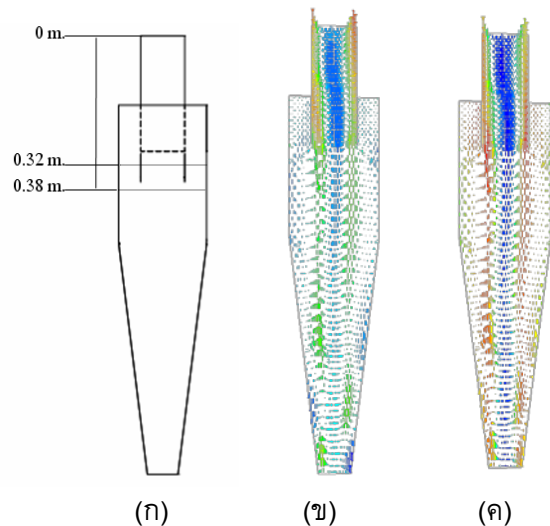
รูปที่ 2 แสดงการตรวจคุณภาพของกริดในโปรแกรม GAMBIT 2.2.30

### 5. ผลการคำนวณและวิจารณ์

จากผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Fluent 6.3.26 ได้นำผลความเร็วหมุนวนดังรูปที่ 3 ภายในไซโคลนมาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง Slack et al.[1] ซึ่งมีโปรไฟล์ความเร็วดังรูปที่ 4 โดยแบ่งเป็นความเร็วแนวสัมผัสและในแนวแกนตำแหน่งที่ 0.32 m และ 0.38 m ของ



รูปที่ 3 โปรไฟล์ความเร็วหมุนวนภายในไซโคลน



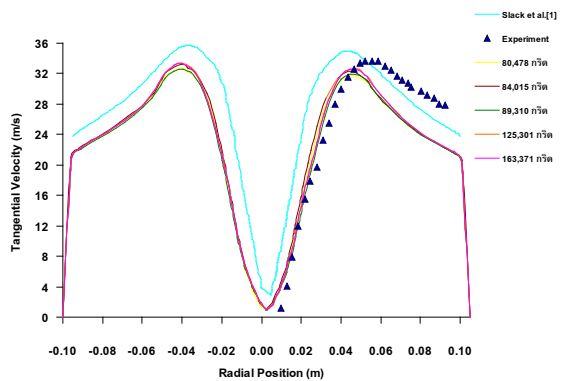
รูปที่ 4 แสดงตำแหน่งความเร็ว (ก) ตำแหน่งที่นำมาเปรียบเทียบกับ (ข) โปรไฟล์ความเร็วในแนวสัมผัส (ค) โปรไฟล์ความเร็วในแนวแกน

จากนั้นนำค่าที่ได้ทำการคำนวณได้ มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณของ Slack et

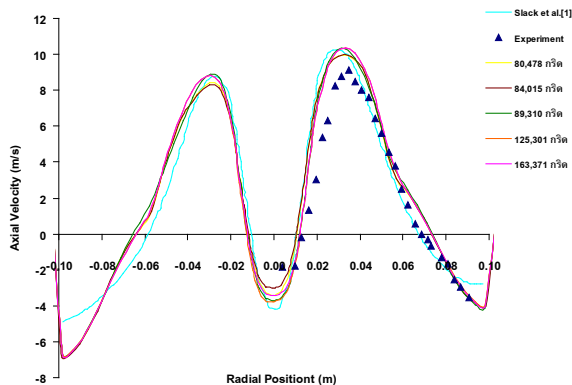
al. [1] โดยการคำนวณค่าเบี่ยงเบนจากสมการที่ 8.

$$\frac{\sum_{i=1}^N |V_{i,cal} - V_{i,exp}| / V_{i,exp}}{N} \times 100 \quad (8)$$

เมื่อ  $V_{cal}$  คือ ความเร็วที่ได้จากการคำนวณ  $V_{exp}$  คือ ความเร็วที่ได้จากการทดลอง  $N$  คือ จำนวนตำแหน่งของความเร็วในการคำนวณ พบว่าที่ระยะ 0.32 m. ความเร็วในแนวสัมผัส Slack et al. [1] คำนวณได้นั้น มีความเบี่ยงเบนจากการทดลองอยู่ 67.2% จากการเพิ่มจำนวนกริดแล้วทำการคำนวณที่ระยะเดียวกัน ความเร็วในแนวสัมผัสที่มีความเบี่ยงเบนจากการทดลองอยู่ที่ 25.0% และความเร็วในแนวแกนของ Slack et al. [1] มีความเบี่ยงเบนจากการทดลองอยู่ที่ 88.2%



(ก)

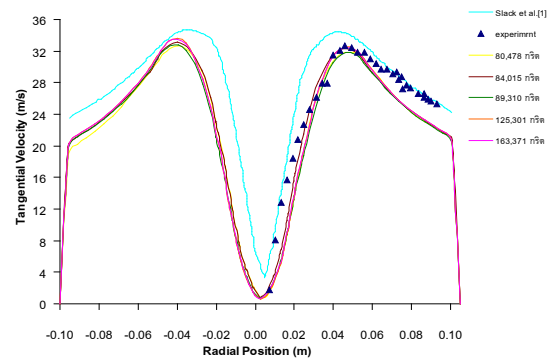


(ข)

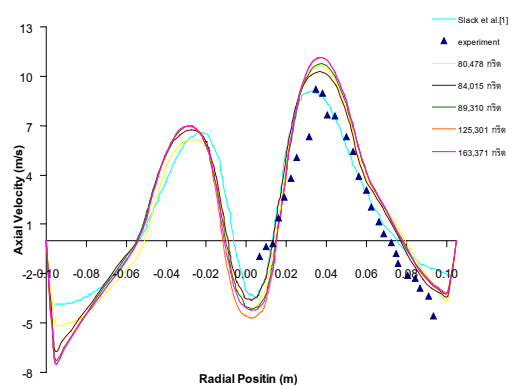
รูปที่ 5 โปรไฟล์ความเร็วตำแหน่ง 0.32 m.

(ก) ความเร็วในแนวสัมผัส (ข) ความเร็วในแนวแกน และความเร็วในแนวแกนของงานวิจัยนี้ที่มีความเบี่ยงเบนอยู่ที่ 86.5% ดังรูปที่ 5 ส่วนที่ระยะ 0.38 m. ความเร็วในแนวสัมผัส Slack et al.[1] คำนวณได้นั้นมี

ความเบี่ยงเบนจากการทดลองอยู่ที่ 18.9% ความเร็วในแนวสัมผัสของงานวิจัยนี้ที่มีความเบี่ยงเบนจากการทดลองอยู่ที่ 12.5% และความเร็วในแนวแกนของ Slack et al. [1] มีความเบี่ยงเบนจากการทดลองอยู่ 78.3% และความเร็วในแนวแกนของงานวิจัยนี้มีความเบี่ยงเบนคือ 151.1% ดังรูปที่ 6 ซึ่งการคำนวณของงานวิจัยนี้ความเร็วในแนวสัมผัส นั้นใกล้เคียงการทดลองมากกว่าผลการคำนวณของของ Slack et al. [1] และผลการคำนวณในแนวแกนก็มีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณของ Slack et al. [1] อาจเป็นผลอันเนื่องมาจากผลของคุณภาพของกริด ซึ่งคุณภาพของกริดนั้นเป็นการบอกถึงการเรียงตัวและการเรียงตัวของกริดในแบบจำลอง โดยโครงสร้างของกริดทำให้การคำนวณในรูปของเมตริกซ์ง่ายขึ้นเพราะสามารถ



(ก)



(ข)

รูปที่ 6 ความเร็วตำแหน่ง 0.38 m.

(ก) ความเร็วในแนวสัมผัส (ข) ความเร็วในแนวแกน อ้างอิงจากพิกัดฉากง่ายขึ้น และกริดเป็นตัวแทนย่อยๆ ของแบบจำลองที่ถูกคำนวณผ่านสมการควบคุม ดังนั้นจำนวนและการเรียงตัวของกริดส่งผลกระทบต่อ

ความแม่นยำในการคำนวณคำนวณ และจำนวนกริดก็ส่งผลต่อความแม่นยำในการคำนวณเช่นกัน เพราะจากงานวิจัยชี้ให้เห็นว่าความเร็วในแนวสัมผัสเข้าใกล้การทดลองมาก เนื่องมาจากจำนวนการเรียงตัวของกริดในการคำนวณความเร็วแนวสัมผัสหรือของงานวิจัยมีมากกว่าของ Slack et al. [1] ดังนั้นความแม่นยำในการคำนวณก็ขึ้นอยู่กับจำนวนการเรียงตัวของกริดในแบบจำลอง โดยแต่ละช่วงในแบบจำลองความละเอียดของกริดก็มีผลในการคำนวณ และบางช่วงอาจไม่ต้องการความละเอียดมากการคำนวณก็ใกล้เคียงกับการทดลอง

## 6. สรุป

จากผลการคำนวณของแบบจำลองไซโคลน โดยนำผลมาเปรียบเทียบกับของ Slack et al. [1] จำนวนของกริดและการเรียงตัวของกริดในแบบจำลองนั้นส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการคำนวณ

## 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ผู้เขียน ขอขอบพระคุณศูนย์กริด มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่อนุเคราะห์ให้ส่งงานวิจัยนี้ไปประมวลผลในศูนย์กริด

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Slack, M.D., Prasad, R.O., Bakker, A. and Boysan,F., (2000). Advances in cyclone modeling using unstructured grid, *Chemical Engineers Research and Design*, vol. 78(8), November 2000, pp. 1098-1104
- [2] ปราโมช เชี่ยวชาญ (2552). *อุปกรณ์ควบคุมมลพิษชนิดอนุภาค*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา [www.safety-stou.com/UserFiles/File/54114-5.PDF](http://www.safety-stou.com/UserFiles/File/54114-5.PDF)
- [3] สามารถ พรเจริญ (2546). *การเก็บฝุ่นขนาดเล็กด้วยไซโคลนสกรับเบอร์*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระเกล้าธนบุรี, หน้า 6-18.
- [4] ธรรมบุญ จันท์ปรียากุล (2550). การจำลองแบบประสิทธิภาพการคัดแยกอนุภาคที่มีความยืดหยุ่นด้วยไฮโดรไซโคลน, *การประชุมวิชาการวิศวกรรม*

เคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 โรง  
แรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่

- [5] Chuah, T.G., Gim bun, J.L. and Choong, S.Y., (2006). A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics, *Powder Technology*, vol. 162(2), March 2006, pp. 126 – 132.
- [6] Gim bun, J.L., Chuah, T.G., Fakhru I-Razi, A. and Choong S.Y., (2005). The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a CFD study, *Chemical Engineering and Processing*, vol. 44(1), January 2005 pp. 7–12.
- [7] กัมปนาท แก้วปลั่ง 2547. *การจำลองการเคลื่อนที่ 3 มิติ ของอนุภาคเดี่ยวตามการไหลแบบปั่นป่วนในก๊าซไซโคลนแบบเป่าลง*, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 4-91.
- [8] Dirgo, J. and Leith, D., (1985). Cyclone collection efficiency : Comparison of experimental Results with theoretical predictions, *Aerosol science and technology*, vol. 4 December 1985, pp. 401-415
- [9] Yoshid, H., (1996). Three-dimensional simulation of air cyclone and particle separation by a revised-type cyclone, *Colloids and surfaces*, vol. 109 April 1996, pp. 1-12
- [10] ทรงฤทธิ์ ต้นชัชวาล, ปฐมยศ วัลลิกุล และ บัณฑิต พุ่งธรรมสาร, 2545. *การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลหมุนวนเทอร์บิวเลนซ์:กรณีเครื่องกำเนิดการหมุนวนแบบท่อหมุนรอบแนวแกน*, วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 2 ฉบับที่ 3.