

การจำลองระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลภายในไซโคลน

ปริญญาโท  
ของ  
วสันต์ ศรีเมือง

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ตุลาคม 2547

ลิขสิทธิ์เป็นของ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

๐๐๐ ๙๙๐

๐ ๓๕๕๖

๕.๓

การจำลองระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลภายในไซโคลน

บทคัดย่อ  
ของ  
วสันต์ ศรีเมือง

26 ส.ค. 2548

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

ตุลาคม 2547

๒ ๒๕๖๕๕๐

วสันต์ ศรีเมือง. (2547). การจำลองระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลภายใน  
ไซโคลน. ปรินซ์นิพนธ์ วิศวกรรม (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม : ดร.วรรณวิไล ไกรเพชร,  
พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง.

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์กระบวนการคำนวณทางคณิตศาสตร์ (Computational Fluid Dynamics) การจำลองการไหลภายในอุปกรณ์ไซโคลน ด้วยโปรแกรม FLUENT 6.0 โดยใช้ Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations (RANS) พบว่า ผลที่ได้จากแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน RSM และการใช้กระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLEC ร่วมกับการประมาณค่าภายในด้วยระเบียบวิธีแบบ QUICK ให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลอง จากนั้นได้ศึกษาพฤติกรรมของการไหลจากการเปลี่ยนขนาดของไซโคลน (ความสูงของทรงกระบอก และทรงกรวย) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยก จากการศึกษาพบว่า การไหลของอากาศภายในไซโคลนมีลักษณะที่ไม่สมมาตร ขนาดของไซโคลนต่างกัน เป็นผลให้ขนาด และตำแหน่งของกระแสไหลวนของอากาศที่เกิดขึ้นภายในไซโคลนเปลี่ยนไป การลดความสูงของทรงกรวยทำให้ความปั่นป่วนลดลง ซึ่งน่าจะส่งผลดีต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค

ส่วนการจำลองการไหลของอนุภาคในไซโคลน นั้น พบว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและความเร็วของอนุภาคมากขึ้นทำให้การแยกอนุภาคดีขึ้น ตำแหน่งของอนุภาคที่ไหลเข้ามีผลต่อลักษณะของเส้นการไหลของอนุภาคและประสิทธิภาพการแยกอนุภาค ผลจากการศึกษาในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุง และพัฒนาออกแบบอุปกรณ์ไซโคลนต่อไป

NUMERICAL SIMULATION OF THE FLOW WITHIN CYCLONE SEPARATORS

AN ABSTRACT  
BY  
WASAN SRIMUANG

Presented in partial fulfillment of the requirements  
for the Master of Engineer degree in Mechanical Engineering  
at Srinakharinwirot University

October 2004

Wasan Srimuang. (2004). *Numerical Simulation of the Flow Within Cyclone Separators*.  
M.Eng. (Mechanical Engineering). Advisor Committee : Dr.Wanwilai Khaipech,  
Asst. Prof. Dr. Anothai Suksangpanomrung.

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 turbulence induced by swirling motion was calculated by using the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS). It was found that only the results obtained from using the RSM model and solving by the SIMPLEC algorithm and QUICK schemes, are in agreement with the experimental data. An effect of cyclone geometry (the height of cylindrical and conical parts) on the flow behavior was studied as it effects 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. A decrease in the height of conical part in this section can reduce the turbulent level of the flow, that could cause the better efficiency in separation.

The simulations of particle (Ash) flow within this equipment were investigated. It was found that the size and the velocity of the particle have significantly effect on the separation performance. The initial position of particle also has an effect on its particle trajectory, and subsequently the separation performance. The results of this study are useful since it offers an idea for improving cyclone design.

**Key words** : Computational Fluid Dynamics, Cyclone, Turbulence Models.

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การจำลองระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลภายในไซโคลน

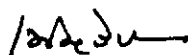
ของ

นายวสันต์ ศรีเมือง

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

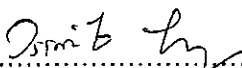


..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญสิริ จีระเดชากุล)

วันที่ 10 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2547

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์



..... ประธาน

(อาจารย์ ดร.วรรณวิไล ไกรเพชร)

..... พ.ศ. ๑๐๓๕ รุ่งทรงธรรม

(พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโนทัย สุขแสงพนมรุ่ง)

..... กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(อาจารย์ ดร.พิชัย อัญมมงคล)



..... กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์)

## ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้นั้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่าน ดร.วรรณวิไล ไกรเพ็ชร์ และท่าน พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำปรึกษา และคำแนะนำ ตลอดจนการตรวจสอบความถูกต้องทางเนื้อหาวิชาการ และแก้ไขข้อบกพร่อง เพื่อให้งานออกมาอย่างมีคุณภาพมากที่สุด

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ โครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่าง มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กับโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความสามารถทางวิชาการ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างยิ่ง ประโยชน์และคุณค่าของงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้ผู้มีพระคุณทุกท่าน และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยเล่มนี้ จะมีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจในเนื้อหารายละเอียดต่าง ๆ เป็นอย่างดี และจะมีส่วนในการพัฒนาประเทศชาติให้เจริญก้าวหน้าต่อไป หากมีข้อผิดพลาด หรือมีข้อบกพร่องประการใด ผู้วิจัยขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

วสันต์ ศรีเมือง

## สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ .....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
ขอบเขตของการวิจัย .....	2
วิธีการดำเนินการวิจัย .....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับไซโคลน .....	4
ลักษณะการไหลภายในไซโคลน .....	4
ทฤษฎีของไซโคลน .....	4
แฟคเตอร์ของการแยก .....	5
ขนาดของไซโคลน .....	5
บทปริทัศน์วรรณกรรม .....	7
3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....	9
สมการพื้นฐาน .....	9
แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน .....	11
ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข .....	14
การดีสครีตไทเซชัน .....	16
การประมาณค่าของอินทิกรัลพื้นผิว .....	17
กระบวนการหาคำตอบ .....	21
เงื่อนไขขอบ .....	23
สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค .....	25
ขั้นตอนและลำดับการแก้สมการ .....	25
ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการจำลอง .....	26

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการจำลองเพื่อหา CFD เทคนิคที่เหมาะสมสำหรับไซโคลน .....	28
การคำนวณการไหลจากการใช้เทคนิคต่างๆ .....	28
การหาจำนวนกริดที่เหมาะสม .....	30
การเปรียบเทียบการใช้แบบวิธีการประมาณค่าภายในต่างกัน .....	31
การเปรียบเทียบการใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนต่างกัน .....	32
พฤติกรรมการไหลของอากาศภายในไซโคลน .....	36
5 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการไหลภายในไซโคลน และการไหลแบบ สองเฟส .....	42
การปรับเปลี่ยนความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าไซโคลน .....	42
การเปลี่ยนความสูงของไซโคลน .....	48
การจำลองการไหลแบบสองเฟส .....	56
6 สรุปผล และข้อเสนอแนะ .....	61
สรุปผลการวิจัย .....	61
ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต .....	62
บรรณานุกรม .....	64
ภาคผนวก .....	67
ประวัติย่อผู้วิจัย .....	70

## บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1	ขนาดของไซโคลนที่ศึกษา .....	6
2	การจำลองการไหลโดยเทคนิคต่าง ๆ .....	29
3	ผลการจำลองโดยการเปลี่ยนขนาดของอนุภาค .....	57
4	ผลการจำลองโดยการเปลี่ยนจำนวนอนุภาค .....	60

## บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ลักษณะการไหลภายในไซโคลน .....	1
2 ส่วนประกอบของความเร็วที่เกิดขึ้นกับอนุภาคในไซโคลน .....	4
3 พารามิเตอร์ของขนาดต่างๆ ของไซโคลน .....	6
4 ส่วนประกอบของความเร็วที่ขึ้นกับเวลา .....	10
5 ปริมาตรควบคุม 3 มิติ .....	15
6 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างอันดับที่หนึ่ง .....	18
7 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างอันดับที่สอง .....	19
8 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างแบบควิก .....	20
9 ขั้นตอนและลำดับการแก้สมการ .....	26
10 ขนาดและลักษณะกริดของไซโคลน .....	28
11 การกระจายความเร็วกับจำนวนกริดที่ใช้ต่างกัน .....	30
12 การเปรียบเทียบความเร็วจากแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน RSM กับการ ประมาณค่าภายในต่างกัน .....	31
13 เปรียบเทียบความเร็วในแนวแกนที่ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนต่างกัน ..	34
14 เปรียบเทียบความเร็วในแนวสัมผัสที่ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนต่างกัน	35
15 ความเร็วของอากาศที่ไหลภายในไซโคลน .....	36
16 เวกเตอร์ของขนาดความเร็วของอากาศภายในไซโคลน .....	37
17 ลักษณะของเส้นการไหล (Path line) ของอากาศภายในไซโคลน .....	38
18 พฤติกรรมของอากาศในไซโคลน ระนาบ $r-z$ ในรูป Contours .....	39
19 พฤติกรรมของอากาศในไซโคลน ระนาบ $r-\theta$ ในรูป Contours .....	40
20 พฤติกรรมของอากาศในไซโคลน ระนาบ $r-z$ ในรูป Contours .....	40
21 พฤติกรรมของอากาศในไซโคลน ระนาบ $r-z$ ในรูป Contours .....	41
22 เปรียบเทียบ Contours ความเร็วในระนาบ $r-z$ ที่ความเร็วไหลเข้าต่างกัน .....	43
23 เปรียบเทียบ Contours ความเร็วในระนาบ $r-\theta$ .....	44
24 เปรียบเทียบ Contours ความดันในระนาบ $r-z$ ที่ความเร็วไหลเข้าต่างกัน .....	44
25 เปรียบเทียบ Contours ความดันในระนาบ $r-\theta$ .....	45
26 เปรียบเทียบ Contours ของความปั่นป่วนในระนาบ $r-z$ ที่ความเร็วไหลเข้า ต่างกัน .....	45
27 เปรียบเทียบ Contours ของความปั่นป่วนในระนาบ $r-\theta$ .....	46

## บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

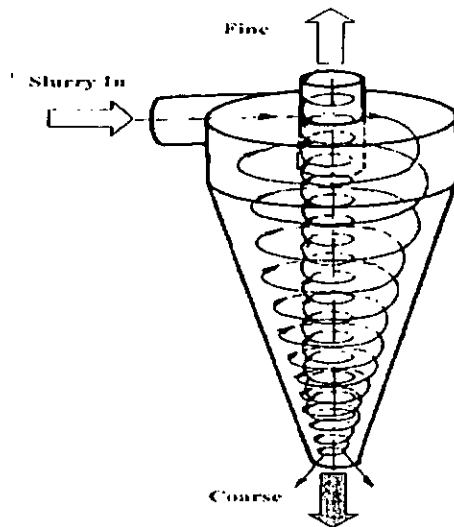
ภาพประกอบ	หน้า
28 เปรียบเทียบเวกเตอร์ความเร็วบนระนาบ $r-z$ ที่ความเร็วไหลเข้าต่างกัน .....	46
29 เปรียบเทียบเวกเตอร์ความเร็วในระนาบ $r-\theta$ .....	47
30 เปรียบเทียบ Contours ความเร็วบนระนาบ $r-z$ กรณีความสูงทรงกระบอก ต่างกัน .....	48
31 เปรียบเทียบ Contours ความเร็วบนระนาบ $r-\theta$ กรณีความสูงทรงกระบอก ต่างกัน .....	49
32 เปรียบเทียบ Contours ความดันบนระนาบ $r-z$ กรณีความสูงทรงกระบอก ต่างกัน .....	50
33 เปรียบเทียบ Contours ความดันบนระนาบ $r-\theta$ กรณีความสูงทรงกระบอก ต่างกัน .....	50
34 เปรียบเทียบ Contours ความปั่นป่วนบนระนาบ $r-z$ กรณีความสูงทรงกระบอก ต่างกัน .....	51
35 เปรียบเทียบ Contours ความปั่นป่วนบนระนาบ $r-\theta$ กรณีความสูงทรงกระบอก ต่างกัน .....	51
36 เปรียบเทียบ Contours ความเร็วของอากาศในระนาบ $r-z$ ความสูงทรงกรวย ต่างกัน .....	53
37 เปรียบเทียบ Contours ความเร็วบนระนาบ $r-\theta$ กรณีความสูงทรงกรวยต่างกัน	53
38 เปรียบเทียบ Contours ความดันของอากาศในระนาบ $r-z$ กรณีมุมทรงกรวย ต่างกัน .....	54
39 เปรียบเทียบ Contours ความดันของอากาศในระนาบ $r-\theta$ กรณีมุมทรงกรวย ต่างกัน .....	54
40 เปรียบเทียบ Contours ความปั่นป่วนของอากาศในระนาบ $r-z$ กรณีมุม ทรงกรวยต่างกัน .....	55
41 เปรียบเทียบ Contours ความปั่นป่วนของอากาศในระนาบ $r-\theta$ กรณีมุม ทรงกรวยต่างกัน .....	55
42 ตำแหน่งของอนุภาคที่เข้าไซโคลนและเส้นการไหลของอนุภาค .....	56
43 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอนุภาคที่ไหลออกด้านบนกับความเร็วเข้าต่างกัน	58
44 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคกับความเร็วยเข้าต่างกัน ...	59
45 จำนวนอนุภาคที่ไหลเข้าและออกด้านบน .....	60

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไซโคลน เป็นอุปกรณ์การแยกที่มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานทางอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตไม้ โรงสี การผลิตซีเมนต์หรืออุตสาหกรรมอื่นๆ อีกมากมาย เนื่องจากมีโครงสร้างง่าย ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายและง่ายต่อการบำรุงรักษา โดยธรรมชาติแล้วพฤติกรรมของฝุ่นที่ผสมมากับอากาศที่ไหลเข้าภายในไซโคลนจะเกิดแรงเหวี่ยงขึ้นด้วยลักษณะรูปร่างของตัวไซโคลนเอง กระแสอากาศจะหมุนเหวี่ยงอยู่ภายใน ทำให้ฝุ่นที่ผสมมาเคลื่อนตัวแยกออกจากกระแสอากาศเกิดการปะทะเข้ากับผนังของไซโคลนและตกลงสู่ด้านล่างด้วยแรงโน้มถ่วง ดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 ลักษณะการไหลภายในไซโคลน

ปัจจุบันเครื่องคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาก้าวหน้าเป็นอย่างมาก อีกทั้งระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขก็ได้มีการพัฒนาตาม ทำให้ศาสตร์ทางด้านการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลมีการพัฒนาจนมีความก้าวหน้าและแม่นยำมากยิ่งขึ้น ดังนั้นกระบวนการทาง CFD (Computational Fluid Dynamic) ซึ่งเป็นศาสตร์ที่ช่วยในการคาดเดาพฤติกรรมและลักษณะการไหลของของไหล จึงถูกนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนในงานวิจัยต่างๆ ในปัจจุบัน ซึ่งประโยชน์ที่เห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบ

กับการทดลองคือ จะทำให้ค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ต่างๆ และโปรแกรมที่ใช้ต่ำกว่า รวมทั้งเวลาที่ใช้ในการคำนวณ และใช้ในการวิเคราะห์ยังสั้นกว่าการทดลองจริงอีกด้วย สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ กระบวนการทาง CFD จึงถูกเลือกเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการไหลภายในไซโคลน โดยในเบื้องต้นจะนำผลการคำนวณที่ได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ผ่านมา จากนั้นจะทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมโดยศึกษาถึงผลกระทบต่อการใช้การไหลโดยการเปลี่ยนขนาดรูปร่างของไซโคลนรวมทั้งอัตราการไหลเข้าให้แตกต่างกันไป สุดท้ายจะทำการจำลองการไหลแบบสองเฟสระหว่างอากาศกับอนุภาคทรงกลม เพื่อเป็นข้อมูลต่อไปในการออกแบบระบบไซโคลนให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไป

## 2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 2.1 ศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการไหลภายในไซโคลนด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข
- 2.2 ศึกษาการจำลองการไหลภายในไซโคลนโดยการปรับเปลี่ยนขนาดและรูปร่างต่างๆ ด้วยวิธีการทาง CFD

## 3. ขอบเขตของการวิจัย

- 3.1 เป็นการจำลองการไหลภายในไซโคลนด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข โดยผลการคำนวณที่ได้จะมีการเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน
- 3.2 การคำนวณเชิงตัวเลขแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกจะจำลองการไหลอากาศเพียงเฟสเดียว และในขั้นที่สองจะจำลองการไหลในสองเฟส
- 3.3 การปรับเปลี่ยนขนาดและรูปร่างของไซโคลนสำหรับกระบวนการทาง CFD จะกระทำที่ความสูงของทรงกระบอกและทรงกรวยเท่านั้น

## 4. วิธีการดำเนินการวิจัย

- 4.1 รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 4.2 ออกแบบจำลองของไซโคลนเพื่อทำการจำลองการไหล
  - 4.2.1 จำลองการไหลเพื่อศึกษาพฤติกรรม/ลักษณะการไหล 1 เฟส
  - 4.2.2 จำลองการไหลเพื่อศึกษาพฤติกรรม/ลักษณะการไหล 2 เฟส
  - 4.2.3 ออกแบบจำลองไซโคลนใหม่โดยเปลี่ยนความสูงของทรงกระบอกและทรงกรวย
    - 4.2.3.1 จำลองการไหลเพื่อศึกษาพฤติกรรม/ลักษณะการไหลของแบบจำลองใหม่
    - 4.2.3.2 วิเคราะห์พฤติกรรมการไหลจากการจำลองและแสดงผล

#### 4.2.3.3 สรุปผลการจำลอง

### 5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

5.1 เข้าใจลักษณะการไหลภายในไซโคลนที่ได้จากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

5.2 ทราบอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของไซโคลนที่มีผลต่อลักษณะการไหล

5.3 ได้ข้อมูล และแนวทาง เพื่อนำไปออกแบบไซโคลนที่ใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 6 ส่วนด้วยกัน ดังนี้ บทที่ 1 ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย วิธีการดำเนินการวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ บทที่ 2 แสดงถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับไซโคลน ลักษณะการไหลภายในไซโคลน ทฤษฎีของไซโคลน แฟคเตอร์การแยก ขนาดของไซโคลนที่ใช้จำลองและบทปริทัศน์วรรณกรรม บทที่ 3 กล่าวถึงสมการพื้นฐาน แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข การดิสครีตไทเซชัน การประมาณค่าของอินทิกรัลพื้นผิว กระบวนการหาค่าตอบ เงื่อนไขขอบ สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคและขั้นตอนลำดับการแก้สมการ ซึ่งเป็นรายละเอียดที่จำเป็นจะต้องใช้คำนวณในบทต่อไป บทที่ 4 นำเสนอผลการจำลองเพื่อหา CFD เทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการทำนายการไหลภายในไซโคลน โดยแบ่งเป็นเทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณหาจำนวนกริดที่เหมาะสม แสดงการเปรียบเทียบการคำนวณที่ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนต่าง ๆ แสดงการเปรียบเทียบการใช้แบบวิธีการประมาณค่าภายในต่างกัน แสดงการเปรียบเทียบการใช้กระบวนการหาค่าตอบต่างกัน สรุปผลการใช้กระบวนการทาง CFD ที่เหมาะสมกับการทำนายการไหลภายในไซโคลนและสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของอากาศภายในไซโคลนที่ได้จากกระบวนการทาง CFD บทที่ 5 แสดงการประยุกต์กระบวนการทาง CFD ที่ได้จากบทที่ผ่านมาโดยการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลภายในไซโคลน จากการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศเข้าไซโคลน การปรับเปลี่ยนความสูงของทรงกระบอกและทรงกรวยของไซโคลนและการจำลองการไหลแบบสองเฟส ส่วนในบทสุดท้าย บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษา ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการจำลอง ข้อเสนอแนะและข้อที่ควรปรับปรุงที่จะเป็นประโยชน์ต่อไปในอนาคตสำหรับการจำลองการไหลของอากาศ และอนุภาคภายในไซโคลนให้ถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้นในโอกาสต่อไป

## บทที่ 2

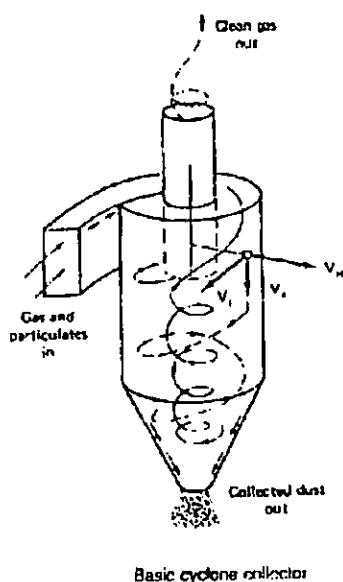
### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับไซโคลน

#### 2.1 ลักษณะการไหลภายในไซโคลน

การไหลภายในไซโคลนนั้นเป็นการไหลแบบสองเฟสซึ่งส่วนมากจะเป็นอากาศกับอนุภาค (ฝุ่นละออง) เมื่ออากาศกับอนุภาคไหลเข้าภายในไซโคลนอากาศกับอนุภาคจะหมุนวนลงส่วนล่างของไซโคลนและ อากาศจะไหลย้อนกลับขึ้นด้านบนส่วนอนุภาคจะไหลลงด้านล่าง ข้อมูลจากการทดลองพบว่าลักษณะการไหลเป็นการไหลที่ขดเป็นวงกลมสองชั้น ชั้นแรกเป็นชั้นนอกจะขดเป็นวงกลมเคลื่อนที่ลงด้านล่าง ส่วนชั้นที่สองจะเป็นขดวงอยู่ด้านบนและไหลขึ้นย้อนกลับจากส่วนล่างขึ้นสู่ทางออกส่วนบนของไซโคลน อนุภาคที่ตกได้จะถูกเก็บไว้ที่ฮอปเปอร์ (Hopper) และบางส่วนที่เก็บไม่ได้จะเคลื่อนตัวไปตามกระแสการไหลของอากาศ

#### 2.2 ทฤษฎีของไซโคลน

ในการแยกอนุภาคออกจากอากาศนั้น ต้องทำให้อากาศในไซโคลนมีความเร็วสัมผัสตามต้องการเสียก่อน การที่อากาศและอนุภาคหมุนอยู่ในไซโคลน อนุภาคจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วในแนวแกน ความเร็วในแนวรัศมีและความเร็วในแนวสัมผัส แสดงได้ดัง ภาพประกอบ 2 ความเร็วสัมผัสนี้เองทำให้มีแรงหนีศูนย์กลางเกิดขึ้น ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ออกในแนวรัศมีไปยังผนังของไซโคลนแล้วอนุภาคจะเคลื่อนที่ออกทางท่อระบายฝุ่นข้างล่างเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก



ภาพประกอบ 2 ส่วนประกอบของความเร็วที่เกิดขึ้นกับอนุภาคในไซโคลน

ในไซโคลนจะมีแรงหลัก 3 แรงที่กระทำกับอนุภาค คือ แรงเนื่องจากความโน้มถ่วง ( $F_g$ ) แรงหนีศูนย์กลาง ( $F_c$ ) และแรงจุดลาก ( $F_D$ ) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาค อย่างไรก็ตามแรงหลักที่แยกอนุภาคออกจากกระแสอากาศ ก็คือ แรงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากการหมุนของอากาศ และอนุภาคภายในไซโคลนนั่นเอง ถ้าพิจารณาอนุภาคทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d_p$  หมุนที่ระยะรัศมี  $r$  และสมมติว่าอนุภาคที่เคลื่อนที่ในไซโคลนมีความเร็วในแนวสัมผัส ( $u$ ) ดังนั้น แรงหนีศูนย์กลางที่กระทำต่ออนุภาค คือ

$$F_c = \frac{mu_{t,p}^2}{r} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $F_c$  คือ แรงหนีศูนย์กลางของอนุภาค  $m$  คือ มวลของอนุภาค  $u_{t,p}$  คือ ความเร็วในแนวสัมผัสของอนุภาคและ  $r$  คือ รัศมีของการหมุนวนของอนุภาค

### 2.3 แฟคเตอร์ของการแยก

แฟคเตอร์ของการแยก ( $S$ ) เป็นอัตราส่วนของแรงหนีศูนย์กลางกับแรงเนื่องจากความโน้มถ่วง เนื่องจากแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดกับอนุภาคขึ้นอยู่กับกำลังสองของความเร็วในแนวสัมผัสของอนุภาคที่ไหลเข้าและเป็นสัดส่วนกลับกับรัศมีของไซโคลน แรงเนื่องจากความโน้มถ่วงเป็นน้ำหนักของอนุภาคนั้นเอง ดังนั้นแฟคเตอร์ของการแยก สามารถเขียนได้เป็น

$$S = \frac{u_{t,p}^2}{rg} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $S$  คือ แฟคเตอร์ของการแยก  $u_{t,p}$  คือ ความเร็วในแนวสัมผัสของอนุภาค  $r$  คือ รัศมีของไซโคลน (ส่วนที่เป็นรูปทรงกระบอก) และ  $g$  คือ ค่าความโน้มถ่วงของโลก จะเห็นว่าแฟคเตอร์ของการแยกจะแปรผันตามกำลังสองของความเร็วในแนวสัมผัสของอนุภาค และแปรผกผันกับรัศมีของการหมุนและค่าความโน้มถ่วง

### 2.4 ขนาดของไซโคลน

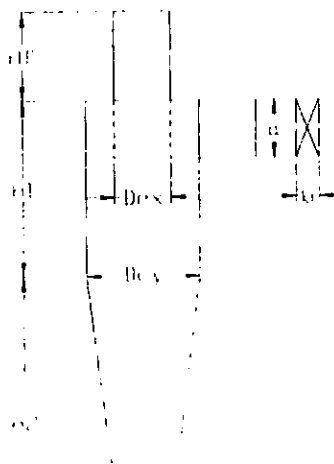
ขนาดของไซโคลนนั้น มีนักวิจัยหลายคนได้เสนอเอาไว้ เช่น สแตร์มันด์ (C.J. Stairmand. 1951 : 356 – 383) ได้เสนอขนาดต่างๆ ของไซโคลนด้วยสัดส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลาง ต่อมา บอยสัน และคณะ (Boyson and others. 1982) ได้นำขนาดตามทฤษฎีของ Stairmand (ไซโคลนชนิด A) มาทำการวิจัยโดยการทดลองวัดค่าความเร็วที่ระดับต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ขนาดตามทฤษฎีดังกล่าวมาทำการจำลองการไหลด้วยกระบวนการทาง CFD เพื่อหาค่าความเร็วในแนวแกนและความเร็วในแนวสัมผัสเปรียบเทียบกับค่าจากผลการทดลอง

รายละเอียดต่างๆ ของขนาดไซโคลนที่จะศึกษาแสดงดังตาราง 1

ตาราง 1 ขนาดของไซโคลนที่ศึกษา (หน่วย : m)

ส่วนต่างของไซโคลน	A Type	B Type	C Type	D Type	E Type	F Type	G Type	H Type	I Type
เส้นผ่าศูนย์กลางไซโคลน (Dcy)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
ความสูงของทางเข้า (a)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
ความกว้างของทางเข้า (b)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
ความสูงทรงกระบอก (h1)	0.30	0.38	0.34	0.26	0.22	0.30	0.30	0.30	0.30
ความสูงของทรงกรวย (h2)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.58	0.54	0.46	0.42

ขนาดของไซโคลนที่จะศึกษาเพิ่มเติมเป็นไซโคลนชนิด B, C, D และ E ซึ่งเป็นไซโคลนที่ได้มีการปรับเปลี่ยนความสูงของทรงกระบอก ไซโคลนชนิด F, G, H และ I เป็นไซโคลนได้มีการปรับเปลี่ยนความสูงของทรงกรวยเพื่อที่จะศึกษาถึงพฤติกรรมและลักษณะของการไหลที่เปลี่ยนแปลงไป พารามิเตอร์ของขนาดต่างๆ ในภาพประกอบ 2.2 แสดงค่าความยาวของส่วนต่างๆ ของไซโคลนที่จะทำการศึกษาในตารางที่ 2.1 สำหรับข้อมูลและคุณสมบัติต่างๆ ของอากาศที่ไหลเข้าในไซโคลนนั้นจะใช้เงื่อนไขเดียวกับที่ทดลอง (Boyson and others, 1982) กล่าวคือ ความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าไซโคลนมีค่า 20 m/s โดยอากาศมีความหนาแน่น  $1.225 \text{ kg/m}^3$  และมีความหนืดจลน์  $1.47 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$



ภาพประกอบ 3 พารามิเตอร์ของขนาดต่างๆ ของไซโคลน

## 2.5 บทปริทัศน์วรรณกรรม

การศึกษาและการวิจัยเกี่ยวกับไซโคลนนั้น ได้มีการทำมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการไหลภายในไซโคลนเพื่อที่จะนำไปสู่การปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคให้ดีขึ้น โยชิตะ (Hideto Yoshida. 1995) ได้ทำการจำลองการไหลภายในไซโคลนเปรียบเทียบกับกรวยเพื่อให้นำไปสู่การหาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค การจำลองระเบียบวิธีการเชิงตัวเลขโดยใช้สมการนาเวียร์-สโตก 3 มิติและแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน  $k - \epsilon$  โดยผลการคำนวณพบว่ามีส่วนที่สอดคล้องกับการทดลอง ในงานวิจัยนี้จึงได้เพิ่มอุปกรณ์ไกด์เพลท (Guide Plate) ที่ทางเข้าของอากาศให้กับไซโคลนเพื่อบังคับทิศทางและควบคุมอัตราการไหลระหว่างบริเวณทางออกของกรวยกับทางเข้าฮอปเปอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค

ต่อมา เมเออร์ และมอริ (Meier & Mori. 1998) ได้ทำการจำลองการไหลภายในไซโคลน โดยใช้วิธีของ Eulerian สำหรับ 2 เฟส แบบ 3 มิติ โดยแบบจำลองความปั่นป่วน  $k - \epsilon$  เพื่อทำนายการไหลในแนวแกนและการไหลในแนวรัศมี ใช้ทฤษฎีฟังก์ชันมาตรฐาน (Standard Wall Function) เพื่อทำนายการไหลของอากาศบริเวณใกล้ๆ กับผนัง ส่วนการไหลในเฟสของแข็งนั้นจะถูกพิจารณาเป็นการไหลแบบไม่มีความหนืดและคิดเฉพาะแรงจุดลากเท่านั้น โดยในขั้นแรกทำการจำลองเฉพาะอากาศเพียงอย่างเดียว และต่อมาทำการจำลองด้วยอากาศรวมกับอนุภาคทรงกลมของแก้ว ในงานวิจัยนี้พบว่า อนุภาคนั้นมีอิทธิพลต่อลักษณะการไหลของอากาศ

แอ็คเกอร์ และคณะ (Akker and others. 1999) ได้ทำการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจำลองการไหลภายในไซโคลนโดยใช้โปรแกรม FLUENT 4.47 เปรียบเทียบกับการทดลองที่วัดโดย Laser-Doppler Velocimetry (LDV) ซึ่งแสดงความเร็วในแนวแกนและความเร็วในแนวสัมผัส โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนต่างๆ ภายในโปรแกรม จากงานวิจัยนี้พบว่า ผลจากการทำนายลักษณะการไหลภายในไซโคลน โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน  $k - \epsilon$  และ RNG ไม่สอดคล้องกับการทดลอง แต่พบว่า ผลที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM มีเหตุผลที่ยอมรับได้กับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ถึงแม้ว่ามีบางอย่างขัดแย้งกับการทดลองอยู่ก็ตาม พาร์ค และคณะ (Park and others. 2000) ได้ศึกษาสมรรถนะของไซโคลน เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของกรวย และอัตราการไหลที่เข้าไซโคลน เขาได้ทดลองโดยการเปลี่ยนขนาดของกรวย 3 ขนาดที่อัตราการไหลแตกต่างกัน 4 ค่า ผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนขนาดของกรวยไม่มีผลต่อกราฟสมรรถนะ (Performance Curve) แต่ Collection Efficiency จะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนล่างของกรวยลดลง เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกัน 3 ทฤษฎี พบว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับทฤษฎีของ Barth มากกว่าทฤษฎีของ Iozia และ Leith แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีทฤษฎีใดเป็นที่น่าพอใจสำหรับการทำนายในงานวิจัย

นี้ Karanikolis (Karanikolis. 2001) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ลักษณะการไหลของอากาศภายในไซโคลน โดยใช้แบบจำลองแบบปั่นป่วนต่างๆ ภายในโปรแกรม FLUENT 5.0 ช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อเปรียบเทียบผลจากการทดลอง ในขั้นแรกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\epsilon$  พบว่า แบบจำลองความปั่นป่วนนี้ไม่เหมาะสมสำหรับใช้จำลองลักษณะการไหลภายในไซโคลน จากนั้นจึงได้ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RSM ทำการจำลอง ผลการจำลองพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนนี้เหมาะสมสำหรับการใช้จำลองลักษณะการไหลภายในไซโคลนได้ดี เนื่องจากเมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้ออกมาจากการทดลอง พบว่าความเร็วในแนวสัมผัสและแนวแกนสอดคล้องกันเป็นอย่างดี กริฟฟิท และบอยสัน (Griffits & Boyson. 1995) ได้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อประเมินความมีประสิทธิภาพและศึกษาประโยชน์ของกระบวนการทาง CFD ที่ใช้โปรแกรม FLUENT โดยทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของไซโคลนที่มีการออกแบบ 3 ทฤษฎี คือ ทฤษฎีของ Barth ทฤษฎีของ lozia และทฤษฎีของ Leith กับการทดลอง จากการวิจัยพบว่า โปรแกรม FLUENT สามารถให้ผลการทำนายสอดคล้องกับการทดลองได้ดีมาก คือ ลักษณะของกราฟสมรรถนะมีความคล้ายคลึงกับการทดลองเป็นอย่างดี รวมทั้งค่าความดันตกคร่อมก็มีค่าใกล้เคียงกันด้วยเช่นกัน

จะเห็นได้ว่า งานวิจัยต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น โดยส่วนใหญ่ได้ทำการทดลองและจำลองเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของรูปทรงไซโคลนต่อคุณลักษณะการไหลภายในไซโคลน และสังเกตเห็นว่าการใช้กระบวนการทาง CFD นั้น ความถูกต้องแม่นยำจะขึ้นอยู่กับทางเลือกกระบวนการหาคำตอบ (Solution Algorithm) ลักษณะของกริดและการสร้างกริดและการเลือกแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบต่างๆ มาทำการคำนวณ

## บทที่ 3

### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

#### 3.1 สมการพื้นฐาน

สมการพื้นฐานของพลศาสตร์ของไหลประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) และ สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation) ที่ให้ค่าเปลี่ยนไปแบบชั่วขณะ โดยในการคำนวณเรสมมติให้ของไหลเป็นของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ มีความหนืด มีอุณหภูมิคงที่และ การไหลเป็นแบบการไหลสภาวะคงตัว มีรูปแบบสมการดังต่อไปนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3.1)$$

สมการนาเวียร์-สโตกส์

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3.2)$$

ให้ความเร็วและปริมาณต่างๆ ซึ่งค่าที่เปลี่ยนไปแบบชั่วขณะ (Instantaneous) มีค่าเท่ากับผลรวมของค่าเฉลี่ย (Mean) ซึ่งไม่ขึ้นกับเวลากับส่วนแสดงการกระเพื่อม (Fluctuations) ดังแสดงในภาพประกอบ 3.1 ดังนี้

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (3.3)$$

โดยที่  $\bar{u}_i$  และ  $u'_i$  คือ ค่าความเร็วเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่งและส่วนของการกระเพื่อมของส่วนประกอบความเร็ว ( $i = 1, 2, 3$ ) ซึ่งค่าของ  $\bar{u}_i$  ได้มาจาก

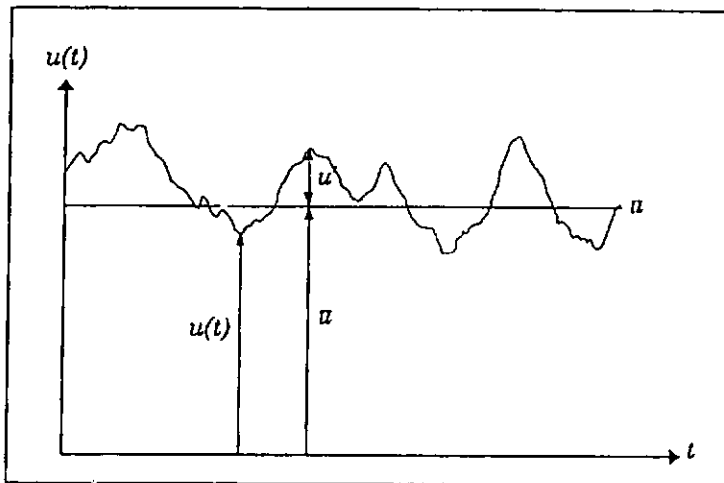
$$\bar{u}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} u_i dt \quad (3.4)$$

โดยที่  $\Delta t$  เป็นขนาดของช่วงเวลาซึ่งมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับการกระเพื่อมของความปั่นป่วน ดังนั้น

$$\bar{u}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_i^{i+\Delta t} (\bar{u}_i + u'_i) dt = \bar{u}_i + \frac{1}{\Delta t} \int_i^{i+\Delta t} u'_i dt = \bar{u}_i + \bar{u}'_i \quad (3.5)$$

เนื่องจาก  $\bar{u}'_i = 0$  ดังนั้น

$$\bar{u}_i = \bar{u}_i \quad (3.6)$$



ภาพประกอบ 4 ส่วนประกอบของความเร็วที่ขึ้นกับเวลา

จะเห็นได้ว่าส่วนของเทอมเฉลี่ยช่วงเวลาหนึ่งของการกระเพื่อมของความปั่นป่วนมีค่าเป็นศูนย์ แต่อย่างไรก็ตามค่า  $\bar{u}'_i, \bar{u}'_j$  ไม่จำเป็นต้องมีค่าเป็นศูนย์ไปด้วย เช่นเดียวกับปริมาณอื่นๆ สามารถเขียนได้ให้รูปแบบเดียวกัน

$$p = \bar{p} + p' \quad (3.7)$$

จากสมการนาเวียร์-สโตกส์ ที่ให้ค่าเปลี่ยนไปแบบชั่วขณะแทนค่าปริมาณต่างๆ ด้วยผลรวมของปริมาณเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่งกับส่วนของการกระเพื่อมเนื่องจากความปั่นป่วนแล้ว

ทำการเฉลี่ยตลอดช่วงเวลาหนึ่ง สมการที่ได้สามารถเขียนให้อยู่ในแกนคาร์ทีเซียน (Cartesian Axis) ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u_i u_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (3.9)$$

จากสมการที่ (3.8) และ (3.9) เรียกว่า สมการค่าเฉลี่ยเรโนลด์นาเวียร์ - สโตกส์ (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation, RANS) ซึ่งสมการที่ได้มีรูปแบบคล้ายคลึงกับสมการนาเวียร์ - สโตกส์ ที่ให้ค่าเปลี่ยนไปแบบชั่วขณะ จะเห็นว่าสมการที่แสดงการไหลแบบปั่นป่วนเป็นสมการอนุพันธ์ย่อยไม่เชิงเส้นอันดับที่สองและยังมีสมการอื่นๆ อีกเชื่อมโยงกันอยู่ในระบบซึ่งยากต่อการหาผลเฉลยโดยวิธีแม่นยำตรงในทางคณิตศาสตร์ (Analytical Method) ในทุกวันนี้ยังไม่มีผลเฉลยแบบปิด (Close form Solution) สำหรับสมการนาเวียร์-สโตกส์ ดังนั้นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจึงเป็นที่นิยมในการหาผลเฉลยในปัจจุบัน และเพื่อให้เป็นปัญหาแบบปิด (Closure Problem) ในสมการที่ (3.9) เทอมความเค้นเรโนลด์ (Reynolds Stresses),  $-\rho \overline{u_i' u_j'}$  จำเป็นต้องใช้แบบจำลองความปั่นป่วน

## 3.2 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ แต่ที่นำมาใช้ในการจำลองปัญหาสำหรับงานวิจัยนี้มีอยู่ 3 แบบคือ แบบจำลองมาตรฐาน  $k-\varepsilon$  (Standard  $k-\varepsilon$ ) แบบจำลองรีนอร์มอลไลซ์เซชันกรุป (Renormalization Group) และแบบจำลองเรโนลด์สเตรส (Reynolds Stress Model)

### 3.2.1 แบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$

แบบจำลอง standard  $k-\varepsilon$  เทอมความเค้นเรโนลด์ จะถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราความเค้นเฉลี่ย (Mean Strain Rate) (Versteeg & Malalasekera, 1995) โดย Eddy-viscosity ที่ซึ่งค่า Eddy-viscosity จะกำหนดให้สัมพันธ์กับพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy,  $k$ ) และอัตราการสูญเสีย (Dissipation Rate,  $\varepsilon$ ) โดยใช้ข้อสมมติฐานของ Boussinesq คือ

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.10)$$

โดยที่  $\mu_t$  คือความหนืดของความปั่นป่วน (Turbulent Viscosity) ซึ่งหาได้จาก

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.11)$$

โดยที่ค่า  $C_\mu$  เป็นค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 0.09 และ  $k$  คือ พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ( $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$ ) ส่วน  $\varepsilon$  คือ อัตราการสูญเสียของความปั่นป่วน (Turbulent Dissipation Rate) สำหรับรูปของสมการที่ใช้ในการหาค่า  $k$  และ  $\varepsilon$  เป็นดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon) \quad (3.13)$$

โดยที่ค่า  $\mu_t = \mu + \mu_t$  ค่า  $G$  แทน อัตราการเกิดของพลังงานจลน์ ความปั่นป่วน (Turbulent Production Rate) ขณะที่  $\rho \varepsilon$  เป็นอัตราการสูญเสีย (Destruction Rate) โดย  $G$  มีค่าเป็น

$$G = \mu_{eff} \left[ \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (3.14)$$

โดยทั่วไปแล้วค่า  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1$  และ  $\sigma_\varepsilon = 1.3$

### 3.2.2 แบบจำลอง RNG

สำหรับแบบจำลอง RNG ในการหาค่าความเค้นเรโนลด์ จะใช้สมมติฐานของ Boussinesq เช่นเดียวกับแบบจำลอง standard  $k-\varepsilon$  แต่ค่าคงที่  $C_\mu$  สำหรับแบบจำลอง RNG มีค่าเท่ากับ 0.0845 [9,10,11] ซึ่งรูปของสมการที่ใช้ในการหาค่า  $k$  และ  $\varepsilon$  เป็นดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (3.16)$$

โดยที่ค่า  $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.393$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1.42$  และ  $C_{2\varepsilon} = 1.68$  สำหรับค่า  $R$  ในสมการ (3.16) นั้นหาได้จาก

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} k \quad (3.17)$$

โดยที่  $\eta \equiv S \frac{k}{\varepsilon}$ ,  $\eta_0 = 4.38$ ,  $\beta = 0.012$  เมื่อนำค่า  $R$  ในสมการ (3.17) ไปแทนในสมการ (3.16) จะได้รูปของสมการ  $\varepsilon$  เปลี่ยนเป็น

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.18)$$

โดยที่  $C_{2\varepsilon}^* \equiv C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3}$  สำหรับ  $G_k$  ซึ่งเป็นอัตราการเกิดพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน สามารถหาได้จาก

$$G_k = \mu_i S^2 \quad (3.19)$$

$$\text{โดยที่ } S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \text{ ซึ่ง } S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

### 3.2.3 แบบจำลอง RSM

สำหรับแบบจำลอง RSM [9,10] ในการหาค่าความเค้นเรโนลด์ มีรูปสมการ เป็นดังนี้

$$\frac{D\overline{u'_i u'_j}}{Dt} = P_{ij} + \psi_{ij} - \frac{2}{3} \varepsilon \delta_{ij} + D_{ij}^T + \frac{\partial \mu}{\partial x_i} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_i} \quad (3.20)$$

โดยที่เทอมทางด้านขวาของสมการประกอบไปด้วย  $P_{ij}$  คือ ผลคูณความเค้น (Stress Production)  $\psi_{ij}$  คือ ความเครียดจากความดัน (Pressure Strain) และ  $D_{ij}^T$  คือ การแพร่ของการปั่นป่วน (Turbulent Diffusion) ซึ่งสมการของเทอมต่าง ๆ แสดงได้ดังนี้

$$P_{ij} = - \left( \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_k} + \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} \right) \quad (3.21)$$

$$\psi_{ij} = -C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left( \overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right) - C \left( P_{ij} - \delta_{ij} \frac{P}{3} \right) \quad (3.22)$$

$$D_{ij}^T = \frac{\partial}{\partial x_k} \mu_t \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \quad (3.23)$$

โดยที่  $k = \frac{\overline{u'_i u'_i}}{2}$  และ  $P = \frac{P_{ij}}{2}$  ตัวแปร  $\mu_t, k$  และ  $\varepsilon$  มีความสัมพันธ์แบบเดียวกันกับที่ใช้ในแบบจำลอง standard  $k - \varepsilon$  สำหรับค่าคงที่ในสมการมีค่า ดังนี้  $C_1 = 1.8$  และ  $C_2 = 0.6$  ในทางปฏิบัติถึงแม้ว่าจะได้ใช้แบบจำลอง RSM ดังสมการข้างบนเพื่อช่วยในการหาค่าความเค้นเรโนลด์แล้วก็ตาม แต่ภายในแบบจำลอง RSM ก็ยังมีเทอมที่ไม่ทราบค่าเกิดขึ้นคือเทอม  $\psi_{ij}$  และ  $D_{ij}^T$  ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองในการหาค่าเทอมเหล่านั้น เพื่อให้ปัญหาเป็นแบบปิดอย่างแท้จริง

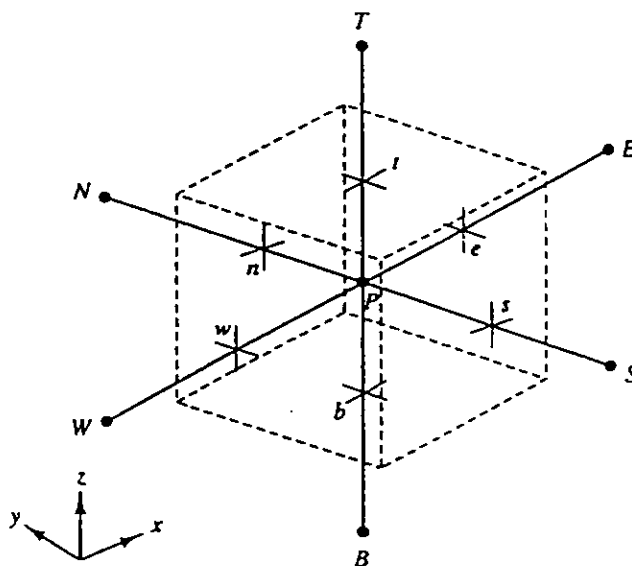
### 3.3 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method)

ในการหาผลเฉลยของสมการควบคุม (Governing Equation) ซึ่งอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยซึ่งคู่ควบกันอยู่ ได้ใช้หลักวิธีพื้นฐานของปริมาตรควบคุม ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยแบ่งขอบเขตการคำนวณออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อย ๆ ทำการอินทิเกรตสมการควบคุมในแต่ละปริมาตรควบคุม พร้อมทั้งจัดให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิต ทำการดีสครีตสมการควบคุม ซึ่งอยู่ในรูปอินทิกรัล และทำการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของปริมาตรต่าง ๆ ในปริมาตรควบคุมย่อยหนึ่ง ๆ กับปริมาตรต่าง ๆ ในปริมาตรควบคุมย่อยข้างเคียงให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น จากนั้นจึงทำการแก้สมการ เพื่อหาผลเฉลยต่อไป ซึ่งระเบียบวิธีดังกล่าวเรียกว่า

วิธีการคำนวณแบบปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method) และจะได้อธิบายต่อไป  
รูปทั่วไปของสมการการส่งถ่ายปริมาณสเกลลาร์ ( $\phi$ ) ในปริมาตรควบคุมใด ๆ  
สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอินทิกรัลได้ดังนี้

$$\int_A \rho \bar{u} \cdot \bar{n} dA = \int_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot \bar{n} dA + \int_V S_\phi dV \quad (3.24)$$

โดยที่  $\rho$  คือ ความหนาแน่น  $\bar{n}$  คือ เวกเตอร์ความเร็ว  $A$  คือ พื้นที่ผิวของปริมาตร  
 $\Gamma_\phi$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของ  $\phi$   $\nabla \phi$  คือ ค่าความชันของ  $\phi$   $S_\phi$  คือ แหล่งกำเนิด (Source)  
ของ  $\phi$  ต่อหน่วยปริมาตร เทอมต่างๆ ในสมการที่ (3.24) มีความหมายดังนี้ เทอมแรกทางด้าน  
ซ้ายของสมการเป็นเทอมที่ขึ้นอยู่กับเวลา เทอมแรกทางด้านขวาของสมการ เป็นเทอมของ  
การพา ส่วนเทอมที่สองด้านขวาของสมการเป็นเทอมการแพร่ การหาค่าอินทิเกรตสมการ  
ข้างต้นเป็นขั้นตอนต่อไปของการคำนวณแบบปริมาตรสี่เหลี่ยม ในการวิเคราะห์การไหลแบบ  
3 มิติ จะกำหนดให้ค่า  $\phi$  มีค่าเป็น  $u, v$  และ  $w$  ต่อไปเราจะพิจารณาปริมาตรควบคุมใด ๆ  
ในภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 ปริมาตรควบคุม 3 มิติ

จากภาพประกอบ 5 จุด  $P$  ตัวแทนของปริมาตรจะอยู่ตำแหน่งกลางของปริมาตร  
พื้นที่ผิวแต่ละด้านของปริมาตรเขียนแทนด้วย  $e, w, n, s, t$  และ  $b$  ซึ่งหมายถึงถึง พื้นที่ด้านทิศตะวันออก  
ทิศตะวันตก ทิศเหนือ ทิศใต้ ด้านบนและด้านล่างของจุด  $P$  ตามลำดับ ต่อไปเป็น  
การดิสครีตสมการ (3.24)

### 3.4 การดิสครีตไทเซชัน (Discretisation)

สมการอนุพันธ์ย่อยไม่เชิงเส้นที่ใช้อธิบายการไหลของของไหลนั้น เมื่อทำการดิสครีตไนต์แต่ละเทอมจะได้ดังนี้

#### 3.4.1 เทอมการพา (Convection term)

ทำการดิสครีต เทอมการพาจะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & [(\rho\phi Au)_e - (\rho\phi Au)_w] \\ & + [(\rho\phi Av)_n - (\rho\phi Av)_s] \\ & + [(\rho\phi Aw)_t - (\rho\phi Aw)_b] \end{aligned} \quad (3.25)$$

สามารถเขียนสมการของการพาที่ทำการดิสครีตแล้วให้ง่ายขึ้นโดยการแทนด้วย  $F = \rho uA$  โดยที่ค่า  $F$  คือ ฟลักซ์ของการพา (Convective Flux) เขียนสมการ (3.25) ใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & [(F\phi)_e - (F\phi)_w] \\ & + [(F\phi)_n - (F\phi)_s] \\ & + [(F\phi)_t - (F\phi)_b] \end{aligned} \quad (3.26)$$

#### 3.4.2 เทอมการแพร่ (Diffusion Term)

ทำการดิสครีตเทอมการแพร่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \left[ \left( A\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} \right)_e - \left( A\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} \right)_w \right] \\ & + \left[ \left( A\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} \right)_n - \left( A\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} \right)_s \right] \\ & + \left[ \left( A\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z} \right)_t - \left( A\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z} \right)_b \right] \end{aligned} \quad (3.27)$$

เมื่อ  $\Gamma$  คือค่าของสัมประสิทธิ์ของการแพร่ เพื่อความสะดวกเราจะใช้ตัวแปร  $D = \frac{\Gamma A}{\delta x}$  แสดงแทนฟลักซ์ของการแพร่ (Diffusive Flux) และสามารถเขียนสมการของการแพร่ที่ทำการดิสครีตแล้วได้ใหม่เป็น

$$\begin{aligned} & [D_e(\phi_e - \phi_p) - D_w(\phi_p - \phi_w)] \\ & + [D_n(\phi_n - \phi_p) - D_s(\phi_p - \phi_s)] \\ & + [D_i(\phi_i - \phi_p) - D_b(\phi_p - \phi_b)] \end{aligned} \quad (3.28)$$

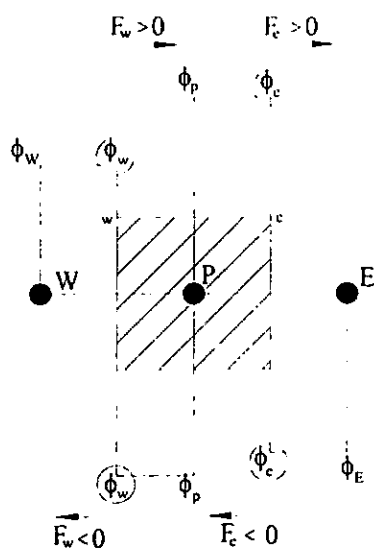
ค่า  $\phi_e$ ,  $\phi_n$ ,  $\phi_s$ ,  $\phi_i$  และ  $\phi_b$  เป็นค่าของ  $\phi$  ที่พื้นผิวผนังของปริมาตร ซึ่งหาได้โดยการประมาณค่า  $\phi$  และการประมาณค่า  $\phi$  ที่บริเวณผิวของปริมาตรนั้นมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่แนะนำเสนอและใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ระเบียบวิธีผลต่างอันดับที่หนึ่ง (First Order Scheme, FODS) วิธีผลต่างอันดับที่สอง (Second Order Scheme, SODS) และระเบียบวิธีผลต่างแบบควิก (Quick Scheme, QUICK )

### 3.5 การประมาณค่าของอินทิกรัลพื้นผิว

ในการประมาณค่าเทอมที่เกิดการพาดนั้น จะใช้ระเบียบวิธีแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้ ระเบียบวิธีผลต่างอันดับที่หนึ่ง วิธีผลต่างอันดับที่สอง และระเบียบวิธีผลต่างแบบควิก ซึ่งจะแสดงรายละเอียดต่อไป

#### 3.5.1 ระเบียบวิธีผลต่างอันดับที่หนึ่ง

สำหรับการประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างอันดับที่หนึ่งนั้น ค่าที่ต้องการหาคือค่า  $\phi$  ในกรณี  $F_e$  เป็นค่าบวก ค่าของ  $\phi_e$  จะถูกกำหนดให้เท่ากับค่า  $\phi_p$  สังเกตว่าจะให้เท่ากับค่าที่อยู่ทางด้านปลายลูกศร กรณีที่  $F_e$  เป็นค่าลบ ค่า  $\phi_e$  จะถูกกำหนดให้เท่ากับ  $\phi_e$  ดังแสดงในภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่หนึ่ง

$$\phi_e = \phi_p : F_e > 0, \quad \phi_e = \phi_E : F_e < 0$$

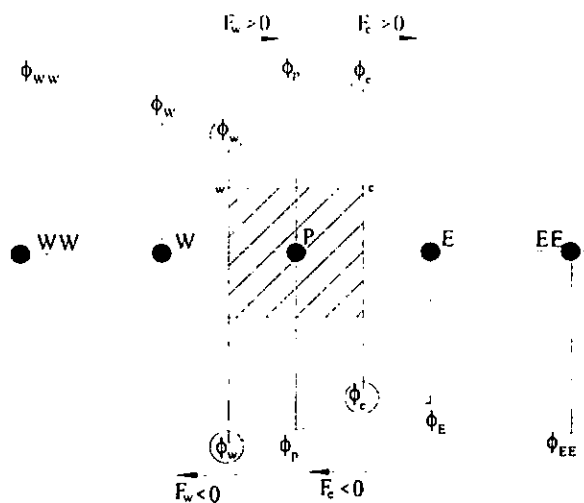
$$\phi_w = \phi_W : F_w > 0, \quad \phi_w = \phi_p : F_w < 0$$

ดังนั้นสมการเขียนได้ดังนี้

$$F_e \phi_e = \phi_p [F_e] + \phi_e [-F_e] \quad (3.29)$$

### 3.5.2 ระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง

ค่า  $\phi$  จะประมาณค่าภายในที่พื้นผิวของปริมาตรโดยใช้ตำแหน่งกริดข้างเคียงที่อยู่ปลายลูกศร 2 กริด (Downstream) ดังแสดงในภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง

$$\phi_e = \frac{3}{2}\phi_p - \frac{1}{2}\phi_w \quad : \quad F_e > 0$$

$$\phi_w = \frac{3}{2}\phi_w - \frac{1}{2}\phi_{ww} \quad : \quad F_w > 0$$

$$\phi_e = \frac{3}{2}\phi_E - \frac{1}{2}\phi_{EE} \quad : \quad F_e < 0$$

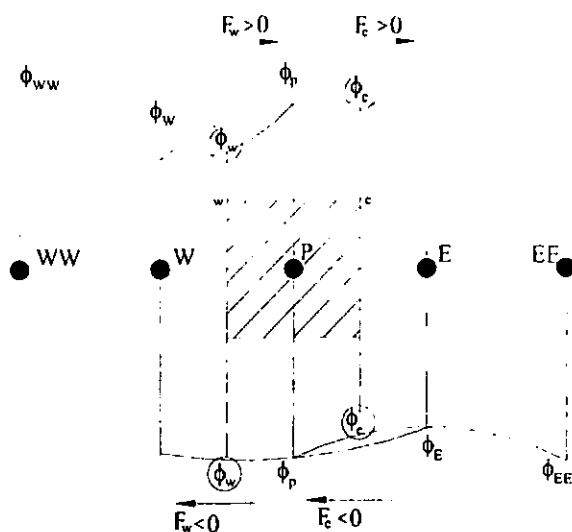
$$\phi_w = \frac{3}{2}\phi_p - \frac{1}{2}\phi_E \quad : \quad F_w < 0$$

ดังนั้นสมการเขียนได้ดังนี้

$$F_e \phi_e = \left( \frac{2}{3}\phi_p - \frac{1}{2}\phi_w \right) [F_e] - \left( \frac{2}{3}\phi_E - \frac{1}{2}\phi_{EE} \right) [-F_e] \quad (3.30)$$

### 3.5.3 ระเบียบวิธีผลต่างแบบควิก

การประมาณค่า  $\phi$  ด้วยระเบียบวิธีนี้ ตั้งสมมติฐานอยู่บนค่าเฉลี่ยของระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง (Versteeg & Malalasekera. 1995) การหาค่าพื้นที่ผิวนั้น หาได้จาก 2 กริดข้างเคียงอยู่ที่ปลายลม (Downstream) และอีก 1 กริดที่อยู่ต้นลม (Upstream)



ภาพประกอบ 8 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างแบบควิก

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

$$\phi_W = \frac{3}{8}\phi_P + \frac{3}{4}\phi_W - \frac{1}{8}\phi_{WW} \quad : F_W > 0$$

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

$$\phi_W = \frac{3}{8}\phi_W + \frac{3}{4}\phi_P - \frac{1}{8}\phi_E \quad : F_W < 0$$

ดังนั้นสมการเขียนได้ดังนี้

$$F_e \phi_e = \left( \frac{3}{8}\phi_E - \frac{3}{4}\phi_P - \frac{1}{8}\phi_W \right) [F_e]$$

$$- \left( \frac{3}{4}\phi_E - \frac{3}{8}\phi_P - \frac{1}{8}\phi_{EE} \right) [-F_e] \quad (3.31)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\phi$  ของปริมาตรหนึ่ง ๆ กับตัวแปร  $\phi_{nb}$  ของปริมาตรข้างเคียงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเชิงเส้นได้ดังนี้

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (3.32)$$

โดยที่ตัวห้อย  $nb$  หมายถึง ปริมาตรข้างเคียง ส่วน  $a_p$  และ  $a_{nb}$  เป็นสัมประสิทธิ์ของการทำให้อยู่ในรูปเชิงเส้นสำหรับตัวแปร  $\phi_p$  และ  $\phi_{nb}$  ตามลำดับ ซึ่งจำนวนของปริมาตรข้างเคียงมีค่าเท่ากับด้านที่ล้อมรอบปริมาตรที่พิจารณา ส่วน  $b$  เป็นเทอมที่เพิ่มมาจากแหล่งกำเนิดอื่นๆ

การหาผลเฉลยโดยวิธีการแยกพิจารณา (Segregated Method) เป็นการแยกส่วนในการคำนวณระหว่างสมการโมเมนตัมและสมการความต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามค่าต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณต้องสอดคล้องกัน สมการที่ (3.33) เป็นสมการโมเมนตัมที่ discretized แล้วในแนวแกน  $x$  โดยได้พิจารณาผลของแรงที่เกิดจากความดัน ( $pA_f$ ) และกำหนดให้  $\phi = u$

$$a_p u_p = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + \sum pA_f + B \quad (3.33)$$

โดยที่  $A_f$  แทนพื้นที่ผิวที่พิจารณา  $B$  แทนแหล่งกำเนิดอื่นๆ ที่ปราศจากการกระจายความดันสำหรับสมการโมเมนตัม ในแนวแกน  $y$  และแนวแกน  $z$  ก็มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ส่วนสมการความต่อเนื่องที่ discretized แล้วแสดงได้ดังนี้

$$\sum_f^{N_{faces}} \rho u_n A_f = 0 \quad (3.34)$$

โดยที่  $N_{face}$  เป็นจำนวนผนังล้อมรอบปริมาตร  $u_n$  คือ ความเร็วที่ผนังปริมาตร

### 3.6 กระบวนการหาคำตอบ (Solution algorithm)

เพื่อให้ค่าความดันและความเร็วในสมการโมเมนตัมสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง ดังนั้นกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE (Semi - Implicit Method for Pressure - Linked Equations), SIMPLER (Semi - Implicit Method for Pressure - Linked Equations Consistent ) และ PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) จึงถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบค่าความดันและความเร็วให้มีความสอดคล้องกัน (Versteeg & Malalasekera. 1995; FLUENT version 6.0 : 2001 ; Patankar & Spalding. 1972) จากสมการ (3.33) เราจะ

กำหนด  $p$  เพื่อให้ได้ค่าของ  $u$  และเพื่อปรับค่าที่ได้จากการคำนวณในรอบแรกเพื่อช่วยให้ลู่อู่เข้า หากคำตอบเราจะเพิ่ม  $p'$  ขึ้นมา ดังนั้นสมการ (3.33) สามารถเขียนได้เป็น

$$a_p u_p^* = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb}^* + \sum (p_w^* - p_e^*) A_f + B \quad (3.35)$$

โดยที่  $p_w^*$  และ  $p_e^*$  เป็นค่าความดันของแต่ละปริมาตรที่ติดกัน ในการแก้สมการจะเริ่มต้นด้วยการสมมติค่าความดัน  $p^*$  เพื่อให้ได้ค่า  $u^*$ ,  $v^*$  และ  $w^*$  และค่าที่ได้จะต้องที่สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง ดังนั้นความสัมพันธ์ที่ได้เพิ่มเทอม  $p'$  เข้ามาเพื่อปรับค่า  $p^*$  ในการคำนวณรอบต่อไป ซึ่งมีดังนี้

$$p = p^* + p', \quad u = u^* + u' \quad (3.36)$$

โดยที่  $p'$  เรียกว่า การตรวจสอบค่าความดัน (pressure correction) ดังนั้นสมการ (3.36) สามารถเขียนได้เป็น

$$a_p u_p' = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb}' + \sum (p_w' - p_e') A_f + B \quad (3.37)$$

ในกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE จะไม่พิจารณาเทอม  $\sum_{nb} a_{nb} u_{nb}'$  ดังนั้นจะได้สมการที่ดิส-ครีตของการตรวจสอบค่าความดันในปริมาตรเป็นดังนี้

$$u_p' \square d_f (p_w^* - p_e^*) \quad (3.38)$$

โดยที่ เทอม  $d_f$  มีค่าเท่ากับ  $d_f = \frac{A_f}{a_p}$  ในสมการโมเมนตัมที่ดิสครีตแล้ว การปรับค่าความดันและอัตราการไหลผ่านผนังปริมาตรในแต่ละครั้งนั้น จะเป็นไปตามสมการนี้

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (3.39)$$

โดยที่  $\alpha_p$  เป็นค่าแฟคเตอร์ของการปรับค่า สำหรับกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLEC นั้น เริ่มต้นจะเหมือนกับกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE ที่กล่าวมาข้างต้น แต่

ต่างกันได้ นำเทอม  $\sum_{nb} a_{nb} u'_{nb}$  มาพิจารณาด้วย ซึ่งจะมีสัมประสิทธิ์ของ  $d_f$  เป็นฟังก์ชันของ  $1 - \sum a_{nb} / a_p$  ดังนั้น สมการที่ตีศร็ดของการตรวจสอบค่าความดันในปริมาตรที่พิจารณา จะเป็น  $u'_p \square \frac{d_f}{1 - \sum a_{nb} / a_p} (p_w^* - p_e^*)$  ส่วนกระบวนการหาคำตอบแบบ PISO นั้น ได้ปรับปรุงประสิทธิภาพของการคำนวณจาก SIMPLE โดยการเพิ่ม Neighbor Correction และ Skewness Correction ซึ่งได้เพิ่มวงจร (Loop) ในการคำนวณเพื่อให้ค่าความดันและความเร็วของสมการโมเมนตัมสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่องเร็วขึ้น กระบวนการทำซ้ำนี้เรียกว่า การปรับค่าโมเมนตัม (Momentum Correction) หรือ Neighbor Correction กระบวนการหาคำตอบแบบ PISO นั้น ทำให้การใช้เวลาในการประมวลผลต่อรอบการคำนวณมากขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่จะทำให้จำนวนรอบในการทำซ้ำเพื่อหาคำตอบลดลง สำหรับ Skewness Correction นั้น เป็นตัวปรับค่าฟลักซ์ของมวลที่ผืนของปริมาตรและค่าความแตกต่างของการตรวจสอบค่าความดัน

### 3.7 เงื่อนไขขอบ (Boundary Condition)

ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่สำคัญที่ขาดเสียไม่ได้คือเงื่อนไขขอบ ดังนั้น เงื่อนไขขอบเป็นตัวบ่งชี้ถึงลักษณะของความเป็นจริงที่เกิดขึ้นในบริเวณขอบเขตของการคำนวณ ในการกำหนดเงื่อนไขขอบจำเป็นต้องคำนึงถึงความเป็นจริงที่เกิดขึ้น เพื่อให้การจำลองปัญหาเหมือนจริงมากที่สุด ซึ่งจะส่งผลถึงความถูกต้องของผลที่ได้จากการคำนวณ สำหรับการจำลองการไหลในงานวิจัยนี้ มีเงื่อนไขขอบดังต่อไปนี้

#### 3.7.1 เงื่อนไขขอบที่ทางเข้า (Inlet boundary condition)

ลักษณะของอากาศที่ไหลเข้าไซโคลนนั้น กำหนดเป็นค่าความเร็วเฉลี่ย และค่าความเข้มของการปั่นป่วน (Turbulence Intensity,  $I$ ) (FLUENT version 6.0 : 2001) ซึ่งจากค่าความเข้มของการปั่นป่วน สามารถคำนวณหาค่า  $k$  และ  $\varepsilon$  ได้จากสมการ

$$k = \frac{3}{2} (\overline{uI})^2 \quad (3.40)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\ell} \quad (3.41)$$

เมื่อ  $C_\mu$  คือค่าคงที่ โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 0.09 และ  $\ell = 0.07L$  โดยที่  $L$  คือค่าคุณลักษณะความยาว (Characteristic Length) และ  $\ell$  คือสเกลของความยาว

### 3.7.2 เงื่อนไขขอบที่ผนัง (wall boundary condition)

สำหรับเงื่อนไขขอบที่บริเวณผนัง กำหนดให้ความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ (No Slip Condition) และบริเวณใกล้ๆ ผนังกำหนดให้ใช้ฟังก์ชันผนังมาตรฐาน (Standard Wall Function) (Yakhot & Orzag. 1986) โดยกำหนดให้ค่าความเร็วเฉลี่ย สมการฟังก์ชันผนังมาตรฐานเขียนได้เป็น

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad (3.42)$$

โดยที่

$$u^+ \equiv \frac{\bar{u}_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{\tau_w / \rho} \quad (3.43)$$

$$y^+ \equiv \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} y_p}{\mu} \quad (3.44)$$

โดยที่  $\kappa$  คือค่าคงที่ของวอนการ์มันน์ (Von Karman Constant) มีค่าเท่ากับ 0.42 ส่วน  $E$  คือ ค่าคงที่จากการทดลองมีค่าเท่ากับ  $9.81 \bar{u}_p$  คือค่าความเร็วเฉลี่ยที่จุด  $P$   $k_p$  คือค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนที่จุด  $P$   $y_p$  คือระยะทางจากจุด  $P$  กับผนังและ  $\mu$  คือค่าความหนืดของของไหล โดยทั่วไปแล้ว เมื่อ  $y^+ > 11.25$  ค่าความเร็วเฉลี่ยที่ได้จะเป็นไปตามสมการ (3.44) (Patankar & Spalding. 1972) แต่ที่  $y^+ < 11.25$  ค่าของความเร็วเฉลี่ยจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดแบบราบเรียบ (Laminar Stress-strain Relationship) ดังนี้

$$u^+ = y^+ \quad (3.45)$$

### 3.7.3 เงื่อนไขขอบที่ทางออก (Outlet boundary condition)

สำหรับเงื่อนไขขอบที่ทางออก กำหนดเป็นแบบ Out Flow ซึ่งให้ค่าฟลักซ์ของการแพร่มีค่าเท่ากับศูนย์ โดยไม่คิดผลจากความดันที่ทางออกย้อนกลับ (Back Pressure) และการไหลอยู่ในช่วงพัฒนาเต็มที่แล้ว (Fully Developed)

### 3.8 สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค

สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้จากการอินทิเกรตของการสมมูลแรงที่กระทำกับอนุภาค ซึ่งอยู่ในรูปกรอบ Lagrangian การสมมูลแรงนี้ได้พิจารณาเทอมทางซ้ายมือกับเทอมต่างๆ ของแรงที่กระทำกับอนุภาค (Kraipech; Nowwakowski & Suksangpanomrung, 2004) สามารถเขียน ได้ดังนี้

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (3.46)$$

โดยที่  $u$  คือความเร็วของอากาศ  $u_p$  คือความเร็วของอนุภาค  $\mu$  คือความหนืดของอากาศ  $\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ  $\rho_p$  คือความหนาแน่นของอนุภาค  $F_x$  คือแรงอื่นๆ ที่กระทำกับอนุภาค และ  $F_D(u - u_p)$  เป็นแรงจุดลากต่อหน่วยของอนุภาค มีค่าเท่ากับ

$$F_D = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p C_c} \quad (3.47)$$

โดยที่  $C_c$  [10] คือ แฟคเตอร์ปรับค่าของคันทิงแฮม (Cunningham) ในกฎของสโตกส์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

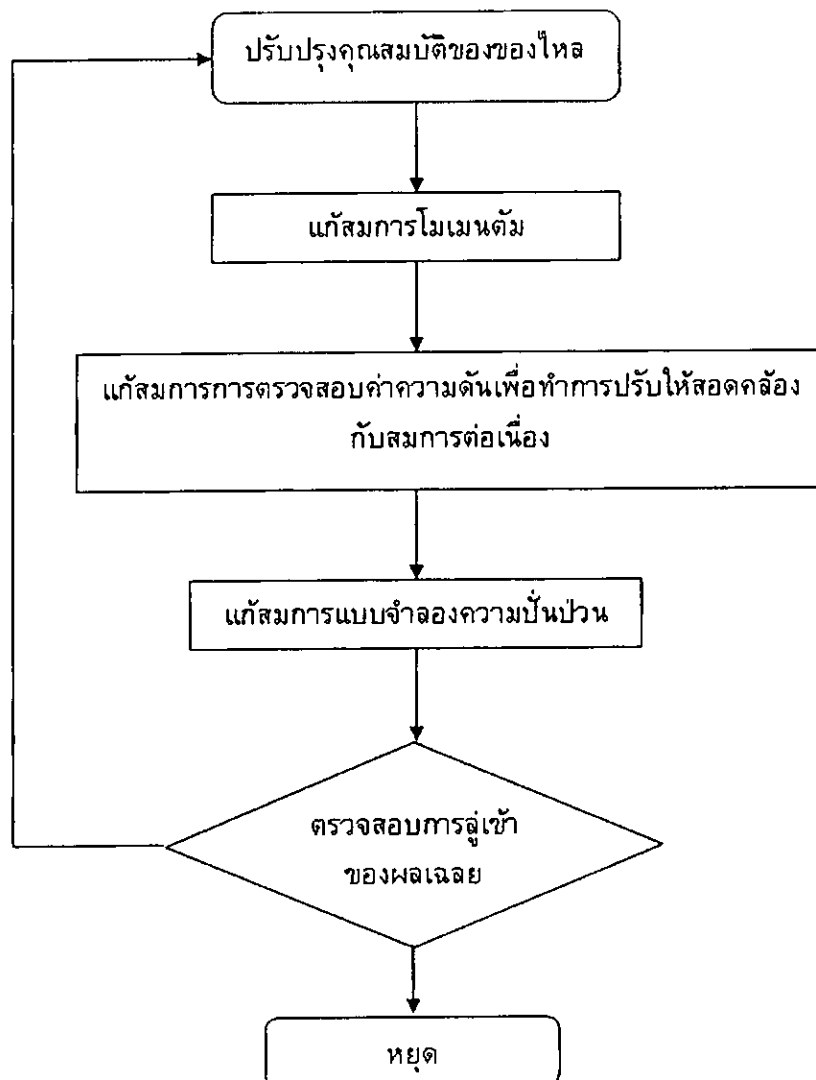
$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.4e^{-(1.1d_p/2\lambda)}) \quad (3.48)$$

เมื่อ  $\lambda$  เป็นค่าเฉลี่ยโมเลกุลของเส้นทางอิสระ (Molecular Mean Free Path)

### 3.9 ขั้นตอนและลำดับการแก้สมการ

สำหรับการหาผลเฉลยนั้น จะใช้การคำนวณซ้ำ ซึ่งขั้นตอนในแต่ละรอบมีรายละเอียดแสดงดังภาพประกอบ 3.5 มีขั้นตอนดังนี้

1. ปรับค่าคุณสมบัติของของไหลโดยใช้ผลเฉลยล่าสุด ในกรณีที่เป็นการคำนวณครั้งแรกจะใช้ค่าเงื่อนไขเริ่มต้น
2. แก้สมการโมเมนต์เพื่อหาฟลักซ์ของมวลตรงผนังปริมาตร
3. แก้สมการการตรวจสอบค่าความดันเพื่อทำการปรับให้สอดคล้องกับสมการต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากค่าความเร็วในขั้นตอนที่ 2 อาจไม่สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง
4. แก้สมการแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน
5. ตรวจสอบการลู่เข้าของผลเฉลย
6. กลับสู่ขั้นตอนที่ 1



ภาพประกอบ 9 ขั้นตอนและลำดับการแก้สมการ

### 3.10 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการจำลอง

ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการคำนวณด้วยวิธีการเชิงตัวเลขนั้น หลีกเลียงไม่ได้ เนื่องจากการประมาณค่า และใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้น สามารถแบ่งออกได้ดังนี้ ความผิดพลาดที่เกิดจากแบบจำลองเอง ความผิดพลาดที่เกิดจาก ตีศคริตและค่าความผิดพลาดที่เกิดจากกระบวนการทำซ้ำ (Iteration) รายละเอียดของค่าความผิดพลาดมี ดังต่อไปนี้ ความผิดพลาดที่เกิดจากแบบจำลอง คือ ค่าความแตกต่าง ระหว่างจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับอุปกรณ์ไฮโดลนจริง และการไหลจริงกับการไหลในการจำลองที่เราตั้งสมมติฐานขึ้น ซึ่งคุณสมบัติของการไหลไม่สามารถที่จะกำหนดให้ถูกต้องกับของไหลที่เป็นจริง

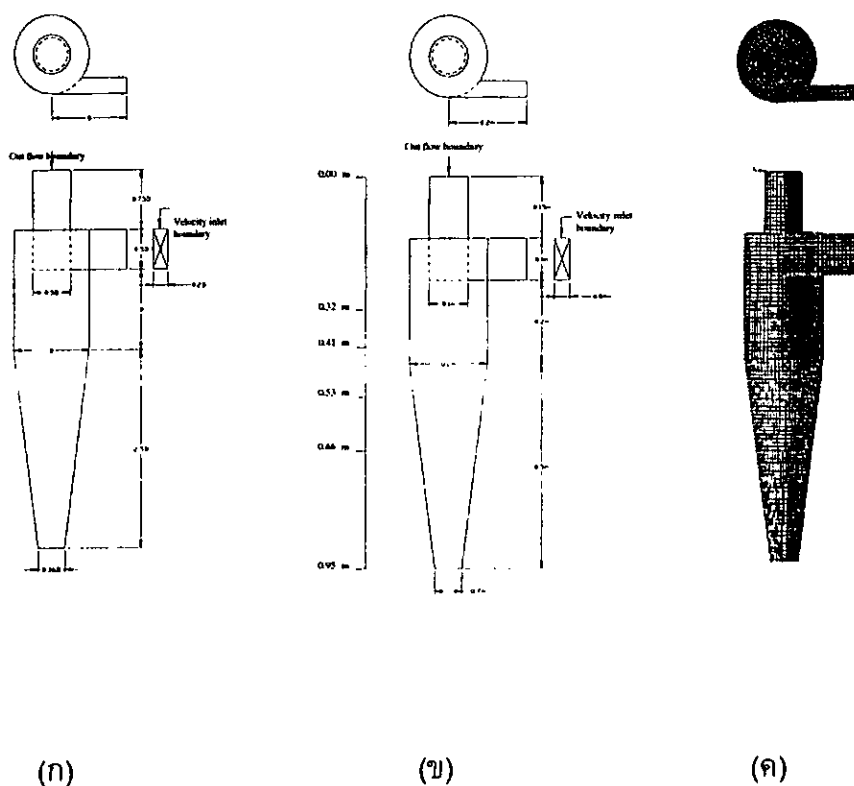
ได้ เช่น การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นที่แปรตามอุณหภูมิในของไหลจริง เจื่อนไซขอบเขตที่เรากำหนดไว้เป็นเพียงคาดคะเน ซึ่งไม่สามารถจะกำหนดให้ตรงกับความเป็นจริงมากที่สุดได้ ความผิดพลาดที่เกิดจากการตีสคริตนั้นคือ ความผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณค่าของสมการอนุพันธ์ย่อย ซึ่งเราจำเป็นที่จะต้องตัดเทอมปลายของสมการอนุกรมเทเลอร์ (Taylor Series) ออกไป เพื่อที่จะทำให้เราได้มีการประมาณค่าได้ และเทคนิคการประมาณค่าแต่ละชนิดก็จะมีค่าความผิดพลาดแตกต่างกันไป สุดท้ายเป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดจากกระบวนการทำซ้ำซึ่งในกระบวนการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อยที่ได้ทำการตีสคริตแล้วนั้น จำเป็นที่จะต้องใช้กระบวนการทำซ้ำ โดยที่กระบวนการทำซ้ำนั้นจะมีการสิ้นสุดที่เป็นไปได้ยากมาก ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องกำหนดจุดให้กระบวนการทำซ้ำนั้นหยุด จุดนั้น เรียกว่า Criteria ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นสามารถที่จะลดให้น้อยลงได้โดยการกำหนดค่านี้ให้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเราจะต้องใช้เวลาในการจำลองมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังมีค่าความผิดพลาดที่เกิดจากจำนวนกริดไม่ละเอียดพอ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากแบบจำลองการไหลไม่ดีพอ

## บทที่ 4

### ผลการจำลองเพื่อหา CFD เทคนิคที่เหมาะสมสำหรับไซโคลน

#### การคำนวณการไหลจากการใช้เทคนิคต่าง ๆ

ในบทนี้เป็นการแสดงการหา CFD เทคนิคที่เหมาะสม สำหรับการทำนายการไหลภายในอุปกรณ์ไซโคลน โดยในช่วงแรกจะนำเสนอการหาจำนวนกริดที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณ หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบลักษณะของการไหลที่ได้จากการคำนวณที่ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบต่างกัน โดยจะทำการเปรียบเทียบความเร็วในแนวแกนและความเร็วในแนวสัมผัสที่ระดับต่างๆ ต่อมาเป็นการแสดงการหาแบบวิธีการประมาณค่าของเทอมการพา (Convection) และการแพร่ (Diffusion) สุดท้ายเป็นการแสดงผลการคำนวณที่ได้จากกระบวนการทาง CFD ขนาดของไซโคลนและลักษณะกริดแสดงได้ดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 ขนาดและลักษณะกริดของไซโคลน

(ก) ขนาดที่เป็นสัดส่วนของ D (ข) ขนาดและระดับต่างๆ (ค) ลักษณะกริดของแบบจำลอง ภาพประกอบ 10 (ก) แสดงขนาดของไซโคลนในสัดส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของ

ไซโคลน ภาพประกอบ 10 (ข) แสดงขนาดของไซโคลนและระดับต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และ ภาพประกอบ 10 (ค) แสดงลักษณะกริดของแบบจำลองซึ่งถูกสร้างโดยโปรแกรม GAMBIT 2.04 สำหรับเทคนิคการจำลองการไหลนั้น ในการคำนวณแต่ละครั้งจะทำการจำลองโดยใช้ เทคนิคต่างกันไป โดยมีเทคนิคต่างๆ ที่จะทำจำลองแสดงได้ดังตาราง 2

ตาราง 2 การจำลองการไหลโดยเทคนิคต่างๆ

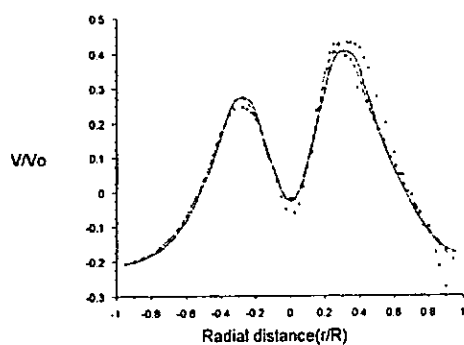
เทคนิค การ จำลอง	แบบจำลองการไหล		การประมาณค่าภายใน				กระบวนการหาคำตอบ			Residual
	$k - \varepsilon$	RNG	RSM	FODS	SODS	QUICK	SIMPLE	SIMPLEC	PISO	
1	✓			✓			✓			$10^{-6}$
2	✓			✓				✓		$10^{-6}$
3	✓			✓					✓	$10^{-6}$
4	✓				✓		✓			$10^{-6}$
5	✓				✓			✓		$10^{-6}$
6	✓				✓				✓	$10^{-6}$
7	✓					✓	✓			$10^{-5}$
8	✓					✓		✓		$10^{-5}$
9	✓					✓			✓	$10^{-5}$
10		✓		✓			✓			$10^{-6}$
11		✓		✓				✓		$10^{-6}$
12		✓		✓					✓	$10^{-6}$
13		✓			✓		✓			$10^{-6}$
14		✓			✓			✓		$10^{-6}$
15		✓			✓				✓	$10^{-6}$
16		✓				✓	✓			$10^{-5}$
17		✓				✓		✓		$10^{-5}$
18		✓				✓			✓	$10^{-5}$
19			✓	✓			✓			$10^{-6}$
20			✓	✓				✓		$10^{-6}$
21			✓	✓					✓	$10^{-6}$
22			✓		✓		✓			$10^{-6}$
23			✓		✓			✓		$10^{-6}$

ตาราง 2 (ต่อ)

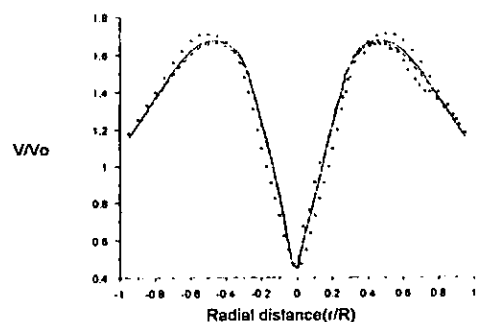
เทคนิค การ จำลอง	แบบจำลองการไหล			การประมาณค่าภายใน			กระบวนการหาค่าตอบ			Residual
	$k-\varepsilon$	RNG	RSM	FODS	SODS	QUICK	SIMPLE	SIMPLEC	PISO	
24			✓		✓				✓	$10^{-6}$
25			✓			✓	✓			$10^{-5}$
26			✓			✓		✓		$10^{-5}$
27			✓			✓			✓	$10^{-5}$

#### 4.2 การหาจำนวนกริดที่เหมาะสม

ในงานวิจัยนี้การหาจำนวนกริดที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณนั้น พิจารณาโดยเปรียบเทียบผลการคำนวณที่จำนวนกริด 8460, 44504 และ 124500 ของแต่ละเทคนิค ภาพประกอบ 11 แสดงผลการคำนวณด้วยเทคนิคที่ 26 (จากตาราง 2) โดยผลการคำนวณที่ได้แสดงเป็นค่าความเร็วในแนวแกน และความเร็วในแนวสัมผัสกับจำนวนกริดทั้งสามที่ใช้ในการคำนวณ ที่ระดับ  $z = 0.41$  m. ซึ่งแกนอนแสดงระยะต่างๆ ในแนวรัศมี ( $r/R$ ) และที่จุด  $r = 0$  เป็นตำแหน่งจุดศูนย์กลางของไซโคลน ส่วนค่าของความเร็วจะแสดงในแนวแกนตั้ง ( $V/V_0$ )



(ก)



(ข)

× 8460, ---- 44504, — 124500, ▲ experimental

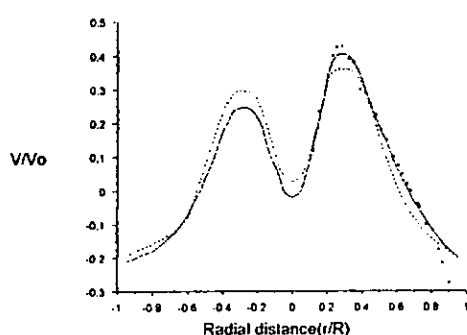
ภาพประกอบ 11 การกระจายความเร็วกับจำนวนกริดที่ใช้ต่างกัน ที่ระดับ  $z = 0.41$  m.

(ก) ความเร็วในแนวแกน (ข) ความเร็วในแนวสัมผัส

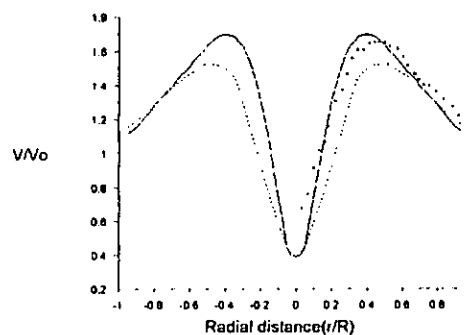
จากภาพประกอบ 11 พบว่าค่าความเร็วที่ได้จากการคำนวณจะมีความแตกต่างกันน้อยมากเมื่อใช้จำนวนกริดเท่ากับ 44504 และ 124500 ดังนั้น จำนวนกริดที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการคำนวณในขั้นตอนต่อไปมีค่าเท่ากับ 44504

#### 4.3 การเปรียบเทียบการใช้แบบวิธีการประมาณค่าภายในต่างกัน

สำหรับแบบวิธีการประมาณค่าภายในที่ใช้คำนวณเทอมการพาและการแพร่ นั้น ในที่นี้ได้แสดงผลการคำนวณจากการใช้เทคนิคที่ 23 และ 26 กล่าวคือ ใช้วิธีผลต่างตันลุ่มอันดับที่สอง และระเบียบวิธีผลต่างแบบ QUICK ร่วมกับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน RSM และกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLEC ผลจากการจำลองด้วยวิธีทั้งสองเทคนิคเปรียบเทียบกันแสดงดังภาพประกอบ 12 พิจารณาความเร็วในแนวแกนจากภาพประกอบ 12 (ก) พบว่าลักษณะการกระจายความเร็วของอากาศภายในไซโคลนที่ทำการคำนวณด้วยวิธีผลต่างตันลุ่มอันดับที่สอง และระเบียบวิธีผลต่างแบบ QUICK ให้ผลที่ได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งบริเวณแกนกลางของไซโคลนพบว่าการใช้ระเบียบวิธีผลต่างแบบ QUICK จะให้ค่าความเร็วต่ำกว่าแบบวิธีผลต่างตันลุ่มอันดับที่สองเล็กน้อย แต่ค่าความเร็วสูงสุดพบว่า ผลที่ได้จากการใช้ระเบียบวิธีผลต่างแบบ QUICK จะให้ค่าความเร็วสูงกว่า ส่วนความเร็วในแนวสัมผัสนั้น จากภาพประกอบ 12 (ข) พบว่า ลักษณะการกระจายความเร็วในแนวสัมผัสของอากาศภายในไซโคลนที่ทำการคำนวณด้วยวิธีผลต่างตันลุ่มอันดับที่สองและวิธีผลต่างแบบ QUICK มีลักษณะการกระจายความเร็วคล้ายกัน ซึ่งค่าความเร็วสูงสุดพบว่าการใช้แบบวิธีผลต่างแบบ QUICK จะให้ค่าความเร็วสูงกว่าผลจากการคำนวณด้วยวิธีผลต่างตันลุ่มอันดับที่สอง โดยที่ลักษณะความชันของการกระจายความเร็วด้วยระเบียบวิธีผลต่างแบบ QUICK จะมีความชันมากกว่าวิธีผลต่างตันลุ่มอันดับที่สอง



(ก)



(ข)

----- Second order, — QUICK, ▲ experimental

ภาพประกอบ 12 เปรียบเทียบความเร็วจากแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน RSM กับการประมาณค่าภายในต่างกัน

## (ก) ความเร็วในแนวแกน (ข) ความเร็วในแนวสัมผัส

พิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบวิธีการประมาณค่าทั้งสองแบบกับการทดลอง พบว่า ระเบียบวิธีผลต่างแบบ QUICK ให้ผลสอดคล้องกับการทดลองมากกว่า แบบวิธีผลต่างด้นลมอันดับที่สอง ดังนั้นแบบวิธีการประมาณค่าภายในที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณการไหลภายในไซโคลนที่จะนำไปคำนวณต่อไปเป็นระเบียบวิธีผลต่างแบบ QUICK

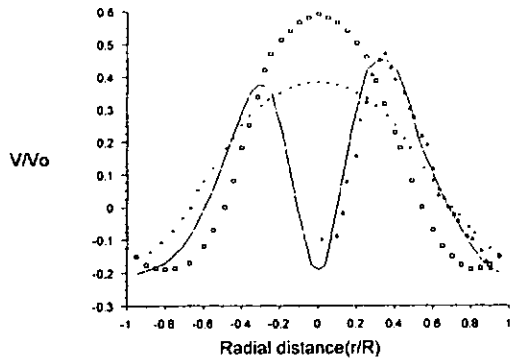
## 4.4 การเปรียบเทียบการใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนต่างกัน

ในการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนภายในไซโคลนนั้น แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่ใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบ ได้แก่ แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน  $k - \epsilon$ , RNG และ RSM และได้แสดงผลจากการคำนวณด้วยเทคนิคที่ 8, 17 และ 26 ผลจากการคำนวณด้วยแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนทั้งสามแสดงเปรียบเทียบได้ดังภาพประกอบ 13 และ 14 ซึ่งเป็นการคำนวณที่ใช้จำนวนกริดเท่ากับ 44504 และใช้กระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLEX ร่วมกับการประมาณค่าภายในแบบระเบียบวิธีผลต่างแบบ QUICK แต่ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนต่างกัน จากภาพประกอบ 13 จะเห็นได้ว่า ลักษณะของการกระจายความเร็วในแนวแกนที่ได้จากแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน  $k - \epsilon$  และ RNG มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยเฉพาะบริเวณแกนกลางของไซโคลนจะมีค่าความเร็วสูงสุด ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าความเร็วที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน RNG สูงกว่าที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน  $k - \epsilon$  และบริเวณห่างจากจุดศูนย์กลางไปหาผนังทั้งสองข้างจะมีค่าความเร็วลดลงเรื่อยๆ แต่ผลที่ได้จากการคำนวณที่ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน RSM มีลักษณะการกระจายความเร็วจะถูกแบ่งโดยจุดศูนย์กลาง ( $r = 0$ ) ออกเป็นสองด้านคล้ายกัน โดยลักษณะของการกระจายความเร็ว ( $r/R$ ) บริเวณช่วง  $0 \sim 0.2$  m. ความเร็วจะเพิ่มขึ้น และจะมีค่าสูงสุดในช่วง  $0.2 \sim 0.4$  m. แล้วความเร็วจะลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าต่ำสุดที่บริเวณผนังของไซโคลน แสดงว่าการไหลเป็นการไหลวนแบบบังคับ (Force Vortex) พิจารณาความเร็วในแนวสัมผัสจากภาพประกอบ 14 จะเห็นได้ว่า การลักษณะของการกระจายความเร็วในแนวสัมผัสที่ได้จากแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน  $k - \epsilon$ , RNG และ RSM มีส่วนที่คล้ายกันคือ บริเวณแกนกลางของไซโคลนจะต่ำสุดและความเร็วจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อรัศมีมากขึ้น อย่างไรก็ตามลักษณะของการเพิ่มขึ้นของความเร็วจากการคำนวณที่ได้จากการใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน  $k - \epsilon$  และ RNG นั้น ค่าความเร็วสูงสุดจะอยู่บริเวณผนังของไซโคลน แต่ผลที่ได้จากการคำนวณที่ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน RSM ค่าความเร็วสูงสุดจะอยู่บริเวณช่วงรัศมี  $0.2 \sim 0.6$  m. จากนั้นความเร็วจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงบริเวณผนังของไซโคลน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนทั้งสามแบบ มีค่าความเร็วในแนวแกนสูงสุด ( $V/V_0$ )

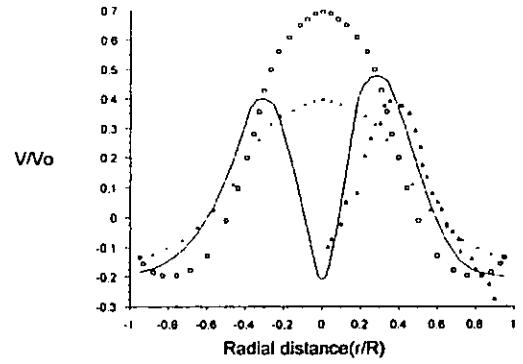
จากการคำนวณด้วยแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน  $k - \epsilon$ , RNG และ RSM เป็น 0.26, 0.53 และ 0.41 m/s ตามลำดับ ส่วนค่าความเร็วสูงสุดในแนวสัมผัสมีค่าเป็น 1.88, 2 และ 1.63 m/s ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความเร็วกับผลการทดลอง พบว่า ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน  $k - \epsilon$ , RNG และ RSM กรณีความเร็วในแนวแกนมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองร้อยละ 50.14, 58.06 และ 33.43 ตามลำดับ กรณีความเร็วในแนวสัมผัสมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองร้อยละ 21.11, 50.17 และ 18.10 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ลักษณะของการกระจายความเร็วที่ได้จากแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน RSM เท่านั้นที่สอดคล้องกับการทดลอง เมื่อพิจารณาความรุนแรงที่แสดงในการหมุน พบว่า มีค่า Swirl number เท่ากับ 2.54

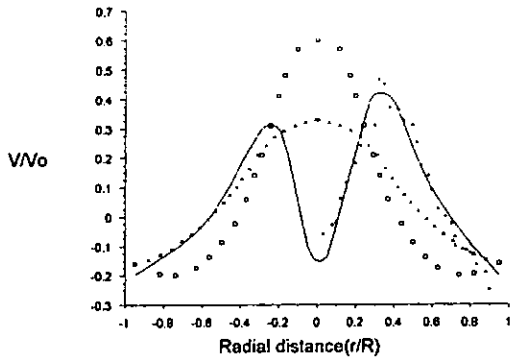
ดังนั้นการทำนายการไหลของอากาศภายในไซโคลนด้วยกระบวนการทาง CFD โดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน RSM มีกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLEC และประมาณค่าด้วยระเบียบวิธีผลต่างแบบ QUICK ให้ผลสอดคล้องกับการทดลองมากกว่าแบบอื่นๆ และสามารถทำนายพฤติกรรมการไหลภายในไซโคลนได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะแสดงในหัวข้อต่อไป



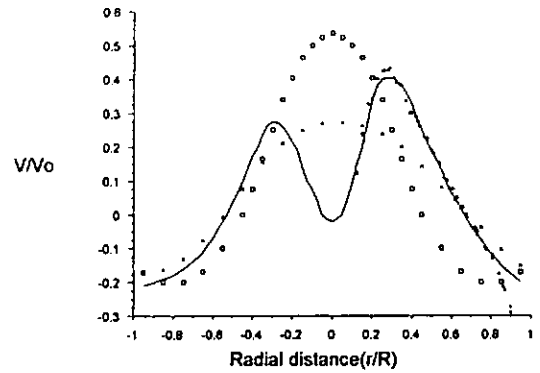
$z = 0.32 \text{ m}$



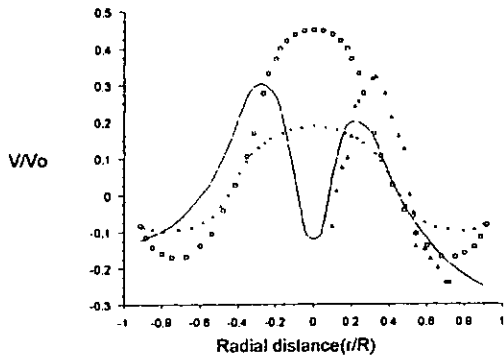
$z = 0.35 \text{ m}$



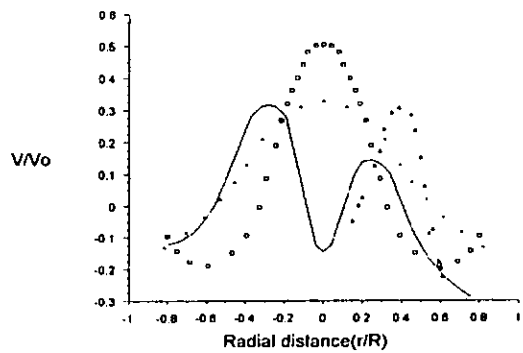
$z = 0.38 \text{ m}$



$z = 0.41 \text{ m}$



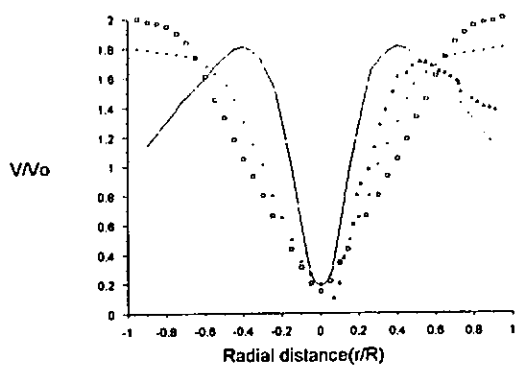
$z = 0.59 \text{ m}$



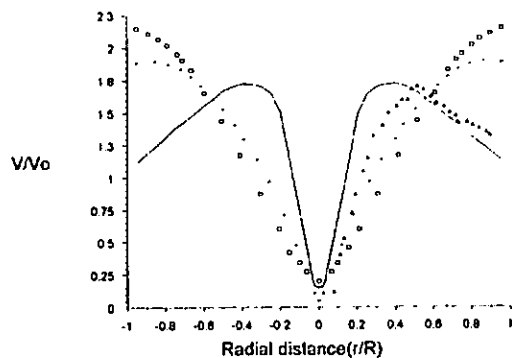
$z = 0.66 \text{ m}$

$\times$   $k - \epsilon$  ,  $\square$  RNG , --- RSM ,  $\blacktriangle$  Experimental

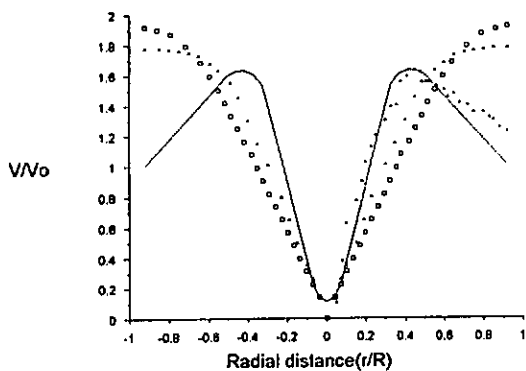
ภาพประกอบ 13 เปรียบเทียบความเร็วในแนวแกนที่ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนต่างกัน



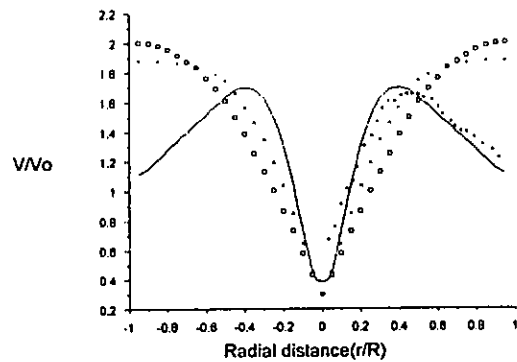
$z = 0.32 \text{ m}$



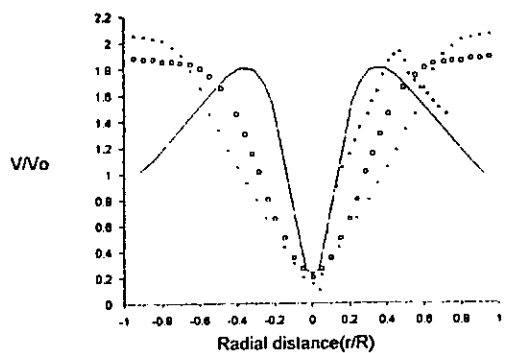
$z = 0.35 \text{ m}$



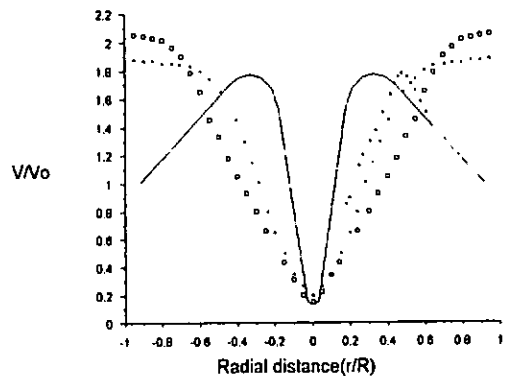
$z = 0.38 \text{ m}$



$z = 0.41 \text{ m}$



$z = 0.59 \text{ m}$



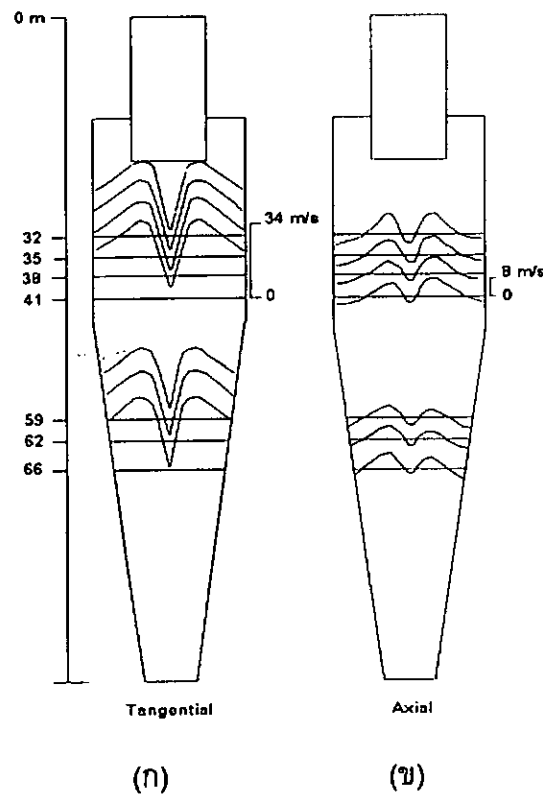
$z = 0.66 \text{ m}$

$\times k - \epsilon$  ,  $\square$  RNG ,  $---$  RSM ,  $\blacktriangle$  Experimental

ภาพประกอบ 14 เปรียบเทียบความเร็วในแนวสัมผัสที่ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนต่างกัน

#### 4.5 พฤติกรรมการไหลของอากาศภายในไซโคลน

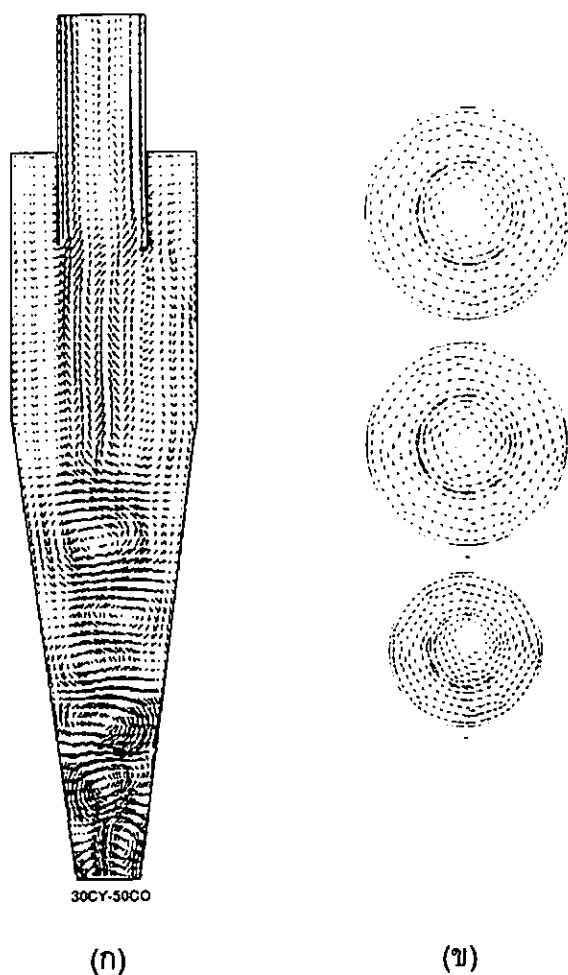
พฤติกรรมการไหลของอากาศภายในไซโคลนที่ได้จากการคำนวณโดยใช้เทคนิคที่ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด สามารถทำนายลักษณะความเร็วของอากาศที่ไหลภายในไซโคลนแสดงได้ดังภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 ความเร็วของอากาศที่ไหลภายในไซโคลน

(ก) ความเร็วในแนวสัมผัส (ข) ความเร็วในแนวแกน

ภาพประกอบ 15 (ก) แสดงความเร็วในแนวสัมผัสและภาพประกอบ 15 (ข) แสดงความเร็วในแนวแกน ส่วนลักษณะของการไหลแสดงเป็นเวกเตอร์ความเร็วของอากาศที่ไหลภายในไซโคลน แสดงได้ดังภาพประกอบ 16 (ก) และ (ข) พบว่า มีกระแสไหลวนเกิดขึ้นมากที่บริเวณทรงกรวย เนื่องจากในส่วนนี้มีการเปลี่ยนทิศทางความเร็วจากที่ความเร็วบางส่วนเคลื่อนที่ลงเป็นการเคลื่อนที่ขึ้น



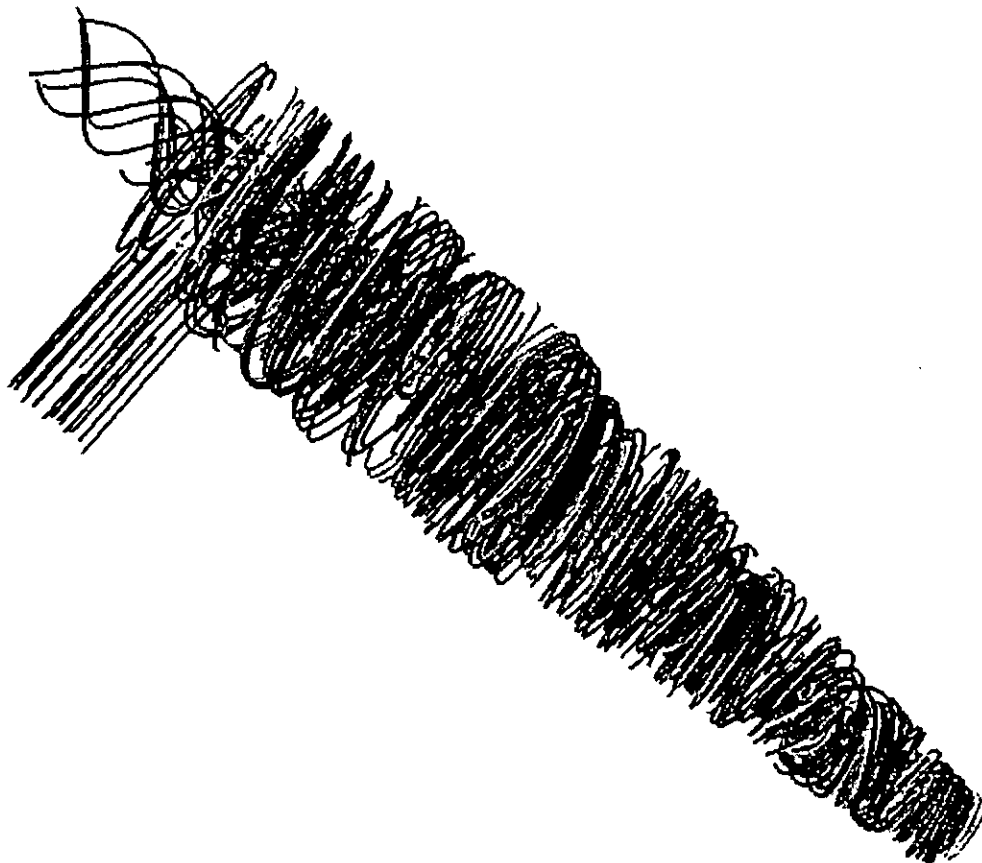
ภาพประกอบ 16 เวกเตอร์ของขนาดความเร็วของอากาศภายในไซโคลน

(ก) ระนาบ  $r-z$  (ข) ระนาบ  $r-\theta$  ที่ระดับ  $z = 0.26, 0.45$  และ  $0.70$  m.

จากภาพประกอบ 16 พบว่า การเคลื่อนที่ของความเร็วบริเวณชั้นในจะมีการส่ายของลำการไหล ซึ่งลักษณะของการส่ายของลำการไหลบริเวณทรงกระสวยจะมากกว่าบริเวณทรงกระบอก จากภาพประกอบ 16 (ก) พบว่า มีการเกิดกระแสไหลวนขึ้นบริเวณทรงกระสวย ส่วนจากภาพประกอบ 16 (ข) พบว่า ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของกระแสอากาศไหลวนบริเวณทรงกระบอกจะมีการเปลี่ยนตำแหน่งเพียงเล็กน้อย ต่างจากบริเวณทรงกระสวยจะมีการเปลี่ยนตำแหน่งอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่า พฤติกรรมการไหลทางด้านซ้ายและขวาจะไม่สมมาตรกัน มีสาเหตุเนื่องมาจากอากาศที่ไหลเข้าในไซโคลนเพียงด้านข้างด้านเดียว

พฤติกรรมการไหลของอากาศภายในไซโคลนที่ได้จากการคำนวณ พบว่าลักษณะของเส้นการไหลที่เกิดขึ้นเป็นแบบขดภายในไซโคลน ซึ่งจะขดเป็นวงสองชั้น ชั้นนอกจะเคลื่อนที่ลงส่วนล่างของไซโคลน ส่วนชั้นในจะขดเป็นวงเคลื่อนตัวย้อนกลับขึ้นออกสู่ด้านบนของทางออก

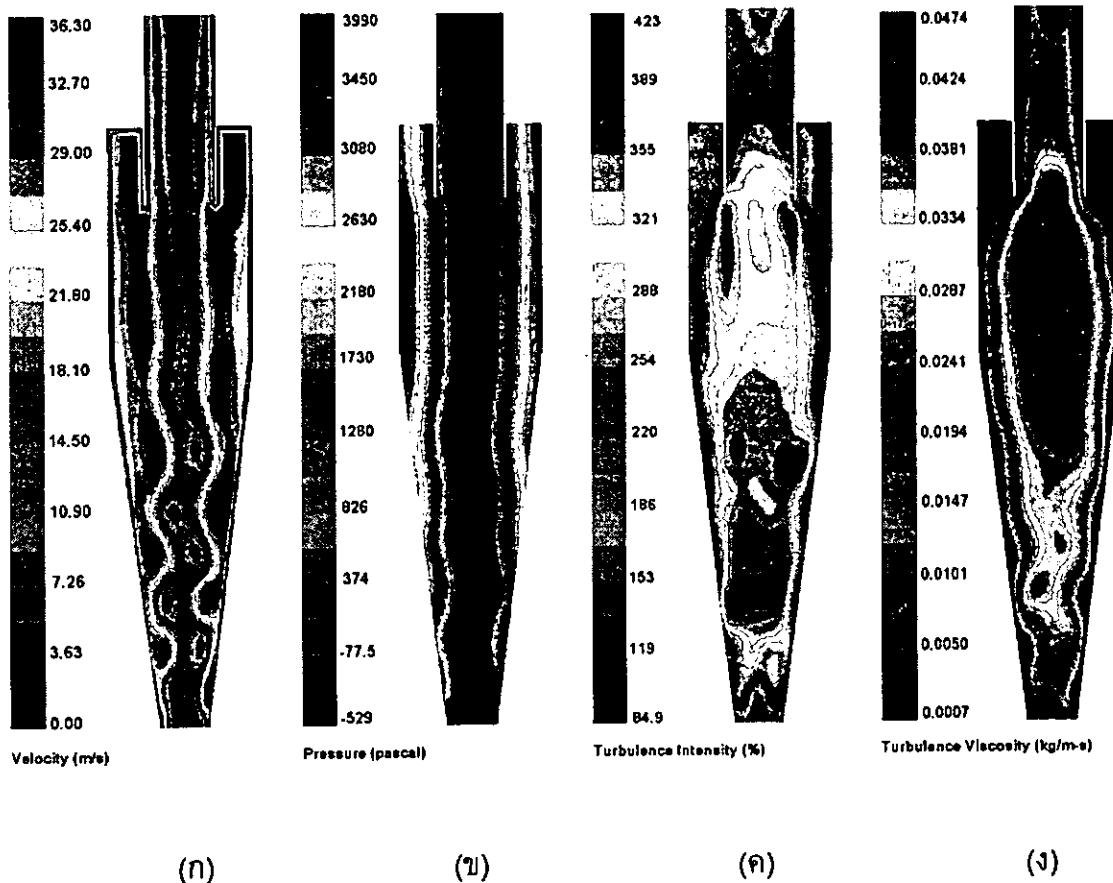
ของอากาศสะอาด แสดงได้ดังภาพประกอบ 17 จะเห็นได้ว่า การไหลที่เกิดขึ้นภายในไซโคลนจะมีทั้งการเคลื่อนที่ขึ้นและลง



ภาพประกอบ 17 ลักษณะของเส้นการไหล (Path line) ของอากาศภายในไซโคลน

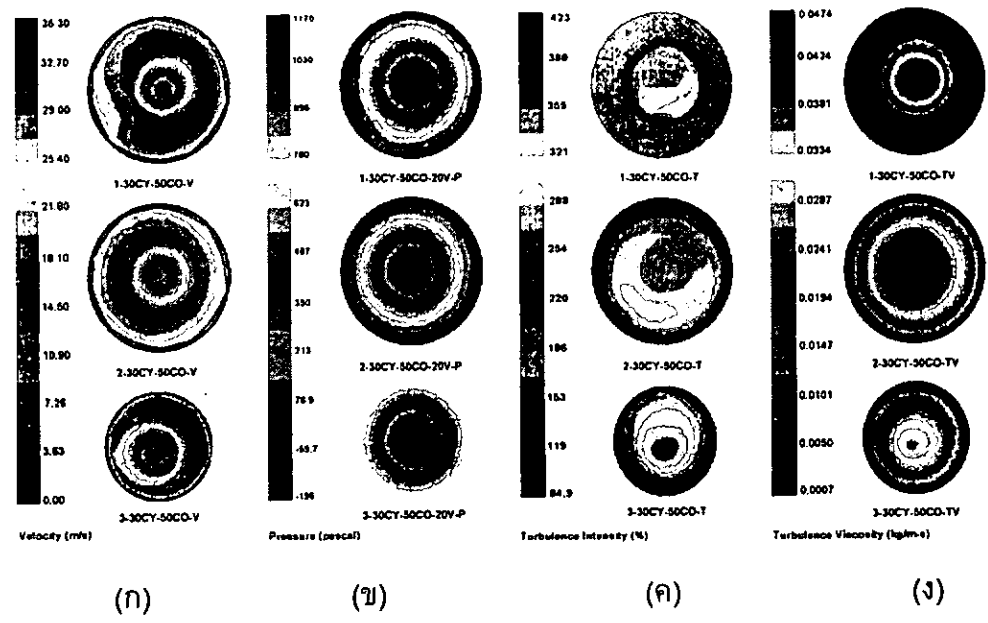
พฤติกรรมกรไหลในรูป Contours ของความเร็ว ความดัน ความปั่นป่วนและความหนืดของความปั่นป่วนแสดงดังภาพประกอบ 18 และ 19 ซึ่งภาพประกอบ 18 แสดงบนระนาบ  $r-z$  จากภาพประกอบ 18 (ก) จะเห็นว่า ที่ระยะรัศมี ( $r/R$ ) 0.2, 0.4 m. ของไซโคลนจะมีความเร็วสูงกว่าบริเวณอื่นๆ พิจารณาพฤติกรรมกรไหลในรูปความดันแสดงจากภาพประกอบ 18 (ข) พบว่า บริเวณแกนกลางของไซโคลนจะมีความดันต่ำกว่าบริเวณอื่นๆ ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า แกนกลางความดันต่ำ (Low Pressure Core) พิจารณาพฤติกรรมกรของการปั่นป่วนแสดงจากภาพประกอบ 18 (ค) พบว่า บริเวณส่วนกลางของไซโคลนจะมีปั่นป่วนมากกว่าบริเวณอื่นๆ ส่วนความหนืดของความปั่นป่วนที่แสดงในภาพประกอบ 18 (ง) พบว่า บริเวณส่วนกลางทรงกระบอกของไซโคลนมีค่าความหนืดของความปั่นป่วนมากกว่าบริเวณอื่นๆ พฤติกรรมกรไหลของไซโคลนบนระนาบ  $r-\theta$  แสดงในภาพประกอบ 19 ซึ่งเป็นการแสดงที่ระดับใต้ Vortex

Finder ระดับรอยต่อระหว่างทรงกระบอกกับทรงกรวย และระดับกึ่งกลางทรงกรวย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางของกระแสไหลวนของอากาศจะเปลี่ยนไป ซึ่งสอดคล้องกับภาพประกอบ 18 (ก)



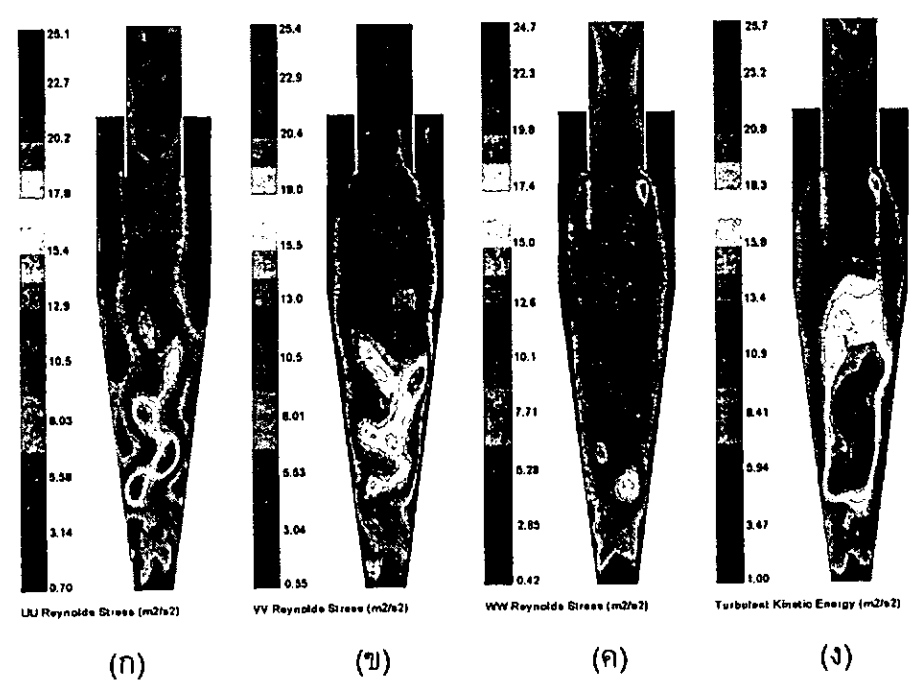
ภาพประกอบ 18 พฤติกรรมของอากาศในไซโคลน ระนาบ r-z ในรูป Contours

(ก) ความเร็ว (ข) ความดัน (ค) ความปั่นป่วน (ง) ความหนืดของความปั่นป่วน



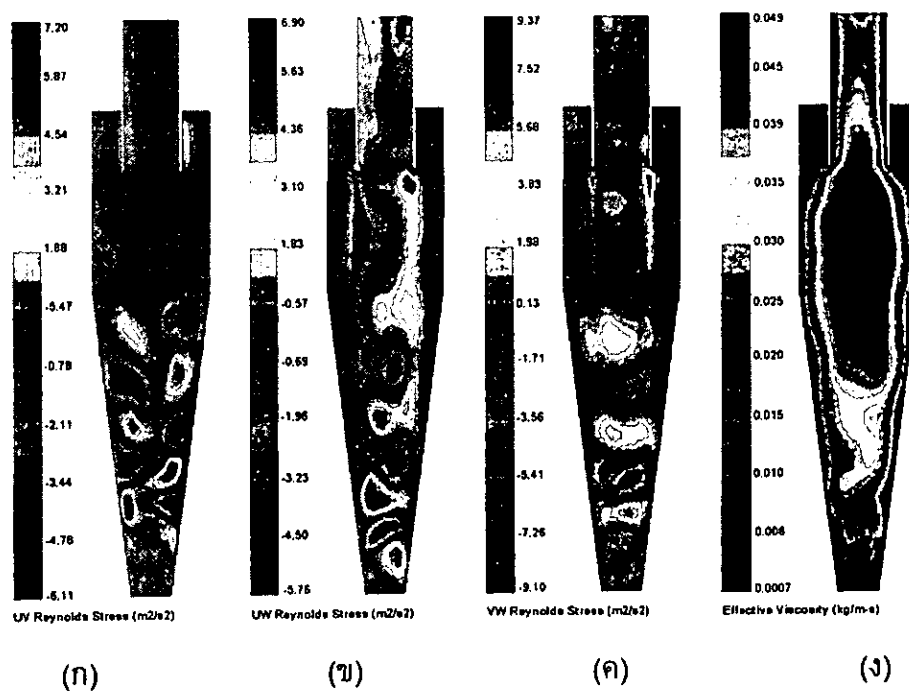
ภาพประกอบ 19 พฤติกรรมของอากาศในไซโคลน ระนาบ r- $\theta$  ในรูป contours

(ก) ความเร็ว (ข) ความดัน (ค) ความปั่นป่วน (ง) ความหนืดของความปั่นป่วน



ภาพประกอบ 20 พฤติกรรมของอากาศในไซโคลน ระนาบ r-z ในรูป Contours

(ก) นอร์มอลสเตรสของ VV (ข) นอร์มอลสเตรสของ UU (ค) นอร์มอลสเตรสของ WW (ง) พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน



ภาพประกอบ 21 พฤติกรรมของอากาศในไซโคลน ระนาบ r-z ในรูป Contours

(ก) เชียร์สเตรสของ UV (ข) เชียร์สเตรสของ UW (ค) เชียร์สเตรสของ VW  
(ง) พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

จากการคำนวณพบว่า ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นภายในไซโคลนมีมากที่สุดที่บริเวณแกนกลางของทรงกรวย สังเกตได้จากภาพประกอบ 18 (ค) และ 19 (ค) ส่วนพฤติกรรมของอากาศในไซโคลนในรูป Contours ของนอร์มอลสเตรส (Normal Stress) ของ VV, UU และ WW แสดงดังภาพประกอบ 20 พบว่านอร์มอลสเตรสสูงสุดที่บริเวณทรงกรวยของไซโคลนซึ่งสอดคล้องบริเวณที่เกิดความปั่นป่วนสูงสุด เช่น ตำแหน่งที่นอร์มอลสเตรสของ VV เกิดสูงสุดจะอยู่บริเวณส่วนกลางของทรงกรวยและในกรณีเดียวกันเชียร์สเตรส (Shear Stress) ของ UV, UW และ VW แสดงดังภาพประกอบ 21 พบว่า บริเวณที่เกิดเชียร์สเตรสสูงสุดก็อยู่บริเวณทรงกรวยเช่นกัน ซึ่งสังเกตได้ชัดเจนที่บริเวณทรงกรวยจากภาพประกอบ 21

ต่อไปเป็นการประยุกต์กระบวนการ CFD ที่ได้จากบทนี้ โดยทำการจำลองการไหลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าไซโคลนและเปลี่ยนแปลงความสูงของไซโคลนเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลที่เปลี่ยนไปจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว สุดท้ายทำการจำลองการไหลโดยการเพิ่มอนุภาคผสมกับอากาศที่ไหลเข้าในไซโคลน (การไหลแบบสองเฟส) ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะกล่าวในบทต่อไป

## บทที่ 5

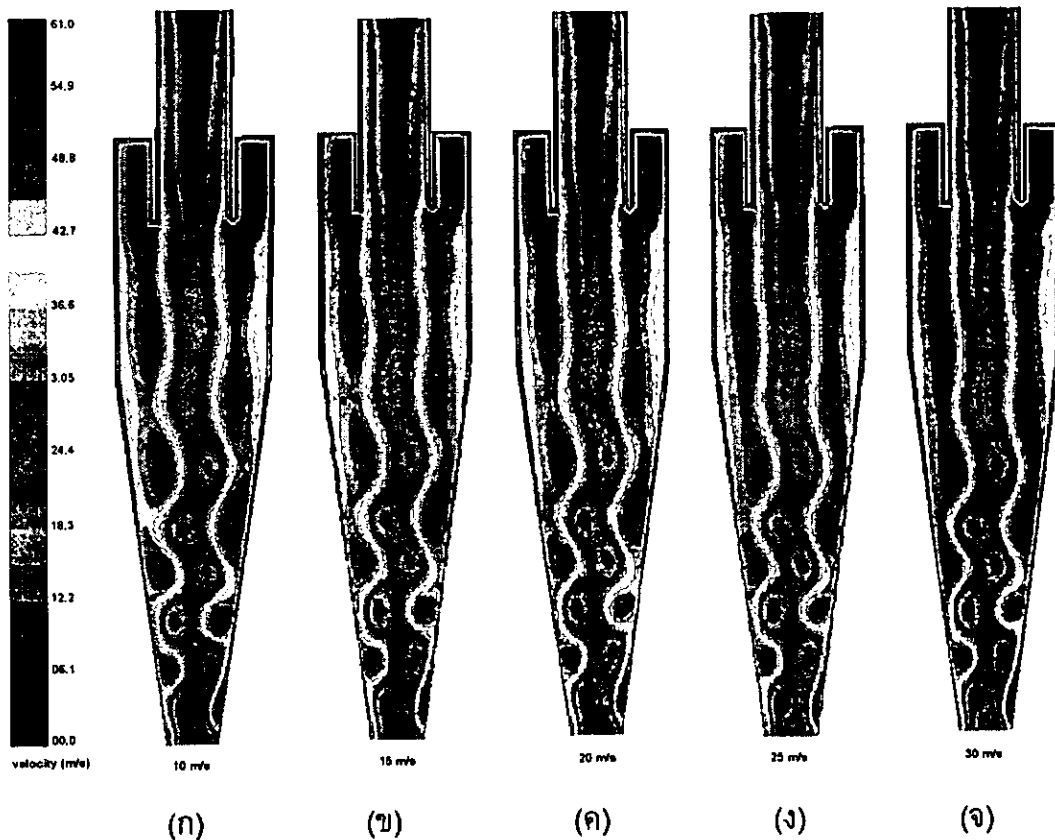
### การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการไหลภายในไซโคลน และการไหลแบบสองเฟส

ในบทนี้เป็นการจำลองการไหลโดยมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าไซโคลนและเปลี่ยนแปลงความสูงของไซโคลน เพื่อศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการไหลที่เปลี่ยนแปลงไป สุดท้ายเป็นการจำลองการไหลแบบสองเฟสโดยการเพิ่มอนุภาคผสมกับอากาศที่ไหลเข้าในไซโคลน ซึ่งในการจำลองการไหลแบบสองเฟสนั้น จะทำการเปลี่ยนความเร็วของอนุภาคที่ไหลเข้าไซโคลน รายละเอียดต่างๆ จะกล่าวถึงต่อไป

#### 5.1 การปรับเปลี่ยนความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าไซโคลน

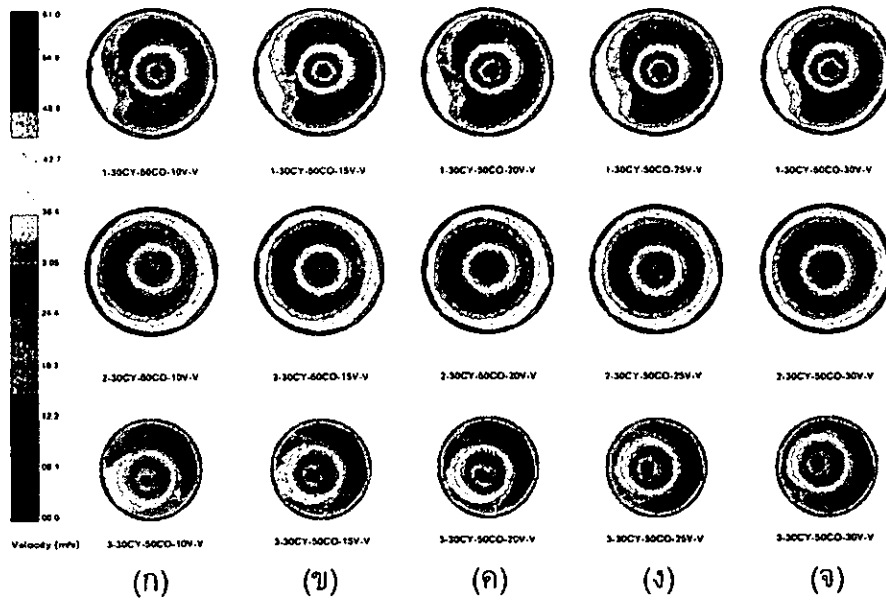
การจำลองการไหล โดยการปรับเปลี่ยนความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าไซโคลน เพื่อศึกษาพฤติกรรม และลักษณะการไหลของอากาศภายในไซโคลน ในการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าไซโคลนนั้น จะทำการลดความเร็วจากเดิม 20 m/s ลดลงเป็น 15 และ 10 m/s ตามลำดับ ส่วนการเพิ่มความเร็วจะทำการเพิ่มเป็น 25 และ 30 m/s ตามลำดับ ผลที่ได้ทำการเปรียบเทียบกับความเร็วเดิม โดยแสดงเป็น Contours ความเร็ว และความดัน เวกเตอร์ความเร็วและเส้นการไหล ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังภาพประกอบที่ 22 – 29 จากภาพประกอบ 22 และ 23 จะเห็นได้ว่า เมื่อเราลด และเพิ่มความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าไซโคลน จะทำให้พฤติกรรม และลักษณะการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นภายในไซโคลนเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยเฉพาะบริเวณแกนกลางความดันต่ำมีลักษณะการแกว่งต่างจากเดิมเพียงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาจุดศูนย์กลางของกระแสไหลวนในระนาบ  $r-\theta$  ที่บริเวณใต้ Vortex Finder (ระดับที่ 1) บริเวณรอยต่อระหว่างทรงกระบอกกับทรงกรวย (ระดับที่ 2) และบริเวณกึ่งกลางของทรงกรวย (ระดับที่ 3) เปรียบเทียบกัน จะเห็นว่า ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของจุดศูนย์กลางของกระแสไหลวนทั้ง 3 ระดับแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ส่วนภาพประกอบ 24 และ 25 แสดงการเปรียบเทียบ Contours ของความดันที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าไซโคลน จะพบว่า ความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าลดลงทำให้ความดันที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางไซโคลนเพิ่มขึ้นและความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าเพิ่มขึ้นทำให้ความดันที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางไซโคลนลดลง ภาพประกอบ 26 และ 27 แสดงการเปรียบเทียบ Contours ของความปั่นป่วน บนระนาบ  $r-z$  จะพบว่า ความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าเพิ่มขึ้นทำให้ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางไซโคลนเพิ่มขึ้นและความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าลดลงทำให้ความปั่นป่วน

ที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางไซโคลนลดลง บนระนาบ  $r-\theta$  พบว่า บริเวณแกนกลางของทรงกรวย มีความปั่นป่วนมากกว่าบริเวณอื่น ๆ ส่วนภาพประกอบ 28 และ 29 แสดงการเปรียบเทียบ เวกเตอร์ความเร็วที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าไซโคลน พบว่า ความเร็วลดลงทำให้เกิดการไหลวนของกระแสอากาศลดลงและความเร็วของการไหลเข้าเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการไหลวนของกระแสอากาศมากขึ้น



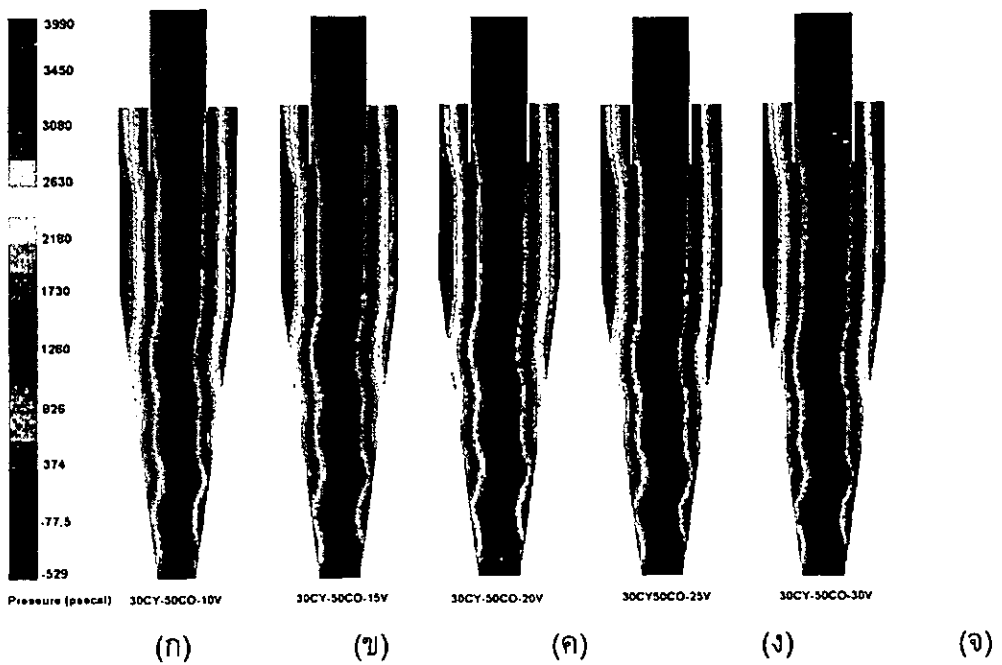
ภาพประกอบ 22 เปรียบเทียบ Contours ความเร็วในระนาบ  $r-z$  ที่ความเร็วไหลเข้าต่างกัน

(ก) ความเร็ว 10m/s (ข) ความเร็ว 15m/s (ค) ความเร็ว 20m/s (ง) ความเร็ว 25m/s  
(จ) ความเร็ว 30m/s



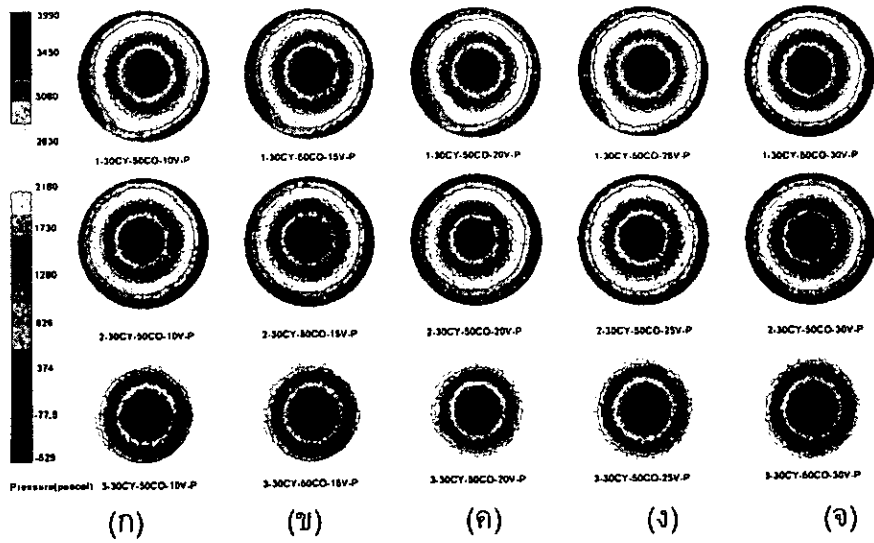
ภาพประกอบ 23 เปรียบเทียบ Contours ความเร็วในระนาบ  $r-\theta$

(ก) ความเร็ว 10m/s (ข) ความเร็ว 15m/s (ค) ความเร็ว 20m/s (ง) ความเร็ว 25m/s  
 (จ) ความเร็ว 30m/s



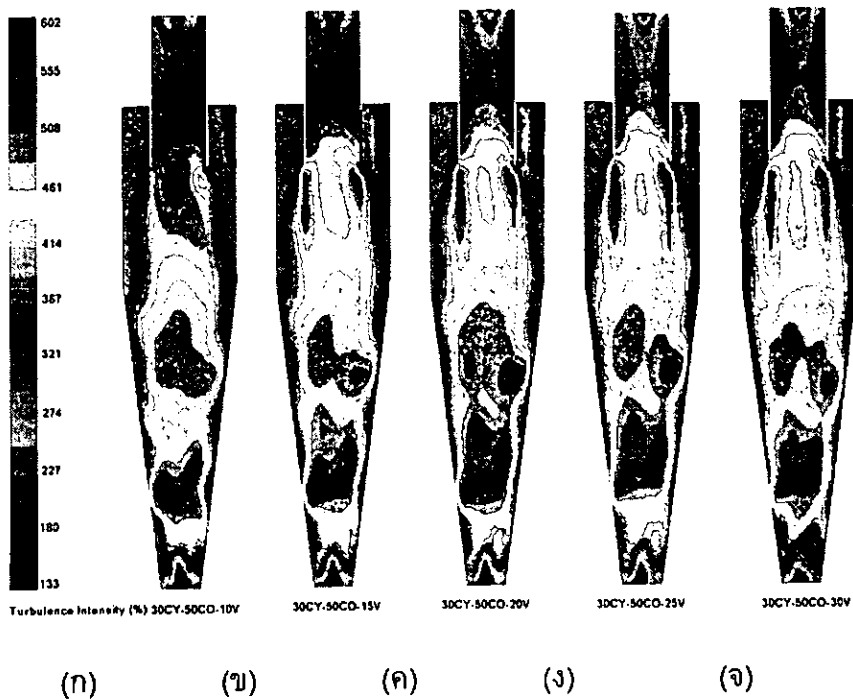
ภาพประกอบ 24 เปรียบเทียบ Contours ความดันในระนาบ  $r-z$  ที่ความเร็วไหลเข้าต่างกัน

(ก) ความเร็ว 10m/s (ข) ความเร็ว 15m/s (ค) ความเร็ว 20m/s (ง) ความเร็ว 25m/s  
 (จ) ความเร็ว 30m/s



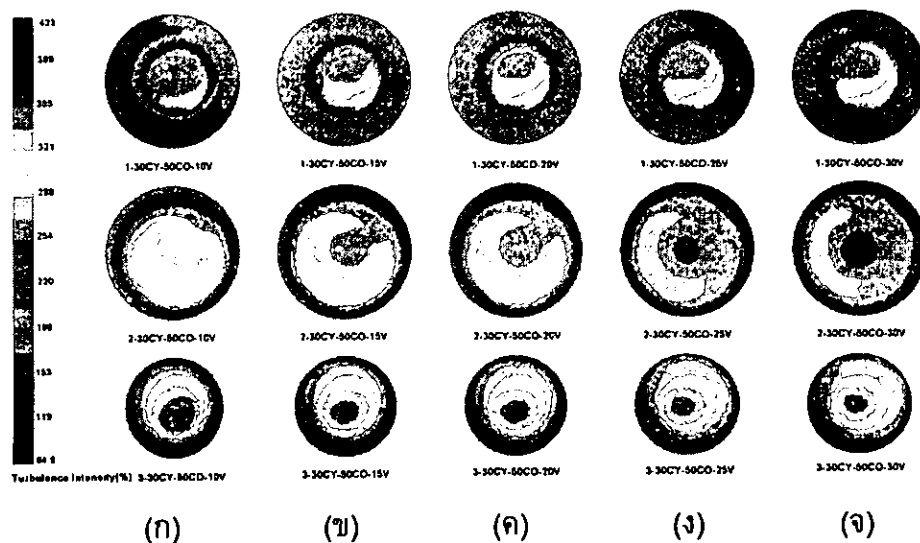
ภาพประกอบ 25 เปรียบเทียบ Contours ความดันในระนาบ r- $\theta$

(ก) ความเร็ว 10m/s (ข) ความเร็ว 15m/s (ค) ความเร็ว 20m/s (ง) ความเร็ว 25m/s  
 (จ) ความเร็ว 30m/s



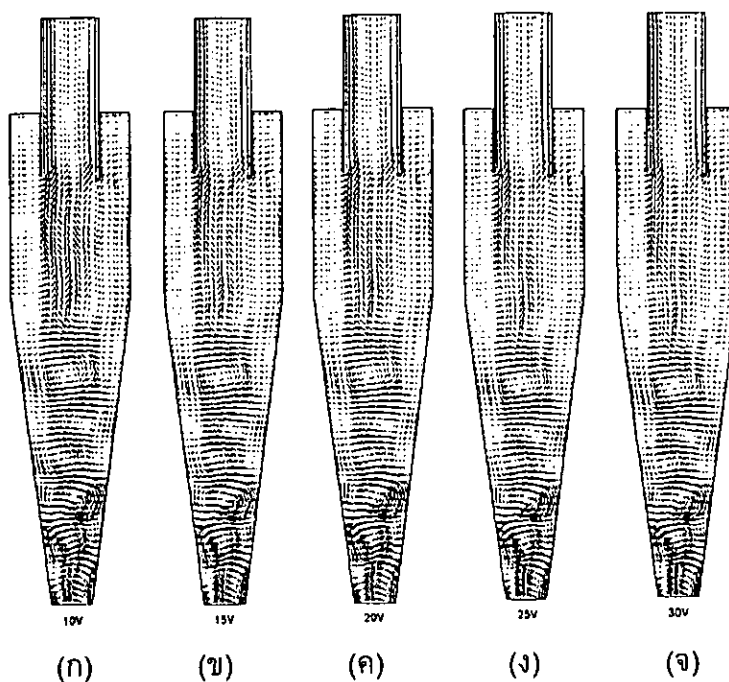
ภาพประกอบ 26 เปรียบเทียบ Contours ของความปั่นป่วนในระนาบ r-z ที่ความเร็วไหลเข้าต่างกัน

(ก) ความเร็ว 10m/s (ข) ความเร็ว 15m/s (ค) ความเร็ว 20m/s (ง) ความเร็ว 25m/s  
 (จ) ความเร็ว 30m/s



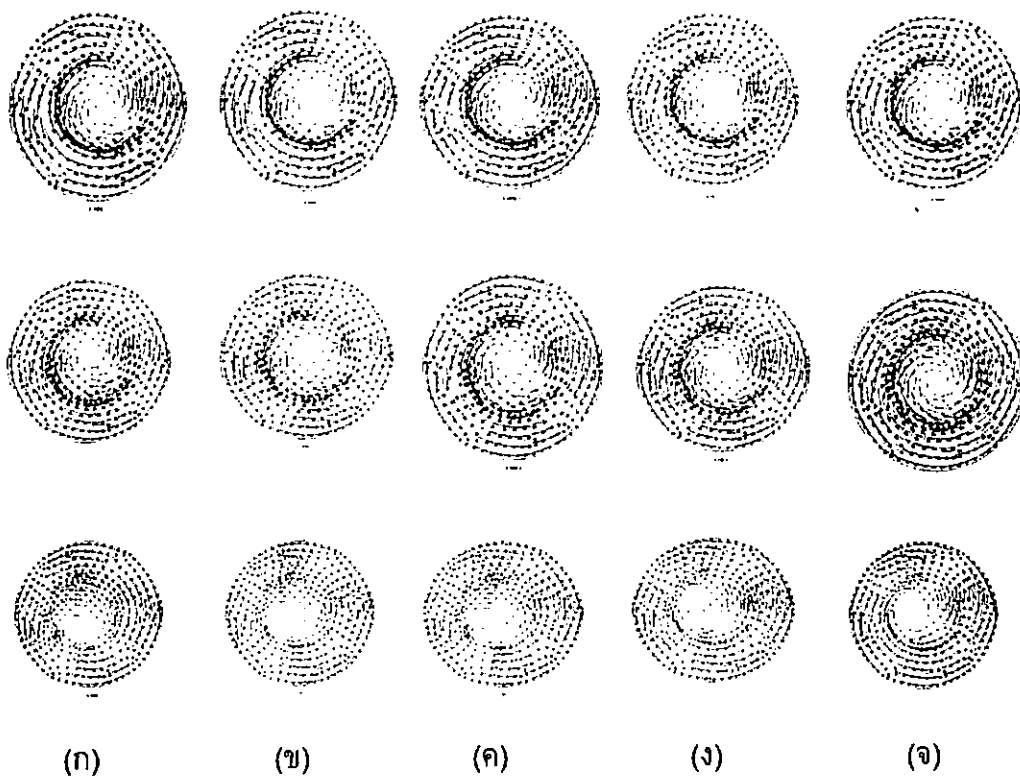
ภาพประกอบ 27 เปรียบเทียบ Contours ของความปั่นป่วนในระนาบ  $r-\theta$

(ก) ความเร็ว 10m/s (ข) ความเร็ว 15m/s (ค) ความเร็ว 20m/s (ง) ความเร็ว 25m/s  
(จ) ความเร็ว 30m/s



ภาพประกอบ 28 เปรียบเทียบเวกเตอร์ความเร็วในระนาบ  $r-z$  ที่ความเร็วไหลเข้าต่างกัน

(ก) ความเร็ว 10m/s (ข) ความเร็ว 15m/s (ค) ความเร็ว 20m/s (ง) ความเร็ว 25m/s  
(จ) ความเร็ว 30m/s



ภาพประกอบ 29 เปรียบเทียบเวกเตอร์ความเร็วในระนาบ  $r-\theta$

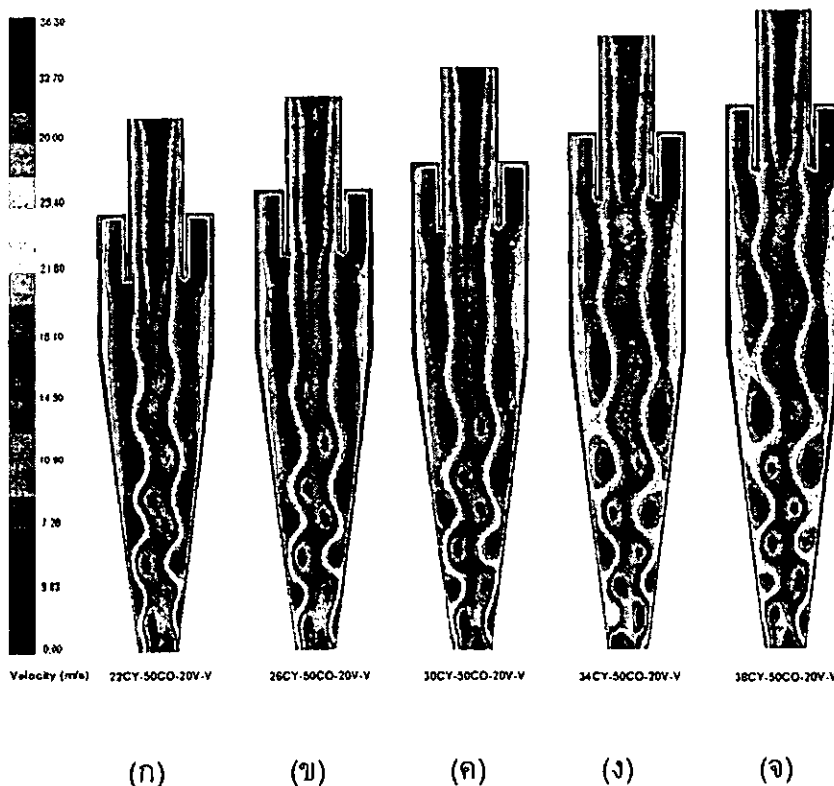
(ก) ความเร็ว 10m/s (ข) ความเร็ว 15m/s (ค) ความเร็ว 20m/s (ง) ความเร็ว 25m/s  
 (จ) ความเร็ว 30m/s

## 5.2 การเปลี่ยนความสูงของไซโคลน

การปรับเปลี่ยนความสูงของไซโคลนจากขนาดเดิมนั้น ได้แยกเป็นเปลี่ยนแปลงความสูงของทรงกระบอกและเปลี่ยนแปลงความสูงของทรงกรวย ในกรณีทรงกระบอกนั้น ได้ทำการลดความสูงของทรงกระบอกจากเดิม 0.30 m. เป็น 0.22 และ 0.26 m. และเพิ่มความสูงเป็น 0.34 และ 0.38 m. ส่วนการเปลี่ยนแปลงความสูงของทรงกรวยนั้น ได้ทำการลดความสูงจากเดิม 0.50 m. เป็น 0.46 และ 0.42 m. และเพิ่มความสูงเป็น 0.54 และ 0.58 m.

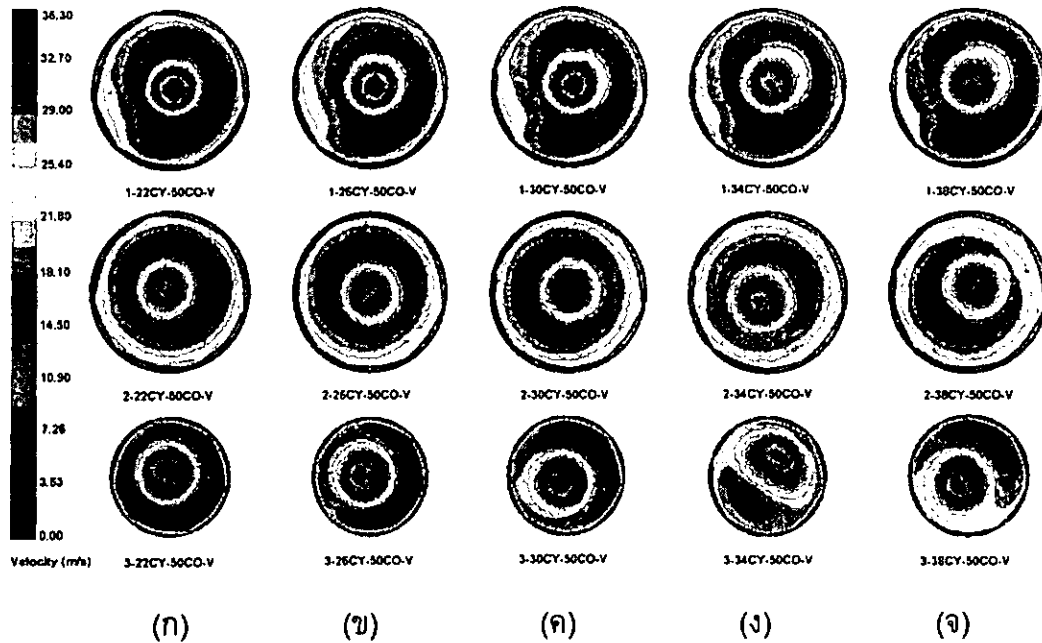
### 5.2.1 การเปลี่ยนแปลงความสูงของทรงกระบอก

ผลจากการคำนวณเมื่อลดความสูงของทรงกระบอกได้แสดงดังภาพประกอบ 30 (ก) จะเห็นว่า แกนกลางความดันต่ำมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของกระแสไหลวนบริเวณกึ่งกลางทรงกรวยจะเปลี่ยนจากเดิมที่อยู่ด้านซ้ายมาเป็นด้านขวา ผลการคำนวณเมื่อความสูงของทรงกระบอกเพิ่มขึ้น แสดงดังภาพประกอบ 30 (จ) จะเห็นว่า แกนกลางความดันต่ำบริเวณทรงกระบอกเกิดการไม่เสถียรมากกว่ากรณีเดิมมาก จนทำให้เกิดการแตกตัวของกระแสไหลวน (Vortex brake down) ขึ้นบริเวณกึ่งกลางทรงกรวย



ภาพประกอบ 30 เปรียบเทียบ Contours ความเร็วบนระนาบ r-z กรณีความสูงทรงกระบอกต่างกัน

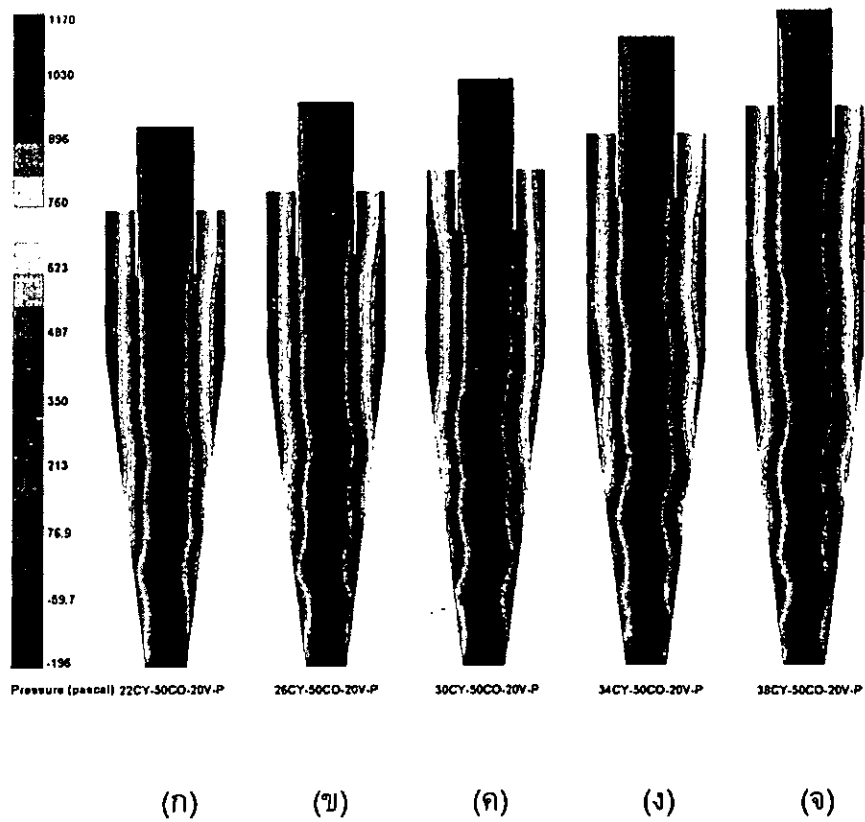
(ก)  $h_1 = 0.22$  m. (ข)  $h_1 = 0.26$  m. (ค)  $h_1 = 0.30$  m. (ง)  $h_1 = 0.34$  m. (จ)  $h_1 = 0.38$  m.



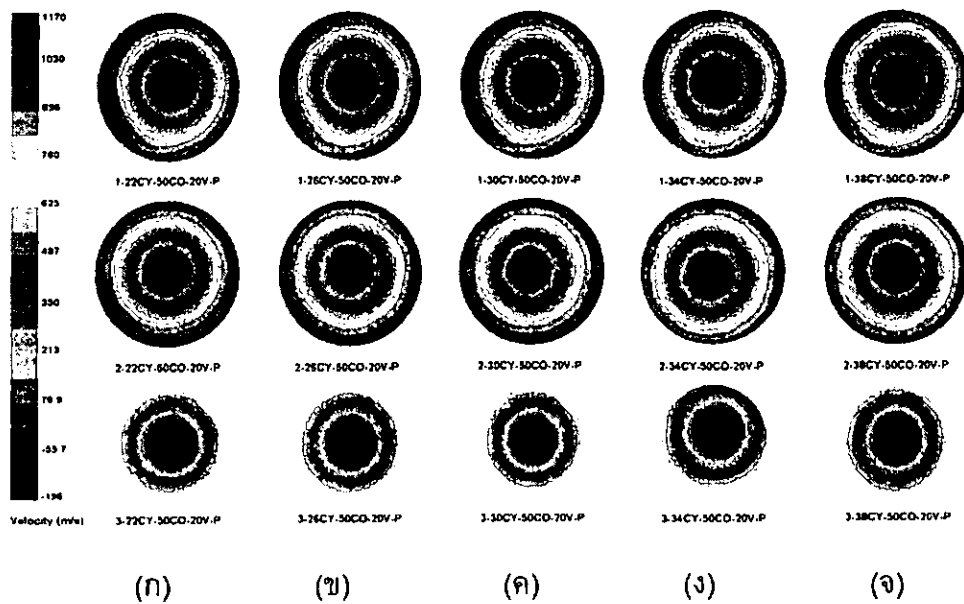
ภาพประกอบ 31 เปรียบเทียบ Contours ความเร็วบนระนาบ  $r-\theta$  กรณีความสูงทรงกระบอกต่างกัน

(ก)  $h_1 = 0.22$  m. (ข)  $h_1 = 0.26$  m. (ค)  $h_1 = 0.30$  m. (ง)  $h_1 = 0.34$  m. (จ)  $h_1 = 0.38$  m.

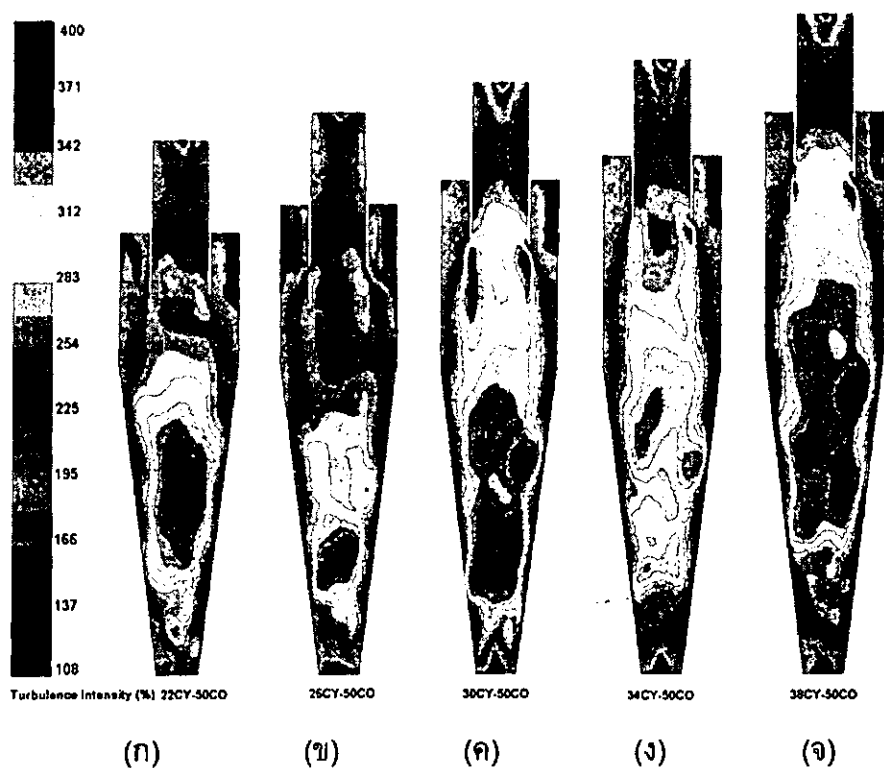
จากภาพประกอบ 31 เมื่อพิจารณา Contours ความเร็วของอากาศบนระนาบ  $r-\theta$  บริเวณใต้ Vortex Finder (ระดับที่ 1) และบริเวณรอยต่อทรงกระบอกกับทรงกรวย (ระดับที่ 2) จะเห็นว่า ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของกระแสไหลวนเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย แสดงว่าการลดและเพิ่มความสูงของทรงกระบอกนั้นจะไม่ค่อยมีผลต่อตำแหน่งจุดศูนย์กลางของกระแสไหลวนบริเวณนี้ แต่ที่บริเวณทรงกรวยจุดศูนย์กลางของกระแสไหลวนจะเปลี่ยนตำแหน่งไปมาก ซึ่งผลจากการลดความสูงของทรงกระบอกจะทำให้จุดศูนย์กลางของกระแสไหลวนที่บริเวณกึ่งกลางทรงกรวยเคลื่อนตัวเข้าใกล้กับผนังด้านบนซ้ายและผลจากการเพิ่มความสูงของทรงกระบอกจะทำให้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของกระแสไหลวนที่บริเวณกลางทรงกรวยเคลื่อนตัวเข้าใกล้กับผนังด้านล่างซ้าย พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วแสดงในภาพประกอบ 31 จะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงความสูงทรงกระบอกทำให้ลักษณะการไหลของอากาศมีกระแสไหลวนเพิ่มขึ้นบริเวณใต้ Vortex Finder ซึ่งทำให้อากาศบางส่วนของกระแสไหลวนชั้นใน (Inner Upward Vortex) ไหลย้อนกลับลงด้านล่าง ในภาพประกอบ 31 (จ) จะเห็นว่า มีกระแสไหลวนเพิ่มขึ้น 2 ตำแหน่งที่บริเวณทรงกระบอก ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มความสูงของทรงกระบอกจะทำให้มีการไหลแบบปั่นป่วนมากขึ้น



ภาพประกอบ 32 เปรียบเทียบ Contours ความดันบนระนาบ  $r-z$  กรณีความสูงทรงกระบอกต่างกัน  
 (ก)  $h_1 = 0.22$  m. (ข)  $h_1 = 0.26$  m. (ค)  $h_1 = 0.30$  m. (ง)  $h_1 = 0.34$  m. (จ)  $h_1 = 0.38$  m.

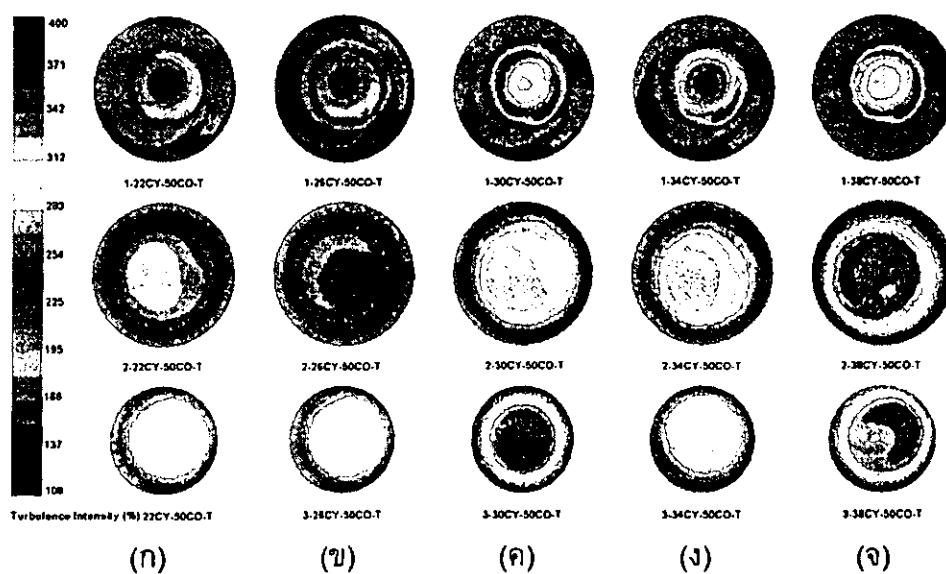


ภาพประกอบ 33 เปรียบเทียบ Contours ความดันบนระนาบ  $r-\theta$  กรณีความสูงทรงกระบอกต่างกัน  
 (ก)  $h_1 = 0.22$  m. (ข)  $h_1 = 0.26$  m. (ค)  $h_1 = 0.30$  m. (ง)  $h_1 = 0.34$  m. (จ)  $h_1 = 0.38$  m.



ภาพประกอบ 34 เปรียบเทียบ Contours ความปั่นป่วนบนระนาบ  $r-z$  กรณีความสูงทรงกระบอกต่างกัน

(ก)  $h_1 = 0.22$  m. (ข)  $h_1 = 0.26$  m. (ค)  $h_1 = 0.30$  m. (ง)  $h_1 = 0.34$  m. (จ)  $h_1 = 0.38$  m.



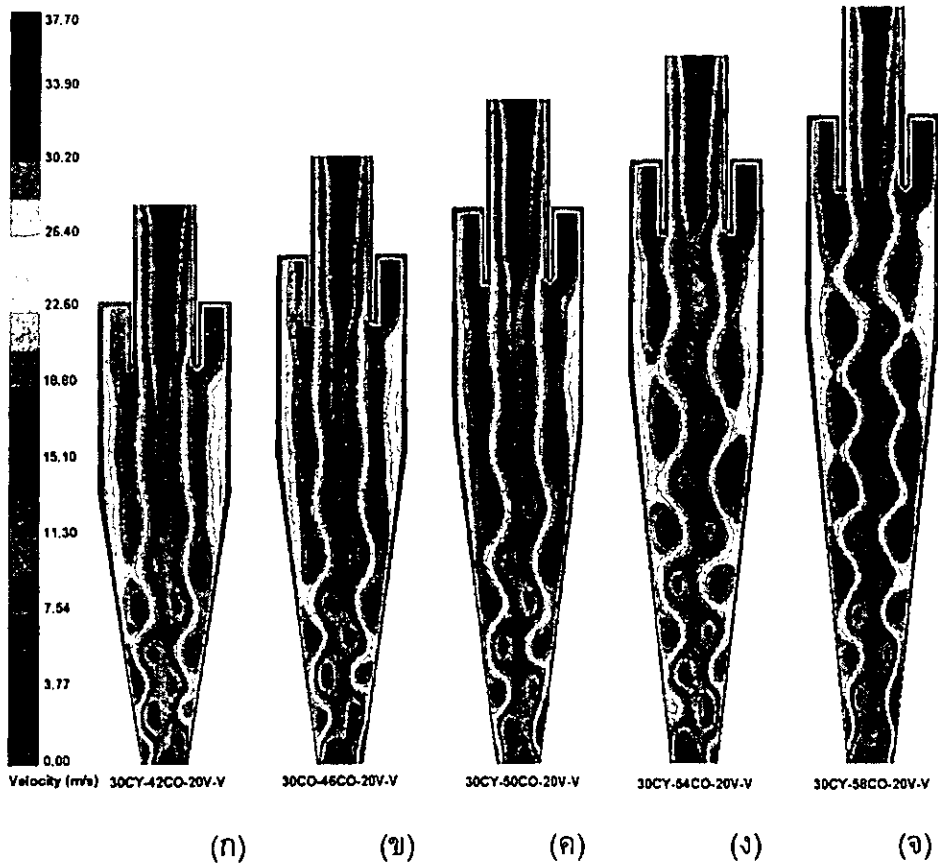
ภาพประกอบ 35 เปรียบเทียบ Contours ความปั่นป่วนบนระนาบ  $r-\theta$  กรณีความสูงทรงกระบอกต่างกัน

(ก)  $h_1 = 0.22$  m. (ข)  $h_1 = 0.26$  m. (ค)  $h_1 = 0.30$  m. (ง)  $h_1 = 0.34$  m. (จ)  $h_1 = 0.38$  m.

## 5.2.2 การเปลี่ยนแปลงความสูงของทรงกรวย

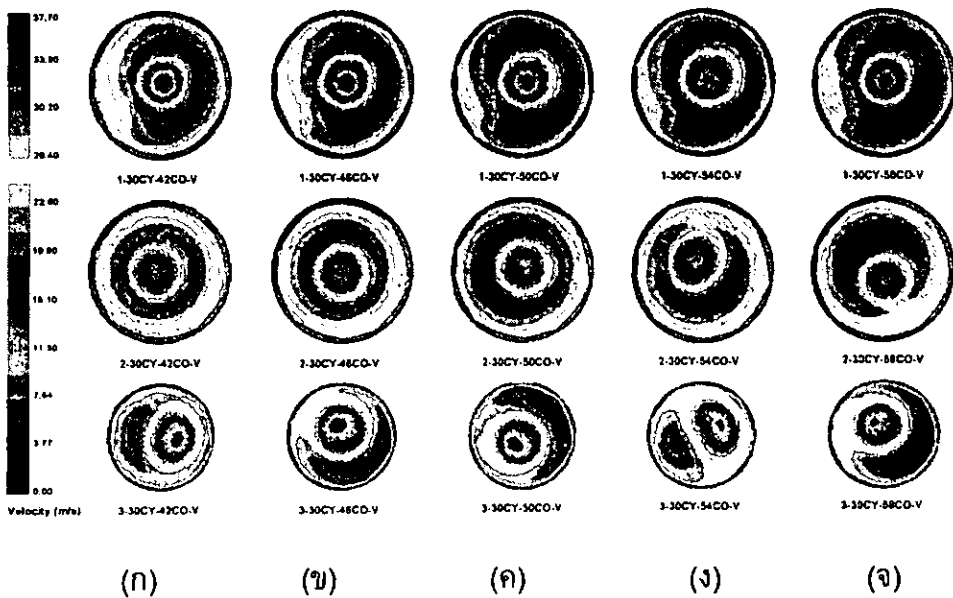
การเปลี่ยนแปลงความสูงของทรงกรวยจะทำให้มุมของทรงกรวยเปลี่ยนไปด้วย งานวิจัยนี้ ได้นำเสนอในรูปของมุมที่เปลี่ยนไป คือจากเดิม 7.41 ( $h_2 = 0.50$  m.) องศา ลดลงเป็น 6.86 ( $h_2 = 0.54$  m.) และ 6.39 ( $h_2 = 0.58$  m.) องศา ตามลำดับ ส่วนการเพิ่มมุมของทรงกรวยได้เพิ่มจากเดิมเป็น 8.04 ( $h_2 = 0.46$  m.) และ 8.80 ( $h_2 = 0.42$  m.) องศา ตามลำดับ พิจารณา Contours ความเร็วผลจากการคำนวณ เมื่อความสูงทรงกรวยลดลงแสดงในภาพประกอบ 28 (ก) จะเห็นได้ว่า ลักษณะของแกนกลางความดันต่ำบริเวณส่วนล่างทรงกรวยจะต่างกับความสูงเดิมเพียงเล็กน้อยและกระแสไหลวนบริเวณส่วนบนขวาของทรงกรวยจะหายไป แต่เมื่อความสูงของทรงกรวยเพิ่มขึ้น แสดงได้ดังภาพประกอบ 28 (จ) จะเห็นว่า แกนกลางความดันต่ำเกิดการไม่เสถียรอย่างรุนแรงซึ่งรุนแรงมากกว่ากรณีเพิ่มความสูงของทรงกรวยบ่อทำให้เกิดการแตกตัวของกระแสไหลวนขึ้น 2 ตำแหน่ง กล่าวคือ ที่บริเวณทรงกรวยบ่อ 1 ตำแหน่งและทรงกรวยอีก 1 ตำแหน่ง พิจารณาจำนวนของกระแสไหลวน จะเห็นว่า มีกระแสไหลวนจะเพิ่มขึ้นจากเดิม 6 จุด เป็น 10 จุด โดยเฉพาะบริเวณทรงกรวยบ่อจะมีกระแสไหลวนเพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของทรงกรวยต่อลักษณะของตำแหน่งจุดศูนย์กลางของกระแสไหลวน บริเวณใต้ Vortex Finder บริเวณรอยต่อระหว่างทรงกรวยบ่อกับทรงกรวยและบริเวณกึ่งกลางของทรงกรวยแสดงได้ดังภาพประกอบ 27 จะเห็นว่าบริเวณใต้ Vortex Finder จุดศูนย์กลางของกระแสไหลวนจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ส่วนบริเวณรอยต่อระหว่างทรงกรวยบ่อกับทรงกรวยกรณีที่เพิ่มความสูงทรงกรวย จะทำให้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของกระแสไหลวนจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ส่วนบริเวณรอยต่อระหว่างทรงกรวยบ่อกับทรงกรวยกรณีที่เพิ่มความสูงทรงกรวย จะทำให้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของกระแสไหลวนเคลื่อนตัวไปใกล้กับผนังส่วนล่างขวาของไซโคลนมากขึ้น และบริเวณกึ่งกลางของทรงกรวยของจุดศูนย์กลางของกระแสไหลวนจะเปลี่ยนไปมาก กล่าวคือ จากความสูงทรงกรวยเท่าเดิมตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของกระแสไหลวนจะอยู่บริเวณใกล้กับผนังด้านล่างซ้าย แต่เมื่อลดความสูงทรงกรวยลง ทำให้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของการไหลวนจะอยู่ใกล้กับผนังด้านล่างขวา ส่วนการเพิ่มความสูงทรงกรวย ทำให้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของกระแสไหลวนเคลื่อนที่เข้าใกล้กับผนังด้านซ้ายบน

พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วได้แสดงเปรียบเทียบในภาพประกอบ 30 จากภาพประกอบ 30 (ก) และ (ค) กรณีลดและเพิ่มความสูงของทรงกรวยบ่อจะเห็นได้ว่า บริเวณทรงกรวยบ่อมีการปั่นป่วนของกระแสไหลวนเพิ่มขึ้นมากกว่าส่วนอื่นๆ ซึ่งการเพิ่มความสูงทรงกรวยบ่อจะทำให้มีการปั่นป่วนของกระแสไหลวนของอากาศเพิ่มขึ้นมากกว่าการลดความสูงทรงกรวยบ่อ ส่วนบริเวณทรงกรวยมีพฤติกรรมการปั่นป่วนคล้ายกับขนาดเดิม



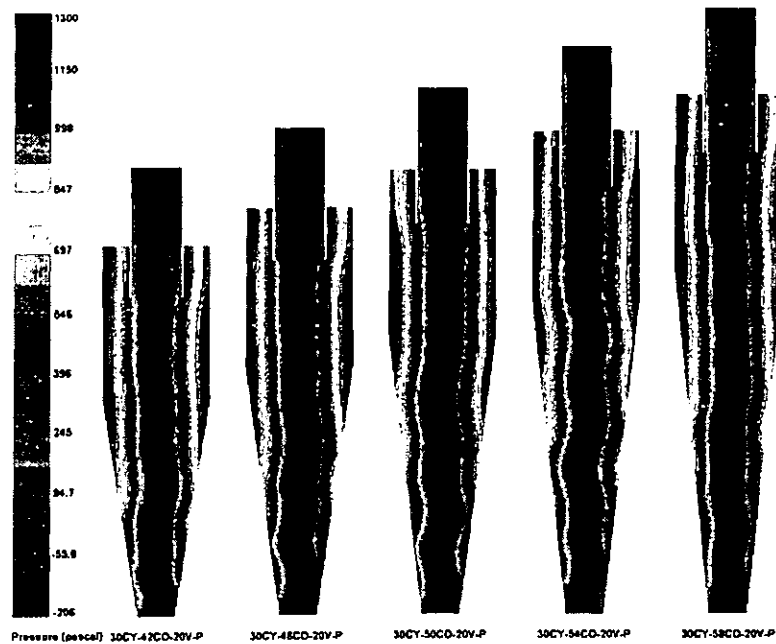
ภาพประกอบ 36 เปรียบเทียบ Contours ความเร็วของอากาศในระนาบ r-z ความสูงทรงกรวยต่างกัน

(ก) 8.80 องศา (ข) 8.04 องศา (ค) 7.41 องศา (ง) 6.86 องศา (จ) 6.39 องศา



ภาพประกอบ 37 เปรียบเทียบ Contours ความเร็วบนระนาบ r-θ กรณีความสูงทรงกรวยต่างกัน

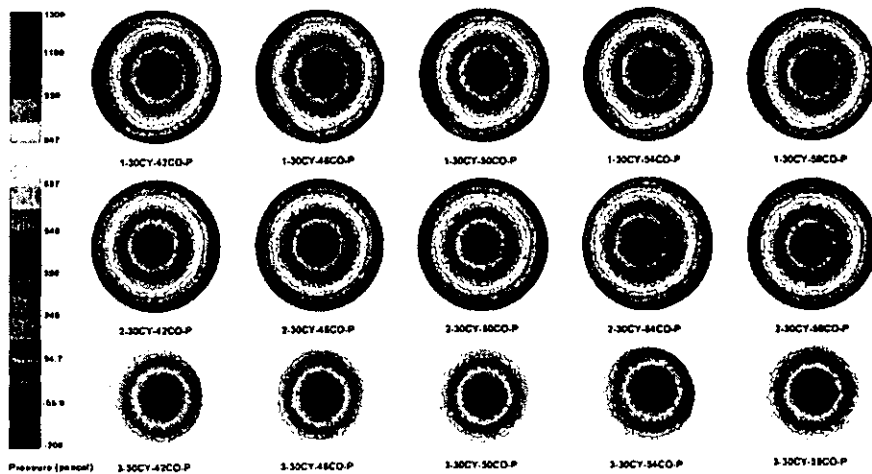
(ก) 8.80 องศา (ข) 8.04 องศา (ค) 7.41 องศา (ง) 6.86 องศา (จ) 6.39 องศา



(ก) (ข) (ค) (ง) (จ)

ภาพประกอบ 38 เปรียบเทียบ Contours ความดันของอากาศในระนาบ r-z กรณีมุมทรงกรวยต่างกัน

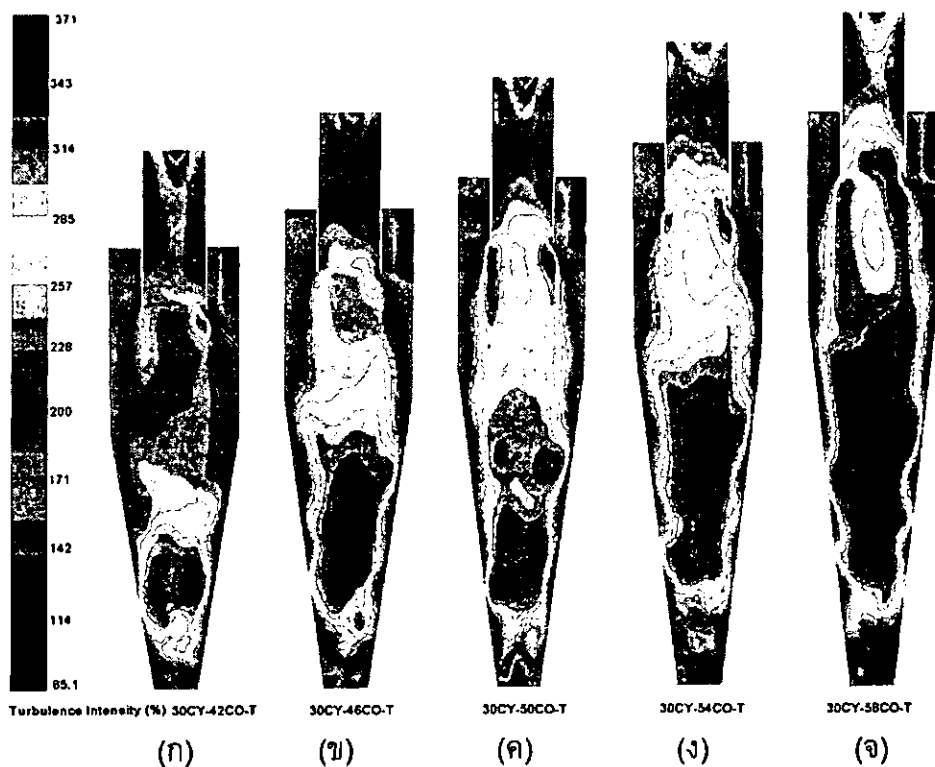
(ก) 8.80 องศา (ข) 8.04 องศา (ค) 7.41 องศา (ง) 6.86 องศา (จ) 6.39 องศา



(ก) (ข) (ค) (ง) (จ)

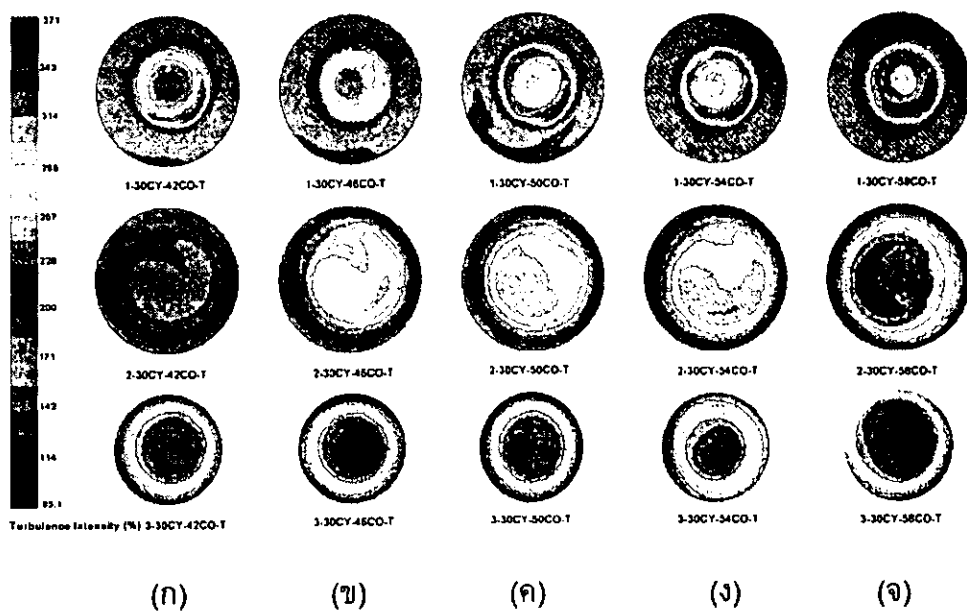
ภาพประกอบ 39 เปรียบเทียบ Contours ความดันของอากาศในระนาบ r-θ กรณีมุมทรงกรวยต่างกัน

(ก) 8.80 องศา (ข) 8.04 องศา (ค) 7.41 องศา (ง) 6.86 องศา (จ) 6.39 องศา



ภาพประกอบ 40 เปรียบเทียบ Contours ความปั่นป่วนของอากาศในระนาบ r-z กรณีมุมทรงกรวยต่างกัน

(ก) 8.80 องศา (ข) 8.04 องศา (ค) 7.41 องศา (ง) 6.86 องศา (จ) 6.39 องศา

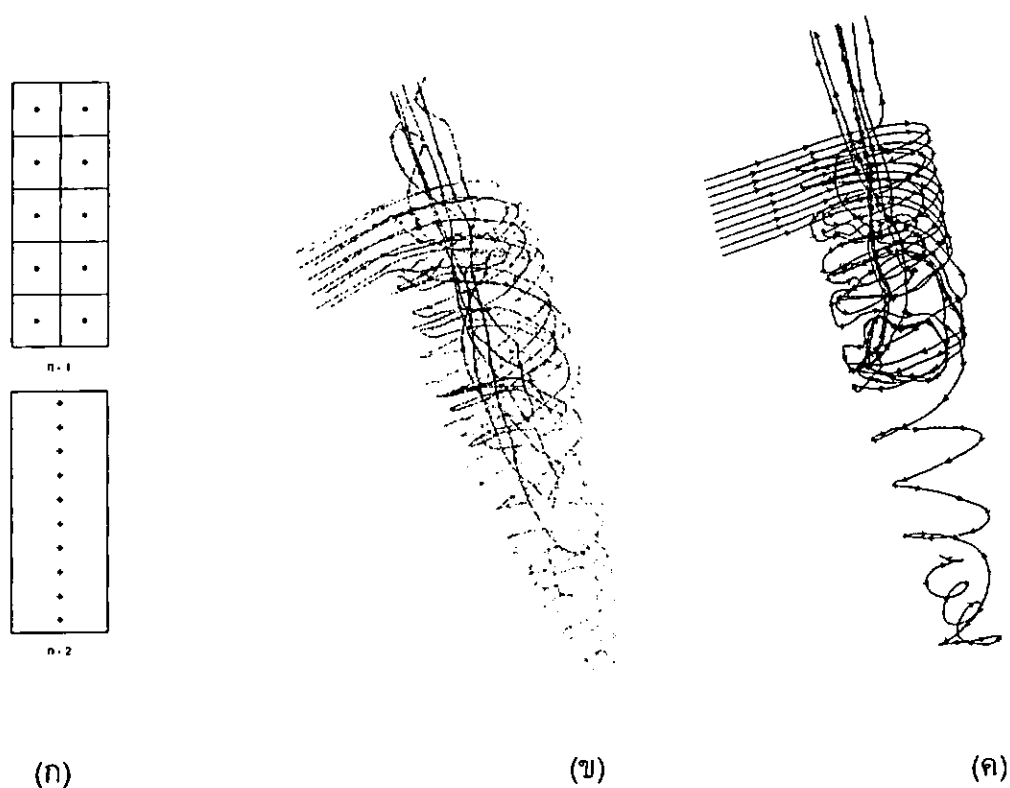


ภาพประกอบ 41 เปรียบเทียบ Contours ความปั่นป่วนของอากาศในระนาบ r-θ กรณีมุมทรงกรวยต่างกัน

(ก) 8.80 องศา (ข) 8.04 องศา (ค) 7.41 องศา (ง) 6.86 องศา (จ) 6.39 องศา

### 5.3 การจำลองการไหลแบบสองเฟส

การไหลภายในไซโคลอนนั้นเป็นการไหลแบบสองเฟส โดยมีอนุภาคผสมกับอากาศ ไหลเข้าไซโคลอน ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ไซโคลอนขนาดมาตรฐาน (ไซโคลอนชนิด A) ทำการจำลอง ส่วนอนุภาคนั้นเลือกเป็นเถ้า (Ash) ทรงกลม มีความหนาแน่นเท่ากับ  $600 \text{ kg/m}^3$  อย่างไรก็ตาม การกำหนดจำนวนของอนุภาคที่ไหลเข้าไซโคลอนนั้น โปรแกรม FLUENT 6.0 มีข้อแตกต่างในการแบ่งจำนวนช่องสำหรับใส่อนุภาค แสดงดังภาพประกอบ 42



ภาพประกอบ 42 ตำแหน่งของอนุภาคที่เข้าไซโคลอนและเส้นการไหลของอนุภาค

(ก) ตำแหน่งของอนุภาคที่ไหลเข้า (ข) เส้นการไหลจากการไหลเข้าแบบ ก - 1  
(ค) เส้นการไหลจากการไหลเข้าแบบ ก - 2

จากภาพประกอบ 42 ข และ ค แสดงการทำนายการเคลื่อนที่ของอนุภาคในกระแส อากาศที่ไหลภายในไซโคลอนที่ตำแหน่งการเข้าของอนุภาคแตกต่างกัน จะเห็นว่า ลักษณะของ ตำแหน่งอนุภาคที่ปล่อยเข้าไซโคลอนต่างกัน มีผลให้ลักษณะการไหลและเคลื่อนตัวไปกับกระแส อากาศหมุนเหวี่ยงลงด้านล่างและบางส่วนไหลย้อนกลับออกสู่ด้านบนไม่เท่ากัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้ทำการจำลองการไหลโดยเปลี่ยนแปลง ขนาดของอนุภาค ความเร็วของอนุภาคและจำนวน

ของอนุภาคที่ไหลเข้าไซโคลน ซึ่งการเปลี่ยนจำนวนอนุภาคนั้นได้เลือกการใส่จำนวนอนุภาคโดยแบ่งบริเวณทางเข้าเฉพาะตรงกลางให้เท่ากับจำนวนของอนุภาคที่ใส่เข้าไป (ภาพประกอบ 42) เนื่องจากการทำจำนวนช่องทางเข้าให้เป็นแบบ  $n - 1$  นั้น ทำให้จำนวนกริดในการคำนวณต่างไปจากเดิม

### 5.3.1 การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็วของอนุภาค

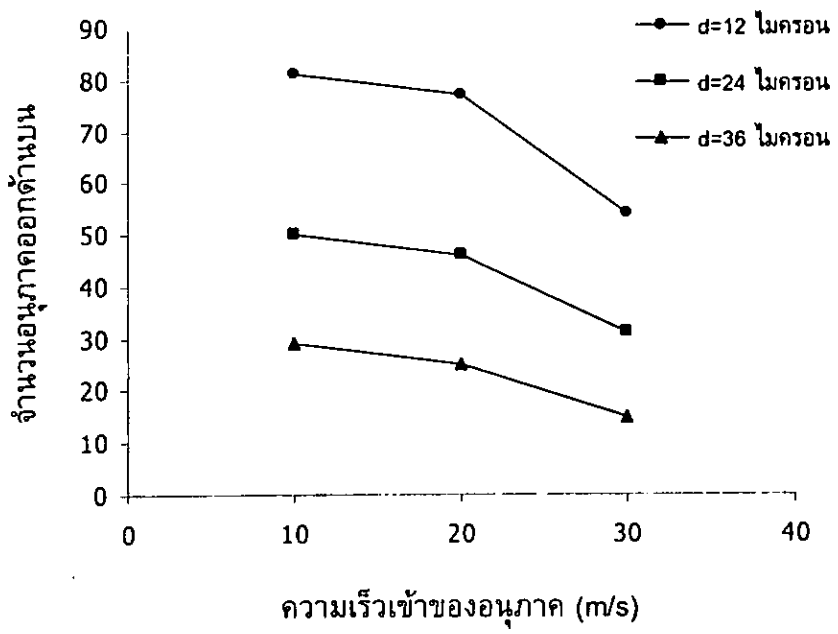
การจำลองการไหลโดยการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็วของอนุภาคที่เข้าไซโคลน เพื่อศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในไซโคลนนั้น จะกำหนดให้อนุภาคจำนวน 100 อนุภาค ไหลเข้าไซโคลน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคต่างกัน คือ 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44, 48, 52, 56 และ 60  $\mu\text{m}$ . ตามลำดับ โดยให้ความเร็วของอากาศและอนุภาคที่ไหลเข้าไซโคลนเท่ากับ 10, 20 และ 30 m/s ผลการทำนายการไหลของอนุภาคที่เคลื่อนออกด้านบนแสดงได้ดังตาราง 3

ตาราง 3 ผลการจำลองโดยการเปลี่ยนขนาดของอนุภาค

ลำดับ	ขนาดของอนุภาคที่ไหลเข้า ( $\mu\text{m}$ )	จำนวนอนุภาคที่ไหลออกด้านบน			ประสิทธิภาพ(%)		
		10 m/s	20 m/s	30 m/s	10 m/s	20 m/s	30 m/s
1	4	90	86	82	10	14	18
2	8	84	80	70	16	20	30
3	12	81	77	54	19	23	46
4	16	72	64	50	28	36	50
5	20	64	58	42	36	42	58
6	24	50	46	31	50	54	69
7	28	42	34	23	58	66	77
8	32	34	26	20	66	74	80
9	36	29	25	15	71	75	85
10	40	25	14	7	75	86	93
11	44	21	8	2	79	92	98
12	48	17	2	1	83	98	99
13	52	13	1	-	87	99	100
14	56	8	-	-	92	100	100
15	60	1	-	-	99	100	100

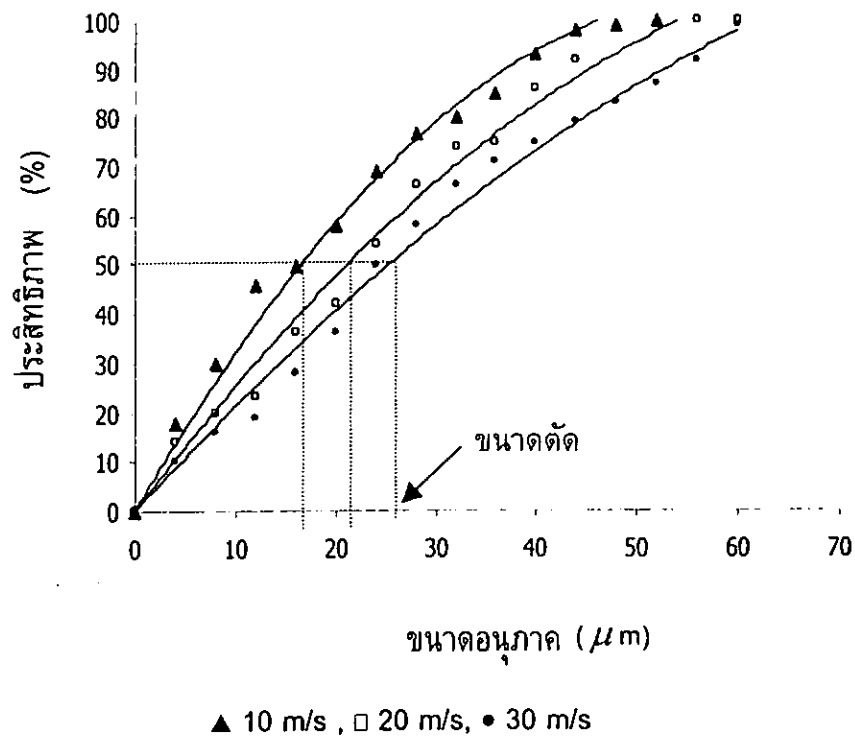
\*ประสิทธิภาพ (%) = (จำนวนอนุภาคที่ไซโคลนเก็บได้/จำนวนอนุภาคที่เข้าไซโคลน)  $\times$  100

จากตาราง 3 จะเห็นได้ว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็วของอนุภาคเพิ่มขึ้น ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไหลย้อนออกด้านบนลดลง สังเกตเห็นว่า ที่ความเร็วเข้า 20 m/s ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเพิ่มขึ้นเท่ากับ 56  $\mu\text{m}$  อนุภาคจะไม่ไหลย้อนกลับออกสู่ด้านบน ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเข้ากับจำนวนของอนุภาคที่ออกด้านบนแสดงได้ดังภาพประกอบ 43



ภาพประกอบ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอนุภาคที่ไหลออกด้านบนกับความเร็วเข้าต่างกัน

จากภาพประกอบ 43 พบว่า ผลของการเพิ่มความเร็วของอนุภาคทั้ง 3 ขนาด แสดงผลในทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อความเร็วของอนุภาคเพิ่มขึ้น เป็นผลให้จำนวนอนุภาคที่เคลื่อนที่ออกด้านบนลดลงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคกับขนาดของอนุภาคแสดงได้ดังภาพประกอบ 44



ภาพประกอบ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคกับความเร็วเข้าต่างกัน

จากภาพประกอบ 44 พบว่า ไซโคลอนชนิด A ทำการแยกอนุภาคที่มีความหนาแน่นเท่ากับ  $600 \text{ kg/m}^3$  ที่ไหลเข้าด้วยความเร็วเท่ากับ 10, 20 และ 30 m/s มีขนาดตัด (ขนาดที่จำนวนอนุภาคเคลื่อนที่ออกด้านบนและด้านล่างเท่ากัน) เท่ากับ 25, 22 และ  $17 \mu\text{m}$ . ตามลำดับ แสดงว่า ไซโคลอนจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็วของอนุภาคเพิ่มขึ้น

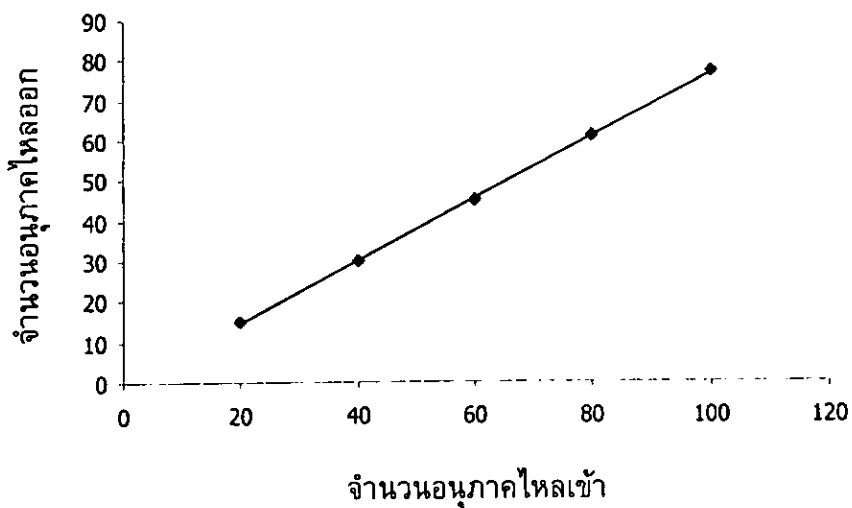
### 5.3.2 การปรับเปลี่ยนจำนวนอนุภาคที่เข้าไซโคลอน

การจำลองการไหลโดยการเปลี่ยนจำนวนอนุภาคที่ไหลเข้าไซโคลอนนั้น จะทำการเลือกอนุภาคเป็นทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $12 \mu\text{m}$ . เปลี่ยนจำนวนอนุภาคที่ไหลเข้าให้ต่างกัน คือ 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ โดยให้ความเร็วของอนุภาคเข้าเท่ากับ 20 m/s ซึ่งเท่ากับความเร็วของอากาศ (อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ  $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ผลจากการจำลองพิจารณาจำนวนอนุภาคที่เคลื่อนที่ออกด้านบนมีรายละเอียดดังตาราง 4

ตาราง 4 ผลการจำลองโดยการเปลี่ยนจำนวนอนุภาค

ลำดับ	จำนวนอนุภาคที่ไหลเข้า	จำนวนอนุภาคที่ไหลออกด้านบน	ประสิทธิภาพ(%)
1	20	15	25
2	40	30	25
3	60	45	25
4	80	61	23.8
5	100	77	23

จากตาราง 4 จะเห็นว่า เมื่อจำนวนอนุภาคไหลเข้าไซโคลนมากขึ้น ทำให้จำนวนอนุภาคที่เคลื่อนที่ออกด้านบนจะมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 43



ภาพประกอบ 45 จำนวนอนุภาคที่ไหลเข้าและออกด้านบน

จากภาพประกอบ 45 จะเห็นว่า จำนวนอนุภาคที่ออกด้านบนแปรผันตรงกับจำนวนอนุภาคที่ไหลเข้าไซโคลน ซึ่งมีอัตราส่วนความชันเท่ากับ 3 : 4 แสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นของจำนวนอนุภาคไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บ เนื่องจากในการจำลองนี้พิจารณาเฉพาะแรงกระทำระหว่างอนุภาคและอากาศ โดยไม่ได้พิจารณาแรงกระทำระหว่างอนุภาคด้วยกัน (จากสมการ 3.46 สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค)

## บทที่ 6

### สรุปผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการไหลภายในไซโคลนด้วยกระบวนการทาง CFD โดยใช้โปรแกรม FLUENT 6.0 และได้เลือกแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน  $k-\epsilon$ , RNG และ RSM มาทำการจำลองการไหล โดยใช้การประมาณค่าภายในด้วยระเบียบวิธีผลต่างด้นลมนับที่หนึ่ง ระเบียบวิธีผลต่างด้นลมนับที่สอง และระเบียบวิธีผลต่าง QUICK ร่วมกับกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE, SIMPLEC และ PISO เพื่อหาระเบียบวิธีทางการคำนวณที่เหมาะสม จากนั้นได้นำระเบียบวิธีการคำนวณที่เหมาะสมที่ได้ทำนายพฤติกรรมการไหลภายในไซโคลน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วไหลของอากาศที่ไหลเข้าไซโคลน และเปลี่ยนแปลงความสูงของไซโคลน สุดท้ายทำการจำลองการไหลแบบสองเฟส โดยการเพิ่มอนุภาคผสมกับอากาศที่ไหลเข้าในไซโคลน ซึ่งในการจำลองการไหลแบบสองเฟสนี้ ได้มีการปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค ปรับเปลี่ยนความเร็วของอนุภาคที่ไหลเข้าไซโคลนและจำนวนของอนุภาคที่ไหลเข้าไซโคลน

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

การจำลองการไหลภายในไซโคลน พบว่า การใช้แบบจำลองแบบปั่นป่วน RSM เท่านั้นที่สอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดี และระเบียบวิธีทางการคำนวณที่เหมาะสม พบว่าการประมาณค่าภายในด้วยระเบียบวิธีแบบ QUICK มีความแม่นยำมากกว่าแบบระเบียบวิธีผลต่างด้นลมนับที่หนึ่งและระเบียบวิธีผลต่างด้นลมนับที่สอง ซึ่งกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLEC นั้นให้ผลที่ได้ดีกว่าแบบ SIMPLE และ PISO เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าไซโคลน เพื่อศึกษาผลกระทบต่อนวัตกรรมและลักษณะการไหลของอากาศภายในไซโคลนขนาดมาตรฐาน (ชนิด A) นั้น พบว่าการเพิ่มและลดความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าไซโคลนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลเพียงเล็กน้อย

เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความสูงของทรงกระบอกและทรงกรวยพบว่า การลดความสูงของทรงกระบอก จะทำให้ลักษณะการไหลของอากาศจะมีกระแสไหลวนเพิ่มขึ้นบริเวณใต้ Vortex Finder ซึ่งทำให้อากาศบางส่วนของกระแสไหลวนชั้นในไหลย้อนกลับและบริเวณแกนกลางความดันต่ำมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของกระแสไหลวนบริเวณทรงกรวยเปลี่ยนไป ผลการคำนวณเมื่อความสูงของทรงกระบอกเพิ่มขึ้น พบว่า มีกระแสไหลวนเพิ่มขึ้น 2 ตำแหน่งที่บริเวณทรงกระบอกและลักษณะของแกนกลางความดันต่ำบริเวณทรงกระบอกเกิดการไม่เสถียร ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้นและบริเวณ

ทรงกรวยยังเกิดการแตกตัวของกระแสไหลวนขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการผสมแต่ไม่ดีต่อการแยก

ผลจากการคำนวณเมื่อความสูงทรงกรวยลดลง พบว่าลักษณะการไหลของอากาศภายในไซโคลน และตำแหน่งของกระแสไหลวนเปลี่ยนไปโดยเฉพาะบริเวณทรงกรวย พบว่าจำนวนของกระแสไหลวนลดลง ส่วนลักษณะของแกนกลางความดันต่ำจะต่างกับขนาดเดิมเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อความสูงของทรงกรวยเพิ่มขึ้น พบว่าจำนวนการเกิดกระแสไหลวนจะเพิ่มขึ้นจาก 6 จุดเป็น 10 จุด โดยเฉพาะบริเวณทรงกระบอกจะแตกต่างจากเดิมมาก และลักษณะของแกนกลางความดันต่ำเกิดการไม่เสถียรอย่างรุนแรงมากกว่ากรณีเพิ่มความสูงของทรงกระบอก ทำให้มีการไหลแบบปั่นป่วนมากขึ้นเป็นผลให้เกิดการแตกตัวของกระแสไหลวนขึ้น 2 ตำแหน่งที่บริเวณทรงกระบอกและทรงกรวย

สำหรับจากการจำลองแบบสองเฟสนั้น ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะมีความชันมากกว่าอากาศ เนื่องจากว่าอนุภาคมีความหนาแน่นมากกว่าอากาศ การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคให้ใหญ่ขึ้นจะทำให้การแยกอนุภาคได้ดีขึ้น การเพิ่มความเร็วของอนุภาคที่ไหลเข้าทำให้ประสิทธิภาพในการแยกดีขึ้น แต่การปรับเปลี่ยนจำนวนอนุภาคไม่มีผลต่อประสิทธิภาพ เนื่องจากในการคำนวณไม่ได้พิจารณาแรงกระทำระหว่างอนุภาคกับอนุภาค ซึ่งมีผลต่อการไหลในกรณีที่สองผสมมีความหนาแน่นของจำนวนอนุภาคสูง จากผลของงานวิจัยนี้ แสดงว่ากระบวนการทาง CFD สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ไซโคลนเพื่อให้เหมาะสมกับขบวนการแยกอนุภาคออกจากอากาศต่อไปได้

## 6.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

จากการศึกษาในงานวิจัยนี้ทำให้เราทราบถึงการคาดเดาพฤติกรรมกรรมการไหลที่เกิดขึ้นภายในไซโคลนด้วยการใช้การคำนวณเชิงตัวเลข นับว่าเป็นทางเลือกที่ดีอีกอย่างหนึ่ง เพราะจะทำให้ลดค่าใช้จ่าย และระยะเวลาในการออกแบบมาก การจำลองการไหลแบบปั่นป่วนภายในไซโคลนนั้นสามารถประมาณแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสนามการไหลของอนุภาคและอากาศได้เป็นอย่างดี ซึ่งจัดว่าเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการออกแบบ อย่างไรก็ตามเพื่อให้การวิจัยมีประสิทธิภาพสูงสุด ผู้วิจัยได้จัดทำข้อเสนอแนะขึ้นเพื่อเป็นแนวทางต่อไปสำหรับงานวิจัยในอนาคต ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

6.2.1 ควรที่จะทำการจำลองโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีการประมวลผลด้วยความเร็วสูงหรือทำการจำลองโดยใช้คอมพิวเตอร์หลายตัวต่อกันเพื่อที่จะช่วยลดเวลาในการจำลองได้

6.2.2 การปรับเปลี่ยนจำนวนกริดของแบบจำลองนั้นควรจะมีการเพิ่มจำนวนกริดให้หลากหลายและมีจำนวนมากขึ้นเพื่อที่จะมีแบบจำลองที่แตกต่างกันมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น

6.2.3 การปรับเปลี่ยนขนาดและรูปร่างของไซโคลนควรจะมีการปรับเปลี่ยนส่วนอื่น ๆ เพิ่มขึ้นอีก เช่น ขนาดและรูปร่างทางเข้าของอากาศ หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกของอนุภาค หรือความสูงของ Vortex Finder เพื่อที่จะได้เห็นถึงผลการเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลมากขึ้น

6.2.4 การจำลองการไหลแบบสองเฟสนั้น ควรจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอนุภาค หรือรูปทรงของอนุภาคให้แตกต่างกันไป เพื่อที่จะได้มีข้อมูลนำไปออกแบบหาขนาดและรูปร่างของไซโคลนที่เหมาะสมในการแยกอนุภาคต่อไป

6.2.5 การจำลองการไหลแบบสองเฟสนั้น สำหรับการเคลื่อนที่ของอนุภาค ควรจะมีการพิจารณาผลกระทบที่เกิดจากปฏิภิริยาระหว่างอนุภาคด้วยกัน เพื่อที่จะได้มีข้อมูลที่สอดคล้องกับความเป็นจริง

6.2.6 ตำแหน่งของอนุภาคที่ไหลเข้าบริเวณทางเข้าของไซโคลนนั้น ควรจะหาวิธีการใส่จำนวนอนุภาคโดยแบ่งบริเวณทางเข้าทั้งหมดให้เท่ากับจำนวนของอนุภาคที่ใส่เข้าไป (ภาพประกอบ ก – 1) เพื่อที่จะให้การไหลเข้าของอนุภาคสอดคล้องกับความเป็นจริง

**บรรณานุกรม**

## บรรณานุกรม

- Akker, Van Den, H.E.A., Hoekstra, A.J., Derksen, J.J. (1999). *An Experimental and Numerical Study of Turbulent Weiriling Flow in Gas Cyclones*. Krners Laboratorium Voor Fysische Technologie. J.M. Burgers Centre for Fluid Mechanics, Delft University of Technology.
- Boysan, F., Ayers, W.H. & Swithenbank, J. (1982). *A Fundamental Mathermatical Modeling Approach to the Cyclone Design*. Department of Chemical Engineering and Fuel Technology, Sheffield University, Sheffield,England.
- FLUENT User's Guide Version 6.0*, (2001). U.S.A.
- Griffiths, W.D. & Boyson, F. (1996). "Computational Fluid Dynamics and Empirical Modeling of the Performance of a Number of Cyclone Samplers," *Journal of Aerosol Science*. 27(2) : 281 – 304.
- Hideto, Yoshida. (1995). *Three-dimensional Simulation of Air Cyclone and Particle Separator by a Revised-type Cyclone*. Department of Chemical Engineering, Hiroshima University.
- Karanikolis, Vassilis G. (2001). *CFD Analysis of a Cyclone Separator Using FLUENT*. Department of Mechanical Aerospace and Manufacturing Engineering, University of Manchester of Science and Technology.
- Kraipech, W., Nowwakowski, A., Dyakowski, T. & Suksangpanomrung, A. (2004). *An Influence of the Particle-fluid Particle-particle Interactions on the Separation Performance of a Hydrocyclone*.
- Meier, H.F. & Mori, M. (1998). "Gas-Solid Flow in the Cyclones : The Eulerian-Eulerian Approach," *Computers & Chemical Engineering*. 22 (Supp) : S641 – S644.
- Park, S.H., Xiang, Ongbiao., Lee, K.W. (2000). *Effects of Cone Dimension on Cyclone Performance*. Department of Environmental Science and Engineering, Kwangju Institute of Science and Technology, South Korea.
- Patankar, S.V. & Spalding, D.B. (1972). "A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three - dimensional Parabolic Flows," *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- Stiarmand, C. J., (1951). "The Design and Performance of Cyclone Separators," *Trans I Chem E*. 29 : 58 – 76.

Versteeg, H.K. & Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. England, The finite Volume Method, Longman Scientific & Technical, Longman Group Limited.

Yakhot, V. & Orzag, S.A. (1986). "Renormalization Group Analysis of Turbulence : I Basis Theory," *Journal of Scientific Computing*. 1 : 1 – 51.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

คำอธิบายสัญลักษณ์

## คำอธิบายสัญลักษณ์

### สัญลักษณ์ และความหมาย

$F_r$	หมายถึง	แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง
$F_D$	หมายถึง	แรงจุดลาก
$F_x$	หมายถึง	แรงอื่น ๆ นอกจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางแรงจุดลาก
$r$	หมายถึง	รัศมีของไซโคลน
$\mu$	หมายถึง	ความหนืด
$\mu_i$	หมายถึง	ความหนืดของการปั่นป่วน
$k$	หมายถึง	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
$\varepsilon$	หมายถึง	อัตราการสลายความปั่นป่วน
$\phi$	หมายถึง	ตัวแปรใดๆ ของการไหล
$\rho$	หมายถึง	ความหนาแน่นของของไหล
$\rho_p$	หมายถึง	ความหนาแน่นของอนุภาค
$d_p$	หมายถึง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
$u$	หมายถึง	ความเร็วของกระแสการไหล
$\bar{u}$	หมายถึง	ความเร็วเฉลี่ยของกระแสการไหล
$\bar{u}'$	หมายถึง	ความเร็วเฉลี่ยของการกระเพื่อม
$S$	หมายถึง	แฟคเตอร์การแยก
$p$	หมายถึง	ความดัน
$\bar{p}$	หมายถึง	ความดันเฉลี่ย
$p^*$	หมายถึง	ค่าตรวจสอบความดัน
$\alpha$	หมายถึง	แฟคเตอร์การปรับค่า
$t$	หมายถึง	เวลา
$A$	หมายถึง	พื้นที่ผิวของปริมาตร
$h_1$	หมายถึง	ความสูงทรงกระบอก
$h_2$	หมายถึง	ความสูงทรงกรวย

ประวัติย่อผู้วิจัย

## ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ - ชื่อสกุล	นายวสันต์ ศรีเมือง
วันเดือนปีเกิด	6 มิถุนายน 2518
สถานที่เกิด	อำเภอเดชอุดม จังหวัดอุบลราชธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	744 ถนน สุรนารายณ์ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
ตำแหน่งหน้าที่การงานในปัจจุบัน	ข้าราชการครู ตำแหน่ง อาจารย์ 1 ระดับ 4
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2539	ปวส. ช่างจักรกลหนัก สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
พ.ศ. 2542	วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
พ.ศ. 2547	วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ