

การจำลองสนามการไหลของอนุภาคของไหลภายในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น

ปริญญาานิพนธ์

ของ

สิทธิกานต์ นุ่นหนู

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

เมษายน 2551

การจำลองสนามการไหลของอนุภาคของไหลภายในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น

ปริญญาานิพนธ์  
ของ  
สิทธิกานต์ นุ่นหนู

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

เมษายน 2551

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การจำลองสนามการไหลของอนุภาคของไหลภายในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น

บทคัดย่อ

ของ

สิทธิกานต์ นุ่นหนู

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

เมษายน 2551

สิทธิกันต์ นุ่นหนู . (2551). การจำลองสนามการไหลของอนุภาคของไหลภายในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น. ปริญญาโท วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัญมมงคล, พ.ท. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ , ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง.

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการจำลองสนามการไหลในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น เพื่อออกแบบใช้งานสำหรับแยกส่วนผสมของเหลวออกจากก๊าซธรรมชาติ โดยประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) ด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  model โดยสมมติฐานที่ใช้ในการไหล คือ การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ของของไหล 2 สถานะ ระหว่างก๊าซกับอนุภาคของเหลวใน 2 มิติที่สภาวะคงตัว

ในการศึกษาออกแบบได้แบ่งรูปแผ่นคลื่นออกเป็น 3 แบบ คือแบบทั่วไป แบบเพิ่มครีบริบาย และแบบปรับปรุงครีบริบาย ขั้นต้นได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลในแบบทั่วไป แล้วนำข้อมูลที่ได้มาทำการออกแบบครีบริบายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน โดยกำหนดความเร็วเริ่มต้นอยู่ระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที และสุดท้ายได้เลือกแบบแผ่นคลื่นที่เหมาะสมที่สุดมาศึกษาเพิ่มเติม โดยกำหนดขนาดอนุภาคของเหลวเป็น 2 ขนาด คือ ระหว่าง 5 ถึง 40  $\mu m$  โดยมีขนาดเฉลี่ย 25  $\mu m$  และ 10 ถึง 40  $\mu m$  โดยมีขนาดเฉลี่ย 21  $\mu m$

ผลการวิจัยพบว่าความเร็วการไหลของของไหลที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที โดยรูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบริบายขนาดช่องทางไหล 15 มิลลิเมตร มุมหัก 75 องศา มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่าความดันสูญเสีย้น้อย และมีประสิทธิภาพการดักจับละอองของเหลวเกินกว่า 85 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : คุณลักษณะการแยกการไหล คุณลักษณะการไหล เครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น

SIMULATION OF GAS-LIQUID/PARTICLE FLOW PATTERN IN THE WAVE-PLATE  
MIST ELIMINATOR

AN ABSTRACT  
BY  
SITTHIKARN NUNNOO

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements of the  
Master of Engineer Degree in Mechanical Engineering  
at Srinakharinwirot University

April 2008

Sitthikarn Nunnoo. (2008). *Simulation of gas-liquid/particle flow pattern in the wave-plate mist eliminator*. Master thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Asst. Prof. Dr. Phichai Asadamongkon, Asst. Prof. Dr. Anotai Suksangpanomrung.

This research presents the simulation of gas-liquid/particle flow in the wave-plate mist eliminator for separating liquid particle out of natural gas by using Computational Fluid Dynamics (CFD) technique with the  $k - \varepsilon$  turbulence model.. The flow assumed to be two dimensional, steady and incompressible with 2 phase flow base on discrete phase model.

In this research, the wave-plate mist eliminator, is divided into 3 types; general type model, drainage channel type model and modified drainage channel types model. In primary, the general type model is simulated and the data is modified for drainage channel type and modified drainage channel type model. The modification's purpose is to increase the separation efficiency. The inlet velocity is controlled between 2–5 m/s. Finally, the simulation's are simulated with particle size between 5-40  $\mu m$  with the averaged 25  $\mu m$  and 10–40  $\mu m$  with averaged 21  $\mu m$

The result found that, the velocity of 2–5 m/s is appropriated for the simulation with modified drainage channel type model of vane spacing 15 mm. and bend angle 75 degree. Sine it gave low pressure drop across a wave-plate unit and the separation efficiency is more than 85 %.

Keywords : Separation flow characteristics, Flow characteristics, Mist eliminator.

ปริญญานิพนธ์  
เรื่อง

การจำลองสนามการไหลของอนุภาคของไหลภายในเครื่องแยกละเอียดแบบแผ่นคลื่น

ของ

สิทธิกานต์ นุ่นหนู

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญศิริ จีระเดชากุล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2551

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธาน

.....ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมภมงคล)

(รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข)

.....กรรมการ

.....กรรมการ

(พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ่ง) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมภมงคล)

.....กรรมการ

(พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ่ง)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ คุรุเจริญ)

## ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้นั้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมภมมงคลและ พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ่ง ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำปรึกษา และคำแนะนำ ตลอดจนการตรวจสอบความถูกต้องทางเนื้อหาวิชาการและแก้ไขข้อบกพร่อง เพื่อให้งานออกมาอย่างมีคุณภาพมากที่สุด และขอขอบคุณ สำนักวิจัย และบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเพื่อโปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลสำหรับงานวิจัยนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ โครงการร่วมมือทางวิชาการระหว่างมหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ กับส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ระดับบัณฑิตศึกษาศาขาศึกษาวิศวกรรมเครื่องกล ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความสามารถทางวิชาการ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างยิ่ง ประโยชน์และคุณค่าของงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้ผู้มีพระคุณทุกท่าน และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยเล่มนี้ จะมีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจในเนื้อหารายละเอียดต่างๆ เป็นอย่างดี และจะมีส่วนในการพัฒนาประเทศชาติให้เจริญก้าวหน้าต่อไป หากมีข้อผิดพลาด หรือมีข้อบกพร่องประการใดผู้วิจัยขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สิทธิกานต์ นุ่นหนู

# สารบัญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ.....	1
	ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย.....	1
	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
	ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	3
	สมมติฐานในการวิจัย.....	4
2	ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
	บทนำ.....	5
	สมการควบคุมพื้นฐานสำหรับการไหล.....	6
	สมการความต่อเนื่อง.....	6
	สมการโมเมนตัม.....	6
	แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ .....	7
	สมการ Turbulent kinetic energy ( $k$ ).....	8
	สมการ Dissipation rate ( $\epsilon$ ).....	10
	สรุปสมการของ $k - \epsilon$ สำหรับ Reynolds number สูง ๆ.....	12
	สรุปสมการการไหลแบบปั่นป่วน.....	13
	สมการควบคุมการเคลื่อนที่ของอนุภาค.....	14
	ลักษณะการไหลภายในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น.....	15
	ทฤษฎีของเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น.....	15
	ทฤษฎีการไหลในท่อของก๊าซ.....	17
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
3	ระเบียบวิธีการวิจัย.....	22
	บทนำ.....	22
	สมการควบคุมพื้นฐาน (Governing Equations).....	22
	การดิสครีไทซ์สมการ.....	24

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 (ต่อ)	
เทอมการพา (Convection Term).....	24
เทอมการแพร่ (Diffusion Term).....	25
Source Term.....	25
การประมาณค่าของอินทิกรัลพื้นผิว.....	26
ระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง.....	26
ระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับสอง.....	27
ระเบียบวิธีผลต่างแบบคิวก.....	28
กระบวนการหาคำตอบ (Solution algorithm).....	29
เงื่อนไขขอบ (Boundary conditions).....	33
เงื่อนไขขอบที่ทางเข้า (Inlet boundary condition).....	33
เงื่อนไขขอบที่ผนัง (Wall boundary condition).....	24
เงื่อนไขที่บริเวณผนังสำหรับก๊าซ.....	34
เงื่อนไขขอบที่ผนังสำหรับอนุภาคของเหลว.....	34
เงื่อนไขขอบที่ทางออก (Outlet boundary condition).....	35
กรณีศึกษาสำหรับงานวิจัย.....	35
เงื่อนไขการจำลองการไหล.....	35
รูปแบบของเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น.....	36
ขั้นตอนและลำดับการแก้สมการ.....	37
การทดลองผลกระทบของกริดที่มีต่อคำตอบ.....	40
ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการจำลอง.....	42
4 ผลและการวิเคราะห์.....	44
บทนำ.....	44
การไหลแบบปั่นป่วนในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น.....	44
เปรียบเทียบผลการทำนายกับงานวิจัยที่ผ่านมา.....	46
ผลการทำนายของรูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A).....	47
การออกแบบครีบริบาย (Drainage Channel).....	49

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 (ต่อ)	
ผลการทำนายของรูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบระบาย (Type-B).....	53
ผลการทำนายของรูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบระบาย (Type-C).....	57
เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล .....	61
ขนาดช่อง 15 mm. มุมหัก 90 องศา (AS15 $\alpha$ 90) Type-A.....	63
ขนาดช่อง 15 mm. มุมหัก 75 องศา (BS15 $\alpha$ 75) Type-B.....	67
ขนาดช่อง 15 mm. มุมหัก 75 องศา (CS15 $\alpha$ 75) Type-C.....	70
5 สรุปลงงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	75
สรุปลงงานวิจัย.....	75
ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยต่อไป.....	76
บรรณานุกรม.....	77
ภาคผนวก .....	80
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	99

## บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 สมการพื้นฐานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในรูปแบบของเทนเซอร์.....	13
2 รูปสมการ Transport ของการไหลแบบปั่นป่วนเปรียบเทียบกับ สมการพื้นฐานในรูปแบบทั่วไป.....	23
3 เงื่อนไขการจำลองการไหล และพารามิเตอร์ต่างๆ ของก๊าซ.....	36
4 เงื่อนไขการจำลองการไหล และพารามิเตอร์ต่างๆ ของอนุภาคของเหลว.....	36
5 รูปแบบแผ่นคลื่นที่ศึกษา.....	36
6 สัญลักษณ์รูปแผ่นคลื่นที่ใช้ประกอบการแสดงผลการจำลองการไหล.....	38
7 การหาจำนวนกริดที่เหมาะสม.....	41
8 แสดงผลการเพิ่มขึ้นของค่าความดันสูญเสียสัมพัทธ์และค่าประสิทธิภาพการแยก สัมพัทธ์ที่อัตราส่วนครีบริบายขนาดต่างๆ.....	51

# บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แสดงลักษณะของเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น (Wave-plate Mist Eliminator) ....	1
2 ลักษณะของความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วน.....	6
3 ส่วนประกอบของความเร็วที่เกิดขึ้นในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น.....	16
4 ปริมาตรควบคุมของความดันและความเร็วในระบบ Staggered grid.....	23
5 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง.....	26
6 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับสอง.....	27
7 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างแบบควิก.....	28
8 แสดงเงื่อนไขขอบแบบ trap ของการจำลองการไหลที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน.....	35
9 พารามิเตอร์ของแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A).....	37
10 พารามิเตอร์ของแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B).....	37
11 พารามิเตอร์ของแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบริบาย (Type-C).....	37
12 ขั้นตอนและลำดับการแก้สมการ.....	39
13 ลำดับขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธี SIMPLE .....	40
14 Unstructured grids ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	41
15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการแยกกับความละเอียดของกริด ที่แตกต่างกัน.....	42
16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นกับความละเอียดของกริด ที่แตกต่างกัน.....	42
17 รูปแสดงภาพจนถึงความดันสำหรับติดตั้งแผ่นคลื่นแยกละอองของเหลว และแสดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เลือกใช้ในการหาค่าตัวเลขเรย์โนลด์.....	45
18 พารามิเตอร์ของรูปแบบแผ่นคลื่นที่ใช้จำลองการไหลเพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัย ของ (Jianzhi Zhoa. 2005).....	46
19 เปรียบเทียบค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นกับงานวิจัยของ (Jianzhi Zhoa. 2005).....	46
20 กราฟแสดงความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อกำหนดความเร็วการไหลของก๊าซที่ แตกต่างกันระหว่าง 2 ถึง 9 เมตรต่อวินาที.....	47
21 กราฟแสดงประสิทธิภาพการแยกเมื่อกำหนดความเร็วการไหลของก๊าซที่แตกต่าง กันระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที.....	48

## บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
22	แสดงลักษณะสนามการไหล (Stream line) ภายในเครื่องแยกละอองรูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A) AS20 $\alpha$ 90 ที่ความเร็วการไหล 3 เมตรต่อวินาที.....	49
23	แสดงลักษณะรูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไปที่ใช้ในการจำลองการไหล ที่ขนาดช่องทางไหล (Spacing) 20 มิลลิเมตร มุมหัก 90 องศา.....	50
24	แสดงลักษณะรูปแผ่นคลื่นที่ใช้ในการจำลองการไหลเพื่อออกแบบครีบริบายซึ่งกำหนดให้ $l/L$ และ $s/S$ เปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 10 ถึง 50 เปอร์เซนต์.....	50
25	กราฟแสดงความดันสูญเสียสัมพัทธ์เปรียบเทียบระหว่างรูปแบบแผ่นคลื่นแบบทั่วไปกับรูปแบบแผ่นคลื่นเมื่อเพิ่มครีบริบายที่สัดส่วนต่าง ๆ.....	51
26	รูปภาพแสดงประสิทธิภาพของการแยกสัมพัทธ์เปรียบเทียบระหว่างรูปแบบแผ่นคลื่นแบบทั่วไปกับรูปแบบแผ่นคลื่นเมื่อเพิ่มครีบริบายที่สัดส่วนต่าง ๆ.....	52
27	กราฟแสดงความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อกำหนดความเร็วการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที ของรูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B).....	53
28	กราฟแสดงประสิทธิภาพการแยกเมื่อกำหนดความเร็วการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที ของรูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B).....	55
29	กราฟแสดงความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อกำหนดความเร็วการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที ของรูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบริบาย (Type-C).....	57
30	กราฟแสดงประสิทธิภาพการแยกเมื่อกำหนดความเร็วการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที ของรูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบริบาย (Type-C).....	59
31	กราฟเปรียบเทียบความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อกำหนดความเร็วการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที ของรูปแผ่นคลื่น 3 แบบ.....	62
32	กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกเมื่อกำหนดความเร็วการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที ของรูปแผ่นคลื่น 3 แบบที่ขอบเขตขนาดอนุภาคของเหลว 5-40 $\mu\text{m}$ .....	62

## บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า	
33	กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกของรูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A) AS15 $\alpha$ 90 เมื่อกำหนดขอบเขตขนาดอนุภาคของเหลวที่ต่างกันคือ 5-40 และ 10-40 .....	63
34	แสดงรูปร่างความเร็วที่เกิดขึ้นภายในรูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A) AS15 $\alpha$ 90.....	64
35	รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคลื่นแบบ ทั่วไป (Type-A) AS15 $\alpha$ 90 สำหรับ Re = 149,000 (Not to scale).....	64
36	รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคลื่นแบบ ทั่วไป (Type-A) AS15 $\alpha$ 90 สำหรับ Re = 223,000 (Not to scale).....	65
37	รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคลื่นแบบ ทั่วไป (Type-A) AS15 $\alpha$ 90 สำหรับ Re = 298,000 (Not to scale).....	65
38	รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคลื่นแบบ ทั่วไป (Type-A) AS15 $\alpha$ 90 สำหรับ Re = 372,000 (Not to scale).....	66
39	กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกของรูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบบะบาย (Type-B) BS15 $\alpha$ 75 เมื่อกำหนดขนาดอนุภาคของเหลวที่ต่างกันคือ 5-40 และ 10-40 $\mu$ m.....	67
40	แสดงรูปร่างความเร็วที่เกิดขึ้นภายในรูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบบะบาย (Type-B) BS15 $\alpha$ 75.....	67
41	รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคลื่นแบบ เพิ่มครีบบะบาย (Type-B) BS15 $\alpha$ 75 สำหรับ Re=149,000 (Not to scale).....	68
42	รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคลื่นแบบ เพิ่มครีบบะบาย (Type-B) BS15 $\alpha$ 75 สำหรับ Re=223,000 (Not to scale).....	68
43	รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคลื่นแบบ เพิ่มครีบบะบาย (Type-B) BS15 $\alpha$ 75 สำหรับ Re=298,000 (Not to scale).....	69

## บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า	
44	รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคลื่นแบบ เพิ่มครีบริบาย (Type-B) BS15 $\alpha$ 75 สำหรับ Re=372,000 (Not to scale).....	69
45	กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกของรูปแผ่นคลื่นแบบปรับรูปร่างครีบริบาย (Type-C) CS15 $\alpha$ 75 เมื่อกำหนดขอบเขตของขนาดอนุภาคของเหลว ที่ต่างกันระหว่าง 5-40 และ 10-40 .....	70
46	แสดงรูปร่างความเร็วที่เกิดขึ้นภายในรูปแผ่นคลื่นแบบปรับรูปร่างครีบริบาย (Type-C) CS15 $\alpha$ 75 .....	71
47	รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคลื่นแบบ ปรับรูปร่างครีบริบาย (Type-C) CS15 $\alpha$ 75 สำหรับ Re=149,000 (Not to scale).....	71
48	รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคลื่นแบบ ปรับรูปร่างครีบริบาย (Type-C) CS15 $\alpha$ 75 สำหรับ Re = 223,000 (Not to scale).....	72
49	รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคลื่นแบบ ปรับรูปร่างครีบริบาย (Type-C) CS15 $\alpha$ 75 สำหรับ Re = 298,000 (Not to scale).....	72
50	รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคลื่นแบบ ปรับรูปร่างครีบริบาย (Type-C) CS15 $\alpha$ 75 สำหรับ Re = 372,000 (Not to scale).....	73
51	ลักษณะของหน้าต่างโปรแกรม FLUENT 6 .....	86
52	ลักษณะของหน้าต่างโปรแกรม GAMBIT 2.1 .....	86
53	แสดงรูปแบบและพารามิเตอร์ต่างๆ ของรูปแผ่นคลื่น .....	87
54	หน้าต่างแสดงการเปิดใช้แบบจำลอง .....	88
55	หน้าต่างแสดงแบบจำลองของเมชโมเดล .....	88
56	หน้าต่างแสดงการกำหนดเงื่อนไขของปัญหาการไหล .....	89
57	หน้าต่างแสดงการกำหนดรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน .....	89

## บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

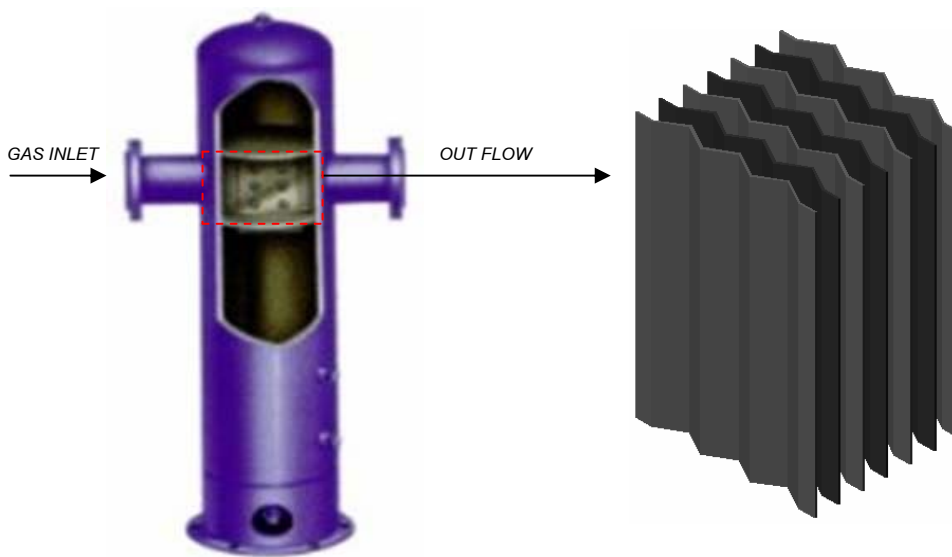
ภาพประกอบ	หน้า
58 หน้าต่าง Discrete Phase Model สำหรับปัญหาการไหลแบบ 2 สถานะ ระหว่าง ก๊าซและอนุภาคของเหลว .....	90
59 หน้าต่างแสดงการกำหนดเงื่อนไขการไหลของอนุภาคของเหลว .....	90
60 หน้าต่างแสดงการกำหนดคุณสมบัติของก๊าซ .....	91
61 หน้าต่างแสดงการกำหนดคุณสมบัติของอนุภาคของเหลว .....	91
62 หน้าต่างแสดงการกำหนดเงื่อนไขของความดันที่ใช้ออกแบบ .....	92
63 หน้าต่างแสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของก๊าซ .....	93
64 หน้าต่างแสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของค่าความเร็วไหลเข้า .....	93
65 หน้าต่างแสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของช่องทางออก .....	93
66 หน้าต่างแสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของผนังแบบจำลอง .....	94
67 หน้าต่างแสดงการกำหนดเงื่อนไขระเบียบวิธีเชิงตัวเลข .....	94
68 หน้าต่างแสดงการกำหนดเงื่อนไขให้โปรแกรมเริ่มทำการคำนวณจากค่า ความเร็วเริ่มต้น .....	95
69 หน้าต่างการกำหนดเงื่อนไขการลู่ออกค่าตอบ .....	95
70 หน้าต่างแสดงการกำหนดให้โปรแกรมเริ่มทำการคำนวณ .....	96
71 หน้าต่างแสดงผลการคำนวณ .....	96
72 แสดงหน้าต่างการดูข้อมูลค่าความดันสูญเสีย .....	97
73 แสดงหน้าต่างการดูข้อมูลค่าประสิทธิภาพการแยก .....	97
74 หน้าต่างการกำหนดให้โปรแกรมแสดงผลข้อมูลในรูปแบบเส้นลวดลายความเร็ว .....	98
75 แสดงเส้นลวดลายของค่าความเร็วการไหล .....	98

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย

ปัจจุบันก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงหลักของประเทศไทยที่ใช้สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า และยังมีใช้กันอย่างแพร่หลายในสถานประกอบการโรงงานอุตสาหกรรม และรัฐบาลยังมีการส่งเสริมให้ใช้สำหรับยานยนต์อีกด้วย โดยมีแนวโน้มการใช้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ก๊าซธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีส่วนผสมของก๊าซมีเทนอยู่ประมาณ 80 – 90 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือเป็นส่วนผสมของก๊าซเชื้อเพลิงอื่น รวมถึงส่วนผสมของเหลวซึ่งไม่มีประโยชน์ทางความร้อนประกอบอยู่ด้วย ดังนั้นอุปกรณ์แยกส่วนผสมของเหลวออกจากก๊าซก่อนนำไปใช้งานจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพราะสามารถช่วยเพิ่มค่าความร้อนของก๊าซ และยังช่วยยืดระยะเวลาการทำงานของอุปกรณ์เนื่องจากของเหลวเป็นตัวก่อให้เกิดการผุกร่อน ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอีกด้วย ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกของเหลวออกจากก๊าซมีอยู่หลายแบบ และวิธีการเลือกใช้อุปกรณ์แต่ละแบบจำเป็นต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมในการออกแบบตามหลักการทางวิศวกรรมภายใต้สภาวะการทำงานจริง เครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น (Wave-Plate Mist Eliminator) เป็นอุปกรณ์การแยกชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และสถานประกอบการอื่น ๆ อีกมากมาย เนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่าย ราคาถูกเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ชนิดอื่น โดยมีลักษณะและรูปแบบการทำงานดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 แสดงลักษณะของเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น (Wave-plate Mist Eliminator)

สำหรับการศึกษาด้านพลศาสตร์ของไหล (Computation Fluid Dynamic) วิวัฒนาการทางด้านคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ประกอบกับเทคนิคทางด้านการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) มีความก้าวหน้าอย่างมาก มีผลทำให้การวิเคราะห์การไหลด้วยวิธีเชิงตัวเลขสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งประโยชน์ของการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมีดังนี้ (ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2538, 2544)

1. ใช้เวลาน้อยกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับทดลอง การวิเคราะห์โดยการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสามารถกระทำได้อย่างรวดเร็วโดยผู้ออกแบบสามารถศึกษาลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกันมากมาย และเลือกออกแบบรูปร่างที่ดีที่สุด
2. ประหยัดค่าใช้จ่าย โดยไม่ต้องลงทุนมากเช่นเดียวกับการทดลอง
3. ให้ข้อมูลที่สมบูรณ์ซึ่งผลลัพธ์จากการคำนวณโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจะให้รายละเอียด และข้อมูลครบทุกตำแหน่ง ในขอบเขตทั้งหมดที่สนใจ
4. สามารถจำลองสภาวะทางอุดมคติ โดยในบางครั้งพบว่าการทำงานถูกใช้เพื่อศึกษาปรากฏการณ์พื้นฐานซึ่งต้องพิจารณาเฉพาะตัวแปรที่มีความสำคัญ และตัดตัวแปรที่ไม่สำคัญออกได้จากสภาวะทางอุดมคติ ตัวอย่างเช่น ความเป็นสองมิติ สภาวะคงตัว การอัดตัวไม่ได้ของของไหล และอื่นๆ ซึ่งในการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่สภาวะเหล่านี้สามารถทำได้ไม่ยากนัก โดยผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องเชื่อถือได้
5. สามารถจำลองการไหลจริงที่มีความซับซ้อนได้ เช่น สามารถจำลองการไหลแบบปั่นป่วนหรือการไหลที่มีความเร็ว และความดันสูง

งานวิจัยในครั้งนี ้กระบวนการทาง CFD (Computation Fluid Dynamic) จึงถูกเลือกเพื่อใช้เป็นเครื่องมือเข้ามาช่วยในการออกแบบและคำนวณเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการไหลภายในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น เบื้องต้นจะนำข้อมูลการจำลองการไหลของชุดอุปกรณ์แบบทั่วไปมาดัดแปลงเพิ่มประสิทธิภาพ จากนั้นจะทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมโดยศึกษาถึงผลกระทบของสนามการไหลเมื่อมีการเปลี่ยนขนาดและรูปร่างของเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น รวมทั้งกำหนดอัตราการไหลเข้าที่แตกต่างกัน สุดท้ายจะทำการจำลองการไหลแบบสองสถานะระหว่างก๊าซกับละอองของเหลว (droplet) เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่นให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการจำลองคุณลักษณะการไหลของของไหล 2 สถานะ ภายในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น โดยประยุกต์ใช้เทคนิคทาง CFD

2. เพื่อศึกษาตัวแปรของเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคและความดันที่ลดลง เช่น สัดส่วนมุมเอียง ขนาดและรูปแบบช่องทางไหล เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบใช้งานจริง

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการทาง CFD โดยใช้ CFD code เพื่อทำการจำลองการไหลของของเหลวภายในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น
2. ใช้โปรแกรม CFD สร้างแบบจำลองการไหลแบบ 2 มิติ โดยมีสภาวะขอบเขต (Boundary Condition) และ สภาวะการไหล (Flow Condition) ดังนี้
  - การไหลเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulence Flow)
  - การไหลเป็นแบบคงตัว (Steady Flow) ไม่มีการถ่ายเทความร้อน (Isothermal System)
 การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow)
  - การไหลแบบสองสถานะ (2- Phase Flow) ระหว่างก๊าซกับละอองของเหลว

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. เป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น สำหรับแยกละอองของเหลวออกจากก๊าซ
2. ใช้กระบวนการทาง CFD มาช่วยในการวิเคราะห์ และทำความเข้าใจลักษณะการไหลภายในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น
3. ได้ข้อมูล และเข้าใจถึงรูปแบบการไหล (Flow Pattern) ในระบบเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและพัฒนาต่อไป

### 1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของการไหลในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น
2. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากการสร้างแบบจำลองและการทดลอง
3. สร้างแบบจำลองการไหลภายในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่นแบบต่างๆ โดยใช้โปรแกรม CFD
4. ศึกษารูปแบบการไหล (Flow pattern) ภายใต้สภาวะต่าง ๆ
5. สรุปและวิเคราะห์ผลการวิจัย

## 1.6 สมมติฐานในการวิจัย

### 1. สมมติฐานการไหลของก๊าซ

- ความเร็วของของไหลที่จุดเข้าเป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform Flow)
- ไม่คิดผลกระทบจากการอัดตัวของของไหล โดยของไหลที่ใช้ศึกษาคือก๊าซมีเทน
- กำหนดให้การไหลเป็นแบบคงตัว (Steady State Flow)

### 2. สมมติฐานการเคลื่อนที่ของอนุภาคของเหลว

- ไม่คิดการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคในระบบเนื่องจากมีส่วนผสมของอนุภาคเบาบาง

ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์

- ไม่คิดการสะท้อนกลับ (Rebound) ของอนุภาคเมื่อมีการเกิดการชนปะทะกับผนัง
- ในกรณีที่อนุภาคของเหลวชนปะทะกับผนังการคำนวณจะสิ้นสุดลง และโปรแกรม

จำลองจะเก็บบันทึกข้อมูลจำนวนอนุภาคที่ตกกระทบเพื่อนำไปหาประสิทธิภาพการทำงาน ซึ่งสอดคล้องตามเงื่อนไขขอบที่ผนังแบบ trap

## บทที่ 2

### ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

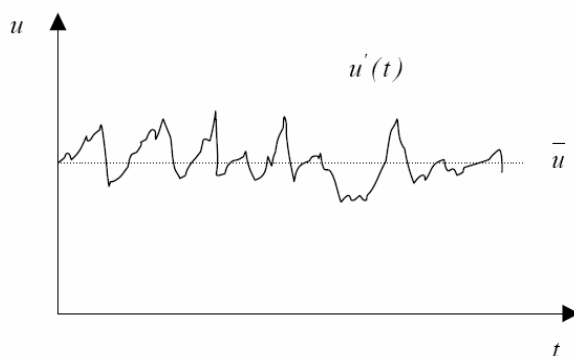
การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics:CFD) ในอดีตการทำ ความเข้าใจในปรากฏการณ์ของการไหล การถ่ายเทความร้อน รวมถึงปรากฏการณ์อื่นๆ จำเป็นต้องพึ่งพา การทดลอง ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง ใช้เวลานานรวมถึงอาจต้องนำกลับไปทดลองซ้ำในกรณีที่มีการแก้ไข เปลี่ยนแปลงแบบจำลอง โดยที่ไม่ทราบว่ารูปร่างที่เปลี่ยนไปนั้นอาจทำให้ได้ผลที่ดีขึ้นหรือแย่ลงอย่างไร เพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้จึงได้นำเอาการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเข้ามาใช้สำหรับปัญหาที่มีความ ซับซ้อน โดยการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเป็นศาสตร์ที่ว่าด้วยการแก้ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stoke Equation) ที่อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ซึ่งประกอบด้วยสมการของการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน สมการเหล่านี้สามารถแก้ได้อย่าง มีประสิทธิภาพโดยการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) เช่น ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method) หรือระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method) เป็นต้น ซึ่ง ระเบียบวิธีทางตัวเลขนี้จะเปลี่ยนสมการสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ใช้อธิบายพฤติกรรมทางกายภาพ ให้ เป็นสมการพีชคณิต (Algebraic Equation) ซึ่งอยู่ในรูปของการ บวก ลบ คูณ หาร ซึ่งสามารถหาผล เฉลยได้ง่ายขึ้น การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลนี้ไม่ได้เข้าแทนที่ทฤษฎีหรือการทดลอง หากแต่เป็น เพียงการเสริมสร้างความเข้าใจ และยืนยันผลที่ได้จากทฤษฎีและการทดลอง

สำหรับการไหลของของไหลที่มีความหนืด เป็นการไหลที่รวมผลที่เกิดจากการกระจายตัว และ ปรากฏการณ์ที่เกิดจากความหนืด โดยสมการควบคุม (Governing Equations) ที่เขียนในรูปแบบอนุรักษ์ (Conservation Form) ของการไหลของของไหลที่มีความหนืด (Viscous flow) ที่ใช้สำหรับกรณีการไหล อยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state), ของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) และพิจารณาแบบ 2 มิติ (Two dimensional) ซึ่งสามารถแสดงสมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์ 2 สมการคือ

- 1) สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)
- 2) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum equation)

## 2.2 สมการควบคุมพื้นฐานสำหรับการไหล (Governing Equation of Fluid Dynamic)

โดยปกติแล้วค่าของตัวแปรในการไหลแบบปั่นป่วนจะมีค่าไม่คงที่ และค่าเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป ดังเช่นตัวอย่างของความเร็ว  $u$  ที่แสดงในภาพประกอบ 2 ซึ่งลักษณะเช่นนี้ทำให้การคำนวณค่าตัวแปรมีความยุ่งยากเพิ่มขึ้นเป็นอันมาก เพราะฉะนั้นจึงสมมติว่าคุณสมบัติต่างๆ ที่พิจารณาในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วนนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน โดยใช้หลักการ Reynolds decomposition กล่าวคือ แบ่งออกเป็นส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ยไม่ขึ้นกับเวลา เช่น  $\bar{u}, \bar{v}$  หรือ  $\bar{p}$  กับส่วนที่แทนผลของ Fluctuation ที่ขึ้นกับเวลา เช่น  $u', v'$  หรือ  $p'$



ภาพประกอบ 2 ลักษณะของความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วน

สมการพื้นฐานของการไหลแบบปั่นป่วนสำหรับสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) และสมการโมเมนตัม (Momentum equation) สามารถเขียนสมการทั้งสองให้อยู่ในรูปของเทนเซอร์ (Tensor) ได้ดังนี้

### 2.2.1 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2.1)$$

### 2.2.2 สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.2)$$

โดยที่  $\rho$  เป็นความหนาแน่น  $u$  เป็นความเร็วของของไหล  $p$  เป็นค่าความดันและ  $\mu$  เป็นค่าความหนืด

จาก Reynolds decomposition ทุกตัวแปรในการไหลสามารถแบ่งออกเป็นส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ย และส่วนที่แทนผลของการสั่น ตัวอย่างเช่น ฟังก์ชัน  $f$  สามารถแบ่งออกได้เป็น

$$f = \bar{f} + f' \quad (2.3)$$

จากนั้นทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (Time-averaging) จะได้ว่า

$$\bar{f}(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(x,t) dt \quad (2.4)$$

ซึ่งเมื่อทำการเฉลี่ยแล้วจะทำให้ค่าเฉลี่ยของส่วนที่แทนผลของ Fluctuation นั้นมีค่าเป็นศูนย์ ( $\bar{f}' = 0$ ) และจะได้ค่าเฉลี่ยของผลคูณทั้งสองตัวแปรมีค่าเป็น  $\overline{fg} = \bar{f}\bar{g} + \overline{f'g'}$  หากทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง กับสมการความต่อเนื่องและสมการโมเมนตัมจะได้

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.5)$$

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.6)$$

สมการ (2.5) และ (2.6) นี้ เรียกว่าสมการ Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) ซึ่งจะสังเกตได้ว่าสมการ (2.6) นี้มีรูปแบบสมการเหมือนกันกับสมการ (2.2) ยกเว้นเพียงเทอม Reynolds stresses ( $\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$ ) ที่เพิ่มขึ้นมา ซึ่งเทอมที่เพิ่มขึ้นมานี้ก็เนื่องมาจากการไหลที่เป็นแบบปั่นป่วนนั่นเอง เทอม  $\tau_{ij}$  ที่เพิ่มขึ้นมานี้มีผลทำให้ไม่สามารถแก้สมการเชิงอนุพันธ์ทั้งสองได้ สืบเนื่องมาจากจำนวนตัวแปรที่มากกว่าสมการ (2.2) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยการสร้างแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model) มาช่วยในการคำนวณ ซึ่งจะได้กล่าวถึงแบบจำลองนี้ในหัวข้อต่อไป

### 2.2.3 แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$

แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model) เป็นแบบจำลองที่ช่วยในการคำนวณสมการความต่อเนื่องและสมการ Reynolds-averaged Navier-Stokes equation (RANS) ในการไหลแบบปั่นป่วน โดยจะใช้ในการหาค่า Reynolds stress ซึ่งในการคำนวณนั้นไม่จำเป็นต้องหาค่า Fluctuation แต่จะสนใจเพียงค่าเฉลี่ยของการไหลเท่านั้น โดยแบบจำลองความปั่นป่วนที่ดีนั้นต้องสามารถคำนวณ

พฤติกรรมกรไหลในลักษณะต่างๆ ได้อย่างแม่นยำรวมทั้งช่วยประหยัดหน่วยความจำ แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้กันอยู่ในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนมีอยู่หลายแบบด้วยกัน แต่ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลอง Standard  $k - \varepsilon$  ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Two-equation turbulence model ที่นิยมใช้ในการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนก็คือ  $k - \varepsilon$  model ซึ่งแบบจำลองนี้ก็มีหลายรูปแบบด้วยกัน แต่รูปแบบที่ได้รับความนิยมกันมากที่สุดก็คือแบบจำลองของ Launder and Spalding (1974) ที่เรียกว่า Standard  $k - \varepsilon$  model ซึ่งจะใช้ Boussinesq Approximation ในการหาค่าของ Reynolds stress ดังสมการ (2.7)

$$-\overline{\rho u_i u_j} = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.7)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.8)$$

โดยที่  $\mu_t$  คือค่าความหนืดของความปั่นป่วน (turbulent or eddy viscosity) ซึ่งหาได้จากสมการ (2.8) และค่าคงที่  $C_\mu = 0.09$  และ  $k$  คือ พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน  $\left( k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \right)$  ส่วน  $\varepsilon$  คืออัตราการแยกสลายของความปั่นป่วน (turbulent dissipation rate)

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}}{\partial x_i} = -\frac{\partial \bar{p}^*}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.9)$$

โดยเทอมของ Modified pressure ( $p^*$ ) และ Effective viscosity ( $\mu_{eff}$ ) สามารถนิยามได้ดังสมการ (2.10)

$$p^* = p + \frac{2}{3} \rho k, \mu_{eff} = \mu + \mu_t, \mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.10)$$

1. สมการ Turbulent kinetic energy ( $k$ ) คือพลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยมวลของ Turbulent fluctuation ซึ่งหาได้จาก

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} = \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) \quad (2.11)$$

จากสมการ Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) (2.6) เมื่อนำความหนาแน่น ( $\rho$ ) มารวมทั้งสองข้างของสมการและจัดรูปของสมการใหม่จะได้ว่า

$$\overline{u_j \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} \quad (2.12)$$

เทอมต่างๆ ในสมการเชิงอนุพันธ์ของ  $k$  ในการสร้างรูปแบบที่ซับซ้อนและมีลักษณะที่เหมือนจริงในสมการ Turbulent kinetic energy ( $k$ ) สามารถทำได้โดยกำหนด Eddy viscosity ดังนี้

$\nu_t \propto (\text{length scale}) \times (\text{turbulent velocity fluctuation})$  หรือ

$$\nu_t \propto L \sqrt{k} \quad (2.13)$$

1.1 สมการ Turbulent kinetic energy ( $k$ ) สามารถหาได้จากการนำ  $u_i'$  คูณตลอดในสมการ Navier-Stokes (2.2) และสมการ RANS (2.12) จากนั้นนำผลที่ได้จากทั้งสองสมการมาลบกันและทำการจัดรูปซึ่งจะได้

$$\overline{u_j \frac{\partial k}{\partial x_j}} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{1}{2} \overline{u_j' u_i' u_i'} \right) - \nu \frac{\partial k}{\partial x_j} + \frac{\overline{p u_j'}}{\rho} - \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \nu \frac{\partial \overline{u_i'}}{\partial x_j} \frac{\partial \overline{u_i'}}{\partial x_j} \quad (2.14)$$

(1)                      (2)                      (3)                      (4)                      (5)                      (6)

โดยความหมายของแต่ละเทอม คือ

เทอมที่ (1) คือ เทอม Transport ของ  $k$  โดยการพา

เทอมที่ (2) คือ เทอมการแพร่ของความปั่นป่วน

เทอมที่ (3) คือ เทอมการแพร่ของความหนืด

เทอมที่ (4) คือ เทอมการแพร่ของความดัน

เทอมที่ (5) คือ เทอมการผลิตของ  $k$  ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์  $P$

เทอมที่ (6) คือ เทอมการแยกสลาย (Dissipation) ของ  $k$  ซึ่งเทอมนี้สามารถแทนด้วย

ตัวแปร  $\epsilon$

1.2 Turbulent Diffusion และ Dissipation Rate จากสมมติฐานของ Gradient-Diffusion เราสามารถจำลองเทอมการแพร่ของความปั่นป่วนได้ดังนี้

$$-\frac{1}{2} \overline{u_j u_i u_i} = \frac{\nu_i}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $\sigma_k$  คือ Prandtl-Schmidt number  $\approx 1.0$  ซึ่งโดยปกติจะสมมติว่าเทอมนี้ได้รวมเทอมการแพร่ของความดัน  $\left( -\frac{\overline{p u_j}}{\rho} \right)$  เข้าไปด้วยแล้ว

2. สมการ Dissipation rate ( $\varepsilon$ ) สมการ Transport ของ  $\varepsilon$  สามารถหาได้จากการกำหนดรูปแบบตามสมการ Navier-Stokes จากการกำหนดนี้พบว่า สมการ Transport จะมีความซับซ้อนมาก อย่างไรก็ตามสมการนี้สามารถถูกจำลองให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่ายได้

สำหรับ Two-equation models นั้นยังมีตัวแปรอื่นนอกจาก  $\varepsilon$  โดยตัวแปรต่างๆ จะจัดอยู่ในรูปดังนี้

$$\phi = k^m L^n \quad (2.16)$$

ซึ่งตัวแปรนี้จะถูกใช้ในสมการรูปทั่วไปคือ

$$\overline{u_j} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right\} + C_{\phi 1} \frac{\phi}{k} P - C_{\phi 2} \phi \frac{\sqrt{k}}{L} \quad (2.17)$$

สำหรับแบบจำลอง  $k - \varepsilon$  เราสามารถนิยาม  $\varepsilon$  จากสมการ

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{L} \quad (2.18)$$

แทนตัวแปร  $\phi$  ในสมการรูปทั่วไป (2.17) ด้วย  $\varepsilon$  จะได้สมการของ  $\varepsilon$  สำหรับ Re สูง ๆ คือ

$$\overline{u_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{\varepsilon 2} \phi \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.19)$$

(1)                      (2)                      (3)                      (4)

ซึ่งเทอมต่างๆ ในสมการ (2.19) มีความหมายทางกายภาพดังนี้

เทอมที่ (1) คือ เทอม Transport ของ  $\varepsilon$  โดยการพา

เทอมที่ (2) คือ เทอมการแพร่ของความปั่นป่วน

เทอมที่ (3) คือ อัตราการผลิตของ  $\varepsilon$

เทอมที่ (4) คือ อัตราการแยกสลายของ  $\varepsilon$

ซึ่งจะสังเกตว่าอัตราการผลิตจะเกี่ยวเนื่องกันกับ Turbulence energy และอัตราการแยกสลายจะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่าย คือ  $\varepsilon / (\text{turbulence time scale})$  โดยค่า time scale นี้จะเป็นอัตราส่วนของ  $k / \varepsilon$

2.1 ค่าคงที่ของ Model จากการสลายตัว (Decay) ของ Turbulence ทำให้สามารถลดรูปสมการ  $k$  และ  $\varepsilon$  ได้เป็น

$$-u \frac{\partial k}{\partial x} = -\varepsilon \quad \text{และ} \quad -u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = -C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.20)$$

การลดลงของ  $k$  จะเป็นแบบ Power law ( $k \propto x^{-n}$ ) และจะได้

$$C_{\varepsilon 2} = \frac{n+1}{n} \quad (2.21)$$

จากผลการทดลองพบว่า  $n \approx 1.25$  ดังนั้น  $C_{\varepsilon 2} \approx 1.8$

$$\text{ที่บริเวณใกล้ผนังนั้น } P \approx \varepsilon, \quad k \approx \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}}, \quad \varepsilon \approx \frac{u_\tau^3}{\kappa y}, \quad v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{และ}$$

สมการของ  $\varepsilon$  สามารถลดรูปได้ดังนี้

$$0 = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.22)$$

ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_{\varepsilon 1}$  และ  $C_{\varepsilon 2}$  ได้ดังนี้

$$C_{\varepsilon 1} = C_{\varepsilon 2} - \frac{\kappa^2}{\sigma_\varepsilon \sqrt{C_\mu}} \quad (2.23)$$

ดังนั้นค่าคงที่สำหรับ  $k - \varepsilon$  model ที่ Re สูง ๆ คือ  $C_\mu = 0.09$ ,  
 $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$

## 2.2.4 สรุปสมการของ $k - \varepsilon$ สำหรับ Reynolds number สูง ๆ

$$\overline{u_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P - \varepsilon \quad (2.24)$$

$$\overline{u_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.25)$$

จากสมการ (2.24) และ (2.25) เมื่อนำความหนาแน่น ( $\rho$ ) คูณทั้งสองข้างของสมการและจัดรูปของสมการใหม่จะได้ว่า

$$\overline{\rho u_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P - \rho \varepsilon \quad (2.26)$$

$$\overline{\rho u_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.27)$$

เมื่อ  $P =$  Production of kinetic energy

$$\tau_{ij} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \mu_t \left[ 2 \left( \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 \right) + \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (2.28)$$

ในการไหลแบบปั่นป่วนนั้น บริเวณใกล้ผนังจะมีผลของความหนืดและ Turbulence ซึ่งจะมีอิทธิพลที่สำคัญต่อการไหล และค่าความเร็วจะขึ้นอยู่กับ Boundary layer ซึ่งในที่นี้ การคำนวณความเร็วในบริเวณใกล้ผนังจะใช้วิธี Wall function ซึ่งสำหรับรายละเอียดจะได้กล่าวถึงต่อไปในหัวข้อเรื่องเงื่อนไขขอบ (Boundary conditions) ในบทที่ 3

## 2.3 สรุปสมการการไหลแบบปั่นป่วน

จากเนื้อหาทั้งหมดที่กล่าวไปแล้วในข้างต้นสามารถสรุปสมการที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณการไหลโดยทั่วไป โดยแบ่งเป็นสมการพื้นฐานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 สมการพื้นฐานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในรูปแบบของเทนเซอร์

Transport equation	Differential form
Continuity	$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$
Momentum	$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}}{\partial x_i} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right]$
Turbulent kinetic energy	$\rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P - \rho \varepsilon$
Dissipation rate	$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$
Boussinesq approximation	$-\overline{\rho u_i u_j} = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$

เมื่อ

$$P = \tau_{ij} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \mu_t \left[ 2 \left( \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 \right) + \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 \right], \quad \mu_{eff} = \mu + \mu_t, \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \text{และ} \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

## 2.4 สมการควบคุมการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Governing Equation of Particle Motion)

สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้จากการอินทิเกรตของการสมดุลแรงที่กระทำกับอนุภาค ซึ่งอยู่ในรูปกรอบ Lagrangian (Fluent 6.2 User's guide. 2005) การสมดุลแรงนี้ได้พิจารณาเทอมทางซ้ายมือกับเทอมต่างๆ ของแรงที่กระทำกับอนุภาคสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{gx(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (2.29)$$

โดยที่  $u$  คือ ความเร็วของก๊าซ  
 $u_p$  คือ ความเร็วของอนุภาค  
 $\mu$  คือ ความหนืดของก๊าซ  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของก๊าซ  
 $\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาค  
 $F_x$  คือ แรงอื่นๆ ที่กระทำกับอนุภาค  
 $F_D$  คือ แรงจุดลากต่อหน่วยของอนุภาคมีค่าดังสมการ (2.30)

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D \text{Re}}{24} \quad (2.30)$$

สำหรับสมการ (2.31) แสดงการคำนวณหาสัมประสิทธิ์แรงจุดลาก (drag coefficient) เมื่อ  $a_1, a_2$  และ  $a_3$  คือค่าคงที่ของสมการใช้สำหรับอนุภาคทรงกลมที่นำเสนอโดย Morsi and Alexander

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{\text{Re}} + \frac{a_3}{\text{Re}^2} = \frac{24}{\text{Re}} (1 + b_1 \text{Re}^{b_2}) + \frac{b_3 \text{Re}}{b_4 + \text{Re}} \quad (2.31)$$

โดยที่  $b_1 = \exp(2.3288 - 64581\phi + 2.4486\phi^2)$   
 $b_2 = 0.0964 + 0.5565\phi$   
 $b_3 = \exp(4.905 - 13.8944\phi + 18.4222\phi^2 - 10.2599\phi^3)$   
 $b_4 = \exp(1.4681 + 12.2584\phi - 20.7322\phi^2 + 15.8855\phi^3)$

สำหรับอนุภาคที่เล็กกว่าไมคอน  $F_D$  สามารถหาได้จากสมการ (2.32)

$$F_D = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p C_c} \quad (2.32)$$

โดยที่  $C_c$  คือ แฟคเตอร์ปรับค่าของคันทิงแฮม (Cunningham) ในกฎของสโตกส์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.275 + 0.4e^{-(1.1d_p/2\lambda)}) \quad (2.33)$$

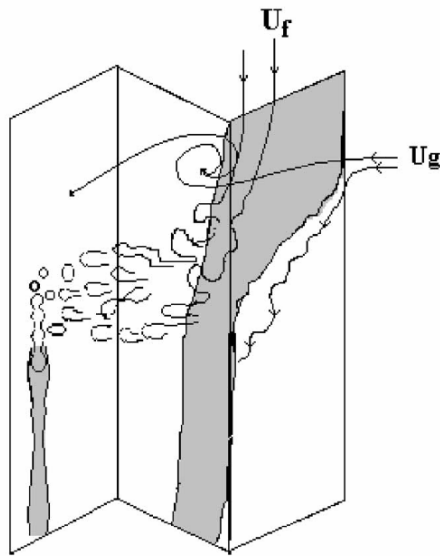
เมื่อ  $\lambda$  เป็นค่าเฉลี่ยโมเลกุลของเส้นทางอิสระ (Molecular mean free path)

## 2.5 ลักษณะการไหลภายในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น

การไหลภายในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่นนั้น อาศัยหลักการทำให้ของไหลเกิดการไหลแบบสลับไปมา (Zig-Zag) ในชุดอุปกรณ์อนุภาคของเหลวที่หนักกว่าของส่วนผสมซึ่งมีแรงเฉื่อยสูงไม่สามารถไหลตามอนุภาคของก๊าซที่เบากว่าได้เกิดการชนปะทะกับผนังแผ่นคลื่น แล้วจึงเกิดการรวมตัวและยึดเกาะกันจนเป็นฟิล์มของเหลวบางๆ ไหลตามแรงโน้มถ่วงลงสู่ส่วนกักเก็บด้านล่าง (James. 2005) ซึ่งในบริเวณแผ่นคลื่นที่เกิดการรวมตัวของละอองของเหลวจำเป็นต้องออกแบบช่องระบายให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยคำนึงถึงความดันลด และอัตราความเร็วของการไหลในบริเวณมุมหักหรือครีบริบาย

## 2.6 ทฤษฎีของเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น

เนื่องจากเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่นที่จะทำการศึกษิตตามสภาวะการใช้งานจริง ชุดอุปกรณ์จะถูกติดตั้งอยู่กับภาชนะถึงความดันของระบบท่อ ดังนั้นในการจำลองการไหลเพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานในการแยกละอองของเหลวออกจากก๊าซนั้น ทฤษฎีการไหลของก๊าซภายในท่อจึงถูกใช้อ้างอิงสำหรับกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ในการออกแบบเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น



ภาพประกอบ 3 ส่วนประกอบของความเร็วที่เกิดขึ้นในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น

ในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่นจะมีแรงหลัก 3 แรงที่กระทำกับอนุภาค คือ แรงเนื่องจากความโน้มถ่วง ( $F_g$ ) แรงหนีศูนย์กลาง ( $F_r$ ) และแรงฉุดลาก ( $F_D$ ) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาค อย่างไรก็ตามแรงหลักที่แยกละอองของเหลวออกจากก๊าซก็คือ แรงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากการไหลวนของก๊าซ และละอองของเหลวภายในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่นนั่นเอง ถ้าพิจารณาอนุภาคทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d_p$  หมุนที่รัศมี  $r$  และสมมติว่าอนุภาคที่เคลื่อนที่มีความเร็วในแนวสัมผัส ( $u_t$ ) ดังนั้นแรงหนีศูนย์กลางที่กระทำต่ออนุภาคของเหลว คือ

$$F_r = \frac{mu_{t,p}^2}{r} \quad (2.34)$$

เมื่อ  $F_r$  คือ แรงหนีศูนย์กลางของอนุภาคของเหลว  $m$  คือ มวลของอนุภาคของเหลว  $u_{t,p}$  คือ ความเร็วในแนวสัมผัสของหยดของเหลวและ  $r$  คือ รัศมีของการหมุนวนของหยดของเหลว การประมาณค่าประสิทธิภาพการแยกสามารถหาได้จากสมการ (2.35) (Jianzhi Zhoa. 2005) โดยสมมติให้  $n$  คือชนิดของหยดของเหลวที่ขนาดแตกต่างกัน และจำนวนหยดของเหลวทั้งหมดแทนด้วย  $x_i$  จำนวนหยดของเหลวที่เก็บกักได้แทนด้วย  $y_i$  ดังนั้นประสิทธิภาพรวมของการทำงาน คือ

$$\eta = \sum_i^n (m_i \cdot \eta_{di}) / \sum_{i=1}^n m_i \quad (2.35)$$

เมื่อ  $\eta$  คือ ประสิทธิภาพรวมของการแยก  $m_i$  คือ น้ำหนักรวมทั้งหมดของอนุภาคของเหลว และ  $\eta_{d_i}$  คือ ประสิทธิภาพการแยกของหยดของเหลว 1 ชนิด ดังนั้นในกรณีที่ของเหลวมีเพียงชนิดเดียว ประสิทธิภาพการแยกจึงสามารถหาได้จาก

$$\eta_{d_i} = y_i / x_i \quad (2.36)$$

สำหรับวิธีการหาค่าความดันลดของเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่นสามารถหาได้จากสมการ (2.37) (Jianzhi Zhoa. 2005) คือ

$$\Delta p = \xi \rho_g u^2 / 2 \quad (2.37)$$

เมื่อ  $\xi$  คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทาน  $\rho_g$  คือ ความหนาแน่นของก๊าซและ  $u$  คือ ความเร็ว

## 2.7 ทฤษฎีการไหลในท่อของก๊าซ

ตามหลักการของกฎอนุรักษ์พลังงานสมการเบอร์นูลลีสามารถประยุกต์ใช้สำหรับคำนวณหาคุณสมบัติการไหลของก๊าซภายในเส้นท่อได้ดังนี้

**สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli equation in gas flow)**

$$\frac{p_1}{\rho} = \frac{u_1^2}{2g} + Z_1 + h_p - h_f = \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2g} + Z_2 \quad (2.38)$$

$p_1$	คือ ความดันที่จุดเริ่มต้น
$p_2$	คือ ความดันที่จุดสิ้นสุด
$\rho$	คือ ความหนาแน่นของก๊าซ
$\frac{u^2}{2g}$	คือ เหนดของความเร็ว (Velocity head)
$Z$	คือ เหนดของระดับความสูง (Elevation head)
$h_p$	คือ เหนดที่เกิดจากเครื่องอัดก๊าซ
$h_f$	คือ เหนดที่เกิดจากแรงเสียดทาน

การสูญเสียความดันภายในเส้นท่อตามสมการ AGA (American Gas Association) หาได้จาก

$$Q = 38.77 \left( \frac{T_b}{P_b} \right) E \sqrt{\frac{1}{f_f} \left[ \frac{P_1^2 - P_2^2}{S L_m T_{avg} Z_{avg}} \right]^{0.5}} D^{2.5} \quad (2.39)$$

$Q$	คือ อัตราการไหลของก๊าซ
$T_b$	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของก๊าซ
$P_b$	คือ ความดันสัมบูรณ์ของก๊าซ
$E$	คือ เฟคเตอร์ประสิทธิภาพ
$f$	คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของท่อ moody = $f(\text{Re}, \frac{\epsilon}{D}) = 4f_f$
$f_f$	คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ fanning
$S$	คือ ความถ่วงจำเพาะของก๊าซ
$L_m$	คือ ความยาวท่อส่ง
$T_{avg}$	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซ $T_{avg} = (T_1 + T_2)/2$
$Z_{avg}$	คือ ค่าการอัดตัวเฉลี่ยของก๊าซ
$D$	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ
$\text{Re}$	คือ ค่าตัวเลขเรโนลด์ (Reynolds number)
$u$	คือ ความเร็วเชิงเส้นเฉลี่ยในท่อ
$\nu$	คือ ค่าความหนืดจลน์ของของไหลในท่อ
$\mu$	คือ ความหนืดของของไหลในท่อ
$\epsilon$	คือ ขนาดความขรุขระของผิวท่อ
$\frac{\epsilon}{D}$	คือ ความขรุขระสัมพัทธ์

อัตราการไหลภายใต้ความดันและอุณหภูมิจริง (Actual flow) คือ

$$Q_a = Q \frac{p_b T_a}{p_a T_b} \quad (2.40)$$

เมื่อ  $Q_a$  คือ อัตราการไหลจริง (Actual flow)  $T_a$  คือ อุณหภูมิจริง (Actual temperature) และ  $p_a$  คือ ความดันจริง (Actual pressure)

จากสมการ (2.38) ความเร็วการไหลของก๊าซภายในเส้นท่อสามารถหาได้จาก

$$u = \frac{4Q_a}{\pi D^2} \quad (2.41)$$

ค่าตัวเลขของเรโนลด์ (Reynolds number) ของการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนคือ

$$\text{Re} = \frac{uD}{\nu} = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (2.42)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการไหลสามารถหาได้ 2 วิธี คือ เปิดจาก Moody diagram และคำนวณจากสมการดังนี้

สำหรับการไหลแบบราบเรียบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหาได้จากสมการ (2.43) คือ

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (2.43)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานคือ

$$\text{Fully turbulent flow (rough pipes)} \quad \sqrt{1/f_f} = 4 \log \left( \frac{3.7D}{\varepsilon} \right) \quad (2.44)$$

$$\text{Partially turbulent flow (smooth pipes)} \quad \sqrt{1/f_f} = 4 \log \frac{\text{Re}}{\sqrt{1/f_f}} - 0.6 \quad (2.45)$$

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แอซโซปาดิ และซานออลาห์ (Azzopardi; & Sanallah. 2002) ได้ทำการทดลองวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวและการตกตะกอนของฟิล์มของเหลวในช่องทางไหลของเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น แบบไม่มีคريب ซึ่งทดลองกับของเหลว 2 ชนิดที่มีค่าความหนืดต่างกัน คือ น้ำกับสารละลายกลีเซอรอล (Glycerol solution) โดยทำการเติมของเหลวที่บริเวณผิวข้างด้านต้นทางของอุปกรณ์ แล้วกำหนดให้อากาศไหลเข้าที่ความเร็วต่างกันเพื่อสังเกตพฤติกรรมในช่องทางไหล จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มของเหลวไม่แตกกระจายในช่วงความเร็วก๊าซ 2 ถึง 4 m/s โดยเมื่อเพิ่มความเร็ว 5.6 m/s พบว่าฟิล์มของเหลวเกิดการกระจายตัวจากแผ่นคลื่นแรกและแตกตัวกระจายแล้วเกิดการจับตัวกันอีกครั้งในช่วงแผ่นถัดไป

เจินซีเห่า และคนอื่น ๆ (Jianzhi Zhao; et al. 2005) ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบ Discrete phase method ในการทำนายผลการแยกของเหลวออกจากก๊าซในช่องทางไหลแบบ Two Stage Wave-plate flow ในการศึกษานี้ได้ใช้พื้นฐานรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน Standard  $k - \epsilon$  ทำนายผล ซึ่งกำหนดให้ขนาดอนุภาคของเหลวที่เติมเข้าในระบบมีขนาดระหว่าง 10 ถึง 40  $\mu m$  ผลการทำนายเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการแยกและความดันลดระหว่างทางเข้าและทางออกแล้วปรากฏว่าชุดอุปกรณ์ที่มีความกว้างรูปคลื่น 1 ถึง 1.2 เมตร, Vane ยาว 0.18 ถึง 0.21 เมตร และขนาดช่องทางไหลระหว่าง wave-plate 0.025 ถึง 0.035 มีความที่เหมาะสมที่สุด

เจมส์ และคนอื่น ๆ (James; et al. 2005) ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการทำนายผลการเคลื่อนตัวและการตกตะกอนของฟิล์มของเหลวในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น โดย James กล่าวว่า Wave-plate mist eliminator อาศัยหลักการทำให้หยดของเหลวเกิดการชนกับผนังเกิดการรวมตัวก่อให้เกิดฟิล์มบางๆ แล้วไหลลงสู่ด้านล่างตามแรงโน้มถ่วง แต่ผลกระทบจากการไหลของก๊าซยังทำให้การตกตะกอนของฟิล์มของเหลวมีขอบเขตและประสิทธิภาพเปลี่ยนไป ดังนั้นในงานวิจัยจึงได้จำลองรูปแบบการไหลโดยกำหนดให้มีของเหลวไหลเข้าบริเวณด้านข้างผนังแล้วทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของการไหลและการกระจายตัวในรูปแบบของการแพร่ และลักษณะการไหลของฟิล์มของเหลว

เจมส์ และคนอื่น ๆ (James; et al. 2003) ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการทำนายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น ให้สมบูรณ์ขึ้น โดยทำการศึกษาอิทธิพลของช่องระบายของเหลว (Drainage Channels) ในช่องทางไหล ผลสรุปพบว่าการออกแบบช่องระบายที่เหมาะสมโดยพิจารณาถึง ความเร็วของก๊าซ, ขนาดความกว้างของผนังรูปคลื่น (Wave-plate Spacing), ขนาดช่องระบาย รวมถึงปริมาณและขนาดอนุภาคของเหลวที่ถูกส่งเข้ามา จะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแยกของเหลวออกจากก๊าซได้

ไยวาง และเจมส์ (Yi Wang; & James. 1998) ศึกษาและรวบรวมผลการคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ของการไหลแบบปั่นป่วนในช่องทางไหล และการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Droplet motion) เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ผ่านมา ซึ่งผลการศึกษาพบว่าวิธีการคำนวณโดยใช้รูปแบบ Low Reynolds number  $k - \epsilon$  Turbulence ให้ผลสอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด และพบว่าผลเปรียบเทียบที่แย้งกันระหว่างการทดลองกับใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขคือระเบียบวิธีเชิงตัวเลขให้ประสิทธิภาพการแยกดีกว่า ซึ่งอาจเป็นเพราะในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขไม่ได้รวมเอาความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นของการเคลื่อนตัวของอนุภาคของเหลว (Droplet motion) และพบว่าผลกระทบและรวมตัวของอนุภาคของเหลวร้อยละ 70 จะเกิดขึ้นที่มุมหักแรก และมุมหักที่สองเมื่อกำหนดให้ความเร็วไหลเข้าของก๊าซอยู่ระหว่าง 2 และ 5 m/s

ไยวาง และเจมส์ (Yi Wang; & James. 1999) ศึกษาเกี่ยวกับการตกตะกอนของหยดของเหลวในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น โดยใช้วิธี Eulerian Lagrangian Method ประกอบกับการทำนายผลด้วยซอฟต์แวร์ CFD Package “CFX” และศึกษาผลกระทบของการไหลแบบปั่นป่วนบนความสัมพันธ์ของ Droplet Motion ซึ่งอธิบายและทำการเปรียบเทียบผลการศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขกับผลการทดลองในรูปแบบ Eddy interaction model (EIM) โดยผลการคำนวณบนพื้นฐานของ Eddy interaction model (EIM) ให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลองเว้นแต่ขนาดอนุภาคของเหลวที่เล็กมากๆ ที่ไม่สามารถแสดงผลได้

จากการสำรวจเอกสารที่ได้กล่าวมานั้นจะเห็นได้ว่าส่วนใหญ่เป็นการศึกษาเชิงทฤษฎีที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จะรวบรวมเอาทฤษฎี และผลการวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้นมาทำการศึกษาออกแบบหาขนาด และรูปแบบของเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น (wave-plate mist eliminator) ที่เหมาะสมในสภาวะการใช้งานจริง โดยคำนึงถึงความดันสูญเสีย และประสิทธิภาพการทำงานควบคู่กัน

## บทที่ 3

### ระเบียบวิธีการวิจัย

#### 3.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method) กับสมการพื้นฐานของการไหลจากหัวข้อที่ผ่านมา โดยจะทำการศึกษาขั้นตอนต่างๆ ของระเบียบวิธีนี้ซึ่งประกอบด้วยการดิสครีไทซ์ (Discretisation) ของสมการการประมาณค่าสเกลลาร์ ( $\phi$ ) ที่บริเวณผิวของปริมาตรควบคุมด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่แตกต่างกัน รวมถึงเงื่อนไขขอบและกระบวนการที่ใช้ในการหาคำตอบ

#### 3.2 สมการควบคุมพื้นฐาน (Governing Equations)

สำหรับการใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมในการแก้ปัญหาคาร์ไหลสามารถทำได้โดยจัดรูปสมการพื้นฐานของการไหลให้อยู่ในรูปของสมการควบคุมพื้นฐานรูปทั่วไปของตัวแปร  $\phi$  ซึ่งแสดงได้ดังต่อไปนี้

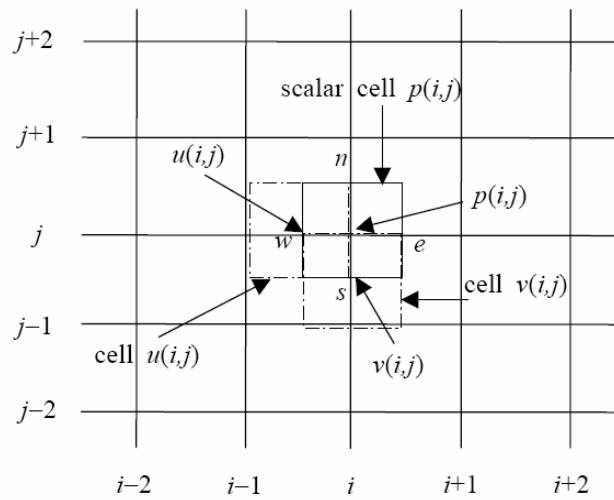
$$\underbrace{\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y}}_{\text{ConvectionTerm}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)}_{\text{DiffusionTerm}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{SourceTerm}} \quad (3.1)$$

โดยที่  $\Gamma_\phi$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient)

รายละเอียดของแต่ละสมการสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนถูกแสดงในตารางที่ 3.1 ในการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธี Finite volume นั้น เริ่มด้วยการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (สมการ 3.1) ตลอดทั้งปริมาตรควบคุม แล้วดิสครีไทซ์ (Discretize) ลงบนจุดต่อต่างๆ บนปริมาตรควบคุมดังแสดงในภาพประกอบ 4 ซึ่งแสดงภาพของปริมาตรควบคุมแบบ Staggered grid เพื่อเปลี่ยนรูปของสมการพื้นฐานจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยไปเป็นสมการพีชคณิต ซึ่งจะได้

$$\int_{\Delta V} \left[ \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} \right] dV = \int_{\Delta V} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi \right] dV \quad (3.2)$$

โดยสมการนี้ก็คือสมการพื้นฐานในรูปทั่วไปที่เขียนอยู่ในรูปของอินทิกรัลนั่นเองสำหรับ Staggered grid นี้ เป็นการแบ่งกริดเพื่อให้กริดของความเร็วยุ่ระหว่างจุดต่อของตัวแปรสเกลาร์ ทั้งนี้ เพื่อให้สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) และแก้ปัญหาการเกิด Checker-board effect (Patankar, 1980) อันจะก่อให้เกิดความผิดพลาดในการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งการวางกริด ของความดัน  $p$  และความเร็ว  $u$  และ  $v$  ถูกแสดงในภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 ปริมาตรควบคุมของความดันและความเร็วในระบบ Staggered grid

ตาราง 2 รูปสมการ Transport ของการไหลแบบปั่นป่วนเปรียบเทียบกับสมการพื้นฐานในรูปทั่วไป

Transport Equation	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
Continuity	1	0	0
x-Momentum	$\bar{u}$	$\mu_e$	$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)$
y-Momentum	$\bar{v}$	$\mu_e$	$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)$
Turbulent kinetic energy	$k$	$\frac{\mu_e}{\sigma_k}$	$P - \rho \varepsilon$
Dissipation rate	$\varepsilon$	$\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon}$	$(C_{\varepsilon 1} P) \frac{\varepsilon}{k} - (C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k}$

โดยที่  $\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92, \mu_e = \mu_t + \mu$

$$\text{และ } P = \mu_t \left[ 2 \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (3.3)$$

เนื่องจากในการคำนวณหาค่า  $u$  และ  $v$  จากสมการโมเมนตัมนั้น ค่าที่คำนวณได้อาจจะไม่สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง ในการแก้ไขข้อผิดพลาดนี้สามารถทำได้โดยใช้ขั้นตอนวิธีที่เรียกว่า SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) ซึ่งถูกพัฒนาโดย Patankar and Spalding (1972) ช่วยในการจัดลำดับและวางความต่อเนื่องของการแก้สมการเพื่อให้  $u, v$  และ  $p$  ที่คำนวณได้นั้นสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง

### 3.3 การดิสครีไทซ์สมการ

สมการ Transport ซึ่งแสดงโดยสมการ (3.1) นั้นประกอบด้วยเทอมต่างๆ คือ Convection Term, Diffusion Term และ Source Term ซึ่งแต่ละเทอมสามารถทำการดิสครีไทซ์ได้ดังนี้

#### 3.3.1 เทอมการพา (Convection Term)

การดิสครีไทซ์เทอมของการพา (Convection Term) สามารถทำได้โดยการอินทิเกรตตลอดทั้งปริมาตรควบคุมของตัวแปร  $\phi$  ซึ่งจะได้

$$\int_V \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) \right] dV \quad (3.4)$$

แยกอินทิเกรตที่ละเทอมโดยกำหนด  $A_e = A_w = 1 \times \Delta y$  และ  $A_n = A_s = \Delta x \times 1$  จะได้เทอมของการพาในสองแนวแกน คือ

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) dV = (\rho u A)_e \phi_e - (\rho u A)_w \phi_w = F_e \phi_e - F_w \phi_w \quad (3.5a)$$

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) dV = (\rho v A)_n \phi_n - (\rho v A)_s \phi_s = F_n \phi_n - F_s \phi_s \quad (3.5b)$$

โดยที่  $F = \rho u A =$  Convective mass flux และ  $\phi_e, \phi_w, \phi_n$  และ  $\phi_s$  เป็นค่าของ  $\phi$  ที่ผนังเซลล์ซึ่งหาได้โดยการประมาณค่าที่เหมาะสม (Interpolation)

### 3.3.2 เทอมการแพร่ (Diffusion Term)

การดิฟฟิวชันเทอมของการแพร่กระจาย (Diffusion Term) จะใช้วิธีเดียวกันกับการดิฟฟิวชันเทอมของการพา ซึ่งสำหรับตัวแปร  $\phi$  จะได้

$$\int_{\Delta V} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right] dV \quad (3.6)$$

แยกอินทิเกรตทีละเทอมเช่นเดียวกับเทอมของการพาซึ่งจะได้เทอมของการแพร่กระจายในสองแนวแกน คือ

$$\int_{\Delta V} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right] dV = \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_e - \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_w = D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_w) \quad (3.7a)$$

$$\int_{\Delta V} \left[ \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right] dV = \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} A \right)_n - \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} A \right)_s = D_n (\phi_N - \phi_P) - D_s (\phi_P - \phi_s) \quad (3.7b)$$

โดยที่  $D = \frac{\Gamma A}{\delta} = \text{Diffusion Conductance}$

### 3.3.3 Source Term

Source Term ( $S_\phi$ ) สามารถแยกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นค่าคงที่ ( $S_C$ ) กับส่วนที่เป็นสัมประสิทธิ์ของ  $\phi_P$  ( $S_P$ )

$$S_\phi = S_C + S_P \phi_P \quad (3.8)$$

ทำการอินทิเกรต Source Term ลงบนปริมาตรควบคุมจะได้เป็น

$$\int_V S_\phi dV = S_\phi V = S_C V + S_P V \phi_P \quad (3.9)$$

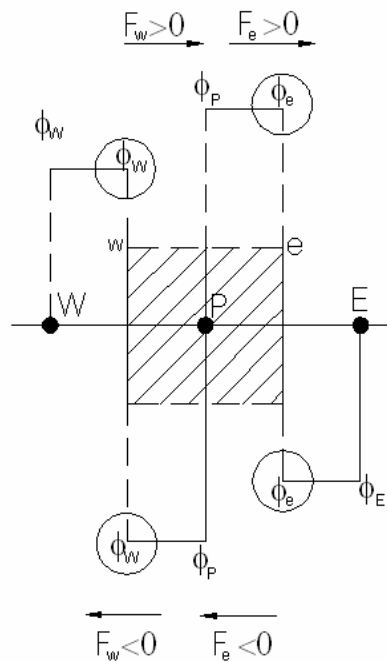
เมื่อ  $V$  คือ ปริมาตร

### 3.4 การประมาณค่าของอินทิกรัลพื้นผิว

ในการประมาณค่าของ  $\phi$  บนผิวปริมาตรควบคุมในเทอมการพาที่อยู่ในสมการ (3.5) สามารถหาได้จากการประมาณค่าด้วยระเบียบแบบต่าง ๆ เช่น ระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่หนึ่ง วิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง และระเบียบวิธีผลต่างแบบคิก โดยรายละเอียดของวิธีต่างๆ มีดังนี้

#### 3.4.1 ระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง

สำหรับการประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่งนั้น ค่าที่ต้องการหาคือค่า  $\phi$  ในกรณี  $F_e$  เป็นบวก ค่าของ  $\phi_e$  จะถูกกำหนดให้เท่ากับค่า  $\phi_p$  สังเกตว่าจะให้เท่ากับค่าที่อยู่ทางด้านปลายลูกศร กรณี  $F_e$  เป็นค่าลบ ค่า  $\phi_e$  จะถูกกำหนดให้เท่ากับ  $\phi_E$  ดังแสดงในภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง

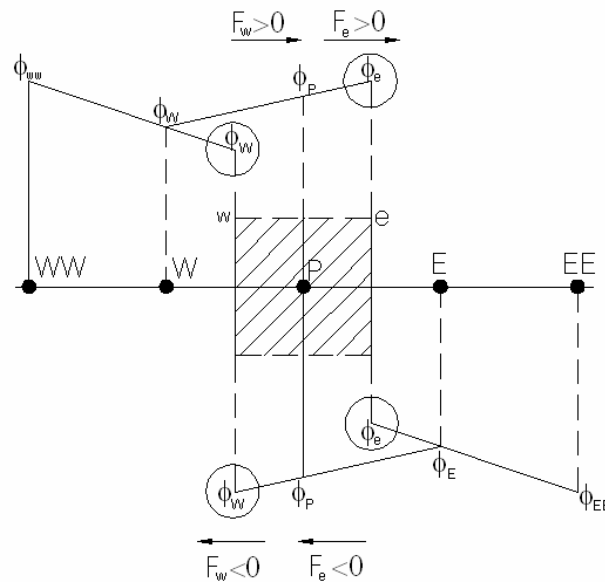
$$\begin{aligned} \phi_e = \phi_p & : F_e > 0, & \phi_e = \phi_E & : F_e < 0, \\ \phi_w = \phi_w & : F_w > 0, & \phi_w = \phi_P & : F_w < 0, \end{aligned}$$

ดังนั้นสมการเขียนได้ดังนี้

$$F_e \phi_e = \phi_p [F_e] + \phi_e [-F_e] \tag{3.10}$$

### 3.4.2 ระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับสอง

ค่า  $\phi$  จะประมาณค่าภายในพื้นที่ผิวของปริมาตรโดยใช้ตำแหน่งกริดข้างเคียงที่อยู่ปลายลูกศร 2 กริด (downstream) ดังแสดงในภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับสอง

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

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

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

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

ดังนั้นสมการเขียนได้ดังนี้

$$F_e \phi_e = \left( \frac{2}{3}\phi_p - \frac{1}{2}\phi_w \right) [F_e] - \left( \frac{2}{3}\phi_E - \frac{1}{2}\phi_{EE} \right) [-F_e] \quad (3.11)$$



ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\phi$  ของปริมาตรหนึ่งๆ กับตัวแปร  $\phi_{nb}$  ของปริมาตรข้างเคียงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเชิงเส้นได้ดังนี้

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (3.13)$$

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

การหาผลเฉลยโดยวิธีการแยกพิจารณา (Segregate method) เป็นการแยกส่วนในการคำนวณระหว่างสมการโมเมนต์และสมการความต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามค่าต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณต้องสอดคล้องกัน สมการที่ (3.13) เป็นสมการโมเมนต์ที่ดีสคริตแล้วในแนวแกน  $x$  โดยได้พิจารณาผลของแรงที่เกิดจากความดัน ( $pA_f$ ) และกำหนดให้  $\phi = u$

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + \sum pA_f + B \quad (3.14)$$

โดยที่  $A_f$  แทนพื้นที่ผิวที่พิจารณา  $B$  แทนแหล่งกำเนิดอื่นๆ ที่ปราศจากการกระจายความดันสำหรับโมเมนต์ในแนวแกน  $y$  และแนวแกน  $z$  ก็มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ส่วนสมการความต่อเนื่องที่ดีสคริตแล้วแสดงได้ดังนี้

$$\sum_f^{N_{faces}} \rho u_n A_f = 0 \quad (3.15)$$

โดยที่  $N_{face}$  เป็นจำนวนผนังล้อมรอบปริมาตร  $u_n$  คือความเร็วที่ผนังปริมาตร

### 3.5 กระบวนการหาคำตอบ (Solution algorithm)

การหาคำตอบแบบ SIMPLE (Semi-implicit method for pressure-linked equation) algorithm (Patankar. 1980) เป็นวิธีที่ใช้ในการคำนวณความเร็ว และความดัน เพื่อให้ค่า  $u$  และ  $v$  ที่คำนวณได้จากสมการโมเมนต์นั้นสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง โดยใช้สมการ Pressure-Correction ช่วยในการคำนวณ

### สมการ Pressure-Correction

จากสมการอนุรักษ์โมเมนตัมในแนวแกน  $x$  และ  $y$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vu) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial v}{\partial x}\right) \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vv) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial v}{\partial y}\right) \quad (3.17)$$

ทำการอินทิเกรตสมการ (3.16) และ (3.17) ตลอดปริมาตรควบคุมในภาพประกอบ 4 จะได้สมการดิสครีไทซ์ (Discretised equation) ดังต่อไปนี้

$$\text{ในแกน } x \quad a_p u_p = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + S_u V + (p_{i-1,j} - p_{i,j}) A \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} &\text{ในแกน } y \\ a_p u_p &= \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + S_v V + (p_{i,j-1} - p_{i,j}) A \end{aligned} \quad (3.19)$$

โดย

$$\sum_{nb} a_{nb} u_{nb} = a_N u_N + a_S u_S + a_E u_E + a_W u_W \quad (3.20)$$

$$\sum_{nb} a_{nb} v_{nb} = a_N v_N + a_S v_S + a_E v_E + a_W v_W \quad (3.21)$$

จากนั้นทำการจัดรูปสมการอนุรักษ์มวลให้อยู่ในรูปของสมการผลต่างความดัน เพื่อใช้แก้ไขค่าความดัน และความเร็วในสนามการไหล โดยเริ่มจากการกำหนดค่าต่อไปนี้

$$p = p^* + p' \quad (3.22a)$$

$$u = u^* + u' \quad (3.22b)$$

$$v = v^* + v' \quad (3.22c)$$

โดย  $p, u$  และ  $v$  คือ ความดันและความเร็วที่ถูกต้อง

$p^*, u^*$  และ  $v^*$  คือ ความดันที่กำหนดขึ้น (Guessed pressure) และค่าความเร็วที่คำนวณ

จาก  $p^*$

$p', u'$  และ  $v'$  คือ ค่าแก้ไขความดัน (Pressure correction) และค่าแก้ไขความเร็ว (Velocity correction) และความเร็ว  $u^*$  และ  $v^*$  สามารถคำนวณได้จากสมการโมเมนต์ที่มีลักษณะเช่นเดียวกับสมการ (3.18) และ (3.19) ซึ่งจะได้สมการดิสครีไทซ์ของความเร็วทั้งสองเป็น

$$a_w u_w^* = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb}^* + S_u V + (p_w^* - p_p^*) A_w \quad (3.23)$$

$$a_s v_s^* = \sum_{nb} a_{nb} v_{nb}^* + S_v V + (p_s^* - p_p^*) A_s \quad (3.24)$$

นำสมการ (3.22) แทนในสมการ (3.18) และ (3.19) แล้วลบด้วยสมการ (3.23) และ (3.24) ตามลำดับได้เป็น

$$a_w u_w' = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb}' + (p_w' - p_p') A_w \quad (3.25)$$

$$a_s v_s' = \sum_{nb} a_{nb} v_{nb}' + (p_s' - p_p') A_s \quad (3.26)$$

โดยที่กำหนดให้  $\sum_{nb} a_{nb} u_{nb}'$  และ  $\sum_{nb} a_{nb} v_{nb}'$  มีค่าเป็นศูนย์ เพื่อความง่ายของการหาคำตอบ (Patankar, 1980) เมื่อการไหลสอดคล้องกับสมการอนุรักษ์มวล จะได้สมการของค่าแก้ไขความเร็ว (Velocity-correction equation) ของ  $u_w$  เป็น

$$a_w u_w' = (p_w' - p_p') A_w \quad \text{หรือ} \quad u_w' = d_w (p_w' - p_p') \quad (3.27)$$

เมื่อ 
$$d_w = \frac{A_w}{a_w}$$

ดังนั้น 
$$u_w = u_w^* + d_w (p_w' - p_p') \quad (3.28)$$

โดยพิจารณาแบบเดียวกันสำหรับ  $u_e$  จะได้

$$u_e = u_e^* + d_e (p_e' - p_p') \quad (3.29)$$

และสำหรับสมการความเร็วแก้ไขของ  $v_s$

$$a_s v'_s = (p'_s - p'_p) A_s \quad \text{หรือ} \quad v'_s = d_s (p'_s - p'_p) \quad (3.30)$$

โดย 
$$d_s = \frac{A_s}{a_s}$$

$$v_s = v_s^* + d_s (p'_s - p'_p) \quad (3.31)$$

และจะได้ 
$$v_n = v_n^* + d_s (p'_N - p'_p) \quad (3.32)$$

จากสมการอนุรักษ์มวลที่เขียนในรูปสมการเชิงอนุพันธ์

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (3.33)$$

อินทิเกรตตลอดปริมาตรควบคุมดังรูปที่ 3.2 ได้เป็น

$$\int_{\Delta V} \left[ \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \right] dV = 0 \quad (3.34)$$

$$(\rho u A)_e - (\rho u A)_w + (\rho v A)_n - (\rho v A)_s = 0 \quad (3.35)$$

เพราะฉะนั้น เมื่อแทนค่าความเร็วจากสมการ (3.28), (3.29), (3.31) และ (3.32) จะได้สมการของความดันแก้ไข (Pressure-correction equation) ดังต่อไปนี้

$$a_p p'_p = a_N p'_N + a_s p'_s + a_E p'_E + a_W p'_W + b \quad (3.36)$$

เมื่อ

$$a_N = \rho d_n A_n$$

$$a_s = \rho d_s A_s$$

$$a_E = \rho d_e A_e$$

$$a_W = \rho d_w A_w$$

$$b = (\rho u^* A)_e - (\rho u^* A)_w + (\rho v^* A)_n - (\rho v^* A)_s \quad (3.37)$$

ขั้นตอนของกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. เริ่มต้นสมมติค่าของ  $u^*$ ,  $v^*$ ,  $\phi^*$  และ  $p^*$
2. คำนวณค่า  $u^*$ ,  $v^*$  จากสมการ (3.23) และ (3.24)
3. นำค่า  $u^*$ ,  $v^*$  ที่คำนวณได้มาแทนค่าในสมการ (3.36)
4. คำนวณค่า  $p'$  จากสมการที่ (3.36) แล้วนำมาแทนค่าในสมการ (3.22a) จากนั้นจึง นำค่า  $p$  ที่คำนวณได้มากำหนดให้เป็น  $p^*$  ค่าใหม่
5. คำนวณค่า  $u, v$  จากสมการ (3.28), (3.29), (3.31) และ (3.32) โดยใช้ค่า  $p^*$  จากขั้นตอนที่ 4 จากนั้นจึงกำหนดค่า  $u, v$  ที่ได้เป็น  $u^*, v^*$  ค่าใหม่
6. นำค่า  $u, v$  ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 5 มาหาค่าตัวแปร  $\phi$  เช่น  $k$  และ  $\varepsilon$  จากนั้นจึงกำหนดค่า  $\phi$  ที่ได้เป็น  $\phi^*$  ค่าใหม่
7. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ถึง 6 จนกระทั่ง  $u^*, v^*, \phi^*$  และ  $p^*$  มีค่าเข้าสู่ค่าที่ถูกต้อง โดยตรวจสอบจากการเข้าใกล้ศูนย์ของเทอม  $b$  (Mass source term) ในสมการที่ (3.36) ซึ่งแสดงว่าค่า  $u^*, v^*, \phi^*$  และ  $p^*$  ที่คำนวณได้สอดคล้องกับสมการอนุรักษ์มวลขั้นตอนที่กล่าวมาทั้งหมดนี้สามารถแสดงเป็น Flow chart ได้ดังภาพประกอบ 13

### 3.6 เงื่อนไขขอบ (Boundary conditions)

ในการแก้ปัญหาคำนวณไหลด้วยระเบียบวิธี Finite Difference นั้นเงื่อนไขขอบก็เป็นสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญ เนื่องจากเงื่อนไขขอบนี้จะเป็นตัวกำหนดลักษณะเฉพาะของแต่ละปัญหา ซึ่งเงื่อนไขขอบที่ใช้สำหรับการจำลองการไหลในงานวิจัยนี้คือ เงื่อนไขขอบที่ทางเข้า (Inlet boundary condition) เงื่อนไขขอบที่ทางออก (Outlet boundary condition) และเงื่อนไขขอบที่ผนัง (Wall boundary condition) เป็นต้น

#### 3.6.1 เงื่อนไขขอบที่ทางเข้า (Inlet boundary condition)

ลักษณะของก๊าซที่ไหลเข้าเครื่องแยกละเอียดแบบแผ่เคลื่อนนั้น กำหนดเป็นความเร็วเฉลี่ยและค่าความเข้มของการปั่นป่วน (turbulence intensity,  $I$ ) ซึ่งจากค่าความเข้มของการปั่นป่วน สามารถคำนวณหาค่า  $k$  และ  $\varepsilon$  ได้จากสมการ

$$k = \frac{3}{2}(\overline{uI})^2 \quad (4.38)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\ell} \quad (4.39)$$

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

### 3.6.2 เงื่อนไขขอบที่ผนัง (Wall boundary condition)

1) เงื่อนไขที่บริเวณผนังสำหรับก๊าซ กำหนดให้ความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ (no slip condition) และบริเวณใกล้ๆ ผนังกำหนดให้ใช้ฟังก์ชันผนังมาตรฐาน (standard wall function) โดยกำหนดให้ค่าความเฉลี่ย สมการฟังก์ชันผนังมาตรฐานได้เป็น

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad (4.40)$$

โดยที่

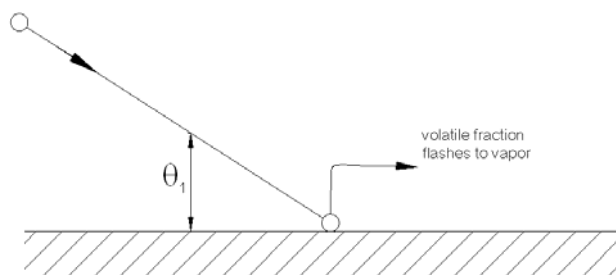
$$u^+ \equiv \frac{\overline{u_p} C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{\tau_w / \rho} \quad (4.41)$$

$$y^+ \equiv \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} y_p}{\mu} \quad (4.42)$$

โดยที่  $\kappa$  คือค่าคงที่ของวอนคาร์มันน์ (Von Karman constant) มีค่าเท่ากับ 0.42 ส่วน  $E$  คือค่าคงที่จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 9.81  $\overline{u_p}$  คือค่าความเร็วเฉลี่ยที่จุด  $P$   $k_p$  คือค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนที่จุด  $P$   $y_p$  คือระยะทางจากจุด  $P$  กับผนังและ  $\mu$  คือค่าความหนืดของของไหล โดยทั่วไปแล้ว เมื่อ  $y^+ > 11.25$  ค่าความเร็วเฉลี่ยที่ได้จะเป็นไปตามสมการ (4.38) แต่ที่  $y^+ < 11.25$  ค่าของความเร็วเฉลี่ยจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดแบบราบเรียบ (laminar stress-strain relationship) ดังนี้

$$u^+ = y^+ \quad (4.43)$$

2) เงื่อนไขขอบที่ผนังสำหรับอนุภาคของเหลว ของการจำลองการไหลที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันในการไหลของหลายเฟส (Discrete phase method) กำหนดให้เป็นแบบ trap อนุภาคของเหลวจะสิ้นสุดตามการคำนวณวิถีการไหล trajectory โดยอนุภาคของเหลวที่ตกกระทบจะถูกเก็บบันทึกเพื่อแสดงจำนวนอนุภาคที่ตกกระทบที่ผนังของชุดอุปกรณ์



ภาพประกอบ 8 แสดงเงื่อนไขขอบแบบ trap ของการจำลองการไหลที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

### 3.6.3 เงื่อนไขขอบที่ทางออก (Outlet boundary condition)

สำหรับเงื่อนไขขอบที่ทางออกกำหนดเป็นแบบ outflow ซึ่งให้ค่าฟลักซ์ของการแพร่มีค่าเท่ากับศูนย์ โดยไม่คิดผลจากความดันที่ทางออกย้อนกลับ (back pressure) และการไหลอยู่ในช่วงพัฒนาเต็มที่แล้ว (fully developed)

## 3.7 กรณีศึกษาสำหรับงานวิจัย

### 3.7.1 เงื่อนไขการจำลองการไหล

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard  $k-\epsilon$  มาทำการจำลองการไหลเพื่อคำนวณออกแบบเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 15,000 ถึง 670,000 และเป็นารจำลองการไหลของของไหล 2 สถานะ แบบ Discrete phase คือมีส่วนผสมของของเหลวเบาบางไม่เกินร้อยละ 10 โดยมีเงื่อนไขการจำลองการไหลดังตาราง 3 และ ตาราง 4 และกำหนดให้ละอองของเหลวมีการกระจายตัวแบบ Rosin-rammler 2 รูปแบบ ดังนี้

- 1) ขนาดละอองเล็กสุด  $5 \mu m$  ขนาดใหญ่สุด  $40 \mu m$  และมีขนาดเฉลี่ย  $25 \mu m$  (5-25-40)
- 2) ขนาดละอองเล็กสุด  $10 \mu m$  ขนาดใหญ่สุด  $40 \mu m$  และมีขนาดเฉลี่ย  $21 \mu m$  (10-21-40)

(Jianzhi Zhou, 2005)

ตาราง 3 เงื่อนไขการจำลองการไหล และพารามิเตอร์ต่างๆ ของก๊าซ

Grid size	Coarse size
Turbulence intensity	10%
Residual error	1E-5
Pressure-velocity coupling	SIMPLE
Discretization scheme	QUICK scheme

ตาราง 4 เงื่อนไขการจำลองการไหล และพารามิเตอร์ต่างๆ ของอนุภาคของเหลว

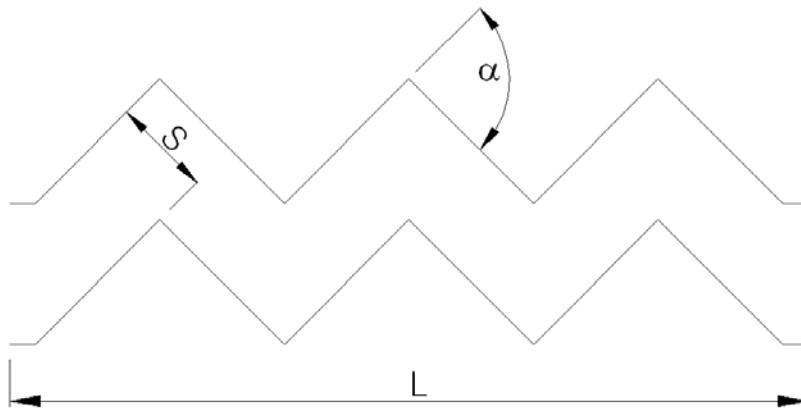
Length scale (integration time step)	0.5 mm.
Cunningham correction factor in stoke's law	1.0
Total number of inlet particle	100
Inlet velocity of particle	slip condition/escape
Outlet (Discrete phase BC type)	escape
Wall (Discrete phase BC type)	no slip/trap

### 3.7.2 รูปแบบของเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่น

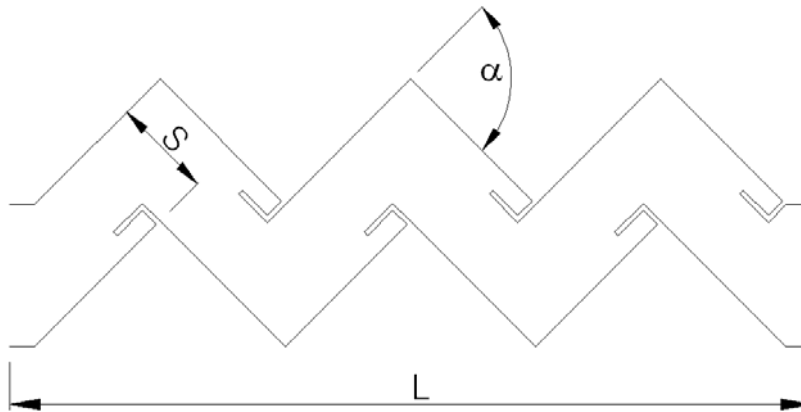
การออกแบบขนาดและรูปทรงของเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่นนั้น ขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงาน ความเหมาะสมในการติดตั้งและขนาดของภาชนะความดันที่นำมาใช้ ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้ขนาดความยาวแผ่นคลื่น 160 มิลลิเมตร และกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องทางไหล, ขนาดมุมเอียงของแผ่นคลื่น และรูปแบบของครีบริบาย โดยมีรายละเอียดต่างๆ ของขนาดที่จะทำการศึกษาแสดงดังตาราง 5 และตาราง 6

ตาราง 5 รูปแบบแผ่นคลื่นที่ศึกษา

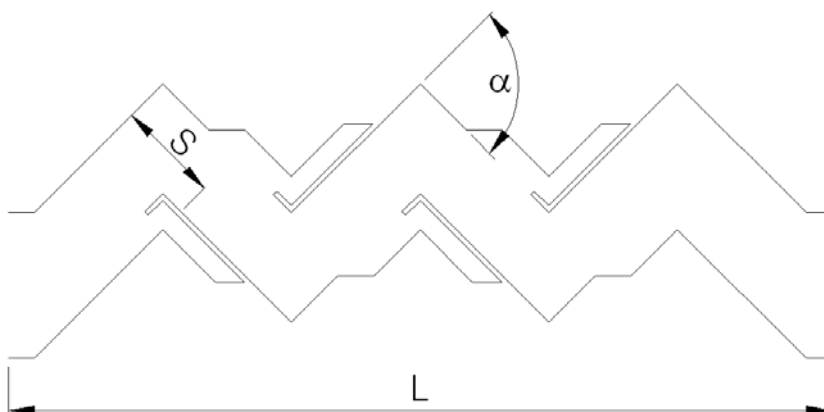
ส่วนต่างๆ ของแผ่นคลื่น	Type-A	Type-B	Type-C
จำนวนของมุมหัก $N$	5	5	5
ความยาวของแผ่น $L$ (mm)	160	160	160
ขนาดของช่องทางไหล $S$ (mm)	15, 20, 25	15, 20, 25	15, 20, 25
ขนาดของมุมหัก $\alpha^\circ$	60, 75, 90	60, 75, 90	60, 75, 90



ภาพประกอบ 9 พารามิเตอร์ของแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A)



ภาพประกอบ 10 พารามิเตอร์ของแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B)



ภาพประกอบ 11 พารามิเตอร์ของแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบริบาย (Type-C)

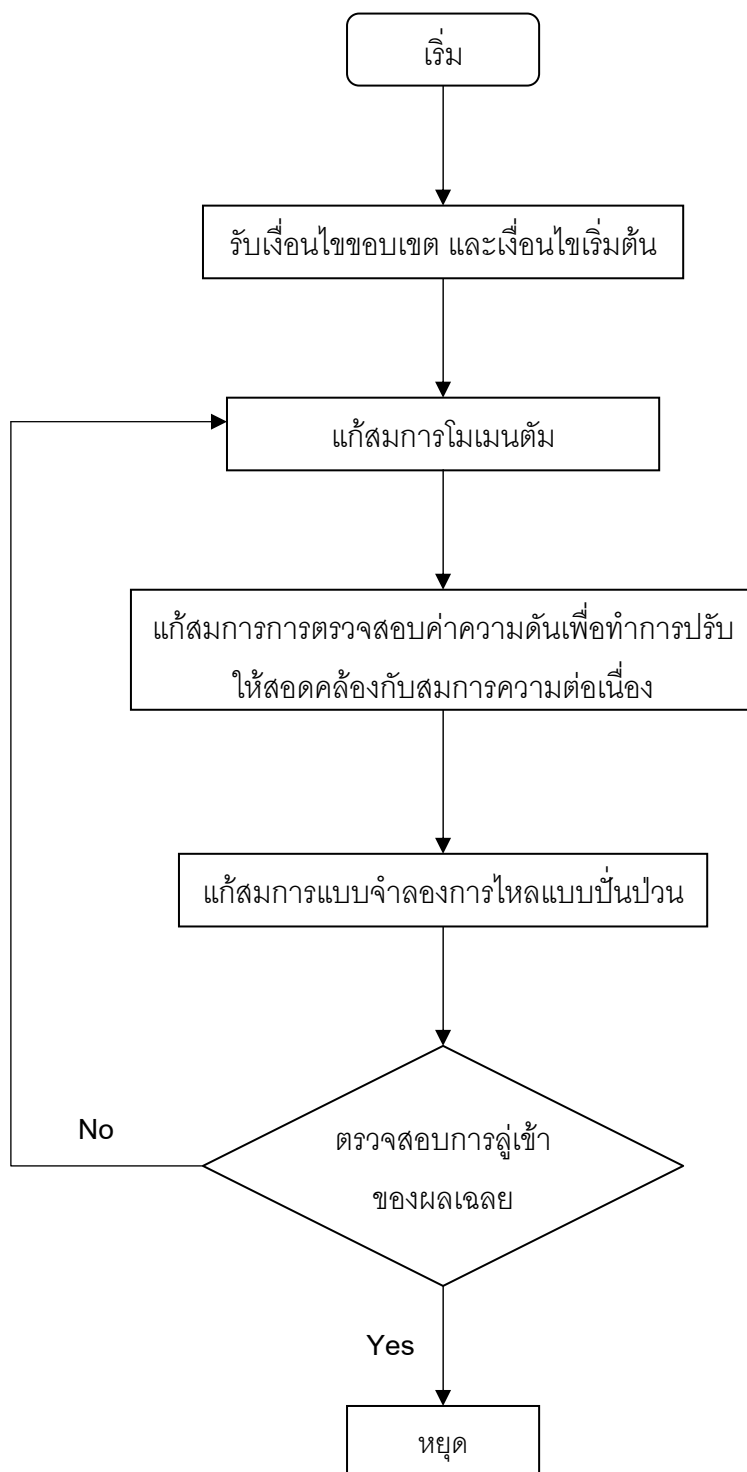
ตาราง 6 สัญลักษณ์รูปแผ่นคลื่นที่ใช้ประกอบการแสดงผลการจำลองการไหล

Spacing (S, mm)	Bend Angle ( $\alpha^\circ$ )	Case study		
		Type-A	Type-B	Type-C
15	60	AS15 $\alpha$ 60	BS15 $\alpha$ 60	CS15 $\alpha$ 60
15	75	AS15 $\alpha$ 75	BS15 $\alpha$ 75	CS15 $\alpha$ 75
15	90	AS15 $\alpha$ 90	BS15 $\alpha$ 90	CS15 $\alpha$ 90
20	60	AS20 $\alpha$ 60	BS20 $\alpha$ 60	CS20 $\alpha$ 60
20	75	AS20 $\alpha$ 75	BS20 $\alpha$ 75	CS20 $\alpha$ 75
20	90	AS20 $\alpha$ 90	BS20 $\alpha$ 90	CS20 $\alpha$ 90
25	60	AS25 $\alpha$ 60	BS25 $\alpha$ 60	CS25 $\alpha$ 60
25	75	AS25 $\alpha$ 75	BS25 $\alpha$ 75	CS25 $\alpha$ 75
25	90	AS25 $\alpha$ 90	BS25 $\alpha$ 90	CS25 $\alpha$ 90

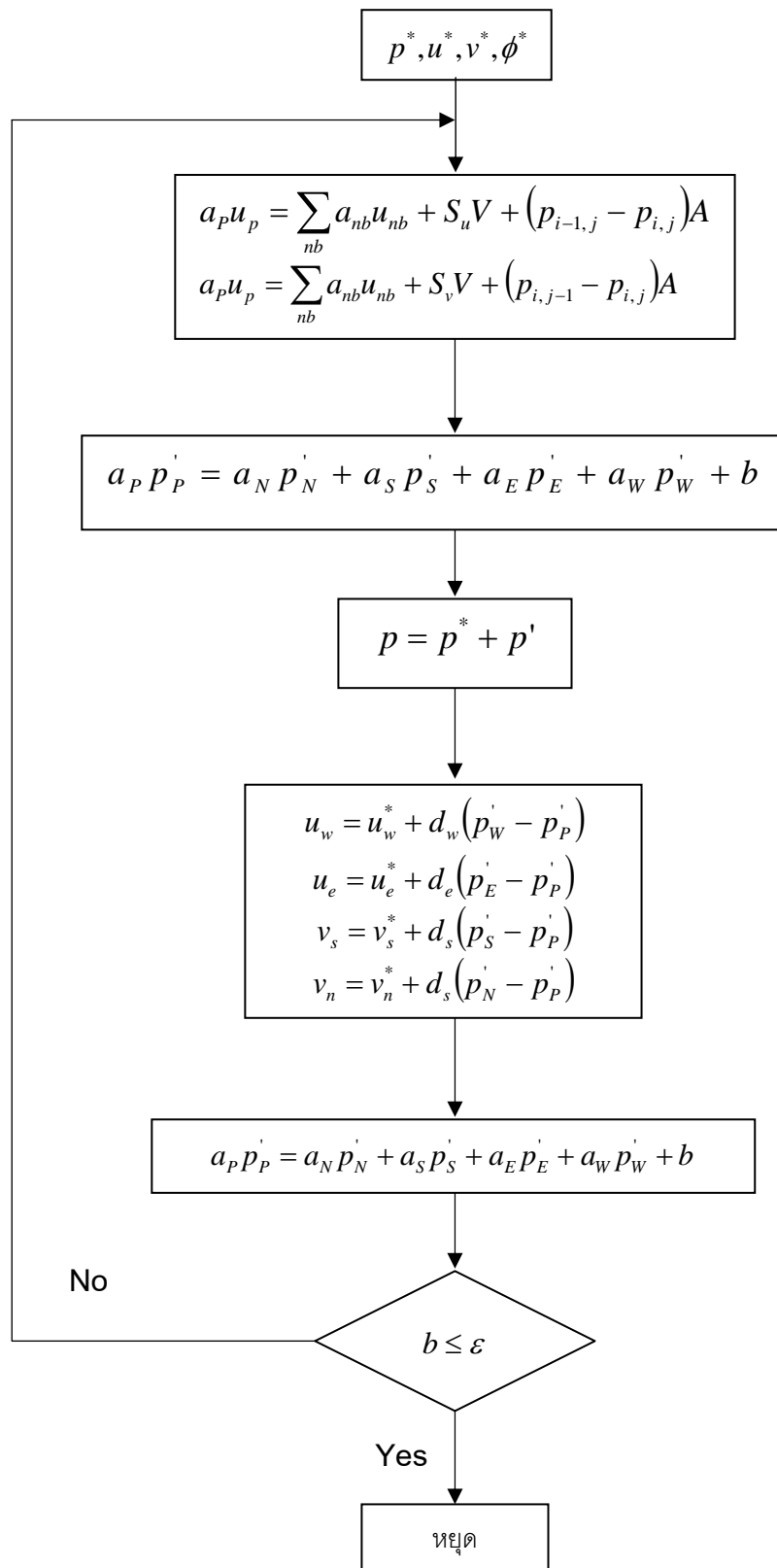
### 3.8 ขั้นตอนและลำดับการแก้สมการ

สำหรับการหาผลเฉลยนั้น จะใช้การคำนวณซ้ำ ซึ่งขั้นตอนในแต่ละรอบมีรายละเอียดแสดงดังภาพประกอบ 13 อธิบายขั้นตอนได้ดังนี้

1. ปรับค่าคุณสมบัติของของไหลโดยใช้ผลเฉลยล่าสุด ในกรณีที่เป็นการคำนวณครั้งแรกจะใช้ค่าเงื่อนไขเริ่มต้น
2. แก้สมการโมเมนตัมเพื่อหาฟังก์ชันของมวลตรงผนังปริมาตร
3. แก้สมการการตรวจสอบค่าความดันเพื่อทำการปรับให้สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากค่าความเร็วในขั้นตอนที่ 2 อาจไม่สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง
4. แก้สมการแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน
5. ตรวจสอบการลู่เข้าของผลเฉลย
6. กลับสู่ขั้นตอนที่ 1



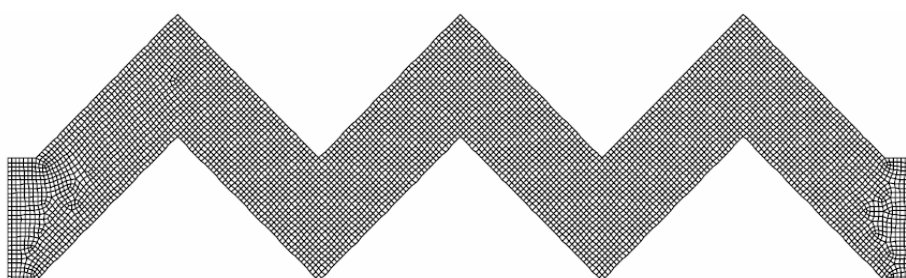
ภาพประกอบ 12 ขั้นตอนและลำดับการแก้สมการ



ภาพประกอบ 13 ลำดับขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธี SIMPLE

### 3.9 การทดลองผลกระทบของกริดที่มีต่อคำตอบ

สำหรับส่วนของการคำนวณระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนั้น งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ระเบียบปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป FLUENT ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลข และใช้การประมาณค่าภายในด้วยวิธี QUICK scheme เพื่อตีสคริปต์ระบบสมการที่เกี่ยวข้องสำหรับพจน์ของความดันและความเร็วซึ่งคู่ควบกัน และได้ใช้กระบวนการหาคำตอบใช้วิธี SIMPLIC รูปแบบการจัดวางกริดแบบไม่เป็นโครงสร้าง (Unstructured grids) ซึ่งมีลักษณะกริดเป็นแบบสี่เหลี่ยมขนาดไม่คงที่ ดังภาพประกอบ 14

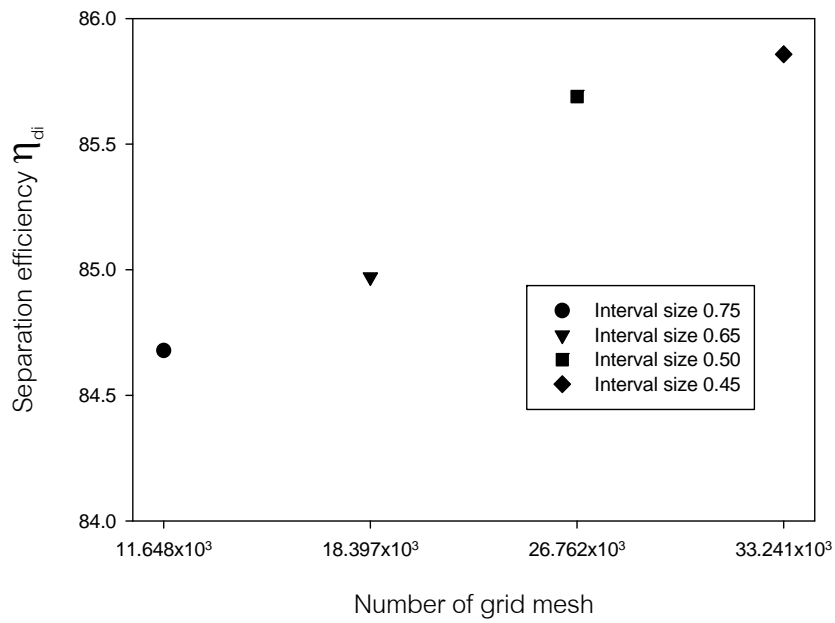


ภาพประกอบ 14 Unstructured grids ที่ใช้ในการวิเคราะห์

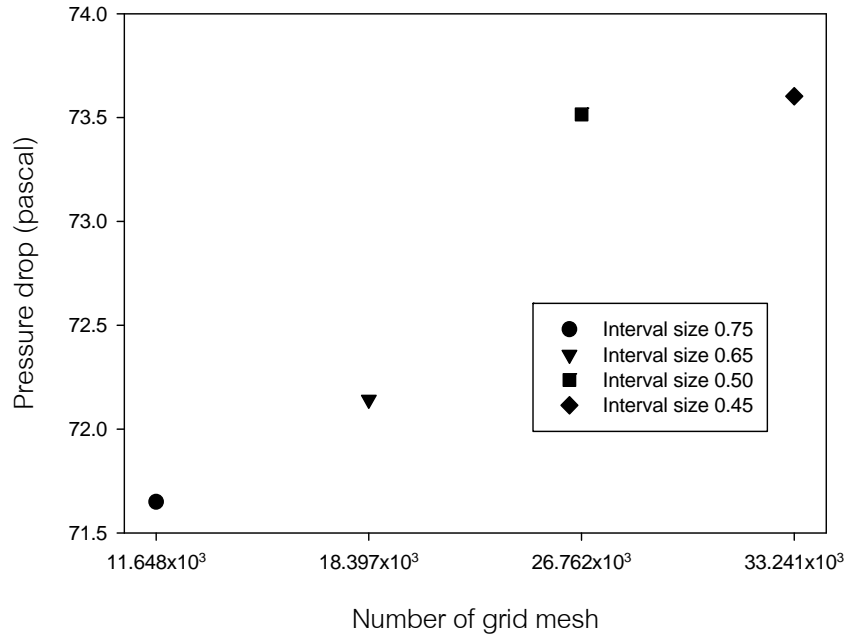
ในงานวิจัยนี้การหาจำนวนกริดที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณในแต่ละรูปแบบนั้น ได้ออกแบบ mesh model ด้วยโปรแกรม GAMBIT และเลือกใช้รูปแบบแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A) ขนาดช่องทางไหล 15 มิลลิเมตร มุมหัก 90 องศา มาทำการจำลองการไหล โดยกำหนดให้มีความละเอียดของกริดที่แตกต่างกัน 4 แบบ ดังตาราง 7

ตาราง 7 การหาจำนวนกริดที่เหมาะสม

Interval size (mm)	จำนวนกริด	$\Delta P$ (pascal)	efficiency ( $\eta_{di}$ )
0.75	$1.1648 \cdot 10^4$	71.6495	84.678
0.65	$1.8397 \cdot 10^4$	72.1416	84.971
0.50	$2.6762 \cdot 10^4$	73.5159	85.690
0.45	$3.3241 \cdot 10^4$	73.6031	85.858



ภาพประกอบ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการแยกกับความละเอียดของกริดที่แตกต่างกัน



ภาพประกอบ 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นกับความละเอียดของกริดที่แตกต่างกัน

จากข้อมูลการจำลองการไหลในตาราง 6 เมื่อนำมาแสดงในรูปกราฟดังภาพประกอบ 15 และภาพประกอบ 16 พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมีความแตกต่างกันน้อยมาก โดยมีค่าผลต่างของความดันสูญเสียประมาณ 0.0872 ปาสคาล และมีค่าผลต่างของประสิทธิภาพการแยกประมาณ 0.168 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้จำนวนกริดเท่ากับ  $2.6762 \times 10^4$  เปรียบเทียบกับจำนวนกริดเท่ากับ  $3.3241 \times 10^4$  และเมื่อกำหนดให้จำนวนกริดเท่ากับ  $3.3241 \times 10^4$  ในการจำลองการไหลเครื่องคอมพิวเตอร์ต้องใช้เวลาในการประมวลผลประมาณ 50 นาที จึงได้คำตอบ และเมื่อกำหนดให้จำนวนกริดเท่ากับ  $2.6762 \times 10^4$  เวลาที่ใช้ในการประมวลผลประมาณ 30 นาที จึงได้คำตอบ ดังนั้นการกำหนดกริดที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้การกำหนดในรูปแบบอื่นๆ จึงเลือกใช้การกำหนดจำนวนกริด mesh model แบบ interval size ขนาด 0.5 มิลลิเมตร

### 3.10 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการจำลอง

ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการคำนวณด้วยวิธีการเชิงตัวเลขนั้น หลีกเลียงไม่ได้เนื่อง จากเป็นการประมาณค่า และใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. ความผิดพลาดที่เกิดจากแบบจำลอง
2. ความผิดพลาดที่เกิดจากดิสครีต
3. ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากกระบวนการทำซ้ำ (Iteration)

รายละเอียดของค่าความผิดพลาดมีดังต่อไปนี้ ความผิดพลาดที่เกิดจากแบบจำลอง คือ ค่าความแตกต่างระหว่างจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับอุปกรณ์รูปแผ่นคลื่นของจริง และการไหลจริงกับการไหลในการจำลองที่เราตั้งสมมติฐานขึ้น ซึ่งคุณสมบัติของการไหลไม่สามารถที่จะกำหนดให้ถูกต้องกับของไหลที่เป็นจริงได้ เช่น การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นที่แปรตามอุณหภูมิในของไหลจริง เงื่อนไขขอบเขตที่เรากำหนดไว้เป็นเพียงคาดคะเน ซึ่งไม่สามารถจะกำหนดให้ตรงกับความเป็นจริงมากที่สุดได้ ความผิดพลาดที่เกิดจากการดิสครีตนั้นคือ ความผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณค่าของสมการอนุพันธ์ย่อย ซึ่งเราจำเป็นที่จะต้องตัดเทอมปลายของสมการอนุกรมเทเลอร์ (Taylor Series) ออกไป เพื่อที่จะทำให้เราได้มีการประมาณค่าได้ และเทคนิคการประมาณค่าแต่ละชนิดก็จะมีค่าความผิดพลาดแตกต่างกันไป สุดท้ายเป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดจากกระบวนการทำซ้ำซึ่งในกระบวนการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อยที่ได้ทำการดิสครีตแล้วนั้น จำเป็นที่จะต้องใช้กระบวนการทำซ้ำ โดยที่กระบวนการทำซ้ำนี้จะมีการสิ้นสุดที่เป็นไปได้ยากมาก ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องกำหนดจุดให้กระบวนการทำซ้ำนั้นหยุด จุดนั้นเรียกว่า Criteria ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นสามารถที่จะลดให้น้อยลงได้โดยการกำหนดค่านี้ให้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเราจะต้องใช้เวลาในการจำลองมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังมีค่าความผิดพลาดที่เกิดจากจำนวนกริดไม่ละเอียดพอ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากแบบจำลองการไหลไม่ดีพอ

## บทที่ 4

### ผลและการวิเคราะห์

#### 4.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทำนายการไหลในช่องทางเปิดของชุดอุปกรณ์เครื่องแยกโลหะของแบบแผ่นคลื่น โดยแบ่งรูปแบบแผ่นคลื่นออกเป็น 3 ชนิด (Type-A, Type-B, Type-C) ตามรายละเอียดกรณีศึกษาที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 สำหรับบทนี้ในหัวข้อ 4.2 จะเริ่มด้วยการอธิบายการไหลแบบปั่นในเครื่องแยกโลหะของแบบแผ่นคลื่นและการหาค่าตัวเลขเรย์โนลด์ หัวข้อ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลของค่าความดันที่สูญเสียกับงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกัน ส่วนในหัวข้อ 4.4 แสดงผลการจำลองการไหลรูปแบบแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A) หัวข้อ 4.5 เป็นการหารขนาดครีบระบายที่เหมาะสม โดยนำข้อมูลจากผลการจำลองการไหลในหัวข้อ 4.4 ไปทำการศึกษารูปแบบ หัวข้อ 4.6 เป็นการแสดงผลการจำลองการไหลของรูปแบบแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบระบาย (Type-B) หัวข้อ 4.7 เป็นการแสดงผลการจำลองการไหลของรูปแบบแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบระบาย (Type-C) และหัวข้อ 4.8 เป็นการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล โดยทำการเลือกรูปแบบแผ่นคลื่นจากผลการจำลองที่เหมาะสมจำนวน 3 แบบ ของแต่ละรูปแบบแผ่นคลื่น มาทำการจำลองการไหลอีกครั้ง โดยเปลี่ยนเงื่อนไขให้อนุภาคของเหลวมีขนาดเล็กสุด  $10 \mu\text{m}$  ใหญ่สุด  $40 \mu\text{m}$  และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $21 \mu\text{m}$  (Jianzhi Zhao, 2005)

#### 4.2 การไหลแบบปั่นป่วนในเครื่องแยกโลหะของแบบแผ่นคลื่น

การไหลแบบปั่นป่วนนั้นจะเกิดการไหลแบบหมุนวนที่มีความปั่นป่วนสูงซึ่งสามารถนำไป ใช้ งานในหลายๆ สาขาทางวิศวกรรม โดยการไหลแบบนี้จะมีบทบาทสำคัญในการสร้างและกำหนดการ ทำงานของอุปกรณ์รูปแบบต่างๆ การไหลในลักษณะนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการ เปลี่ยนแปลงรูปทรงอย่างทันทีทันใดของช่องทางไหล ซึ่งความเข้าใจในพฤติกรรมของการไหลที่เกิดขึ้น ดังกล่าวนี้อาจนำไปใช้ออกแบบเครื่องจักรกลให้มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดได้

การไหลภายในเครื่องแยกโลหะของรูปแบบแผ่นคลื่นของงานวิจัยนี้ คือเมื่อของไหลไหลผ่านช่องทาง ไหลที่ถูกทำให้เกิดการไหลวนตามรูปคลื่นสลับไปมาจะทำให้สนามการไหลบริเวณผนังด้านหลังมุมหักเกิด สนามการไหลหมุนวนความเร็วการไหลเข้าใกล้ศูนย์ซึ่งทำให้เกิดการแยกตัวของอนุภาคของเหลวออกจาก ก๊าซ จึงได้นำหลักการดังกล่าวมาทำการศึกษาค้นหาประสิทธิภาพของชุดอุปกรณ์ที่เหมาะสมที่สุดกับการใช้ งานจริง โดยกำหนดเงื่อนไขให้การไหลเป็นแบบปั่นป่วนใน 2 มิติ ของของไหลที่อัดตัวไม่ได้แบบ 2 สถานะ ที่สภาวะคงตัวระหว่างก๊าซมีเทนกับละอองน้ำ โดยมีสัดส่วนของละอองน้ำผสมอยู่ไม่เกินร้อยละ 10 และ กำหนดให้ความเร็วที่ทางเข้าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 9 เมตรต่อวินาที

การหาค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.25) โดยมีรายละเอียดดังนี้

$$Re = \frac{uD}{\nu} = \frac{\rho u D}{\mu}$$

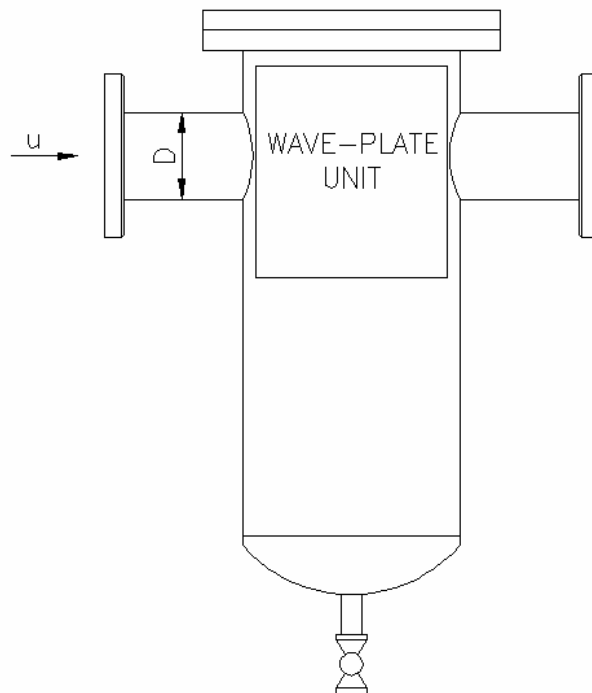
เมื่อ  $\rho = P/RT = \frac{8 \times 10^5}{518.2 \times 298} = 5.1 \text{ kg/m}^3$

$u = 2, 3, 4, 5, 6$  และ  $9 \text{ m/s}$

$D = 0.152 \text{ m}$

$\mu = 0.0000104 \text{ kg/m.s}$

ดังนั้น  $Re \approx 149,000, 223,000, 298,000, 372,000, 447,000$  และ  $670,000$  ตามลำดับ

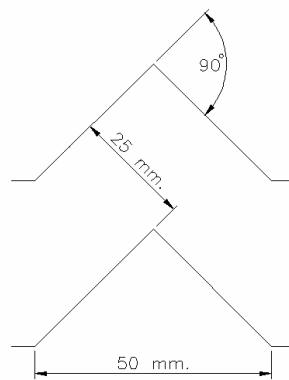


ภาพประกอบ 17 รูปแสดงภาพขณะถึงความดันสำหรับติดตั้งแผ่นคลื่นแยกของของเหลว และแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เลือกใช้ในการหาค่าตัวเลขเรย์โนลด์

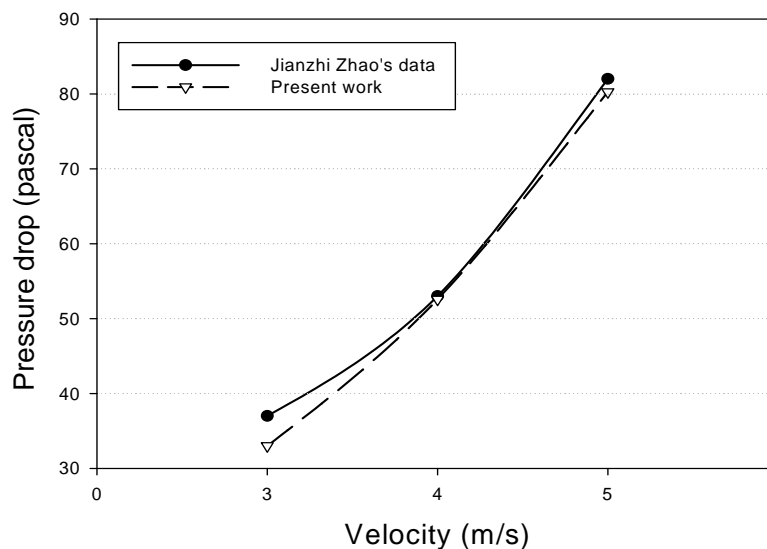
### 4.3 เปรียบเทียบผลการทำนายกับงานวิจัยที่ผ่านมา

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้รูปแบบแผ่นคลื่นแบบทั่วไปไม่มีครีบริบาย (Type-A) ขนาดช่องทางไหล 25 มิลลิเมตร มุมหัก (Bend angle) 90 องศา จำนวน 1 มุม มาทำการจำลองการไหลเพื่อหาค่าความดันสูญเสียเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ (Jianzhi Zhao. 2005) ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยมีรายละเอียดดังภาพประกอบ 18 และมีเงื่อนไขการจำลองการไหลต่างๆ ดังนี้

1. กำหนดค่าความเร็วเริ่มต้นเท่ากับ 3, 4 และ 5 เมตรต่อวินาที
2. กำหนดให้ mesh model เป็นแบบ Interval size 0.4 มีจำนวนกริดเท่ากับ  $2.6106 \times 10^4$
3. กำหนดเงื่อนไขขอบเขตมีรายละเอียดดังหัวข้อ 3.6



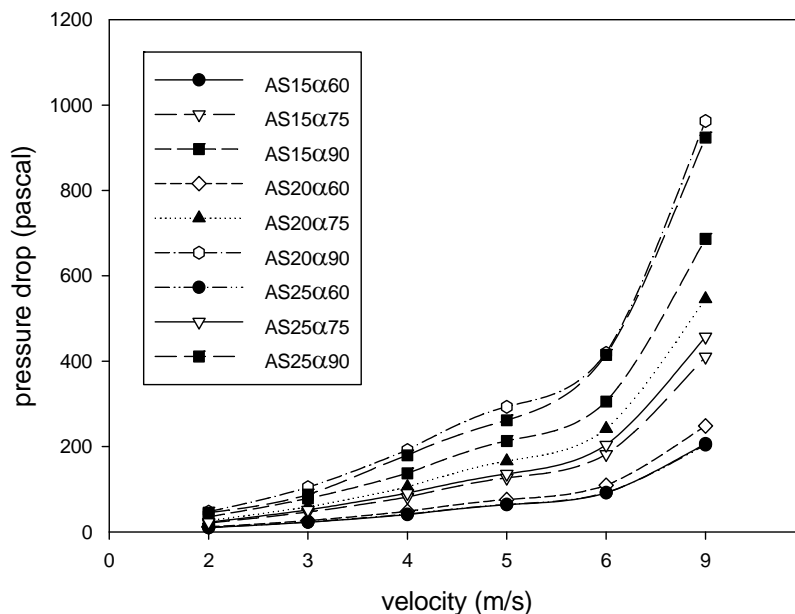
ภาพประกอบ 18 พารามิเตอร์ของรูปแบบแผ่นคลื่นที่ใช้จำลองการไหลเพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ (Jianzhi Zhao. 2005)



ภาพประกอบ 19 เปรียบเทียบค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นกับงานวิจัยของ (Jianzhi Zhao. 2005)

จากกราฟในภาพประกอบ 19 พบว่าแบบจำลองรูปแผ่นคลื่นที่ทำการออกแบบเมื่อนำผลลัพธ์ค่าความดันสูญเสียที่ได้จากการจำลองสนามการไหลโดยใช้โปรแกรม FLUENT มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ (Jianzhi Zhoa. 2005) ซึ่งมีขนาดและรูปแบบแผ่นคลื่นที่คล้ายคลึงกัน พบว่า มีค่าแตกต่างสูงสุดของความดันสูญเสียประมาณ 4 ปาสคาล ที่ความเร็วการไหล 3 เมตรต่อวินาที ส่วนที่ความเร็ว 4 และ 5 เมตรต่อวินาที มีความแตกต่างกันน้อยมากซึ่งผลลัพธ์ที่แตกต่างกันนี้อาจเกิดจากความผิดพลาดของแบบจำลอง และเงื่อนไขต่าง ๆ ที่กำหนดให้กับโปรแกรม อย่างไรก็ตามคำตอบที่ได้ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกันทำให้มั่นใจได้ว่าผลจากการศึกษาออกแบบเครื่องแยกละอองรูปแผ่นคลื่นของงานวิจัยนี้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือเพียงพอ

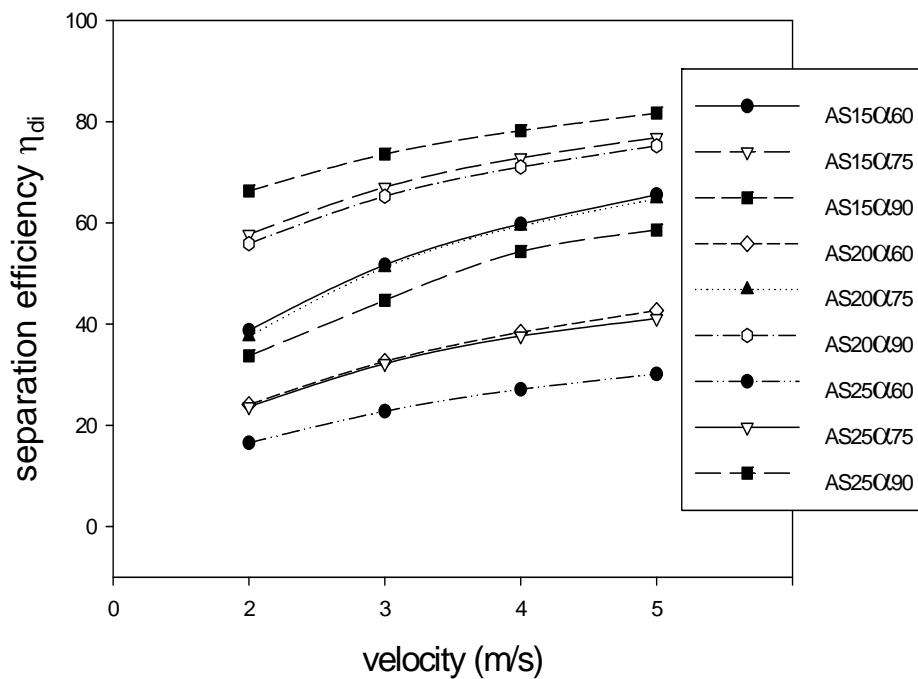
#### 4.4 ผลการทำนายของรูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A)



ภาพประกอบ 20 กราฟแสดงความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อกำหนดความเร็วการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันระหว่าง 2 ถึง 9 เมตรต่อวินาที

จากภาพประกอบ 20 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลกับค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ จากผลการจำลองการไหลของรูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A) จำนวน 9 แบบ โดยกำหนดให้ความเร็วเริ่มต้นเท่ากับ 2, 3, 4, 5, 6, และ 9 เมตรต่อวินาที ผลการจำลองการไหลพบว่า เมื่อความเร็วการไหลสูงขึ้นค่าความดันสูญเสียจะเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยรูปแผ่นคลื่นแบบ AS20α90 และ AS25α90 มีค่าความดันสูญเสียสูงกว่าแบบอื่น ๆ และรูปแผ่นคลื่นแบบ AS15α60, AS25α60 มีค่า

ความดันสูญเสียที่ใกล้เคียงกันมากและยังน้อยกว่าแบบอื่น ๆ ด้วย เมื่อพิจารณาจากค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบแล้วสามารถสรุปได้ว่าความเร็วการไหลของก๊าซที่เหมาะสมสำหรับเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่นนั้น อยู่ระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที เนื่องจากเมื่อความเร็วการไหลของก๊าซสูงกว่า 5 เมตรต่อวินาที ความดันสูญเสียจะเพิ่มขึ้นสูงมากสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟ ดังนั้นการจำลองการไหลในขั้นต่อไปจะเลือกใช้ค่าความเร็วระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที



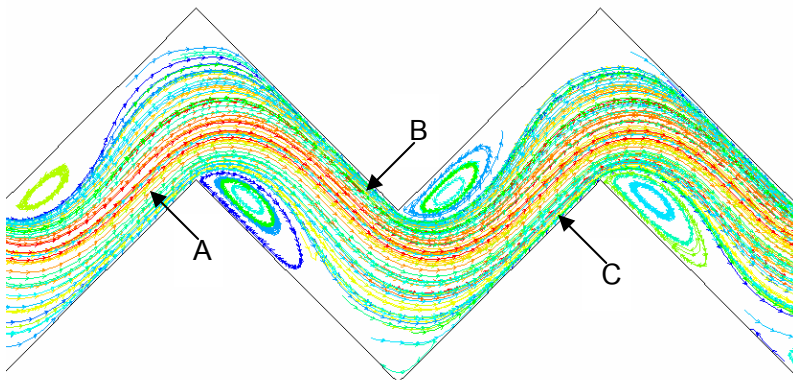
ภาพประกอบ 21 กราฟแสดงประสิทธิภาพการแยกเมื่อกำหนดความเร็วการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที

จากภาพประกอบ 21 เป็นการแสดงค่าประสิทธิภาพการแยกที่เกิดขึ้นจากผลการจำลองการไหลของรูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A) จำนวน 9 รูปแบบ โดยกำหนดให้ความเร็วเริ่มต้นเท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 เมตรต่อวินาที ผลการจำลองการไหลพบว่าเมื่อความเร็วการไหลเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพการแยกจะเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยขนาดช่องทางไหล (Spacing) แคบและขนาดมุมหัก (Bend angle  $\alpha$ ) มาก จะมีประสิทธิภาพการแยกดีกว่าขนาดช่องทางไหลกว้างและขนาดมุมหักน้อยกว่าจากรูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไป AS15 $\alpha$ 90 มีประสิทธิภาพการแยกสูงสุด และรูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไป AS25 $\alpha$ 60 มีประสิทธิภาพการแยกต่ำที่สุด

ดังนั้นเมื่อพิจารณาระหว่างค่าความดันสูญเสีย จากภาพประกอบ 20 และประสิทธิภาพการแยกจากภาพประกอบ 21 แล้วจึงสรุปได้ว่ารูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไป AS15 $\alpha$ 90 มีความเหมาะสมสูงสุดการเลือกใช้ เนื่องจากให้ค่าประสิทธิภาพการแยกสูงสุดประมาณ 66 – 82 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นไม่สูงมากประมาณ 36 – 200 ปาสคาล ที่ช่วงความเร็วการไหล 2 – 5 เมตรต่อวินาที

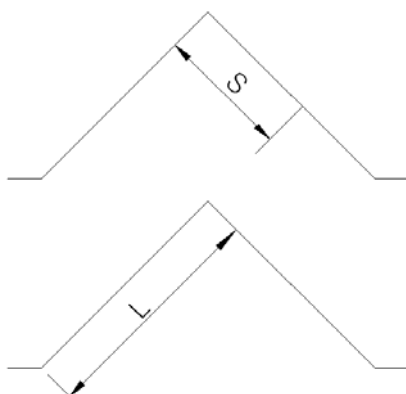
#### 4.5 การออกแบบครีบริบาย (Drainage Channel)

ในการหาขนาดครีบริบาย (Drainage channel) ที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้การออกแบบจะเลือกรูปแบบแผ่นคลื่นขนาดช่องทางไหล (Spacing) 20 มิลลิเมตร มุมหัก 90 องศา ของแบบทั่วไป (Type-A) มาทำการจำลองสนามการไหลเปรียบเทียบผลการจำลองสนามการไหลกับแบบมีครีบริบาย (Type-B) ที่สัดส่วนต่างๆ โดยกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น เงื่อนไขขอบเขต และเงื่อนไขทางออกเหมือนกัน ผลลัพธ์ของค่าความดันสูญเสีย และประสิทธิภาพการแยกที่ได้จากรูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไปจะถูกเปรียบเทียบกับอัตราการเพิ่มของความดันสูญเสีย และประสิทธิภาพการแยกจากรูปแผ่นคลื่นแบบมีครีบริบายที่สัดส่วนต่างๆ แล้วจึงนำผลการจำลองการไหลที่ได้ของแต่ละแบบมาพิจารณาเลือกสัดส่วนของครีบริบายที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงค่าความดันสูญเสียและประสิทธิภาพควบคู่กัน

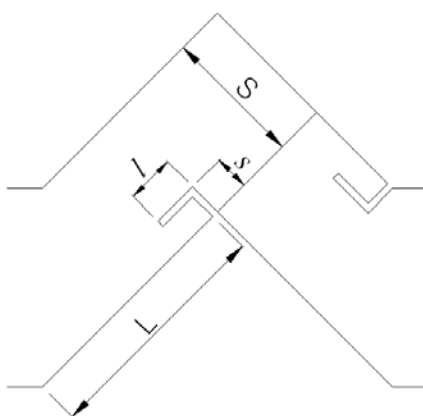


ภาพประกอบ 22 แสดงลักษณะสนามการไหล (Stream line) ภายในเครื่องแยกของแบบแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A) AS20 $\alpha$ 90 ที่ความเร็วการไหล 3 เมตรต่อวินาที

จากภาพประกอบ 22 ผลจากการจำลองการไหลภายในเครื่องแยกของรูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A) เมื่อพิจารณาลักษณะสนามการไหล (Stream line) พบว่าบริเวณมุมหักดังตัวอย่างในจุด A, B และ C ของแผ่นคลื่นจะมีความหนาแน่นของสนามการไหลสูง นั่นคือบริเวณนี้จะมีจำนวนอนุภาคของเหลวไหลผ่านเป็นจำนวนมาก ดังนั้นบริเวณดังกล่าวจึงเหมาะสมในการออกแบบติดตั้งครีบริบาย (Drainage channel) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดักของเหลว



ภาพประกอบ 23 แสดงลักษณะรูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไปที่ใช้ในการจำลองการไหล ที่ขนาดช่องทางไหล (Spacing) 20 มิลลิเมตร มุมหัก 90 องศา



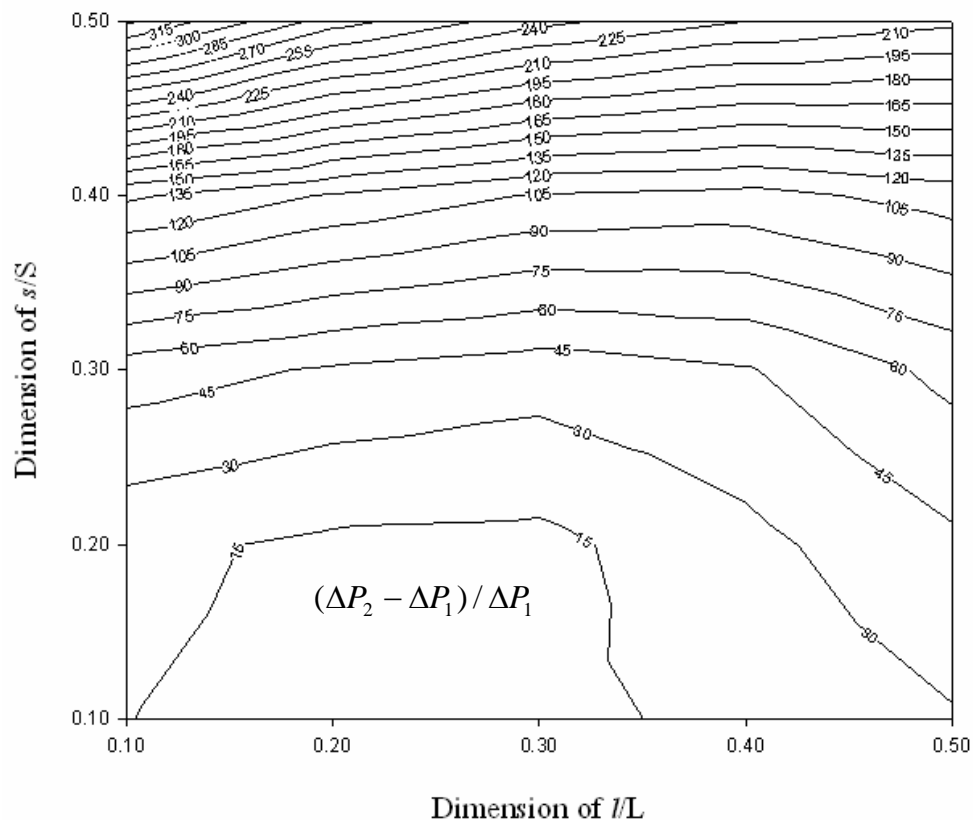
ภาพประกอบ 24 แสดงลักษณะรูปแผ่นคลื่นที่ใช้ในการจำลองการไหลเพื่อออกแบบครีบระบาย ซึ่งกำหนดให้  $l/L$  และ  $s/S$  เปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 10 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์

จากภาพประกอบ 23 แสดงลักษณะรูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A) และภาพประกอบ 24 แสดงลักษณะรูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบระบาย (Type-B) ของขนาดช่องทางไหล (Spacing) 20 มิลลิเมตร มุมหัก 90 องศา ที่ใช้ในการจำลองการไหลเปรียบเทียบ โดยมีเงื่อนไขการจำลองการไหลต่างๆ คือ กำหนดค่าความเร็วเริ่มต้นเท่ากับ 5 เมตรต่อวินาที ใช้ mesh model เป็นแบบ Interval size 0.4 มีจำนวนกริดเท่ากับ  $2.6106 \times 10^4$  และมีเงื่อนไขขอบเขตตามรายละเอียดดังหัวข้อ 3.6 และมีค่าสัดส่วนต่างๆ ของครีบระบายที่จะทำการออกแบบตามภาพประกอบ 24 โดยที่  $L$  คือความยาวของแผ่นคลื่น 1 ช่วง,  $l$  คือความยาวของครีบระบายกำหนดให้มีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ของ  $L$ ,  $S$  คือขนาดของ

ช่องทางไหลในรูปแผ่นคลื่น และ  $s$  คือขนาดของครีบริบายกำหนดให้มีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 50 เปอร์เซนต์ของ  $S$

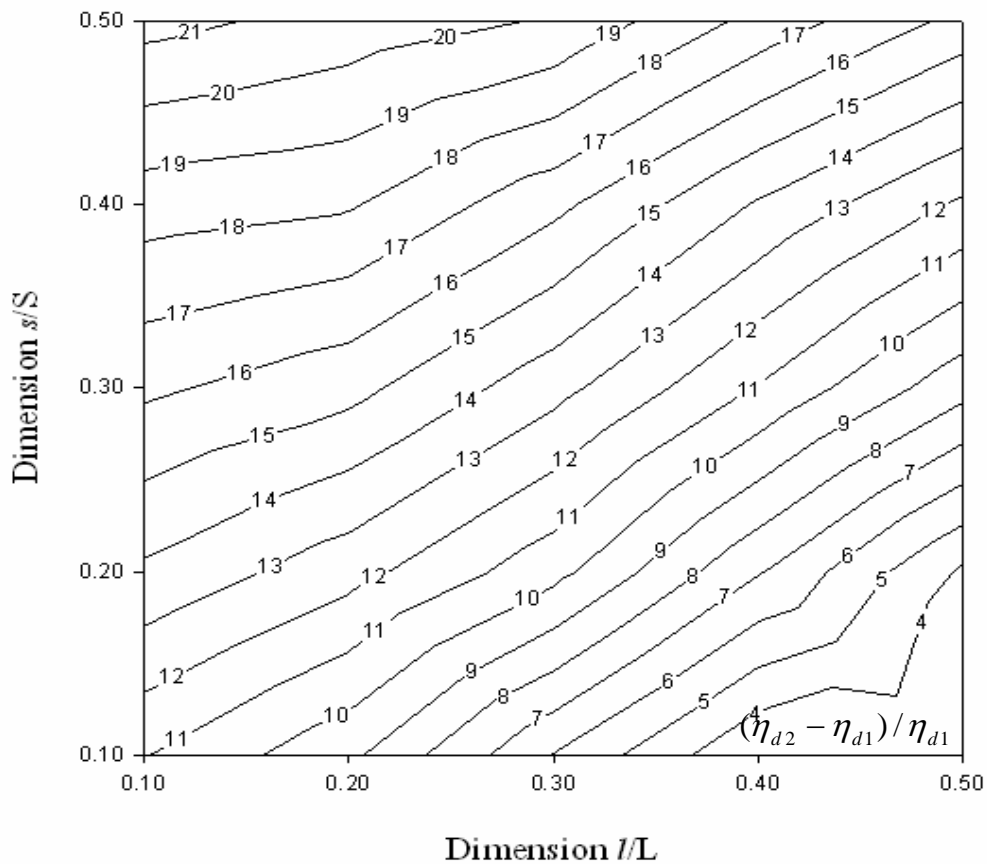
ตาราง 8 แสดงผลการเพิ่มขึ้นของค่าความดันสูญเสียสัมพัทธ์และค่าประสิทธิภาพการแยกสัมพัทธ์ที่ อัตราส่วนครีบริบายขนาดต่างๆ  $[(\Delta P_2 - \Delta P_1) / \Delta P_1] : [(\eta_{d2} - \eta_{d1}) / \eta_{d1}]$

อัตราส่วน	$s/S=0.1$	$s/S=0.2$	$s/S=0.3$	$s/S=0.4$	$s/S=0.5$
$l/L=0.1$	15.20 : 11.05	18.47 : 13.84	52.67 : 16.21	137.93 : 18.47	333.72 : 21.34
$l/L=0.2$	10.60 : 9.23	12.15 : 12.38	43.18 : 15.34	118.16 : 18.11	276.92 : 20.61
$l/L=0.3$	11.70 : 6.00	11.04 : 10.34	36.96 : 13.37	103.27 : 16.28	244.73 : 19.90
$l/L=0.4$	18.27 : 3.05	25.83 : 7.09	43.74 : 10.94	99.55 : 13.90	224.81 : 17.68
$l/L=0.5$	28.76 : 3.36	42.27 : 3.83	64.38 : 8.35	111.36 : 11.81	214.11 : 15.68



ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงความดันสูญเสียสัมพัทธ์เปรียบเทียบระหว่างรูปแบบแผ่นคลื่นแบบทั่วไป กับรูปแบบแผ่นคลื่นเมื่อเพิ่มครีบริบายที่สัดส่วนต่างๆ

จากภาพประกอบ 25 รูปกราฟแสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความดันสูญเสีย กรณีการไหลแบบทั่วไปเปรียบเทียบกับกรณีการไหลแบบมีครีบบที่สัดส่วน  $l/L$  และ  $s/S$  10 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพประกอบ 23 โดยกำหนดให้  $\Delta P_1$  คือความดันสูญเสียของรูปแบบคลื่นแบบทั่วไป  $\Delta P_2$  คือความดันสูญเสียของรูปแบบคลื่นแบบมีครีบระบายที่สัดส่วนต่างๆ ดังนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความดันสูญเสียจึงหาได้จาก  $(\Delta P_2 - \Delta P_1) / \Delta P_1$  เมื่อนำค่าดังกล่าวมาแสดงในรูปกราฟจึงพอเป็นข้อมูลเบื้องต้นได้ว่าขนาดครีบบที่เหมาะสมมีสัดส่วน  $l/L$  อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.35 เนื่องจากเกิดความดันสูญเสียต่ำ น้อยกว่า 15 เปอร์เซ็นต์



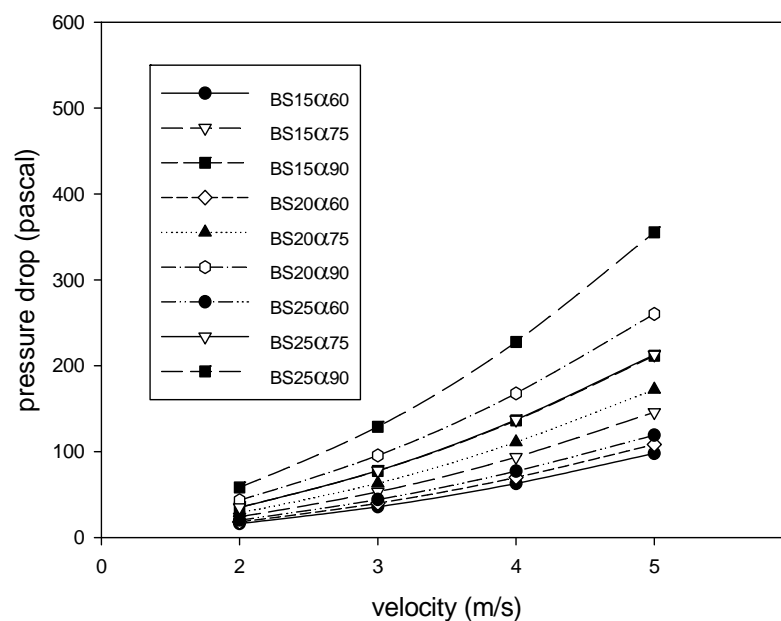
ภาพประกอบ 26 รูปกราฟแสดงประสิทธิภาพของการแยกสัสมพัทธ์เปรียบเทียบระหว่างรูปแบบแผ่นคลื่นแบบทั่วไปกับรูปแบบแผ่นคลื่นเมื่อเพิ่มครีบระบายที่สัดส่วนต่างๆ

จากภาพประกอบ 26 เส้นกราฟแสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการแยก กรณีการไหลแบบทั่วไปเปรียบเทียบกับกรณีการไหลแบบมีครีบบที่สัดส่วน  $l/L$  และ  $s/S$  10 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพประกอบ 24 โดยกำหนดให้  $\eta_{d1}$  คือประสิทธิภาพการแยกของรูปแบบไม่มีครีบระบาย

$\eta_{d2}$  คือประสิทธิภาพการแยกของรูปแผ่นคลื่นแบบมีครีบริบายที่สัดส่วนต่างๆ ดังนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการแยกหาได้จาก  $(\eta_{d2} - \eta_{d1})/\eta_{d1}$  เมื่อนำค่าดังกล่าวมาแสดงในรูปกราฟจึงพอเป็นข้อมูลเบื้องต้นได้ว่าขนาดครีบริบายที่เหมาะสมมีสัดส่วน  $l/L$  และ  $s/S$  อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.2

ดังนั้นการออกแบบครีบริบายของงานวิจัยนี้ จากข้อมูลในตาราง 8 เมื่อนำมาพิจารณาถึงค่าความดันสูญเสียสัมพัทธ์ จากภาพประกอบ 25 และค่าประสิทธิภาพสัมพัทธ์จากภาพประกอบ 26 ควบคู่กันแล้วสามารถสรุปได้ว่าสัดส่วนครีบริบาย  $l/L$  และ  $s/S$  เท่ากับ 0.2 หรือ 20 เปอร์เซ็นต์ของความยาวและความกว้างแผ่นคลื่นมีความเหมาะสมมากที่สุดในกรณีนำไปออกแบบใช้งาน เนื่องจากสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าความดันสูญเสียมีความสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพการแยกมากที่สุด

#### 4.6 ผลการทำนายของรูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B)



ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อกำหนดความเร็วการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที ของรูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B)

จากภาพประกอบ 27 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลกับค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ จากผลการจำลองการไหลของรูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B) จำนวน 9 แบบ โดยกำหนดให้ความเร็วเริ่มต้นเท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 เมตรต่อวินาที ผลการจำลองการไหล

พบว่ารูปแผ่นคลื่นแบบ BS25 $\alpha$ 90 มีค่าความดันสูญเสียสูงสุด และรูปแผ่นคลื่น BS15 $\alpha$ 60 มีค่าความดันสูญเสียต่ำที่สุด

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นกับแบบทั่วไป (Type-A) ที่ขนาดช่องทางไหล และมุมหักเดียวกันแล้วพอสรุปได้ดังนี้

1) รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B) ที่มีขนาดมุมหัก 90 องศา ช่องทางไหลขนาด 25 มิลลิเมตร BS25 $\alpha$ 90 เกิดค่าความดันสูญเสียสูงกว่าประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 58 – 355 ปาสคาล

2) รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B) ที่มีขนาดมุมหัก 75 องศา ช่องทางไหลขนาด 25 มิลลิเมตร BS25 $\alpha$ 75 เกิดค่าความดันสูญเสียสูงกว่าประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 35 – 212 ปาสคาล

3) รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B) ที่มีขนาดมุมหัก 60 องศา ช่องทางไหลขนาด 25 มิลลิเมตร BS25 $\alpha$ 60 เกิดค่าความดันสูญเสียสูงกว่าประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 20 – 119 ปาสคาล

4) รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B) ที่มีขนาดมุมหัก 90 องศา ช่องทางไหลขนาด 20 มิลลิเมตร BS20 $\alpha$ 90 เกิดค่าความดันสูญเสียต่ำกว่าประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 43 – 260 ปาสคาล

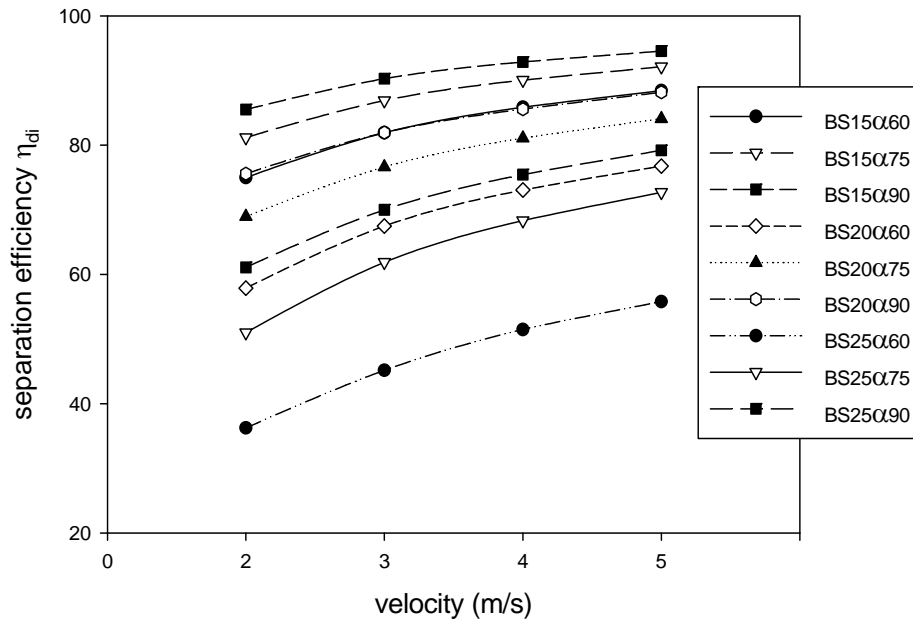
5) รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B) ที่มีขนาดมุมหัก 75 องศา ช่องทางไหลขนาด 20 มิลลิเมตร BS20 $\alpha$ 75 เกิดค่าความดันสูญเสียสูงกว่าประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 29 – 172 ปาสคาล

6) รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B) ที่มีขนาดมุมหัก 60 องศา ช่องทางไหลขนาด 20 มิลลิเมตร BS20 $\alpha$ 60 เกิดค่าความดันสูญเสียสูงกว่าประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 18 – 108 ปาสคาล

7) รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B) ที่มีขนาดมุมหัก 90 องศา ช่องทางไหลขนาด 15 มิลลิเมตร BS15 $\alpha$ 90 เกิดค่าความดันสูญเสียต่ำกว่าประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 35 – 212 ปาสคาล

8) รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B) ที่มีขนาดมุมหัก 75 องศา ช่องทางไหลขนาด 15 มิลลิเมตร BS15 $\alpha$ 75 เกิดค่าความดันสูญเสียสูงกว่าประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 24 – 146 ปาสคาล

9) รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B) ที่มีขนาดมุมหัก 60 องศา ช่องทางไหลขนาด 15 มิลลิเมตร BS15 $\alpha$ 60 เกิดค่าความดันสูญเสียสูงกว่าประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 16 – 98 ปาสคาล



ภาพประกอบ 28 กราฟแสดงประสิทธิภาพการแยกเมื่อกำหนดความเร็วการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที ของรูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B)

จากภาพประกอบ 28 เป็นการแสดงค่าประสิทธิภาพการแยกที่เกิดขึ้นจากการจำลองการไหลของรูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B) จำนวน 9 แบบ โดยกำหนดให้ความเร็วเริ่มต้นเท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 เมตรต่อวินาที ผลการจำลองการไหลมีความสอดคล้องกับแบบทั่วไป คือขนาดช่องทางไหลแคบ และขนาดมุมหักมากจะมีประสิทธิภาพการแยกดีกว่าขนาดช่องทางไหลกว้าง และขนาดมุมหักน้อย จากกราฟพบว่ารูปแผ่นคลื่นแบบ BS15 $\alpha$ 90 มีประสิทธิภาพการแยกสูงสุด และรูปแผ่นคลื่นแบบ BS25 $\alpha$ 60 มีประสิทธิภาพการแยกต่ำที่สุด

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการแยกที่เกิดขึ้นกับแบบทั่วไป (Type-A) ที่ขนาดช่องทางไหล และมุมหักเดียวกันแล้วพอสรุปได้ดังนี้

1) รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B) ที่มีขนาดมุมหัก 90 องศา ช่องทางไหลขนาด 25 มิลลิเมตร BS25 $\alpha$ 90 มีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 61 – 79 เปอร์เซ็นต์

2) รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบบะบาย (Type-B) ที่มีขนาดมุมหัก 75 องศา ช่องทางไหลขนาด 25 มิลลิเมตร BS25 $\alpha$ 75 มีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 51 – 72 เปอร์เซ็นต์

3) รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบบะบาย (Type-B) ที่มีขนาดมุมหัก 60 องศา ช่องทางไหลขนาด 25 มิลลิเมตร BS25 $\alpha$ 60 มีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 36 – 56 เปอร์เซ็นต์

4) รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบบะบาย (Type-B) ที่มีขนาดมุมหัก 90 องศา ช่องทางไหลขนาด 20 มิลลิเมตร BS20 $\alpha$ 90 มีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 75 – 88 เปอร์เซ็นต์

5) รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบบะบาย (Type-B) ที่มีขนาดมุมหัก 75 องศา ช่องทางไหลขนาด 20 มิลลิเมตร BS20 $\alpha$ 75 มีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 69 – 84 เปอร์เซ็นต์

6) รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบบะบาย (Type-B) ที่มีขนาดมุมหัก 60 องศา ช่องทางไหลขนาด 20 มิลลิเมตร BS20 $\alpha$ 60 มีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 58 – 77 เปอร์เซ็นต์

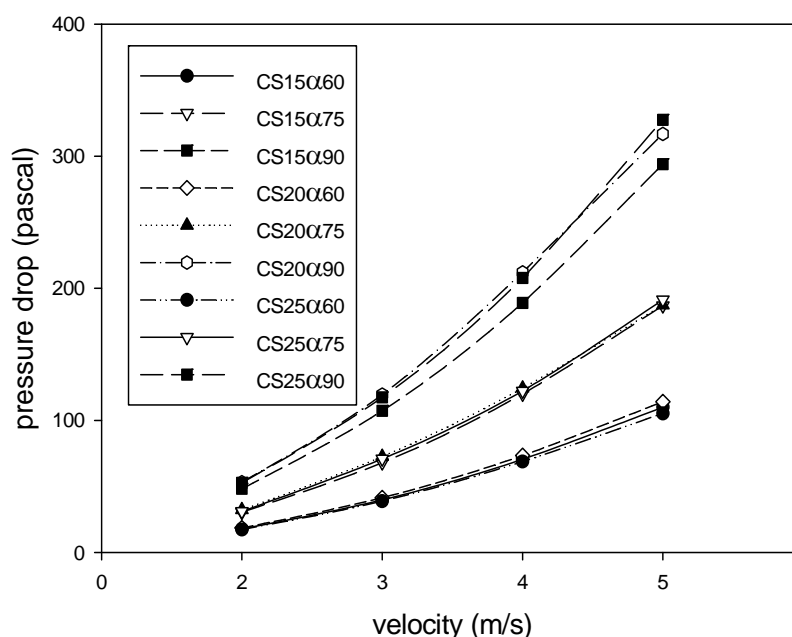
7) รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบบะบาย (Type-B) ที่มีขนาดมุมหัก 90 องศา ช่องทางไหลขนาด 15 มิลลิเมตร BS15 $\alpha$ 90 มีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 85 – 95 เปอร์เซ็นต์

8) รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบบะบาย (Type-B) ที่มีขนาดมุมหัก 75 องศา ช่องทางไหลขนาด 15 มิลลิเมตร BS15 $\alpha$ 75 มีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 81 – 92 เปอร์เซ็นต์

9) รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบบะบาย (Type-B) ที่มีขนาดมุมหัก 60 องศา ช่องทางไหลขนาด 15 มิลลิเมตร BS15 $\alpha$ 60 มีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 75 – 88 เปอร์เซ็นต์

จากข้อมูลข้างต้นทำให้สามารถตัดสินใจได้ว่ารูปแผ่นคลื่นแบบขนาดมุมหัก 75 องศา ช่องทางไหล 15 มิลลิเมตร BS15 $\alpha$ 75 มีความเหมาะสมสูงสุดในการเลือกไปใช้งานเนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพการแยกสูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่มีความดันสูญเสียประมาณ 20 ถึง 150 ปาสคาล ที่ช่วงความเร็วการไหลเข้าระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที

#### 4.7 ผลการทำนายของรูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีกระบาย (Type-C)



ภาพประกอบ 29 กราฟแสดงความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อกำหนดความเร็วการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที ของรูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีกระบาย (Type-C)

ภาพประกอบ 29 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลกับค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ จากผลการจำลองการไหลของรูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีกระบาย (Type-C) จำนวน 9 แบบ โดยกำหนดให้ความเร็วเริ่มต้นเท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 เมตรต่อวินาที ผลการจำลองการไหลพบว่ารูปแผ่นคลื่นแบบ CS25α90 มีค่าความดันสูญเสียสูงสุด และรูปแผ่นคลื่นแบบ BS25α60 มีค่าความดันสูญเสียต่ำที่สุด

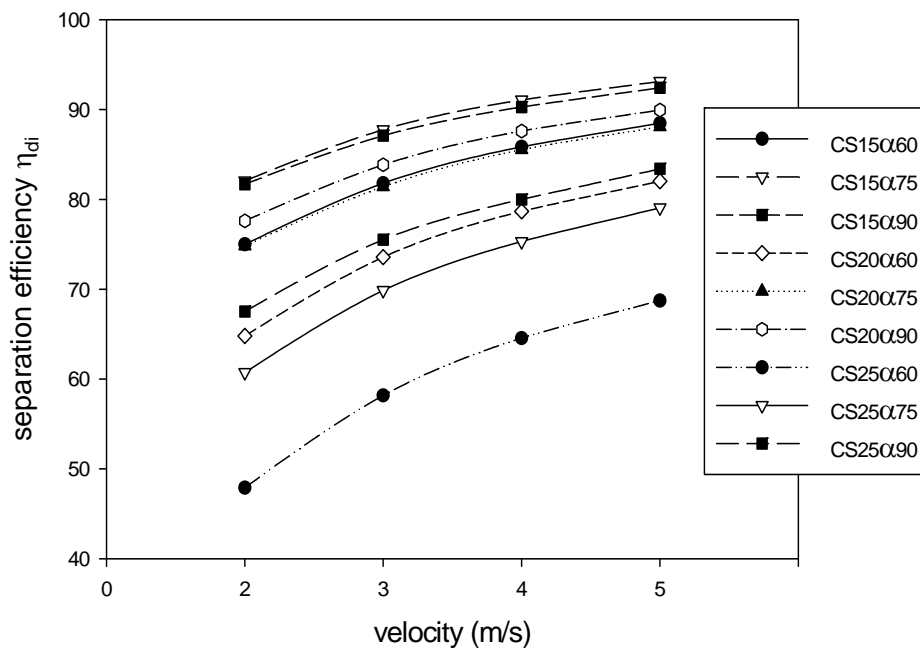
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นกับแบบทั่วไป (Type-A) และแบบเพิ่มครีกระบาย (Type-B) ที่ขนาดช่องทางไหล และมุมหักเดียวกันแล้วสามารถสรุปได้ดังนี้

1) รูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีกระบาย (Type-C) ที่มีขนาดมุมหัก 90 องศา ช่องทางไหลขนาด 25 มิลลิเมตร CS25α90 เกิดค่าความดันสูญเสียสูงกว่าแบบทั่วไป (Type-A) ประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ และเกิดค่าความดันสูญเสียต่ำกว่าแบบเพิ่มครีกระบาย (Type-B) ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 53 – 328 ปาสคาล



9) รูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบริบาย (Type-C) ที่มีขนาดมุมหัก 60 องศา ช่องทางไหลขนาด 15 มิลลิเมตร CS15 $\alpha$ 60 เกิดค่าความดันสูญเสียสูงกว่าแบบทั่วไป (Type-A) ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ และเกิดค่าความดันสูญเสียสูงกว่าแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B) ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 18 – 110 ปาสคาล

จากข้อมูลในหัวข้อ 1), 2) และ 3) เมื่อนำผลของค่าความดันสูญเสียที่ได้จากการจำลองการไหลของรูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบริบาย (Type-C) ขนาดช่องทางไหล 25 มิลลิเมตร มาทำการเปรียบเทียบกับรูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B) แล้วพบว่าค่าความดันสูญเสียของแบบปรับปรุงครีบริบายมีค่าต่ำกว่าแบบเพิ่มครีบริบายประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ แต่หากพิจารณาที่ตัวเลขจริงแล้วค่าความดันสูญเสียของรูปแบบนี้ยังคงมีค่าสูงอยู่จึงไม่เหมาะสมในการเลือกไปใช้งาน



ภาพประกอบ 30 กราฟแสดงประสิทธิภาพการแยกเมื่อกำหนดความเร็วการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที ของรูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบริบาย (Type-C)

จากภาพประกอบ 30 เป็นการแสดงค่าประสิทธิภาพการแยกที่เกิดขึ้นจากจำลองการไหลของรูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบริบาย (Type-C) จำนวน 9 แบบ โดยกำหนดให้ความเร็วเริ่มต้นเท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 เมตรต่อวินาที พบว่ารูปแผ่นคลื่นแบบ CS15 $\alpha$ 75 มีประสิทธิภาพการแยกสูงสุด และรูปแผ่นคลื่นแบบ CS25 $\alpha$ 60 มีประสิทธิภาพการแยกต่ำที่สุด

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการแยกที่เกิดขึ้นกับแบบทั่วไป (Type-A) และแบบเพิ่มครีบบะบาย (Type-B) ที่ขนาดช่องทางไหล และมุมหักเดียวกันแล้วสามารถสรุปได้ดังนี้

1) รูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบบะบาย (Type-C) ที่มีขนาดมุมหัก 90 องศา ช่องทางไหลขนาด 25 มิลลิเมตร CS25 $\alpha$ 90 มีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าแบบทั่วไป (Type-A) ประมาณ 47 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าแบบเพิ่มครีบบะบาย (Type-B) ประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 68 – 83 เปอร์เซ็นต์

2) รูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบบะบาย (Type-C) ที่มีขนาดมุมหัก 75 องศา ช่องทางไหลขนาด 25 มิลลิเมตร CS25 $\alpha$ 75 มีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าแบบทั่วไป (Type-A) ประมาณ 100 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าแบบเพิ่มครีบบะบาย (Type-B) ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 61 – 79 เปอร์เซ็นต์

3) รูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบบะบาย (Type-C) ที่มีขนาดมุมหัก 60 องศา ช่องทางไหลขนาด 25 มิลลิเมตร CS25 $\alpha$ 60 มีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าแบบทั่วไป (Type-A) ประมาณ 130 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าแบบเพิ่มครีบบะบาย (Type-B) ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 48 – 69 เปอร์เซ็นต์

4) รูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบบะบาย (Type-C) ที่มีขนาดมุมหัก 90 องศา ช่องทางไหลขนาด 20 มิลลิเมตร CS20 $\alpha$ 90 มีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าแบบทั่วไป (Type-A) ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าแบบเพิ่มครีบบะบาย (Type-B) ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 77 – 90 เปอร์เซ็นต์

5) รูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบบะบาย (Type-C) ที่มีขนาดมุมหัก 75 องศา ช่องทางไหลขนาด 20 มิลลิเมตร CS20 $\alpha$ 75 มีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าแบบทั่วไป (Type-A) ประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าแบบเพิ่มครีบบะบาย (Type-B) ประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 75 – 88 เปอร์เซ็นต์

6) รูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบบะบาย (Type-C) ที่มีขนาดมุมหัก 60 องศา ช่องทางไหลขนาด 20 มิลลิเมตร CS20 $\alpha$ 60 มีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าแบบทั่วไป (Type-A) ประมาณ 100 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าแบบเพิ่มครีบบะบาย (Type-B) ประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 65 – 82 เปอร์เซ็นต์

7) รูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบบะบาย (Type-C) ที่มีขนาดมุมหัก 90 องศา ช่องทางไหลขนาด 15 มิลลิเมตร CS15 $\alpha$ 90 มีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าแบบทั่วไป (Type-A) ประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าแบบเพิ่มครีบบะบาย (Type-B) ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 82 – 92 เปอร์เซ็นต์

8) รูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบบระบาย (Type-C) ที่มีขนาดมุมหัก 75 องศา ช่องทางไหล ขนาด 15 มิลลิเมตร CS15 $\alpha$ 75 มีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าแบบทั่วไป (Type-A) ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าแบบเพิ่มครีบบระบาย (Type-B) ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 82 – 93 เปอร์เซ็นต์

9) รูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบบระบาย (Type-C) ที่มีขนาดมุมหัก 60 องศา ช่องทางไหล ขนาด 15 มิลลิเมตร CS15 $\alpha$ 60 มีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าแบบทั่วไป (Type-A) ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่าแบบเพิ่มครีบบระบาย (Type-B) ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 75 – 88 เปอร์เซ็นต์

จากข้อมูลข้างต้นทำให้สามารถตัดสินใจได้ว่ารูปแผ่นคลื่นแบบขนาดมุมหัก 75 องศา ช่องทางไหล 15 มิลลิเมตร CS15 $\alpha$ 75 มีความเหมาะสมสูงสุดในการเลือกไปใช้งานเนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพการแยกสูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่มีความดันสูญเสียประมาณ 30 ถึง 180 ปาสคาล ที่ช่วงความเร็วการไหลเข้าระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที

#### 4.8 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล

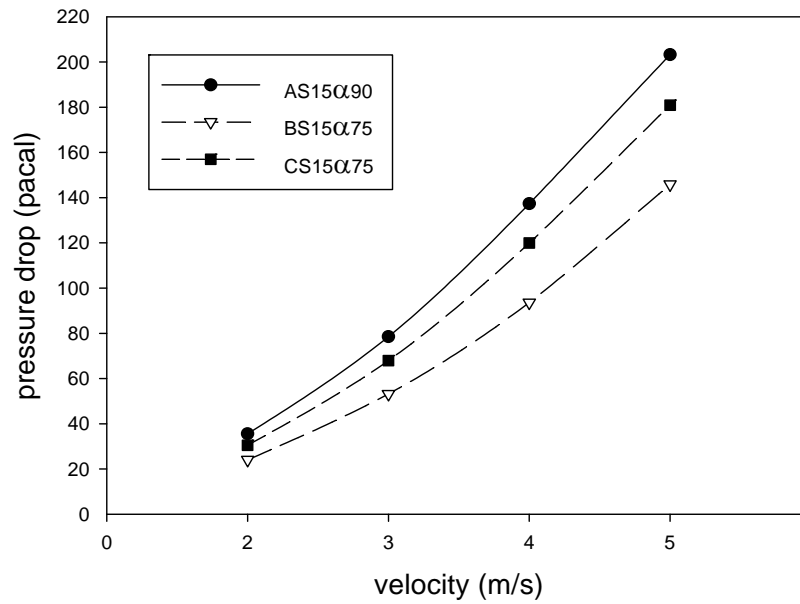
จากการเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลที่ผ่านมาของเครื่องแยกของรูปแผ่นคลื่น 3 แบบ และได้พิจารณาเลือกรูปแผ่นคลื่นที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละรูปแบบไว้แล้วคือ

1. รูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A) เลือกใช้ขนาดช่อง 15 มิลลิเมตร มุมหัก 90 องศา (AS15 $\alpha$ 90) เนื่องจากมีประสิทธิภาพการแยกสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบเดียวกัน และมีค่าความดันสูญเสียอยู่ประมาณ 30 ถึง 200 ปาสคาล ที่ช่วงความเร็วการไหลเข้าระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที

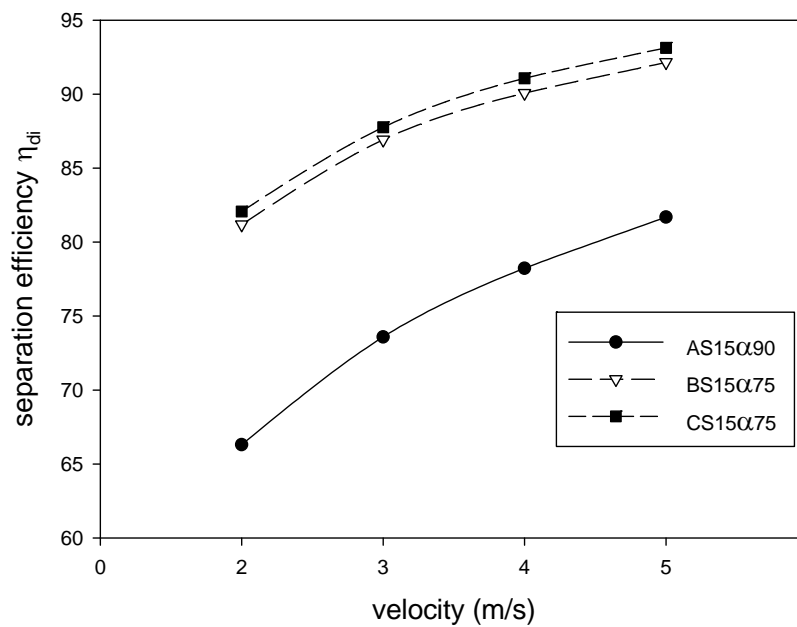
2. รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบบระบาย (Type-B) เลือกใช้ขนาดช่อง 15 มิลลิเมตร มุมหัก 75 องศา (BS15 $\alpha$ 75) เนื่องจากมีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความดันสูญเสียอยู่ประมาณ 20 ถึง 150 ปาสคาล ที่ช่วงความเร็วการไหลเข้าระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที

3. รูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบบระบาย (Type-C) เลือกใช้ขนาดช่อง 15 มิลลิเมตร มุมหัก 75 องศา (CS1 $\alpha$ D75) เนื่องจากมีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความดันสูญเสียอยู่ประมาณ 30 ถึง 180 ปาสคาล ที่ช่วงความเร็วการไหลเข้าระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที

ซึ่งค่าประสิทธิภาพการแยก และค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบของรูปแบบแผ่นคลื่นที่เลือกใช้ได้แสดงดังภาพประกอบ 31 และ 32



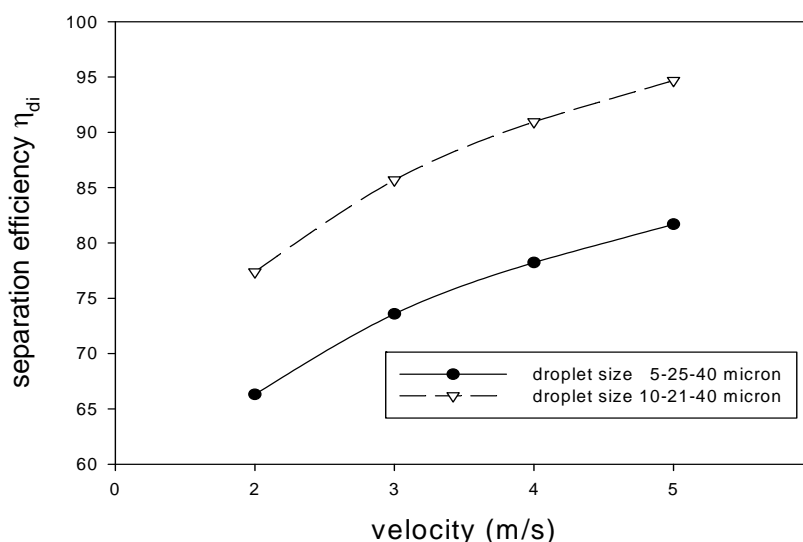
ภาพประกอบ 31 กราฟเปรียบเทียบความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อกำหนดความเร็วการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที ของรูปแผ่นคลื่น 3 แบบ



ภาพประกอบ 32 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกเมื่อกำหนดความเร็วการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันระหว่าง 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที ของรูปแผ่นคลื่น 3 แบบ ที่ขอบเขตขนาดอนุภาคของเหลว 5-40  $\mu\text{m}$

ในการพิจารณาเลือกรูปแบบแผ่นคลื่นไปใช้งานจริง ผู้ใช้อาจให้ความสำคัญกับค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบมากกว่าประสิทธิภาพการแยก โดยอาจเห็นว่าจำนวนละอองของเหลวที่หลุดลอดหากมีขนาดเล็กกว่า  $10\ \mu\text{m}$  สามารถรับได้ไม่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรลดลงมากนัก ดังนั้นจึงได้นำรูปแบบแผ่นคลื่นทั้ง 3 แบบที่เลือกไว้มาทำการศึกษาเพิ่มเติม โดยกำหนดให้ขนาดของละอองของเหลวเล็กสุด  $10\ \mu\text{m}$  ขนาดใหญ่สุด  $40\ \mu\text{m}$  และมีขนาดเฉลี่ย  $21\ \mu\text{m}$  (Jianzhi Zhoa. 2005) มาทำการจำลองการไหลแล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพการแยกที่ได้กับเงื่อนไขเดิมที่ขอบเขตขนาดละอองของเหลวเล็กสุด  $5\ \mu\text{m}$  ขนาดใหญ่สุด  $40\ \mu\text{m}$  และมีขนาดเฉลี่ย  $25$  ซึ่งมีผลการจำลองการไหลแสดงดังนี้

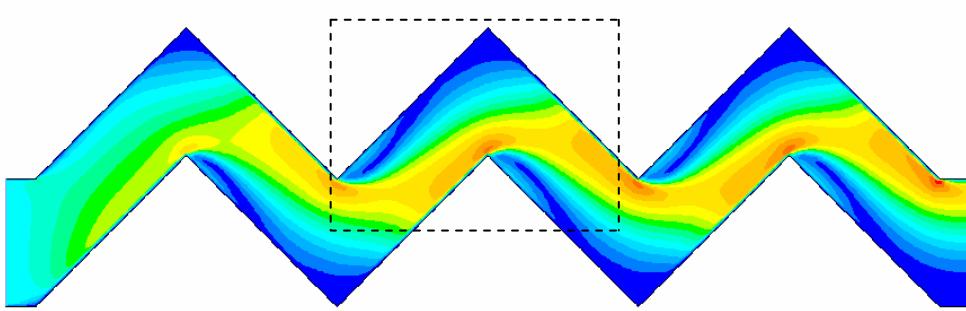
#### 4.8.1 ขนาดช่อง 15 มิลลิเมตร มุมหัก 90 องศา (AS15 $\alpha$ 90) Type-A



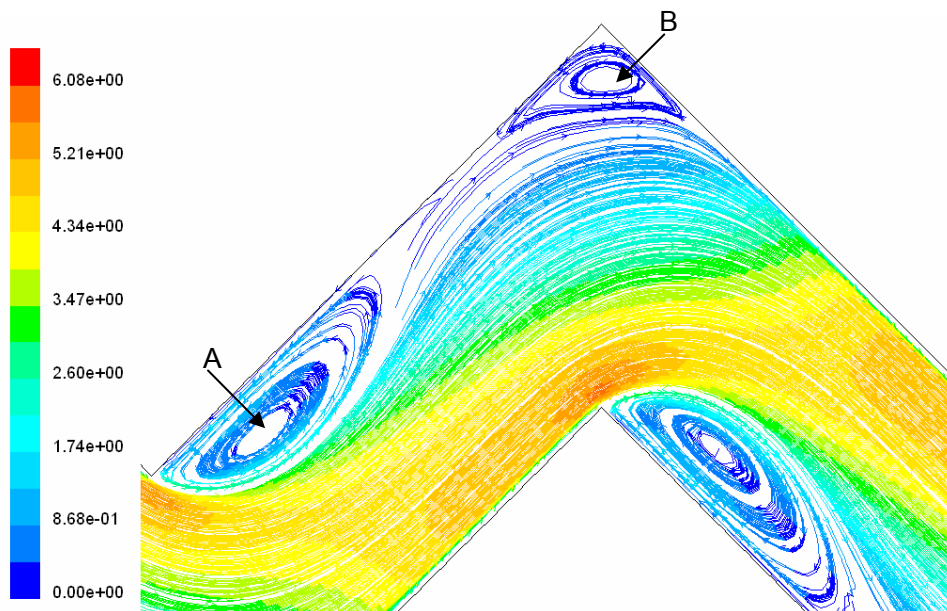
ภาพประกอบ 33 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกของรูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A)

AS15 $\alpha$ 90 เมื่อกำหนดขอบเขตขนาดอนุภาคของเหลวที่ต่างกันคือ 5-40 และ 10-40  $\mu\text{m}$

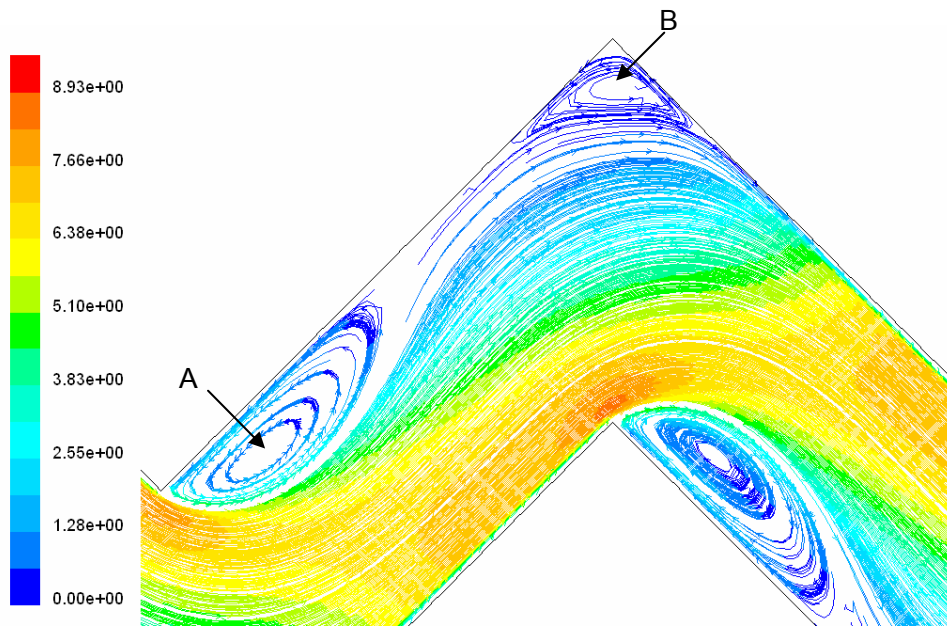
ผลจากการจำลองการไหลในภาพประกอบ 33 เมื่อเปลี่ยนขอบเขตขนาดของอนุภาคของเหลวอยู่ระหว่าง  $10\text{-}40\ \mu\text{m}$  พบว่ามีประสิทธิภาพการแยกเพิ่มขึ้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วการไหลเข้า 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีประสิทธิภาพการแยกประมาณ 78 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ โดยมีรูปร่างความเร็วทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในรูปแผ่นคลื่น และรายละเอียดเส้นลวดลาย (Contour) ของความเร็วบริเวณจุดที่เกิดการหมุนวนที่ค่า Re ต่าง ๆ แสดงดังภาพประกอบ 34 ถึง 38



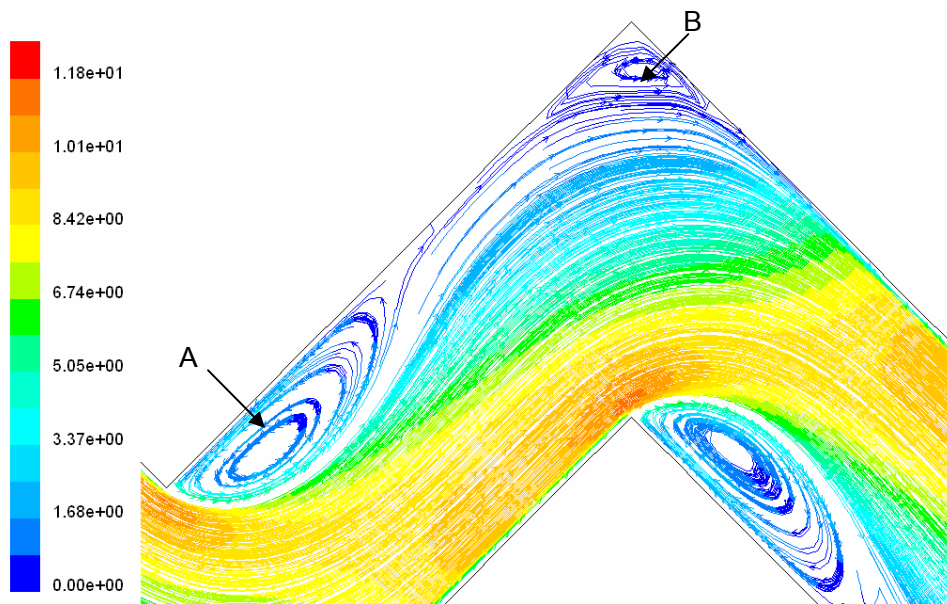
ภาพประกอบ 34 แสดงรูปร่างความเร็วที่เกิดขึ้นภายในรูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A) AS15 $\alpha$ 90



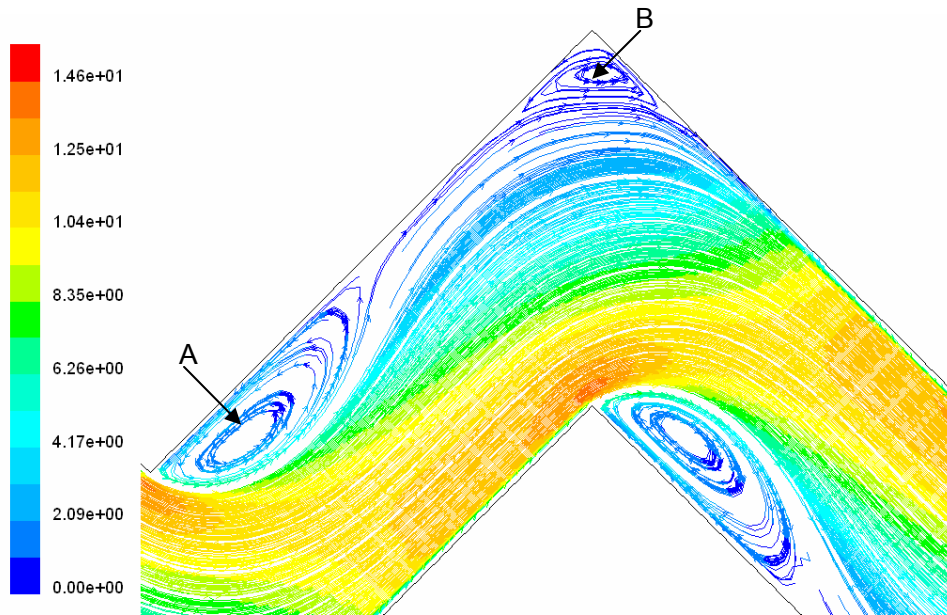
ภาพประกอบ 35 รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A) AS15 $\alpha$ 90 สำหรับ  $Re = 149,000$  (Not to scale)



ภาพประกอบ 36 รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคั่นแบบ  
ทั่วไป (Type-A) AS15 $\alpha$ 90 สำหรับ  $Re = 223,000$  (Not to scale)



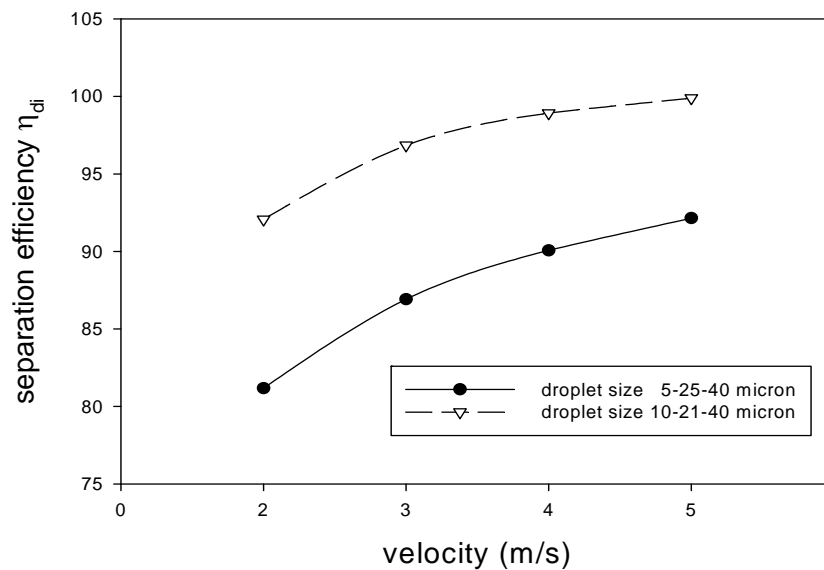
ภาพประกอบ 37 รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคั่นแบบ  
ทั่วไป (Type-A) AS15 $\alpha$ 90 สำหรับ  $Re = 298,000$  (Not to scale)



ภาพประกอบ 38 รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณมุมของรูปแผ่นคลื่นแบบ  
ทั่วไป (Type-A) AS15 $\alpha$ 90 สำหรับ  $Re = 372,000$  (Not to scale)

จากการเปรียบเทียบรูปร่างความเร็วผลการจำลองการไหลสำหรับการไหลปั่นป่วนของรูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A) AS15 $\alpha$ 90 ระหว่างค่า  $Re$  เท่ากับ 149,000, 223,000, 298,000 และ 372,000 ดังภาพประกอบที่ 35 ถึง 38 ตามลำดับ พบว่าเกิดการแยกไหลและเกิดหมุนวนของการไหลด้านปลายลม (Downstream) ของมุมหัก (จุด A) และบริเวณมุมหัก (จุด B) โดยขนาดการหมุนวนค่อย ๆ สั้นลงตามอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า  $Re$  ในการไหลของของไหลค่า  $Re$  คือตัวชี้วัดค่าความปั่นป่วนของการไหล ดังนั้นเมื่อ  $Re$  มีค่าสูงขึ้นความสามารถในการแพร่กระจายโมเมนตัมไปสู่ผนังจะเกิดขึ้นมากและรวดเร็ว มีผลทำให้การนำละอองของเหลวไปสู่ผนังเกิดขึ้นมากกว่า ในขณะที่เดียวกันบริเวณดังกล่าวจะมีความเร็วการไหลเข้าใกล้ศูนย์ นั่นทำให้ละอองของเหลวเกิดการตกกระทบ และยึดเกาะกับผนังได้มากขึ้นซึ่งหมายถึงการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการแยกนั่นเอง

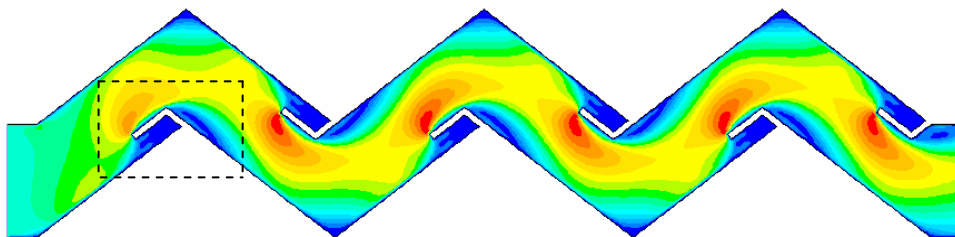
#### 4.8.2 ขนาดช่อง 15 มิลลิเมตร มุมหัก 75 องศา (BS15 $\alpha$ 75) Type-B



ภาพประกอบ 39 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกของรูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีกระบาย

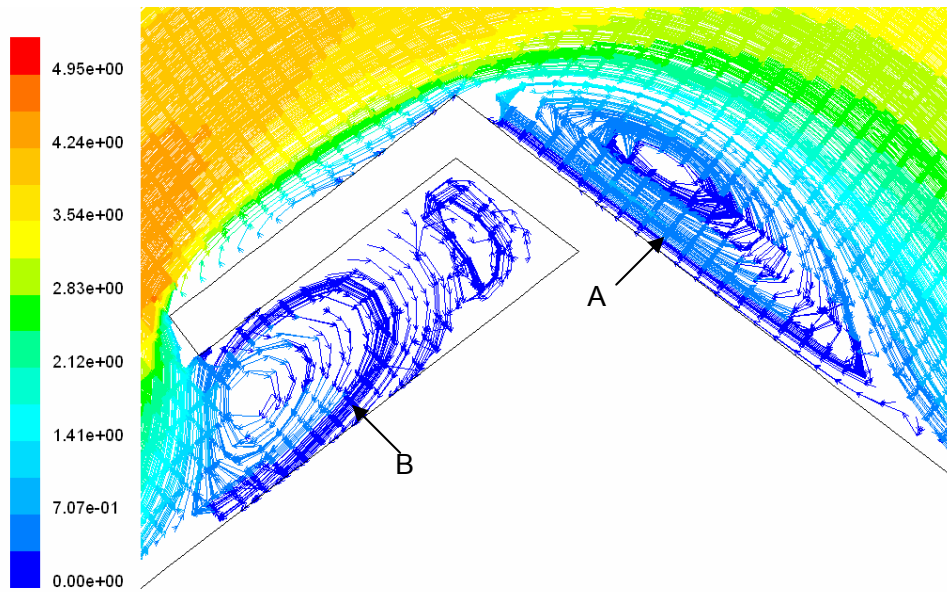
(Type-B) BS15 $\alpha$ 75 เมื่อกำหนดขนาดอนุภาคของเหลวที่ต่างกันคือ 5-40 และ 10-40  $\mu\text{m}$

ผลจากการจำลองการไหลในภาพประกอบ 39 เมื่อเปลี่ยนขอบเขตขนาดของอนุภาคของเหลวอยู่ระหว่าง 10-40  $\mu\text{m}$  พบว่ามีประสิทธิภาพการแยกเพิ่มขึ้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วไหลเข้า 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีประสิทธิภาพการแยกประมาณ 92 ถึง 98 เปอร์เซ็นต์ โดยมีรูปร่างความเร็วทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในรูปแผ่นคลื่น และรายละเอียดเส้นลวดลาย (Contour) ของความเร็วบริเวณจุดที่เกิดการหมุนวนที่ค่า Re ต่างๆ แสดงดังภาพประกอบ 40 ถึง 44

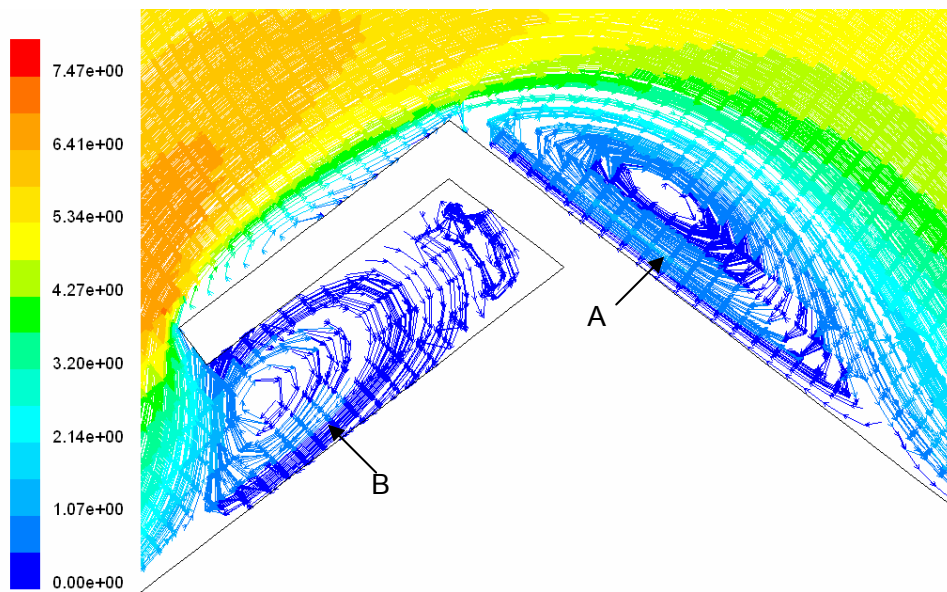


ภาพประกอบ 40 แสดงรูปร่างความเร็วที่เกิดขึ้นภายในรูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีกระบาย (Type-B)

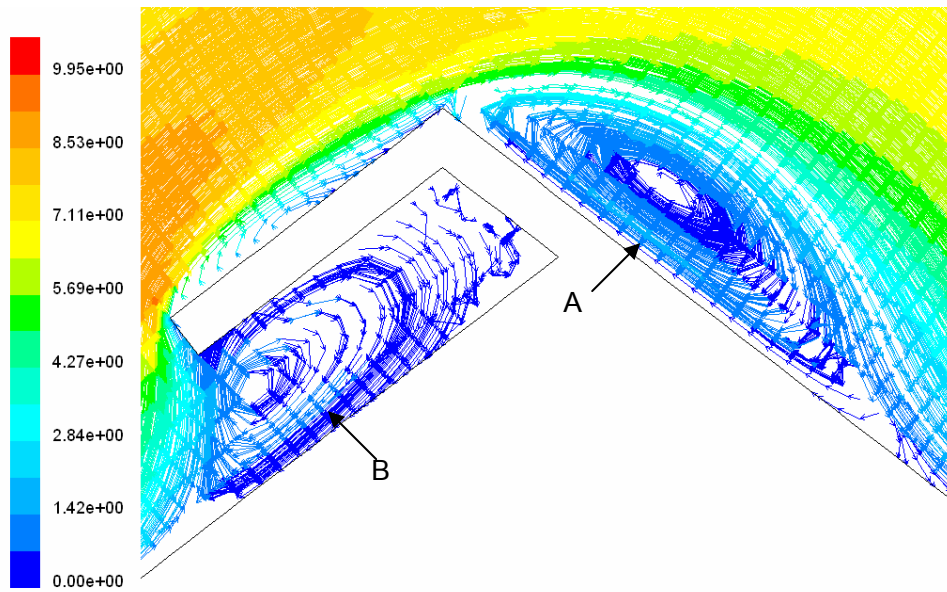
BS15 $\alpha$ 75



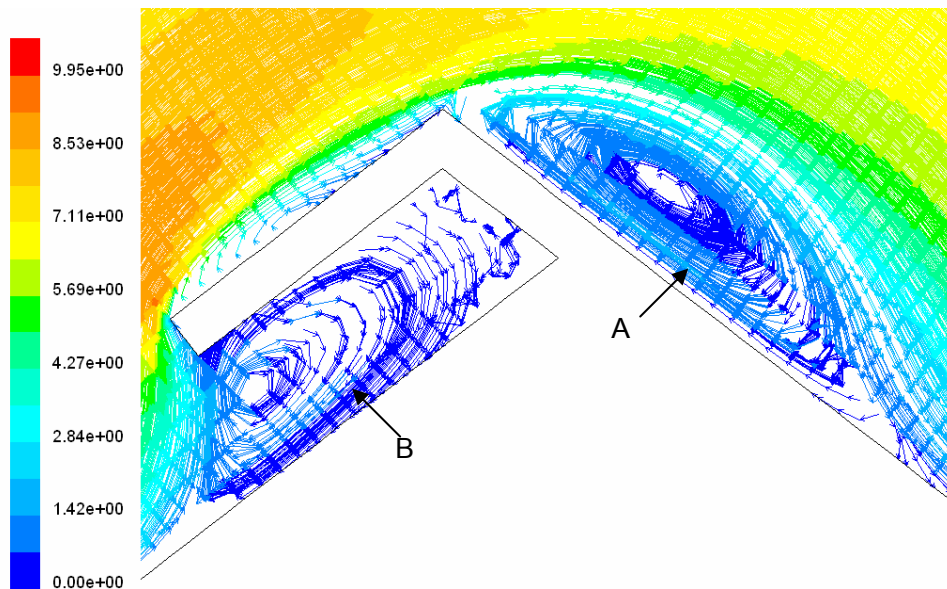
ภาพประกอบ 41 รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคั่นแบบ  
เพิ่มครีบริบาย (Type-B) BS15 $\alpha$ 75 สำหรับ  $Re = 149,000$  (Not to scale)



ภาพประกอบ 42 รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคั่นแบบ  
เพิ่มครีบริบาย (Type-B) BS15 $\alpha$ 75 สำหรับ  $Re = 223,000$  (Not to scale)



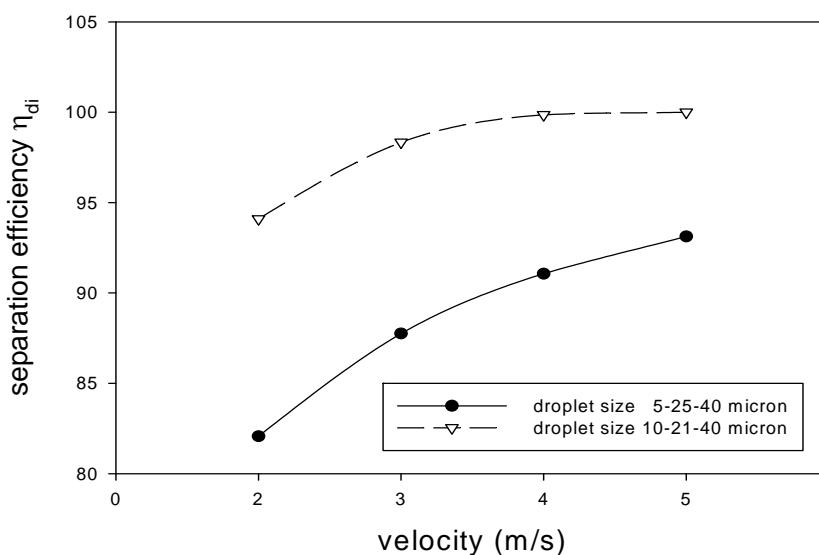
ภาพประกอบ 43 รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคั่นแบบ  
เพิ่มครีบริบาย (Type-B) BS15 $\alpha$ .75 สำหรับ  $Re = 298,000$  (Not to scale)



ภาพประกอบ 44 รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคั่นแบบ  
เพิ่มครีบริบาย (Type-B) BS15 $\alpha$ .75 สำหรับ  $Re = 372,000$  (Not to scale)

จากการเปรียบเทียบรูปร่างความเร็วผลการจำลองการไหลสำหรับการไหลปั่นป่วนของรูปแบบคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B) BS15 $\alpha$ 75 ระหว่างค่า Re เท่ากับ 149,000, 223,000, 298,000 และ 372,000 ดังภาพประกอบที่ 40 ถึง 44 ตามลำดับ พบว่าเกิดการแยกไหลและเกิดการหมุนวนของการไหล บริเวณด้านปลายลม (Downstream) ของมุมหัก (จุด A) และบริเวณภายในครีบริบาย (จุด B) ทั้ง 2 จุด มีขนาดการหมุนวนค่อยๆ ลดลงตามอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Re ซึ่งสอดคล้องกับแบบทั่วไป (Type-A) บริเวณดังกล่าวจะมีความสามารถในการแพร่กระจายโมเมนตัมไปสู่ผนังสูงและรวดเร็ว มีผลทำให้การนำละอองของเหลวไปสู่ผนังเกิดขึ้นมาก ในขณะที่เดียวกันบริเวณนี้ยังมีความเร็วการไหลเข้าใกล้ศูนย์ประกอบกับเมื่อมีการเพิ่มครีบริบายช่วยกักเก็บปริมาณของเหลว ทำให้ลดการหลุดลอดออกของอนุภาคของเหลว จึงทำให้รูปแบบแผ่นคลื่นชนิดนี้มีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่แบบทั่วไป (Type-A)

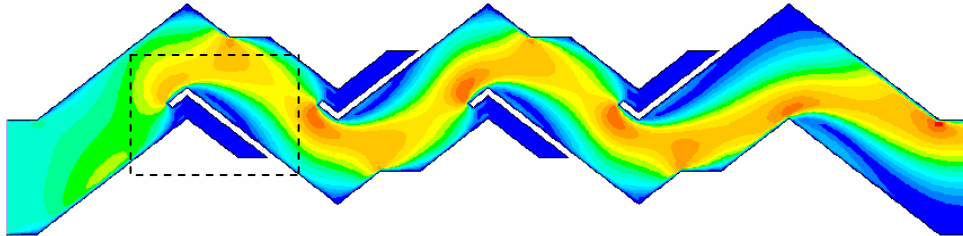
#### 4.8.3 ขนาดช่อง 15 มิลลิเมตร มุมหัก 75 องศา (CS15 $\alpha$ 75) Type-C



ภาพประกอบ 45 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกของรูปแบบปรับปรุงครีบริบาย

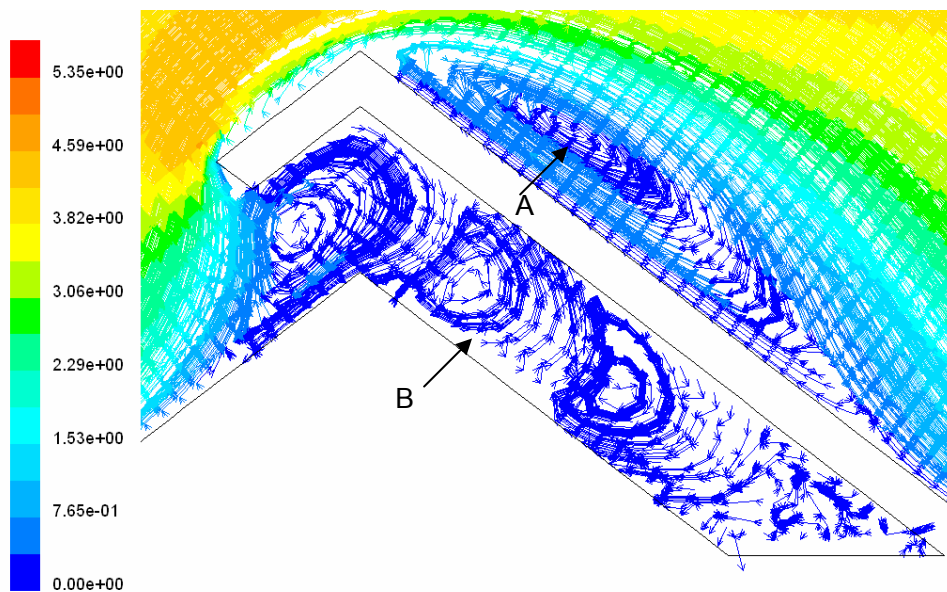
(Type-C) CS15 $\alpha$ 75 เมื่อกำหนดขอบเขตของขนาดอนุภาคของเหลวที่ต่างกัน 5-40 และ 10-40  $\mu\text{m}$

ผลจากการจำลองการไหลในภาพประกอบ 45 เมื่อเปลี่ยนขอบเขตขนาดของอนุภาคของเหลวอยู่ระหว่าง 10-40  $\mu\text{m}$  พบว่ามีประสิทธิภาพการแยกเพิ่มขึ้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วไหลเข้า 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีประสิทธิภาพการแยกประมาณ 94 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ โดยมีรูปร่างความเร็วทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในรูปแบบคลื่น และรายละเอียดเส้นลวดลาย (Contour) ของความเร็วบริเวณจุดที่เกิดการหมุนวนที่ค่า Re ต่างๆ แสดงดังภาพประกอบ 46 ถึง 50

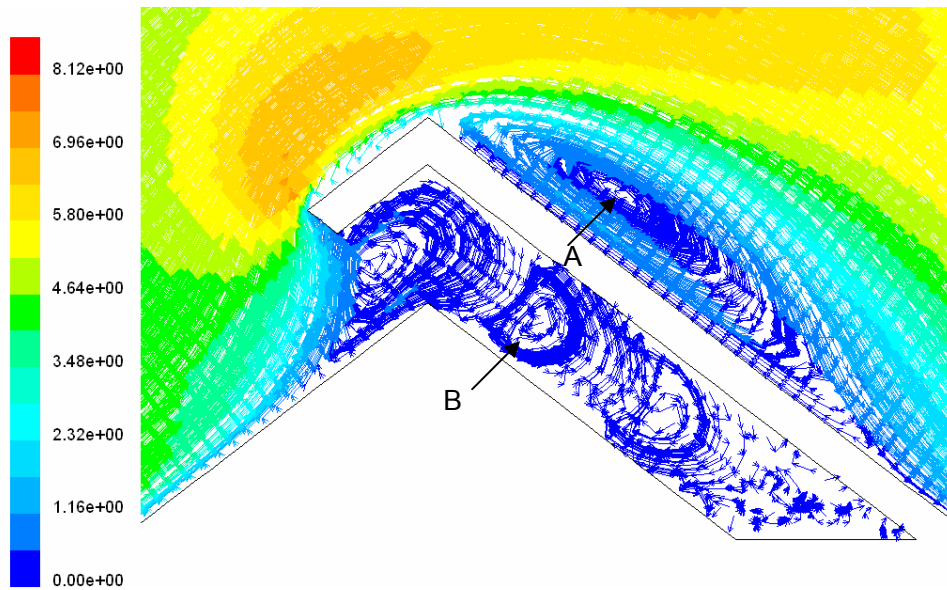


ภาพประกอบ 46 แสดงรูปร่างความเร็วที่เกิดขึ้นภายในรูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีกระบาย (Type-C)

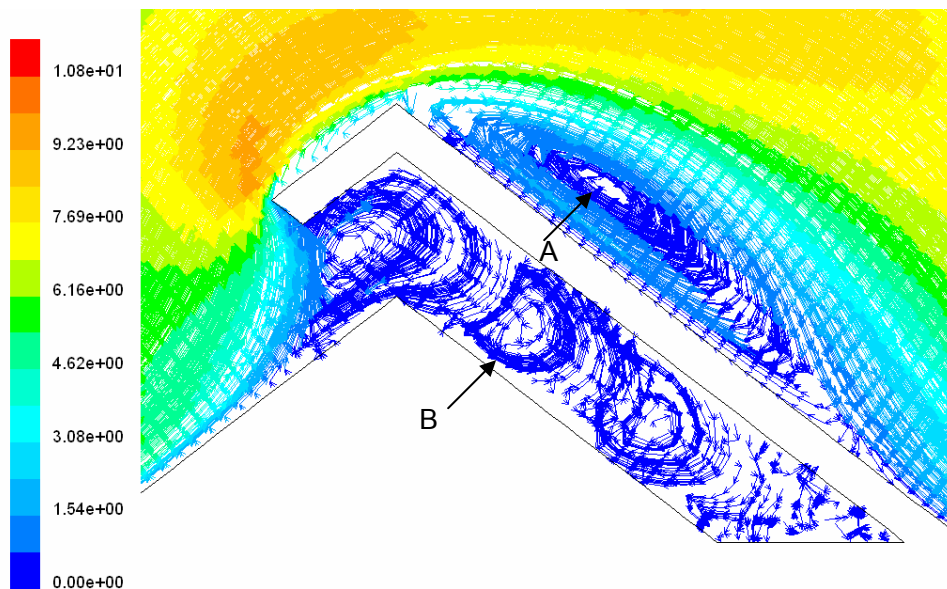
CS15 $\alpha$ 75



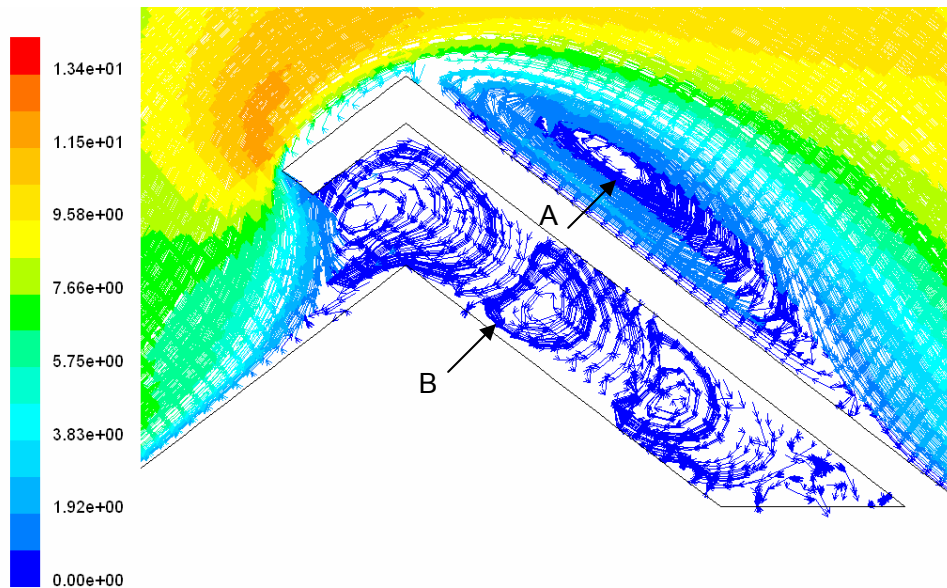
ภาพประกอบ 47 รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีกระบาย (Type-C) CS15 $\alpha$ 75 สำหรับ  $Re = 149,000$  (Not to scale)



ภาพประกอบ 48 รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณมุมของรูปแผ่นคั่นแบบ  
ปรับปรุงครีบริบาย (Type-C) CS15 $\alpha$ 75 สำหรับ  $Re = 223,000$  (Not to scale)



ภาพประกอบ 49 รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณมุมของรูปแผ่นคั่นแบบ  
ปรับปรุงครีบริบาย (Type-C) CS15 $\alpha$ 75 สำหรับ  $Re = 298,000$  (Not to scale)



ภาพประกอบ 50 รายละเอียดเส้นลวดลายของความเร็วในช่วงบริเวณหมุนวนของรูปแผ่นคี่นแบบ  
ปรับปรุงครีบริบาย (Type-C) CS15 $\alpha$ 75 สำหรับ  $Re = 372,000$  (Not to scale)

จากการเปรียบเทียบรูปร่างความเร็วผลการจำลองการไหลสำหรับการไหลปั่นป่วนของรูปแผ่นคี่นแบบปรับปรุงครีบริบาย (Type-C) CS15 $\alpha$ 75 ระหว่างค่า  $Re$  เท่ากับ 149,000, 223,000, 298,000 และ 372,000 ดังภาพประกอบที่ 45 ถึง 50 ตามลำดับ พบว่าเกิดการแยกไหลและเกิดการหมุนวนของการไหลบริเวณด้านปลายลม (Downstream) ของมุมหัก (จุด A) และบริเวณภายในครีบริบาย (จุด B) ทั้ง 2 จุด มีขนาดการหมุนวนค่อยๆ สั้นลงตามอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า  $Re$  ซึ่งสอดคล้องกับแบบทั่วไป (Type-A) และแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B) บริเวณดังกล่าวจะมีความสามารถในการแพร่กระจายโมเมนตัมไปสู่ผนังสูงและรวดเร็ว มีผลทำให้การนำละอองของเหลวไปสู่ผนังเกิดขึ้นมาก ในขณะที่เดียวกันบริเวณนี้ยังมีความเร็วการไหลเข้าใกล้ศูนย์ประกอบกับเมื่อมีการปรับปรุงครีบริบายช่วยกักเก็บปริมาณของเหลวเป็นช่องเล็กกว่าแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B) ทำให้ลดการหลุดลอดออกของอนุภาคของเหลว จึงทำให้รูปแบบแผ่นคี่นชนิดนี้มีประสิทธิภาพการแยกสูงกว่แบบทั่วไป (Type-A) และแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B)

สนามการไหลภายในเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่นแต่ละแบบทำให้เกิดปรากฏการณ์ของการแยกไหล (Separated flow) และเกิดบริเวณการหมุนวนของของไหลที่ต่างกัน ซึ่งการแยกไหลและการหมุนวนเกิดขึ้นบริเวณมุมหัก และภายในครีบริบาย ดังแสดงในภาพประกอบของแต่ละรูปแบบจากการเปรียบเทียบรูปร่างความเร็วของแต่ละรูปแบบแผ่นคลื่น พบว่าบริเวณการหมุนวนนั้นจะเกิดความซับซ้อนของ Stream line โครงสร้าง Eddy และ Turbulence intensity สิ่งเหล่านี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน และการสูญเสียความดันในระบบ เพราะฉะนั้นเมื่อพิจารณาเชิงทฤษฎีการแยกไหลและการหมุนวนจึงเป็นข้อมูลสำคัญที่จะพิจารณาในการออกแบบใช้งานชุดอุปกรณ์เครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลื่นต่อไป

จากรายละเอียดเส้นลวดลายรูปร่างความเร็วภายในครีบริบายของรูปแบบแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B) และแบบปรับปรุงครีบริบาย (Type-C) พบว่าบริเวณดังกล่าวมีการไหลวนดีกว่า และมีความเร็วการไหลเข้าใกล้ศูนย์ และยังมีครีบริบายป้องกันการไหลออกของของเหลวจึงเหมาะเป็นจุดที่ละอองของเหลวเกิดการรวมตัว และตกตะกอนลงสู่ส่วนกักเก็บ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรายละเอียดรูปร่างความเร็วของรูปแบบแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A) แล้วพบว่าการไหลวนและความเร็วการไหลเข้าใกล้ศูนย์จะเกิดที่บริเวณมุมหักเข้าและหลังมุมหักของแผ่นคลื่น แต่เนื่องจากไม่มีครีบริบายช่วยกักเก็บจึงอาจทำให้ละอองของเหลวเกิดการไหลหลุดลอดออกได้สูงกว่าแบบมีครีบริบายส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกที่ได้ไม่ดีนักเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบที่มีครีบริบาย

## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาออกแบบชุดอุปกรณ์แยกของเหลวออกจากก๊าซ โดยใช้หลักการทางพลศาสตร์ของไหลแก้ปัญหาคารไหลแบบปั่นป่วนในช่องทางไหลของเครื่องแยกของแบบแผ่นคลื่น โดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\epsilon$  model ในการศึกษาได้เลือกใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เชิงพาณิชย์ FLUENT และประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมแก้ไขปัญหาคารไหล โดยใช้ QUICK scheme ในการประมาณค่า  $\phi$  ที่บริเวณผิวของปริมาตรควบคุม ในการทำนายนี้สามารถแบ่งรูปแบบของแผ่นคลื่นออกเป็น 3 ประเภท คือ รูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A) รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B) และรูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบริบาย (Type-C) ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 จากผลการทำนายการไหล โดยพิจารณาถึงประสิทธิภาพการแยกและความดันสูญเสียควบคู่กันสามารถเลือกรูปแผ่นคลื่นที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละแบบ และสรุปผลตามลักษณะรูปแบบแผ่นคลื่นได้ดังนี้

1. รูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไป (Type-A) AS15 $\alpha$ 90 ความเร็วการไหล 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที มีความเหมาะสมสูงสุดเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพ และความดันสูญเสียไม่เกิน 200 ปาสคาล ข้อดีของรูปแบบนี้คือมีรูปแบบโครงสร้างไม่ซับซ้อนทำให้ง่ายในการจัดสร้าง ข้อเสียคือไม่เหมาะสำหรับความเร็วการไหลสูงๆ เนื่องจากเมื่ออัตราความเร็วการไหลสูงทำให้ค่าความดันสูญเสียสูงขึ้นด้วย

2. รูปแผ่นคลื่นแบบเพิ่มครีบริบาย (Type-B) BS15 $\alpha$ 75 มีความเหมาะสมสูงสุดสำหรับช่วงความเร็วการไหล 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที เมื่อพิจารณาที่ความดันสูญเสียไม่เกิน 200 ปาสคาล สำหรับความเร็วการไหลที่สูงกว่านี้ผู้ออกแบบอาจเลือกใช้ขนาดมุมหักที่น้อยลงเพื่อควบคุมค่าความดันสูญเสียให้ลดลง ข้อดีของรูปแบบนี้คือมีประสิทธิภาพการทำงานสูง สามารถใช้งานในช่วงความเร็วการไหลสูงๆ ได้ โดยความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นไม่สูงมากนัก ข้อเสียคือมีรูปแบบโครงสร้างที่ซับซ้อนทำให้ยากในการออกแบบจัดสร้างซึ่งอาจส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการจัดสร้างสูงขึ้นด้วย

3. รูปแผ่นคลื่นแบบปรับปรุงครีบริบาย (Type-C) CS15 $\alpha$ 75 มีความเหมาะสมสำหรับช่วงความเร็วการไหล 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาทีเมื่อพิจารณาที่ความดันสูญเสียไม่เกิน 200 ปาสคาล สำหรับความเร็วการไหลที่สูงกว่านี้ผู้ออกแบบอาจเลือกใช้ขนาดมุมหักที่น้อยลงเพื่อควบคุมค่าความดันสูญเสียให้ลดลง ข้อดีของรูปแบบนี้คือมีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบอื่นๆ ข้อเสียคือมีรูปแบบโครงสร้างที่ซับซ้อนทำให้ยากในการออกแบบจัดสร้างซึ่งอาจส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการจัดสร้างสูงขึ้นด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยต่อไป

1. ควรทำการศึกษาแบบจำลองความปั่นป่วนอื่นๆ เปรียบเทียบกัน เช่น k-omega model และ Reynolds stress model ในการทำนายการไหลแบบปั่นป่วน
2. ควรมีการใช้ในการทำนายการไหลที่เป็นการไหลแบบ 3 มิติ หรือ ปัญหาการไหลที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น ปัญหาการไหลที่สถานะไม่คงตัว (Unsteady state)
3. เพิ่มการออกแบบรูปทรงของแผ่นคลีนให้ความหลากหลายมากขึ้น
4. เพื่อความถูกต้องของการออกแบบเครื่องแยกละอองแบบแผ่นคลีนควรมีการทดลองเปรียบเทียบกับงานวิจัยประกอบด้วย

บรรณานุกรม

## บรรณานุกรม

1. ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2538). *ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
2. \_\_\_\_\_. (2544). *ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการคำนวณพลศาสตร์ของไหล*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
3. Azzopardi, B.J.; & Sanullah, K.S. (2002). *Re-entrainment in wave-plate mist eliminators*. UK: Chemical Engineering Science.
4. Courant, R.; Isaacson, E.; & Rees, M. (1952). *On the Solution of Non-Linear Hyperbolic Differential Equations by Finite Differences*. Communications on Pure and Applied Mathematics.
5. Durst, F.; & Tropea, C. (1982). *Flows Over Two-Dimensional Backward-Facing Steps*. Structure of Complex Turbulent Flows IUTAM Symposium.
6. FLUENT. (2005). *Fluent 6.2 User's guide*. Fluent Inc. Lebanon. NH.
7. Fox, R.W.; & McDonald, A.T. (1994). *Introduction to Fluid Mechanics*. Fourth Edition. New York: John Wiley & Sons.
8. Harlow, F.H.; & Nakayama, P.I. (1968). *Transport of Turbulence Energy Decay Rate*. Report LA-3854: Los Alamos Science Lab University of California.
9. James, P.W.; Azzopardi B.J.; Wang, Y.; & Hughes J.P. (2005). *A Model for Liquid Film Flow and Separation in a Wave-plate Mist Eliminator*. UK: Chemical Engineering Research and design.
10. James, P.W.; Wang, B.J. Azzopardi, Hughes, J.P. (2003). *The Role of Drainage Channels in the Performance of Wave-Plate Mist Eliminator*. UK: Chemical Engineering Research and design.
11. Jianzhi Zhao.; Baosheng Jin.; & Zhoaping Zhong. (2005). *Optimum Analysis of Wet Flue Gas Desulphurization*. Nanjing, China: Key Laboratory of Clean Coal Generation and Combustion Technology of Ministry of Education, Southeast University.
12. Kolmogorov A.N. (1942). *Equations of Turbulent Motion of an Incompressible Fluid*. USSR Izvestia: Academy of Sciences, Physics 6.
13. Launder, B.E.; & Spalding, D.B. (1974). *The Numerical Computation of Turbulent Flows*. Computational Methods for Applied Mechanical Engineering 3.

14. Patankar, S.V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Minnesota: Hemisphere Publishing Corporation.
15. Rotta, J.C. (1968). *Über eine Methode zur Berechnung turbulenter Scherströmungen*. Report 69. A14, Aerodynamische Versuchsanstalt Göttingen.
16. Saffman, P.G. (1970). *A Model for Inhomogeneous Turbulent Flow*. London A317: Proc. Roy. Soc.
17. Sakamoto, H.; & Hanui, H. (1988). Effect of Free-Stream Turbulence on Characteristics of Fluctuating Forces Acting on Two Square Prisms in Tandem Arrangement. *Journal of Fluids Engineering*. 110.
18. Schofield, W.H.; & Logan, E. (1990). Turbulent Shear Flow Over Surface Mounted Obstacles. *Journal of Fluids Engineering*. 112.
19. Sloan, D.G.; Smith, P.G.; & Smoot, L.D. (1986). Modelling of Swirl in Turbulent Flow System. *Progress in Energy Combustion Science*. 12.
20. Spalding, D.B. (1972). A Novel Finite-Difference Formulation for Differential Expressions Involving Both First and Second Derivatives. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 4.
21. Speziale, C.G. (1987). On Non-Linear  $k - \varepsilon$  and  $k - \omega$  Models of Turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*. 178.
22. Speziale, C.G.; Abid, R.; & Anderson, E.C. (1990). A Critical Evaluation of Two-Equation Models for Near Wall Turbulence. AIAA-90-1481.
23. Versteeg, H.K.; & Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. London: Longman Scientific & Technical.
24. Wilcox, C.D. (1993). *Turbulence Modeling for CFD*. California: DCW Industries Inc.
25. Yi Wang.; & James, P.W. (1998). *The Calculation of Wave-Plate Demister Efficiencies Using Numerical Simulation of the Flow Field and Droplet Motion*. UK: Chemical Engineering Research and design.
26. Yi Wang.; & James, P.W. (1999). *Assessment of an Eddy-Interaction Model and Its Refinements Using Predictions of Droplet Deposition in a Wave-Plate Demister*. UK: Chemical Engineering Research and design.

ภาคผนวก

## คำอธิบายสัญลักษณ์

### สัญลักษณ์

$C_D$	หมายถึง	สัมประสิทธิ์แรงจุดลาก
$C_\mu, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$	หมายถึง	ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน $k - \varepsilon$ Model
$D$	หมายถึง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ
$F_D$	หมายถึง	แรงจุดลากต่อหน่วยของอนุภาค
$f$	หมายถึง	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของท่อ
$I$	หมายถึง	ค่าความเข้มข้นของการปั่นป่วน
$k$	หมายถึง	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
$m$	หมายถึง	น้ำหนักของอนุภาคของเหลว
$p$	หมายถึง	ความดัน
$P$	หมายถึง	The turbulent production term ของสมการ $k$
$Q$	หมายถึง	อัตราการไหลของก๊าซ
$Re$	หมายถึง	ค่าตัวเลขเรย์โนลด์
$S_\phi$	หมายถึง	Source term
$T$	หมายถึง	อุณหภูมิของก๊าซ
$t$	หมายถึง	เวลา
$u$	หมายถึง	เป็นความเร็วของของไหล

### สัญลักษณ์กรีก

$\rho$	หมายถึง	ความหนาแน่น
$\mu$	หมายถึง	ความหนืดสัมบูรณ์
$\mu_t$	หมายถึง	ค่าความหนืดของความปั่นป่วน
$\nu$	หมายถึง	ความหนืดจลศาสตร์
$\phi$	หมายถึง	ตัวแปรสเกลาร์
$\phi_\varepsilon$	หมายถึง	The destruction term ของสมการ $\varepsilon$
$\delta_{ij}$	หมายถึง	Kronecker delta
$\tau_{ij}$	หมายถึง	Reynolds stress
$\varepsilon$	หมายถึง	อัตราการแยกสลายของความปั่นป่วน

$\ell$	หมายถึง	Turbulent length scale
$\xi$	หมายถึง	สัมประสิทธิ์ความต้านทาน
$\eta$	หมายถึง	ประสิทธิภาพรวมของการแยก
$\eta_{d_i}$	หมายถึง	ประสิทธิภาพการแยกของหยดของเหลว 1 ชนิด
$\Gamma$	หมายถึง	สัมประสิทธิ์การแพร่
$\forall$	หมายถึง	ปริมาตร
$\sigma_k$	หมายถึง	ค่าคงที่เทมอการแพร่ของ $k$
$\sigma_\varepsilon$	หมายถึง	ค่าคงที่เทมอการแพร่ของ $\varepsilon$
$\kappa$	หมายถึง	ค่าคงที่ของวอนคาร์มันน์

### ตัวกำกับล่าง

$e, w, n, s$	หมายถึง	Control volume face ระหว่าง P และ E, P และ W, P และ N, P และ S
$E, W, N, S$	หมายถึง	จุดที่อยู่ข้างเคียงบน east, west, north และ south
$nb$	หมายถึง	จุดต่อที่อยู่ข้างเคียง
$i, j, k$	หมายถึง	Cartesian indices
ave	หมายถึง	ค่าเฉลี่ย

### ตัวกำกับบน

'	หมายถึง	ส่วนการสั่นที่ได้จาก Reynolds decomposition
*	หมายถึง	Current value
-	หมายถึง	ส่วนเฉลี่ยที่ได้จาก Reynolds decomposition

## ขั้นตอนการดำเนินการสำหรับการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

### บทนำ

สำหรับการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนสามารถเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนได้หลายรูปแบบ เช่น แบบ Standard  $k - \epsilon$ , แบบ RNG  $k - \epsilon$  หรือแบบ RSM (Reynolds Stress Model) เพื่อให้เข้าถึงคำตอบการเพิ่มสมการเป็นการแก้ปัญหาของปริมาณความปั่นป่วน เนื่องจากสมการปริมาณเฉลี่ยและปริมาณความปั่นป่วน ( $\mu, k$  หรือ  $\epsilon$ ) จึงเป็นส่วนสำคัญทั้งคู่ในการแก้ปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในขบวนการประมวลผลเพื่อให้ผู้เข้าหาคำตอบของปัญหาการไหลกรณีการไหลเป็นแบบปั่นป่วนจะมีความยุ่งยากมากกว่ากรณีการไหลเป็นแบบราบเรียบ ดังนั้นข้อแนะนำข้างล่างนี้จะช่วยให้เข้าถึงคำตอบที่ถูกต้องเที่ยงตรงสูงสุด

**การสร้างเมช (Mesh Generation):** กริดมีความละเอียดมาก ข้อดีคือ คำตอบที่ได้จะมีความถูกต้องแม่นยำสูง ข้อเสียคือ ใช้เวลาในการประมวลผลนาน และเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้จำเป็นต้องมีหน่วยความจำสูง ในทางตรงข้ามกริดที่มีความละเอียดน้อยหรือกริดแบบหยาบ ข้อดีคือ ใช้เวลาในการประมวลผลน้อยเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ไม่จำเป็นต้องมีหน่วยความจำสูงมาก ข้อเสียคือ คำตอบที่ได้ อาจไม่มีความถูกต้องเพียงพอ

ดังนั้นในการเลือกใช้จำนวนกริดที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญมาก เนื่องจากต้องพิจารณาทั้งเวลาที่ใช้ในการประมวลผล และความถูกต้องแม่นยำของคำตอบควบคู่กัน โดยผลลัพธ์ที่ได้ต้องเข้าใกล้คำตอบจริงมากที่สุดหรืออยู่ในเกณฑ์ที่สามารถรับได้

**ความถูกต้องเที่ยงตรง (Accuracy):** ข้อแนะนำสำหรับการประมาณค่าเทอมการพาคือ ควรเลือกใช้ระเบียบวิธีผลต่างอันดับสูง ดังนั้นระเบียบวิธีผลต่างแบบ QUICK จึงเหมาะสมสำหรับประมาณค่าเทอมการพา ความพิเศษของระเบียบวิธีผลต่างแบบ QUICK นี้คือ มีความเหมาะสมสำหรับการไหลมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูงๆ และเกิดการไหลวนมากซึ่งก็คือการเคลื่อนที่ของของไหลในเครื่องแยกตะกอนแบบแผ่นคลื่น

**การลู่เข้าหาคำตอบ (Convergence):** ในการจำลองการไหลเพื่อให้เกิดการลู่เข้าของคำตอบ สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาคือ การกำหนดค่าเฟคเตอร์การผ่อนคลาย (Under-relaxation) ที่เหมาะสมกับแบบจำลองการไหลที่เลือกใช้ จำนวนครั้งของการทำซ้ำที่กำหนดให้กับโปรแกรม โดยจะต้องสอดคล้องกับค่า Residual error ด้วย

## การแก้ปัญหาของแบบจำลองการไหล standard $k - \varepsilon$

การแก้ปัญหาขั้นสูงของสมการโมเมนต์ และสมการการไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดขึ้นของแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน standard  $k - \varepsilon$  สามารถทำได้ดังนี้

**การผ่อนปรนต่ำของแบบจำลองการไหล standard  $k - \varepsilon$  (Under-relaxation):** โดยปกติค่าการผ่อนปรนต่ำที่ใช้กันส่วนใหญ่คือ 0.5 โดยทั่วไปอัตราการใช้ค่าตอบจะเพิ่มขึ้นถ้ากำหนดให้ค่าการผ่อนปรนต่ำเพิ่มขึ้น หากเป็นการไหลที่ซับซ้อน และมีการหมุนวนสูงควรเลือกใช้ค่าเฟกเตอร์การผ่อนปรนต่ำระหว่าง 0.2-0.3 จึงจะเหมาะสม สำหรับแบบจำลองการไหล standard  $k - \varepsilon$  ค่าเฟกเตอร์การผ่อนปรนต่ำกำหนดที่ 0.3 เนื่องจากเมื่อกำหนดค่าเฟกเตอร์การผ่อนปรนต่ำที่มากกว่า 0.6 จะไม่ได้คำตอบ (Divergence)

**ขอบเขตความผิดพลาดสำหรับแบบจำลอง (Residual error):** เมื่อเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard  $k - \varepsilon$  (SKE) หรือ RNG  $k - \varepsilon$  ขอบเขตความผิดพลาดสามารถเลือกใช้ที่  $10^{-3}$  อาจเพียงพอ แต่กรณีเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RSM (Reynolds Stress Model) จำเป็นต้องเลือกใช้ขอบเขตความผิดพลาดอย่างน้อย  $10^{-5}$

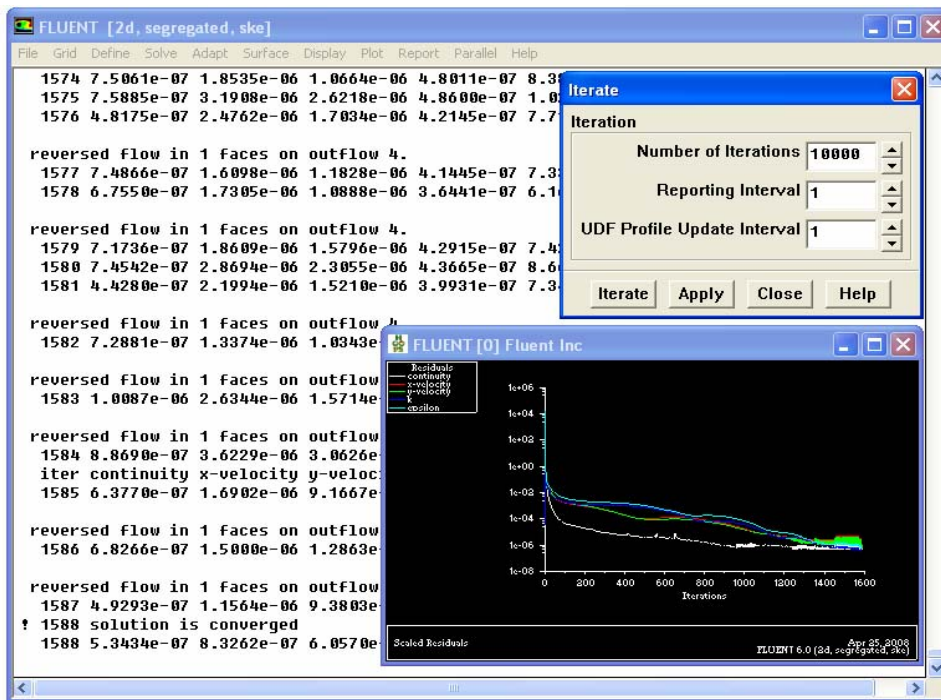
**คุณลักษณะของเมช :** ผลกระทบจากรูปร่างของเมชในบริเวณที่เกิดการกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ โดยรูปทรงของแต่ละเซลล์จะมีผลต่อความถูกต้องแม่นยำของผลลัพธ์ และส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของขบวนการแก้ปัญหา การจัดวางเมชจึงขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหล ยกตัวอย่างบริเวณทางเข้าควรกำหนดให้เมชมีความเป็นระเบียบสอดคล้องกับความเป็นจริงของสนามการไหลเข้า เพื่อลดผลกระทบของความผิดพลาดในขอบเขตของการไหลบริเวณนั้น ดังนั้นการจัดวางเมชที่มีความเป็นระเบียบและเหมาะสมในบริเวณช่องทางไหลจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก

## โปรแกรมสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์ FLUENT และ GAMBIT

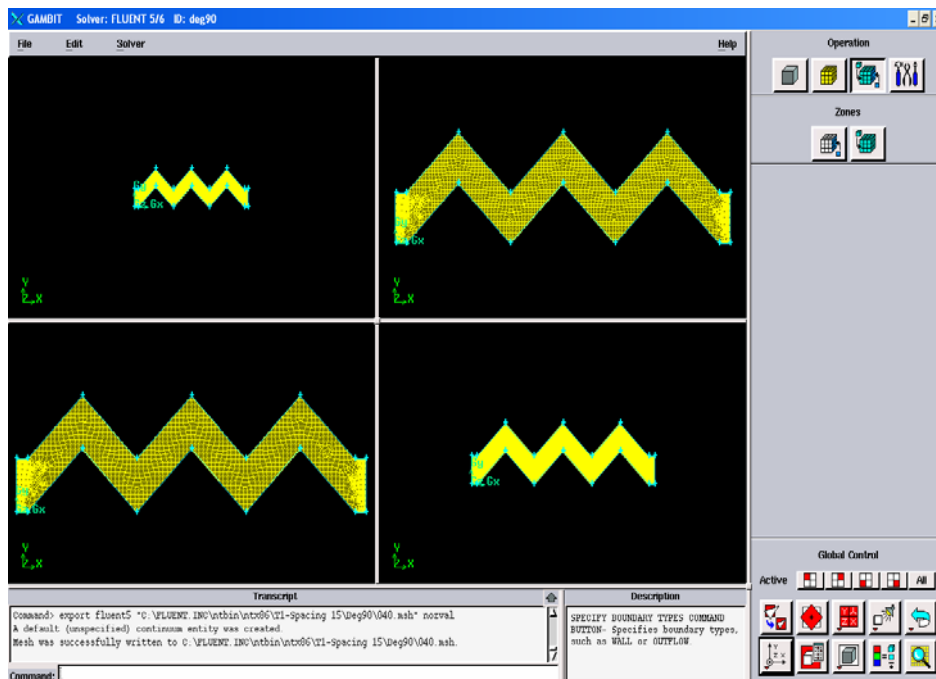
### FLUENT และ GAMBIT

FLUENT คือโปรแกรมสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์ใช้สำหรับวิเคราะห์รูปแบบการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนของรูปทรงที่ซับซ้อน โดยโปรแกรมนี้ถูกสร้างขึ้นเพื่อรองรับการแก้ปัญหาการไหลกับรูปแบบเมชที่มีโครงสร้างไม่แน่นอน ชุดโปรแกรมยังสามารถรองรับการทำงานแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของกริดรูปสามเหลี่ยม, รูปสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า และรูปแบบผสมผสานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดของรูปทรงลักษณะต่างๆ เช่น รูปกรวย, รูปลิ้ม, รูปปริมาตร FLUENT ถูกเขียนขึ้นโดยคอมพิวเตอร์ภาษาซี ซึ่งเป็นโปรแกรมพื้นฐานที่มีความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการพัฒนาสร้างโปรแกรมอื่นๆ ทางด้านวิทยาศาสตร์มากมาย เนื่องจากโปรแกรมมีเสถียรภาพสูง และรองรับการทำงานที่หลากหลาย โดยหน้าตาของชุดโปรแกรมสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์นี้แสดงดังภาพประกอบ 51

GAMBIT คือ ชุดโปรแกรมช่วยในการออกแบบวิเคราะห์รูปแบบกริด (Mesh Model) สำหรับการศึกษาด้านพลศาสตร์ของไหล (CFD) และการประยุกต์ใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์อื่นๆ GAMBIT สามารถรองรับประสานการทำงานได้กับหลายโปรแกรม เช่น FLUENT, ANSYS, NASTRAN หรือชุดโปรแกรม CAD/CAE อื่นๆ อีกหลายตัว ดังนั้น GAMBIT จึงมีความนิยมใช้กันเป็นอย่างสูงในการออกแบบสร้างแบบจำลองทางด้านวิศวกรรม โดยโปรแกรมยังสามารถกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions), กำหนดค่าจำกัดความของของไหล, ดำเนินการแก้ไข, ทดสอบความถูกต้องของกริด, และยังสามารถตรวจสอบขั้นตอนการดำเนินการให้เป็นไปตามลำดับอีกด้วย ชุดโปรแกรมสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์นี้แสดงดังภาพประกอบ 52



ภาพประกอบ 51 ลักษณะของหน้าต่างโปรแกรม FLUENT 6



ภาพประกอบ 52 ลักษณะของหน้าต่างโปรแกรม GAMBIT 2.1

## ขั้นตอนการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม FLUENT

### Tutorial of Gas-Liquid/Particle flow in the Wave-plate Mist Eliminator

ในตัวอย่างขั้นตอนการจำลองการไหลนี้ประกอบด้วยรายละเอียดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- ใช้รูปแบบการไหล 2 สถานะ แบบ Discrete Phase ระหว่างก๊าซกับอนุภาคของเหลว
- การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต
- การแสดงผลการจำลองการไหล

รายละเอียดปัญหา : ปัญหานี้เป็นการพิจารณาสนามการไหลภายในเครื่องแยกละอองรูปแผ่นคลื่นแบบทั่วไป โดยกำหนดให้ มีขนาดช่องทางไหล  $S=15$  mm. มุมหักขนาด  $\alpha=90$  องศา ความยาว  $L=160$  mm. ดังภาพประกอบ 53

Gas (Methane)

$$\rho = 0.6679 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1.087\text{e-}5 \text{ kg/m-s}$$

$$u = 3 \text{ m/s}$$

VELOCITY INLET →

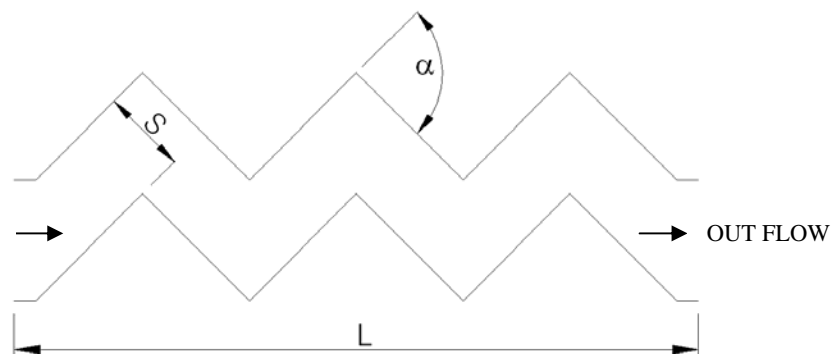
Liquid (Water)

$$\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 0.001003 \text{ kg/m-s}$$

$$u = 3 \text{ m/s}$$

$$\dot{m} = 0.01 \text{ kg/s}$$



ภาพประกอบ 53 แสดงรูปแบบ และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของรูปแผ่นคลื่น

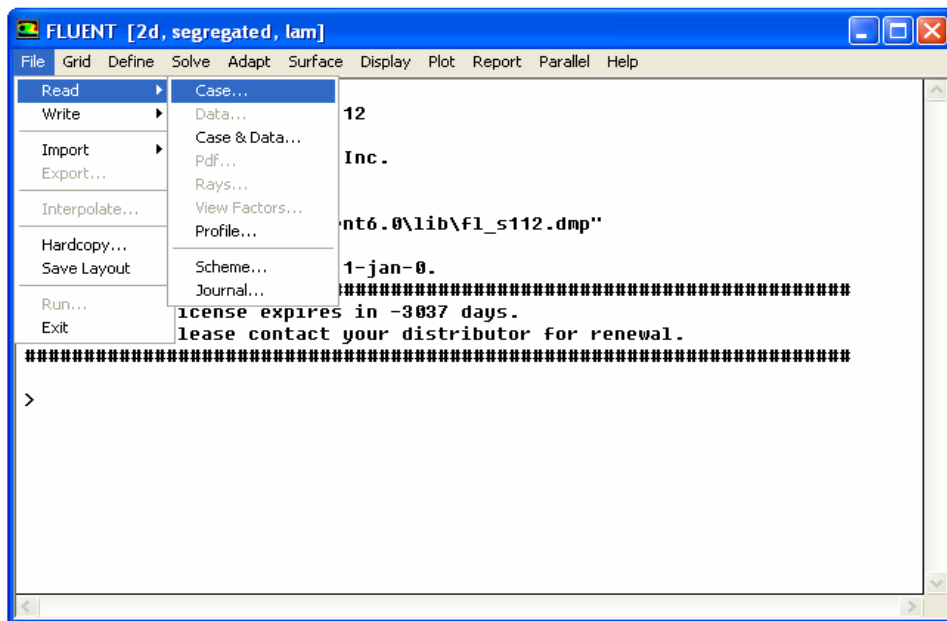
### เริ่มต้นโปรแกรม

1. เปิดใช้โปรแกรม FLUENT เลือกรูปแบบ 2D version.

### ขั้นตอนที่ 1: Grid

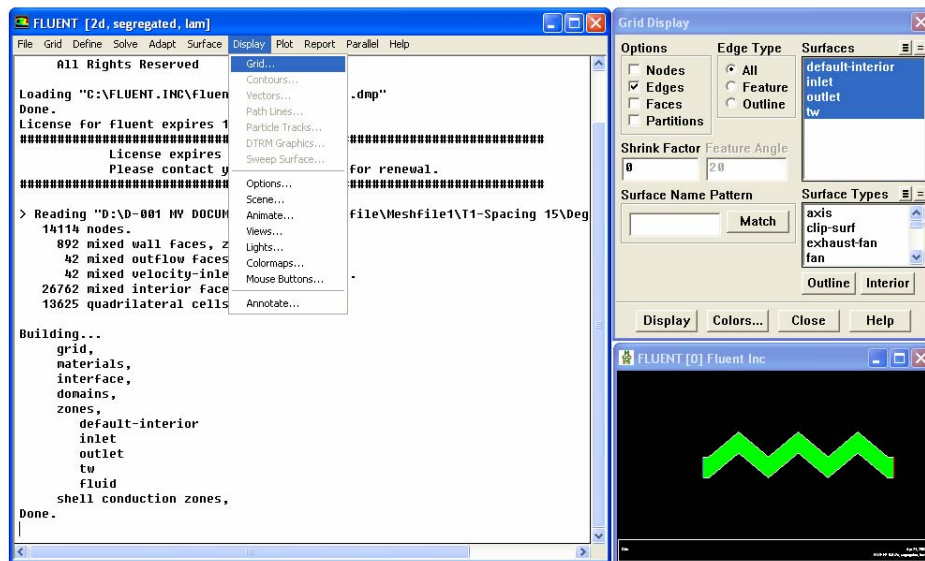
1. เลือกเมชโมเดลของแบบจำลองแบบ 2D (xxx.msh)

File → Read → Case



ภาพประกอบ 54 หน้าต่างแสดงการเปิดใช้แบบจำลอง

2. ตรวจสอบความถูกต้องของกริด  
Grid → Check...
3. กำหนดให้โปรแกรมแสดงรูปแบบของเมชโมเดล  
Display → Grid...



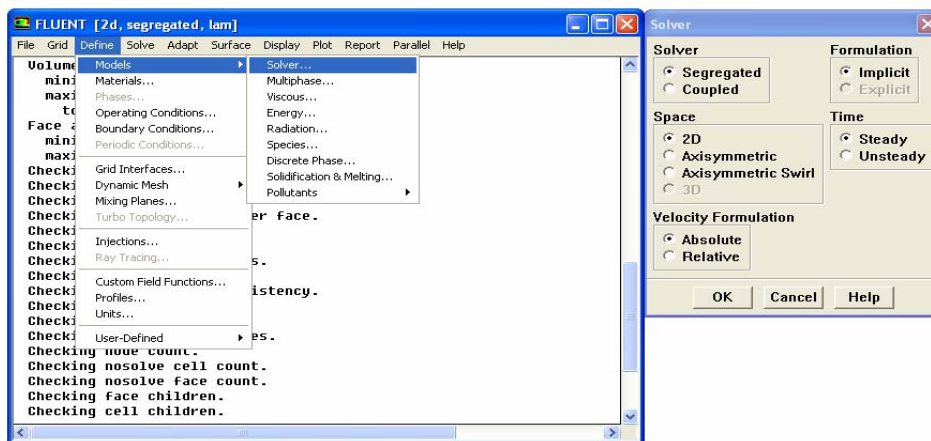
ภาพประกอบ 55 หน้าต่างแสดงแบบจำลองของเมชโมเดล

## ขั้นตอนที่ 2: Models

### 1. กำหนดเงื่อนไขการของปัญหาการไหล

Define → Models → solver...

- Solver, เลือก segregated.
- Under Space, เลือก 2D.
- Under Time, เลือก steady.
- Velocity Formulation, เลือก Absolute

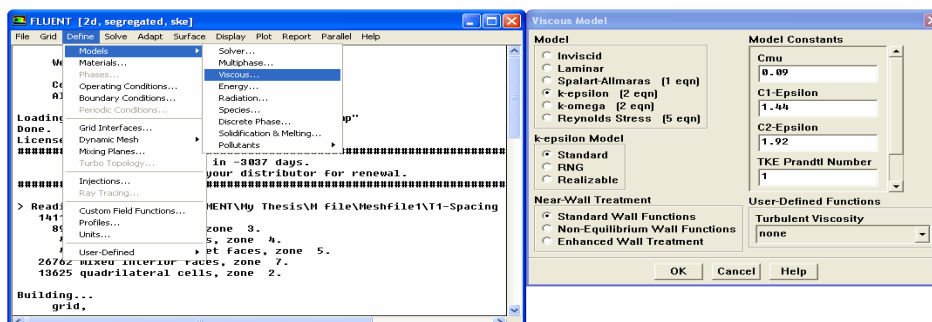


ภาพประกอบ 56 หน้าต่างแสดงการกำหนดเงื่อนไขของปัญหาการไหล

### 2. กำหนดรูปแบบการแบบปั่นป่วน k-epsilon

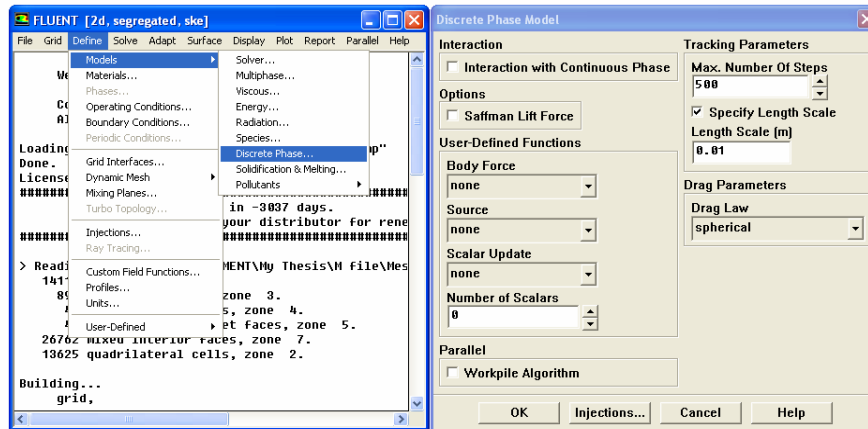
Define → Models → Viscous

- Model, เลือก k-epsilon (2-eqn).
- K-epsilon Model, เลือก standard.



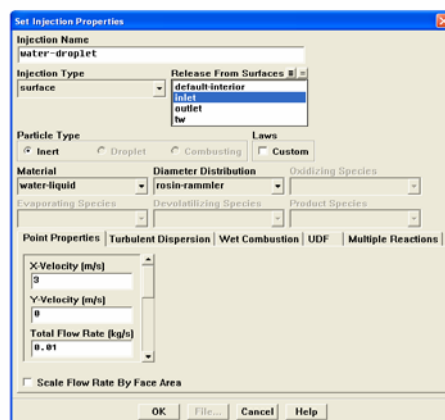
ภาพประกอบ 57 หน้าต่างแสดงการกำหนดรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน

3. กำหนดให้การไหลเป็นแบบ 2 สถานะ ระหว่างก๊าซและอนุภาคของเหลวแบบ Discrete Phase  
Define → Models → Discrete Phase...



ภาพประกอบ 58 หน้าต่าง Discrete Phase Model สำหรับปัญหาการไหลแบบ 2 สถานะ ระหว่าง  
ก๊าซและอนุภาคของเหลว

4. กำหนดเงื่อนไขการไหลของอนุภาคของเหลว  
Define → Models → Discrete Phase → Injections...
- Injection Type, เลือก surface.
  - Material, เลือก water-liquid.
  - Diameter Distribution, เลือก rosin-rammler.
  - Point Properties, กำหนดเงื่อนไขการจำลองเช่น ค่าความเร็ว, ปริมาณการไหล,  
ขนาดอนุภาคของไหล, จำนวนอนุภาคที่ป้อนต่อหนึ่งช่องกริด.



ภาพประกอบ 59 หน้าต่างแสดงการกำหนดเงื่อนไขการไหลของอนุภาคของเหลว

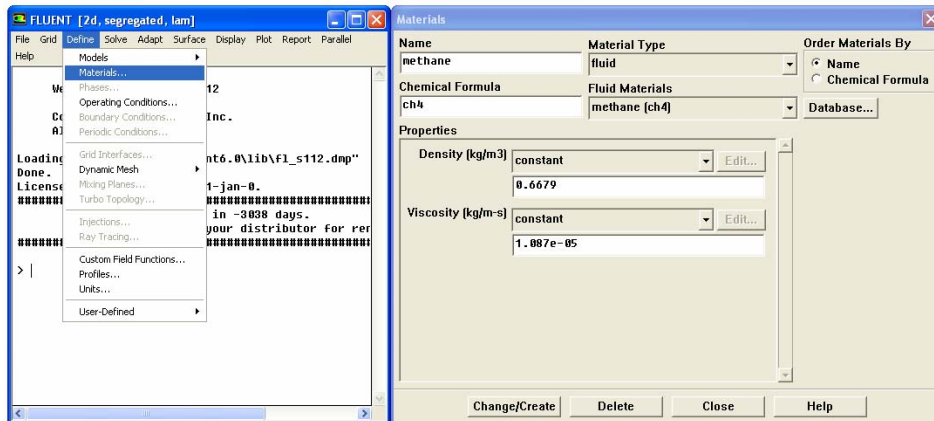
### ขั้นตอนที่ 3: Material

- กำหนดคุณสมบัติของไหลตามเงื่อนไขการออกแบบ

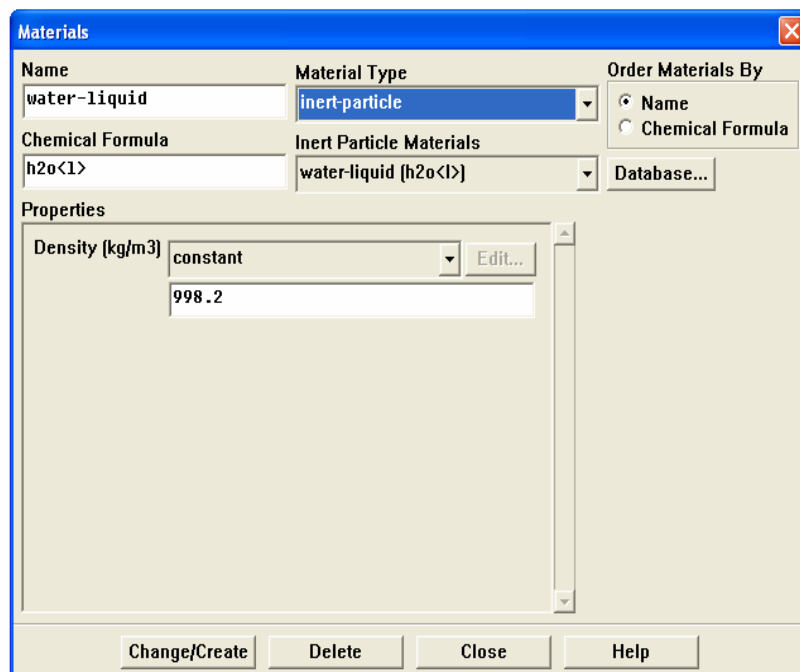
Define → Materials

(a) Material Type / fluid, เลือก methane (ข้อมูลจาก Database).

(b) Material Type / inert-particle, เลือก water-liquid.



ภาพประกอบ 60 หน้าต่างแสดงการกำหนดคุณสมบัติของก๊าซ



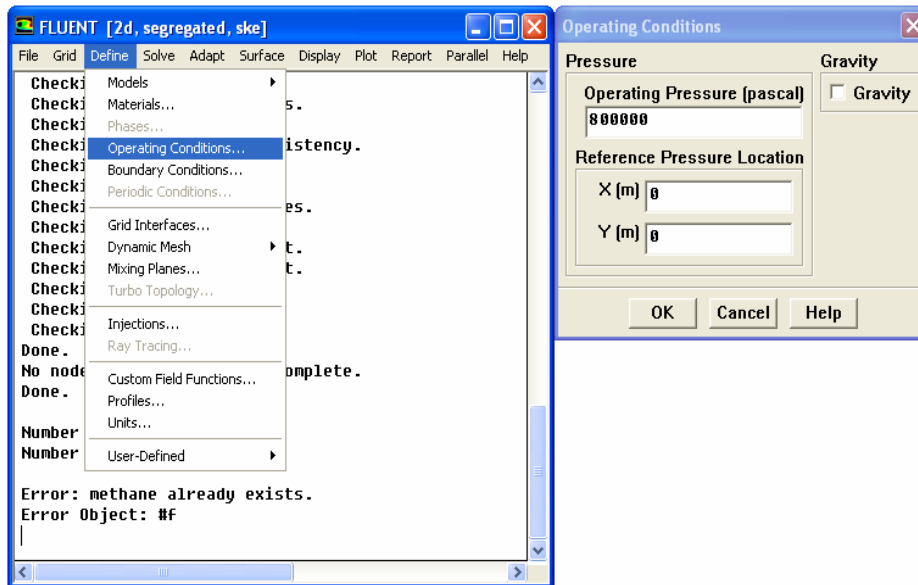
ภาพประกอบ 61 หน้าต่างแสดงการกำหนดคุณสมบัติของอนุภาคของเหลว

## ขั้นตอนที่ 4: Operating Conditions

### 1. กำหนดค่าความดันออกแบบ

Define → Operating Conditions...

- Operating Pressure, ให้กำหนดตามเงื่อนไขการออกแบบ



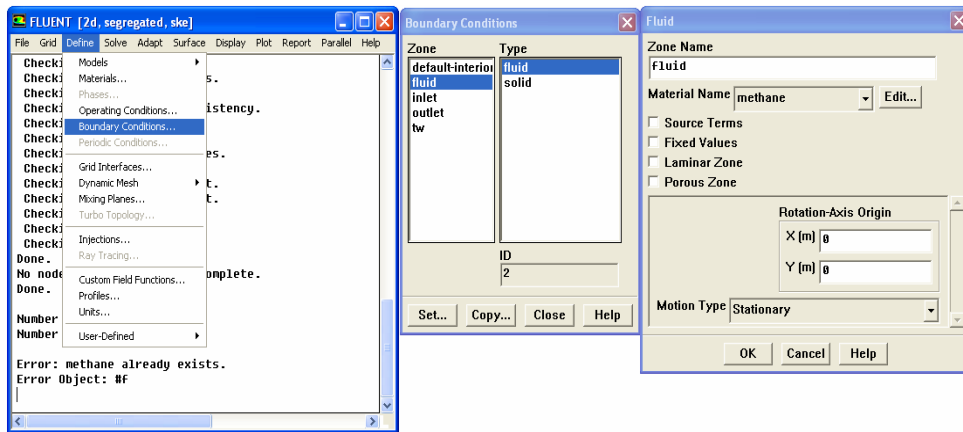
ภาพประกอบ 62 หน้าต่างแสดงการกำหนดเงื่อนไขของความดันที่ใช้ออกแบบ

## ขั้นตอนที่ 5: Boundary Conditions

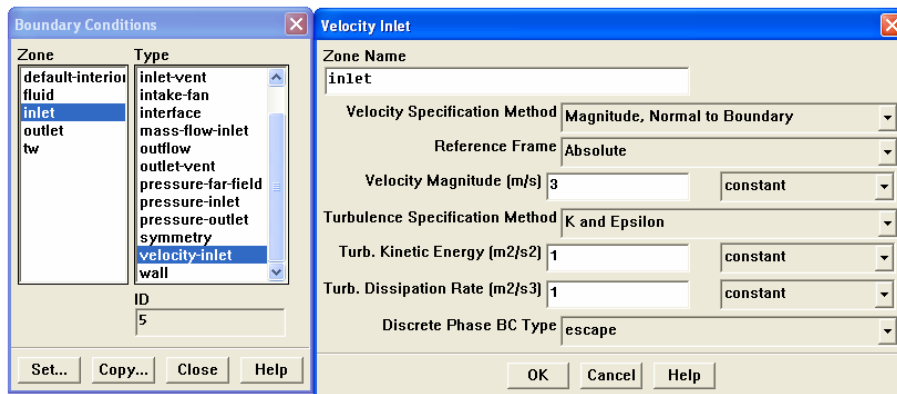
### 1. กำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต

Define → Boundary Conditions...

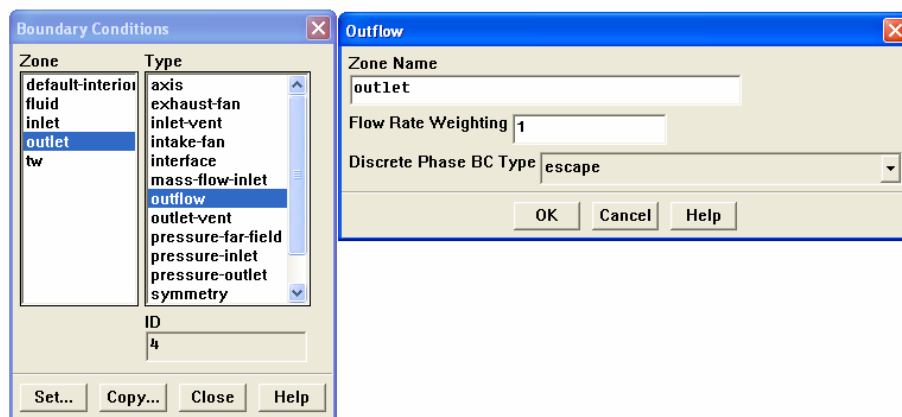
- fluid, เลือก methane
- inlet / velocity inlet, กำหนดตามเงื่อนไขการออกแบบ
- outlet / out-flow, เลือก escape
- tw / DPM, เลือก trap (เป็นส่วนสำคัญของการจำลองการไหลหากกำหนดผิดจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการออกแบบ)



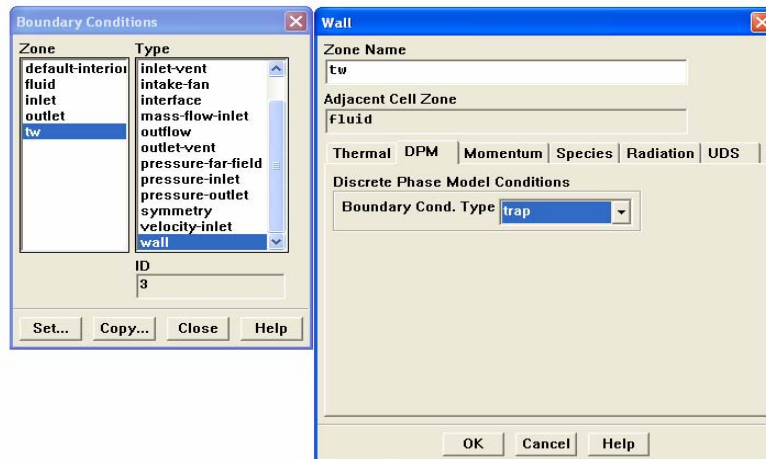
ภาพประกอบ 63 หน้าต่างแสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของก๊าซ



ภาพประกอบ 64 หน้าต่างแสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของค่าความเร็วไหลเข้า



ภาพประกอบ 65 หน้าต่างแสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของช่องทางออก



ภาพประกอบ 66 หน้าต่างแสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของผนังแบบจำลอง

## ขั้นตอนที่ 6: Solution

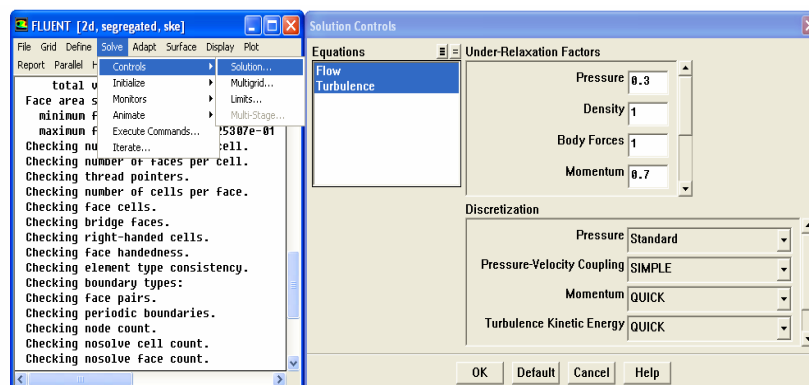
### 1. กำหนดเงื่อนไขระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

Solve → Controls → Solution...

(a) Under-Relaxation Factors, เลือกเป็นค่ามาตรฐานของโปรแกรม

(b) Discretization,

- Pressure, เลือก Standard.
- Pressure-Velocity Coupling, เลือกแบบ SIMPLE.
- Momentum, เลือก QUICK.
- Turbulence Kinetic Energy, เลือก QUICK.
- Turbulence Dissipation Rate, เลือก QUICK.

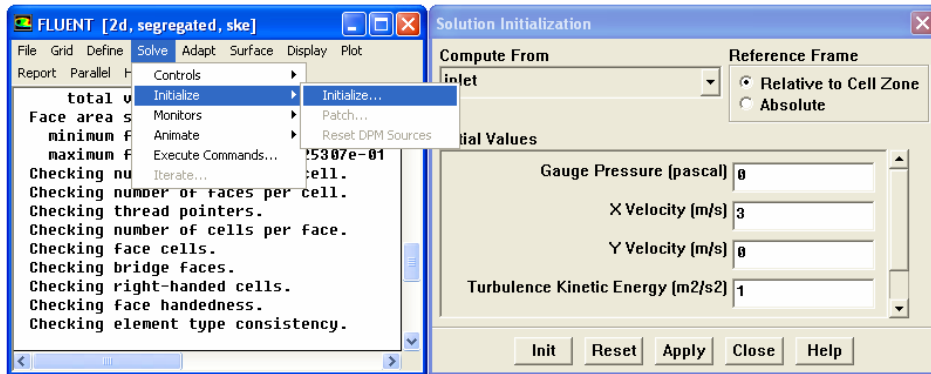


ภาพประกอบ 67 หน้าต่างแสดงการกำหนดเงื่อนไขระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

### ขั้นตอนที่ 7: Initialize

1. กำหนดเงื่อนไขให้โปรแกรมเริ่มกระทำการคำนวณจากค่าความเร็วเริ่มต้น

Solve → Initialize → Initialize...



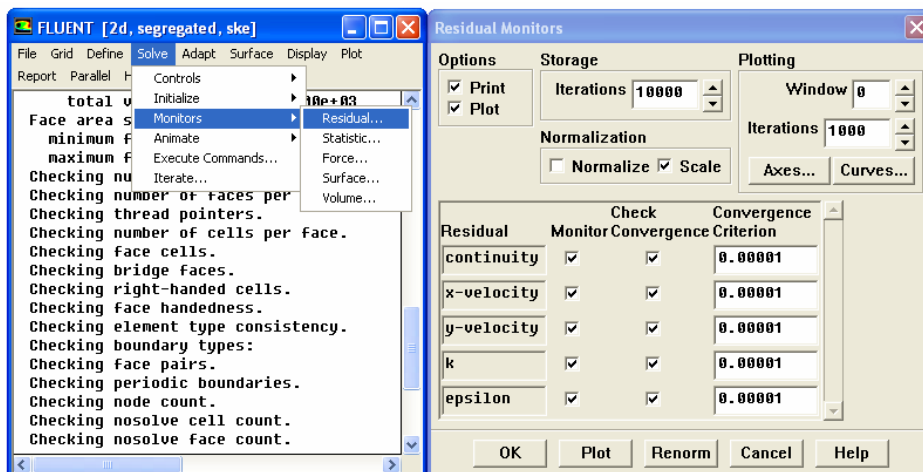
ภาพประกอบ 68 หน้าต่างแสดงการกำหนดเงื่อนไขให้โปรแกรมเริ่มกระทำการคำนวณจากค่าความเร็วเริ่มต้น

### ขั้นตอนที่ 8: Monitors

1. กำหนดเงื่อนไขการลู่เข้าหาคำตอบ

Monitors → Residual...

(a) Convergence Criterion, เลือก  $10e-5$

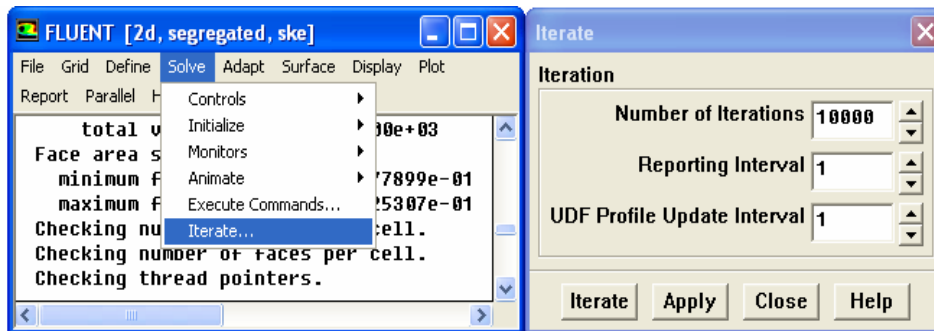


ภาพประกอบ 69 หน้าต่างการกำหนดเงื่อนไขการลู่เข้าหาคำตอบ

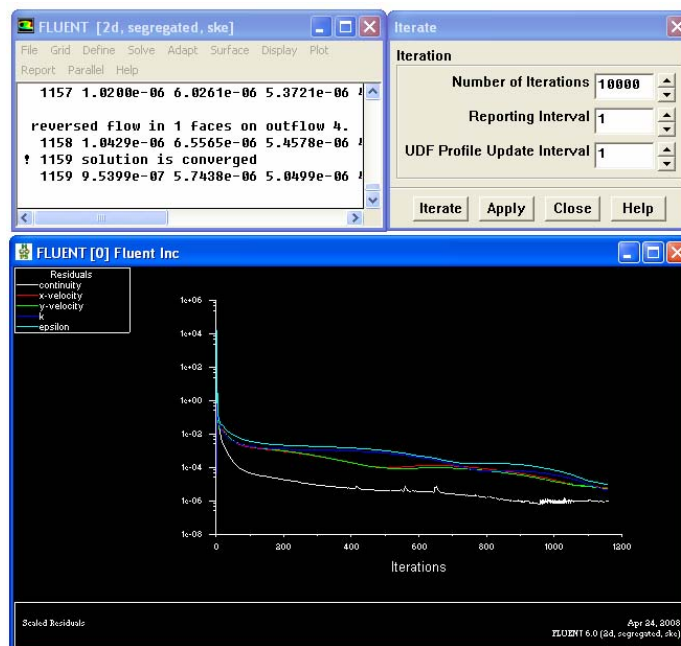
### ขั้นตอนที่ 9: Iterate

1. กำหนดให้โปรแกรมเริ่มทำการคำนวณ

Solve → Iterate...



ภาพประกอบ 70 หน้าต่างแสดงการกำหนดให้โปรแกรมเริ่มทำการคำนวณ



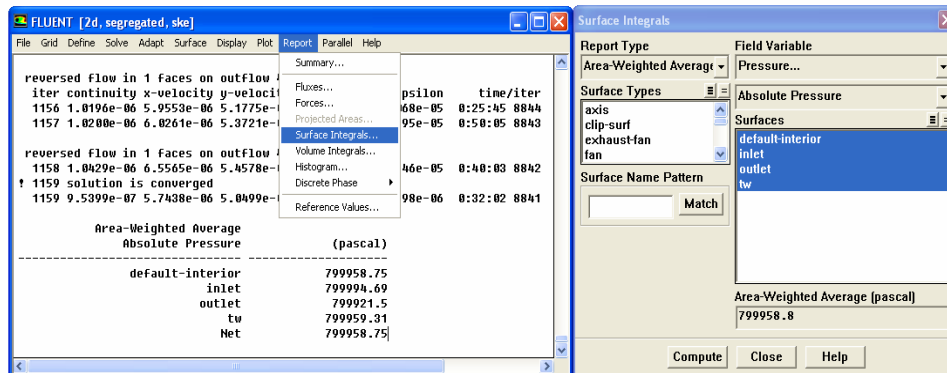
ภาพประกอบ 71 หน้าต่างแสดงผลการคำนวณ

### ขั้นตอนที่ 10: Report

1. กำหนดให้โปรแกรมแสดงค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ

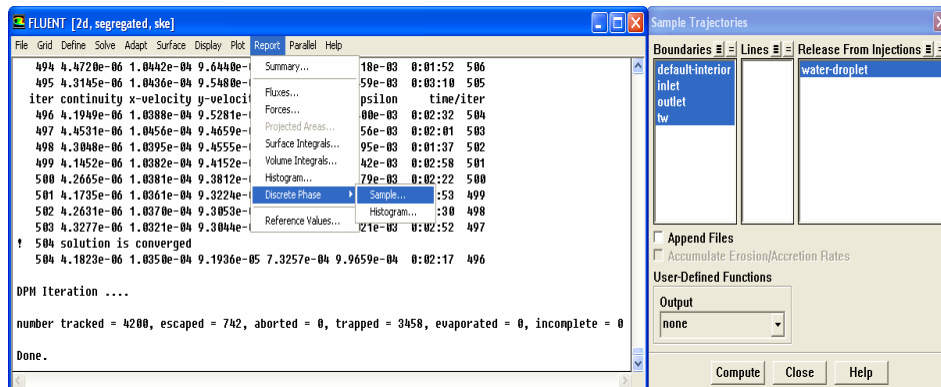
Report → Surface Integrals...

- Report Type, เลือก Area-Weighted Average
- Field Variable, เลือก Pressure / Absolute Pressure



ภาพประกอบ 72 แสดงหน้าต่างการดูข้อมูลค่าความดันสถุลเฉลี่ย

- กำหนดให้โปรแกรมแสดงค่าประสิทธิภาพการแยกตัวของอนุภาคของเหลว  
Report → Discrete Phase → Sample...

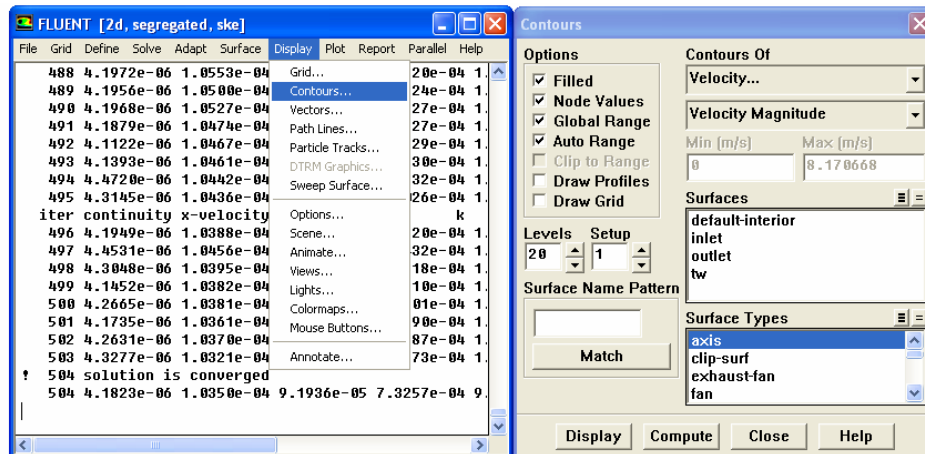


ภาพประกอบ 73 แสดงหน้าต่างการการดูข้อมูลค่าประสิทธิภาพการแยก

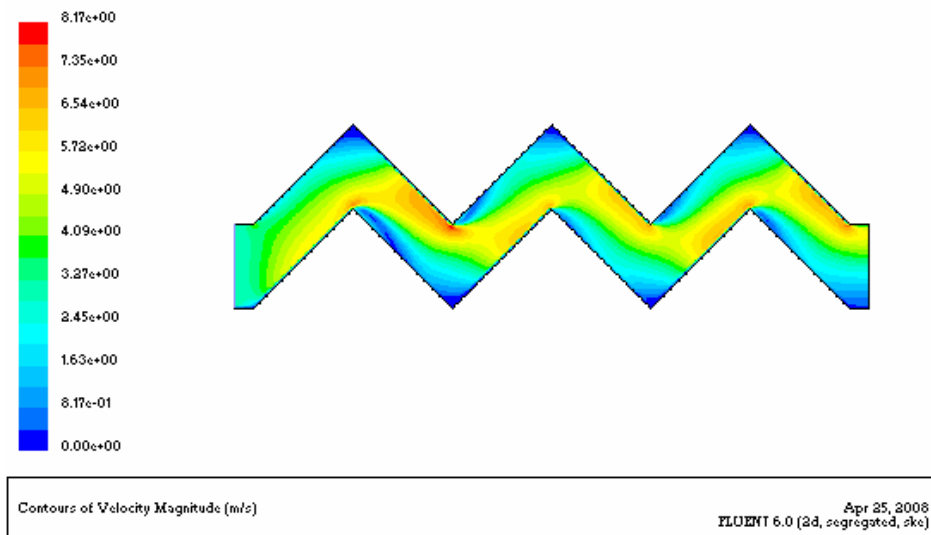
จากข้อมูลในภาพประกอบ 56 number tracked = 4200 คือจำนวนอนุภาคทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่ระบบ, escaped = 742 คือ จำนวนอนุภาคที่หลุดลอดออกจากระบบ, trapped=3458 คือ จำนวนอนุภาคที่เกิดการชนปะทะกับผนังและถูกดักจำได้

- กำหนดให้โปรแกรมแสดงเส้นลวดลายของค่าความเร็ว  
Display → Contours...

- Contours of, เลือก Velocity / Velocity Magnitude
- Surface Type, เลือก axis



ภาพประกอบ 74 หน้าต่างการกำหนดให้โปรแกรมแสดงผลข้อมูลในรูปแบบเส้นลวดลายความเร็ว



ภาพประกอบ 75 แสดงเส้นลวดลายของค่าความเร็วการไหล

ประวัติย่อผู้วิจัย

## ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ สกุล	นายสิทธิกานต์ นุ่นหนู
วันเดือนปีเกิด	30 พฤศจิกายน 2518
สถานที่เกิด	อำเภอชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	113/62 หมู่ 16 หมู่บ้านนักกีฬาแหลมทอง แขวงสะพานสูง เขตสะพานสูง จังหวัดกรุงเทพฯ 10250
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ผู้จัดการฝ่ายก่อสร้าง
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท คิวซิอินดัสทรี (ประเทศไทย) จำกัด 8/1 ถนน เสรี 9 แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2539	ปวส. ช่างกลโรงงาน จาก สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตนนทบุรี
พ.ศ. 2543	อส.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2551	วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ