



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเพิ่มสมรรถนะของไซโคลนด้วยการปรับปรุงรูปทรงเรขาคณิตของท่อทางออก

Enhancement of Cyclone Performance
Via Improvement of Dipleg Geometry



ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์
ดร.สันติ วัฒนานสรณ์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณ **รายได้** ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเพิ่มสมรรถนะของไซโคลนด้วยการปรับปรุงรูปทรงเรขาคณิตของท่อทางออก

Enhancement of Cyclone Performance
Via Improvement of Dipleg Geometry

ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์
ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

เลขที่.....
เลขทะเบียน 137856
รับเดือนปี 13 ค.ศ. 2558

b. 00272851
i.....

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณฯ ได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การเพิ่มสมรรถนะของไฮโคลนด้วยการปรับปรุงรูปทรงเรขาคณิตของท่อ
ทางออก

แหล่งเงิน คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 80,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2555 ถึง กันยายน 2556

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) อภินันท์ นัมคณิสร์ณ

ตำแหน่งทางวิชาการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สัดส่วนการวิจัย 50%

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โทรศัพท์ 02-3298360-3

โทรสาร 02-3298360-3 ต่อ 4

E-mail knapinan@kmitl.ac.th

ผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) สันติ วัฒนานุสรณ์

ตำแหน่งทางวิชาการ อาจารย์ สัดส่วนการวิจัย 50%

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โทรศัพท์ 02-3298360-3 ต่อ 166

โทรสาร 02-3298360-3 ต่อ 4

E-mail santi_wattananusorn@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้านในอัตราส่วนของมุมและความยาวของท่อทางออกต่างๆกันและศึกษาผลของค่าตัวเลขเรโนลด์ต่อประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไฮโคลน ด้วยเทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหลภายในไฮโคลนด้วย Reynolds Stress Model (RSM) การไหลของของไหลที่บริเวณผนังเป็นแบบ Non-Equilibrium wall functions และแบบจำลองการติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วย Discrete Phase Model (DPM) โดยในส่วนแรกจะเป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองกับงานวิจัยที่ใช้อ้างอิง เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของผลงานวิจัยและในส่วนที่สอง จะเป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไฮโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้าน และ ผลของค่าตัวเลขเรโนลด์ ซึ่งอัตราส่วนของมุมและความยาวที่ทำให้ไฮโคลนมีประสิทธิภาพสูงสุดคือที่ 1θ และ $L/2$ ตามลำดับและผลของค่าตัวเลขเรโนลด์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไฮโคลนมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เมื่อค่าตัวเลขเรโนลด์เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : การแยกอนุภาค, ไฮโคลน, Reynolds Stress Model (RSM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ซึ่งงานที่เอกสารนี้เป็นต้น และอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Enhancement of Cyclone Performance Via Improvement of Dipleg Geometry

Researcher: Asst. Prof. Dr. Apinan Namkanisorn
Dr.Santi Wattananusorn

Faculty: Engineering **Department:** Chemical Engineering

ABSTRACT

This project studies performance characteristics of a cyclone prolonged with a divergent dipleg. The effect of different angle, length ratio of divergent dipleg and Reynolds number on cyclone efficiency were studied by computational fluid dynamic technique. The model implements Reynolds Stress Model (RSM) with Non-Equilibrium wall functions and Discrete Phase Model (DPM) to calculate cyclone performance. In the first part, comparison between experimental results and calculation results was carried out to confirm the accuracy and reliability of the results. In second part, collection efficiency of cyclone prolonged with a divergent dipleg and effect of Reynolds number result .In conclusion, angle and length ratio case which has highest efficiency is 10° of angle and $L/2$ of length. Furthermore, the collection efficiency increase when Reynolds number increase.

Keywords : particle separation, cyclone, Reynolds Stress Model (RSM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุน คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2556 จำนวนเงิน 80,000 บาท
จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

อภิรักษ์ นัมคณิสสรณ์

สันติ วัฒนานุสรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผลของโครงการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	1
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD).....	3
2.2 สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation).....	5
2.3 สมการนาเวียร์-สโตกส์จากการเฉลี่ยของเรโนลด์ (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation).....	6
2.4 Reynolds Stress Model (RSM).....	7
2.5 Discrete Phase Modeling(DPM).....	11
2.6 ไซโคลน (Cyclone).....	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	14
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการคำนวณ.....	19
4.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับข้อมูลจากงานวิจัยที่ใช้อ้างอิง.....	19
4.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองไซโคลนที่ไม่มีท่อทางออกและที่มีท่อทางออกในรูปทรงต่างๆ.....	20
4.3 ลักษณะการไหลภายในไซโคลน.....	23
4.4 ประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไซโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้านที่อัตราส่วนมุมและความยาวต่างๆ กัน.....	28
4.5 ประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไซโคลนที่ค่าตัวเลขเรโนลด์ต่างๆ.....	29
บทที่ 5 สรุปผลการจำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลข.....	31
5.1 สรุปผลการจำลอง.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นใด
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	32
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	32
บรรณานุกรม.....	33
ประวัตินักวิจัย.....	34



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงสมการที่ใช้ข้างต้นให้เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณจริง เพื่อความสะดวกในการใช้งาน.....	9
2.2 ตารางแสดงจุดเด่นและจุดด้อยของแบบจำลองแบบ RSM (Reynolds Stress Model).....	10
3.1 ขนาดของไซโคลน.....	17
3.2 ขนาดของท่อทางออกของไซโคลน.....	18
4.1 ประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไซโคลนรูปแบบต่างๆ.....	22
4.2 แสดงประสิทธิภาพของไซโคลนที่ต่อท่อทางออกเป็นมุมป้าน ที่อัตราส่วนของมุมและความยาวต่างๆ.....	28
4.3 แสดงประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไซโคลนที่ค่าตัวเลขเรโนลด์์ต่างๆ.....	30
4.4 ตารางแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกักเก็บระหว่าง ไซโคลนที่ประกอบด้วย ท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้าน และ ไซโคลนธรรมดา ที่ค่าตัวเลขเรโนลด์์ เท่ากับ 39,375.....	30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงถึงการคำนวณลักษณะการไหลโดยชุดสมการต่างๆ.....	6
2.2 ส่วนประกอบของไซโคลน.....	13
3.1 ตัวอย่างไซโคลนมุม $0, \theta/2, \theta, 3\theta/2$ และ 2θ ความยาว $L = 38.5$ หน่วย.....	14
3.2 แผนผังแสดงการดำเนินงาน.....	16
3.3 โครงสร้างของไซโคลน.....	17
4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของไซโคลนจากการทดลองและการคำนวณ.....	19
4.2 Tangential Velocity.....	21
4.3 Axial velocity.....	21
4.4 Static pressure.....	22
4.5 สนามการไหลของความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสภายในไซโคลน.....	25
4.6 สนามการไหลของความเร็วตามแนวแกนภายในไซโคลน.....	26
4.7 สนามการไหลของความดันสถิตภายในไซโคลน.....	27
4.8 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไซโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้านที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (1θ และ $L/2$) ที่ค่าตัวเลขเรโนลด์ต่างๆ.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผลของโครงการวิจัย

ไซโคลน (Cyclone) เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถแยกอนุภาคได้เป็นจำนวนมาก ง่ายต่อการออกแบบ การสร้าง และใช้ต้นทุนในการดำเนินงานต่ำ การทำงานของไซโคลนอาศัยแรงเหวี่ยง (Centrifugal Force) ในการแยกอนุภาคที่มีขนาดต่างกันออกจากกัน ถึงแม้ว่าไซโคลนจะออกแบบง่ายแต่ปรากฏการณ์การไหลภายในไซโคลนเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) และซับซ้อนยากต่อการทำการทดลอง การใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เข้ามาศึกษารูปแบบการไหลภายในไซโคลนจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากเทคนิค CFD นี้สามารถลดต้นทุนในการทดลอง มีความแม่นยำในการคำนวณ ง่ายต่อการปรับเปลี่ยนตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาและสามารถผลิตข้อมูลในการวิเคราะห์ที่ได้เป็นจำนวนมาก จึงเป็นส่วนช่วยเพิ่มความเข้าใจ ในปรากฏการณ์การไหลภายในไซโคลน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกของไซโคลนโดยการปรับปรุงท่อทางออกของไซโคลน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในไซโคลน

1.3.2 ศึกษาตัวแปรของรูปทรงของท่อทางออกจากไซโคลนที่มีผลต่อสมรรถนะการแยกของไซโคลน ได้แก่ รูปร่างของท่อทางออก มุมและความยาวของท่อทางออก

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) ที่มีต่อสมรรถนะการแยกของไซโคลนที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นของการไหล ได้แก่ สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equations) แบบจำลองความเครียดของเรย์โนลด์ (Reynolds Stress Model) แบบจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Discrete Phase Model) การทำงานของไซโคลนและเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

1.4.2 เปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลอง : สร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Gambit แล้วนำไปจำลองการไหลด้วยโปรแกรม FLUENT และนำผลการจำลอง (ค่าสนามความเร็ว สนามความดัน) ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ใช้อ้างอิง เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.3 การทำนายของแบบจำลอง : เป็นการจำลองการไหลภายในไซโคลนโดยการปรับตัวแปรตามที่ได้กล่าวไว้ในขอบเขตการวิจัย

1.4.4 สรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เข้าใจพฤติกรรมการไหลภายในไซโคลนและได้องค์ความรู้ใหม่ในการออกแบบไซโคลนที่มีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคสูงกว่าไซโคลนที่ใช้งานในปัจจุบัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) [1]

การคำนวณพลศาสตร์ของไหลเป็นสาขาหนึ่งของกลศาสตร์ของไหลที่ใช้การคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขและระเบียบวิธีในการแก้ปัญหาของจำนวนที่แน่นอนทางคณิตศาสตร์ เพื่อแก้และวิเคราะห์ปัญหาซึ่งเกี่ยวข้องกับของไหล การถ่ายโอนความร้อนหรือปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี โดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของกฎการอนุรักษ์มวล โมเมนตัมและพลังงาน ซึ่งเทคนิค CFD จะทำการแก้ไขปัญหในตำแหน่งกริด (Grid) ที่ได้กำหนดขึ้น ผลที่ได้จากการคำนวณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน สามารถนำออกมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลายผ่านการแสดงในรูปแบบที่แตกต่างกันไปตามลักษณะของงาน ทำให้เทคนิค CFD นี้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรมทุกประเภท

โดยทั่วไปแล้วโปรแกรมทางด้านวิเคราะห์ผลจะมีราคาที่สูง แต่ก็ไม่มากเมื่อเทียบกับการทดลองที่ต้องการคุณภาพสูง จึงทำให้เป็นหนึ่งในข้อดีของเทคนิคนี้ซึ่งมีข้อดีอื่นๆที่พอสรุปได้ดังนี้

- สามารถลดเวลาและต้นทุนของการออกแบบใหม่ได้
- สามารถศึกษาระบบที่ไม่สามารถทำการทดลองได้
- สามารถศึกษาระบบที่มีภาวะเสี่ยงอันตรายหรือที่มีสมรรถนะนอกเหนือข้อจำกัดปกติที่ระบบนั้นทำงานอยู่ เช่น ศึกษาในเรื่องความปลอดภัยเมื่อเกิดการไม่คาดคิดขึ้น
- ไม่จำกัดรายละเอียดของผลลัพธ์ที่ต้องการนำไปใช้งาน ซึ่งทำให้สามารถออกแบบเพื่อให้อุปกรณ์ทำงานในเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดทั้งด้านประสิทธิภาพที่ได้รับและด้านเศรษฐศาสตร์

หลักการทำงานของ CFD แบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน

Pre-Processor คือ ส่วนของการป้อนข้อมูลของปัญหากรไหลให้กับโปรแกรมคำนวณ ในส่วนนี้ขั้นตอนนี้จะรวมถึง

- นิยามรูปร่างขอบเขตที่สนใจ ซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของปัญหาที่ต้องการคำนวณ
- การแบ่งขอบเขตของปัญหาเป็นส่วนเล็กๆจำนวนมาก และไม่เกิดการทับซ้อนกัน
- การเลือกปรากฏการณ์ทางธรรมชาติทางกายภาพและทางเคมีที่จำเป็นต่อแบบจำลอง
- นิยามคุณสมบัติของของไหล
- กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมกับขอบเขตของปัญหา

ความแม่นยำของคำตอบจากวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลถูกควบคุมโดยจำนวนเซลล์ ซึ่งจำนวนเซลล์ยิ่งมากคำตอบของปัญหาก็จะแม่นยำมากขึ้น แต่การแบ่งเซลล์ในการคำนวณก็มีข้อจำกัดในเรื่องของประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Solver คือ ส่วนของการแก้ปัญหา ซึ่งเทคนิคในการคำนวณเชิงตัวเลข มีอยู่ 4 แบบด้วยกัน คือ Finite difference method, Finite element method, Spectral method และ Finite volume method รูปแบบพื้นฐานของการแก้ปัญหามีขั้นตอนดังนี้

- ประมาณตัวแปรที่ไม่ทราบค่าด้วยฟังก์ชันอย่างง่าย
- เปลี่ยนสมการ Partial differential equations ให้เป็นสมการพีชคณิตด้วยวิธีเชิงตัวเลข โดยการแทนค่าการประมาณลงในสมการควบคุมแล้วทำการจัดรูป
- แก้ปัญหาของสมการพีชคณิต

เทคนิคเชิงตัวเลขที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบ Finite volume method เทคนิคเชิงตัวเลขนี้ถูกพัฒนามาจาก Spectral method ซึ่งได้มีการตัดพจน์อันดับสูงออกไปและจะสนใจเพียงเทคนิควิธีที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ลำดับขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลขของวิธีนี้จะประกอบด้วย

- อินทิเกรตสมการควบคุมของของไหลทุกปริมาตรภายใต้ขอบเขตของปัญหา
- เปลี่ยนสมการ Partial differential equations ให้เป็นสมการพีชคณิตด้วยวิธีเชิงตัวเลข ด้วยการแทนค่าเทอมต่างๆ ของสมการควบคุมที่อินทิเกรตแล้วด้วยการประมาณค่า
- หาคำตอบของสมการพีชคณิตโดยวิธีการกระทำซ้ำ

Post-processor เป็นส่วนของการแสดงผลที่ได้ ซึ่งได้มีการพัฒนาให้มีการแสดงผลในรูปแบบต่างๆ เช่น

- รูปทรงโดเมนและการแสดงกริด
- เวกเตอร์
- เส้นและ Contour
- พื้นผิว 2 มิติและ 3 มิติ
- การติดตามอนุภาค
- การจัดภาพการมอง (การย้าย, การหมุน, การปรับ ฯลฯ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation) [2][3]

สมการนาเวียร์-สโตกส์ เป็นสมการที่ใช้เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยการประยุกต์ใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันบนของไหล ร่วมกับสมมติฐานว่าความเค้นบนของไหล คือ ผลรวมของเทอมของความหนืดของการกระจายตัวและเทอมของความดัน ชุดสมการนาเวียร์-สโตกส์เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ ที่ไม่มีการระบุความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่แน่นอน แต่จะระบุเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงแทน ชุดสมการนาเวียร์-สโตกส์ไม่สามารถใช้ระบุตำแหน่งได้ แต่สามารถบอกความเร็วได้ ทำให้คำตอบของชุดสมการนาเวียร์-สโตกส์ ถูกเรียกว่าสนามความเร็วหรือสนามการไหล ซึ่งเป็นตัวอธิบายถึงความเร็วของของไหล ณ ตำแหน่ง และเวลาที่กำหนด โดยทั่วไปสมการนาเวียร์-สโตกส์ จะประกอบด้วยชุดสมการที่เกี่ยวข้อง 3 ชุดสมการด้วยกันคือ สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัมและสมการพลังงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมีชุดสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (2-1)$$

สมการโมเมนตัม

$$\text{x component : } \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2-2)$$

$$\text{y component : } \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v V) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (2-3)$$

$$\text{z component : } \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w V) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (2-4)$$

โดยที่ V คือ ความเร็วของของไหล f คือ แรงจากน้ำหนักวัตถุ

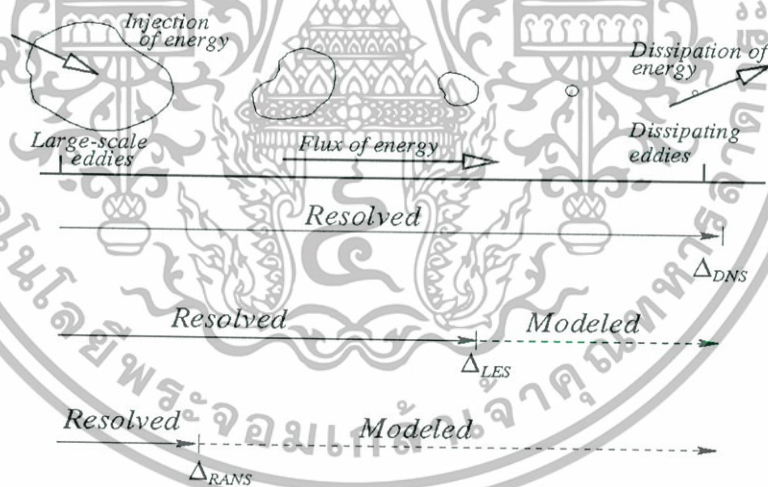
ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล u, v, w คือ ความเร็วในทิศทาง x, y, z ตามลำดับ

p คือ ความดัน τ คือ เทนเซอร์ของความเค้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สมการนาเวียร์-สโตกส์จากการเฉลี่ยของเรโนลด์ (Reynolds-Averaged Navier -Stokes equation) [4][5]

การคำนวณเพื่อหาลักษณะของการไหลผ่านชุดสมการนาเวียร์-สโตกส์โดยตรง (Direct Numerical Simulation, DNS) นั้น จำเป็นที่จะต้องอาศัยทรัพยากรจำนวนมากเพื่อใช้ร่วมกับการคำนวณดังกล่าว เช่น จำเป็นต้องใช้กริด (Grid) ที่มีขนาดเล็กมากในการคำนวณ โดยขนาดของ กริดต้องเล็กมากพอที่จะสามารถวัดลักษณะการไหลของกระแสการไหลเล็กๆที่เกิดขึ้นได้ หรือ ต้องใช้คอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงมาก เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่ละเอียดและครบถ้วน จากการคำนวณผ่านชุดสมการนั้น ในการใช้งานทางวิศวกรรมส่วนมากจะไม่เน้นถึงความละเอียดจากการจำลองมาก จึงได้ลดข้อจำกัดที่เกิดขึ้นนี้โดยนำชุดสมการนาเวียร์-สโตกส์มาประยุกต์ให้ใช้งานได้ง่ายขึ้น โดยเฉลี่ยความเร็วของกระแสการไหลนั้นและเพิ่มพจน์ของความเร็วแกว่ง เข้าไปในสมการเพื่ออธิบายถึงลักษณะของการไหลนั้น ณ เวลาใดๆ ค่าความเร็วแกว่งที่เพิ่มเข้ามาในสมการจะถูกระบุในรูปของแบบจำลอง (Models) ต่างๆ ซึ่งจะทำให้ความต้องการทรัพยากรที่ใช้ในการคำนวณลดลงไปตามจำนวนแบบจำลองที่เพิ่มเข้าไปด้วย แต่ความผิดพลาดในการคำนวณที่เกิดจากการใช้แบบจำลองก็จะมากขึ้นตามไปด้วยเช่น LES หรือ RANS ดังภาพที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงถึงการคำนวณลักษณะการไหลโดยชุดสมการต่างๆ

สมการนาเวียร์-สโตกส์จากการเฉลี่ยของเรโนลด์หรือ RANS เป็นแบบจำลองหนึ่งซึ่งแสดงถึงลักษณะการไหลของของไหล ณ ช่วงเวลาเฉลี่ยหนึ่งโดยแบบจำลองนี้จะใช้กับการไหลแบบปั่นป่วนเป็นหลักซึ่งชุดสมการในแบบจำลองสามารถใช้ในการประมาณค่าคุณสมบัติต่างๆตามองค์ความรู้ของการไหลแบบปั่นป่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อนำไปใช้เป็นค่าประมาณเฉลี่ยที่ใช้แก้ปัญหาในสมการนาเวียร์-สโตกส์ โดยที่รูปแบบสมการเมื่อของไหลเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้และมีลักษณะเป็นของไหลแบบ Newtonian สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \right] \quad (2-5)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล \bar{u} คือ ความเร็วแกว่ง \bar{u}_i คือ ความเร็วเฉลี่ย μ คือความหนืดของของไหล \bar{f}_i คือ แรงจากน้ำหนักวัตถุเฉลี่ย และ δ_{ij} คือ เดลตาโครเนกเกอร์ (Kronecker Delta)

จากสมการพจน์ทางด้านซ้ายมือจะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าโมเมนตัมเฉลี่ยขององค์ประกอบในของไหลเนื่องมาจากความไม่คงที่ของการไหลเฉลี่ย และการนำพาโดยกระแสนของการไหลเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้จะถูกชดเชยด้วยค่าเฉลี่ยของแรงที่กระทำต่อวัตถุ (Body Force) ซึ่งประกอบด้วย

- ค่า Isotropic stress เนื่องจากสนามความดันเฉลี่ย
- ค่า Viscous stresses
- ค่า Apparent stress, $(-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)$ เนื่องจากสนามความเร็วแกว่ง

ซึ่งค่าทั้ง 3 จะเรียกโดยทั่วไปว่า Reynolds stress โดยที่พจน์ของ Nonlinear Reynolds stress จำเป็นที่จะต้องเพิ่มแบบจำลองอื่นๆเข้ามาอีกเพื่อให้ใกล้เคียงกับสมการ RANS ซึ่งทำให้แตกแขนงเป็นแบบจำลองความปั่นป่วนอีกมากมาย เช่น

1. แบบจำลองศูนย์สมการ Mixing length model
2. แบบจำลองหนึ่งสมการ Spalart-Almaras
3. แบบจำลองสองสมการ k - ϵ style models (standard, RNG, realizable), k - ω model, และ ASM.
4. แบบจำลองเจ็ดสมการ Reynolds stress model

2.4 Reynolds Stress Model (RSM)

Reynolds Stress Model (RSM) เป็นแบบจำลองที่อธิบายถึงลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วนของไหลที่ใกล้เคียงกับสมการนาเวียร์-สโตกส์จากการเฉลี่ยของเรโนลด์ (RANS) แบบจำลองหนึ่ง ซึ่งในแบบจำลองได้เพิ่มสมการที่ใช้ในการคำนวณถึงลักษณะของการเคลื่อนที่ที่เกิดจากค่า Reynolds Stress ในลักษณะต่างๆเข้าไว้ด้วยกัน โดยสมการที่ถูกเพิ่มเข้ามาจะใช้เพื่อจำลองถึงปัจจัยอันเนื่องมาจากการเกิดความเครียดในระดับสูงของการไหลและปัจจัยอันเนื่องมาจากค่า Reynolds Stress ที่ส่งผลต่อลักษณะของการไหลที่ไม่เท่ากันในแต่ละทิศทาง โดยจะมีการคำนวณจากค่า Reynolds Stress ของแต่ละตำแหน่งที่ต่างกันออกไป, $\rho \bar{u}_i \bar{u}_j$ หรือเขียนในรูปของ Kinematic Reynolds Stress ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{ij} = -\tau_{ij}/\rho = \overline{u_i u_j} \quad (2-6)$$

โดยที่ τ เป็นค่า Reynolds Stress Tensor และมีสมการการเคลื่อนย้ายดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u_i u_j}) = & \\ - \frac{\partial}{\partial x_k}[\rho \overline{u_i u_j u_k} + p(\delta_{kj} u_i + \delta_{ik} u_j)] - \rho(\overline{u_i u_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k}) + & \\ p \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - 2\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} - 2\rho \omega_k (\overline{u_j u_m} \epsilon_{ikm} + \overline{u_i u_m} \epsilon_{jkm}) + & \\ \frac{\partial}{\partial x_k} [\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u_i u_j})] - \rho \beta (g_i \overline{u_j \theta} + g_j \overline{u_i \theta}) + S_{user} & \end{aligned} \quad (2-7)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล u คือความเร็วแกว่ง u คือความเร็ว μ คือความหนืดของของไหล
 p คือ ความดันของของไหล ϵ_{jkm} คือ Permutation Symbol ω คือ สัดส่วนโดยมวล
 δ_{ij} คือ เดลตาโครเนกเกอร์ (Kronecker Delta) β คือ การไล่ระดับของความเร็วที่พื้นผิว และ
 g คือ แรงจากน้ำหนักวัตถุต่อมวล หรือเขียนได้ในรูป

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u_i u_j}) + C_{ij} = D_{T,ij} + P_{ij} + \Pi_{ij} - \epsilon_{ij} + \Omega_{ij} + D_{L,ij} + G_{ij} + S_{user} \quad (2-8)$$

โดยที่

C_{ij} หมายถึง Convection Term	$D_{T,ij}$ หมายถึง Turbulent Diffusion
$D_{L,ij}$ หมายถึง Molecular Diffusion	P_{ij} หมายถึง Stress Production
G_{ij} หมายถึง Buoyancy Production	Π_{ij} หมายถึง Pressure Strain
ϵ_{ij} หมายถึง Dissipation	Ω_{ij} หมายถึง Production by System Rotation
S_{user} หมายถึง User-Defined-Source Term	

โดยที่ค่าในเทอมของ $D_{L,ij}$ G_{ij} และ S_{user} เป็นค่าที่ถูกเพิ่มเข้ามาในชุดสมการเพื่อให้การคำนวณรูปแบบการไหลของของไหลในบางรูปแบบมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ชุดรูปแบบสมการ RSM โดยทั่วไปจึงเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u_i u_j}) + C_{ij} = P_{ij} + D_{T,ij} + \Pi_{ij} - \epsilon_{ij} + \Omega_{ij} \quad (2-9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นการอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงไปของสนามการไหลตามค่า Reynolds Stress ที่ถูกระบุไว้ในสมการการเคลื่อนที่ในแต่ละสมการย่อยทั้ง 6 สมการนั่นเอง โดยในการคำนวณจะมีการแปลงบางชุดสมการที่ใช้ข้างต้นให้เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณจริงเพื่อความสะดวกในการใช้งานดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงสมการที่ใช้ข้างต้นให้เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณจริงเพื่อความสะดวกในการใช้งาน

พจน์	สมการจริง	รูปแบบชุดสมการในการคำนวณ	ที่มาของชุดสมการ
$D_{T,ij}$	$-\frac{\partial}{\partial x_k} [\overline{\rho u_i u_j u_k}] + p(\delta_{kj} \overline{u_i} + \delta_{ik} \overline{u_j})$	$-\frac{\partial}{\partial x_m} \left(\overline{v_t} \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_m} \right)$	การตั้งสมมติฐานในการไล่ระดับของการแพร่
Π_{ij}	$-p \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right)$	$-C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) - C_2 \left(P_{ij} - \frac{2}{3} P \delta_{ij} \right)$	โดยปกติจะใช้รูปแบบการคำนวณแบบ Launder model
ε_{ij}	$2\mu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k}$	$\frac{2}{3} \varepsilon \delta_{ij}$	คำนวณจากสมการ ε มาตรฐาน

โดยที่ v_t คือ Turbulent kinematic viscosity

P คือ ความดัน โดยจะมีค่าเท่ากับ $0.5P_{ii}$

C_1 และ C_2 มีค่าเท่ากับ 1.8 และ 0.6 P ตามลำดับ (ในกรณีที่ใช้รูปแบบสมการในการคำนวณเป็นแบบ Launder Model)

สำหรับแบบจำลองนี้ พจน์ที่มีความสำคัญ คือ พจน์ของ Pressure Strain (Π_{ij}) ซึ่งเป็นพจน์ที่ใช้ในการปรับแก้ค่าความผันแปรของความดันที่เกิดขึ้น อันเนื่องมาจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างกระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นด้วยตัวเอง และ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างกระแสหมุนวนกับพื้นที่ที่มีการไหลของของไหลด้วยความเร็วเฉลี่ยที่ต่างกันไป ผลที่เกิดขึ้นจากการปรับแก้ด้วยตัวแปรนี้คือปรับแก้ค่า Normal Reynolds Stress ให้มีความปั่นป่วนเป็นรูปแบบ Isotropic มากขึ้น ด้วยการกระจายพลังงาน และลดค่า Shear Reynolds Stress ลง โดยเฉพาะในบริเวณที่ใกล้ผนัง เพราะผนังจะส่งผลให้เกิดความผันแปรของความดันที่มีความปั่นป่วนเป็นแบบ Anisotropic โดยเกิดการลดทอนของ Normal Reynolds Stress ในทิศทางที่ตั้งฉากกับผนังนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการเพิ่มขึ้นมาของพจน์นี้จึงส่งผลให้การจำลองโดย RSM ไม่จำเป็นที่จะต้องตั้งสมมติฐานให้ ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากความผันแปรของความดันมีรูปแบบ Isotropic เสมอไป ส่งผลให้แบบจำลองนี้มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

ถึงแม้ว่าแบบจำลอง RSM จะค่อนข้างซับซ้อน แต่ถือได้ว่าเป็นแบบจำลองที่ง่ายที่สุดในกลุ่มของแบบจำลองที่มีศักยภาพในการจำลองปรากฏการณ์ของความปั่นป่วนได้อย่างครบถ้วนโดยเฉพาะการไหลที่เป็นเส้นโค้งมีการหมุนและมีอัตราความเครียดในการไหลนั้นสูง เช่น กระแสการไหลในไซโคลน ในเตาเผาหรือกระแสการไหลของกระบวนการแยกต่างๆ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการทำนายลักษณะการไหลในรูปแบบต่างๆ ได้เหมือนกับหรือใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่าแบบจำลอง k-epsilon อีกด้วย เนื่องจากความต้องการทรัพยากรในการคำนวณสูงมากจึงทำให้ไม่เป็นที่นิยมนักในการนำไปใช้กับโปรแกรมสำเร็จรูป แต่ก็ยังมีการพัฒนาวิจัยกันเรื่อยมา จนในปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปหลายตัวที่มีแบบจำลองนี้ให้ได้เลือกใช้ใช้งาน

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงจุดเด่นและจุดด้อยของแบบจำลองแบบ RSM (Reynolds Stress Model)

จุดเด่น	จุดด้อย
<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นแบบจำลองที่ศักยภาพครอบคลุมรูปแบบการไหลมากที่สุดแบบหนึ่ง 2. การคำนวณต้องการเพียงแค่เงื่อนไข และ/หรือ ค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่เกี่ยวข้องเท่านั้น 3. ครอบคลุมทั้งความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากความผันแปรของความดันมีรูปแบบ Isotropic และ Anisotropic โดยไม่ต้องตั้งสมมติฐานให้เป็นเฉพาะ Isotropic เสมอไป 4. มีความแม่นยำสูงในการคำนวณคุณสมบัติการไหล รวมทั้งค่า Reynolds Stress ทั้งการไหลอย่างง่ายและการไหลที่ซับซ้อน เช่น การไหลในช่องที่ไม่สมมาตร เป็นต้น 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ใช้ทรัพยากรในการคำนวณเป็นอย่างมาก 2. ยังไม่ได้รับการตรวจสอบกับการทดลองมากเทียบเท่ากับแบบจำลองแบบ k-epsilon 3. ผลการจำลองในลักษณะการไหลบางแบบก็มีผลที่ไม่แตกต่างจากแบบจำลองแบบ k-epsilon เช่น การไหลของลำเจ็ตแบบอิสระ (Unconfined Jet) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 Discrete Phase Modeling(DPM)

เป็นแบบจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าอนุภาคเป็นทรงกลมกระจายตัวอย่างเบาบางในเฟสของของไหล ดังนั้นปริมาตรของอนุภาคในของไหลจะน้อยมากจนตัดทิ้งได้ (สัดส่วนโดยปริมาตรน้อยกว่า 10-20 %)

สำหรับ Lagrangian discrete phase model ในโปรแกรม FLUENT จะใช้ตามวิธีของ Eulerian-Lagrangian ซึ่งสถานะของไหลจะถูกทำให้ต่อเนื่อง โดยใช้เวลาเฉลี่ยของสมการนาเวียร์-สโตกส์ในการหาคำตอบ และสถานะที่กระจายตัวอยู่ จะหาคำตอบได้โดยติดตามอนุภาคจำนวนมากผ่านการคำนวณบนสนามการไหล ซึ่งสถานะที่กระจายตัวจะสามารถแลกเปลี่ยนโมเมนตัม มวลและพลังงานกับสถานะของไหลภายใต้กรอบของ Eulerian-Lagrangian

เส้นทางโคจรของอนุภาคถูกคำนวณภายใต้กรอบของ Eulerian-Lagrangian ระหว่างการคำนวณของสถานะของไหล ซึ่งทำให้ได้ตัวแบบที่เหมาะสมสำหรับการไหลที่บรรจุอนุภาคอยู่ การบรรจุอนุภาคในไฮโดรโคลนจะมีค่าน้อย (3-5%) ดังนั้นจึงสมมุติว่า การมีอยู่ของอนุภาคไม่มีผลกระทบต่อสนามการไหล (One-way coupling) เพราะฉะนั้นในรูปของวิธี Eulerian-Lagrangian (One-way coupling) สมการของการเคลื่อนที่ที่จะสามารถตัดพจน์ของแรงกระทำระหว่างอนุภาคที่เพิ่มเข้ามา เช่น Pressure gradient, Thermophoretic, Rotating reference frame, Brownian motion, Saffman lift เป็นต้น ออกไป จะได้รูปสมการเป็น

$$\frac{du_{pi}}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re_p}{24} (u_i - u_{pi}) + \frac{(\rho_p - \rho) g_i}{\rho_p} \quad (2-10)$$

$$\frac{dx_{pi}}{dt} = u_{pi} \quad (2-11)$$

ซึ่งเทอม $\frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re_p}{24}$ คือ แรงหน่วง (Drag force) ต่อมวลหนึ่งหน่วยของอนุภาค ρ และ μ คือ ความหนาแน่นและความหนืดของการไหลตามลำดับ ρ_p และ d_p คือ ความหนาแน่นและเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคตามลำดับ C_D คือ สัมประสิทธิ์ความหน่วง (Drag coefficient) u_i และ u_{pi} เป็นความเร็วของแก๊สและอนุภาคตามลำดับ g_i คือ ความเร่งเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงในทิศทาง i

Re_p คือ ค่าตัวเลขเรโนลด์สัมพัทธ์

$$Re_p = \frac{\rho_p d_p |u - u_p|}{\mu} \quad (2-12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโปรแกรม Fluent สัมประสิทธิ์ความหวังสำหรับอนุภาคทรงกลม คือ การคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ ที่พัฒนาโดย Morsi และ Alexander ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าตัวเลขเรโนลด์สัมพัทธ์ (Re_p) และสำหรับการกระจายตัวของอนุภาคในการในการป้อนเข้าสู่ไซโคลนจะเป็นไปตามวิธีของ Rosin-Rammler Diameter Distribution ซึ่งจะแบ่งอนุภาคเป็นหลายขนาด จำเป็นต้องกำหนดข้อมูลดังนี้

1. ขนาดอนุภาค 3 ขนาดในการกระจายตัว คือ ขนาดเล็กสุด ขนาดใหญ่สุดและขนาดเฉลี่ย (\bar{d})

2. ตัวแปรการกระจาย (Spread parameter, n) คำนวณจากสมการ

$$n = \frac{\ln(-\ln Y_d)}{\ln(d/\bar{d})} \quad (2-13)$$

เมื่อ Y_d คือ สัดส่วนโดยมวลของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่เราสนใจ (d)

3. จำนวนของอนุภาคแต่ละการกระจายขนาด

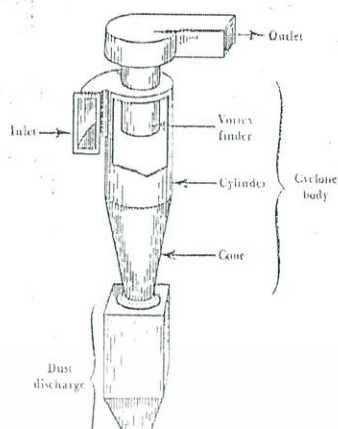
2.6 ไซโคลน (Cyclone)

ไซโคลนเป็นเครื่องแยกสารปนเปื้อนในอากาศแบบหนึ่งที่ยอมรับใช้กันมากในอุตสาหกรรมการผลิตที่มีฝุ่นปริมาณความเข้มข้นสูงๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ อุตสาหกรรมการเจียรไนและขัดผิวโลหะต่างๆ อุตสาหกรรมเตาหลอมโลหะ เป็นต้น

2.6.1 หลักการทำงานไซโคลน

ไซโคลนประกอบด้วยส่วนรูปทรงกระบอกและมีปลายเป็นรูปโคน (รูปที่ 1) เมื่อป้อนอากาศที่ประกอบด้วยอนุภาคกระจายตัวอยู่เคลื่อนที่เข้าสู่ไซโคลนในแนวสัมผัสที่ใกล้ส่วนบนของเครื่องมือด้วยความเร็วค่าหนึ่ง อากาศที่ผ่านเข้ามาในไซโคลนจะเกิดกระแสวน (Main Vortex) ขึ้น ซึ่งทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางเหวี่ยงอนุภาคไปยังผนังของไซโคลนทำให้สูญเสียโมเมนตัมมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไปทำให้อนุภาคมีความเร็วที่ต่ำลง ขณะที่อากาศยังรักษาความเร็วได้มากกว่า และเนื่องจากอนุภาคมีแรงเฉื่อยที่มากกว่าอากาศทำให้อนุภาคพยายามเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงส่วนอากาศที่มีแรงเฉื่อยน้อยกว่ามากก็จะเคลื่อนที่ไปตามกระแสวนทำให้อนุภาคหลุดโค้งออกไปดังนั้นอนุภาคจึงเกิดการแยกออกจากอากาศและจากนั้นกระแสวนนี้จะเคลื่อนลงจนถึงจุดหนึ่งที่อยู่เกือบปลายโคน อากาศจะหมุนกลับเป็นกระแสวนที่เล็กกว่าเดิม (Core Vortex) เนื่องจากการเหนี่ยวนำของความดันและความเร็วที่ต่างกันและเคลื่อนที่ขึ้นไปตามตัวไซโคลน จนออกไปทางท่อออกที่อยู่ส่วนบนของเครื่อง นั่นคือมีกระแสวน 2 ชั้น (Double Vortex) เกิดขึ้นในทิศทางเดียวกัน สำหรับอนุภาค ที่ถูกเหวี่ยงไปยังผนังของไซโคลนจะเคลื่อนที่ลงไปยังส่วนปลายของโคนไปยังถังพัก (Hopper) เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของไซโคลน

2.6.2 สมรรถนะของไซโคลน

สมรรถนะของไซโคลนประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่สำคัญ 3 พารามิเตอร์ คือ ขนาดตัดของอนุภาค (Cut of Diameter) ประสิทธิภาพในการเก็บกักรวม (Overall Collection Efficiency) และความดันลด (Pressure Drop)

- ขนาดตัดของอนุภาค หมายถึง ขนาดของอนุภาคที่ถูกแยกด้วยประสิทธิภาพ 50 %
- ประสิทธิภาพในการกักเก็บรวม หมายถึง ความสามารถในการแยกอนุภาคออกจากของไหลของไซโคลนสามารถหาได้จากการปล่อยอนุภาคจำนวนเฉพาะเข้าไปในปากทางเข้าของไซโคลนและหลังจากนั้นทำการวัดจำนวนอนุภาคที่ออกจากปากทางออกแล้วนำมาเปรียบเทียบกับหรือใช้อัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคแทนการใช้จำนวนอนุภาคในการประเมินประสิทธิภาพในการกักเก็บรวมได้เช่นกัน
- ความดันสูญเสียเป็นค่าที่บ่งบอกถึงพลังงานที่ต้องใช้ในการแยกอนุภาคของไซโคลนยิ่งค่าความดันสูญเสียมากพลังงานที่ใช้ก็จะสูงตาม
- การเพิ่มประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไซโคลนมักจะทำให้พลังงานที่ต้องใช้สูงขึ้นด้วย ดังนั้นในการพิจารณาออกแบบไซโคลนต้องหาความเหมาะสมหรือความสมดุล ระหว่างประสิทธิภาพและความดันลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิเคราะห์ลักษณะการทำงานและสมรรถนะของไซโคลนนั้น ในขั้นตอนแรกต้องสร้างแบบจำลองไซโคลน โดยโปรแกรม Gambit โดยกำหนดขนาดให้เหมือนงานวิจัยที่อ้างอิงเพื่อที่จะสามารถนำไปเปรียบเทียบผลการจำลองได้ จากนั้นจึงส่งแบบจำลองของไซโคลนเข้าโปรแกรม Fluent เพื่อคำนวณการไหลของของไหลภายในไซโคลน โดยกำหนดค่าที่จำเป็นที่จะต้องใช้ในการคำนวณ เช่น สมบัติของสารเข้า ความเร็วขาเข้า ความหนาแน่นของสาร เป็นต้น โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนเป็น Reynolds Stress Model (RSM) และ Wall function เป็นแบบ Non-Equilibrium wall function และจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยใช้ Discrete Phase Model (DPM) เมื่อโปรแกรมคำนวณผลเสร็จแล้ว สามารถแสดงผลการคำนวณเป็นกราฟและเส้นแสดงรูปร่าง (Contour) ของค่าต่างๆ เช่น ความดันสถิต ความเร็วในแนวเส้นสัมผัส ความเร็วในแนวแกน เป็นต้น แล้วนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ใช้อ้างอิง หากค่าที่ได้มีความแตกต่างกันให้ปรับตัวแปรและกำหนดค่าที่ใช้ในการคำนวณใหม่ จนกว่าการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ใช้อ้างอิงซึ่งแสดงว่าแบบจำลองถูกต้อง จึงใช้ตัวแปรและการกำหนดค่าต่างๆ เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการคำนวณไซโคลนที่ต้องการจะศึกษาต่อไป

เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองไซโคลนที่ได้เทียบกับงานวิจัยที่ใช้อ้างอิงแล้ว จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองที่ติดท่อทางออกด้านล่างที่มีลักษณะเป็นมุมป้านโดยใช้มุมเป็น $0, \theta/2, \theta, 3\theta/2$ และ 2θ ซึ่งในแต่ละมุมจะใช้ความยาวเป็น $L/4, L/2$ และ $3L/4$ เช่น ที่มุม $3\theta/2$ จะใช้ความยาวเป็น $L/2, L$ และ $3L/2$ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างไซโคลนมุม $0, \theta/2, \theta, 3\theta/2$ และ 2θ ความยาว $L = 38.5$ หน่วย

จากนั้นนำไปคำนวณด้วยโปรแกรม Fluent โดยกำหนดค่าตามที่ได้ทำการศึกษาไว้ เมื่อทำการคำนวณแบบจำลองครบทุกแบบแล้ว จากนั้นนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบเพื่อที่จะหาว่าไซโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกเป็นมุมป้าน ในอัตราส่วนมุมและความยาวใดที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ไซโคลนที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดแล้ว นำแบบจำลองไซโคลนนั้นมาปรับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ เพื่อศึกษาว่าไซโคลนที่มีประสิทธิภาพสูงสุดจากขอบเขตของการศึกษามีความเหมาะสมที่จะใช้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในช่วงไหนเพื่อที่จะให้ไซโคลนที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ซึ่งตัวเลขเรย์โนลด์สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Re} = \frac{\rho v D_H}{\mu} \quad (3-1)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

v คือ ความเร็วเฉลี่ย

μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์

D_H คือ hydraulic diameter ของท่อทางเข้า

สำหรับท่อทางเข้าที่เป็นสี่เหลี่ยมสามารถหา hydraulic diameter ได้จาก

$$D_H = \frac{4A}{P} = \frac{2LW}{L+W} \quad (3-2)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัด

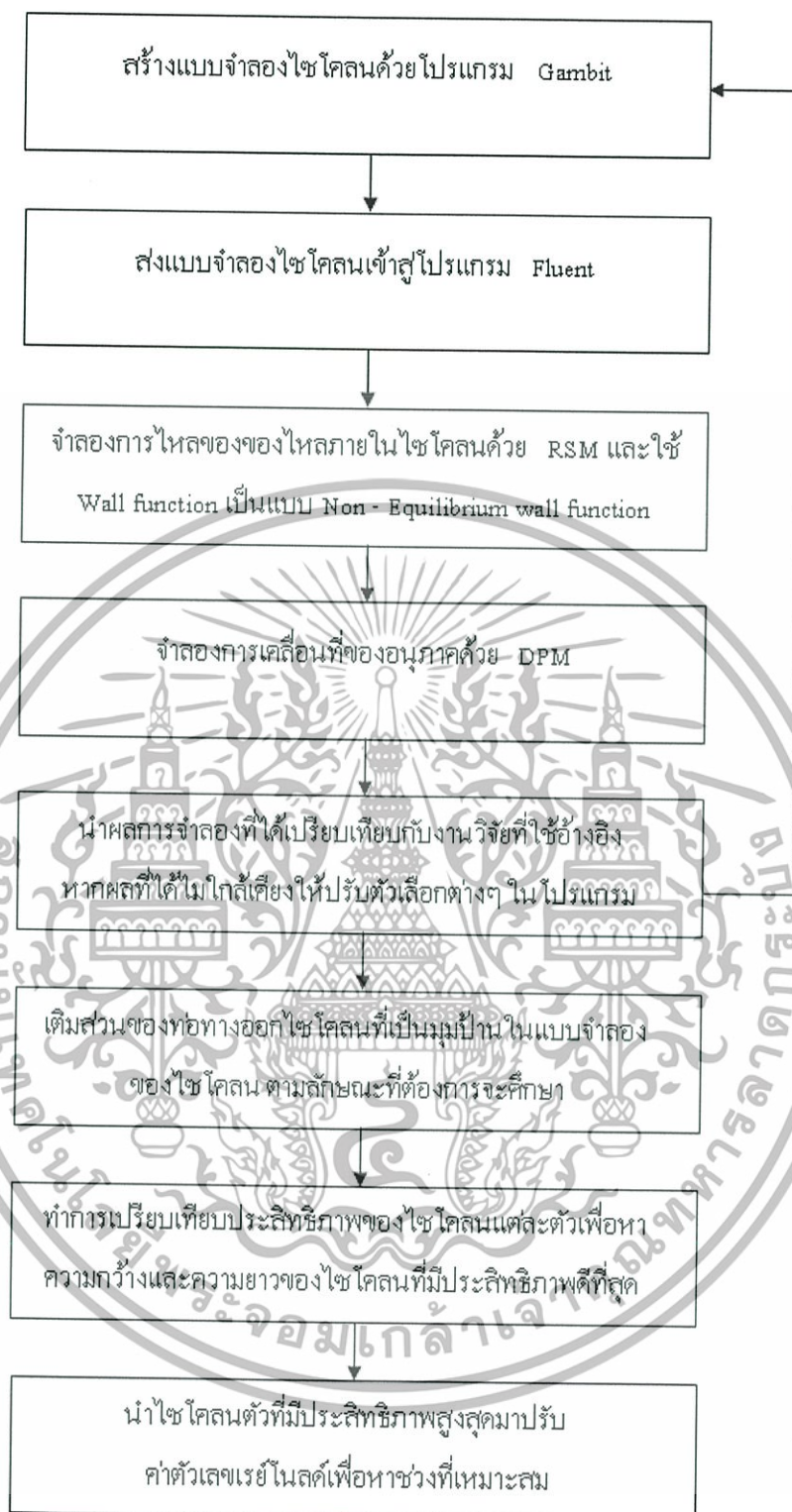
P คือ เส้นรอบรูป

L คือ ความยาว

W คือ ความกว้าง

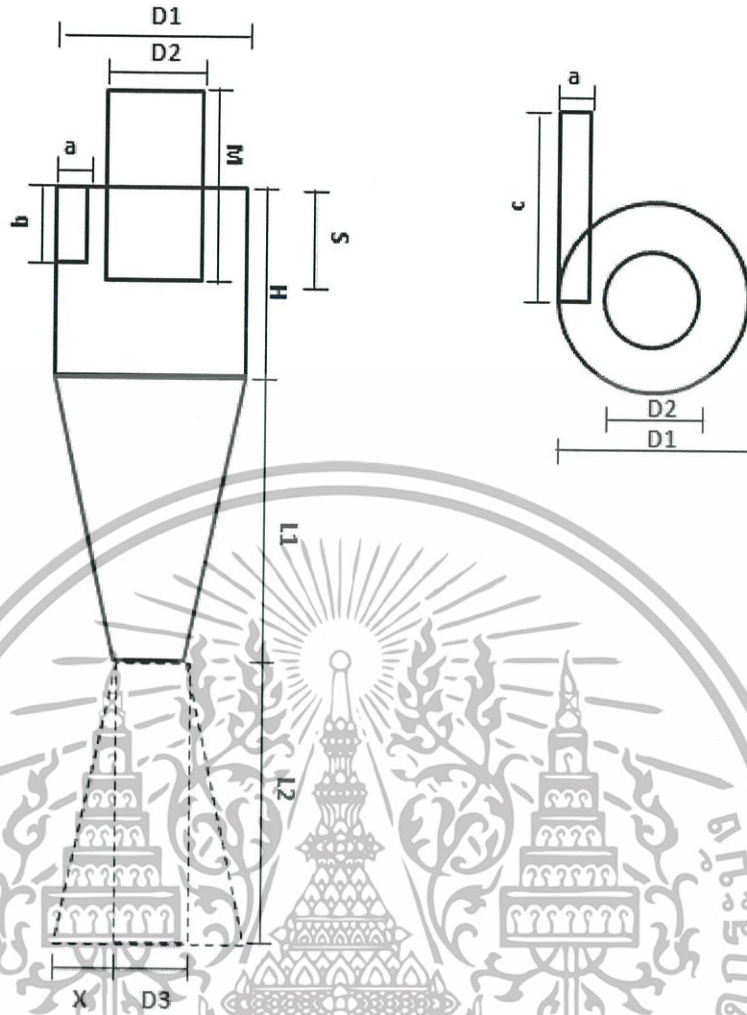
การดำเนินงานเพื่อหาประสิทธิภาพของไซโคลนและขนาดของไซโคลนที่ใช้ในการจำลองสามารถสรุปได้ตามรูปที่ 3.2 รูปที่ 3.3 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของไชโคลอน

ตารางที่ 3.1 ขนาดของไชโคลอน

ลักษณะไชโคลอน	ความยาวด้าน(หน่วย)									
	a	b	c	D1	D2	D3	S	H	M	L1
ไชโคลอนธรรมดา	5	12.5	31	31	15.5	11.6	15.5	31	31	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ขนาดของท่อทางออกของไซโคลน

	ลักษณะท่อทางออกด้านล่าง		ความยาวด้าน(หน่วย)	
	มุม	ความยาว	L2	X
ไม่ติดท่อ	0	0	0	0
ทรงกระบอก	0	0.50L	38.50	0
มุมแหลม	$-\theta$	0.50L	38.50	-8.1185
มุมป้าน	0.5θ	0.25L	19.25	2.02962
มุมป้าน	θ	0.25L	19.25	4.05924
มุมป้าน	1.5θ	0.25L	19.25	6.08886
มุมป้าน	2θ	0.25L	19.25	8.11848
มุมป้าน	0.5θ	0.50L	38.50	4.05925
มุมป้าน	θ	0.50L	38.50	8.1185
มุมป้าน	1.5θ	0.50L	38.50	12.17775
มุมป้าน	2θ	0.50L	38.50	16.237
มุมป้าน	0.5θ	0.75L	57.75	6.08885
มุมป้าน	θ	0.75L	57.75	12.1777
มุมป้าน	1.5θ	0.75L	57.75	18.26655
มุมป้าน	2θ	0.75L	57.75	25.5554

หมายเหตุ : L คือ ความยาวของตัวไซโคลนปกติตั้งแต่ท่อทางออกด้านบนจนถึงปลายโคน

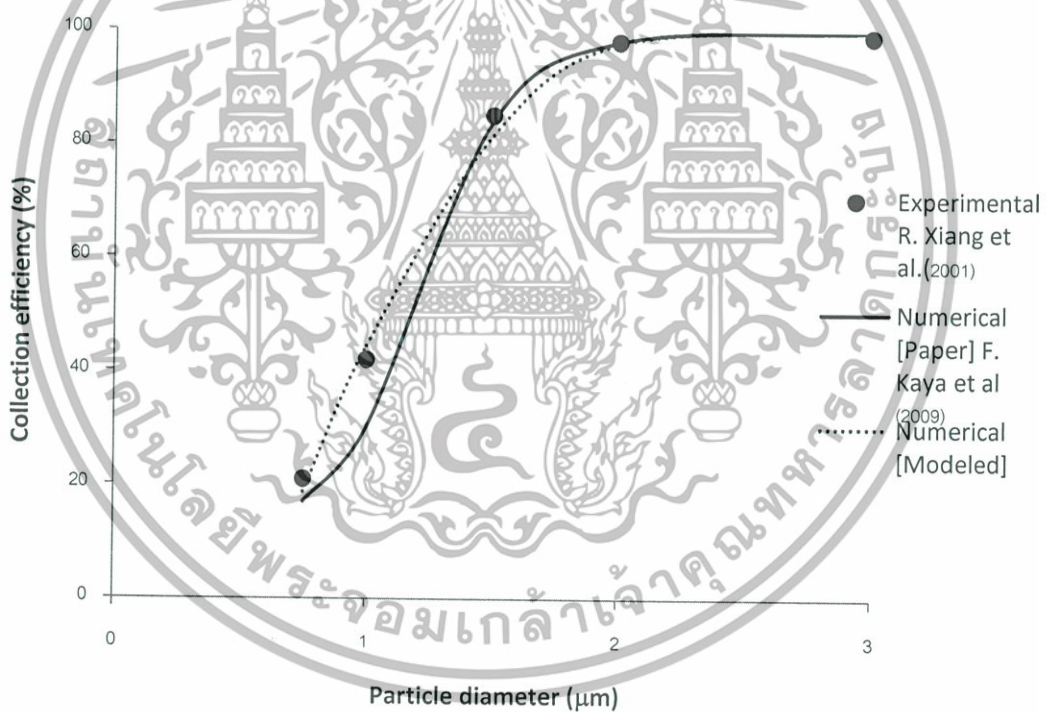
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการคำนวณ

4.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับข้อมูลจากงานวิจัยที่ใช้อ้างอิง

ในการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับข้อมูลจากงานวิจัยที่ใช้อ้างอิง จะใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคในช่วง 0.75 - 2 ไมโครเมตร ความเร็วที่ปากทางเข้า 16 เมตรต่อวินาทีและใช้ขนาดไซโคลนธรรมดา เช่นเดียวกัน จากรูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคที่ได้จากการคำนวณกับข้อมูลจากงานวิจัยที่ใช้อ้างอิง ผลปรากฏว่า ค่าประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของแต่ละขนาดอนุภาค ระหว่างการคำนวณและข้อมูลจากงานวิจัยที่ใช้อ้างอิง มีค่าที่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แสดงว่าแบบจำลองในการวิจัยนี้มีความถูกต้องและ น่าเชื่อถือได้



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของไซโคลนจากการทดลองและการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองไฮโคลนที่ไม่มีท่อทางออกและที่มีท่อทางออกในรูปทรงต่างๆ

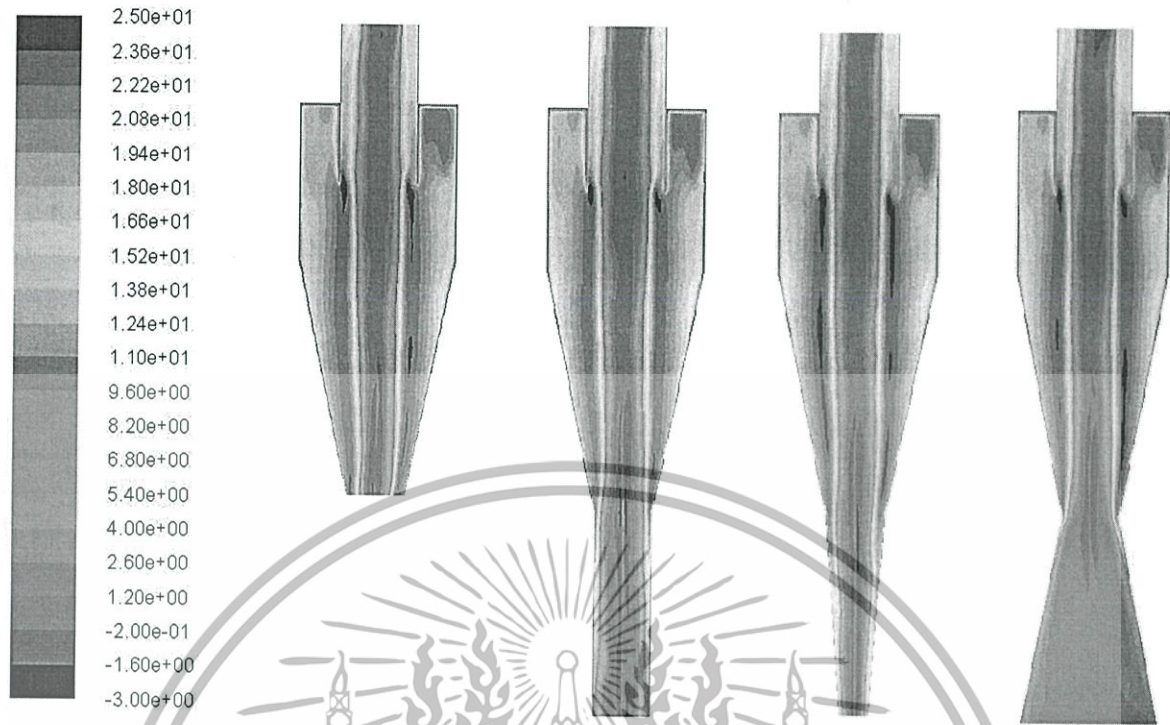
ในส่วนของการจำลองไฮโคลนที่ไม่ต่อท่อทางออก ไฮโคลนที่ต่อท่อทางออกเป็นทรงกระบอก ไฮโคลนที่ต่อท่อทางออกเป็นมุมป้านและไฮโคลนที่ต่อท่อทางออกเป็นมุมแหลม เพื่อเป็นการยืนยันงานวิจัยที่ใช้อ้างอิง ในเรื่องการวิเคราะห์ลักษณะของสมรรถนะของไฮโคลนโดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งผลที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ ไฮโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้านจะให้ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคสูงสุด จากตารางที่ 5 พบว่าไฮโคลนที่ต่อท่อทางออกทางด้านล่างเป็นมุมป้านจะมีประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคร้อยละ 90.60 ส่วนไฮโคลนตัวที่มีประสิทธิภาพต่ำสุด คือ ไฮโคลนตัวที่ไม่ติดท่อทางออกทางด้านล่างมีประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคร้อยละ 86.63

จากรูปที่ 4.2 จะพบว่าสนามการไหลของความเร็วตามแนวสัมผัสที่ท่อทางออกทางด้านล่างจะมีแนวโน้มที่สนามการไหลมีทิศทางลู่ออก ซึ่งการติดท่อทางออกทางด้านล่างที่มีลักษณะเป็นมุมป้านจะเป็นการช่วยให้สนามการไหลของความเร็วตามแนวสัมผัสขยายตัวตามลักษณะที่ควรจะเป็น เนื่องจากความเร็วตามแนวสัมผัสเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดต่อการแยกอนุภาค จึงทำให้ไฮโคลนที่ต่อท่อทางออกทางด้านล่างที่มีลักษณะเป็นมุมป้านมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคได้สูงสุด

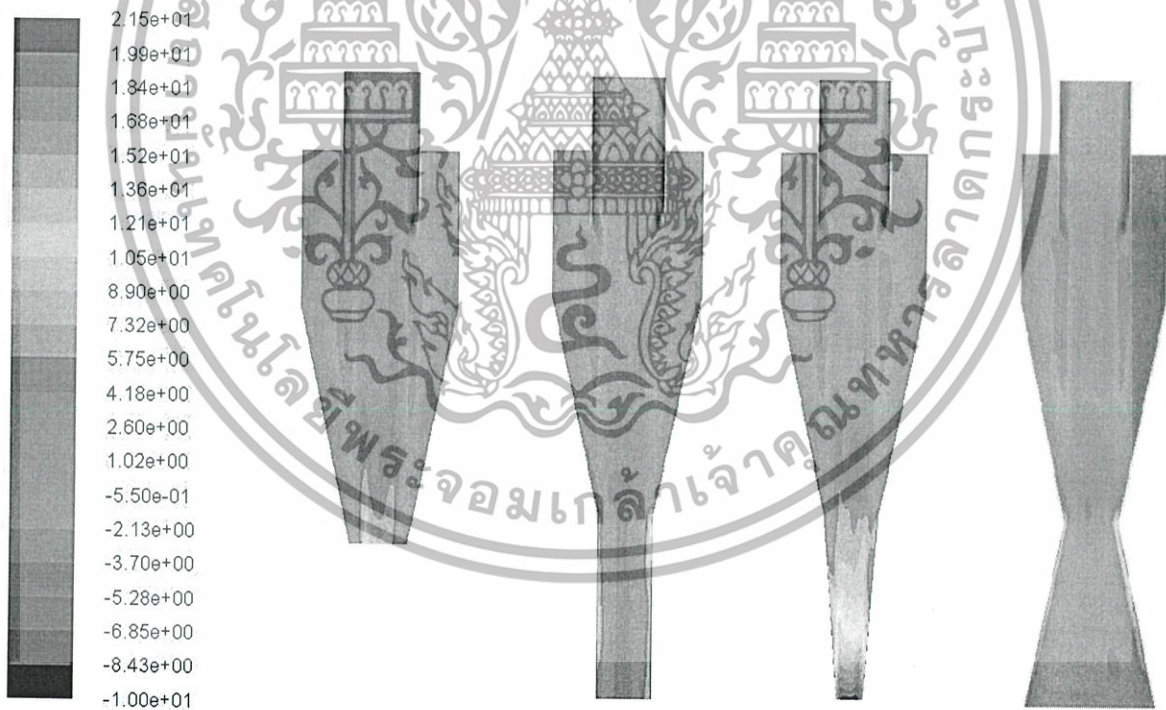
จากรูปที่ 4.3 จะพบว่าสนามการไหลของความเร็วตามแนวแกนของไฮโคลนที่ต่อท่อทางออกทางด้านล่างที่มีลักษณะเป็นมุมป้าน จะมีความเร็วตามแนวแกนที่ไม่สูงมาก เมื่อเทียบกับไฮโคลนในแบบอื่นๆ ถ้าความเร็วตามแนวแกนน้อย ของไหลก็จะหมุนเหวี่ยงอยู่ในไฮโคลนได้นานขึ้นและมีโอกาสที่จะเกิดการแยกสูงมากขึ้น

จากรูปที่ 4.4 จะพบว่าสนามการไหลของความดันสถิตภายในไฮโคลนที่ต่อท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้าน ที่ตรงกลางไฮโคลนจะพบว่ามีความดันสถิตต่ำตลอดทั้งแนวไฮโคลน ของไหลจะเคลื่อนที่จากความดันสูงไปความดันต่ำ จึงทำหน้าที่เป็นตัวดูดของไหลให้ออกไปทางด้านบนของไฮโคลน อีกทั้งปลายด้านล่างตรงบริเวณที่ต่ำกว่าคอคอดลงมาจะมีความแตกต่างของความดันขึ้นซึ่งส่วนที่ต่ำกว่าจะมีความดันที่สูงกว่าจึงทำให้อากาศไหลขึ้นเนื่องมาจากความต่างของความดันนั้นทำให้การแยกอากาศออกได้ดีขึ้น และการที่มีพื้นที่ของท่อทางออกมากจึงมีโอกาสน้อยที่กระแสอากาศจะไปรบกวนกับการตกลงมาของอนุภาคจึงทำให้รูปทรงนี้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

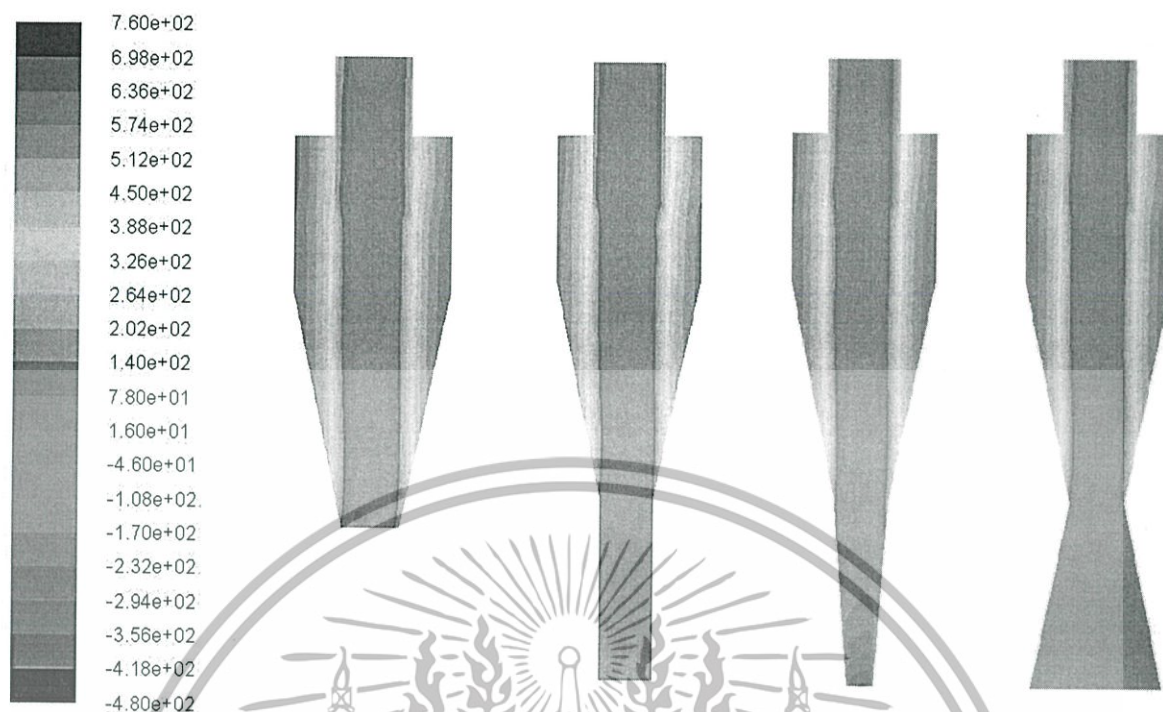


รูปที่ 4.2 Tangential Velocity



รูปที่ 4.3 Axial velocity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 Static pressure

ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไซโคลนรูปแบบต่างๆ

ชนิดไซโคลน	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ไซโคลนธรรมดา	86.63
ไซโคลนที่ติดท่อทางออกเป็นทรงกระบอก	88.35
ไซโคลนที่ติดท่อทางออกเป็นมุมชัน	90.60
ไซโคลนที่ติดท่อทางออกเป็นมุมแหลม	86.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ลักษณะการไหลภายในไซโคลน

หลังจากผลการเปรียบเทียบยืนยันว่าไซโคลนที่ต่อท่อทางออกเป็นแบบมุมป้านให้ประสิทธิภาพสูงสุดแล้ว จากนั้นจึงเปลี่ยนแปลงค่ามุมและความยาวของท่อทางออกที่แตกต่างกันเพื่อหาอัตราส่วนมุมและความยาวที่ทำให้ไซโคลนมีประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคสูงสุด ซึ่งจะนำเสนอแสดงในรูปของContourเพื่อนำมาวิเคราะห์

4.3.1 ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัส

ความเร็วในแนวเส้นสัมผัสเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดต่อการแยกอนุภาค เนื่องจากจะทำให้ของไหลเกิดแรงเหวี่ยงจากศูนย์กลางและอนุภาคที่มีความเฉื่อยจะหลุดจากวงโคจรไปชนผนังทำให้อนุภาคสูญเสียพลังงานและจะตกลงมาทางด้านล่างทำให้เกิดการแยกของอนุภาคเกิดขึ้น ซึ่งจะประกอบไปด้วย main vortex และ core vortex โดยเมื่อของไหลเข้าไปภายในไซโคลน จะเกิดแรงเหวี่ยงจากศูนย์กลางขึ้นและจะทำให้เกิดการแยกอนุภาคขึ้น เนื่องจากแรงเฉื่อยและแรงโน้มถ่วง เมื่อ main vortex เคลื่อนที่ไปจนเกือบสุดปลายโคน ซึ่งเป็นของไหลที่แยกอนุภาคออกแล้วนั้นจะเกิดเป็นกระแสซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเดิม วนกลับออกไปทางด้านบน ซึ่งเรียกว่า core vortex

จากรูป 4.5 จะเห็นว่าไซโคลนตัวที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือที่อัตราส่วนของมุมและความยาวเป็น 1θ และ $L/2$ ตามลำดับนั้น จะเกิด main vortex ออกมาถึงท่อทางออกทางด้านล่าง หมายความว่า การแยกอนุภาคก็จะเกิดมาเรื่อยๆ จนถึงปลายท่อทางออกทางด้านล่างและที่ core vortex จะสังเกตเห็นว่าไซโคลนตัวที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดความเร็วตรงส่วนของ core vortex จะสูงกว่าไซโคลนตัวอื่นๆ ซึ่งก็หมายถึงเกิดการแยกของของไหลออกทางท่อทางออกด้านบนของไซโคลนได้ดีนั่นเอง

4.3.2 ความเร็วตามแนวแกน

คือความเร็วตามแนวแกน ซึ่งเป็นอีกหนึ่งองค์ประกอบที่สำคัญต่อการแยกอนุภาคของไซโคลน เมื่อความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสเหวี่ยงอนุภาคให้หลุดจากวงโคจร ความเร็วตามแนวแกนจะพาอนุภาคที่อยู่ตรงขอบลงมาสู่ถึงเก็บ เนื่องจากพื้นที่ที่ลดลงจะบังคับให้กระแสไหลลงมาสู่ด้านล่างและกระแสด้านในจะไหลออกทางด้านบนของไซโคลนซึ่งเป็นผลเนื่องมาจาก core vortex ความเร็วตามแนวแกนยังรวมถึงเวลาที่กระแสเกิดการหมุนเหวี่ยงอยู่ภายในไซโคลน หากความเร็วตามแนวแกนไม่มากนักก็จะทำให้เวลาในการหมุนเหวี่ยงในไซโคลนนานขึ้น ซึ่งหมายถึงโอกาสที่จะเกิดการแยกก็จะสูงขึ้นด้วย

จากรูป 4.6 จะเห็นว่าไซโคลนตัวที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือที่อัตราส่วนของมุมและความยาวเป็น 1θ และ $L/2$ ตามลำดับนั้น ความเร็วที่ผนังของไซโคลนจะมีค่าสูงเนื่องจากที่บริเวณผนังจะมีอนุภาคจากการแยกและจะตกลงสู่ถึงเก็บทางด้านล่าง จึงทำให้มีความเร็วตามแนวแกนของบริเวณนี้สูงและที่ส่วนบริเวณขอบด้านนอกของ core vortex จะเห็นว่ามีความเร็วติดลบ ซึ่งหมายถึงว่าที่บริเวณนี้ความเร็วจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางขึ้นซึ่งสอดคล้องกับ core vortex ที่ว่าจะมีทิศทางขึ้น เพื่อนำกระแสของของไหลที่ถูกแยกอนุภาค แล้วออกที่ท่อทางออกทางด้านบนนั่นเอง

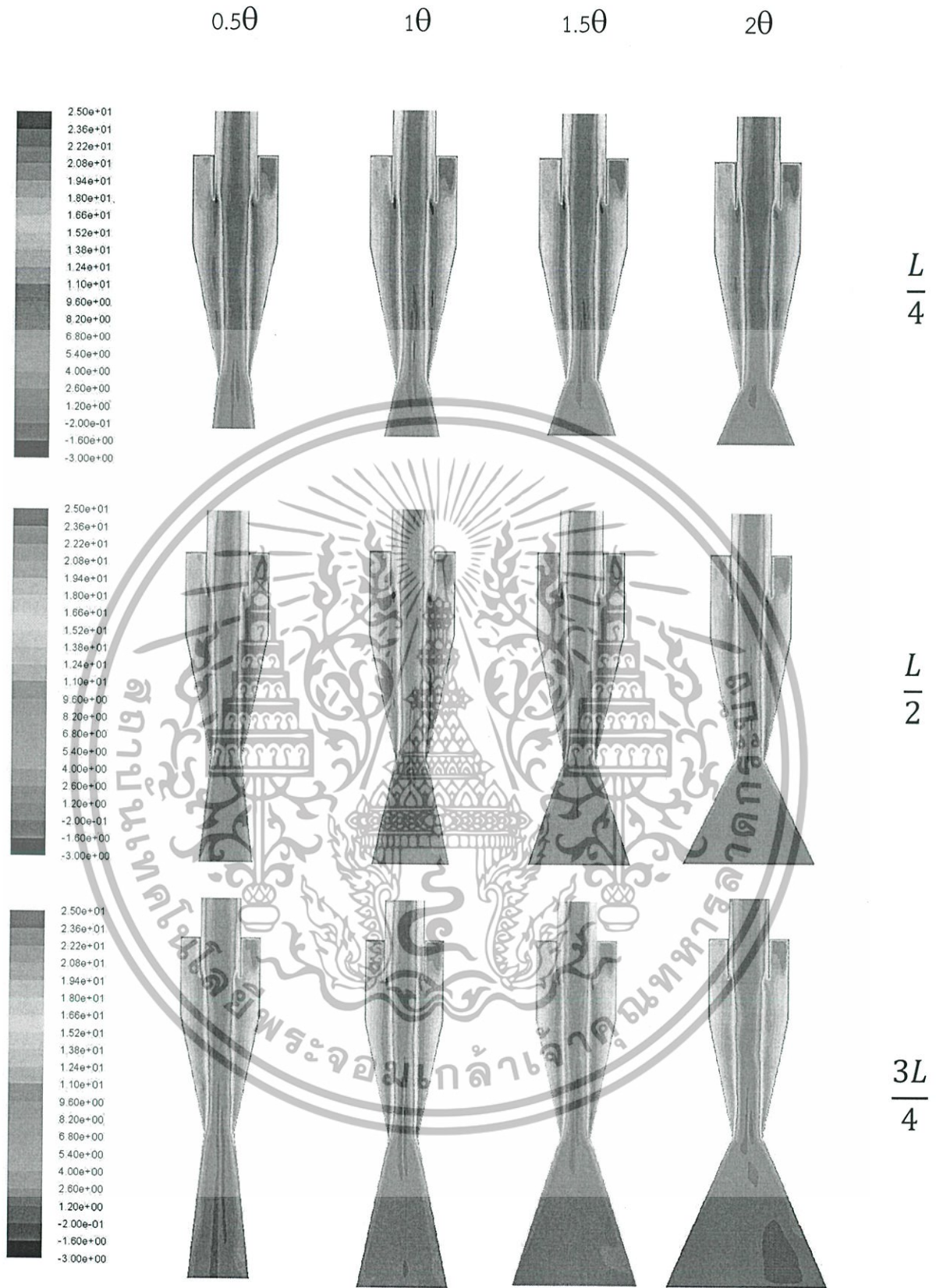
4.3.3 ความดันสถิต

ความดันสถิตคือความดันภายในไซโคลน โดยปกติของไหลจะไหลจากที่ที่มีความดันสูงไปยังที่ที่มีความดันต่ำ ดังนั้นความดันสถิตจึงมีผลต่อการแยกของไซโคลนในแง่ของการแยกของไหลให้ออกไปทางท่อทางออกทางด้านบนของไซโคลน

จากรูป 4.7 จะเห็นว่าไซโคลนตัวที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือที่อัตราส่วนของมุมและความยาวเป็น 1θ และ $L/2$ ตามลำดับนั้น จะเห็นความดันที่แกนกลางของตัวไซโคลนต่ำเป็นลํายาวตลอดทั้งตัวของไซโคลน ซึ่งจะทำหน้าที่เหมือนเป็นตัวดูดของไหลให้ออกที่ท่อทางออกทางด้านบนของตัวไซโคลนและที่แกนกลางตรงส่วนบริเวณคอคอดทางด้านล่างของไซโคลนจะพบเป็นโพรงอากาศขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำให้เกิดการดูดกลับของกระแสของไหลหมุนวนกลับเข้าไปยังตัวตั้งไซโคลนแล้วออกที่ท่อทางออกทางด้านบนของไซโคลนเช่นกัน

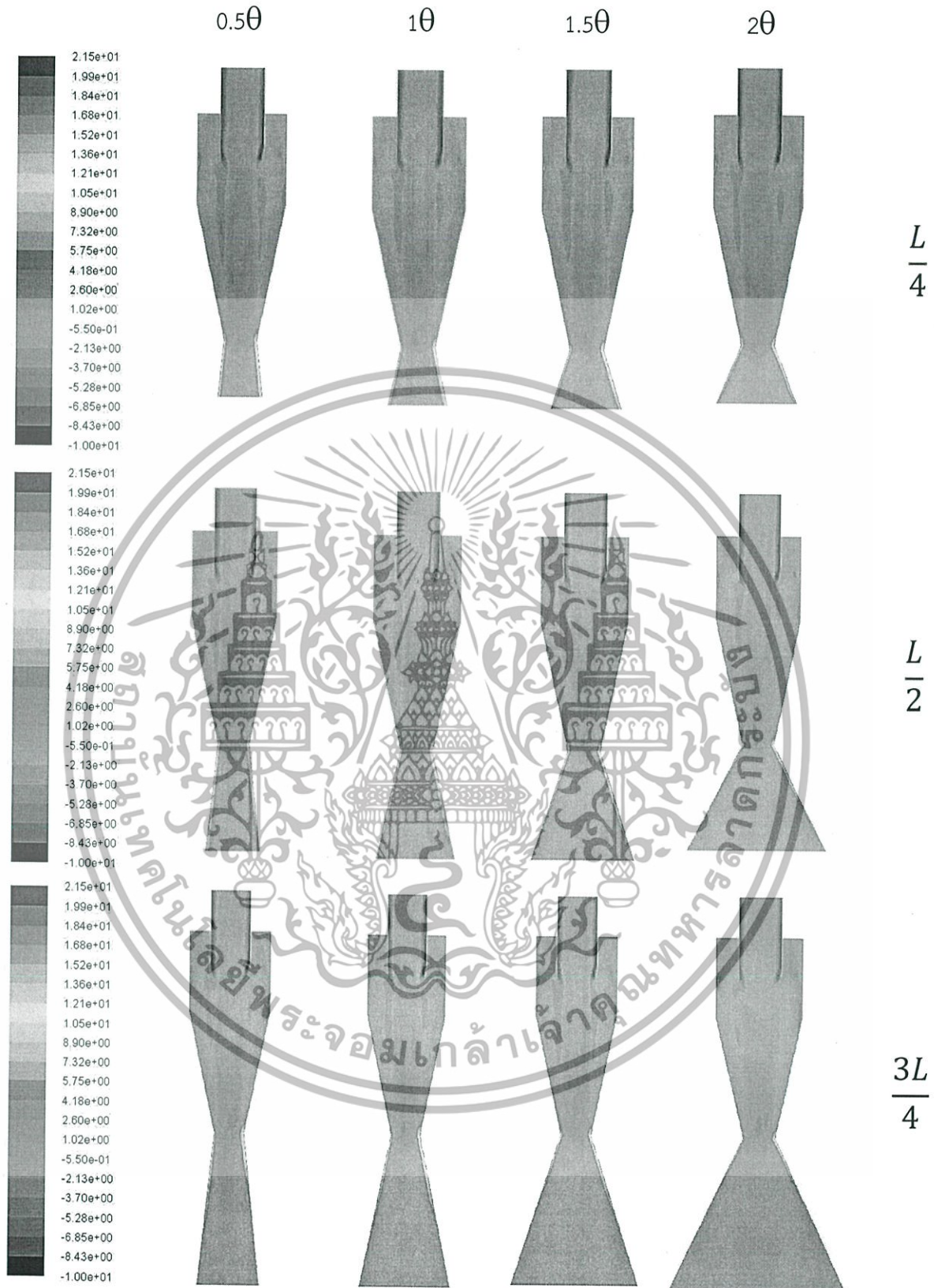


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



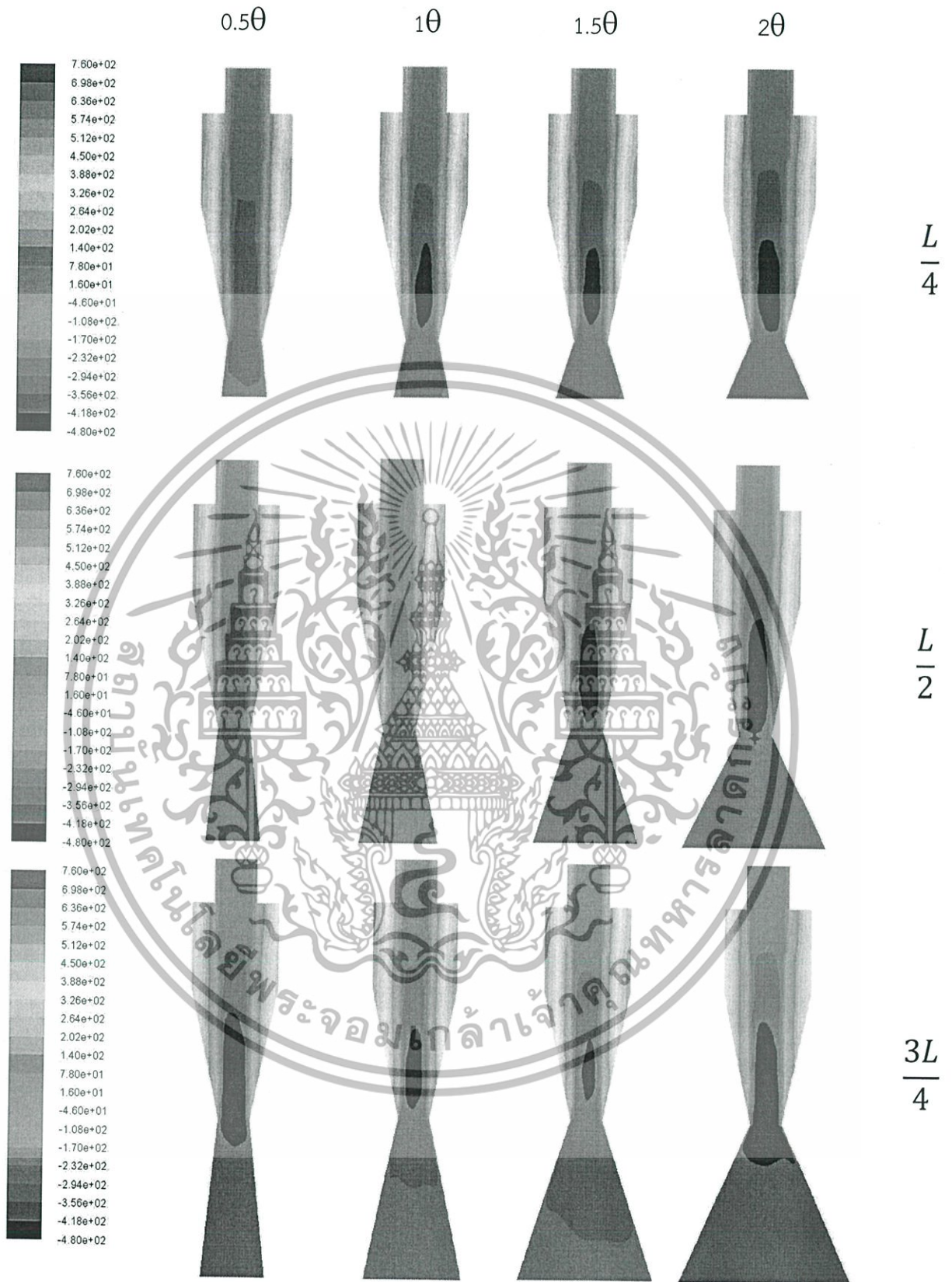
รูปที่ 4.5 สนามการไหลขอความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสภายในไซโคลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 สนามการไหลของความเร็วตามแนวแกนภายในไซโคลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 สนามการไหลของความดันสถิตภายในไซโคลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไซโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้านที่อัตราส่วนมุมและความยาวต่างๆ กัน

จากการจำลองประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไซโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้านที่อัตราส่วนของมุมและความยาวที่แตกต่างกัน โดยที่มุมจะใช้แทนด้วย θ และความยาวจะใช้แทนด้วย L ซึ่งจะใช้ความเร็วเข้าไซโคลนเป็น 16 m/s

จากตาราง 4.2 แสดงค่าประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไซโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้านที่อัตราส่วนของมุมและความยาวที่แตกต่างกัน จะพบว่าอัตราส่วนของมุมและความยาวที่ทำให้ไซโคลนมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ มุม 1θ และ $L/2$ คือมีประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคอยู่ถึงร้อยละ 90.60

ตารางที่ 4.2 แสดงประสิทธิภาพของไซโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้านที่อัตราส่วนของมุมและความยาวต่างๆ

ชนิดไซโคลน		ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ความยาว	มุม	
L/4	0.5 θ	87.47
L/4	1 θ	88.54
L/4	1.5 θ	89.19
L/4	2 θ	87.56
L/2	0.5 θ	88.40
L/2	1 θ	90.60
L/2	1.5 θ	89.36
L/2	2 θ	87.90
3L/4	0.5 θ	86.62
3L/4	1 θ	88.58
3L/4	1.5 θ	89.24
3L/4	2 θ	86.73

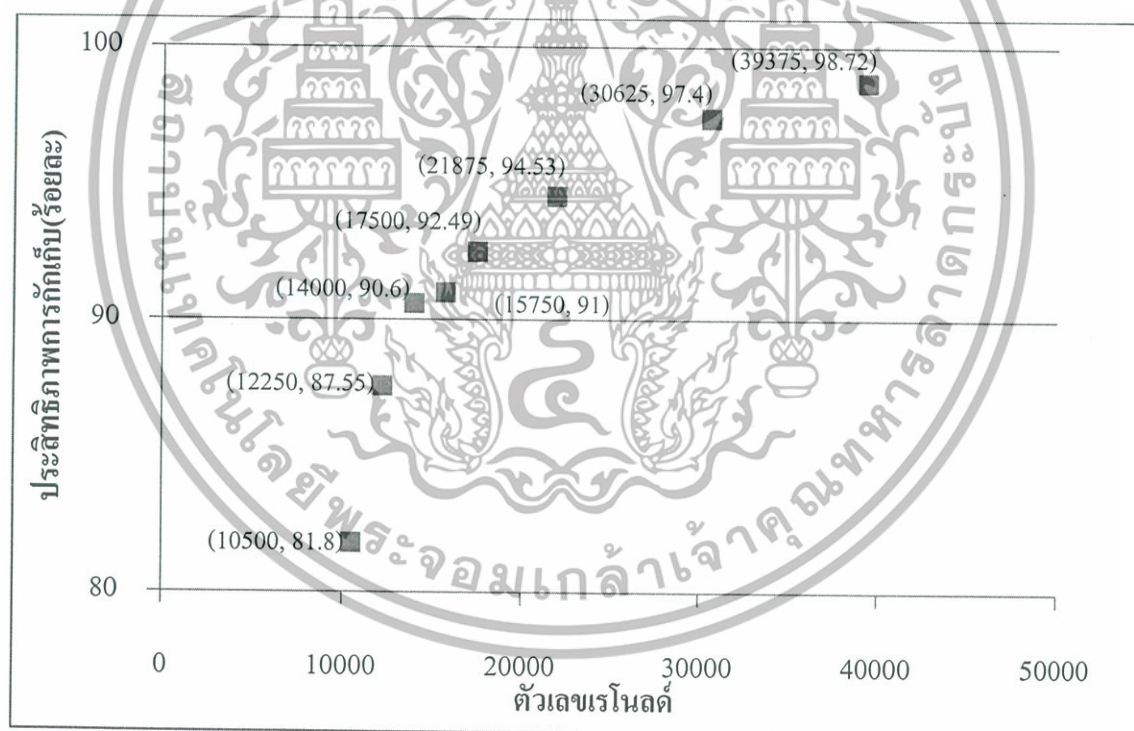
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไซโคลนที่ค่าตัวเลขเรโนลด์ต่างๆ

เมื่อได้ไซโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้านตัวที่ให้ประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคสูงสุดแล้ว คือ ไซโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้านที่อัตราส่วนของมุมและความยาวเป็น 1θ และ $L/2$ ตามลำดับ จากนั้นนำมาปรับเปลี่ยนค่าตัวเลขเรโนลด์ เพื่อศึกษาผลของค่าตัวเลขเรโนลด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไซโคลน

จากรูปที่ 4.8 พบว่าผลการจำลองการปรับเปลี่ยนค่าตัวเลขเรโนลด์ ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคของไซโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้านจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มค่าตัวเลขเรโนลด์ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อการแยกอนุภาค เมื่อความเร็วเข้าสูง ความเร็วตั้งต้นที่จะทำให้เกิดความเร็วตามแนวสัมผัสก็จะสูงขึ้นด้วย เพราะฉะนั้นจึงทำให้เกิดการแยกอนุภาคได้ดี

กราฟแสดงประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไซโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้านที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (1θ และ $L/2$) ที่ค่าตัวเลขเรโนลด์ต่างๆ



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไซโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้านที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (1θ และ $L/2$) ที่ค่าตัวเลขเรโนลด์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไซโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้านที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (1θ และ $L/2$) ที่ค่าตัวเลขเรโนลด์ต่างๆ

ความเร็ว (m/s)	ตัวเลขเรโนลด์	ประสิทธิภาพการกักเก็บ(ร้อยละ)
12	10500	81.80
14	12250	87.55
16	14000	90.60
18	15750	91.00
20	17500	92.49
25	21875	94.53
35	30625	97.40
45	39375	98.72

จะเห็นได้ว่าที่ความเร็ว 45 m/s ไซโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้านที่มีประสิทธิภาพสูงสุด จะมีประสิทธิภาพมากถึง ร้อยละ 98.72 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับไซโคลนธรรมดาที่มีขนาด และ ความเร็วเข้าเท่ากัน พบว่า ประสิทธิภาพของไซโคลนทั้ง 2 รูปร่างจะมี ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกักเก็บระหว่าง ไซโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้านและไซโคลนธรรมดา ที่ค่าตัวเลขเรโนลด์ เท่ากับ 39,375

ลักษณะท่อทางออก	ประสิทธิภาพการกักเก็บ(ร้อยละ)
ไซโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้าน	98.72
ไซโคลนธรรมดา	98.35

จากผลการทดลอง แสดงว่าที่ค่าตัวเลขเรโนลด์สูงๆ (มากกว่า 39,375) ประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไซโคลน ไม่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของท่อทางออก เนื่องจากยิ่งความเร็วที่ป้อนให้แก่ไซโคลนมีค่ามากเท่าไร การปั่นแยกอนุภาคก็ยิ่งดีขึ้นเท่านั้น จึงทำให้ตัวแปรอื่นๆที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไซโคลนมีค่าน้อยลง ขณะที่อิทธิพลของความเร็วที่มีมากขึ้น แต่ที่ความเร็วต่ำๆ จะพบว่ามีผลต่างระหว่างประสิทธิภาพการกักเก็บของไซโคลนทั้ง 2 รูปร่างค่อนข้างมาก โดยไซโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้านมีประสิทธิภาพสูงกว่าจึงเป็นข้อได้เปรียบของไซโคลนลักษณะดังกล่าว ในช่วงของความเร็วที่ไซโคลนในอุตสาหกรรมใช้คือ 20-30 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการจำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลข

5.1 สรุปผลการจำลอง

จากการศึกษาการหาประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคและการทำงานของไซโคลน ด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข โดยการสร้างแบบจำลองจากโปรแกรม Gambit และทำการคำนวณการไหลภายในไซโคลนด้วยวิธีการเชิงตัวเลขโดยโปรแกรม Fluent ซึ่งใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Reynolds stress model และใช้แบบจำลองการติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็น Discrete phase model

จากผลการจำลองเพื่อหาประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไซโคลนที่ต่อท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้านที่อัตราส่วนความกว้างและความยาวที่แตกต่างกัน พบว่าไซโคลนตัวที่ต่อท่อทางออกแบบมุมป้านที่มีอัตราส่วนของมุมและความยาวที่ 10 และ L/2 ตามลำดับ จะทำให้ไซโคลนมีประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคสูงสุด ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคสูงถึงร้อยละ 90.60 เนื่องจากองค์ประกอบที่สำคัญต่อการแยกคือความเร็วในแนวเส้นสัมผัส ความเร็วตามแนวแกนและความดันสถิต ซึ่งความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสจะเป็นองค์ประกอบที่ทำให้ของไหลเกิดการหมุนเหวี่ยงจากแรงหนีศูนย์กลาง แล้วอนุภาคซึ่งมีความเฉื่อยจะหลุดออกจากกระแสการหมุนเหวี่ยงไปกระทบผนังทำให้อนุภาคสูญเสียพลังงานและตกลงมาและความเร็วตามแนวแกนจะเป็นองค์ประกอบที่ทำให้กระแสหมุนเหวี่ยงอยู่ในไซโคลนควรมีค่าไม่มาก เพราะหมายถึงเวลาที่กระแสหมุนเหวี่ยงอยู่ในไซโคลนและเกิดการแยก หากเวลาที่ของไหลหมุนเหวี่ยงในไซโคลนนานโอกาสเกิดการแยกก็จะสูง ของไหลจะมีการเคลื่อนที่จากความดันสูงไปความดันต่ำ ที่ตรงกลางไซโคลนจะมีความดันต่ำจะทำหน้าที่ดูดของไหลและออกทางด้านบนของไซโคลน หากมีความดันที่ตรงกลางต่ำตลอดทั้งแนว การแยกก็จะดีด้วยและที่บริเวณทางออกทางด้านล่าง จะมีความดันสถิตที่บริเวณท่อทางออกต่ำ ทำให้กระแสอากาศไม่ไปรบกวนอนุภาคที่แยกออกมา

จากผลการจำลองในการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวเลขเรโนลด์ เมื่อเพิ่มค่าของตัวเลขเรโนลด์ ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคก็จะมากขึ้นด้วย เนื่องจากความเร็วเป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อการแยกอนุภาค เมื่อความเร็วเข้าสูง ความเร็วตั้งต้นที่จะทำให้เกิดความเร็วตามแนวสัมผัสก็จะสูงขึ้นด้วย จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของไซโคลน

5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลจากการจำลองอาจยังมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการกำหนดค่า Absolute Criteria ซึ่งตั้งไว้ที่ 10^{-3} ยิ่งค่านี้น้อยมีค่าน้อยเท่าไรความละเอียดจะมากขึ้น แต่มีข้อจำกัดที่ว่าถ้าตั้งค่าที่น้อยไปการคำนวณของโปรแกรมอาจไม่ถึงจึงจำเป็นต้องไปปรับค่า Solution control ซึ่งทำได้ยากและยังมีผลต่อผลการจำลองด้วย
2. การกำหนดค่าคุณสมบัติของของไหลอาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากไม่ได้ทำการวัดค่าจริงๆ ซึ่งเป็นการประมาณจากการหาข้อมูล
3. ในการแสดงผลการจำลองในรูปของ Contour ของค่าความเร็วและความดันของไซโคลนที่ต่อท่อทางออกเป็นมุมแหลมมีความแตกต่างจากไซโคลนรูปทรงอื่นมากการกำหนดช่วงความเร็วและความดันของทุกๆกรณี ทำให้ Contour ที่ได้ของรูปทรงอื่นมีความชัดเจนลดลง
4. ในบางกรณีการคำนวณโดยโปรแกรมไม่สามารถคำนวณจนค่าความแตกต่างของการคำนวณถึงเกณฑ์ที่ตั้งไว้ จึงต้องมีการปรับค่า Solution control ทำให้ผลการทดลองมีการคลาดเคลื่อน

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ปรับค่า Absolute Criteria ให้มีค่าน้อยลงเพื่อให้ผลการคำนวณมีค่าที่ละเอียดมากขึ้นและ ควรปรับ Solution control ให้เหมาะสมกับค่า Absolute Criteria นั้นๆ
2. ในการพัฒนาการทำงานของไซโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้าน ควรจะมีทำการลองเพื่ออ้างอิงกับผลการคำนวณจากโปรแกรมด้วยเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้อง และทำให้ง่ายต่อการนำไปปรับใช้จริงในอุตสาหกรรมมากยิ่งขึ้น
3. ควรมีการทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพไซโคลนที่ประกอบด้วยท่อทางออกที่มีลักษณะเป็นมุมป้าน โดยใช้ตัวไซโคลนที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมเพื่อความสะดวกในการใช้งาน
4. ค้นหาวีธีที่ทำให้กริดมีความเยื้องลดลงเพื่อให้ได้กริดที่มีคุณภาพดีขึ้นซึ่งส่งผลโดยตรงกับความถูกต้องและแม่นยำของการคำนวณ
5. ศึกษาอัตราส่วนของมุมและความยาวของท่อทางออกเป็นมุมป้านของไซโคลนที่ต่างจากงานวิจัยนี้ โดยอาจจะเพิ่มหรือลด ซึ่งผลการทดลองที่ได้ อาจไม่เป็นดังที่กล่าวมา
6. ศึกษาค่าตัวเลขเรโนลด์ในช่วงที่ต่างจากงานวิจัยนี้โดยอาจจะเพิ่มหรือลด ซึ่งผลการทดลองที่ได้ อาจไม่เป็นดังที่กล่าวมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Yasinee Wuttison, Manussanun Thanaphatpichai, Suriya Chayatummagoon, Numerical investigation of performance characteristic of a cyclone, A report submitted in partial fulfillment of requirement for the degree of bachelor in chemical engineering (2009).
- [2] สมการนาเวียร์-สโตกส์.[ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://th.wikipedia.org/wiki/สมการนาเวียร์-สโตกส์> .
- [3] John D. Anderson, Jr. “Navier-Stokes Equation”. Computational Fluid Dynamics. Mcgraw Hill, 1995.
- [4] Reynolds stress model (RSM).[ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : [http://www.cfd-online.com/Wiki/Reynolds_stress_model_\(RSM\)](http://www.cfd-online.com/Wiki/Reynolds_stress_model_(RSM)).
- [5] Reynolds stress model (RSM).[ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://jullio.pe.kr/fluent6.1/help/html/ug/node413.htm>.
- [6] Xiang, R., Park, S. H., Lee, K. W. Effects of cone dimension on cyclone performance. Journal of Aerosol Science, 32(2001), 549-561.
- [7] Fuat Kaya, Irfan Karagoz, Numerical investigation of performance characteristics of a cyclone protonged with a dipleg, Chemical Engineering Journal 151 (2009) 39-45.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสสรณ์

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Asst. Prof. Dr. Apinan Namkanisorn

เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3-2297-00031-198

หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์

อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail) : สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 1 ซอยฉลองกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-3298360-3 โทรสาร 02-3298360-3 กด 4 E-mail: knapinan@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญาตรี Bachelor of Science in Chemical Engineering, University of Minnesota, USA

ระดับปริญญาโท Master of Science in Chemical Engineering, Lehigh University, USA

ระดับปริญญาเอก Doctor of Philosophy in Chemical Engineering, Lehigh University, USA

ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา ทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

1. ทูสนับสนุนโครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.ประจำปี 2555 สำหรับโครงการเรื่องการสังเคราะห์อัลคิลเรซินจากของเสียพลาสติก ตำแหน่งหัวหน้าโครงการวิจัย
2. ทูสนับสนุนโครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.ประจำปี 2552 สำหรับโครงการเรื่องเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุสำหรับลดกรดไขมันอิสระเพื่อผลิตไบโอดีเซล ตำแหน่งหัวหน้าโครงการวิจัย
3. ทูสนับสนุนโครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.ประจำปี 2551 สำหรับโครงการเรื่องเครื่องกลั่นแอลกอฮอล์จากพลังงานแสงอาทิตย์ ตำแหน่งหัวหน้าโครงการวิจัย
4. ทูจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้โครงการโครงการงานอุตสาหกรรมสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี ประจำปี 2551 สำหรับโครงการเรื่อง บล็อกจากผงยางรถยนต์ใช้แล้วสำหรับป้องกันมลพิษทางเสียง ตำแหน่งหัวหน้าโครงการวิจัย
5. ทูจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้โครงการโครงการงานอุตสาหกรรมสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี ประจำปี 2550 สำหรับโครงการเรื่อง บล็อกจากผงยางรถยนต์ใช้แล้วสำหรับป้องกันอุทกภัย ตำแหน่งหัวหน้าโครงการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.ประจำปี 2550 สำหรับโครงการเรื่องการแยกตัวทำละลายระเหยง่ายโดยการสตรึงปึงในหอแบบบรรจุ ตำแหน่งหัวหน้าโครงการวิจัย

7. ทุนจากโครงการสนับสนุนทุนนักวิจัยใหม่ วท. ประจำปี 2548 สำหรับโครงการเรื่อง ผลของสัณฐานวิทยาบนผิวโลหะต่อการดึงลอกแบบไฮโกรเทอร์มอลของยางธรรมชาติและโลหะ ตำแหน่งหัวหน้าโครงการวิจัย

8. ทุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปี 2548 สำหรับโครงการเรื่อง การปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติโดยใช้เขม่าดำ ตำแหน่งหัวหน้าโครงการวิจัย

ผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Dr.Santi Wattananusorn

เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน -

หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์

อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail) : สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 1 ซอยฉลองกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-3298360-3 ต่อ 166 โทรสาร 02-3298360-3 ต่อ 4 E-mail santi_wattananusorn@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญาตรี วท.บ. (เคมี) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ไทย)

ระดับปริญญาโท วท.ม. (วิศวกรรมเคมี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ไทย)

ระดับปริญญาเอก Dr.-Ing. (วิศวกรรมเครื่องกล) Ruhr-University Bochum (เยอรมนี)

ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา ทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

1. Wattananusorn, S. (2012) : Special-Relativistic Hydrodynamics for Higher-Order Boundary-Layer Flow over a Flat Plate. [to be published]

2. Wattananusorn, S. (2009) : Explicit Analytical Solution for Drying Kinetics of Flat Materials. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, vol. 43, no. 1, pp. 70 - 73.

3. Wattananusorn, S. (2006) : New Space-Averaging Procedure for Inhomogeneous Flow Fields using Balance Equation Formulations. Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 220, no. 9, pp. 1363 - 1374.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Wattananusorn, S. (2008) : Determination of Membrane Resistance for Cross-Flow Microfiltration in a Rectangular Module including Back-Flow. *Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 222, no. 1, pp. 75 - 77.

5. Wattananusorn, S. (2004) : Interference of Laminar Flow on Displacement Thickness in a Streamwise Corner. *Journal of Power and Energy*, vol. 218, no. 1, pp. 51 - 53.

6. Wattananusorn, S. (2007) : Significance of the Balance-Based Averaging Theory for Application in Energy and Process Engineering. [Dissertation, Ruhr-University Bochum]

7. Wattananusorn, S. (2002) : Umformung der Wellengleichung. [in the Prof. Dr. Heinz Dieter Papenfuss's manuscript notes for lecture course on Numerische Stroemungsmechanik, pp. 135 - 137, translated into German by Dr. Frank Seifert]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้