

การทำนายการไหลเฉลี่ยและความปั่นป่วนภายในเครื่องแยกแก๊สไซโคลน  
ด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวน

MEAN FLOW AND TURBULENCE PREDICTIONS INSIDE GAS CYCLONE  
SEPARATOR BY EDDY-VISCOSITY TURBULENCE MODELS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2567

KMITL-2025-EN-M-227-012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MEAN FLOW AND TURBULENCE PREDICTIONS INSIDE GAS CYCLONE  
SEPARATOR BY EDDY-VISCOSITY TURBULENCE MODELS

PIYAWUT THONGNOI



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2024

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2025-EN-M-227-012



**COPYRIGHT 2024**

**SCHOOL OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำนายการไหลเฉื่อยและความปั่นป่วนภายในเครื่องแยกแก๊สไฮโคลนด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวน
นักศึกษา	นายปิยะวุฒิ ทองน้อย
รหัสประจำตัว	65016063
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาความสามารถในการทำนายสนามการไหลเฉื่อยและความปั่นป่วนภายในเครื่องแยกแก๊สไฮโคลนของแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวน (Eddy-viscosity turbulence model) โดยใช้ขนาดของกริดใกล้ผนังและระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่เหมาะสมในการคำนวณ และยังศึกษาถึงอิทธิพลของการปรับแก้ความโค้ง (Curvature correction) ที่มีต่อความแม่นยำในการทำนายสนามการไหลเฉื่อยและความปั่นป่วนภายในเครื่องแยกแก๊สไฮโคลนของแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวน ผลการทำนายจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการทำนายด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน RSM และจากข้อมูลผลการทดลองจากงานวิจัยก่อนหน้าของ Hoekstra โดยความสูงของเซลล์แรกจากผนัง (First cell height) ในส่วนของถังทรงกระบอก กรวย และท่อทางออกด้านบน เท่ากับ 1.4802 0.9285 และ 1.2424 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลการทำนายสนามการไหลเฉื่อยจากแบบจำลองความปั่นป่วน Spalart-Allmaras ที่มีการใช้งานร่วมกับการปรับแก้ความโค้ง (SA-CC) ซึ่งเป็นแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ใช้สมการในการคำนวณน้อยที่สุด ถูกนำมาสอบเทียบกับข้อมูลการทดลองจากงานวิจัยก่อนหน้าของ Hoekstra และจากการศึกษาผลการทำนายสนามการไหลเฉื่อยจากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ใช้งานร่วมกับการปรับแก้ความโค้ง พบว่าสามารถให้ผลการทำนายที่สอดคล้องกับผลการทำนายจากแบบจำลอง RSM และข้อมูลจากงานวิจัยก่อนหน้าของ Hoekstra แต่เมื่อแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนไม่ได้ใช้งานร่วมกับการปรับแก้ความโค้ง ผลการทำนายไม่มีความแม่นยำและสอดคล้องกับผลการทดลอง และยังพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่สามารถทำนายสนามการไหลเฉื่อยและตัวแปรอื่น เช่น สนามความดัน ลักษณะการไหลหมุนวน และประสิทธิภาพการคัดแยกขนาด ได้แม่นยำที่สุดคือ แบบจำลองความปั่นป่วน RKE ที่ใช้งานร่วมกับการปรับแก้ความโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis</b>	Mean flow and turbulence predictions inside gas cyclone separator by eddy-viscosity turbulence models
<b>Student</b>	Mr. Piyawut Thongnoi
<b>Student ID.</b>	65016063
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Chemical Engineering
<b>Year</b>	2024
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Santi Wattananusorn

## ABSTRACT

This thesis investigates the predictability of the mean flow field and turbulence within a cyclone separator, utilizing an eddy-viscosity turbulence model with appropriate near-wall grid size and numerical scheme set. Additionally, the influence of curvature correction on the predictive accuracy of mean flow field and turbulence inside a cyclone separator by the eddy-viscosity turbulence models are examined. The prediction results are compared with those obtained by the RSM turbulence model and the experimental data from Hoekstra's research. The first cell height in the cyclone barrel, cyclone cone, and vortex finder are 1.4802, 0.9285, and 1.2424 millimeters, respectively. The mean flow field prediction results from the Spalart-Allmaras turbulence model with curvature correction (SA-CC), which is the least intensive eddy-viscosity turbulence models, were validated with experimental data from previous research by Hoekstra. The mean flow field prediction results from the eddy viscous turbulence model with curvature correction were consistent with the RSM model and Hoekstra's prior research data. However, when the eddy-viscosity turbulence model was excluded for curvature correction, the prediction results were found to be inaccurate. The results further revealed that the eddy-viscosity turbulence model that demonstrated the most precise and accurate predictions of the mean flow field, along with other parameters such as the pressure field, vortex structure, and separation efficiency, was the RKE turbulence model co-operated with curvature correction.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. สันติ วัฒนานุกรณ์ อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในด้านทฤษฎีในเรื่องกลศาสตร์ของไหล หลักการทำงานของไฮโดรไซโคลน พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ รวมถึงการให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยแก้ปัญหาและข้อบกพร่องจนวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ ที่ให้ความรู้ในเรื่องพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ในไฮโดรไซโคลน และสอนใช้โปรแกรม GAMBIT และ ANSYS FLUENT 14.5 ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ นอกจากนี้ยังให้คำชี้แนะในการแก้ไขปัญหาและการวิเคราะห์ผลการจำลอง

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี และบุคลากร ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้ความรู้และคอยอบรมสั่งสอนให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ รวมทั้งบิดาและมารดา ที่คอยให้กำลังใจและคำแนะนำตลอดการทำงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมีที่อำนวยความสะดวกในด้านสถานที่ปฏิบัติการในการทำวิทยานิพนธ์นี้ จนประสบความสำเร็จลุล่วงด้วยดี หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำกราบขออภัยมา ณ ที่นี้

ปิยะวุฒิ ทองน้อย

# สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid dynamics: CFD).....	3
2.1.1 กระบวนการก่อนการประมวลผล (Pre-processing).....	3
2.1.2 กระบวนการคำนวณ (Solver).....	3
2.1.3 กระบวนการหลังการประมวลผล (Post-processing).....	4
2.2 สมการควบคุม (Governing equations).....	4
2.2.1 สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation).....	4
2.2.2 สมการโมเมนตัม (Momentum equations).....	5
2.2.3 สมการพลังงาน (Energy equation).....	5
2.3 การไหลแบบปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence and its modeling).....	6
2.3.1 สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยของเรย์โนลด์ (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations).....	7
2.3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence models).....	8
2.3.3 การปรับแก้ความโค้ง (Curvature correction).....	9
2.4 อุปกรณ์คัดแยกแบบแก๊สไซโคลอน (Gas cyclone separator).....	9
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature reviews).....	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 สัดส่วนมิติของแก๊สไซโคลน (Gas cyclone dimension) .....	12
3.2 การสร้างกริด (Grid generation) .....	13
3.3 สมการควบคุมที่ใช้ในการจำลอง (Governing equations for gas cyclone separator simulation) .....	14
3.3.1 สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยของเรย์โนลด์.....	14
3.3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน .....	14
3.4 สภาพขอบเขตและระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Boundary condition and numerical schemes) .....	15
3.4.1 ขนาดของเวลาในการคำนวณ (An appropriate time step size) .....	16
3.5 การศึกษาความเป็นอิสระของผลเฉลยต่อกริดการคำนวณ (Grid independent solutions).....	16
3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model validation).....	17
บทที่ 4 ผลการจำลอง และอภิปรายผลการจำลอง.....	19
4.1 ผลการทำนายสนามความดันสถิตย์เฉลี่ย (Mean static pressure prediction) .....	19
4.2 ผลการทำนายสนามความเร็วเฉลี่ย (Mean velocities prediction) .....	21
4.3 ผลการศึกษาด้วยข้อมูลทางสถิติ (Statistical analysis).....	24
4.4 ผลการทำนายพลังงานจลน์ความปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy prediction) .....	26
4.5 ผลการจำลองลักษณะการไหลหมุนวน (Vortex structure).....	27
4.6 ผลการทำนายประสิทธิภาพการคัดแยกขนาดอนุภาค.....	29
4.7 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการคำนวณ .....	31
บทที่ 5 สรุปผลการจำลองและข้อเสนอแนะ .....	32
5.1 สรุปผลการจำลอง.....	32
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	33
เอกสารอ้างอิง .....	34
ประวัติผู้เขียน.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สัดส่วนมิติของแก๊สไฮโดรเจน.....	12
3.2 ขนาดความสูงของกริดการคำนวณใกล้เคียง.....	14
3.3 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข.....	16
4.1 ค่า Hit-rate ที่ทำนายได้ของแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนจากความเร็วในแนวแกน.....	25
4.2 ประสิทธิภาพการคำนวณสัมพัทธ์ของแต่ละแบบจำลองความปั่นป่วน.....	31



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การจำลองความปั่นป่วนของไอพ่นด้วยวิธี DNS LES และ RANS [7].....	7
2.2 แผนผังแสดงส่วนประกอบและลักษณะการไหลภายในแก๊สไซโคลน [11].....	10
3.1 แผนผังขนาดแก๊สไซโคลน .....	13
3.2 โพรไฟล์ความเร็วในแนวเส้นสัมผัสและแนวแกนของกริด 3 ระดับที่ทำนายด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน SA-CC .....	17
3.3 โพรไฟล์ความเร็วในแนวเส้นสัมผัสและแนวแกนที่ทำนายด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน SA-CC เปรียบเทียบกับข้อมูลผลการทดลองของ Hoekstra [4] .....	18
4.1 คอนทิวอร์ความดันสถิตยของแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนเปรียบเทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วน RSM ที่ระนาบ $y = 0$ .....	19
4.2 คอนทิวอร์ความดันสถิตยของแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ใช้ curvature correction เปรียบเทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วน RSM ที่ระนาบ $y = 0$ .....	19
4.3 ตัวเลขออยเลอร์ที่ทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนเปรียบเทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วน RSM .....	20
4.4 โพรไฟล์ความเร็วในแนวเส้นสัมผัสที่ทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวน (a) ใช้ curvature correction และ (b) ไม่ใช้ curvature correction เปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM.....	22
4.5 โพรไฟล์ความเร็วในแนวแกนที่ทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวน (a) ใช้ curvature correction และ (b) ไม่ใช้ curvature correction เปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM.....	23
4.6 โพรไฟล์พลังงานจลน์ความปั่นป่วนที่ทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวน (a) ใช้ curvature correction และ (b) ไม่ใช้ curvature correction เปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM .....	27
4.7 ลักษณะการไหลหมุนวนที่ทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ใช้ curvature correction เปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM.....	28
4.8 กราฟประสิทธิภาพเกรด .....	30
4.9 ผลการทำนายประสิทธิภาพการคัดแยกขนาดโดยรวมและขนาดตัดของอนุภาค.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

อุปกรณ์คัดแยกแบบแก๊สไซโคลน (Gas cyclone separator) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของไหล โดยกลไกการแยกสารมีหลักการทำงานอาศัยการเคลื่อนที่แบบหมุน ก่อให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางนี้จะส่งผลให้อนุภาคที่ไหลมากับของไหล ถูกเหวี่ยงให้ไปอยู่ที่บริเวณผนังของแก๊สไซโคลนและจะเคลื่อนที่แบบหมุนวนลงสู่ถังกักเก็บอนุภาค (Dustbin) และของไหลที่ปราศจากอนุภาคจะไหลออกทางด้านบนของแก๊สไซโคลน ปัจจุบันแก๊สไซโคลนมีความเกี่ยวข้องกัอุตสาหกรรมมากมายเนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น มีการติดตั้งง่าย กลไกไม่ซับซ้อน ไม่มีส่วนอุปกรณ์ที่เคลื่อนไหว มีค่าการดำเนินการและค่าซ่อมบำรุงที่ต่ำ เป็นต้น [1, 2]

เป็นเวลากว่า 4 ทศวรรษ ที่แก๊สไซโคลนได้ถูกศึกษาปรากฏการณ์การไหลภายในตัวอุปกรณ์ เพื่อที่จะนำไปสู่การปรับปรุงและพัฒนาแก๊สไซโคลนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น สำหรับการไหลภายในแก๊สไซโคลนเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) และวิธีการศึกษาการไหลแบบปั่นป่วนที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันคือ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD) พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการศึกษาพลศาสตร์ของไหล เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ผลลัพธ์จำนวนมากแต่มีต้นทุนในการดำเนินการที่ไม่แพง และยังทำให้เกิดความเข้าใจในปรากฏการณ์การไหลต่างๆได้อย่างชัดเจน [3]

แม้ว่าในปัจจุบันจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการไหลภายในแก๊สไซโคลนด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ แต่งานวิจัยส่วนใหญ่ใช้นั้นมักใช้แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model) ที่มีชื่อว่า Reynolds stress model (RSM) มาใช้ในการวิเคราะห์สนามการไหล แต่ไม่ค่อยมีการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด eddy-viscosity มาใช้ในการวิเคราะห์ อีกทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวกับการสร้างกริดการคำนวณที่มีคุณภาพ เพื่อจะนำมาศึกษาสนามการไหลในแก๊สไซโคลนก็มีอยู่ไม่มากนัก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด eddy-viscosity มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาสนามการไหลในแก๊สไซโคลน นอกจากนี้เพื่อที่จะให้ได้กริดการคำนวณที่มีคุณภาพวิธีการประมาณขนาดกริดที่ผนังของ Bumrunghthaichaichan [1, 2] มาประยุกต์ใช้ในการจำลอง

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาความสามารถในการทำนายสนามการไหลภายในแบบจำลองแก๊สไฮโดรเจนของแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด eddy-viscosity เมื่อนำมาใช้ร่วมกับขนาดกริดการคำนวณและระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่เหมาะสม

1.2.2 เพื่อประเมินความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของสนามการไหลที่คำนวณได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด eddy-viscosity ทั้ง 6 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองความปั่นป่วน Spalart-Allmaras แบบจำลองความปั่นป่วน standard k-epsilon แบบจำลองความปั่นป่วน renormalization group k-epsilon แบบจำลองความปั่นป่วน realizable k-epsilon แบบจำลองความปั่นป่วน standard k-omega และแบบจำลองความปั่นป่วน shear stress transport k-omega

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 สร้างแบบจำลองแก๊สไฮโดรเจนและกริดการคำนวณด้วยโปรแกรม GAMBIT version 2.4.6 และสนามการไหลภายในแบบจำลองจะถูกคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent version 14.5

1.3.2 ศึกษาสนามการไหลภายในแบบจำลองแก๊สไฮโดรเจนด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด eddy-viscosity

1.3.3 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด eddy-viscosity กับแบบจำลองความปั่นป่วน Reynolds stress model และข้อมูลการทดลองจากงานวิจัยของ Hoekstra [4]

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid dynamics: CFD)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ชนิดหนึ่งซึ่งเป็นการรวมกันของ พลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) วิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Method) และวิทยาการ คอมพิวเตอร์ เพื่อทำการศึกษาและตรวจสอบปรากฏการณ์การไหลต่างๆของของไหล หรือสามารถ กล่าวได้ว่าพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นเครื่องมือที่ใช้แก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ของการไหลของของไหลโดยใช้วิธีการเชิงตัวเลขและอัลกอริทึม [3]

ในปัจจุบันพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมที่เป็น ที่เป็นที่ยอมรับและได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมันให้ผลลัพธ์จำนวนมากแต่มีต้นทุนใน การดำเนินการที่ไม่แพง และยังทำให้เกิดความเข้าใจในปรากฏการณ์การไหลต่างๆได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณยังสามารถนำไปศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาของการถ่ายเท ความร้อนและปฏิกิริยาเคมีได้ ตัวอย่างของการใช้งาน เช่น ในงานวิศวกรรมการบินใช้เพื่อการทำนาย แรงยกและแรงลากสำหรับเครื่องบิน ในงานวิศวกรรมเคมีใช้เพื่อการทำนายการไหลของของไหลใน อุปกรณ์เคมีต่างๆ และในงานวิศวกรรมโยธาใช้เพื่อศึกษาการไหลของของไหลผ่านตัวอาคาร เป็นต้น [3]

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) กระบวนการก่อนการ ประมวลผล 2) กระบวนการคำนวณ 3) กระบวนการหลังการประมวลผล โดยสามารถอธิบาย รายละเอียดของขั้นตอนต่างๆได้ดังต่อไปนี้

#### 2.1.1 กระบวนการก่อนการประมวลผล (Pre-processing)

ขั้นตอนนี้เป็นการป้อนปัญหาการไหลของของไหลให้กับโปรแกรม เช่น การสร้าง โดเมนการคำนวณ, การสร้างกริดการคำนวณ, การเลือกปรากฏการณ์ทางกายภาพและเคมี, คุณสมบัติของวัสดุ, การกำหนดสภาวะขอบเขต เป็นต้น

#### 2.1.2 กระบวนการคำนวณ (Solver)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยทั่วไปแล้วจะมีวิธีการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่ วิธี Finite difference method (FDM) วิธี Finite element method (FEM) และวิธี Finite volume method (FVM) โดยทั้ง 3 วิธีมีความแตกต่างกันที่การประมาณ ค่าตัวแปรของการไหล (Flow variable) และขั้นตอนการแบ่งความต่อเนื่อง (Discretization process) สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธี FVM ในการศึกษา โดยรูปแบบกระบวนการ คำนวณโดยสรุปมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ประมาณการตัวแปรการไหลที่ไม่ทราบค่าด้วยฟังก์ชันอย่างง่าย
- เปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเป็นสมการพีชคณิต ด้วยวิธีการเชิงตัวเลขด้วยการแทนค่าลงในสมการควบคุมแล้วทำการจัดรูปสมการใหม่
- แก้สมการพีชคณิตเพื่อให้ได้ผลเฉลย

### 2.1.3 กระบวนการหลังการประมวลผล (Post-processing)

ขั้นตอนหลังการประมวลผล เป็นกระบวนการแสดงผลจากการแก้ปัญหาเชิงตัวเลข ผลลัพธ์ที่เป็นจำนวนตัวเลขสามารถแสดงในรูปแบบต่างๆได้ เช่น รูปทรงโดเมนและแสดงกริด กราฟ เวกเตอร์ คอนทัวร์ การพล็อตเวกเตอร์ การพล็อตพื้นผิว 2 มิติและ 3 มิติ เป็นต้น [3, 5]

## 2.2 สมการควบคุม (Governing equations)

สมการควบคุมสำหรับของไหลที่มีความหนืดเรียกว่า “Navier-Stokes equations” โดยทั่วไปแล้วการไหลของของไหลจะถูกควบคุมโดยกฎพื้นฐานทางกายภาพ 3 ข้อ ได้แก่ กฎการอนุรักษ์มวล (Mass conservation law) กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน (Newton’s second law of motion) และกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ (First law of thermodynamics) ในทางพลศาสตร์ของไหลกฎการอนุรักษ์มวลจะเปลี่ยนเป็นสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันจะเปลี่ยนเป็นสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum equation) และกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์จะเปลี่ยนเป็นสมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy equation) สมการควบคุมสำหรับของไหลเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในการเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้เป็นสมการพีชคณิต [3, 5, 6]

### 2.2.1 สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

จากกฎการอนุรักษ์มวลกล่าวว่า “มวลไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่หรือถูกทำลายได้” สมการความต่อเนื่องหรือสมการอนุรักษ์มวล สำหรับสภาวะไม่คงที่ของของไหลที่อัดตัวได้ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (2.1)$$

หรือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (2.2)$$

โดยที่  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล  $t$  คือ เวลา  $u$   $v$  และ  $w$  คือ ความเร็วในแนวแกน  $x$   $y$  และ  $z$  ตามลำดับ และ  $\mathbf{U}$  คือ เวกเตอร์ความเร็วของของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 สมการโมเมนตัม (Momentum equations)

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันระบุว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของระบบเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่อระบบและมีทิศทางตรงตามผลรวมของแรง” สมการโมเมนตัมในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนสามารถแสดงได้ดังนี้ [3]

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2.3)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (2.4)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + S_{Mz} \quad (2.5)$$

โดยที่  $p$  คือ ความดัน  $\tau$  คือ ความเค้นเฉือน  $S_{Mx}$   $S_{My}$  และ  $S_{Mz}$  คือ เทอมของแหล่งกำเนิดอื่นๆ เช่น แรงโน้มถ่วง ตามแนวแกน  $x$   $y$  และ  $z$  ตามลำดับ

## 2.2.3 สมการพลังงาน (Energy equation)

สมการพลังงานจะได้อาจมาจากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ซึ่งระบุว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบจะเท่ากับอัตราเพิ่มความร้อนให้กับระบบบวกกับอัตราการทำงานที่ทำโดยระบบ” สมการพลังงานในรูปของผลรวมพลังงานในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนสามารถแสดงได้ดังนี้ [3]

$$\begin{aligned} \rho \frac{DE}{Dt} = & -\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \\ & + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + S_E \end{aligned} \quad (2.6)$$

โดยที่  $E$  คือ พลังงานโดยรวม  $k$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน และ  $S_E$  คือ เทอมของแหล่งกำเนิดพลังงาน

## 2.3 การไหลแบบปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence and its modeling)

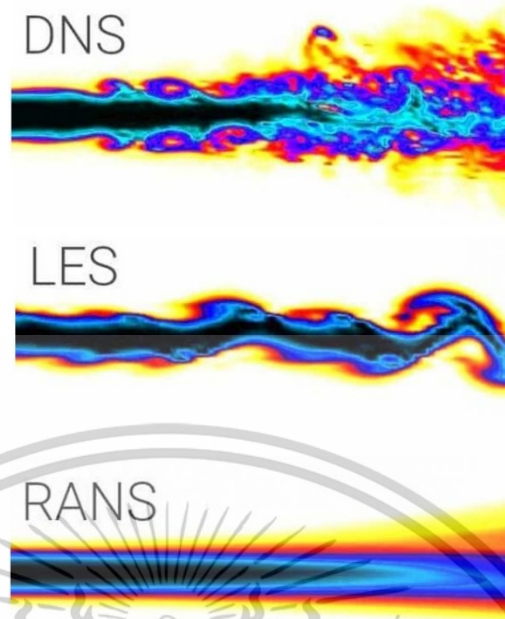
รูปแบบการไหลของของไหลสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบคือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) การไหลในช่วงแปรเปลี่ยน (Transition flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) รูปแบบการไหลทั้ง 3 รูปแบบสามารถแบ่งแยกได้โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เรียกว่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number:  $Re$ ) ซึ่งนิยามโดยใช้สัดส่วนของแรงเฉื่อย (Inertia force) ต่อแรงหนืด (Viscous force) รูปแบบการไหลที่มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่สูงกว่าค่าวิกฤต (Critical Reynolds number:  $Re_{crit}$ ) จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน สมการการคำนวณเรย์โนลด์นัมเบอร์แสดงดังสมการที่ 2.7

$$Re = \frac{\rho v_{avg}^2 L_c}{\mu v_{avg} L_c} \quad (2.7)$$

โดยที่  $v_{avg}$  คือ ความเร็วเฉลี่ย  $\mu$  คือ ความหนืดพลวัต และ  $L_c$  คือ ความยาวคุณลักษณะ

วิธีการศึกษาการไหลแบบปั่นป่วนด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถทำได้ 3 วิธี คือ

- 1) การจำลองเชิงตัวเลขโดยตรง (Direct numerical simulation: DNS) วิธีนี้จะคำนวณหาผลเฉลยของกระแสไหลวนแบบปั่นป่วนทั้งหมดโดยตรง ซึ่งจะทำให้สามารถระบุรายละเอียดการไหลแบบปั่นป่วนทั้งหมดได้ แต่ก็ต้องการทรัพยากรในการคำนวณที่สูง เช่น ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ (Supercomputer)
- 2) การจำลองกระแสไหลวนขนาดใหญ่ (Large eddy simulation: LES) วิธีนี้กระแสไหลวนขนาดใหญ่ (Large eddy) จะได้รับการคำนวณในขณะที่กระแสไหลวนขนาดเล็ก (Small eddy) จะถูกจำลองด้วยโมเดล วิธีนี้สามารถลดการใช้ทรัพยากรการคำนวณได้แต่ก็ยังไม่สามารถใช้คอมพิวเตอร์ทั่วไปในการคำนวณได้ ในงานทางวิศวกรรมการทราบเพียงแค่ค่าเฉลี่ยของสนามการไหลนั้นเพียงพอที่จะนำไปศึกษาระบบหรืออุปกรณ์นั้นๆ ได้ ด้วยเหตุนี้เองจึงเป็นที่มาของวิธีสุดท้าย
- 3) สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยของเรย์โนลด์ (Reynolds-averaged Navier-Stokes: RANS) [7] รายละเอียดของความปั่นป่วนที่คำนวณได้จากทั้ง 3 วิธีจะแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การจำลองความปั่นป่วนของไอพ่นด้วยวิธี DNS LES และ RANS [7]

### 2.3.1 สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยของเรย์โนลด์ (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations)

พลวัตกรรมการไหลแบบปั่นป่วนมีความไม่แน่นอน (Unsteady state) และขึ้นอยู่กับเวลา (Function of time) จึงทำให้ไม่สามารถแก้ปัญหาคารไหลด้วยสมการนาเวียร์-สโตกส์โดยตรงได้ ด้วยเหตุนี้วิธีการคำนวณทางด้านสถิติจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อทำการเฉลี่ยเวลา (Time average) ของคุณสมบัติการไหล [3, 8] สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยของเรย์โนลด์สำหรับของไหลอัดตัวไม่ได้ที่มีความหนืดคงที่ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate) แสดงดังสมการที่ (2.8-2.11)

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (2.8)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left[ \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right] + \rho \left[ -\frac{\partial}{\partial x} \left( \overline{(u')^2} \right) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{u'w'}) \right] + \rho g_x \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{v}u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \left[ \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right] \quad (2.10)$$

$$+ \rho \left[ -\frac{\partial}{\partial x}(\overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\overline{(v')^2}) - \frac{\partial}{\partial z}(\overline{u'w'}) \right] + \rho g_y$$

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{w}u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}v}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}^2}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \left[ \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right] \quad (2.11)$$

$$+ \rho \left[ -\frac{\partial}{\partial x}(\overline{u'w'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\overline{v'w'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\overline{(w')^2}) \right] + \rho g_z$$

### 2.3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence models)

จากสมการในหัวข้อ 2.3.1 สมการข้างต้นจะมีเทอมที่เพิ่มเข้ามาในการคำนวณซึ่งเรียกว่า ความเค้นของเรย์โนลด์ (Reynolds stress:  $\tau_{ij}$ ) ในปี ค.ศ. 1877 Boussinesq ได้เสนอความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยในการคำนวณความเค้นของเรย์โนลด์ [8, 9] แสดงดังสมการที่ 2.12

$$\overline{\tau_{ij}^{(t)}} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.12)$$

โดยที่  $\mu_t$  คือ ความหนืดของความปั่นป่วน (Turbulent viscosity)

ความหนืดของความปั่นป่วนสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนซึ่งสามารถจำแนกได้ 2 ประเภทใหญ่ คือ แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด eddy-viscosity ซึ่งจะทำการคำนวณความเค้นของเรย์โนลด์ผ่านความสัมพันธ์ของ Boussinesq เช่น แบบจำลองความปั่นป่วน Spalart-Allmaras และแบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon เป็นต้น และแบบจำลองความปั่นป่วนอีกประเภทคือ แบบจำลองความปั่นป่วน RSM ซึ่งทำการคำนวณความเค้นของเรย์โนลด์โดยตรงผ่านสมการการถ่ายโอนหลายสมการ (Transport equations) สำหรับรายละเอียดของสมการของแต่ละแบบจำลองความปั่นป่วนและคำอธิบายเพิ่มเติมสามารถอ่านได้จาก ANSYS Fluent theory guide [9]

### 2.3.3 การปรับแก้ความโค้ง (Curvature correction)

แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด eddy-viscosity มีข้อจำกัดในด้านการคำนวณระบบที่การไหลมีความโค้งหรือระบบที่มีการหมุน [9] ซึ่งการไหลรูปแบบนี้มีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อการไหลแบบปั่นป่วน Spalart และ Shur [10] ได้นำเสนอสมการการคำนวณเพื่อการปรับแก้การคำนวณการไหลที่มีความโค้งของแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด eddy-viscosity สมการการปรับแก้ความโค้งนี้จะถูกนำไปคูณกับเทอมการเกิดของพลังงานจลน์ความปั่นป่วน (Turbulence production term) ในสมการการถ่ายโอนของแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด eddy-viscosity สมการการปรับแก้ความโค้งแสดงดังสมการที่ 2.13

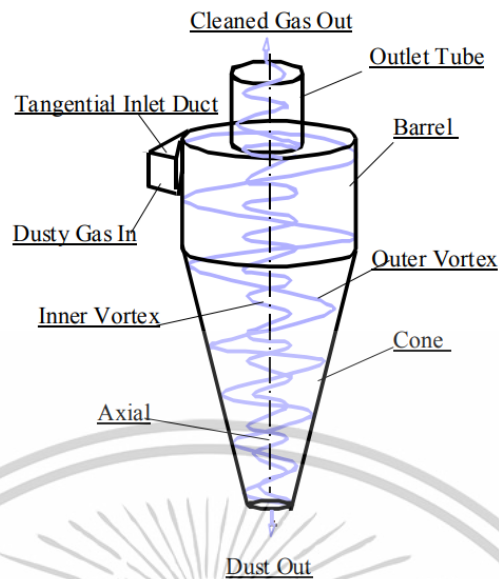
$$f_{\text{rotation}} = (1 + c_{r1}) \frac{2r^*}{1 + r^*} [1 - c_{r3} \tan^{-1}(c_{r2} \tilde{r})] - c_{r1} \quad (2.13)$$

โดยที่  $c_{r1}$   $c_{r2}$   $c_{r3}$  คือ ค่าคงที่ของสมการการปรับแก้ความโค้งซึ่งมีค่าต่างกันในแต่ละแบบจำลองความปั่นป่วน และ  $r^*$   $\tilde{r}$  คือ อาร์กิวเมนต์ของสมการการปรับแก้ความโค้งสำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมในการคำนวณสามารถอ่านได้จาก ANSYS Fluent theory guide [9]

### 2.4 อุปกรณ์คัดแยกแบบแก๊สไซโคลอน (Gas cyclone separator)

อุปกรณ์คัดแยกแบบแก๊สไซโคลอนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดแยกอนุภาคของแข็งออกจากอากาศหรือแก๊ส ลักษณะของแก๊สไซโคลอนจะประกอบด้วยท่อทางเข้าในแนวเส้นสัมผัส (Tangential inlet) ต่อเข้ากับถังทรงกระบอก (Cyclone barrel) เมื่อของไหลที่มีอนุภาคของแข็งผสมอยู่ไหลเข้าสู่ตัวอุปกรณ์ กระแสการไหล (Fluid stream) จะเกิดการหมุนวนส่งผลให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางนี้จะส่งผลให้อนุภาคที่ไหลมากับของไหล ถูกเหวี่ยงให้ไปอยู่ที่บริเวณผนังของแก๊สไซโคลอนและจะเคลื่อนที่แบบหมุนวนลงสู่ถังกักเก็บอนุภาคด้านล่าง กระแสการไหลวนที่พาอนุภาคของแข็งลงสู่ถังเก็บ (Outer vortex) เมื่อเคลื่อนที่ลงมาถึงบริเวณกรวย (Cyclone cone) จะเกิดกระแสการไหลวนอีกหนึ่งกระแสเคลื่อนที่หมุนวนไปทางด้านบน (Inner vortex) ซึ่งของไหลหรือแก๊สจะไหลตามกระแสไหลวนนี้ออกไปทางท่อทางออกด้านบนของไซโคลอน (Vortex finder) [1, 11] รายละเอียดของตัวอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 2.2

แก๊สไซโคลอนมีความเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมเคมีและอุตสาหกรรมอื่นๆมากมาย เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น มีการติดตั้งง่าย กลไกไม่ซับซ้อน ไม่มีส่วนอุปกรณ์ที่เคลื่อนไหว มีค่าการดำเนินการและค่าซ่อมบำรุงที่ต่ำ เป็นต้น



รูปที่ 2.2 แผนผังแสดงส่วนประกอบและลักษณะการไหลภายในแก๊สไซโคลน [11]

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature reviews)

Gimbun และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาการทำนายค่าความดันตกคร่อม (Pressure drop) ในแก๊สไซโคลนด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน RNGKE และ RSM เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Empirical model) 4 แบบจำลองและผลการทดลองของ Bohnet [13] จากผลการศึกษาพบว่าค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองความปั่นป่วน RNGKE และ RSM เบี่ยงเบนจากการทดลองออกไปเท่ากับ 14-18 และ 3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่าการทำนายค่าความดันตกคร่อมด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน RSM ให้ผลการทำนายที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด

Sylvia และคณะ [14] ศึกษาความสามารถของแบบจำลองความปั่นป่วน SA SKE RNGKE SKO และ RSM ในการทำนายสนามการไหล ประสิทธิภาพการคัดแยกขนาด และความดันตกคร่อมภายในแก๊สไซโคลนแบบ Lapple ซึ่งจะนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบกับข้อมูลผลการทดลองของ Wang และคณะ [15] จากการศึกษาการทำนายสนามการไหลพบว่ามีเพียงแบบจำลอง RSM เพียงแบบจำลองเดียวที่สามารถให้ผลการทำนายที่น่าเชื่อถือใกล้เคียงกับผลการทดลอง ซึ่งแม่นยำทั้งความเร็วในแนวเส้นสัมผัส (Tangential velocity) และความเร็วในแนวแกน (Axial velocity) การทำนายสนามการไหลที่แม่นยำของแบบจำลองความปั่นป่วน RSM ส่งผลให้การทำนายประสิทธิภาพการคัดแยกขนาด และความดันตกคร่อมของแบบจำลองความปั่นป่วน RSM มีความแม่นยำเช่นเดียวกัน

Santillo และคณะ [16] ศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วน SKE SKO และ RSM ต่อการทำนายสนามความเร็วในแก๊สไซโคลนแบบ Obermair [17] ในงานวิจัยนี้จะนำผลการทำนายที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 3 แบบจำลอง เปรียบเทียบกับผลการทำนายสนามความเร็วจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ในด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำนายด้วย LES และข้อมูลผลการทดลอง [18] ที่ตำแหน่งต่างๆในแก๊สไฮโดรเจนทั้งหมด 6 ตำแหน่ง ผลการทำนายสนามความเร็วด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน RSM ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลผลการทดลองมากที่สุดรองจากการทำนายด้วย LES และนอกเหนือจากความแม่นยำในการทำนายสนามความเร็วของแบบจำลองความปั่นป่วน RSM แล้วแบบจำลองความปั่นป่วน RSM ยังใช้เวลาและทรัพยากรการคำนวณที่น้อยกว่าการศึกษาด้วย LES

Wasilewski และคณะ [19] ศึกษาแก๊สไฮโดรเจนที่ถูกใช้ในกระบวนการผลิตปูนเม็ด โดยศึกษาสนามความดัน ความเร็ว และประสิทธิภาพการคัดแยกขนาดของแก๊สไฮโดรเจนที่มีความเร็วขาเข้าที่ต่างกันผ่านแบบจำลองความปั่นป่วน RNGKE และ RSM ผลการทำนายที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 2 แบบจำลอง ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทำนายสนามความเร็วจาก LES และข้อมูลผลการทดลอง ผลการศึกษาระบุว่าแบบจำลองความปั่นป่วน RSM สามารถแสดงความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของคำตอบได้โดยผลการทำนายสนามความดัน สนามความเร็ว และประสิทธิภาพการคัดแยกขนาดจากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM แม่นยำสอดคล้องกับผลการทำนายจาก LES และข้อมูลการทดลองมากที่สุด อีกทั้งยังใช้เวลาในการคำนวณที่น้อยกว่าถึง 12 วัน

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 สัดส่วนมิติของแก๊สไซโคลน (Gas cyclone dimension)

ในการศึกษานี้แบบจำลอง 3 มิติ ของแก๊สไซโคลนประสิทธิภาพสูงแบบ Stairmand ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 290 มิลลิเมตร จะถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม GAMBIT โดยสัดส่วนและรูปร่างของแก๊สไซโคลนจะถูกอ้างอิงจากงานวิจัยของ Hoekstra [4] ซึ่งมีท่อทางเข้าของแก๊สไซโคลนมีความสูง ( $a$ ) และความกว้าง ( $b$ ) เท่ากับ 145 และ 58 มิลลิเมตร ตามลำดับ รายละเอียดของสัดส่วนมิติของแก๊สไซโคลนที่ใช้ในการศึกษาจะแสดงดังตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.1 และเมื่อแบบจำลอง 3 มิติ ถูกสร้างขึ้นเรียบร้อยแล้ว แบบจำลองจะถูกแบ่งโดเมน (Partition) เพื่อสร้างกริดการคำนวณที่เหมาะสมในการจำลองการไหลต่อไป

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนมิติของแก๊สไซโคลน

มิติ	ความยาว [มิลลิเมตร] (มิติ/เส้นผ่านศูนย์กลางถึงทรงกระบอก)
ความสูงขาเข้า ( $a$ )	145 (0.5)
ความกว้างขาเข้า ( $b$ )	58 (0.2)
เส้นผ่านศูนย์กลางถึงทรงกระบอก ( $D_b$ )	290 (1)
เส้นผ่านศูนย์กลางปลายกรวย ( $D_c$ )	108 (0.372)
เส้นผ่านศูนย์กลางถึงกักเก็บผง ( $D_d$ )	290 (1)
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออก ( $D_e$ )	145 (0.5)
เส้นผ่านศูนย์กลาง vortex finder ( $D_v$ )	145 (0.5)
ความสูงถึงทรงกระบอก ( $h_b$ )	435 (1.5)
ความสูงกรวย ( $h_c$ )	725 (2.5)
ความสูงถึงกักเก็บผง ( $h_d$ )	580 (2)
ความสูง vortex finder ( $h_v$ )	145 (0.5)
ความสูงไซโคลนสุทธิ ( $h_t$ )	1160 (4)
ความยาวขาเข้า ( $L_i$ )	246.5 (0.85)
ความหนา vortex finder	10 (0.034)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แก๊สไซโคลนค่าความเร็วเฉลี่ยและแพกเตอร์ความเสียหายของผนังในแต่ละส่วนของอุปกรณ์จะมีค่าที่ไม่เท่ากัน จึงทำให้ขนาดกริดการคำนวณแรกจากผนังในแต่ละส่วนของตัวอุปกรณ์มีค่าที่ไม่เท่ากัน [1] ขนาดกริดการคำนวณแรกจากผนังในวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงดังตารางที่ 3.2 และสำหรับอัตราการเติบโตของกริดการคำนวณ (Growth ratio) ในแนวรัศมีและแนวแกนใช้ค่าเท่ากับ 1.2 และ 1.6 เท่า ตามงานวิจัยก่อนหน้าของ Bumrunghthaichaichan [1] ตามลำดับ

**ตารางที่ 3.2** ขนาดความสูงของกริดการคำนวณใกล้ผนัง

รายละเอียด	ความสูงของกริดแรกจากผนัง [มิลลิเมตร]
ถังทรงกระบอก (Cyclone barrel)	1.4802
กรวย (Cyclone cone)	0.9285
ท่อทางออกด้านบน (Vortex finder)	1.2424

### 3.3 สมการควบคุมที่ใช้ในการจำลอง (Governing equations for gas cyclone separator simulation)

#### 3.3.1 สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยของเรย์โนลด์

การจำลองการไหลภายในแก๊สไซโคลนจะถูกควบคุมด้วยสมการความต่อเนื่องเฉลี่ยเรย์โนลด์ และสมการโมเมนตัมเฉลี่ยเรย์โนลด์ (สมการเรย์โนลด์) ซึ่งสมการควบคุมสำหรับการจำลองการไหลของของไหลที่อัดตัวไม่ได้ในระบบ 3 มิติ ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.8 – 2.11

#### 3.3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน

แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในการจำลองการไหลภายในแก๊สไซโคลนในวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 แบบจำลองความปั่นป่วน โดยแบบจำลองความปั่นป่วนลำดับที่ 1 ถึง 6 จะเป็นแบบจำลองความปั่นป่วนประเภทความหนืดหมุนวน ซึ่งข้อแตกต่างของแต่ละแบบจำลองความปั่นป่วนคือรายละเอียดการคำนวณของสมการการถ่ายโอน สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถอ่านได้จาก ANSYS Fluent theory guide [9]

- 1) แบบจำลองความปั่นป่วน Spalart-Allmaras (SA)
- 2) แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon (SKE)
- 3) แบบจำลองความปั่นป่วน Renormalization group k-epsilon (RNGKE)
- 4) แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon (RKE)
- 5) แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-omega (SKO)
- 6) แบบจำลองความปั่นป่วน Shear-stress transport k-omega (SSTKO)
- 7) แบบจำลองความปั่นป่วน Reynolds stress model (RSM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดได้เห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 สภาวะขอบเขตและระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Boundary condition and numerical schemes)

ในการศึกษาการจำลองการไหล ของไหลที่ใช้ในการจำลองคือ อากาศ โดยมีความหนาแน่นเท่ากับ 1.096 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีความหนืดเท่ากับ  $1.81623 \times 10^{-5}$  กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที การกำหนดขอบเขตเงื่อนไขของการจำลองจะกำหนดให้ที่ทางเข้าของของไหลเป็นขอบเขตเงื่อนไขชนิดความเร็วขาเข้า (Velocity inlet) ความเร็วขาเข้าที่ใช้เท่ากับ 16 เมตรต่อวินาที ที่บริเวณทางออกกำหนดเป็นปริมาณที่ของไหลไหลออก (Outflow) และสำหรับบริเวณพื้นผิวอื่นๆของไซโคลนกำหนดเป็นผนังที่อยู่นิ่ง โดยมีเงื่อนไขของแรงเฉือนของผนังเป็นแบบไม่มีการลื่นไถล (No slip condition) และระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมีความสำคัญต่อการประมาณค่าต่างๆของกริดการคำนวณสำหรับรายละเอียดการตั้งค่าระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจะใช้เหมือนกับงานก่อนหน้าของ Bumrunghthaichan [1, 2] ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.3 และรายละเอียดข้อแตกต่างของแต่ละระเบียบวิธีแสดงดังนี้

ระเบียบวิธี Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE) ระเบียบวิธีนี้เป็นการคำนวณสนามความดันและสนามความเร็วภายในการจำลอง ด้วยการเริ่มต้นเดาค่าความดันแล้วนำไปคำนวณในสมการโมเมนตัม หลังจากนั้นจะนำไปแทนค่าในสมการควบคุมการไหลอื่นๆ หากคำตอบของสนามการไหลที่ได้จากการคำนวณไม่ลู่ออก ระเบียบวิธีจะวนซ้ำกลับไปเดาค่าความดันเพื่อคำนวณใหม่ [9]

ระเบียบวิธี Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics (QUICK) เป็นระเบียบวิธีที่ใช้ในการประมาณค่าสนามต่างๆที่บริเวณขอบของกริด โดยระเบียบวิธีนี้ให้ความแม่นยำของคำตอบที่สูงเหมาะสมสำหรับกริดที่มีลักษณะเป็นทรงหกหน้า [9]

ระเบียบวิธี Least-Squares Cell-Based เป็นระเบียบวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการคำนวณเกรเดียนต์ของคำตอบที่คำนวณได้ตรงกลางของกริด ระเบียบวิธีนี้ใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์น้อยและให้คำตอบที่แม่นยำที่สุด [9]

ระเบียบวิธี PREssure Staggering Option (PRESTO!) เป็นระเบียบวิธีในการประมาณค่าความดันที่บริเวณขอบของกริด ระเบียบวิธีนี้เหมาะสำหรับการจำลองการไหลที่ภายในโดเมนมีการหมุนเหวี่ยงรุนแรง ลักษณะการไหลมีความซับซ้อน เช่น การจำลองการไหลภายในไซโคลน เป็นต้น [9]

ตารางที่ 3.3 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

รายละเอียด	ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข
Pressure-velocity coupling scheme	SIMPLE
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	PRESTO!
Momentum	QUICK
Turbulence quantities	QUICK
Reynolds stress	QUICK
Temporal discretization	Second order implicit

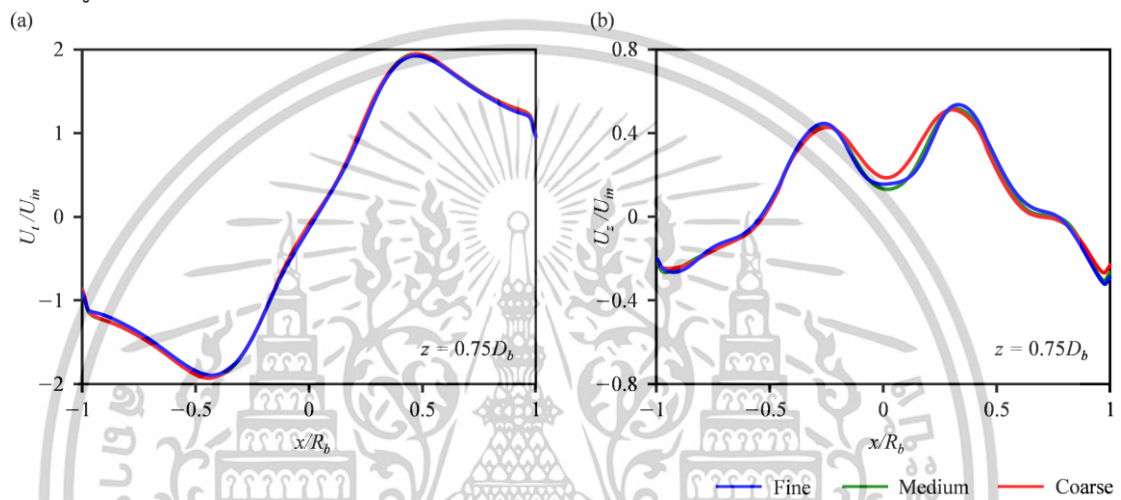
### 3.4.1 ขนาดของเวลาในการคำนวณ (An appropriate time step size)

นอกจากสภาวะขอบเขตและระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ต้องมีความเหมาะสมต่อการจำลองแล้ว ขนาดของเวลาในการคำนวณ (Time step size) ยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สามารถส่งผลต่อคำตอบได้ จากงานวิจัยของ Chuah และคณะ [20] บอกว่าขนาดของเวลาในการคำนวณของการจำลองการไหลภายในแก๊สไฮโดรเจนมีความเท่ากับ เศษเสี้ยวเล็กๆของเวลาที่ของไหลไหลอยู่ภายในอุปกรณ์ ในปี ค.ศ. 2024 Thongnoi และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาขนาดของเวลาในการคำนวณที่เหมาะสมสำหรับการจำลองการไหลภายในแก๊สไฮโดรเจนและพบว่า ขนาดของเวลาในการคำนวณที่เหมาะสมต้องมีค่าน้อยกว่า  $1/1470$  ของเวลาที่ของไหลไหลอยู่ภายในอุปกรณ์ หรือเท่ากับ  $0.0005$  วินาที [21] แต่เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนและให้ได้คำตอบที่แม่นยำ ในทุกๆการจำลองของงานวิจัยนี้จะใช้ขนาดของเวลาในการคำนวณเท่ากับ  $1/7380$  ของเวลาที่ของไหลไหลอยู่ภายในอุปกรณ์ หรือเท่ากับ  $0.0001$  วินาที

### 3.5 การศึกษาความเป็นอิสระของผลเฉลยต่อกริดการคำนวณ (Grid independent solutions)

การศึกษาความเป็นอิสระของผลเฉลยต่อกริดการคำนวณเป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก เพื่อเป็นการยืนยันว่าผลเฉลยไม่เปลี่ยนแปลงหรือแสดงการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อจำนวนกริดการคำนวณเพิ่มขึ้น ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาความแตกต่างของผลเฉลยของสนามความเร็วที่ได้จากการจำลองจากความละเอียดของกริด 3 ระดับ คือ กริดระดับละเอียด (756,788 เซลล์) กริดระดับกลาง (426,552 เซลล์) และกริดระดับหยาบ (245,356 เซลล์) ผลเฉลยของสนามความเร็วที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน SA ที่มีการใช้ curvature correction (SA-CC) จากกริดทั้ง 3 ระดับจะถูกนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อดูความเป็นอิสระของผลเฉลยต่อกริดการคำนวณ รูปที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 a และ b แสดงโปรไฟล์ความเร็วในแนวเส้นสัมผัสและแนวแกนของกริดระดับละเอียด (เส้นสีน้ำเงิน) กริดระดับกลาง (เส้นสีเขียว) และกริดระดับหยาบ (เส้นแดง) ตามลำดับ จากผลการศึกษพบว่า ผลการจำลองจากกริดทั้ง 3 ระดับมีความคลาดเคลื่อนกันเพียงเล็กน้อยทั้งความเร็วในแนวเส้นสัมผัสและแนวแกน นั้นแสดงถึงความเป็นอิสระของผลเฉลยต่อกริดการคำนวณที่สร้างขึ้น เนื่องจากเมื่อจำนวนกริดการคำนวณเปลี่ยนแปลงไปคำตอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก ในงานวิจัยนี้กริดระดับละเอียดจะถูกนำมาใช้ในการจำลองการไหลของทุกแบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อการันตีความแม่นยำของผลเฉลย ผลการทำนายทั้งหมดในวิทยานิพนธ์จะถูกคำนวณแบบสถานะไม่คงที่ (Transient) และนำข้อมูลในช่วงที่การคำนวณคงที่ (Semi-periodic flow field) มาทำการเฉลี่ยและแสดงผล

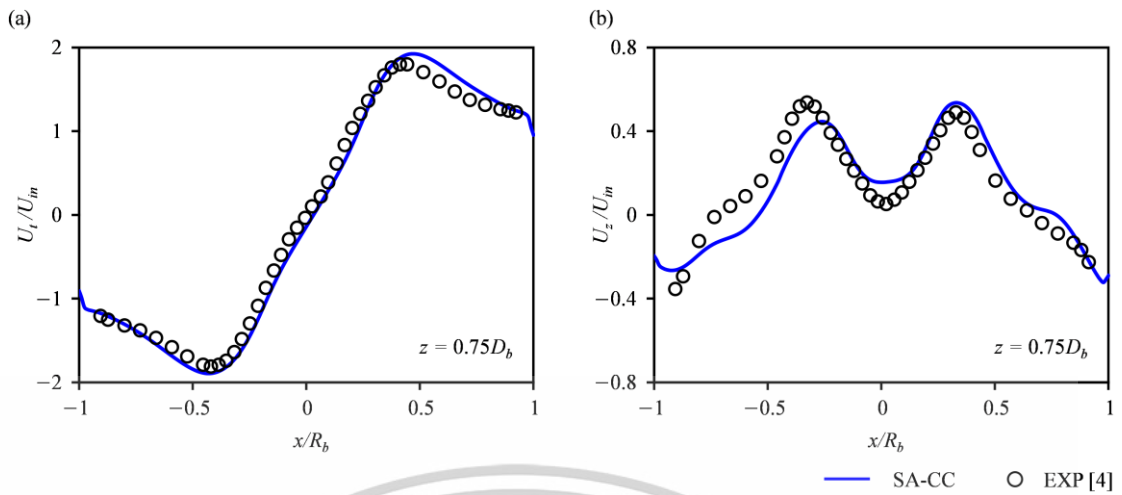


รูปที่ 3.2 โปรไฟล์ความเร็วในแนวเส้นสัมผัสและแนวแกนของกริด 3 ระดับที่ทำนายด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน SA-CC (ปรับปรุงจาก Manuscript draft ของ Thongnoi et al. (POWTEC-D-24-02738))

### 3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model validation)

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะศึกษาผ่านผลการจำลองสนามความเร็วจากแบบจำลองความปั่นป่วน SA-CC ซึ่งจะนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบกับข้อมูลผลการทดลองจากงานวิจัยของ Hoekstra [4] โดยทำการเปรียบเทียบที่ตำแหน่ง  $z = 0.75D_b$  นับจากหลังคาของไซโคลน (Horizontal level from the roof) รูปที่ 3.3 a และ b แสดงโปรไฟล์ความเร็วในแนวเส้นสัมผัสและแนวแกนที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วน SA-CC ผลการจำลองสามารถแสดงแนวโน้มกราฟรูปแบบตัวเอส (S-shape) และกราฟรูปแบบตัวเอ็ม (M-shape) ของความเร็วในแนวเส้นสัมผัสและแนวแกนได้ จากข้อมูลนี้สามารถระบุได้ว่า แบบจำลองแก๊สไซโคลนที่ถูกสร้างขึ้น ขนาดของกริดการคำนวณ สภาวะขอบเขตและระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่เลือกใช้ สามารถใช้ทำนายสนามการไหลภายในแก๊สไซโคลนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 โปรไฟล์ความเร็วในแนวเส้นสัมผัสและแนวแกนที่ทำนายด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน SA-CC เปรียบเทียบกับข้อมูลผลการทดลองของ Hoekstra [4] (ปรับปรุงจาก Manuscript draft ของ Thongnoi et al. (POWTEC-D-24-02738))

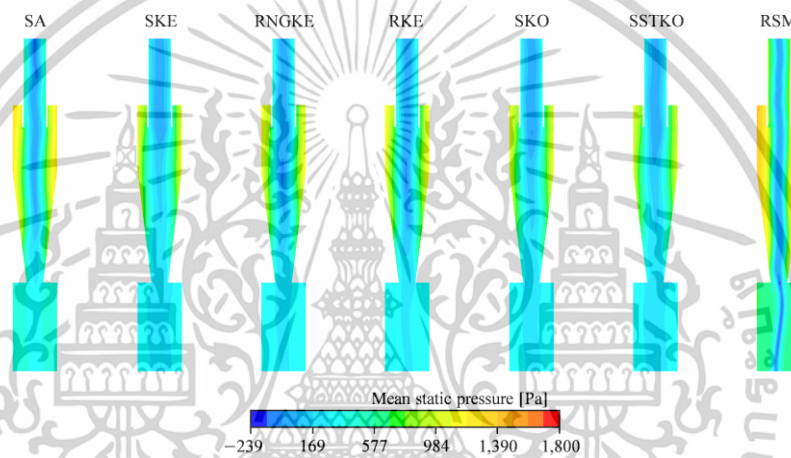
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

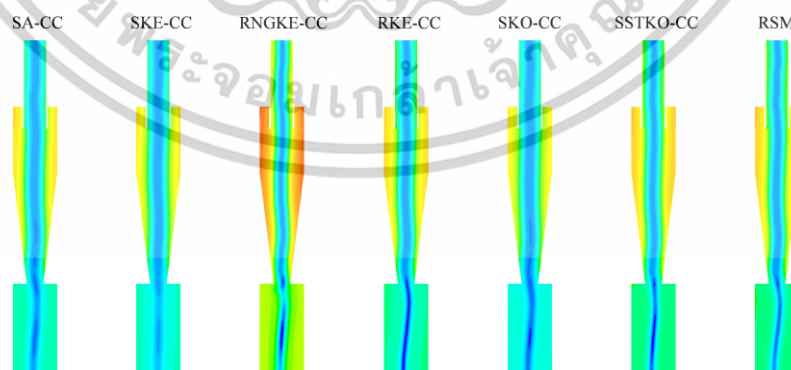
### ผลการจำลอง และอภิปรายผลการจำลอง

#### 4.1 ผลการทำนายสนามความดันสถิตย์เฉลี่ย (Mean static pressure prediction)

สนามความดัน (Pressure field) เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่สามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องแยกแก๊สไซโคลอนได้ ในงานวิจัยนี้ภาพคอนทัวร์ของสนามความดันสถิตย์ที่ระนาบ  $y = 0$  ที่ทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ไม่ใช้และใช้ curvature correction จะนำมาเปรียบเทียบกับผลการทำนายที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ เนื่องจากในงานวิจัยของ Hoekstra [4] ไม่มีผลการเปรียบเทียบในส่วนนี้



รูปที่ 4.1 คอนทัวร์ความดันสถิตย์เฉลี่ยของแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนเปรียบเทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วน RSM ที่ระนาบ  $y = 0$  (ปรับปรุงจาก Manuscript draft ของ Thongnoi et al. (POWTEC-D-24-02738))



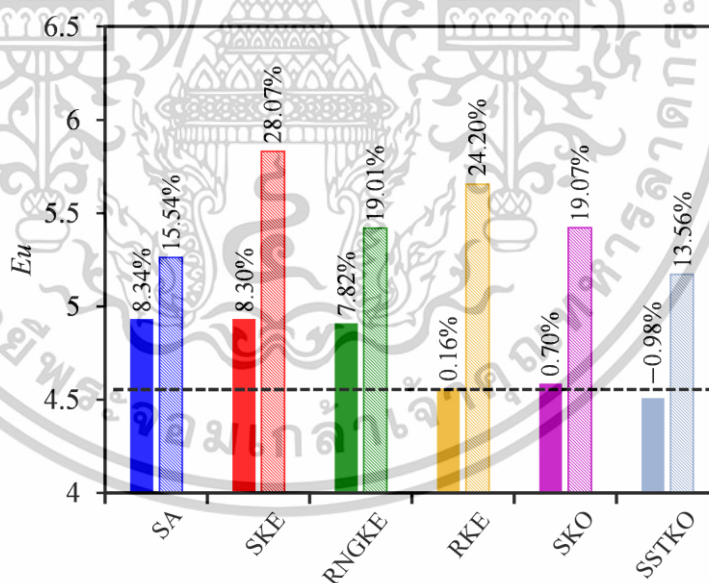
รูปที่ 4.2 คอนทัวร์ความดันสถิตย์เฉลี่ยของแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ใช้ curvature correction เปรียบเทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วน RSM ที่ระนาบ  $y = 0$  (ปรับปรุงจาก Manuscript draft ของ

Thongnoi et al. (POWTEC-D-24-02738))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าสนามความดันสถิตย์ที่ทำนายได้จากแบบจำลองความหนืดหมุนวนที่ไม่เปิดใช้ curvature correction ลักษณะรูปทรงของคอนทอร์และค่าที่คำนวณได้ไม่มีความใกล้เคียงกับแบบจำลองความปั่นป่วน RSM ในขณะที่ในรูปที่ 4.2 แสดงแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่เปิดใช้ curvature correction สามารถทำนายสนามความดันสถิตย์ได้ใกล้เคียงกับแบบจำลองความปั่นป่วน RSM ทั้งลักษณะรูปทรงของคอนทอร์และค่าที่คำนวณได้ จากผลในรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำนายสนามความดันที่เพิ่มขึ้นของแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนเมื่อใช้ร่วมกับ curvature correction

นอกเหนือจากสนามความดันสถิตย์ที่ถูกแสดงในรูปแบบของภาพคอนทอร์แล้ว ความดันตกคร่อม (Pressure drop) ภายในเครื่องแยกแก๊สไฮโดรเจนที่ศึกษาจะถูกแสดงในรูปแบบของตัวเลขออยเลอร์ (Euler number:  $Eu$ ) ตัวเลขออยเลอร์ที่ถูกทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ใช้และไม่ใช้ curvature correction จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทำนายจากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM โดยแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนซึ่งถูกนิยามเหมือนกับในงานวิจัยก่อนหน้าของ Bumrunghthaichan [1] แสดงดังรูปที่ 4.3 โดยตัวเลขออยเลอร์ที่ทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM จะแสดงตั้งเส้นประสีดำซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.55 สำหรับค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ใช้และไม่ใช้ curvature correction จะแสดงดังกราฟแท่งสีเข้มและสีอ่อนตามลำดับ

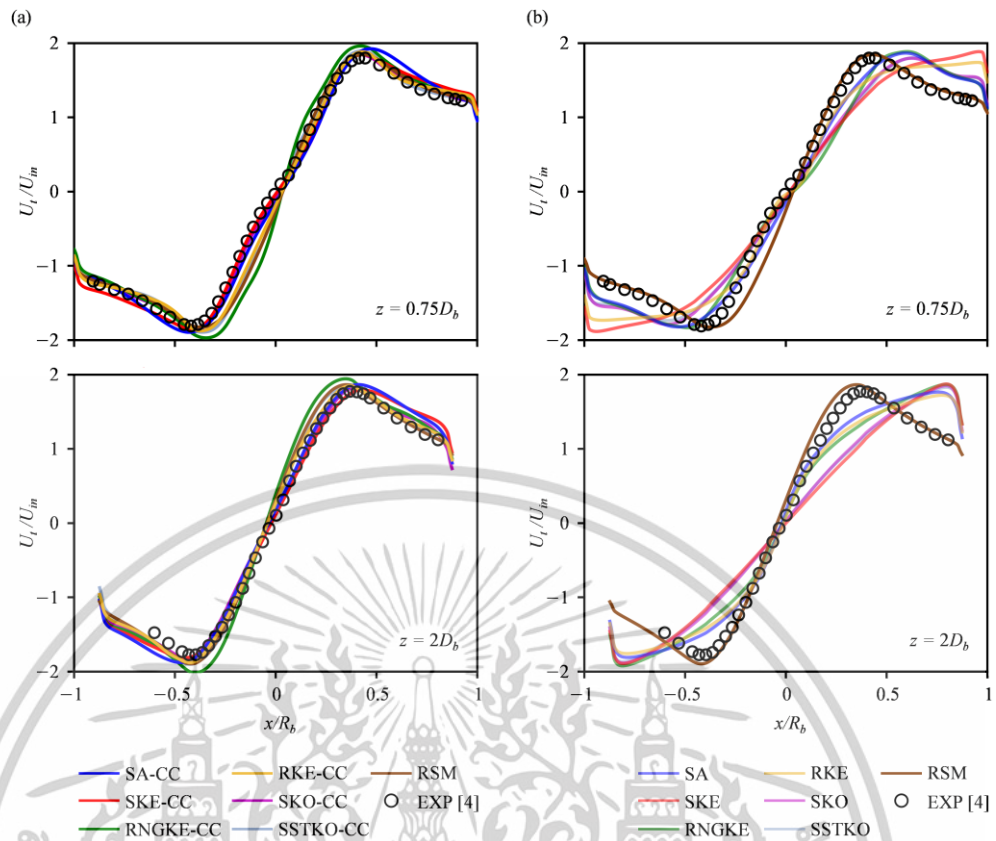


รูปที่ 4.3 ตัวเลขออยเลอร์ที่ทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนเปรียบเทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วน RSM (ปรับปรุงจาก Manuscript draft ของ Thongnoi et al. (POWTEC-D-24-02738))

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ใช้ curvature correction สามารถทำนายตัวเลขขอยเลอร์ได้ใกล้เคียงกับแบบจำลองความปั่นป่วน RSM มากกว่าค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ไม่ใช้ curvature correction อย่างชัดเจน โดยแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ให้ความแม่นยำในการทำนายมากที่สุดคือแบบจำลองความปั่นป่วน RKE-CC ที่ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเพียงแค่ 0.16% จากผลการศึกษาสนามความดันสถิตยและความดันตกคร่อม สามารถสรุปได้ว่าความแม่นยำของคำตอบที่เพิ่มขึ้นของแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวน เป็นผลมาจากการใช้ curvature correction

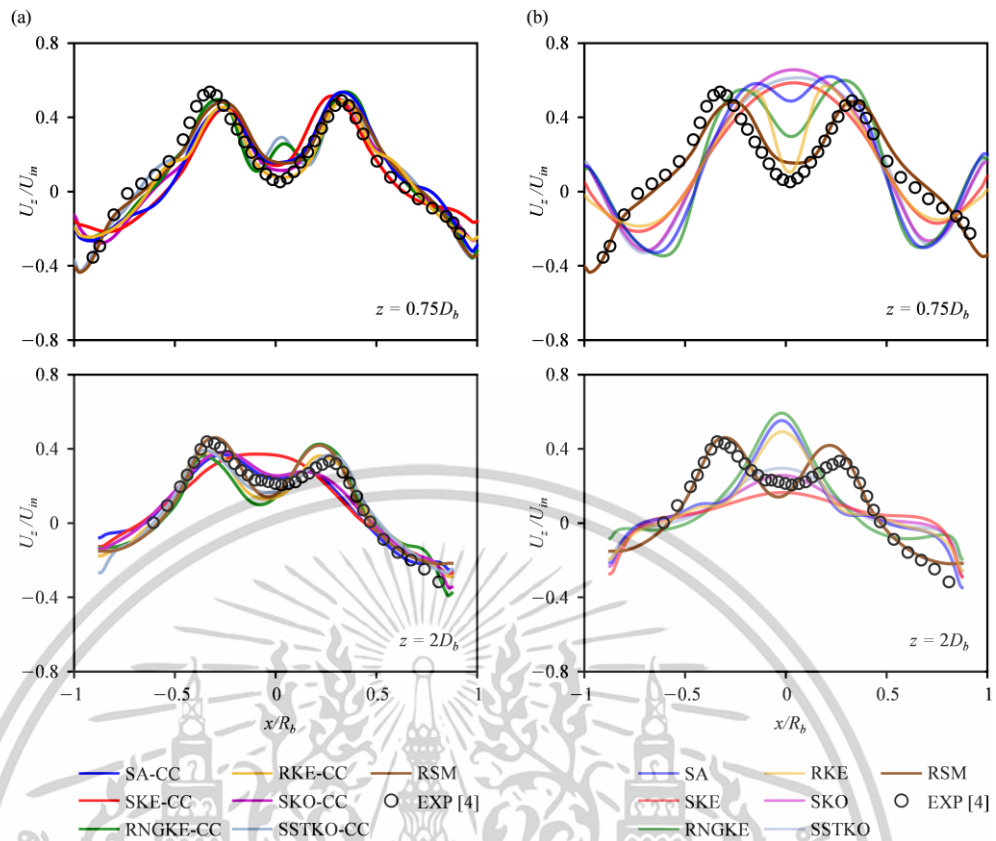
## 4.2 ผลการทำนายสนามความเร็วเฉลี่ย (Mean velocities prediction)

สนามความเร็ว (Velocity field) เป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญของการศึกษาพลศาสตร์ของไหล เนื่องจากหากสามารถคำนวณสนามความเร็วได้แม่นยำจะสามารถแก้ปัญหาการไหลต่างๆได้ [22] ในการประเมินความสามารถของแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวน สนามความเร็วในแนวสัมผัสและแนวแกน (Tangential and Axial velocities) ที่ทำนายได้ ณ ตำแหน่ง  $z = 0.75D_0$  และ  $z = 2D_0$  จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ใช้และไม่ใช้ curvature correction จะถูกทำให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้หน่วย (Normalized) โดยความเร็วในแนวเส้นสัมผัสและแนวแกนจะถูกหารด้วยความเร็วขาเข้า ในขณะที่ระยะทางตามแนวแกน  $x$  จะถูกหารด้วยรัศมีของถังทรงกระบอก โดยความเร็วในแนวสัมผัสจะบ่งบอกถึงความเร็วของการไหลหมุนวนรอบแกนไซโคลน (Cyclone axis) ซึ่งเป็นแรงขับเคลื่อนหลักในการสร้างแรงหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อใช้ในการแยกอนุภาคออกจากกระแสการไหล สำหรับความเร็วในแนวแกนจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับกระแสการไหลเคลื่อนที่ลงและเคลื่อนที่ขึ้น (Downward and upward flow) ภายในอุปกรณ์คัดแยกแบบแก๊สไซโคลน ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่และการขนส่งของอนุภาค สำหรับผลการทำนายจากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทำนายจากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM และข้อมูลการทดลองจากงานวิจัยของ Hoekstra [4] แสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 โปรไฟล์ความเร็วในแนวเส้นสัมผัสที่ทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวน (a) ใช้ curvature correction และ (b) ไม่ใช้ curvature correction เปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM (ปรับปรุงจาก Manuscript draft ของ Thongnoi et al. (POWTEC-D-24-02738))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 โปรไฟล์ความเร็วในแนวแกนที่ทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวน (a) ใช้ curvature correction และ (b) ไม่ใช้ curvature correction เปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM (ปรับปรุงจาก Manuscript draft ของ Thongnoi et al. (POWTEC-D-24-02738))

รูปที่ 4.4(a) แสดงให้เห็นว่าผลการทำนายความเร็วในแนวเส้นสัมผัสทั้ง 2 ตำแหน่งของแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ใช้ curvature correction ทุกๆแบบจำลองให้ผลการทำนายที่สอดคล้องกับผลการทำนายจากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM และข้อมูลการทดลองของ Hoekstra [4] ในขณะที่ผลการทำนายความเร็วในแนวเส้นสัมผัสที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ไม่ใช้ curvature correction ไม่สามารถให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทำนายจากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM และข้อมูลการทดลอง [4] ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.4(b)

สำหรับผลการทำนายความเร็วในแนวแกนของแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวน ที่ตำแหน่ง  $z = 0.75D_b$  แบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ใช้ curvature correction ในรูปที่ 4.5(a) ให้ผลการทำนายที่สอดคล้องดีกับผลการทดลอง [4] ยกเว้นแบบจำลองความปั่นป่วน RNGKE-CC และ SSTKO-CC ที่บริเวณตรงกลางของเครื่องแยกแก๊สไซโคลนให้ค่าที่สูงเกินความเป็นจริง (Overpredicted) กว่าแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนตัวอื่น ซึ่งส่งผลให้ลักษณะของโปรไฟล์แตกต่างออกไป ที่ตำแหน่ง  $z = 2D_b$  แบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ใช้ curvature correction ได้ผลการทำนายที่สอดคล้องกับการทดลอง [4] และแบบจำลองความ

ปั่นป่วน RSM ยกเว้นแบบจำลองความปั่นป่วน SKE-CC ที่ไม่สามารถแสดงแนวโน้มของโปรไฟล์การไหลได้เหมือนแบบจำลองความปั่นป่วนตัวอื่น และเมื่อแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนไม่ใช้ curvature correction ผลการทำนายความเร็วในแนวแกนจากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนไม่สามารถแสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการทดลอง [4] และแบบจำลองความปั่นป่วน RSM ได้อย่างชัดเจน

ในกรณีของแบบจำลองความปั่นป่วน RNGKE-CC ที่ตำแหน่ง  $z = 0.75D_b$  การที่ค่ามีความสูงเกินความเป็นจริงคาดว่าเป็นผลมาจากในสมการของแบบจำลองจะมีค่าคงที่ปรับแก้การหมุนของการไหล (Swirl constant) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ค่าคงที่ปรับแก้การหมุนเท่ากับ 0.07 ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นของโปรแกรมและเป็นค่าที่เหมาะสมกับระบบที่มีการหมุนวนเล็กน้อยมากกว่าการไหลหมุนวนที่รุนแรงและซับซ้อนภายในเครื่องแยกแก๊สไซโคลน [9] สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน SSTKO-CC ที่ตำแหน่ง  $z = 0.75D_b$  ผลการทำนายที่คลาดเคลื่อนคาดว่าเป็นผลมาจากข้อจำกัดของแบบจำลองในการทำนายการไหลแบบ free shear ซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณตรงกลางของถังทรงกระบอก [23] และที่ตำแหน่ง  $z = 2D_b$  แบบจำลองความปั่นป่วน SKE-CC ไม่สามารถแสดงแนวโน้มของโปรไฟล์การไหลได้เหมือนแบบจำลองความปั่นป่วนตัวอื่น เป็นผลมาจากข้อจำกัดของแบบจำลองในการทำนายการไหลแบบหมุนวน ซึ่งที่ตำแหน่งดังกล่าวคือบริเวณโคนของเครื่องแยกแก๊สไซโคลนและมีการไหลหมุนวนอย่างรุนแรง [24] จากผลการทำนายสนามความเร็ว สามารถสรุปได้ว่า curvature correction สามารถช่วยให้แบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนมีความสามารถมากขึ้นในการทำนายสนามความเร็วภายในเครื่องแยกแก๊สไซโคลน

#### 4.3 ผลการศึกษาด้วยข้อมูลทางสถิติ (Statistical analysis)

จากโปรไฟล์ความเร็วที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้สามารถแสดงให้เห็นถึงความสามารถทำนายสนามการไหลเฉลี่ยที่แม่นยำขึ้นเมื่อมีการใช้งาน curvature correction กับแบบจำลองความปั่นป่วนหมุนวน แต่อาจสังเกตได้ยากว่าแบบจำลองความปั่นป่วนชนิดไหนที่ให้ความแม่นยำได้มากกว่ากัน ด้วยเหตุนี้การใช้วิธีการศึกษาด้วยข้อมูลทางสถิติมาช่วยในการศึกษาจะสามารถทำให้ความแม่นยำของแบบจำลองความปั่นป่วนในเชิงประจักษ์ได้มากขึ้น

ในวิทยานิพนธ์นี้การศึกษาด้วยข้อมูลทางสถิติจะนำวิธี Hit-rate ( $q$ ) จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Schlünzen และคณะ [27] ในปี 2004 มาประยุกต์ใช้ซึ่งนิยามดังสมการที่ 4.1

$$q = \frac{N}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \quad (4.1)$$

with  $N_i = 1$ ; if  $\left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right| \leq RD$  or  $|P_i - O_i| \leq AD$

โดยที่  $n$  คือ จำนวนจุดทั้งหมด  $P_i$  คือ ค่าที่คำนวณได้  $O_i$  คือ ค่าจากการทดลอง  $RD$  คือ ค่าความแตกต่างสัมพัทธ์ และ  $AD$  คือ ค่าความแตกต่างสัมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิทยานิพนธ์นี้ค่าความแตกต่างสัมพัทธ์จะใช้เท่ากับ 0.25 ตามงานวิจัยก่อนหน้าของ Schlünzen และคณะ [27] ค่าความแตกต่างสัมบูรณ์จะใช้เท่ากับ 4% ของความเข้มข้นของความปั่นป่วน (Turbulence intensity) คูณกับความเร็วจาเข้า โดยค่า  $q$  ที่คำนวณได้จะต้องมีค่ามากกว่า 66% ขึ้นไป จึงจะถือว่าผลที่ทำนายได้นั้นมีความแม่นยำและสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยผลการศึกษาจะนำค่าการทำนายความเร็วในแนวแกนที่ทั้ง 2 ตำแหน่ง ของทุกแบบจำลองความปั่นป่วน ความหนืดหมุนวนมาเปรียบเทียบ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1** ค่า Hit-rate ที่ทำนายได้ของแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนจากความเร็วในแนวแกน

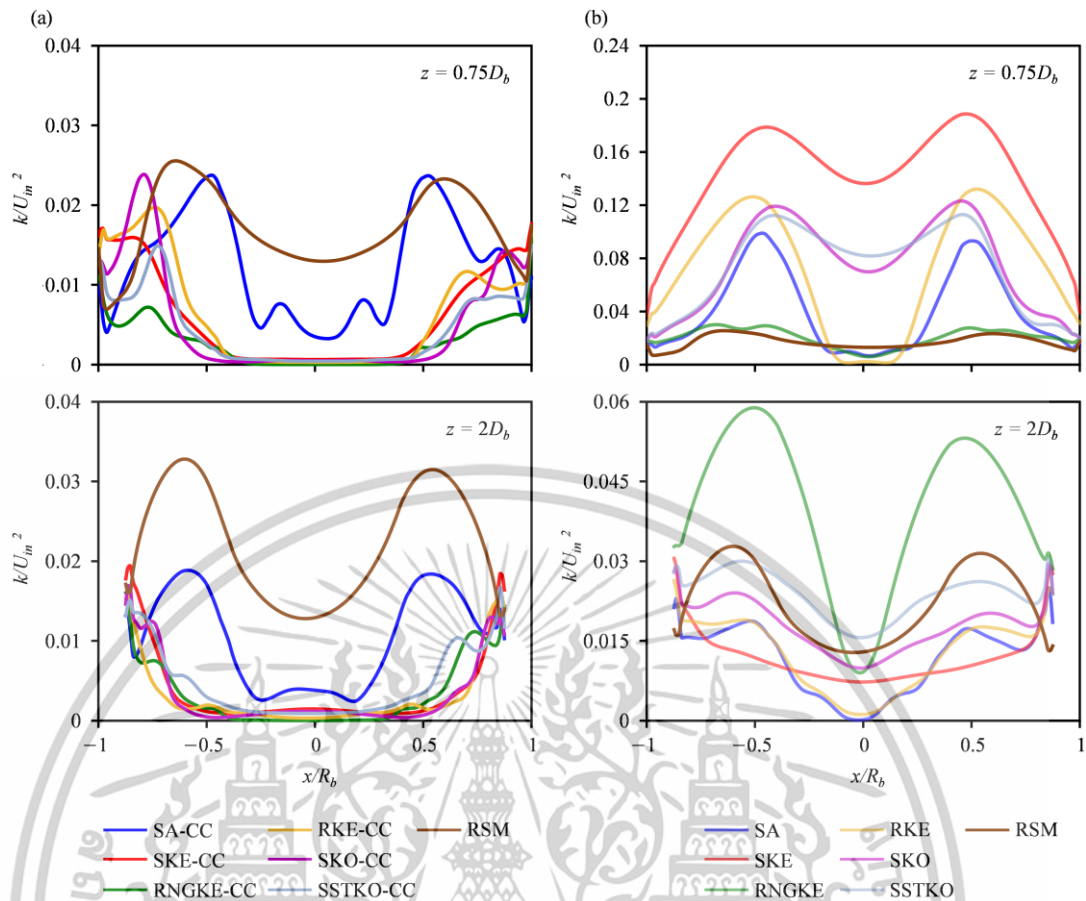
$z = 0.75D_0$	
แบบจำลองความปั่นป่วน	Hit-rate [%]
SA-CC	47.62
SKE-CC	33.33
RNGKE-CC	64.29
RKE-CC	69.05
SKO-CC	54.76
SSTKO-CC	64.29
$z = 2D_0$	
แบบจำลองความปั่นป่วน	Hit-rate [%]
SA-CC	80.56
SKE-CC	33.33
RNGKE-CC	47.22
RKE-CC	72.22
SKO-CC	88.89
SSTKO-CC	80.56

จากผลการศึกษาด้วยข้อมูลทางสถิติที่ตำแหน่ง  $z = 0.75D_0$  และ  $2D_0$  ค่า  $q$  ของแบบจำลองความปั่นป่วน RKE ที่ใช้งานร่วมกับ curvature correction นั้น เป็นเพียงแบบจำลองเดียวที่สามารถให้ค่า  $q$  ได้มากกว่า 66% ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของผลการทำนายสนามการไหลในแนวแกนที่ทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วน RKE กับ ข้อมูลจากผลการทดลอง

#### 4.4 ผลการทำนายพลังงานจลน์ความปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy prediction)

ในงานวิจัยนี้ผลการทำนายพลังงานจลน์ความปั่นป่วนจะถูกนำมาใช้เป็นอีกหนึ่งตัวแปร ในการประเมินประสิทธิภาพการคำนวณของแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวน โดยผลการทำนายพลังงานจลน์ความปั่นป่วนจากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ใช้และไม่ใช้ curvature correction จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทำนายจากแบบจำลอง RSM ที่ตำแหน่ง  $z = 0.75D_b$  และ  $z = 2D_b$  แสดงดังรูปที่ 4.6

ในรูปที่ 4.6(a) แสดงพลังงานจลน์ความปั่นป่วนที่ทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ใช้ curvature correction ซึ่งถูกทำให้ไร้หน่วยจากการหารด้วยความเร็วขาเข้า ยกกำลังสอง ( $U_{in}^2$ ) จากผลการทำนายแสดงให้เห็นว่าค่าพลังงานจลน์ความปั่นป่วนที่ทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนแสดงแนวโน้มที่คล้ายกันคือ มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM ในทุกๆตำแหน่ง ในขณะที่ผลการทำนายพลังงานจลน์ความปั่นป่วนจากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ไม่ใช้ curvature correction ในรูปที่ 4.6(b) แสดงให้เห็นว่าให้ค่าการทำนายที่มีทั้งสูงกว่าและต่ำกว่าซึ่งไม่เหมือนกันเลยทั้งตำแหน่ง  $z = 0.75D_b$  และ  $z = 2D_b$  จากผลการทำนายพลังงานจลน์ความปั่นป่วนแสดงให้เห็นว่า แม้ว่าแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนจะใช้งานร่วมกับ curvature correction แต่ก็ไม่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้แบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนทำนายค่าพลังงานจลน์ความปั่นป่วนให้มีความแม่นยำ เทียบเท่ากับแบบจำลองความปั่นป่วน RSM ได้ ซึ่งบ่งชี้ถึงข้อจำกัดของแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนในการทำนายพลังงานจลน์ความปั่นป่วนภายในอุปกรณ์คัดแยกแบบแก๊สไซโคลน



รูปที่ 4.6 โปรไฟล์พลังงานจลน์ความปั่นป่วนที่ทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวน (a) ใช้ curvature correction และ (b) ไม่ใช้ curvature correction เปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM (ปรับปรุงจาก Manuscript draft ของ Thongnoi et al. (POWTEC-D-24-02738))

#### 4.5 ผลการจำลองลักษณะการไหลหมุนวน (Vortex structure)

เครื่องแยกแก๊สไซโคลนทำงานโดยอาศัยหลักการแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อคัดแยกอนุภาคออกจากของไหล ด้วยเหตุนี้ลักษณะการไหลหมุนวนภายในเครื่องแยกแก๊สไซโคลนจึงถูกนำมาศึกษาโดยใช้สมการ  $Q$  criterion แสดงดังสมการที่ 4.2 ซึ่งถูกนำเสนอโดย Hunt และคณะ [25]

$$Q = \frac{1}{2} (\|\Omega\|^2 - \|S\|^2)$$

$$\Omega = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

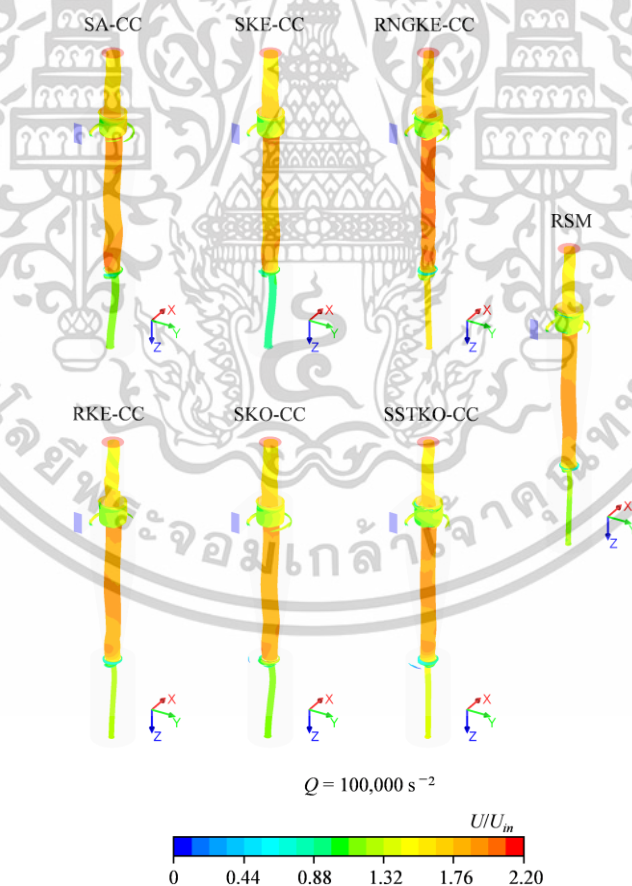
$$S = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$
(4.2)

เมื่อ  $\Omega$  คือ เทนเซอร์การหมุนวน  $S$  คือ เทนเซอร์อัตราความเค้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิทยานิพนธ์นี้ลักษณะการไหลหมุนวนของแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ใช้ curvature correction จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วน RSM เพื่อดูความคล้ายคลึงของการไหลหมุนวนที่จำลองได้แสดงดังรูปที่ 4.7

รูปที่ 4.7 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลหมุนวนที่ค่า  $Q$  เท่ากับ 100,000 แสดงให้เห็นว่าลักษณะการไหลหมุนวนที่ทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ใช้ curvature correction มีความคล้ายคลึงกับผลการทำนายจากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับแบบจำลองความปั่นป่วน RKE-CC สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนชนิดอื่น มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยในรูปร่างลักษณะของการไหลวนลำดับรอง (Secondary vortices) ที่บริเวณด้านบนของบริเวณถังทรงกระบอก การไหลวนลำดับรองชนิดนี้จะเรียกว่า กระแสการไหลแบบลัด (Short-circuit flow) ลักษณะการไหลที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยของกระแสการไหลแบบลัดสามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการคัดแยกขนาดของอนุภาคได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอนุภาคขนาดเล็ก ความสอดคล้องของผลการทำนายลักษณะการไหลหมุนวนของแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนกับแบบจำลองความปั่นป่วน RSM แสดงให้เห็นถึงความสามารถการทำนายที่แม่นยำเมื่อใช้งานร่วมกับ curvature correction



รูปที่ 4.7 ลักษณะการไหลหมุนวนที่ทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ใช้ curvature correction เปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM (ปรับปรุงจาก

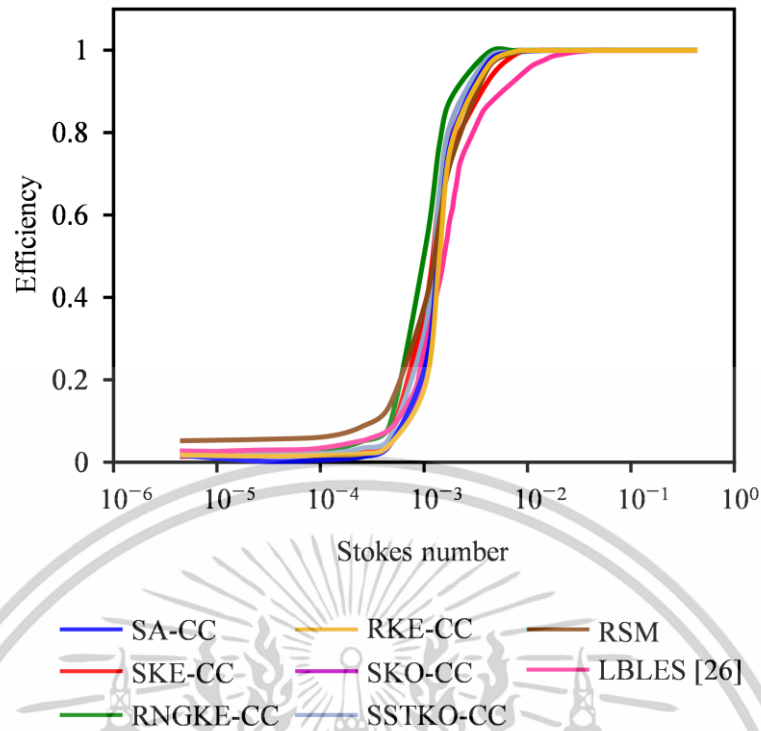
Manuscript draft ของ Thongnoi et al. (POWTEC-D-24-02738))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

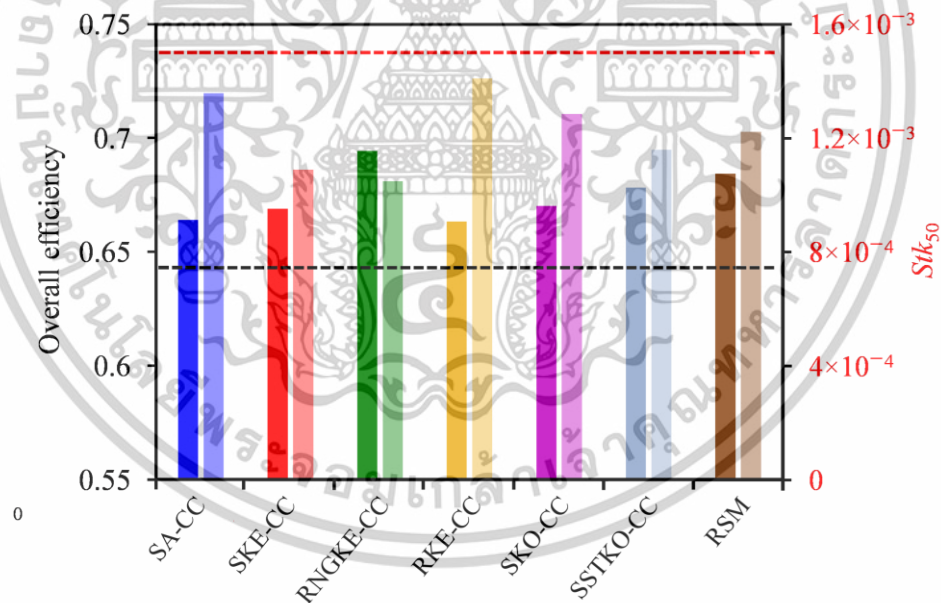
#### 4.6 ผลการทำนายประสิทธิภาพการตัดแยกขนาดอนุภาค

เนื่องจากผลการศึกษาของสนามการไหลเฉลี่ยแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของการทำนายจากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ใช้งานร่วมกับ curvature correction ด้วยเหตุนี้ประสิทธิภาพการตัดแยกขนาดของอนุภาคที่ทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนใช้งานร่วมกับ curvature correction จะนำมาเปรียบเทียบกับผลการทำนายจากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM และผลการทำนายด้วยการจำลองการไหลหมุนวนขนาดใหญ่ของ Lattice-Boltzmann (Lattice-Boltzmann large-eddy simulation: LBLES) จากงานวิจัยก่อนหน้าของ Derksen [26] ซึ่งทำนายด้วยแบบจำลองวิภูภาคไม่ต่อเนื่อง (Discrete phase model: DPM) และใช้วิธีการจำลองแบบสนามการไหลแบบหยุดนิ่ง (Frozen field approach) ร่วมกับ ประสิทธิภาพการตัดแยกขนาดอนุภาคจะถูกนำเสนอในรูปแบบของกราฟประสิทธิภาพเกรด (Grade efficiency curves) แสดงดังรูปที่ 4.8 โดยรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการตัดแยกขนาดอนุภาคที่ทำนายได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ใช้งานร่วมกับ curvature correction และสามารถแสดงแนวโน้มได้ใกล้เคียงกับผลการทำนายจาก LBLES ของ Derksen [26] แม้ว่าผลการทำนายจะแสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกัน แต่ความแตกต่างเพียงเล็กน้อยของโค้งประสิทธิภาพเกรดจะนำไปสู่การทำนายค่าประสิทธิภาพโดยรวม (Overall efficiency) และขนาดตัดของอนุภาค (Cut size diameter) ที่แตกต่างกันได้ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.9

ผลการทำนายประสิทธิภาพโดยรวมและขนาดตัดของอนุภาค จากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวน RKE-CC ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.663 และ  $1.41 \times 10^{-3}$  ตามลำดับ ให้ผลการทำนายที่ใกล้เคียงกับผลจาก LBLES [26] มากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนชนิดอื่น สำหรับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM แบบจำลองความปั่นป่วนนี้ให้ผลการทำนายที่สูงกว่าแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนทุกชนิดเนื่องจากผลการทำนายอนุภาคขนาดเล็กที่ทำได้สูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ แต่มีเพียงแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวน RNGKE-CC เพียงชนิดเดียวที่สามารถให้ผลการทำนายประสิทธิภาพการตัดแยกขนาดโดยรวมที่สูงกว่าแบบจำลอง RSM เนื่องมาจากผลการทำนายความเร็วในแนวเส้นสัมผัสที่ทำนายได้สูงกว่าแบบจำลองความปั่นป่วนชนิดอื่น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.4(a)



รูปที่ 4.8 กราฟประสิทธิภาพเกรด (ปรับปรุงจาก Manuscript draft ของ Thongnoi et al. (POWTEC-D-24-02738))



รูปที่ 4.9 ผลการทำนายประสิทธิภาพการคัดแยกขนาดโดยรวมและขนาดตัดของอนุภาค (ปรับปรุงจาก Manuscript draft ของ Thongnoi et al. (POWTEC-D-24-02738))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการคำนวณ

อีกหนึ่งในตัวแปรสำคัญที่สามารถใช้ประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองความปั่นป่วนได้คือ เวลาในการคำนวณ (Computational time) ในงานวิจัยนี้ ประสิทธิภาพการคำนวณสัมพัทธ์ (Relative computing performance) จะถูกนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพการคำนวณของแต่ละแบบจำลองความปั่นป่วน ซึ่งจะถูกนิยามเหมือนกับในงานวิจัยก่อนหน้าของ Bumrunghthaichan [2] คืออัตราส่วนของประสิทธิภาพการคำนวณจากแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่พิจารณาต่อประสิทธิภาพการคำนวณจากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM แบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่มีการใช้งาน curvature correction จะถูกเลือกนำมาเป็นตัวเปรียบเทียบ และการจำลองทั้งหมดจะถูกคำนวณด้วยทรัพยากรการคำนวณที่เหมือนกันทั้งหมดเพื่อให้มั่นใจว่าผลการเปรียบเทียบมีความน่าเชื่อถือ ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการคำนวณของแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนจะแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพการคำนวณสัมพัทธ์ของแต่ละแบบจำลองความปั่นป่วน

แบบจำลองความปั่นป่วน	ประสิทธิภาพการคำนวณสัมพัทธ์
SA-CC	6.16
SKE-CC	5.89
RNGKE-CC	2.19
RKE-CC	5.28
SKO-CC	5.75
SSTKO-CC	4.95

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการคำนวณสัมพัทธ์ในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่ามีเพียงแบบจำลองความปั่นป่วน RNGKE-CC ที่ใช้เวลาในการคำนวณต่างจากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM เพียงแค่ 2.19 เท่า เนื่องจากแบบจำลองความปั่นป่วนนี้เป็นแบบจำลองความหนืดหมุนวนที่ใช้เวลานานในการเข้าสู่ของคำตอบ [24] ในขณะที่แบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนชนิดอื่นสามารถเร่งความเร็วในการคำนวณได้เร็วกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน RSM ได้ประมาณ 5 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความมีประสิทธิภาพในการคำนวณโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับแบบจำลองความปั่นป่วน RKE-CC ที่ให้ผลการทำนายต่างๆได้ใกล้เคียงแม่นยำกับแบบจำลองความปั่นป่วน RSM และข้อมูลผลการทดลองของ Hoekstra [4]

## บทที่ 5

# สรุปผลการจำลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการจำลอง

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการทำนายการไหลเฉลี่ยและปริมาณความปั่นป่วนภายในเครื่องแยกแก๊สไซโคลนด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวน เพื่อประเมินศักยภาพและความแม่นยำที่สามารถคำนวณได้ โดยแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนเหล่านี้จะถูกใช้งานร่วมกับขนาดกริดการคำนวณและระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังศึกษาถึงอิทธิพลของการใช้งาน curvature correction ว่าส่งผลต่อความแม่นยำในการทำนายการไหลเฉลี่ยและปริมาณความปั่นป่วนอย่างไร

ผลการศึกษาพบว่าเมื่อกริดการคำนวณและระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่เหมาะสมถูกใช้ร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวน ผลการทำนายการไหลเฉลี่ยที่ได้มีความแม่นยำมากกว่าผลการทำนายที่ใช้แบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนจากงานวิจัยก่อนหน้า ที่มีความพยายามจะใช้แบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนในการทำนาย และจากผลการศึกษาทำให้พบว่านอกจากขนาดกริดการคำนวณและระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่เหมาะสมกับการจำลองแล้ว การใช้งาน curvature correction ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความแม่นยำในการทำนายค่าต่างๆของแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวน และเมื่อนำผลการทำนายทั้งหมดมาประเมินพร้อมกัน พบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนที่ใช้งานร่วมกับ curvature correction และให้ผลการทำนายที่แม่นยำสอดคล้องกับผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองความปั่นป่วน RSM มากที่สุดคือ แบบจำลองความปั่นป่วน RKE โดยนอกจากความแม่นยำที่สามารถทำนายได้แล้วแบบจำลองความปั่นป่วน RKE ยังสามารถให้ระยะเวลาในการคำนวณที่น้อยกว่าแบบจำลอง RSM ไปได้มากถึงกว่า 5 เท่า แต่สำหรับผลการทำนายพลังงานจลน์ความปั่นป่วนแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนมีข้อจำกัดในการทำนายพารามิเตอร์นี้ แม้ว่าแบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนจะใช้งานร่วมกับ curvature correction ก็ตามแต่ก็ไม่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้แบบจำลองความปั่นป่วนความหนืดหมุนวนทำนายค่าพลังงานจลน์ความปั่นป่วนให้มีความแม่นยำเทียบเท่ากับแบบจำลองความปั่นป่วน RSM ได้เนื่องจากข้อจำกัดในการทำนาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ณ ตำแหน่ง  $z = 0.75D_b$  ของเครื่องแยกแก๊สไฮโคลน แบบจำลองความปั่นป่วน RNGKE ที่ใช้งานร่วมกับ curvature correction ไม่สามารถรักษาลักษณะโพรไฟล์การไหลของความเร็วในแนวแกนได้ โดยคาดว่าเป็นผลมาจากค่าคงที่ปรับแก้การหมุนของการไหลของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา (0.07) หากต้องการความแม่นยำของการทำนายความเร็วในแนวแกนที่มากขึ้นของแบบจำลองความปั่นป่วนนี้ ซึ่งต้องศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์นี้ต่อการทำนายสนามการไหลเฉลี่ยและความปั่นป่วนในเครื่องแยกแก๊สไฮโคลนเพิ่มขึ้น และในการจำลองการไหลด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน SA และ SSTKO อาจต้องมีการใช้ขนาดกริดแรกใกล้ผนังที่มีขนาดเล็กกว่าในวิทยานิพนธ์นี้ในการศึกษาปัญหาการไหลของอุปกรณ์คัดแยกแบบแก๊สไฮโคลน เนื่องจากข้อจำกัดของแบบจำลองความปั่นป่วนที่ไม่สามารถใช้ฟังก์ชันการคำนวณใกล้ผนัง (Near wall-treatment function) มาช่วยในการคำนวณเพื่อให้ได้คำตอบที่แม่นยำและประหยัดจำนวนกริดได้

สำหรับข้อสรุปของผลการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ ที่บ่งชี้ว่าแบบจำลองความปั่นป่วน RKE ที่ใช้งานร่วมกับ curvature correction สามารถให้ผลการทำนายการไหลเฉลี่ยที่แม่นยำสำหรับอุปกรณ์คัดแยกแบบแก๊สไฮโคลน ไม่สามารถใช้เป็นข้อสรุปแบบที่ใช้ได้กับทุกๆ ปัญหาการไหล (Universal solution) สำหรับปัญหาการไหลของอุปกรณ์คัดแยกแบบแก๊สไฮโคลนที่มีขนาดหรือรูปทรงที่ต่างกันออกไปได้ แต่สามารถใช้ข้อสรุปและวิธีการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้เป็นแนวทางในการศึกษาปัญหาการไหลของอุปกรณ์คัดแยกแบบแก๊สไฮโคลนที่มีขนาดหรือรูปทรงต่างๆในอนาคตต่อไปได้

## เอกสารอ้างอิง

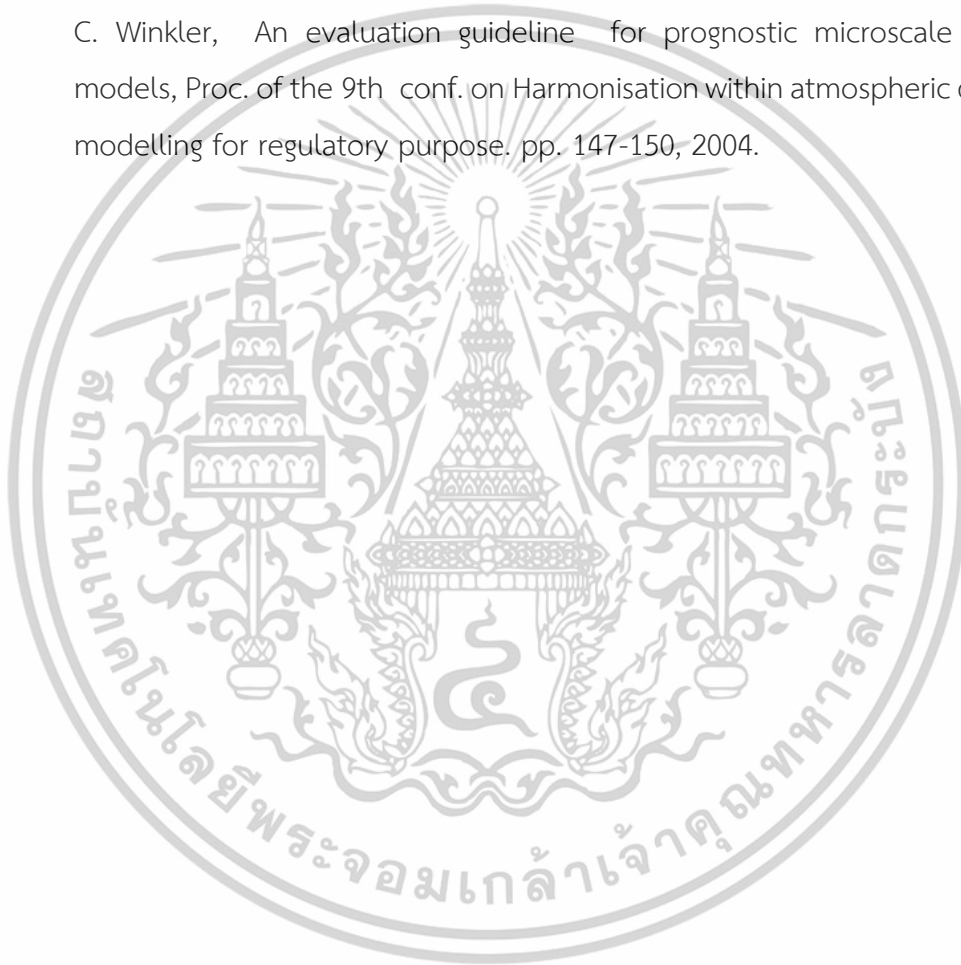
- [1] E. Bumrunghaichaichan, "How can the appropriate near-wall grid size for gas cyclone CFD simulation be estimated?," *Powder Technology*, vol. 396, pp. 327-344, 2022/01/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.10.031>.
- [2] E. Bumrunghaichaichan, "A note of caution on numerical scheme selection: Evidence from cyclone separator CFD simulations with appropriate near-wall grid sizes," *Powder Technology*, vol. 427, 2023, doi: [10.1016/j.powtec.2023.118713](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118713).
- [3] E. Bumrunghaichaichan, "Computational fluid dynamics simulations of pump-around jet mixing tanks," Ph.D., King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2019.
- [4] A. J. Hoekstra, "Gas Flow Field and Collection Efficiency of Cyclone Separators," Ph.D., Delft University of Technology 2000.
- [5] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An introduction to Computational Fluid Dynamics*. 2007.
- [6] J. D. Anderson, *Computational fluid dynamics the basics with applications*. 1995.
- [7] Idealsimulation "Turbulence models in CFD." [Online] Available: <https://www.idealsimulations.com/resources/turbulence-models-in-cfd/> (accessed 20 Jan 2025, 2025).
- [8] S. Wattananusorn, *Fluid mechanics*. 2018.
- [9] A. Inc., *ANSYS Fluent Theory Guide 15*. 2013.
- [10] P. R. Spalart and M. L. Shur, "On the sensitization of turbulence models to rotation and curvature," *Aerospace Sci. Tech.*, vol. 1, no. 5, pp. 297-302, 1997.
- [11] L. Wang, "Theoretical study of cyclone design," Ph.D., Texas A&M University, 2004.
- [12] J. Gimbun, T. G. Chuah, A. Fakhru'l-Razi, and T. S. Y. Choong, "The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a CFD study," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 44, no. 1, pp. 7-12, 2005, doi: [10.1016/j.cep.2004.03.005](https://doi.org/10.1016/j.cep.2004.03.005).
- [13] M. Bohnet, "Influence of the gas temperature on the separation efficiency of aerocyclones," *Chem. Eng. Process.*, vol. 34, pp. 151-156, 1995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] N. Sylvia, Yunardi, I. Maulana, Elwina, Wusnah, and Y. Bindar, "Analysis of turbulence models performance for the predictions of flow yield, efficiency, and pressure drop of a gas-solid cyclone separator," *Proceedings of The Annual International Conference Syiah Kuala University*, 2011.
- [15] B. Wang, D. L. Xu, K. W. Chu, and A. B. Yu, "Numerical study of gas–solid flow in a cyclone separator," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 30, no. 11, pp. 1326-1342, 2006, doi: 10.1016/j.apm.2006.03.011.
- [16] G. Santillo, A. Rapisarda, A. Desando, E. Campagnoli, P. di Torino, and D. Energia, "Santillo et al. - Proc. of the International CAE Conference 2015.pdf>," presented at the International CAE Conference, 2015.
- [17] S. Obermair, J. Woisetschlager, and G. Staudinger, "Investigation of the Flow Pattern in Different Dust Outlet Geometries of a Gas Cyclone by Laser Doppler Anemometry," *Powder Technology*, vol. 138, pp. 239-251, 2003.
- [18] G. Gronald and J. J. Derksen, "Simulating turbulent swirling flow in a gas cyclone: A comparison of various modeling approaches," *Powder Technology*, vol. 205, no. 1-3, pp. 160-171, 2011, doi: 10.1016/j.powtec.2010.09.007.
- [19] M. Wasilewski, S. Anweiler, and M. Masiukiewicz, "Characterization of multiphase gas–solid flow and accuracy of turbulence models for lower stage cyclones used in suspension preheaters," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 27, no. 7, pp. 1618-1629, 2019, doi: 10.1016/j.cjche.2018.11.019.
- [20] T. G. Chuah, J. Gimbun, and T. S. Y. Choong, "A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics," *Powder Technology*, vol. 162, no. 2, pp. 126-132, 2006, doi: 10.1016/j.powtec.2005.12.010.
- [21] P. Thongnoi, W. Chandra-ambhorn, B. Chalerm-sinsuwan, S. Wattananusorn, P. Wongpromrat, and E. Bumrunghthaichaichan, "RANS equation-based gas cyclone separator CFD simulation: an appropriate time step size," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 113, pp. 649-654, 2024, doi: 10.3303/CET24113109.
- [22] F. M. White, "Fluid Mechanics." New York: McGraw-Hill Education, 2016.
- [23] A. Inc., *Introduction to ANSYS Fluent 13.0 - Lecture 6 Turbulence modeling: Release 13.0*. USA, 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] A. Inc., "Introduction to ANSYS Fluent - Lecture 7 Turbulence modeling: Release 15.0, USA, 2014," 2014.
- [25] J. C. R. Hunt, A. A. Wray, and P. Moin, "Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows," *Proceedings of the Summer Program*, pp. 193-208, 1988.
- [26] J. J. Derksen, "Separation performance predictions of a Stairmand high-efficiency cyclone," *AIChE J.*, vol. 49, no. 6, pp. 1359-1371, 2003, doi: <https://doi.org/10.1002/aic.690490603>.
- [27] K. H. Schlünzen, W. Baechlin, H. Brünger, J. Eichhorn, D. Grawe, R. Schenk, and C. Winkler, "An evaluation guideline for prognostic microscale windfield models," Proc. of the 9th conf. on Harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purpose. pp. 147-150, 2004.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายปิยะวุฒิ ทองน้อย  
วัน เดือน ปีเกิด 10 มีนาคม 2543 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร  
ที่อยู่ 42/43 ม. The Plant ซ.วิภาวดี 41 แยก 1 แขวงสนามบิน เขตดอนเมือง  
จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10210

ประวัติการศึกษา:

2565 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย:

2564 นักศึกษาฝึกงาน ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) สังกัดทีมวิจัย  
นวัตกรรมเคลือบนาโน กลุ่มวิจัยวัสดุผสมและการเคลือบนาโน ระยะเวลา  
2 เดือน

2567 ตีพิมพ์ผลงานวิจัยกับวารสารทางวิชาการระดับนานาชาติ Chemical  
Engineering Transactions ในหัวข้อ RANS equation-based gas  
cyclone separator CFD simulation: An appropriate time step  
size doi: 10.3303/CET24113109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้