

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของไฮโดรไซโคลน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2563
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS SIMULATION OF HYDROCYCLONE



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FUFILLMENT OF THE REQUIREMENTS

FOR THE DEGREE OF BECHELOR OF CHEMICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING, SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



COPYRIGHT 2020

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของไฮโดรไซโคลน
โดย นางสาวกมลลักษณ์ แสงอร่าม
นายกวินท์ ศรีสุลัย
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์
ปริญญาานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์



[Signature]
(ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์)

ประธานกรรมการ

[Signature]
(รศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ)

กรรมการ

[Signature]
(ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิศรณ)

กรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญานิพนธ์เรื่อง

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของไฮโดรไซโคลน

โดย

นางสาวกมลลักษณ์ แสงอร่าม

นายกวินท์ ศรีสุลัย

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

ปริญญานิพนธ์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ไฮโดรไซโคลนเป็นหนึ่งในเครื่องแยกที่สำคัญในอุตสาหกรรมในการแยกของแข็งออกจากของเหลว หรือของเหลวออกจากของเหลวเนื่องจากการออกแบบที่เรียบง่าย และมีต้นทุนดำเนินการและการบำรุงรักษาต่ำ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อศึกษาการประมาณค่ากริดที่ผนัง (Near-wall grid) สำหรับการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ของไฮโดรไซโคลน ขนาดของกริดที่ผนังของไฮโดรไซโคลนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 75 มิลลิเมตรนี้ได้จากการประมาณขนาดของกริดที่ผนังของแก๊สไซโคลน ค่าความสูง ของกริดที่ผนังของทรงกระบอก (Barrel) กรวย (Cone) และท่อทางออกด้านบน (Vortex finder) มีค่าเท่ากับ 0.594, 0.298, และ 0.385 มิลลิเมตร ตามลำดับ อัตราการเติบโต (Growth ratio) ของกริดในแนวรัศมีและแนวแกน เท่ากับ 1.2 และ 1.6 ตามลำดับ จำนวนกริดทั้งหมดของไฮโดรไซโคลน เท่ากับ 361,472 เซลล์ สนามการไหลเฉื่อยและความปั่นป่วนสำหรับการไหลวิฤภาคภายในไฮโดรไซโคลนคำนวณโดยสมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) และแบบจำลองความปั่นป่วน Reynolds stress model (RSM) ความเร็วของน้ำขาเข้ามีค่าเท่ากับ 2.27 เมตรต่อวินาที ผลการจำลองของสนามการไหล วิฤภาคภายในไฮโดรไซโคลนถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อแสดงความสามารถของการประมาณขนาดของกริดที่ผนัง ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการประมาณค่าของกริดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำนายโปรไฟล์ความเร็ว ในแนวสัมผัสและในแนวแกนได้ดีที่บริเวณใกล้ผนังไซโคลน สำหรับบริเวณแกนกลางของไฮโดรไซโคลน โปรไฟล์ความเร็วในแนวสัมผัสและในแนวแกนที่ถูกทำนายมีค่าต่ำกว่าการทดลอง เนื่องจากไม่ได้จำลองการไหลของแกนอากาศ (Air core) บริเวณแกนกลางของไฮโดรไซโคลน จากผลการจำลองนี้สามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่า การประมาณขนาดกริดที่ผนังของไฮโดรไซโคลนนี้สามารถประยุกต์ใช้เพื่อจำลองไฮโดรไซโคลนสำหรับงานอนาคตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Report Title	Computational fluid dynamics simulation of hydrocyclone
By	Miss Kamollux Seang-aram Mr.Kawin Srisulai
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2563
Advisor	Asst. Prof. Dr. Santi Wattananusorn

Abstract

Hydrocyclones are one of the important separators in industry, to separate solid from liquid or liquid from liquid, because of a simple design, low operating and maintenance costs. The objective of this work is to study the near-wall grid estimation for computational fluid dynamics (CFD) simulation of a hydrocyclone. The near-wall grids of the hydrocyclone with a diameter of 75 mm was estimated by the near-wall grid estimation of the gas cyclone. The near-wall grid heights of barrel, cone, and vortex finder were 0.594, 0.298, and 0.385 mm, respectively. The growth ratio of grids in radial direction and axial direction were 1.2 and 1.6, respectively. The total number of grids of the hydrocyclone was 361,472 cells. The mean flow and turbulence fields were resolved by Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and Reynolds stress model (RSM), respectively. The velocity of inlet water was 2.27 m/s. The simulated single phase flow field inside the hydrocyclone was compared with the experimental results to represent the capability of near-wall grid estimation. The simulated results revealed that the near-wall grid estimation of this work well predicted the profiles of tangential velocity and axial velocity at the near cyclone wall region. For the hydrocyclone axis, the predicted tangential velocity and axial velocity profiles were lower than the experimental results because the air core at the hydrocyclone center was not simulated. According to these simulated results, it can be primarily concluded that this near-wall grid estimation of the hydrocyclone can be applied to simulate the hydrocyclone in future work.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ ที่ให้ความรู้ในด้านของทฤษฎี ไม่ว่าจะเป็นเรื่อง กลศาสตร์ของไหล หลักการทำงานของไฮโดรไซโคลน พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ รวมถึงให้คำชี้แนะในการแก้ไขปัญหาและช่วยคลายข้อสงสัยต่างๆในการวิจัยครั้งนี้ จนทำให้งานวิจัยผ่านพ้นไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ ที่ให้ความรู้ในเรื่องพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ คอยสอนการใช้โปรแกรม GAMBIT และ ANSYS FLUENT 14.5 กับการประยุกต์ในการจำลองการไหลภายในไฮโดรไซโคลน อีกทั้งยังให้คำชี้แนะในการแก้ไขปัญหา และร่วมวิเคราะห์ผลจำลองด้วย

ขอขอบพระคุณพี่และเพื่อนในห้องวิจัยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ที่คอยให้กำลังใจ และให้คำแนะนำเกี่ยวกับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยดีเสมอมา รวมทั้งเพื่อนและน้องในภาควิชาวิศวกรรมเคมีที่คอยให้กำลังใจและคอยช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่คอยอบรมสั่งสอน ให้ความรู้ และใส่ใจต่อลูกศิษย์ตลอดมา รวมทั้งบิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจตลอดการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมีที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้ จนสำเร็จจุล่ง หากมีข้อผิดพลาดประการใดในงานวิจัยนี้ ผู้จัดทำขอน้อมรับ และขออภัยมา ณ ที่นี้

กมลลักษณ์ แสงอร่าม

กวินท์ ศรีสุลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ.....	VI
สารบัญตาราง	VII
สัญลักษณ์	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamic: CFD)	3
2.2 สมการควบคุม (Governing equations).....	5
2.3 การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow).....	8
2.4 ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone).....	9
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	13
3.1 การสร้างแบบจำลองของไฮโดรไซโคลนและการแบ่งโดเมน.....	13
3.2 การจำลองการไหลในไฮโดรไซโคลน.....	14
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	19
4.1 ผลแบบจำลอง 3 มิติของไฮโดรไซโคลน	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นแต่ที่ มีมติเห็นชอบล่วงหน้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาหาผลเฉลยกริดอิสระ.....	21
4.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองของ Hsieh.....	21
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	22
5.1 สรุปผลการจำลอง.....	22
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	23
เอกสารอ้างอิง.....	24
ภาคผนวก.....	26
ภาคผนวก ก ขั้นตอนการจำลองไฮโดรไฮโคลนด้วยคำสั่งตัวอักษร.....	27
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5.....	59



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational Use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การทำงานของเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	4
2.2 ไฮโดรไฮโคลน	9
3.1 ขนาดของไฮโดรไฮโคลนที่ใช้ในงานวิจัยนี้	14
3.2 แบบจำลอง 3 มิติของไฮโดรไฮโคลนที่บรรจุกรด.....	16
4.1 แบบจำลอง 3 มิติของไฮโดรไฮโคลนแบบโปร่งใสจากโปรแกรม GAMBIT.....	19
4.2 แบบจำลอง 3 มิติของไฮโดรไฮโคลนแบบทึบแสงจากโปรแกรม GAMBIT.....	20
4.3 แบบจำลอง 3 มิติของไฮโดรไฮโคลนที่แบ่งโดเมน	20
4.4 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองงานวิจัยของ Hsieh ของรูปแบบความเร็วในแนวสัมผัส.....	22
4.5 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองงานวิจัยของ Hsieh ของรูปแบบความเร็วในแนวแกน (ก) ที่ระนาบ $x = 0$ และ (ข) ที่ระนาบ $y = 0$	22
4.6 กราฟเปรียบเทียบความเร็วในแนวสัมผัสทั้ง 4 ช่วงเวลา.....	23
4.7 กราฟเปรียบเทียบความเร็วในแนวแกนทั้ง 4 ช่วงเวลา (ก) ที่ระนาบ $x = 0$ และ (ข) ที่ระนาบ $y = 0$	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ขนาดของไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้.....	13
3.2 สมบัติของของไหล.....	14
3.3 การกำหนดสภาวะขอบเขตของแบบจำลอง.....	15
3.4 การตั้งค่าแบบจำลอง.....	15
3.5 การตั้งค่ารูปแบบระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สัญลักษณ์

x	ระยะตามแนวแกน x (m)
y	ระยะตามแนวแกน y (m)
z	ระยะตามแนวแกน z (m)
t	เวลา (s)
u	ความเร็วแนวแกน x (m/s)
v	ความเร็วแนวแกน y (m/s)
w	ความเร็วแนวแกน z (m/s)
U	เวกเตอร์ความเร็ว (m/s)
S_M	แรงภายนอกที่กระทำต่อปริมาตรของของไหล
p	ความดัน (Pa)
τ	ความเค้นเฉือน (Pa)
ρ	ความหนาแน่น (kg/m^3)
μ	สัมประสิทธิ์ความหนืด ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)
λ	สัมประสิทธิ์ความหนืดอันดับสอง ($\text{kg/m}\cdot\text{s}^2$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational VIIIe only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมน้ำมัน อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น โดยไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลว แยกของเหลวออกจากของเหลว โดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) เป็นแรงขับเคลื่อน (Driving force) [1] ปัจจัยที่ทำให้ไฮโดรไซโคลนเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม คือ เป็นอุปกรณ์ที่สามารถติดตั้งได้ง่าย ใช้พื้นที่ในการติดตั้งอุปกรณ์น้อย มีต้นทุนในการดำเนินการและมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อย สามารถออกแบบอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับช่วงขนาดของอนุภาคที่จะทำการแยกได้ รวมทั้งไฮโดรไซโคลนมีประสิทธิภาพในการแยกของผสมสูง [2]

โดยทั่วไปการศึกษาเกี่ยวกับการไหลในไฮโดรไซโคลนสามารถทำได้ 3 วิธี คือ วิธีเชิงทฤษฎี วิธีเชิงทดลอง และวิธีเชิงคำนวณโดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD) ในปัจจุบันการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นที่นิยมในการศึกษาพลศาสตร์ของไหลในการศึกษาไฮโดรไซโคลน [3] กล่าวคือนักวิจัยจำนวนมากเลือกใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลในไฮโดรไซโคลน เนื่องจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถศึกษาไฮโดรไซโคลนได้หลายรูปร่าง หลายขนาดภายในระยะเวลาอันสั้นและประหยัดค่าใช้จ่ายในการศึกษานอกจากนี้ ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองแสดงแนวโน้มเดียวกับการทดลอง

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันมีนักวิจัยจำนวนมากศึกษาการไหลภายในไฮโดรไซโคลนด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยงานวิจัยส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกไฮโดรไซโคลนโดยการปรับปรุงรูปร่างของไฮโดรไซโคลน แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างกริดภายในไซโคลนยังจำกัดอยู่ในวงแคบทำให้ผู้ใช้งานเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีความลำบากในการสร้างกริดภายในไฮโดรไซโคลน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำการประมาณขนาดของกริดที่ผนังที่ถูกพัฒนามาจากแก๊สไซโคลนมาทดสอบกับไฮโดรไซโคลน เพื่อให้ได้วิธีการหาขนาดของกริดที่เหมาะสมสำหรับการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณภายในไฮโดรไซโคลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อหาวิธีการประมาณขนาดของกริดที่ผนังภายในไฮโดรไซโคลนโดยการประยุกต์ใช้การประมาณขนาดของกริดที่ผนังที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากแก๊สไซโคลน

1.3 ขอบเขตการของโครงการงาน

สร้างไฮโดรไซโคลนและกริดด้วยโปรแกรม GAMBIT และจำลองการไหลภายในไฮโดรไซโคลนด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการงาน

- 1.4.1 ได้รับความรู้และมีความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
- 1.4.2 สามารถใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อจำลองการไหลภายในไฮโดรไซโคลนได้ถูกต้อง
- 1.4.3 ได้วิธีประมาณขนาดของกริดที่ผนังของไฮโดรไซโคลน เพื่อนำไปใช้ในงานวิจัยในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamic: CFD)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics) หรือ ซีเอฟดี คือการวิเคราะห์ระบบที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล การถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวล โดยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) และระเบียบวิธี (Algorithm) ซึ่งในปัจจุบันเทคนิคนี้เป็นที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านอุตสาหกรรม เนื่องจากมีต้นทุนในการศึกษาต่ำและสามารถใช้ในการศึกษาระบบที่มีความอันตรายสูงได้

โดยทั่วไปหลักการทำงานของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre-Processor) กระบวนการคำนวณ (Solver) และกระบวนการหลังการคำนวณ (Post-Processor) ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

2.1.1 กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre-Processor)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนก่อนการคำนวณปัญหาการไหล โดยเป็นขั้นตอนของการป้อนข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการคำนวณให้กับโปรแกรม เช่น การสร้างโดเมนการคำนวณ การสร้างเมช การเลือกสมการควบคุมหรือแบบจำลอง การกำหนดคุณสมบัติของไหล การกำหนดสภาวะขอบเขต เป็นต้น [3]

2.1.2 กระบวนการคำนวณ (Solver)

ในปัจจุบันมีเทคนิคการคำนวณเชิงตัวเลขจำนวนมาก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมีกระบวนการคำนวณที่สำคัญอยู่ 3 รูปแบบ ได้แก่ วิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference method) วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์หรือวิธีชิ้นส่วนสืบเนื่อง (Finite Element method) และวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume method) ซึ่งพื้นฐานการคำนวณมีขั้นตอนดังนี้

2.1.2.1 ประมาณค่าตัวแปรการไหลที่ไม่ทราบค่าด้วยฟังก์ชันอย่างง่าย

2.1.2.2 เปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation) เป็นสมการพีชคณิต ด้วยวิธีเชิงตัวเลข

2.1.2.3 แก้ปัญหาสมการพีชคณิต

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีปริมาตรสืบเนื่อง โดยขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลขของวิธีนี้ประกอบไปด้วย

2.1.2.3.1 แบ่งโดเมนการคำนวณเป็นปริมาตรควบคุมขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปัญหา

2.1.2.3.2 อินทริเกรทสมการควบคุมของการไหลทุกปริมาณควบคุมภายใต้ขอบเขตของ

2.1.2.3.3 เปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้เป็นสมการพีชคณิตด้วยวิธีเชิงตัวเลข

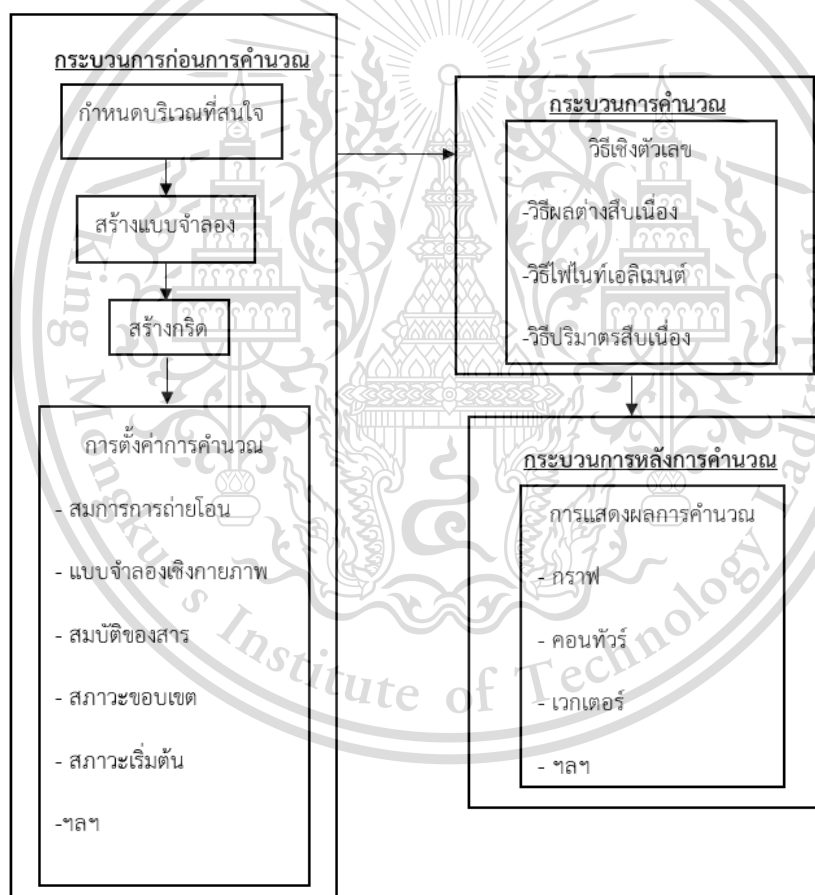
2.1.2.3.4 หาผลเฉลยของสมการพีชคณิตโดยวิธีการกระทำซ้ำ [3]

2.1.3 กระบวนการหลังคำนวณ (Post-Processor)

เป็นการแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งผลลัพธ์เหล่านี้สามารถแสดงในรูปแบบที่แตกต่างกัน เช่น การแสดงรูปทรงโดเมนและกริด กราฟ เวกเตอร์ คอนทัวร์ เป็นต้น

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นการทำงานของโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถสรุปได้

ดังรูปที่ 1 [3]



รูปที่ 2.1 การทำงานของเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2 สมการควบคุม (Governing equations)

ปรากฏการณ์การไหลของของไหลถูกควบคุมด้วยกฎการอนุรักษ์ทางฟิสิกส์ 3 กฎ ได้แก่ กฎการอนุรักษ์มวล กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน กฎการอนุรักษ์พลังงาน จากกฎทางฟิสิกส์เหล่านี้สามารถเขียนเป็นสมการควบคุมได้ดังนี้

2.2.1 สมการการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equation)

กฎการอนุรักษ์มวลกล่าวว่า “มวลไม่สามารถสร้างหรือทำลายได้” ดังนั้น อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในของไหลเท่ากับอัตราการไหลของมวลสุทธิที่เข้าสู่ของไหล [4] ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2-1ก)$$

หรือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (2-2ก)$$

โดยที่

- ρ คือความหนาแน่น (density)
- t คือเวลา (time)
- \mathbf{U} คือเวกเตอร์ความเร็ว (velocity vector)

เรียกสมการที่ (2-1) ว่าสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) สำหรับกรณีของของไหลอัดตัวไม่ได้ (incompressible fluid) ซึ่งความหนาแน่นของของไหลมีค่าคงที่ ดังนั้นสมการที่ (2-1) สามารถลดรูปได้เป็น

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2-2)$$

เรียกสมการที่ (2-2) ว่าสมการความต่อเนื่องสำหรับของไหลอัดตัวไม่ได้ [5]

2.2.2 สมการโมเมนตัม (Momentum equations)

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันที่กล่าวว่า “แรงเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม” สามารถเขียนสมการโมเมนตัมได้ดังนี้ [6]

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2-3ก)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zy})}{\partial z} + S_{My} \quad (2-3ข)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial(\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (2-3ค)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยที่	p	คือความดัน (pressure)
	τ	คือความเค้นเฉือน (shear stress)
	S_M	คือแรงภายนอกที่กระทำต่อปริมาตรของของไหล เช่น แรงโน้มถ่วง แรงทางแม่เหล็ก ฯลฯ

เรียกสมการที่ (2-3) ว่าสมการโมเมนตัมในรูปแบบอนุรักษณ์ (Momentum equations in conservation form)[7]

2.2.3 สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equations)

ไอแซคนิวตัน กล่าวว่า “แรงเค้นเฉือนในของไหลแปรผันตามอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด (เกรเดียนท์ของความเร็ว)” เรียกของไหลเหล่านี้ว่าของไหลแบบนิวตันเนียน (Newtonian fluids) และในปี ค.ศ.1845 สโตกส์พบว่า [3]

$$\tau_{xx} = \lambda(\nabla \cdot U) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2-4ก)$$

$$\tau_{yy} = \lambda(\nabla \cdot U) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2-4ข)$$

$$\tau_{zz} = \lambda(\nabla \cdot U) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2-4ค)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2-4ง)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2-4จ)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2-4ฉ)$$

โดยที่ μ คือสัมประสิทธิ์ความหนืด (Viscosity coefficient)

λ คือสัมประสิทธิ์ความหนืดอันดับสอง (Second viscosity coefficient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 สโตกส์กำหนดสมมติฐานว่า ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu \quad (2-5)$$

ถึงแม้ว่าสมมติฐานของสโตกส์ยังไม่ได้รับการพิสูจน์ แต่อย่างไรก็ตาม สมการที่ (2-5) ยังเป็นที่นิยมใช้มาจนถึงปัจจุบัน [8]

เมื่อแทนสมการ (2-4) ลงในสมการโมเมนตัมในรูปแบบอนุพันธ์ (2-3) จะได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(\nabla \cdot U) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + S_{Mx} \end{aligned} \quad (2-6ก)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(\nabla \cdot U) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + S_{My} \end{aligned} \quad (2-6ข)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(\nabla \cdot U) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right] + S_{Mz} \end{aligned} \quad (2-6ค)$$

เรียกสมการ (2-6) ว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์ในรูปแบบอนุพันธ์ (Navier-Stokes equations in conservation form)

เมื่อแทนเทอมแรงเค้นเฉือนเนื่องจากความหนืด (Viscous stress) และจัดรูปใหม่จะได้สมการนาเวียร์-สโตกส์เป็น [8]

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla \cdot u) + S_{Mx} \quad (2-7ก)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla \cdot v) + S_{My} \quad (2-7ข)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla \cdot w) + S_{Mz} \quad (2-7ค)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยทั่วไปแล้วสมการนาเวียร์-สโตกส์จะประกอบด้วยสมการความต่อเนื่องและสมการโมเมนตัม 3 สมการ

2.3 การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

โดยทั่วไปแล้วรูปแบบการไหลจะมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ แบบราบเรียบ (Laminar) แบบทรานซิชัน (Transition) และแบบปั่นป่วน (Turbulent) โดยรูปแบบการไหลจะถูกจำแนกโดยการพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างแรงหนืดและแรงเฉื่อย โดยผู้ริเริ่มการใช้อัตราส่วนนี้คือ Stokes ในปีค.ศ. 1851 [9] อย่างไรก็ตาม Sommerfeld เรียกชื่ออัตราส่วนไร้หน่วยนี้ว่า “ตัวเลขเรย์โนลด์” (Reynolds number) เนื่องจากถูกใช้บ่อย โดยเรย์โนลด์ ดังนั้นตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) จึงถูกนิยามมาจากแรงเฉื่อย ($\rho v_{avg}^2 L_c^2$) ต่อแรงหนืด ($\mu v_{avg} L_c$) ในขณะที่ v_{avg} คือค่าความเร็วเฉลี่ย μ คือ ค่าความหนืดจลศาสตร์ และ L_c คือ ความยาวคุณลักษณะ ในการทดลองการไหลของของไหล การไหลของของไหลด้วยค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ต่ำกว่าค่าวิกฤติตัวเลขเรย์โนลด์ (Re_{crit}) จะถูกเรียกว่า “การไหลแบบราบเรียบ” (Laminar Flow) โดยการไหลแบบราบเรียบนี้สถานะของไหลจะไหลอย่างเป็นระเบียบ

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของระบบจะสูงกว่าค่าวิกฤติ เป็นการไหลที่ไม่เป็นระเบียบ รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของคุณสมบัติการไหล (สภาวะไม่คงตัว) เกิดการผสมอย่างรวดเร็วเนื่องจากการแพร่ การไหลในสามมิติ โครงสร้างการไหลแบบหมุน และมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูง (ไม่ใช่สำหรับทุกกรณีของการไหล) โดยทั่วไปสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนพลังงานจลน์จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนเนื่องจากแรงเค้นเฉือนของความหนืด โดยกระบวนการนี้ถูกเรียกว่า “การสลายตัว” (Dissipative) ลักษณะที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของการไหลแบบปั่นป่วน คือ ความไม่ปกติ (Irregularity) ซึ่งจะทำให้การแก้ปัญหาคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนทำได้ยาก ดังนั้นวิธีการทางสถิติจึงมักถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายความปั่นป่วนของของไหล

ในการแก้ปัญหาคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนมีวิธีโดยทั่วไปอยู่ 3 วิธี วิธีแรก คือ การจำลองเชิงตัวเลขโดยตรง (Direct numerical simulation, DNS) เป็นการแก้ปัญหาคำนวณเกี่ยวกับการหมุนแบบปั่นป่วนทั้งหมดโดยตรง อย่างไรก็ตามการแก้ปัญหาคำนวณด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ในการคำนวณที่มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีกริดขนาดเล็ก เช่น ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ ดังนั้นเพื่อลดทรัพยากรที่ใช้ในการคำนวณ การหมุนวนขนาดใหญ่เท่านั้นที่ถูกคำนวณโดยตรง ในขณะที่การหมุนวนขนาดเล็กจะใช้แบบจำลองในการคำนวณ วิธีที่สองนี้เรียกว่า “การจำลองแบบหมุนวนขนาดใหญ่” (large eddy simulation, LES) แต่อย่างไรก็ตาม ในเชิงวิศวกรรมค่าการไหลเฉลี่ยก็เพียงพอที่จะนำมาใช้ในการพิจารณาปรากฏการณ์การไหล ดังนั้นวิธีสุดท้ายนี้จะทำการจำลองเฉพาะคุณสมบัติการไหลเฉลี่ยของการไหล และเรียกว่า “สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS)) หรือ สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเชิงเวลา (Time-averaged Navier-Stokes equations)” [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

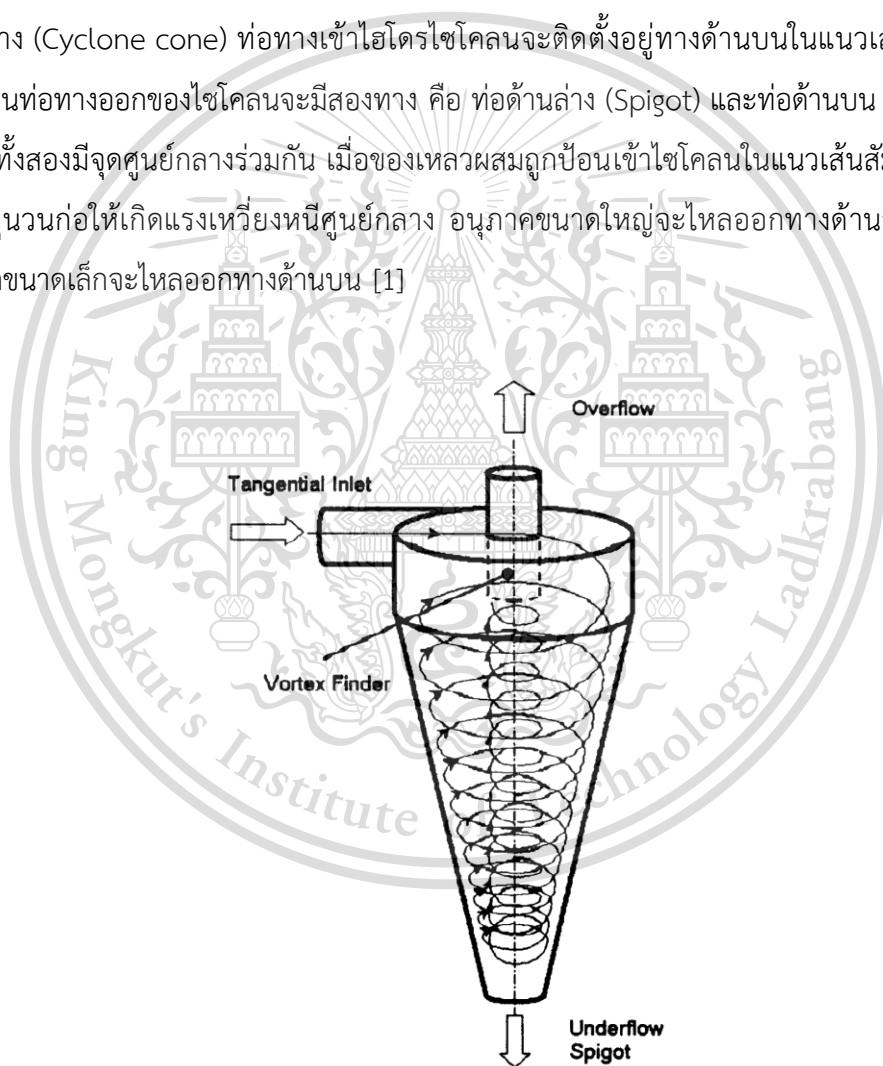
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.4 ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone)

ไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมมาตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็น อุตสาหกรรมน้ำมัน อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมอาหารและยา อุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น ซึ่งไฮโดรไซโคลนสามารถแยกของผสมระหว่างของแข็ง-ของเหลว และของเหลว-ของเหลว โดยอาศัยแรงหนีศูนย์กลาง [1]

หลักการทำงานของไฮโดรไซโคลนใช้แรงหนีศูนย์กลางหรือแรงเหวี่ยงในการแยกของผสมตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป โดยไฮโดรไซโคลนประกอบไปด้วยท่อทรงกระบอกด้านบน (Cyclone body หรือ Cyclone barrel) และท่อทรงกรวยด้านล่าง (Cyclone cone) ท่อทางเข้าไฮโดรไซโคลนจะติดตั้งอยู่ทางด้านบนในแนวเส้นสัมผัสของท่อทรงกระบอก ส่วนท่อทางออกของไซโคลนจะมีสองทาง คือ ท่อด้านล่าง (Spigot) และท่อด้านบน (Vortex finder) โดยท่อทางออกทั้งสองมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน เมื่อของเหลวผสมถูกป้อนเข้าไซโคลนในแนวเส้นสัมผัสจะทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนก่อให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง อนุภาคขนาดใหญ่จะไหลออกทางด้านล่างของไซโคลน ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กจะไหลออกทางด้านบน [1]



รูปที่ 2.2 ไฮโดรไซโคลน [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.4.1 การใช้งานของไฮโดรไซโคลน [2]

2.4.1.1 ใช้แยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลว เช่น

2.4.1.1.1 การแยกอนุภาคของแข็งออกจากน้ำมันในกระบวนการผลิตน้ำมัน

2.4.1.1.2 การแยกอนุภาคแข็งออกจากน้ำแป้ง

2.4.1.1.3 การแยกอนุภาคของแข็งออกจากโคลนขุดเจาะ

2.4.1.1.4 การแยกสินแร่ออกจากสารละลายแขวนลอยในกระบวนการแต่งแร่

2.4.1.2 ใช้เพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคของแข็งให้สูงขึ้น และการทำให้ของไหลใสขึ้น ได้แก่

2.4.1.2.1 การทำให้สารละลายแขวนลอยมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นก่อนจะส่งไปเข้ากระบวนการกำจัดของเหลว (Deliquoring) เช่น การผลิตโพลีเมอร์ ถ่านหิน และยูเรีย

2.4.1.2.2 การทำให้สารละลายแขวนลอยที่ได้จากการตกผลึกมีความเข้มข้นสูงขึ้น เช่น อุตสาหกรรมการผลิตกรดอะดิปิก (Adipic acid) และการผลิตแอมโมเนียมซัลเฟต (Ammonium sulfate)

2.4.1.2.3 ใช้ในการคัดอนุภาค ซึ่งการใช้ไฮโดรไซโคลนในงานประเภทนี้ อนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กจะติดออกไปกับของเหลวทางออกด้านบน ส่วนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าจะหลุดออกไปทางออกด้านล่าง ได้แก่

2.4.1.2.3.1 การแยกอนุภาคที่หนักและหยาบที่ไม่ต้องการออกจากเยื่อกระดาษใน อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษ

2.4.1.2.3.2 การแยกขนาดอนุภาคที่ใหญ่เกินไปออก เช่น อุตสาหกรรมการผลิตปูนขาว ดินขาวและเซรามิก

2.4.2 ข้อดีของไฮโดรไซโคลน [2]

2.4.2.1 ไฮโดรไซโคลนสามารถใช้งานได้ในกระบวนการที่หลากหลาย

2.4.2.2 ไฮโดรไซโคลนสามารถสร้างแรงเฉือนได้สูง เพื่อป้องกันการรวมตัวของสาร

2.4.2.3 ไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ง่ายต่อการใช้งาน มีราคาถูกลงและง่ายต่อการติดตั้งและการบำรุงรักษา

2.4.2.4 ขนาดของไฮโดรไซโคลนมีขนาดเล็ก ทำให้ง่ายต่อการติดตั้ง และอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนให้ออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปเผยแพร่บนด้านการค้า ระยะเวลาของสารตั้งต้นที่อยู่ในอุปกรณ์ต่ำ (Resident time) เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์อื่น เช่น การตกตะกอน ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ข้อเสียของไฮโดรไซโคลน [2]

2.4.3.1 มีขีดจำกัดในการแยกเช่น ความดันในการปฏิบัติงาน และ ขนาดตัด (Cut size) อันเนื่องมาจาก รูปทรงของไฮโดรไซโคลน

2.4.3.2 มีความไม่ยืดหยุ่นในการติดตั้งและปฏิบัติงานของไฮโดรไซโคลน

2.4.3.3 ง่ายต่อการสึกกร่อน เนื่องจากอนุภาคมีโมเมนตัมสูง

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hsieh และ Rajamani ศึกษาการพัฒนาแบบจำลองปรากฏการณ์ของไฮโดรไซโคลนสำหรับการไหลในหนึ่งวงภาค โดยศึกษารูปแบบความเร็วของน้ำภายในไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ใช้การคาดการณ์โดยการแก้สมการ Navier-Stokes ด้วยแบบจำลอง Prandtl mixing-length model ของความหนืดปั่นป่วน ให้ผลการจำลองที่มีความแม่นยำมากพอ แต่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของผลการจำลองได้ด้วยการใช้แบบจำลองปั่นป่วนที่เหมาะสมมากขึ้นเพื่อประมาณค่าความหนืดของความปั่นป่วน จำเป็นต้องใช้ระบบ LDV (Laser-Doppler velocimeter) ที่ซับซ้อนมากขึ้น [12]

Monredon และคณะได้ศึกษาแบบจำลองการไหลของของไหลภายในไฮโดรไซโคลนทั้งหมด 5 ขนาด โดยใช้เทคนิคการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งในแต่ละกรณีรูปแบบความเร็ว (Velocity profile) ของของไหลถูกวัดค่าโดยระบบ LDV พบว่าขนาดของไฮโดรไซโคลนทุกขนาดของงานวิจัยนี้สามารถทำนายค่าสนามความเร็ว (Velocity field) ได้ค่อนข้างถูกต้องและแม่นยำ ในขณะที่กราฟประสิทธิภาพการแยกขนาดสามารถทำนายได้อย่างแม่นยำจนถึงขนาดตัด (Cut size) ของไฮโดรไซโคลน เนื่องจากข้อจำกัดของสมมติฐานแบบแกนสมมาตร (Axisymmetric) และท่อทางเข้าของไฮโดรไซโคลนติดตั้งในแนวเส้นสัมผัส [13]

Mousavian และ Najafi ศึกษาการไหลของแก๊ส ของเหลว และของแข็งภายในไฮโดรไซโคลน โดยใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลข โดยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณถูกนำมาใช้จำลองสนามการไหลในไฮโดรไซโคลนเพื่อวัดประสิทธิภาพการแยก โดยมีแบบจำลองสามแบบ ได้แก่ แบบจำลอง $k - \epsilon$ แบบจำลอง Reynolds stress (RSM) ที่ไม่พิจารณาแกนกลางอากาศ (Air core) และแบบจำลอง Reynolds stress ที่ใช้ควบคู่กับแบบจำลอง Volume of fluid (VOF) เพื่อจำลองแกนกลางอากาศ จากการเปรียบเทียบการจำลองทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าแบบจำลอง RSM มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Mousavian และคณะ ได้ศึกษาอิทธิพลรูปร่างของไฮโดรไซโคลนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกโดยใช้การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ในงานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลอง 3 แบบมาศึกษา คือ แบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ แบบจำลอง Reynold stress และแบบจำลอง LES กับ VOF (Large eddy simulation with volume of fluid) พบว่าผลการจำลองในการจำแนกขนาดโดยใช้แบบจำลอง RSM และ LES ให้ผลการจำลองใกล้เคียงกันและแม่นยำกว่าแบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ และในงานวิจัยนี้ยังพบว่าสนามการไหลภายในไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดและความยาวแตกต่างกันให้ผลที่ต่างกัน [15]

Narasimha และคณะ ศึกษาการแยกขนาดอนุภาคในไฮโดรไซโคลน โดยใช้การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พบว่าในการจำลองการไหลแบบ 2 ภูมิภาค ค่าความเค้นเฉื่อยและความปั่นป่วนที่ทำนายโดยแบบจำลอง LES มีค่าสอดคล้องที่ดีกับข้อมูลที่วัดโดย LDA ในขณะที่แบบจำลอง DRSM ค่าความเค้นที่ได้มีค่าการทำนายมากเกินไป และจากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบหลายภูมิภาคของไฮโดรไซโคลน พบว่าแบบจำลอง LES นี้สามารถจำลองการกระจายขนาดอนุภาคในตำแหน่งที่อยู่ติดกับผนังของไซโคลนและในการหมุนวนอิสระ (Free vortex) ได้สอดคล้องกับผลการทดลอง [16]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองไฮโดรโซโคลนและการสร้างกริด โดยรายละเอียดของการสร้างแบบจำลองและกริดแสดงไว้ดังนี้

3.1 การสร้างแบบจำลองของไฮโดรโซโคลนและการแบ่งโดเมน

ขั้นตอนแรกของการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณคือการสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ที่เราต้องการศึกษา ในการศึกษาค้างนี้ได้สร้างแบบจำลอง 3 มิติของไฮโดรโซโคลนโดยใช้โปรแกรม GAMBIT ซึ่งอ้างอิงขนาดและสัดส่วนของไฮโดรโซโคลนมาจากงานวิจัยของ Hsieh [17] ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.1 อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ Hsieh ไม่มีการระบุขนาดของเมชหรือกริดที่เหมาะสมสำหรับการจำลองการไหลภายในไฮโดรโซโคลน [12] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการสร้างเมชหรือกริดที่เหมาะสมสำหรับไฮโดรโซโคลน เพื่อที่จะนำข้อมูลไปใช้ในการจำลองการไหลภายในไฮโดรโซโคลนในอนาคต

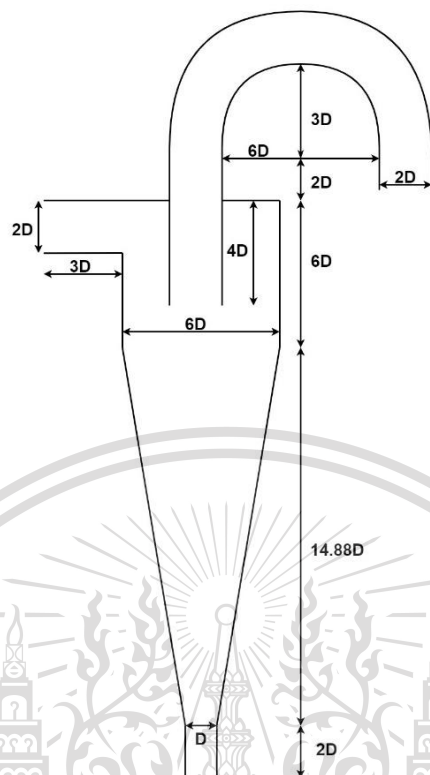
ตารางที่ 3.1 ขนาดของไฮโดรโซโคลนที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ขนาดของไฮโดรโซโคลน	มิลลิเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางของปลายท่อด้านล่าง (D)	12.5
เส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนทรงกระบอก (6D)	75
เส้นผ่านศูนย์กลางของทางเข้าของสารในแนวเส้นสัมผัส (2D)	25
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อด้านบน (2D)	25
ความยาวของทางเข้าของสารในแนวเส้นสัมผัส (3D)	37.5
ความสูงของท่อด้านบน (4D)	50
ความสูงของส่วนทรงกระบอก (6D)	75
ความสูงของส่วนทรงกรวย (14.88D)	186
ความสูงของท่อด้านล่าง (2D)	25
ความสูงเหนือส่วนทรงกระบอกของท่อด้านบน (2D)	25
รัศมีความโค้งของท่อด้านบน (3D)	37.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.1 ขนาดของไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ [16]

3.2 การจำลองการไหลในไฮโดรไซโคลน

3.2.1 กำหนดเงื่อนไขที่จำเป็นในการคำนวณเชิงตัวเลข

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการจำลองการไหลของของไหลแบบวิฏภาคเดียว และของไหลที่ไหลภายในไฮโดรไซโคลนเป็นน้ำที่มีคุณสมบัติของของไหลดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติของของไหล

สมบัติ	ค่าของตัวแปร
ความหนาแน่น (Density)	1000 kg/m ³
ความหนืด (Viscosity)	1x10 ⁻³ kg/(m.s)

เงื่อนไขและขอบเขตของแบบจำลองไฮโดรไซโคลนกำหนดให้ทางเข้าของของไหลเป็นความเร็วขาเข้า (Velocity Inlet) ทางออกเป็นปริมาณที่ของไหลไหลออก (Outflow) กำหนดให้พื้นผิวไฮโดรไซโคลนเป็นผนัง (Wall) ที่อยู่นิ่ง และกำหนดให้เงื่อนไขของแรงเฉือนของผนังเป็นแบบไม่มีการลื่นไถล (No Slip Condition)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.3 การกำหนดสภาวะขอบเขตของแบบจำลอง

ประเภท	สภาวะขอบเขต
Inlet	ชนิด Velocity-Inlet และกำหนดความเร็วขาเข้า 2.27 m/s
Outlet	ชนิด Outflow
Wall	ชนิด Wall

3.2.2 การศึกษาการประมาณขนาดของกริดที่ผนังภายในไฮโดรไซโคลนและการตั้งค่าแบบจำลอง

ในขั้นตอนนี้จะศึกษาการคำนวณการประมาณค่ากริดและการค่าสภาวะต่างๆที่ใช้ในการจำลอง ในส่วนของการประมาณค่ากริดมีวิธีการในการคำนวณเหมือนกับการคำนวณกริดในแก๊สไฮโคลนที่อ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Pechmanee [18] โดยมีการตั้งค่าแบบจำลองและรูปแบบระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข ดังตารางที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 การตั้งค่าแบบจำลอง

การตั้งค่าแบบจำลอง	แบบจำลอง
Viscous model	Reynolds Stress

ตารางที่ 3.5 การตั้งการูปแบบระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ประเภท	ระเบียบวิธีการ
Pressure-velocity Coupling Scheme	SIMPLE
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	PRESTO!
Momentum	QUICK

3.2.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองจากงานวิจัยของ Hsieh

จากผลการทดลองงานวิจัยของ Hsieh จึงได้เลือกสภาวะเงื่อนไขของไฮโดรไซโคลนชุดที่ 1 (Series number 1) โดยมีการวัดความเร็วในแนวสัมผัส (Tangential velocity) และความเร็วในแนวแกน (Axial velocity) ที่วัดความเร็วจากด้านบนสุดของแบบจำลองไฮโดรไซโคลน (Horizontal level from the roof) ที่ระยะ 60 มิลลิเมตรตามแนวแกน z โดยได้เลือกผลการทดลองงานวิจัยของ Hsieh ที่ได้กล่าวมาข้างต้นมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

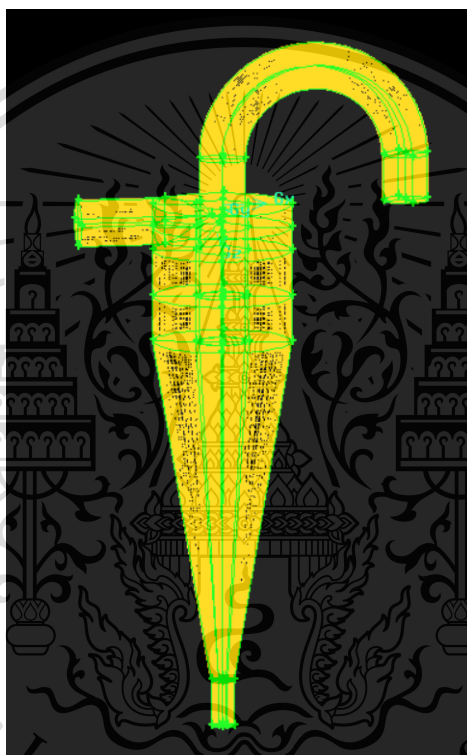
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2.4 การจำลองการไหลผ่านแบบจำลองไฮโดรไซโคลน

หลังจากทำการคำนวณหาขนาดกริดหรือเมชที่เหมาะสมแล้ว นำขนาดกริดที่คำนวณได้มาบรรจุลงในแบบจำลองไฮโดรไซโคลนที่แบ่งโดเมนเรียบร้อยแล้ว โดยกำหนดให้ความสูงของเซลล์แรกจากผนัง (First Cell Height) ในส่วนของบาร์เรล โคน และท่อออกด้านบน มีความสูงเท่ากับ 0.594, 0.298 และ 0.385 มิลลิเมตร ตามลำดับ กำหนดอัตราการเจริญเติบโตของเซลล์ (Growth Ratio) ในแนวรัศมีและแนวแกนเท่ากับ 1.2 และ 1.6 เท่า ตามลำดับ เมื่อนำกริดที่ผ่านการคำนวณมาแล้วมาบรรจุลงในแบบจำลองไฮโดรไซโคลน จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.2 แบบจำลอง 3 มิติของไฮโดรไซโคลนที่บรรจุกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

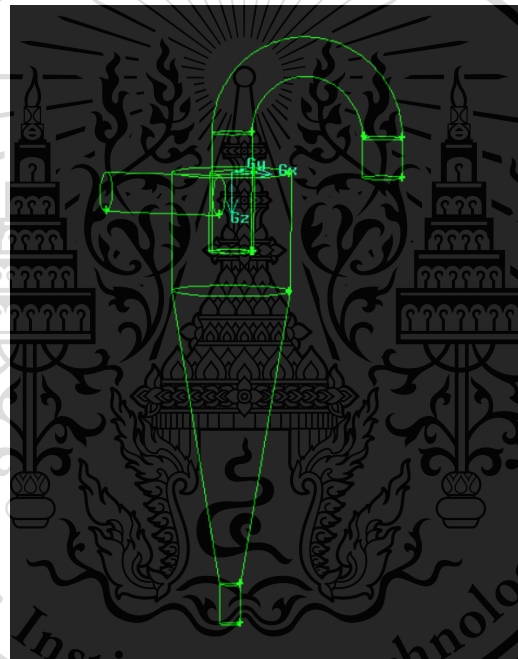
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการจำลอง

4.1 ผลแบบจำลอง 3 มิติของไฮโดรไซโคลอน

เมื่อนำขนาดและสัดส่วนที่อ้างอิงมาสร้างแบบจำลอง 3 มิติของไฮโดรไซโคลอนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ขั้นตอนต่อไปคือการแบ่งโดเมนของแบบจำลอง 3 มิติของไฮโดรไซโคลอน เพื่อที่จะนำไปสร้างเมชหรือกริดที่เหมาะสมต่อไป ในงานวิจัยนี้ต้องแบ่งโดเมนให้ได้เป็นรูปทรงหกด้าน (Hexahedral) เพื่อที่จะบรรจุกฤตที่มีลักษณะเป็นทรงหกด้านลงไปโดเมนที่ถูกแบ่งเรียบร้อยแล้วซึ่งโดเมนที่ถูกแบ่งแล้วแสดงได้ดังรูปที่ 4.3

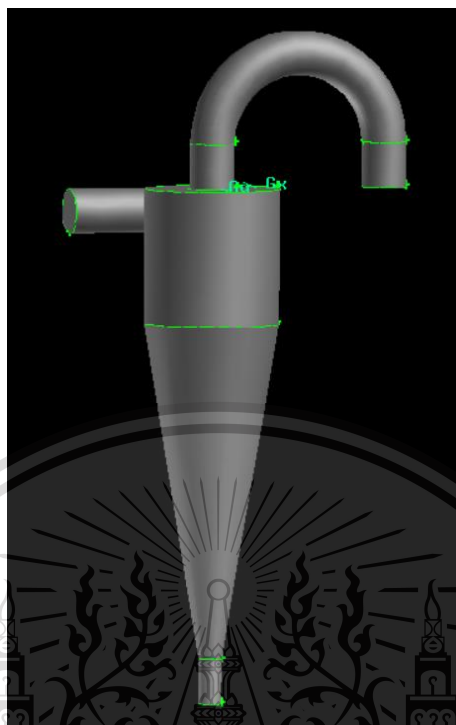


รูปที่ 4.1 แบบจำลอง 3 มิติของไฮโดรไซโคลอนแบบโปร่งใสจากโปรแกรม GAMBIT

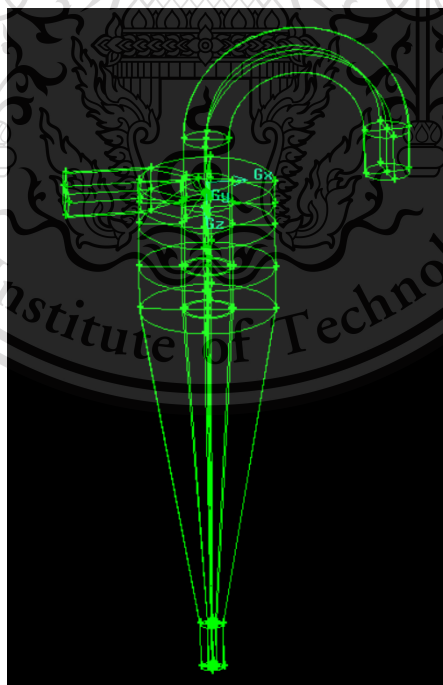
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.2 แบบจำลอง 3 มิติของไฮโดรไซโคลนแบบทึบแสงจากโปรแกรม GAMBIT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.3 แบบจำลอง 3 มิติของไฮโดรไซโคลนที่แบ่งโดเมนไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2 การศึกษาหาผลเฉลยกริดอิสระ

ขนาดและความละเอียดของกริดจะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของผลคำตอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณในโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5 ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องใช้จำนวนกริดที่เหมาะสมในการจำลอง และเนื่องจากงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาวิธีการประมาณขนาดของกริดที่ผนังภายในไฮโดรไซโคลนโดยการประยุกต์ใช้การประมาณขนาดของกริดที่ผนังที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากแก๊สไซโคลน ดังนั้นการประมาณค่ากริดจึงมีวิธีการคล้ายกับกรณีของแก๊สไซโคลน

จากงานวิจัยของ Pechmanee และคณะ[19] ได้ใช้คุณภาพของกริดเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Pechmanee ในการจำลองแก๊สไซโคลน และให้ผลการจำลองที่สอดคล้องกับการทดลอง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้คุณภาพกริดของ Pechmanee ในการจำลองไฮโดรไซโคลนเช่นกัน โดยกำหนดให้ความสูงของเซลล์แรกจากผนัง (First cell height) ในส่วนของทรงกระบอก โคน และท่อออกด้านบน มีความสูงเท่ากับ 0.594, 0.298, และ 0.385 มิลลิเมตร ตามลำดับ กำหนดอัตราการเจริญเติบโตของเซลล์ (Growth ratio) ในแนวรัศมีและแนวแกนเท่ากับ 1.2 และ 1.6 เท่า ตามลำดับ และมีจำนวนกริดทั้งหมดในไฮโดรไซโคลนเท่ากับ 361,472 เซลล์

4.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองของ Hsieh

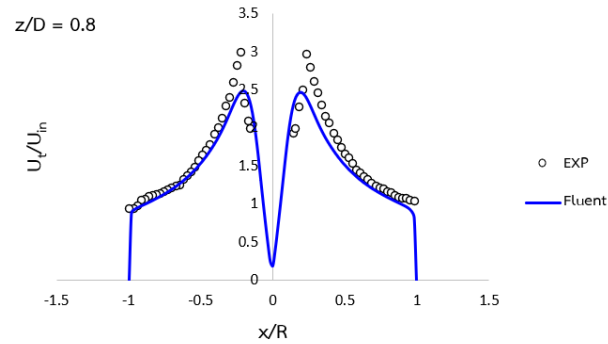
การเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5 กับผลการทดลองงานวิจัยของ Hsieh ในการวัดความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกนของแบบจำลองไฮโดรไซโคลนที่มีความเร็วขาเข้า (U_{in}) เท่ากับ 2.27 เมตรต่อวินาที และแบบจำลองที่ใช้ในโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5 คือแบบจำลอง Reynold stress (RSM) โดยกราฟที่แสดงข้างล่างนี้ แกน y ได้มีการทำความเร็วในแนวสัมผัส (U_t) และความเร็วในแนวแกน (U_z) ให้เป็นไปตามมาตรฐาน (Normalize) ที่ความเร็วขาเข้าของไฮโดรไซโคลน และแกน x คืออัตราส่วนระหว่างระยะทางจากแนวสมมาตรของไฮโดรไซโคลน (x) กับรัศมีของไฮโดรไซโคลน (R) ณ ตำแหน่ง $z/D = 0.8$ แสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5

เนื่องจากกราฟการลู่ออกของผลการจำลองไม่เป็นเส้นตรง จำเป็นต้องนำผลการจำลองที่เวลาการไหล (Flow time) ต่างๆ ที่ได้จากโปรแกรมที่มีการบันทึกอัตโนมัติมาเฉลี่ยทั้งหมด 4 เวลาการไหลคือที่เวลา 2.75 3.00 3.25 และ 3.5 วินาที ค่าเฉลี่ยของผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 หรือเส้นสีน้ำเงิน

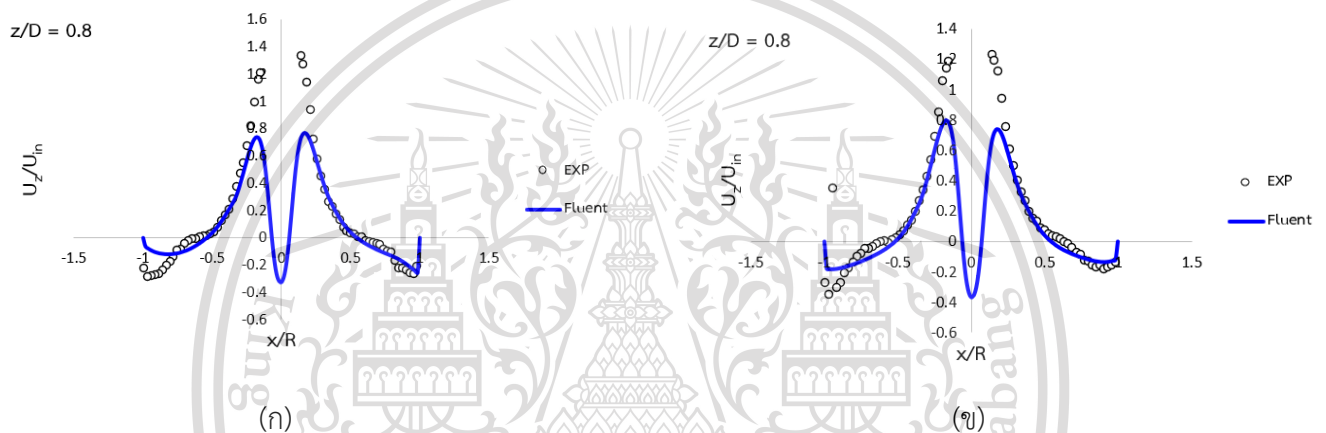
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองงานวิจัยของ Hsieh ของรูปแบบความเร็วในแนวสัมผัส



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองงานวิจัยของ Hsieh ของรูปแบบความเร็วในแนวแกน (ก) ที่ระนาบ $x = 0$ และ (ข) ที่ระนาบ $y = 0$

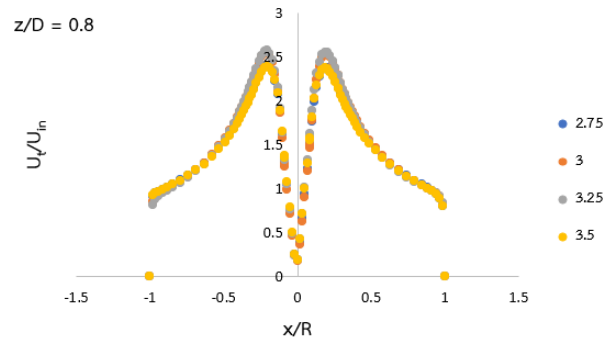
จากรูปที่ 4.4 พบว่ากราฟความเร็วในแนวเส้นสัมผัสที่ได้จากการจำลองมีค่าและแนวโน้มที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hsieh ทั้งบริเวณที่เกิดกระแสวนหลัก (Main vortex) และเกิดกระแสวนกลับ (Core vortex) หรือบริเวณภายในท่อด้านบน ในขณะที่รูปที่ 4.5 พบว่ากราฟความเร็วในแนวแกนที่ได้จากการจำลอง ทั้งระนาบ $x = 0$ และระนาบ $y = 0$ บริเวณที่เกิดกระแสวนกลับหรือบริเวณภายในท่อด้านบนค่าความเร็วจากการจำลองให้ผลที่สอดคล้องและใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Hsieh แต่บริเวณที่เกิดกระแสวนหลักมีค่าและแนวโน้มที่คลาดเคลื่อนไปจากงานวิจัยของ Hsieh เล็กน้อยซึ่งถือเป็นความคลาดเคลื่อนที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

เมื่อนำมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกันทั้ง 4 เวลาการไหล คือที่เวลา 2.75 3.00 3.25 และ 3.5 วินาที แสดงดังรูปที่ 4.6

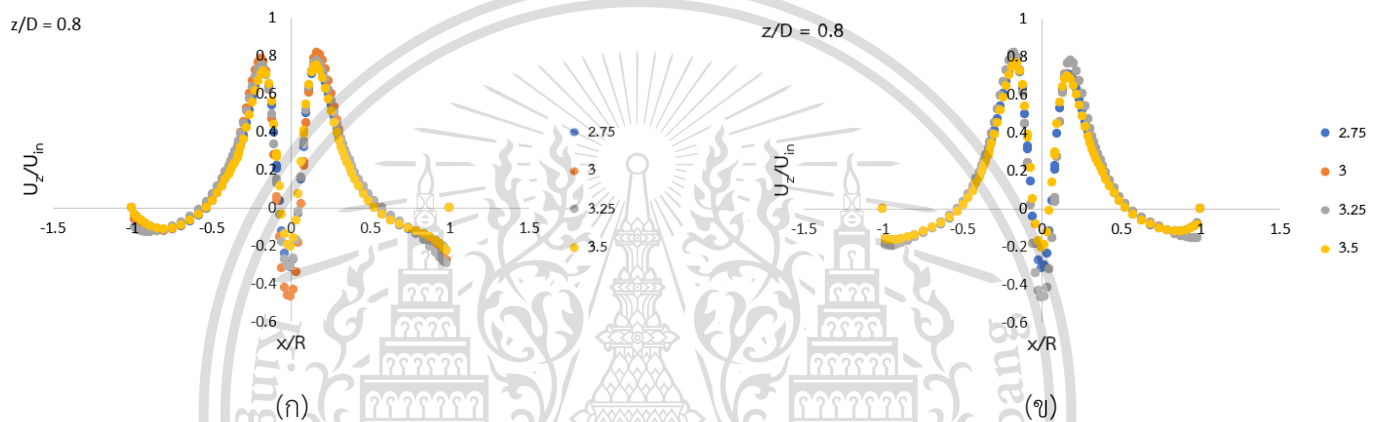
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบความเร็วในแนวสัมผัสทั้ง 4 ช่วงเวลา



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบความเร็วในแนวแกนทั้ง 4 ช่วงเวลา (ก) ที่ระนาบ $x = 0$ และ (ข) ที่ระนาบ $y = 0$

ผลการจำลองของสนามการไหลวฏภาคภายในไฮโดรไซโคลนถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อแสดงความสามารถของการประมาณขนาดของกริดที่ผนังแสดงให้เห็นว่าการประมาณค่าของกริดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำนายโปรไฟล์ความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกนได้ดีที่บริเวณใกล้ผนังไซโคลน สำหรับบริเวณแกนกลางของไฮโดรไซโคลน โปรไฟล์ความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกนที่ถูกทำนายมีค่าต่ำกว่าการทดลอง เนื่องจากการไหลของแกนอากาศ (Air core) บริเวณแกนกลางของไฮโดรไซโคลนไม่ได้ถูกจำลอง จากการศึกษาการประมาณขนาดของกริดที่มีการคำนวณค่าความสูงของเซลล์แรกจากผนังได้อย่างเหมาะสมทำให้ทราบถึงลักษณะสนามการไหลของของไหลภายในไฮโดรไซโคลนได้อย่างถูกต้อง จึงนำไปสู่การพัฒนาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการจำลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการประมาณค่ากริดหรือเมชในไฮโดรไซโคลอนที่มีการประยุกต์มาจากแก๊สไซโคลอน ซึ่งได้อ้างอิงสัดส่วนต่างๆของแบบจำลองไฮโดรไซโคลอนมาจากการวิจัยของ Hsieh การศึกษาครั้งนี้จำเป็นต้องอาศัยโปรแกรมทั้งหมด 2 โปรแกรมคือ โปรแกรม GAMBIT และโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5 โดยการสร้างแบบจำลองไฮโดรไซโคลอน 3 มิติ การแบ่งโดเมน การกำหนดขอบเขตสถานะ (Boundary conditions) มาจากการดำเนินการในโปรแกรม GAMBIT ส่วนการตั้งค่าขั้นตอนการจำลองการไหลภายในไฮโดรไซโคลอนสามารถดำเนินการได้ในโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5 เพื่อทำนายค่าความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวแกนของไฮโดรไซโคลอน

การวิจัยครั้งนี้เริ่มจากการศึกษาการสร้างแบบจำลอง 3 มิติและการแบ่งโดเมนของไฮโดรไซโคลอน โดยทั่วไปแล้วท่อทางเข้าของไซโคลอนส่วนใหญ่จะมีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมในการแบ่งโดเมนนั้นจึงทำได้ง่าย ในขณะที่งานวิจัยนี้มีพื้นที่หน้าตัดท่อทางเข้าเป็นวงกลมตามงานวิจัยของ Hsieh จึงจำเป็นต้องแบ่งโดเมนเป็นรูปทรงหกด้านเพื่อที่จะบรรจุกริดที่มีลักษณะเป็นทรงหกด้านลงไปโดเมนที่ได้ถูกแบ่งเรียบร้อยแล้ว เมื่อแบบจำลองไฮโดรไซโคลอนถูกแบ่งโดเมนเรียบร้อยแล้ว ในลำดับต่อมาเป็นการศึกษาถึงการประมาณค่ากริดหรือเมชในไฮโดรไซโคลอนที่ประยุกต์และอ้างอิงมาจากการวิจัยแก๊สไซโคลอนของ Pechmanee สามารถคำนวณค่าความสูงของเซลล์แรกจากผนังในส่วนของทรงกระบอก โคน และท่อออกด้านบน มีความสูงเท่ากับ 0.594, 0.298, และ 0.385 มิลลิเมตรตามลำดับ กำหนดอัตราการเจริญเติบโตของเซลล์ในแนวรัศมีและแนวแกนเท่ากับ 1.2 และ 1.6 เท่า ตามลำดับ และมีจำนวนกริดทั้งหมดในไฮโดรไซโคลอนเท่ากับ 361,472 เซลล์ ขั้นตอนสุดท้ายในโปรแกรม GAMBIT คือการกำหนดสถานะขอบเขตให้กับแบบจำลองไฮโดรไซโคลอน ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ทางเข้าไฮโดรไซโคลอนเป็น Velocity-inlet ทางออกด้านบนและด้านล่างของไฮโดรไซโคลอนเป็น Outflow และส่วนประกอบที่เหลือของไฮโดรไซโคลอนเป็น Wall

เมื่อได้แบบจำลอง 3 มิติของไฮโดรไซโคลอนที่มีขนาดกริดที่เหมาะสมแล้ว ต่อมาเป็นการศึกษาการตั้งค่าวิธีเชิงตัวเลขในโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5 ซึ่งการจำลองการไหลภายในไฮโดรไซโคลอนครั้งนี้ได้ดำเนินการโดยแบบจำลอง Reynold stress (RSM) ที่มีความเร็วขาเข้าไฮโดรไซโคลอนเท่ากับ 2.27 เมตรต่อวินาที พบว่าผลการจำลองของความเร็วในแนวสัมผัสที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Hsieh ทั้งในบริเวณที่เกิดกระแสวนเอกสตรูมที่ผนังและบริเวณที่ความเร็วไหลต่ำสุดในแนวสัมผัส อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังขาดการคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หลักและกระแสนกลับ แต่ผลการจำลองของความเร็วในแนวแกนบริเวณที่เกิดกระแสนหลักมีค่าและแนวโน้มที่คลาดเคลื่อนไปจากงานวิจัยของ Hsieh เล็กน้อยซึ่งถือเป็นความคลาดเคลื่อนที่อยู่ในช่วงยอมรับได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากกราฟที่ได้จากผลการจำลองมีลักษณะเป็นลูกคลื่น ซึ่งในความเป็นจริงกราฟควรมีลักษณะเป็นเส้นตรง หากเพิ่มจำนวนรอบในการประมวลผลอาจจะทำให้ได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงมากขึ้นและทำให้ผลการจำลองที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น โดยเฉพาะผลการจำลองของความเร็วในแนวแกน

5.2.2 ความละเอียดของกริดมีผลต่อความแม่นยำของผลการจำลอง หากเพิ่มความละเอียดของกริดหรือเพิ่มจำนวนเซลล์ของกริดมากขึ้นอาจส่งผลให้ได้ผลการจำลองที่แม่นยำมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. A-phathongrat, K. Srirahong, P. Wongsarivej, and T. Swasdisevi, “Development of Hydrocyclone in Series for Separating the Solid from Liquid,” pp. 836–843.
- [2] ส. ไทรทับทิม, “การใช้งานไฮโดรไซโคลน,” 2554, [Online]. Available: <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>.
- [3] เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ, “พื้นฐานพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ,” สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : ห้องปฏิบัติการพลศาสตร์เชิงคำนวณ สาขา วิศวกรรมเคมี, 2556.
- [4] D., “Hydrodynamica,” *sive viribus motibus fluidorum Comment.*, no. Bernoulli, 1738.
- [5] C. Kolutawong, “Conservative Law Governing Equations in Fluid Mechanics,” *J. Appl. Sci.*, vol. 18, no. 1, pp. 135–156, 2019, doi: 10.14416/j.appsci.2019.05.001.
- [6] C.-L., “Mémoire sur les lois du mouvement des fluides,” *Mémoires l’Acad. des Sci. l’Institut Fr.*, vol. 6, no. Navier, pp. 389–440, 1827.
- [7] Anon, “Derivations of the Momentum Equation,” 2021. <https://eng.libretexts.org/@go/page/747> (accessed Jul. 21, 2010).
- [8] G.G., “On the theory of the internal friction of fluids in motion, and of the equilibrium and motion of elastic solids,” *Trans. Cambridge Philos. Soc.*, vol. 8, no. Stokes, pp. 287–319, 1849.
- [9] G.G., “On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums,” *Trans. Cambridge Philos. Soc.*, vol. 1851, no. Stokes, pp. 8–106, 9AD.
- [10] O., “On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion,” *Proc. R. Soc. London. Ser. A*, vol. 186, no. 123–164, 1895.
- [11] M. F. Dlamini, M. S. Powell, and C. J. Meyer, “A CFD simulation of a single phase hydrocyclone flow field,” *J. South African Inst. Min. Metall.*, vol. 105, no. 10, pp. 711–717, 2005.
- [12] K. T. Hsieh and K. Rajamani, “Phenomenological model of the hydrocyclone: Model development and verification for single-phase flow,” *Int. J. Miner. Process.*, vol. 22, no. 1–4, pp. 223–237, 1988, doi: 10.1016/0301-7516(88)90065-8.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [13] T. C. Monredon, K. T. Hsieh, and R. K. Rajamani, "Fluid flow model of the hydrocyclone: an investigation of device dimensions," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 35, no. 1–2, pp. 65–83, 1992, doi: 10.1016/0301-7516(92)90005-H.
- [14] S. M. Mousavian and A. F. Najafi, "Numerical simulations of gas-liquid-solid flows in a hydrocyclone separator," *Arch. Appl. Mech.*, vol. 79, no. 5, pp. 395–409, 2009, doi: 10.1007/s00419-008-0237-2.
- [15] S. M. Mousavian and A. F. Najafi, "Influence of geometry on separation efficiency in a hydrocyclone," *Arch. Appl. Mech.*, vol. 79, no. 11, pp. 1033–1050, 2009, doi: 10.1007/s00419-008-0268-8.
- [16] M. Narasimha, M. S. Brennan, and P. N. Holtham, "CFD modeling of hydrocyclones: Prediction of particle size segregation," *Miner. Eng.*, vol. 39, pp. 173–183, 2012, doi: 10.1016/j.mineng.2012.05.010.
- [17] L. Vinet and A. Zhedanov, "PHENOMENOLOGICAL MODEL OF THE HYDROCYCLONE," *J. Phys. A Math. Theor.*, vol. 44, no. 8, 2011, doi: 10.1088/1751-8113/44/8/085201.
- [18] P. Pechmanee, "SIMULATION OF FLUID FLOW FIELD INSIDE GAS CYCLONE SEPARATOR BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS," 2019.
- [19] E. B. Pitiwat Pechmanee, Apinan Namkanisorn, Santi Wattananusorn, "CFD Simulations of High Efficiency Gas Cyclones: An Influence of Dustbin Geometry Pitiwat."

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาคผนวก ก.

ขั้นตอนการจำลองไฮโดรไซโคลนด้วยคำสั่งตัวอักษร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

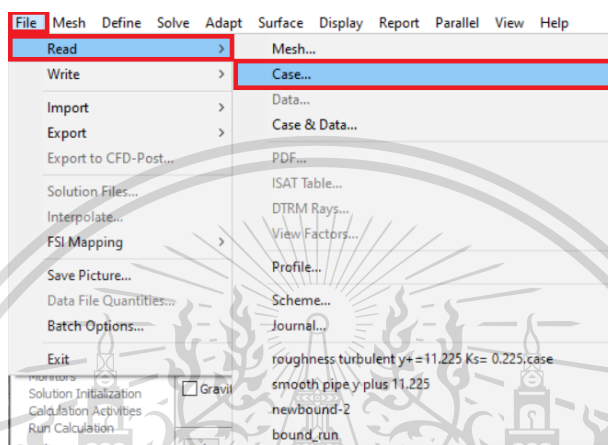
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การกำหนดสภาวะขอบเขตและวิธีการคำนวณในโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5 ในการจำลองไฮโดรโคลนในรูปแบบตัวอักษรมีขั้นตอนดังนี้

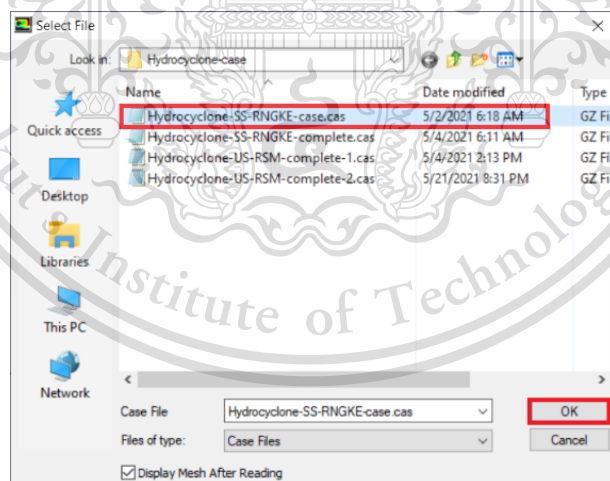
1. /file/read-case/Hydrocyclone-SS-RNGKE-case.cas.gz

1.1 ไปที่เมนู File > เลือก Read > เลือก Case แสดงดังรูปที่ ก-1



รูปที่ ก-1 แสดงขั้นตอนของการกดรหัสที่ 1

1.2 เลือกไฟล์ Hydrocyclone-SS-RNGKE-case.cas > เลือก OK แสดงดังรูปที่ ก-2



รูปที่ ก-2 แสดงขั้นตอนของการกดรหัสที่ 1

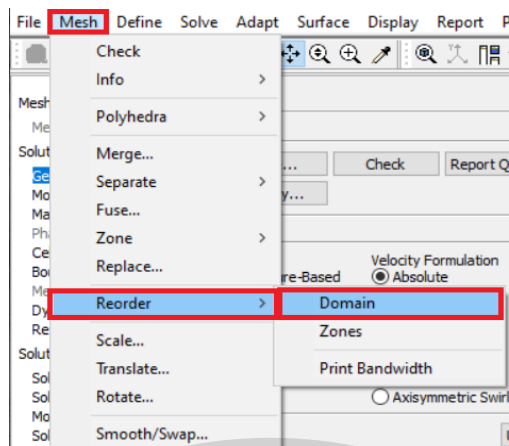
2. mesh/reorder/reorder-domain

2.1 ไปที่เมนู Mesh > เลือก Reorder > เลือก Domain แสดงดังรูปที่ ก-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

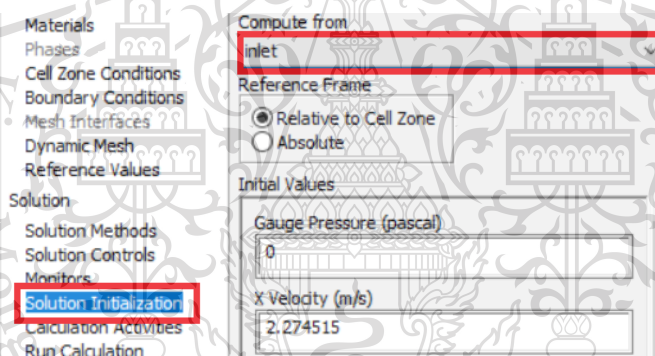
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ก- 3 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 2

3. /solve/initialize/compute-defaults/velocity-inlet inlet

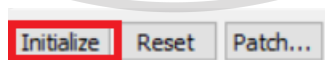
3.1 ไปที่เมนู Solution Initialization > ไปที่ Compute from > เลือก inlet



รูปที่ ก-4 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 3

4. /solve/initialize/initialize-flow

4.1 เลือก Initialize แสดงดังรูปที่ ก-5



รูปที่ ก-5 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 4

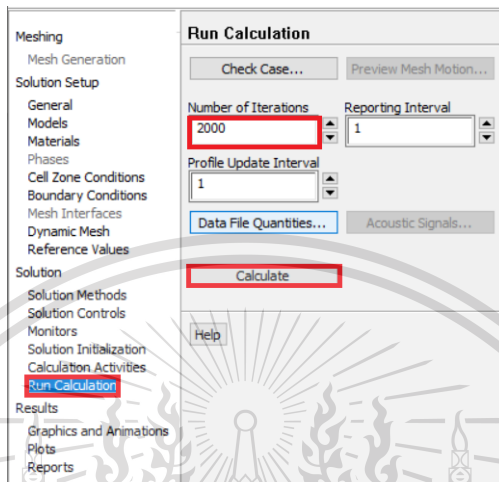
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5. /solve/iterate 2000

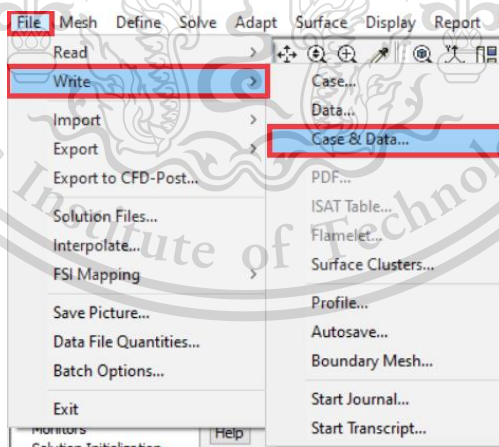
5.1 ไปที่เมนู Run Calculation > ใส่ค่า Number of Iterations 2000 > เลือก Calculate แสดงดังรูปที่ ก-6



รูปที่ ก-6 แสดงขั้นตอนของการกดรหัสที่ 5

6. /file/write-case-data Hydrocyclone-SS-RNGKE-complete.gz

6.1 ไปที่เมนู File > เลือก Write > เลือก Case & Data แสดงดังรูปที่ ก-7



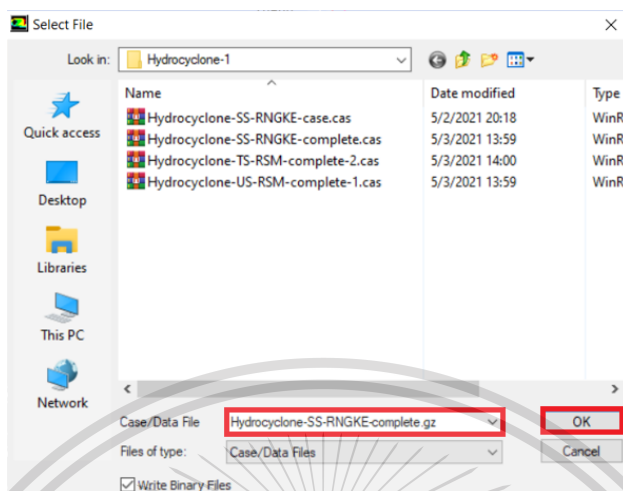
รูปที่ ก-7 แสดงขั้นตอนของการกดรหัสที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

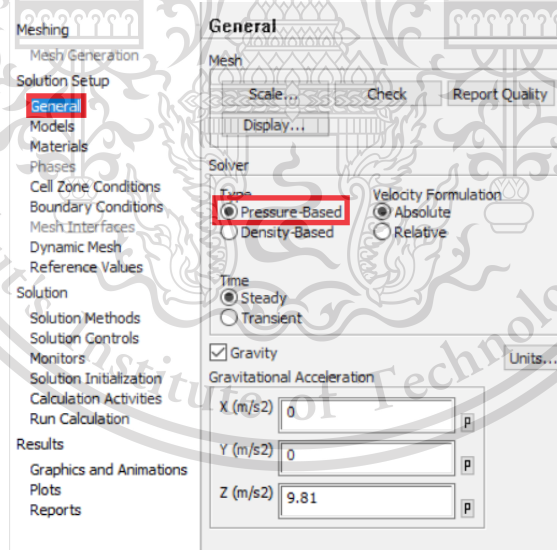
6.2 ตั้งชื่อไฟล์ Hydrocyclone-SS-RNGKE-complete.gz > เลือก OK แสดงดังรูปที่ ก-8



รูปที่ ก-8 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 6

7. /define/models/solver/pressure-based yes

7.1 ไปที่เมนู General > เลือก Type : Pressure Based แสดงดังรูปที่ ก-9



รูปที่ ก-9 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 7

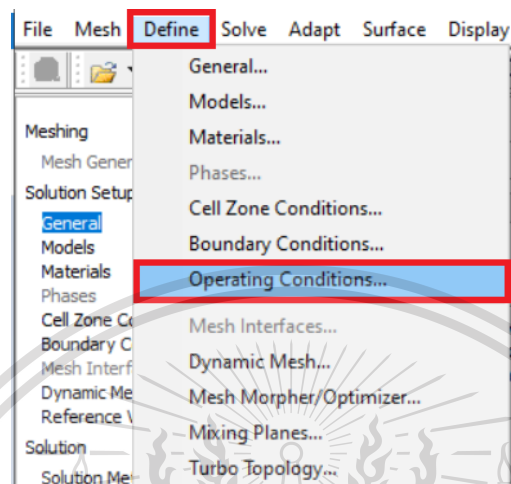
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

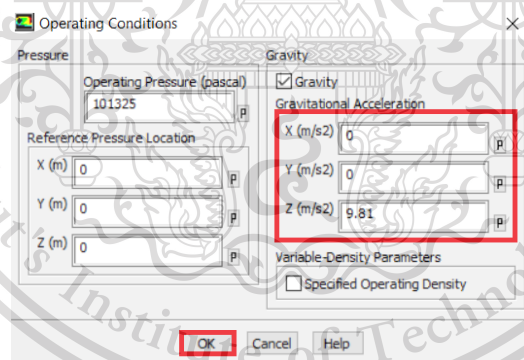
8. /define/operating-conditions/gravity yes 0 0 9.81

8.1 ไปที่เมนู Define > เลือก Operating conditions แสดงดังรูปที่ ก-10



รูปที่ ก-10 แสดงขั้นตอนของการกดรหัสที่ 8

8.2 กรอกค่า $X = 0$ $Y = 0$ และ $Z = 9.81$ > เลือก OK แสดงดังรูปที่ ก-11



รูปที่ ก-11 แสดงขั้นตอนของการกดรหัสที่ 8

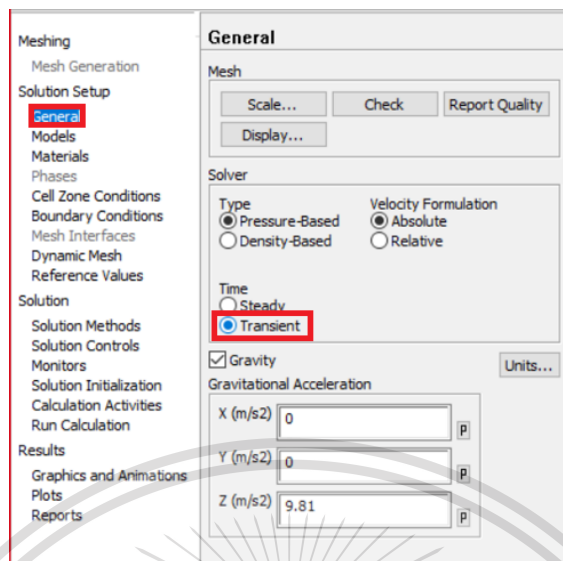
9. /define/models/unsteady-2nd-order yes

9.1 ไปที่เมนู General > เลือก Time : Transient แสดงดังรูปที่ ก-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

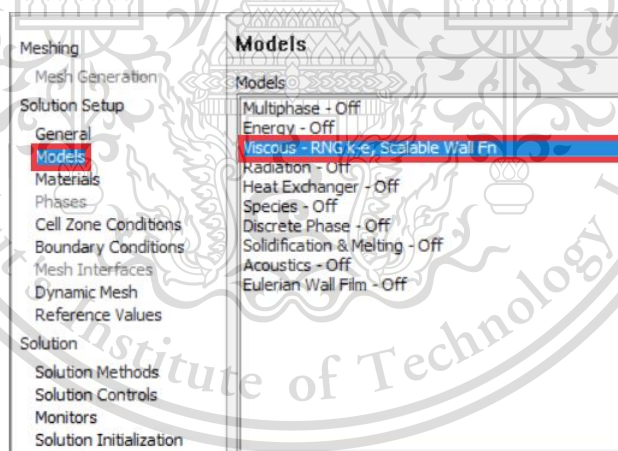
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ก-12 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 9

10. /define/models/viscous/reynolds-stress-model? Yes

10.1 ไปที่เมนู Models > เลือก Viscous – RNG k-ε, Scalable Wall Fn แสดงดังรูปที่ ก-13



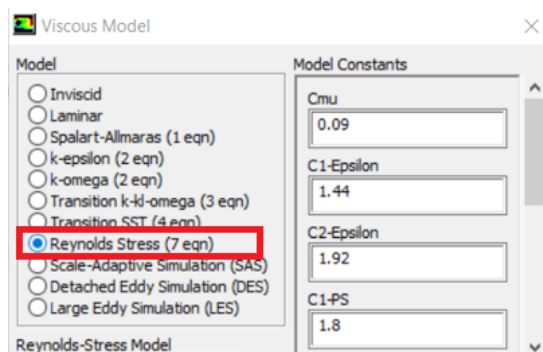
รูปที่ ก-13 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

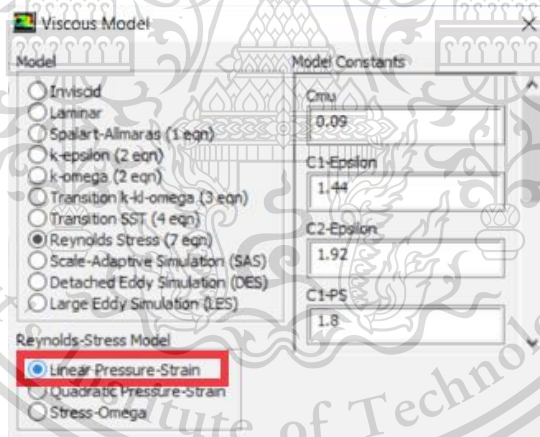
10.2 เลือก Reynolds Stress (7 eqn) ในแถบ Model แสดงดังรูปที่ ก-14



รูปที่ ก-14 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 10

11. /define/models/viscous/rsm-linear-pressure-strain? Yes

11.1 เลือก Linear Pressure-Strain ในแถบ Reynolds-Stress Model แสดงดังรูปที่ ก-15



รูปที่ ก-15 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 11

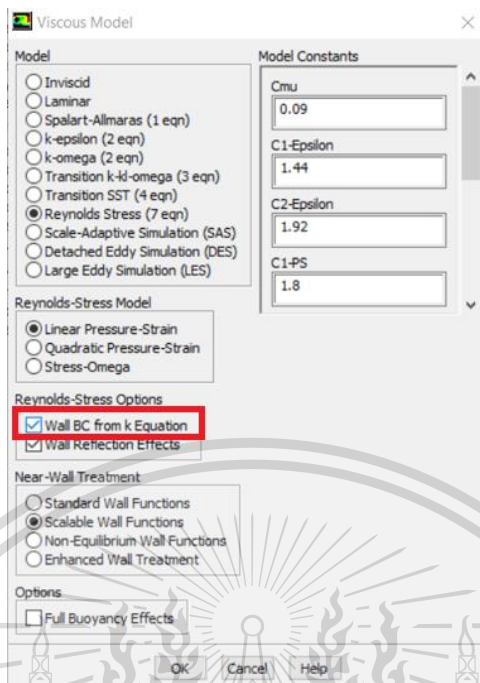
12. /define/models/viscous/rsm-solve-tke? Yes

12.1 เลือก Wall BC from k Equation ในแถบ Reynolds-Stress Options แสดงดังรูปที่ ก-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

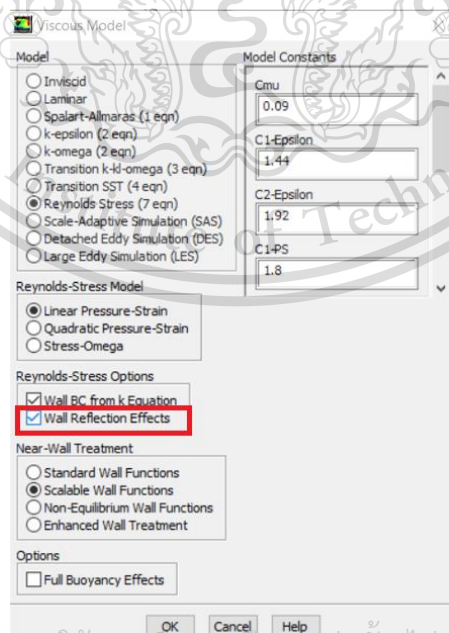
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ก-16 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 12

13. /define/models/viscous/rsm-wall-echo? Yes

13.1 เลือก Wall Reflection Effects ในแถบ Reynolds-Stress Options แสดงดังรูปที่ ก-17



รูปที่ ก-17 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 13

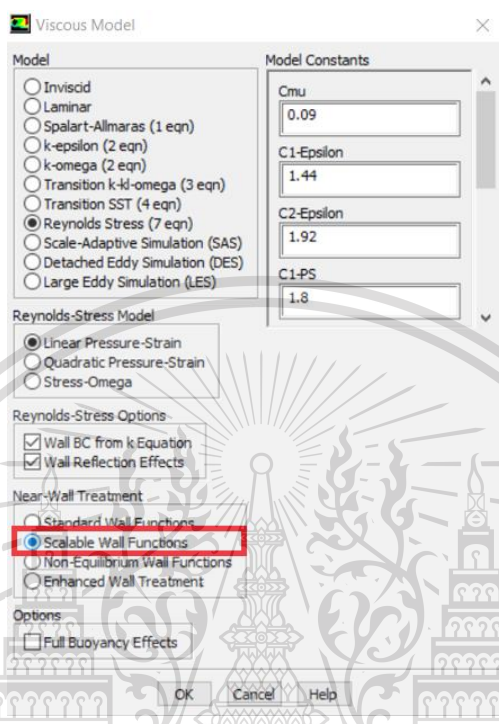
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

14. /define/models/viscous/near-wall-treatment/scalable-wall-functions? Yes

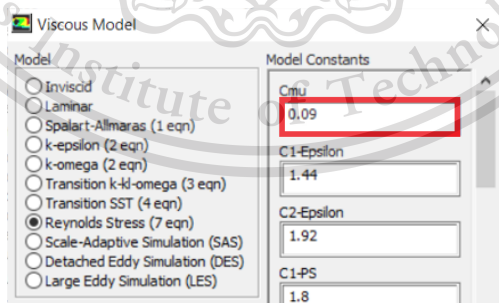
14.1 เลือก Scalable Wall Functions ในแถบ Near-Wall Treatment แสดงดังรูปที่ ก-18



รูปที่ ก-18 แสดงขั้นตอนของการกดรหัสที่ 14

15. (rpsetvar' kecmu 0.09)

15.1 กรอกค่าที่ช่อง Cmu เท่ากับ 0.09 ในแถบ Model Constants แสดงดังรูปที่ ก-19



รูปที่ ก-19 แสดงขั้นตอนของการกดรหัสที่ 15

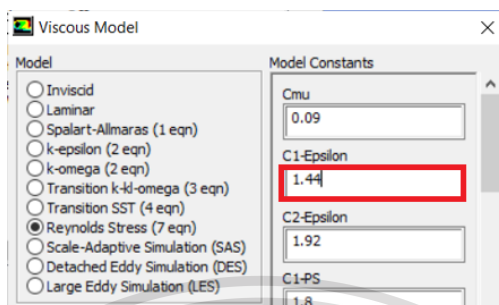
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

16. (rpsetvar' kec1 1.44)

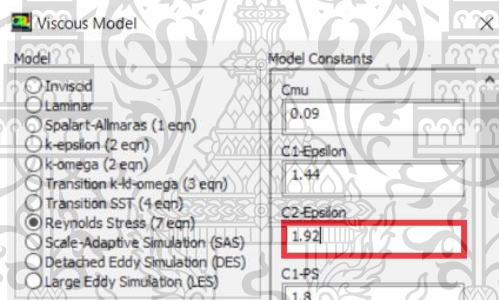
16.1 กรอกค่าที่ช่อง C1-Epsilon เท่ากับ 1.44 ในแถบ Model Constants แสดงดังรูปที่ ก-20



รูปที่ ก-20 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 16

17. (rpsetvar' kec2 1.92)

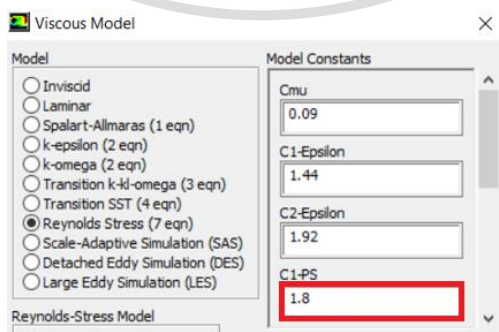
17.1 กรอกค่าที่ช่อง C2-Epsilon เท่ากับ 1.92 ในแถบ Model Constants แสดงดังรูปที่ ก-21



รูปที่ ก-21 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 17

18. (rpsetvar' drsm-c1 1.8)

18.1 กรอกค่าที่ช่อง C1-PS เท่ากับ 1.8 ในแถบ Model Constants แสดงดังรูปที่ ก-22



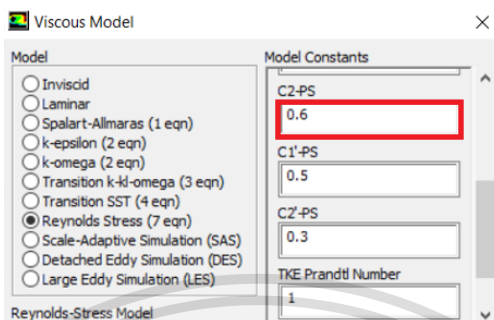
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ ก-22 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 18
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

19. (rpsetvar' drsm-c2 0.6)

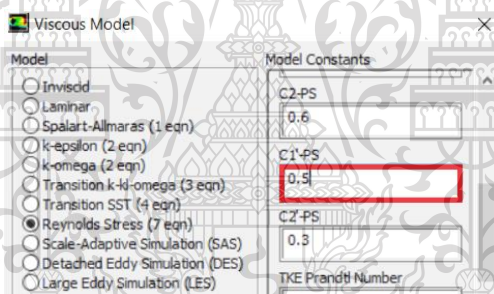
19.1 กรอกค่าที่ช่อง C2-PS เท่ากับ 0.6 ในแถบ Model Constants แสดงดังรูปที่ ก-23



รูปที่ ก-23 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 19

20. (rpsetvar' drsm-c1-wall 0.5)

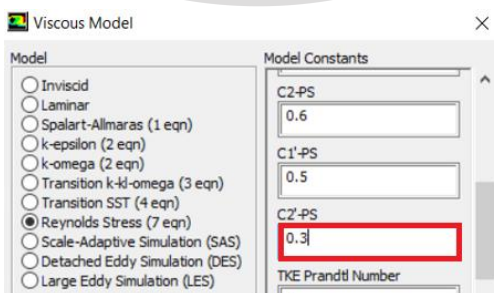
20.1 กรอกค่าที่ช่อง C1'-PS เท่ากับ 0.5 ในแถบ Model Constants แสดงดังรูปที่ ก-24



รูปที่ ก-24 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 20

21. (rpsetvar' drsm-c2-wall 0.3)

21.1 กรอกค่าที่ช่อง C2'-PS เท่ากับ 0.3 ในแถบ Model Constants แสดงดังรูปที่ ก-25



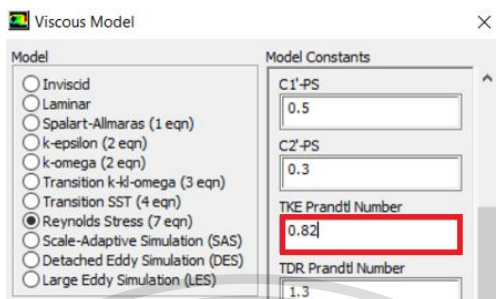
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ ก-25 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 21 นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

22. (rpsetvar' kesigk 0.82)

22.1 กรอกค่าที่ช่อง TKE-Prandtl Number เท่ากับ 0.82 ในแถบ Model Constants แสดงดังรูปที่ ก-26

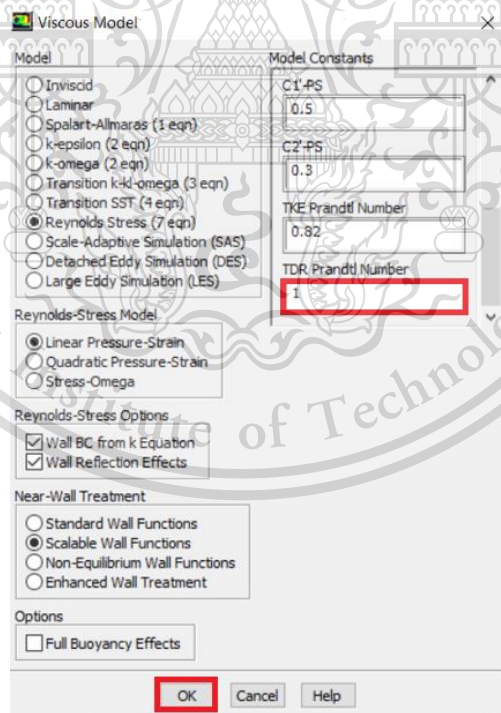


รูปที่ ก-26 แสดงขั้นตอนของการกดรหัสที่ 22

23. (rpsetvar' kesige 1)

23.1 กรอกค่าที่ช่อง TDR-Prandtl Number เท่ากับ 1 ในแถบ Model Constants และกด OK

แสดงดังรูปที่ ก-27



รูปที่ ก-27 แสดงขั้นตอนของการกดรหัสที่ 23

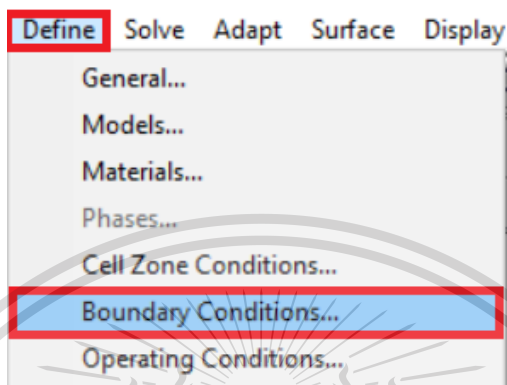
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

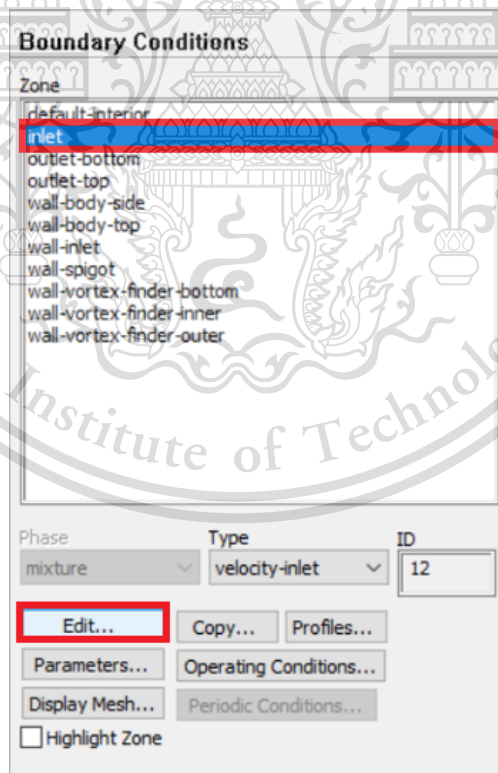
24. /define/boundary-conditions/velocity-inlet inlet n n y y n 2.274515 n 0 y n 0.0129 n 0.137 n
y n 0.0086 n 0.0086 n 0.0086 n 0 n 0 n 0

24.1 ไปที่เมนู Define > Boundary conditions แสดงดังรูปที่ ก-28



รูปที่ ก-28 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 24

24.2 เลือก inlet > เลือก Edit แสดงดังรูปที่ ก-29



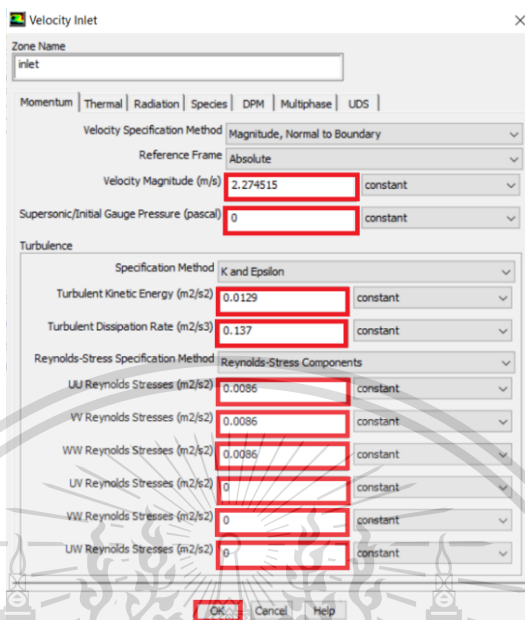
รูปที่ ก-29 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

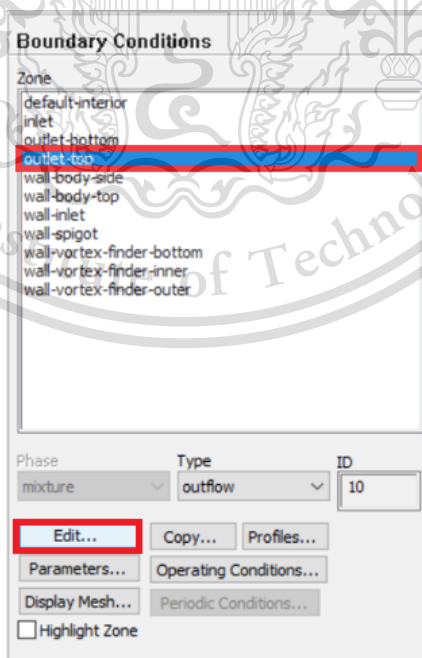
24.3 กรอกค่าตามช่องสีแดงและเลือก OK แสดงดังรูปที่ ก-30



รูปที่ ก-30 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 24

25. /define/boundary-conditions/outflow outlet-top 0.951187

25.1 เลือกเมนูตามข้อ 24.1 ต่อมาเลือก outlet-top และเลือก Edit แสดงดังรูปที่ ก-31

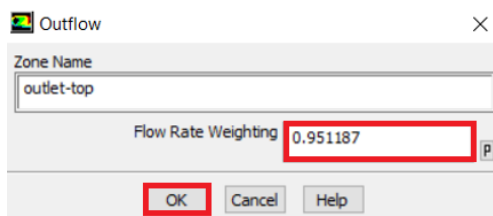


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ ก-31 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 25
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

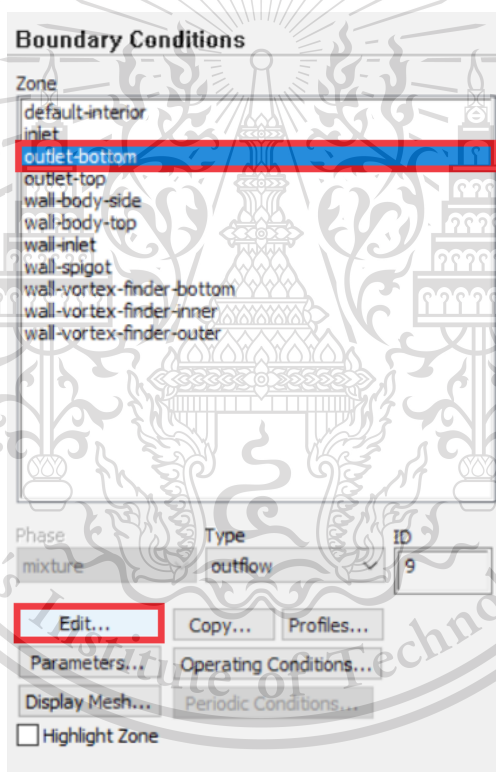
25.2 กรอกค่า Flow Rate Weighting ตามช่องสีแดง และเลือก OK แสดงดังรูปที่ ก-32



รูปที่ ก-32 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 25

26. /define/boundary-conditions/outflow outlet-bottom 0.048813

26.1 เลือกเมนูตามข้อ 24.1 ต่อมาเลือก outlet-bottom และเลือก Edit แสดงดังรูปที่ ก-33



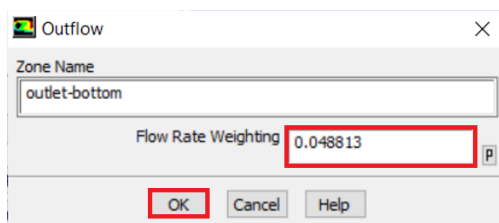
รูปที่ ก-33 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

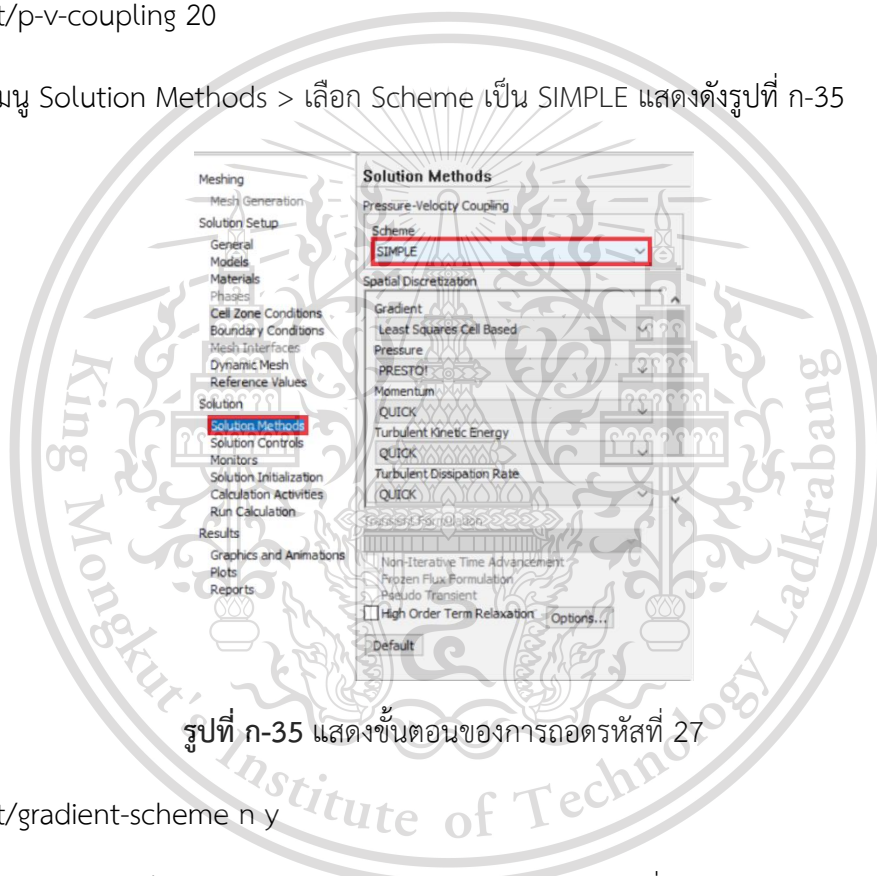
26.2 กรอกค่า Flow Rate Weighting ตามช่องสีแดง และเลือก OK แสดงดังรูปที่ ก-34



รูปที่ ก-34 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 26

27. /solve/set/p-v-coupling 20

27.1 ไปที่เมนู Solution Methods > เลือก Scheme เป็น SIMPLE แสดงดังรูปที่ ก-35



รูปที่ ก-35 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 27

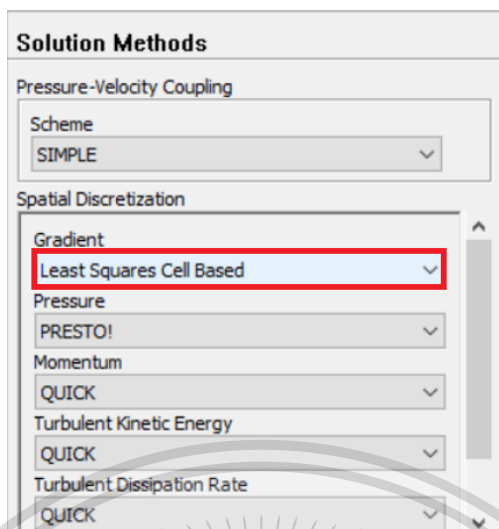
28. /solve/set/gradient-scheme n y

28.1 เลือก Gradient เป็น Least Squares Cell Based แสดงดังรูปที่ ก-36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

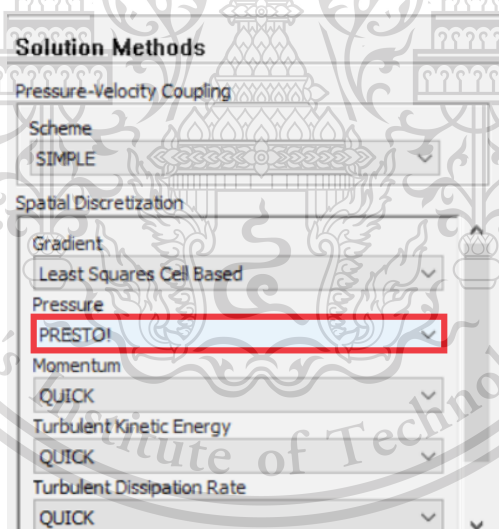
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ก-36 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 28

29. /solve/set/discretization-scheme/pressure 14

29.1 เลือก Pressure เป็น PRESTO! แสดงดังรูปที่ ก-37



รูปที่ ก-37 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 29

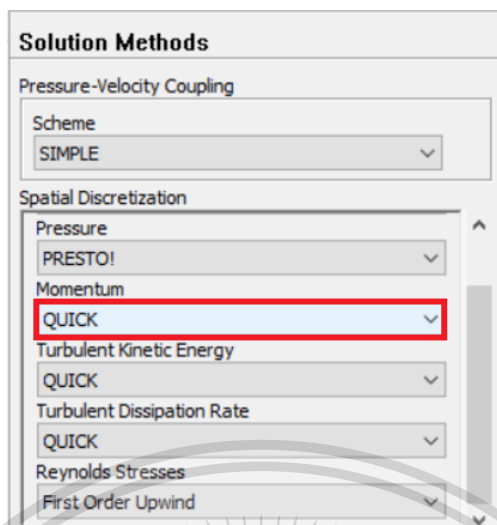
30. /solve/set/discretization-scheme/mom 4

30.1 เลือก Momentum เป็น QUICK แสดงดังรูปที่ ก-38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

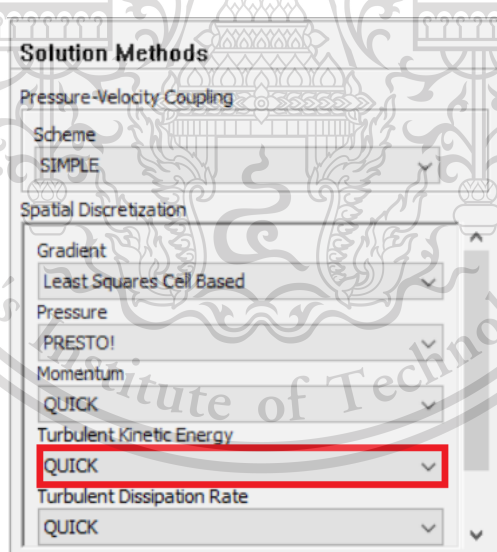
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ก-38 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 30

31. /solve/set/discretization-scheme/k 4

31.1 เลือก Turbulent Kinetic Energy เป็น QUICK แสดงดังรูปที่ ก-39



รูปที่ ก-39 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 31

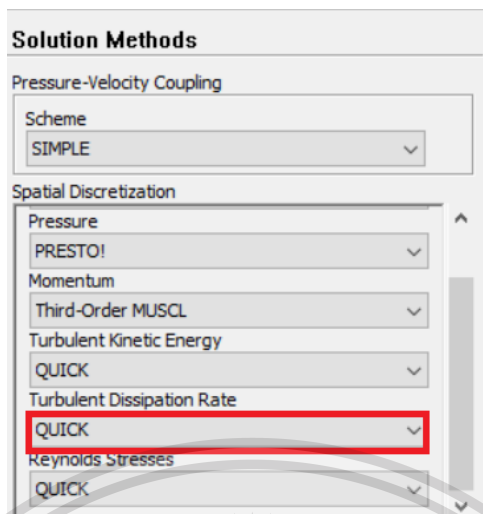
32. /solve/set/discretization-scheme/epsilon 4

32.1 เลือก Turbulent Kinetic Rate เป็น QUICK แสดงดังรูปที่ ก-40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

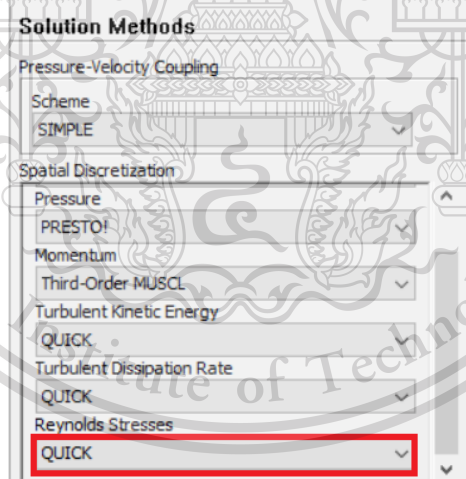
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ก-40 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 32

33. /solve/set/discretization-scheme/dism 4

33.1 เลือก Reynolds Stresses เป็น QUICK แสดงดังรูปที่ ก-41



รูปที่ ก-41 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 33

34. /solve/monitors/residual/check-convergence? y y y y y y y y y y

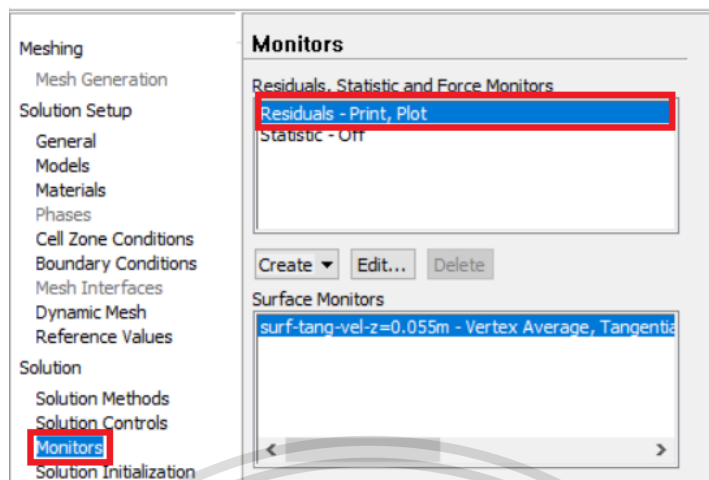
34.1 ไปที่เมนู Solution เลือก Monitors > Residuals, Statistic and Force Monitors เลือก

Residuals – Print, Plot แสดงดังรูปที่ ก-42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

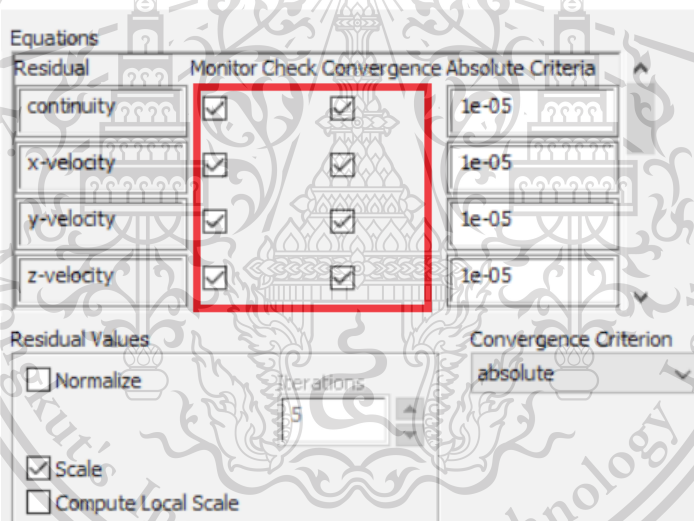
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ก-42 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 34

34.1 ไปที่แถบ Monitor Check Convergence Absolute Criteria > เลือกทั้งหมด แสดงดังรูปที่ ก-43



รูปที่ ก-43 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 34

35. /solve/monitors/residual/convergence-criteria 1e-05 1e-05 1e-05 1e-05 1e-05 1e-05 1e-05
1e-05 1e-05 1e-05 1e-05 1e-05

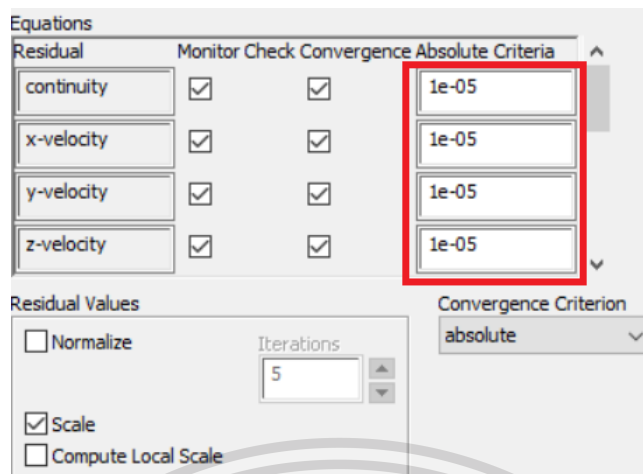
35.1 ไปที่แถบ Monitor Check Convergence Absolute Criteria > ใส่ค่า 1e-05 ทั้งหมด

แสดงดังรูปที่ ก-44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

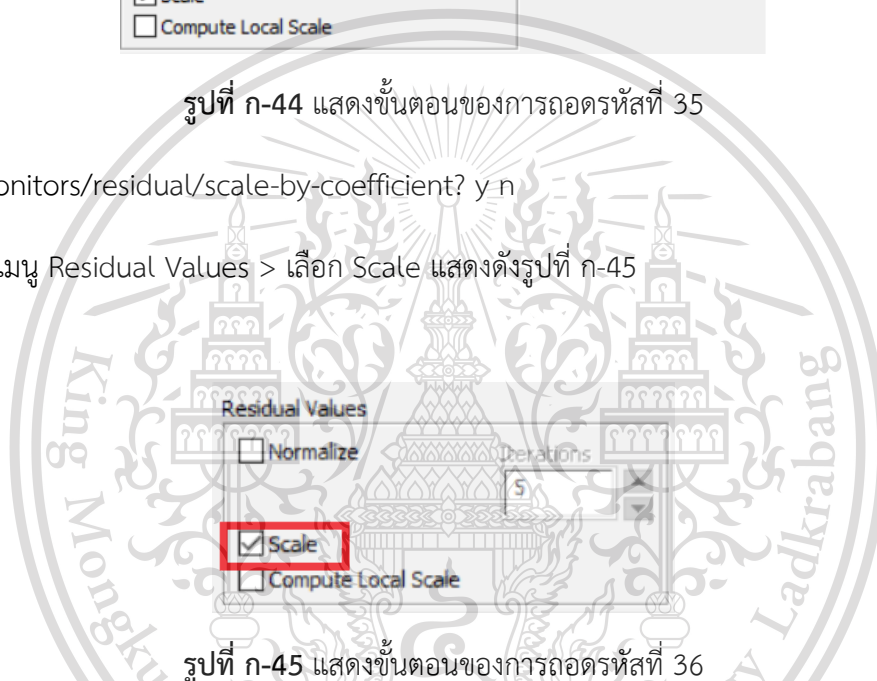
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ก-44 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 35

36. /solve/monitors/residual/scale-by-coefficient? y n

36.1 ไปที่เมนู Residual Values > เลือก Scale แสดงดังรูปที่ ก-45



รูปที่ ก-45 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 36

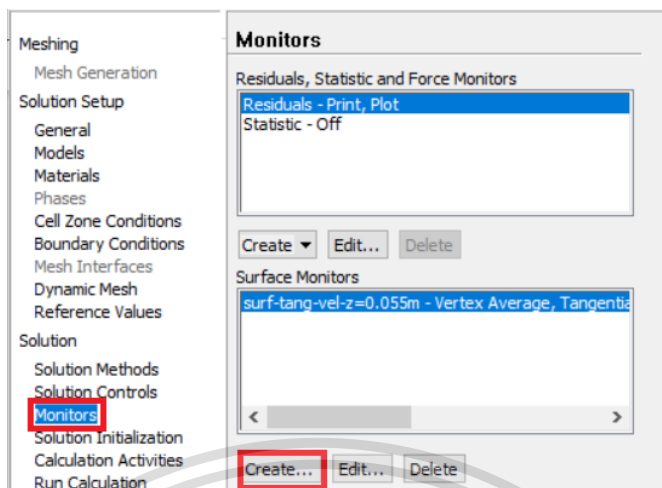
37. /solve/monitor/surface/set-monitor surf-tang-vel-z=0.055m "Vertex Average" tangential-velocity point-z=0.055m () y 2 y y surf-tang-vel-z=0.055m.out 1 y flow-time

37.1 ไปที่เมนู Solution เลือก Monitors > Surface Monitors > เลือก Create... แสดงดังรูปที่ ก-46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

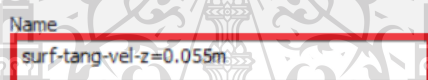
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ก-46 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 37

37.2 ไปที่เมนู Name > ตั้งชื่อ surf-tang-vel-z=0.055m แสดงดังรูปที่ ก-47

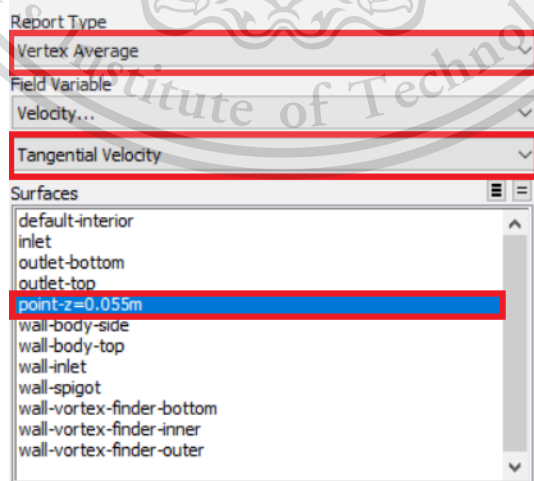


รูปที่ ก-47 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 37

37.3 เลือก ไปที่เมนู Report Type เป็น Vertex Average แสดงดังรูปที่ ก-48

37.4 เลือก Field Variable เป็น Tangential Velocity แสดงดังรูปที่ ก-48

37.5 เลือก Surface เป็น point-z=0.055m แสดงดังรูปที่ ก-48

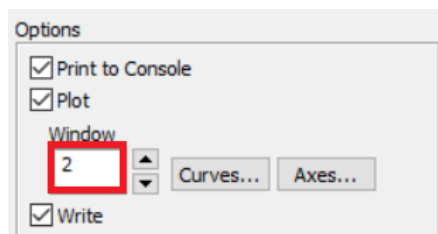


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยและการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ ก-48 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 37
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

37.6 ไปที่ Options > Windows > ใส่ค่า 2 แสดงดังรูปที่ ก-49



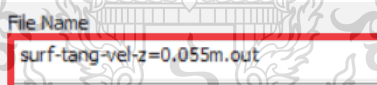
รูปที่ ก-49 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 37

37.7 เลือก Write แสดงดังรูปที่ ก-50



รูปที่ ก-50 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 37

37.8 ไปที่ File Name > ตั้งชื่อ surf-tang-vel-z=0.055m.out แสดงดังรูปที่ ก-51



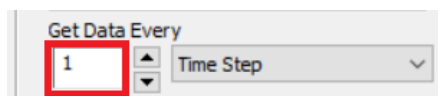
รูปที่ ก-51 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 37

37.9 ไปที่ X Axis > เลือก Flow Time แสดงดังรูปที่ ก-52



รูปที่ ก-52 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 37

37.10 ไปที่เมนู Get Data Every > ใส่ค่า 1 แสดงดังรูปที่ ก-53



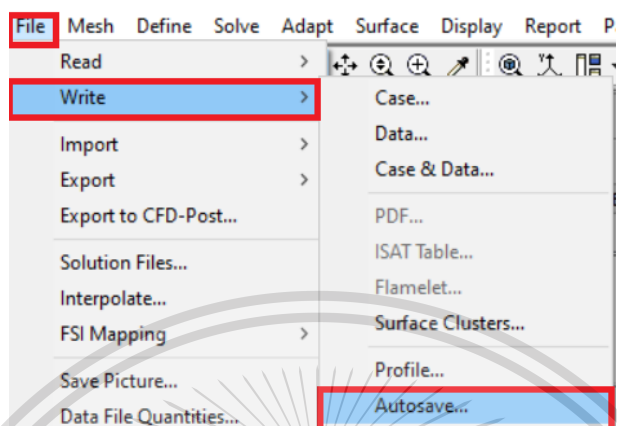
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ ก-53 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 37 ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

38. /file/auto-save/data-frequency 500

38.1 ไปที่เมนู File > เลือก Write > เลือก Autosave... แสดงดังรูปที่ ก-54



รูปที่ ก-54 แสดงขั้นตอนของการกดรหัสที่ 38

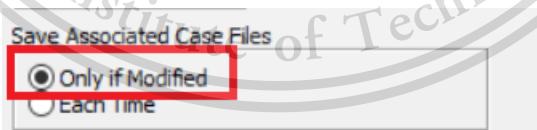
38.2 ไปที่ Save Data File Every (Time Steps) > ใส่ค่า 500 แสดงดังรูปที่ ก-55



รูปที่ ก-55 แสดงขั้นตอนของการกดรหัสที่ 38

39. /file/auto-save/case-frequency if-case-is-modified

39.1 ไปที่ Save Associated Case Files > เลือก Only if Modified แสดงดังรูปที่ ก-56



รูปที่ ก-56 แสดงขั้นตอนของการกดรหัสที่ 39

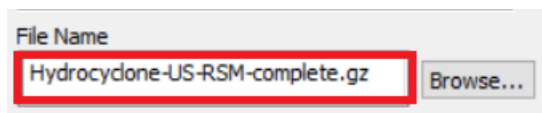
40. /file/auto-save/root-name "Hydrocyclone-US-RSM-complete.gz"

40.1 ไปที่ File Name > ตั้งชื่อ Hydrocyclone-US-RSM-complete.gz แสดงดังรูปที่ ก-57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

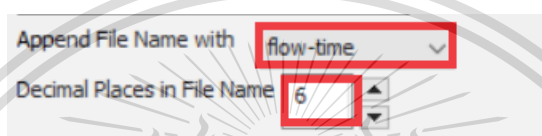


รูปที่ ก-57 แสดงขั้นตอนของการกดรหัสที่ 40

41. /file/auto-save/append-file-name-with flow-time 6

41.1 ไปที่ Append File Name With > เลือก flow-time แสดงดังรูปที่ ก-58

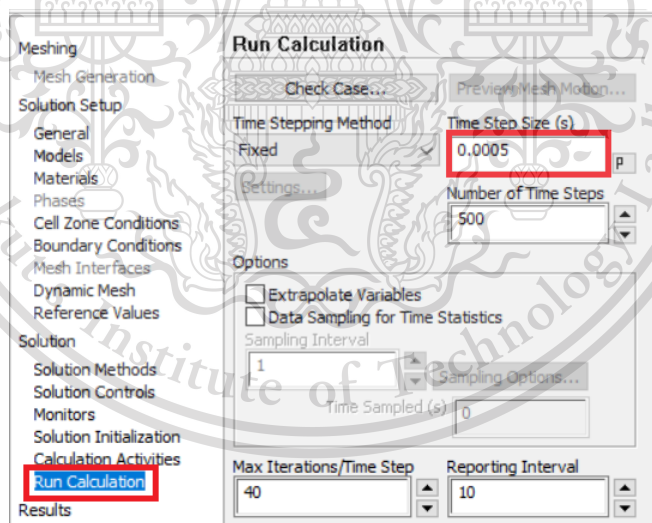
41.2 ไปที่ Decimal Places in File Name > ใส่ค่า 6 แสดงดังรูปที่ ก-58



รูปที่ ก-58 แสดงขั้นตอนของการกดรหัสที่ 41

42. /solve/set/time-step 0.0005

42.1 ไปที่เมนู Solution > Run Calculation > Time Step Size (s) > ใส่ค่า 0.0005 แสดงดังรูปที่ ก-59



รูปที่ ก-59 แสดงขั้นตอนของการกดรหัสที่ 42

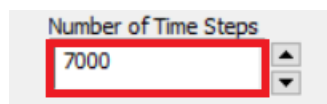
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

43. /solve/set/number-of-time-steps 7000

43.1 ไปที่ Number of Time Steps > ใส่ค่า 7000 แสดงดังรูปที่ ก-60



รูปที่ ก-60 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 43

44. /solve/set/max-iterations-per-time-step 40

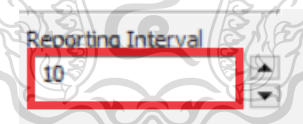
44.1 ไปที่ Max Iterations/Time Step > ใส่ค่า 40 แสดงดังรูปที่ ก-61



รูปที่ ก-61 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 44

45. /solve/set/reporting-interval 10

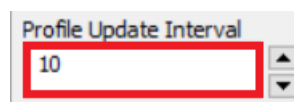
45.1 ไปที่ Reporting Interval > ใส่ค่า 10 แสดงดังรูปที่ ก-62



รูปที่ ก-62 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 45

46. /define/profiles/update-interval 10

46.1 ไปที่ Profiles Update Interval > ใส่ค่า 10 แสดงดังรูปที่ ก-63



รูปที่ ก-63 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 46

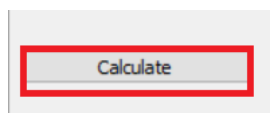
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

47. /solve/dual-time-iterate 7000 40

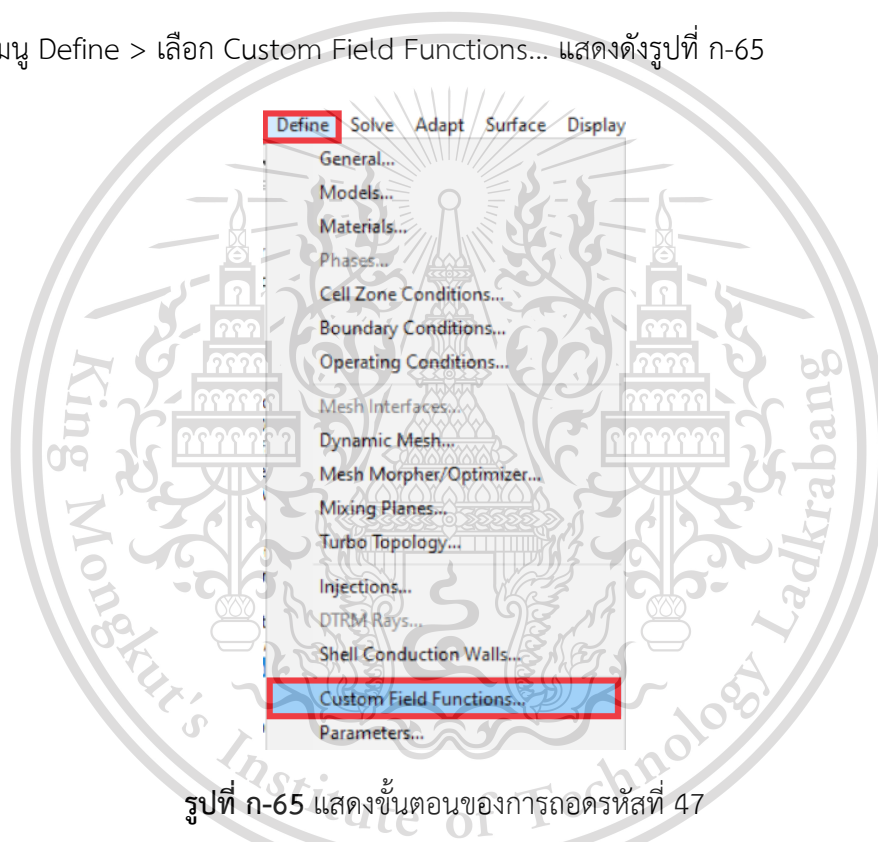
47.1 เลือก Calculate แสดงดังรูปที่ ก-64



รูปที่ ก-64 แสดงขั้นตอนของการกดรหัสที่ 47

48. /define/custom-field-functions/define "custom-uu-reynolds-stress" uu_reynolds_stress

48.1 ไปที่เมนู Define > เลือก Custom Field Functions... แสดงดังรูปที่ ก-65



รูปที่ ก-65 แสดงขั้นตอนของการกดรหัสที่ 47

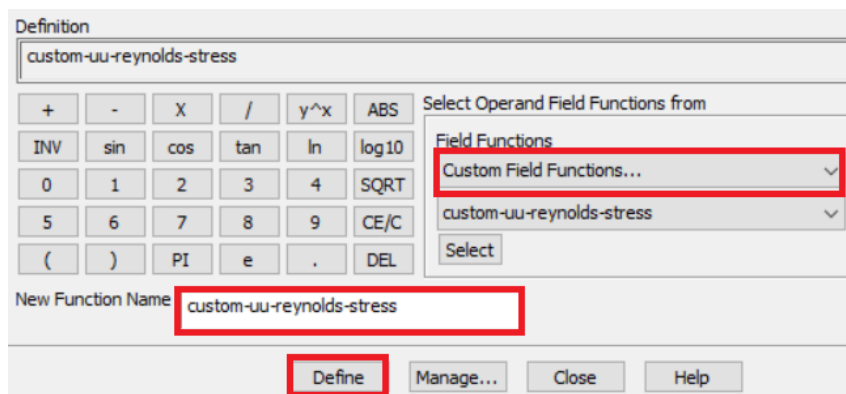
48.2 ไปที่ Field Functions... > เลือก Custom Field Functions... แสดงดังรูปที่ ก-66

48.3 ไปที่ New Function Name > ตั้งชื่อ custom-uu-reynolds-stress > เลือก Define แสดงดังรูปที่ ก-66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



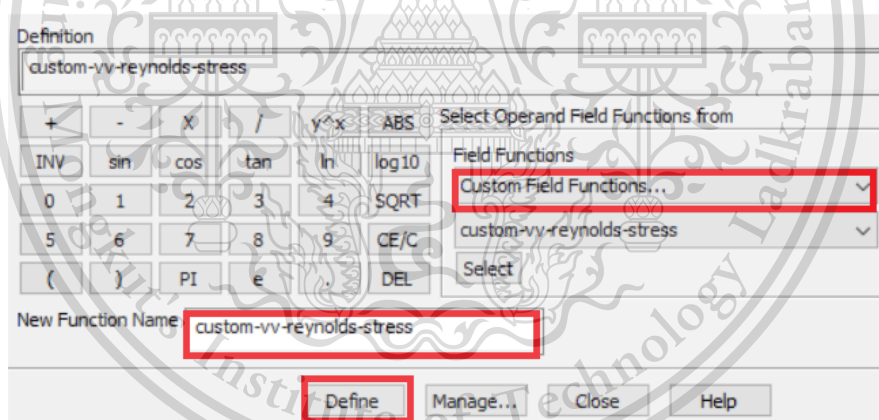
รูปที่ ก-66 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 48

49. /define/custom-field-functions/define "custom-vv-reynolds-stress" vv_reynolds_stress

49.1 ไปที่ Field Functions... > เลือก Custom Field Functions... แสดงดังรูปที่ ก-67

49.2 ไปที่ New Function Name > ตั้งชื่อ custom-vv-reynolds-stress > เลือก Define

แสดงดังรูปที่ ก-67



รูปที่ ก-67 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 49

50. /define/custom-field-functions/define "custom-ww-reynolds-stress" ww_reynolds_stress

50.1 ไปที่ Field Functions... > เลือก Custom Field Functions... แสดงดังรูปที่ ก-68

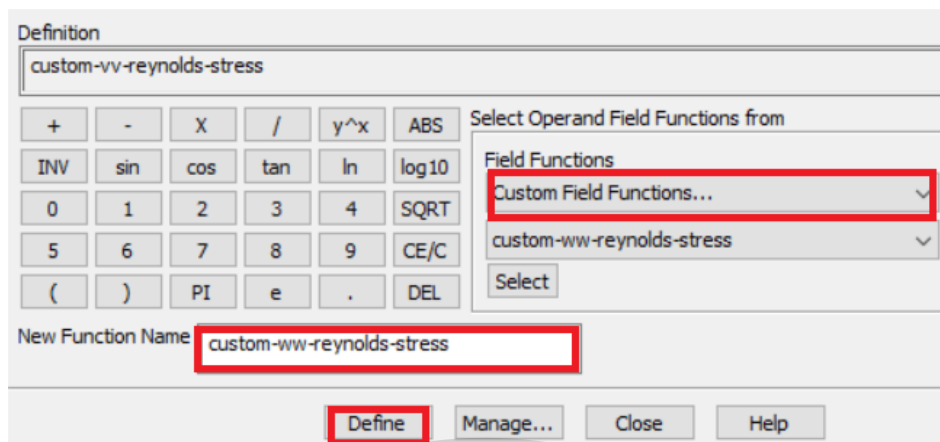
50.2 ไปที่ New Function Name > ตั้งชื่อ custom-ww-reynolds-stress > เลือก Define

แสดงดังรูปที่ ก-68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

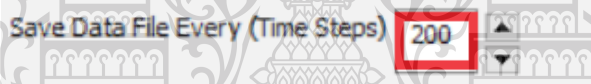


รูปที่ ก-68 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 50

51. /file/auto-save/data-frequency 200

51.1 ไปที่เมนู File > เลือก Write > เลือก Autosave... แสดงดังรูปที่ ก-54

51.2 ไปที่ Save Data File Every (Time Steps) > ใส่ค่า 200 แสดงดังรูปที่ ก-69



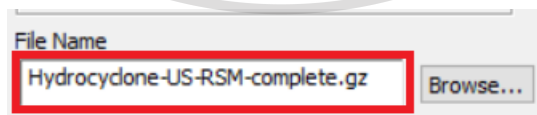
รูปที่ ก-69 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 51

52. /file/auto-save/case-frequency if-case-is-modified

52.1 ไปที่ Save Associated Case Files > เลือก Only if Modified แสดงดังรูปที่ ก-56

53. /file/auto-save/root-name "Hydrocyclone-TS-RSM-complete.gz"

53.1 ไปที่ File Name > ตั้งชื่อ Hydrocyclone-TS-RSM-complete.gz แสดงดังรูปที่ ก-70



รูปที่ ก-70 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 53

54. /file/auto-save/append-file-name-with flow-time 6

54.1 ไปที่ Append File Name With > เลือก flow-time แสดงดังรูปที่ ก-41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

54.2 ไปที่ Decimal Places in File Name > ใส่ค่า 6 แสดงดังรูปที่ ก-41

55. /solve/set/time-step 0.0005

55.1 ไปที่เมนู Solution > Run Calculation แสดงดังรูปที่ ก-42

55.2 ไปที่ Time Step Size (s) > ใส่ค่า 0.0005 แสดงดังรูปที่ ก-42

56. /solve/set/number-of-time-steps 200

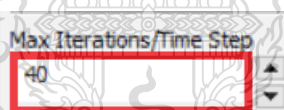
56.1 ไปที่ Number Time Step Size (s) > ใส่ค่า 200 แสดงดังรูปที่ ก-71



รูปที่ ก-71 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 56

57. /solve/set/max-iterations-per-time-step 40

57.1 ไปที่ Max Iterations/Time Step > ใส่ค่า 40 แสดงดังรูปที่ ก-72



รูปที่ ก-72 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 57

58. /solve/set/data-sampling y 1 y y y y y y y y y y y y y y y y y y

58.1 ไปที่ Options > เลือก Data Sampling for Time Statistics แสดงดังรูปที่ ก-73

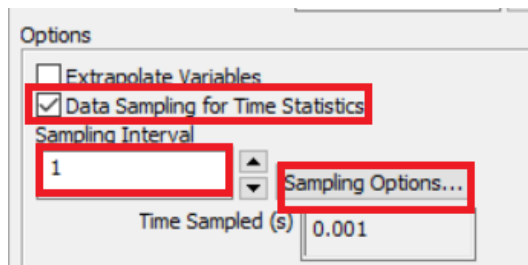
58.2 ไปที่ Sampling Interval > ใส่ค่า 1 แสดงดังรูปที่ ก-73

58.3 เลือก Sapling Options... แสดงดังรูปที่ ก-73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

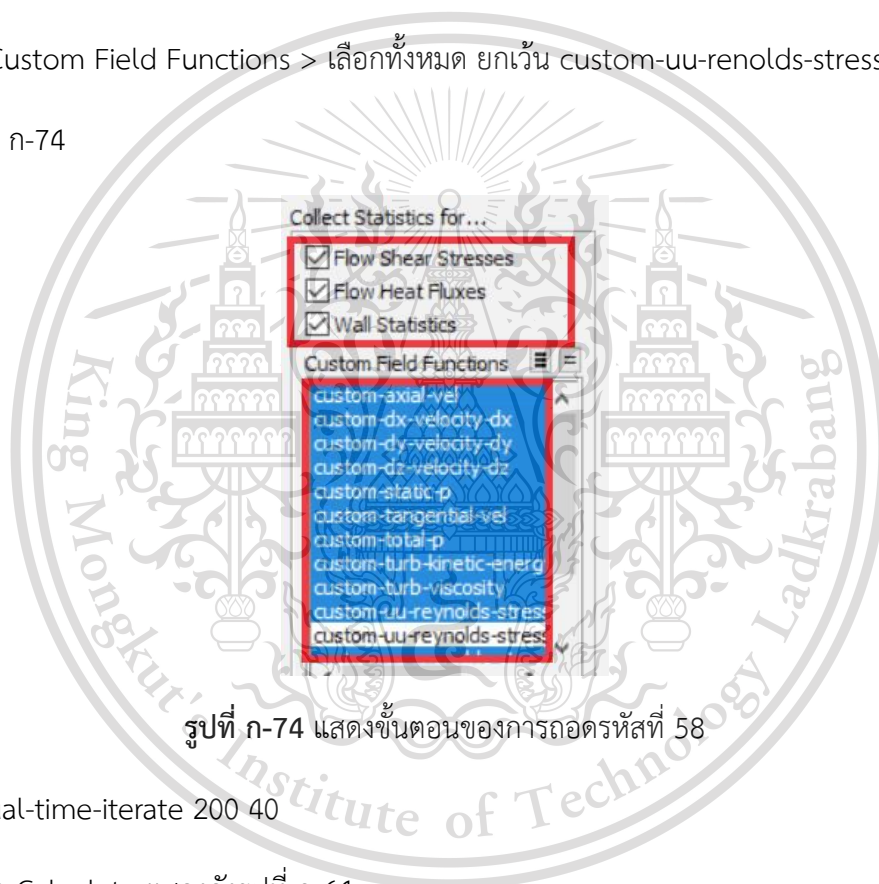


รูปที่ ก-73 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 58

58.4 ไปที่ Collect Statistics for... > เลือกทั้งหมด แสดงดังรูปที่ ก-74

58.5 ไปที่ Custom Field Functions > เลือกทั้งหมด ยกเว้น custom-uu-reynolds-stress

แสดงดังรูปที่ ก-74



รูปที่ ก-74 แสดงขั้นตอนของการถอดรหัสที่ 58

59. /solve/dual-time-iterate 200 40

59.1 เลือก Calculate แสดงดังรูปที่ ก-64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาคผนวก ข.

ข้อมูลดิบที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ข-1 ตัวอย่างข้อมูลดิบของแบบจำลองไฮโดรโซโคลนในแนวเส้นสัมผัสที่คำนวณได้โดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5

ตำแหน่ง (เมตร)	ความเร็ว (เมตร/วินาที)	ตำแหน่ง (เมตร)	ความเร็ว (เมตร/วินาที)
-0.9991	0.0000	-0.2587	2.3570
-0.9833	0.8776	-0.2406	2.4191
-0.9643	0.9210	-0.2226	2.4625
-0.9415	0.9476	-0.2046	2.4782
-0.9142	0.9723	-0.1866	2.4582
-0.8814	1.0010	-0.1687	2.3929
-0.8420	1.0373	-0.1510	2.2742
-0.7947	1.0841	-0.1340	2.1031
-0.7404	1.1429	-0.1174	1.8826
-0.6861	1.2093	-0.1013	1.6253
-0.6318	1.2868	-0.0851	1.3382
-0.5774	1.3772	-0.0836	1.3111
-0.5302	1.4676	-0.0686	1.0442
-0.4908	1.5536	-0.0518	0.7580
-0.4580	1.6346	-0.0348	0.4861
-0.4306	1.7091	-0.0175	0.2443
-0.4078	1.7766	0.0000	0.1885
-0.3888	1.8368	0.0175	0.4081
-0.3730	1.8902	0.0348	0.6827
-0.3597	1.9381	0.0518	0.9686
-0.3464	1.9887	0.0686	1.2616
-0.3330	2.0418	0.0836	1.5236
-0.3227	2.0851	0.0851	1.5503
-0.3102	2.1388	0.1013	1.8160
-0.2952	2.2043	0.1174	2.0398
-0.2773	2.2820	0.1340	2.2197

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 "ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ข-1 ตัวอย่างข้อมูลดิบของแบบจำลองไฮโดรโซโคลนในแนวเส้นสัมผัสที่คำนวณได้โดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5 (ต่อ)

ตำแหน่ง (เมตร)	ความเร็ว (เมตร/วินาที)	ตำแหน่ง (เมตร)	ความเร็ว (เมตร/วินาที)
-0.2587	2.3570	0.1510	2.3480
-0.2406	2.4191	0.1687	2.4259
-0.2226	2.4625	0.1866	2.4578
-0.2046	2.4782	0.2046	2.4530
-0.1866	2.4582	0.2226	2.4190
-0.1687	2.3929	0.2406	2.3631
-0.1510	2.2742	0.2587	2.2933
-0.1340	2.1031	0.2773	2.2149
-0.1174	1.8826	0.2773	2.2149
-0.1013	1.6253	0.2952	2.1374
-0.0851	1.3382	0.3102	2.0739
-0.0836	1.3111	0.3227	2.0228
-0.0686	1.0442	0.3330	1.9822
-0.0518	0.7580	0.3464	1.9327
-0.0348	0.4861	0.3597	1.8859
-0.0175	0.2443	0.3730	1.8417
0.0000	0.1885	0.3888	1.7921
0.0175	0.4081	0.4078	1.7361
0.0348	0.6827	0.4306	1.6732
0.0518	0.9686	0.4580	1.6035
0.0686	1.2616	0.4908	1.5277
0.0836	1.5236	0.5302	1.4468
0.0851	1.5503	0.5774	1.3620
0.1013	1.8160	0.6318	1.2775
0.1174	2.0398	0.6861	1.2053
0.1340	2.2197	0.7404	1.1430

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 "ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ข-1 ตัวอย่างข้อมูลดิบของแบบจำลองไฮโดรโซโคลนในแนวเส้นสัมผัสที่คำนวณได้โดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5 (ต่อ)

ตำแหน่ง (เมตร)	ความเร็ว (เมตร/วินาที)
0.7947	1.0870
0.8420	1.0418
0.8814	1.0061
0.9142	0.9758
0.9415	0.9451
0.9643	0.9031
0.9833	0.8212
0.9991	0.0000
0.7947	1.0870
0.8420	1.0418
0.8814	1.0061

ตารางที่ ข-2 ตัวอย่างข้อมูลดิบของแบบจำลองไฮโดรโซโคลนในแนวความเร็วในแนวแกนที่ระนาบ $x = 0$ ที่คำนวณได้โดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5

ตำแหน่ง (เมตร)	ความเร็ว (เมตร/วินาที)	ตำแหน่ง (เมตร)	ความเร็ว (เมตร/วินาที)
-0.9991	0.0000	-0.6318	-0.0655
-0.9833	-0.0611	-0.5774	-0.0299
-0.9643	-0.0781	-0.5302	0.0081
-0.9415	-0.0923	-0.4908	0.0471
-0.9142	-0.1047	-0.4580	0.0869
-0.8814	-0.1143	-0.4306	0.1261
-0.8420	-0.1197	-0.4078	0.1623
-0.7947	-0.1196	-0.3888	0.1940
-0.7404	-0.1112	-0.3730	0.2205
-0.6861	-0.0931	-0.3597	0.2427

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้หรือเผยแพร่ในทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ข-2 ตัวอย่างข้อมูลดิบของแบบจำลองไฮโดรโซโคลนในแนวความเร็วในแนวแกนที่ระนาบ $x = 0$ ที่คำนวณได้โดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5 (ต่อ)

ตำแหน่ง (เมตร)	ความเร็ว (เมตร/วินาที)	ตำแหน่ง (เมตร)	ความเร็ว (เมตร/วินาที)
-0.3464	0.2657	0.0518	-0.0435
-0.3330	0.2926	0.0686	0.1394
-0.3227	0.3189	0.0836	0.3124
-0.3227	0.3189	0.0851	0.3298
-0.3102	0.3565	0.1013	0.4974
-0.2952	0.4068	0.1174	0.6248
-0.2773	0.4717	0.1340	0.7118
-0.2587	0.5410	0.1510	0.7585
-0.2406	0.6069	0.1687	0.7716
-0.2226	0.6654	0.1866	0.7569
-0.2046	0.7109	0.2046	0.7209
-0.1866	0.7374	0.2226	0.6706
-0.1687	0.7374	0.2406	0.6118
-0.1510	0.7032	0.2587	0.5495
-0.1340	0.6298	0.2773	0.4859
-0.1174	0.5128	0.2773	0.4859
-0.1013	0.3576	0.2952	0.4269
-0.0851	0.1738	0.3102	0.3803
-0.0836	0.1568	0.3227	0.3435
-0.0686	-0.0114	0.3330	0.3154
-0.0518	-0.1669	0.3464	0.2834
-0.0348	-0.2698	0.3597	0.2549
-0.0175	-0.3179	0.3730	0.2283
0.0000	-0.3247	0.3888	0.1981
0.0175	-0.2840	0.4078	0.1639
0.0348	-0.1908	0.4306	0.1265

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรที่ทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ข-2 ตัวอย่างข้อมูลดิบของแบบจำลองไฮโดรโซโคลนในแนวความเร็วในแนวแกนที่ระนาบ $x = 0$ ที่คำนวณได้โดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5 (ต่อ)

ตำแหน่ง (เมตร)	ความเร็ว (เมตร/วินาที)
0.4580	0.0874
0.4908	0.0486
0.5302	0.0115
0.5774	-0.0240
0.6318	-0.0576
0.6861	-0.0859
0.7404	-0.1099
0.7947	-0.1323
0.8420	-0.1548
0.8814	-0.1785
0.9142	-0.2023
0.9415	-0.2242
0.9643	-0.2427
0.9833	-0.2559
0.9991	0.0000

ตารางที่ ข-3 ตัวอย่างข้อมูลดิบของแบบจำลองไฮโดรโซโคลนในแนวความเร็วในแนวแกนที่ระนาบ $y = 0$ ที่คำนวณได้โดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5

ตำแหน่ง (เมตร)	ความเร็ว (เมตร/วินาที)	ตำแหน่ง (เมตร)	ความเร็ว (เมตร/วินาที)
-0.9991	0.0000	-0.8420	-0.1621
-0.9833	-0.1773	-0.7947	-0.1469
-0.9643	-0.1809	-0.7404	-0.1269
-0.9415	-0.1816	-0.6861	-0.1039
-0.9142	-0.1789	-0.6318	-0.0771
-0.8814	-0.1725	-0.5774	-0.0455

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ข-3 ตัวอย่างข้อมูลดิบของแบบจำลองไฮโดรโซโคลนในแนวความเร็วในแนวแกนที่ระนาบ $y = 0$ ที่คำนวณได้โดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5 (ต่อ)

ตำแหน่ง (เมตร)	ความเร็ว (เมตร/วินาที)	ตำแหน่ง (เมตร)	ความเร็ว (เมตร/วินาที)
-0.5302	-0.0112	-0.0686	0.0975
-0.4908	0.0255	-0.0518	-0.0913
-0.4580	0.0646	-0.0348	-0.2388
-0.4306	0.1047	-0.0175	-0.3281
-0.4078	0.1433	0.0000	-0.3643
-0.3889	0.1785	0.0175	-0.3536
-0.3730	0.2094	0.0348	-0.3010
-0.3597	0.2368	0.0518	-0.1938
-0.3464	0.2665	0.0686	-0.0342
-0.3331	0.3005	0.0836	0.1384
-0.3227	0.3310	0.0851	0.1559
-0.3102	0.3716	0.1013	0.3431
-0.2952	0.4237	0.1174	0.5000
-0.2773	0.4897	0.1340	0.6196
-0.2587	0.5603	0.1510	0.6954
-0.2406	0.6286	0.1687	0.7317
-0.2226	0.6917	0.1866	0.7341
-0.2046	0.7446	0.2046	0.7105
-0.1866	0.7811	0.2226	0.6682
-0.1687	0.7944	0.2406	0.6134
-0.1510	0.7768	0.2587	0.5522
-0.1340	0.7217	0.2773	0.4887
-0.1174	0.6227	0.2773	0.4887
-0.1013	0.4802	0.2952	0.4301
-0.0851	0.2982	0.3102	0.3845
-0.0836	0.2799	0.3227	0.3488

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 "ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ข-3 ตัวอย่างข้อมูลดิบของแบบจำลองไฮโดรโซโคลนในแนวความเร็วในแนวแกนที่ระนาบ $y = 0$ ที่คำนวณได้โดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5 (ต่อ)

ตำแหน่ง (เมตร)	ความเร็ว (เมตร/วินาที)
0.3330	0.3216
0.3464	0.2907
0.3597	0.2631
0.3730	0.2370
0.3888	0.2069
0.4078	0.1721
0.4306	0.1332
0.4580	0.0917
0.4908	0.0503
0.5302	0.0111
0.5774	-0.0250
0.6318	-0.0566
0.6861	-0.0811
0.7404	-0.1006
0.7947	-0.1169
0.8420	-0.1282
0.8814	-0.1340
0.9142	-0.1347
0.9415	-0.1315
0.9643	-0.1261
0.9833	-0.1194
0.9991	0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.