

การศึกษาผลสาคตวรรษของโพลีเอทิลีนในกรณีการสังเคราะห์สักรสีออกไซด์ด้วย
กระบวนการออกซิเดชันที่ใช้ความร้อนโดยการพ่นเป็นจังหวะ



ปริญญาโทมีงานทำเป็นส่วนตัวหนึ่งของการศึกษาของมหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์
สถานศึกษาเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๕๖

การศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์ด้วย
กระบวนการออกซิเดชันที่ใช้ความร้อนโดยการพ่นเป็นจังหวะ



ปฏิญานินพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2556
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODELING OF ZINC OXIDE
SYNTHESIS VIA PULSED THERMAL OXIDATION PROCESS



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ACADEMIC YEAR 2013
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์
ด้วยกระบวนการออกซิเดชันที่ใช้ความร้อนโดยการพ่นเป็นจังหวะ
โดย นางสาวกิตติญา บัวสรวง
นางสาวอุทัยชนก จันทร์ศิริ
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.เรีนฤดี เบญจางคประเสริฐ
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์)

.....กรรมการ
(อ.บุญชัย โชติวิริยวาณิช)

.....กรรมการ
(ผศ.เรีนฤดี เบญจางคประเสริฐ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันที่ใช้ความร้อนโดยการพ่นเป็นจังหวะ
โดย	นางสาวกิตติญา บัวสรวง นางสาวอุทัยชนก จันทศิริ
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2.556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.รีณฤดี เบญจางคประเสริฐ

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเบื้องต้น ศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วนที่มีต่อการทำนายปรากฏการณ์การสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์และศึกษาปรากฏการณ์การไหลแบบเจ็ตในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในระบบสามมิติเนื่องจากห้วงคิดภายในเครื่องปฏิกรณ์เป็นการไหลแบบเจ็ต ซึ่งเป็นการไหลที่มีสามลักษณะ คือช่วงแรกจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar) ถัดมาเป็นการไหลแบบช่วงต่อ (transition) จากนั้นจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent) การไหลแบบเจ็ตมีความปั่นป่วนสูงถึงแม้ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ต่ำ ในการทดลองจึงต้องเลือกใช้แบบจำลองในรูปแบบ 3 มิติ เพื่อมิให้เป็นการทำลายธรรมชาติของความปั่นป่วนซึ่งจะเกิดในระบบที่เป็น 3 มิติ เท่านั้น จากนั้นทำการศึกษาแบบจำลองที่เหมาะสมโดยศึกษาทั้งสิ้น 4 แบบจำลองได้แก่ แบบจำลอง k-epsilon, k-omega, LES (large eddy simulation) และ laminar จากการศึกษาพบว่าแบบจำลอง k-epsilon และ k-omega เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการศึกษาลักษณะการไหลแบบเจ็ตภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมากที่สุด แทนการจำลองด้วยระเบียบวิธี DNS ซึ่งใช้ระยะเวลานานและสิ้นเปลืองพลังงานมาก แม้แบบจำลองดังกล่าวมีความผิดพลาดอยู่บ้าง แต่แบบจำลอง k-epsilon และ k-omega ใช้เวลาในการคำนวณน้อยและให้ความถูกต้องใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODELING OF ZINC OXIDE SYNTEHESIS VIA PULSED THERMAL OXIDATION PROCESS	
By	Miss Kittiya Buasuang	Miss Ruthaichanok Chansiri
Degree	Bachelor of Engineering	
Program	Chemical Engineering	
Year	2013	
Advisor	Dr. Santi Wattananusorn	
Co-Advisor	Assist. Prof. Ruenruedee Benjangkprasert	

ABSTRACT

The purpose of this report was to study on basic of computational fluid dynamic, the effect of turbulent model resulted in zinc oxide synthesis in three dimensional reactor and studied on properties of jet flow in computational fluid dynamic. Because of nozzle, the flow became as jet flow in reactor. The specific property of jet flow can be divided into three parts. First region was laminar flow . Next was transition region and last was turbulent flow. Although it is low Renolds number, it is highly unsteady. Using three dimensional to conserve unsteady flow. The researchers had analyzed the proper models for this situation that was k-epsilon, k-omega, LES (large eddy simulation) and laminar. The results shown that the best model for solving in this situation was k-epsilon and k-omega model instead of DNS algorithm. DNS is accurately for simulation jet flow but it uses long time and high energy for solving. Although k-epsilon and k-omega model had similar errors with all models in this study but it used a few time than others

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่องการศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันที่ใช้ความร้อนโดยการพ่นเป็นจังหวะ ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณบุคคลต่างๆ ดังนี้

ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ และ ผศ.เรีนฤติ เบญจางคประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำด้านทฤษฎี ชี้แนะแนวทางแก้ไขปัญหาในการทำโครงการ

อาจารย์บุญชัย โชติวิริยวานิชย์ และ ผศ.เรีนฤติ เบญจางคประเสริฐ คณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์

อาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญาานิพนธ์และเป็นพื้นฐานสำคัญในการประยุกต์ใช้

นายเอกราช บำรุงไทยชัยชาญ ผู้ให้คำปรึกษาด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ที่แนะนำและให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการทำโครงการตั้งแต่เริ่มต้นจนจบโครงการ

นายณัฐวัตร ใจกลม นายทัฬหไทย สีเทา นางสาวดวงกมล อ่อนพรม นายกฤษณะ สายหยุด และ นายชาคร เอกะวิภาต ที่ให้คำปรึกษาในการทำโครงการ

นางสาวกิตติญา บัวสรวง

นางสาวฤทัยชนก จันทร์ศิริ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	v
สารบัญรูปภาพ.....	x
สารบัญตาราง.....	xi
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	xii
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (computational fluid dynamics, CFD)	4
2.2 การทำงานของโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	4
2.2.1 กระบวนการก่อนการคำนวณ (pre processor).....	4
2.2.2 กระบวนการคำนวณ (solver).....	5
2.2.3 กระบวนการหลังการคำนวณ (post processor).....	5
2.3 สมการที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์การไหล.....	5
2.3.1 สมการควบคุม (governing equations).....	5
2.3.2. สมการปฏิกิริยาเคมี (reaction rate)	7

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.3 สมการอนุรักษ์มวลสาร (species mass transport)	7
2.4. ความปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน.....	7
2.4.1 ความปั่นป่วน (turbulent).....	7
2.4.2 ลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วน (characteristics of the turbulent flow)...	8
2.4.3 สมการเรย์โนลด์เฉลี่ยนาเวียร์-สโตกส์ (Reynolds average Navier–Stokes equations: RANS).....	9
2.4.4 แบบจำลองมาตรฐาน k-epsilon.....	11
2.4.5 แบบจำลองมาตรฐาน k-omega.....	12
2.5 large eddy simulation (LES) model.....	14
2.5.1 แบบจำลองสเกลขนาดเล็ก (subgrid scale models).....	15
2.6 แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ finite-rate (laminar finite-rate model).....	16
2.7 การไหลแบบเจ็ต (jet).....	17
2.7.1 กลไกการไหลแบบเจ็ต.....	17
2.8 สังกะสีออกไซด์ (ZnO).....	18
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
บทที่ 3 การจำลอง.....	21
3.1 การกำหนดค่าแบบจำลอง.....	21
3.1.1 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์สังกะสีออกไซด์แบบท่อ.....	21
3.1.2 การสร้างกริดและการกำหนดค่า.....	23
3.1.3 การกำหนดสภาวะขอบเขต.....	24
3.1.4 สมมติฐานของแบบจำลอง.....	25
3.1.5 สมการควบคุมแบบจำลอง.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังสงวนลิขสิทธิ์ของงานวิจัยฉบับนี้ไว้ด้วย

สารบัญ (ต่อ)

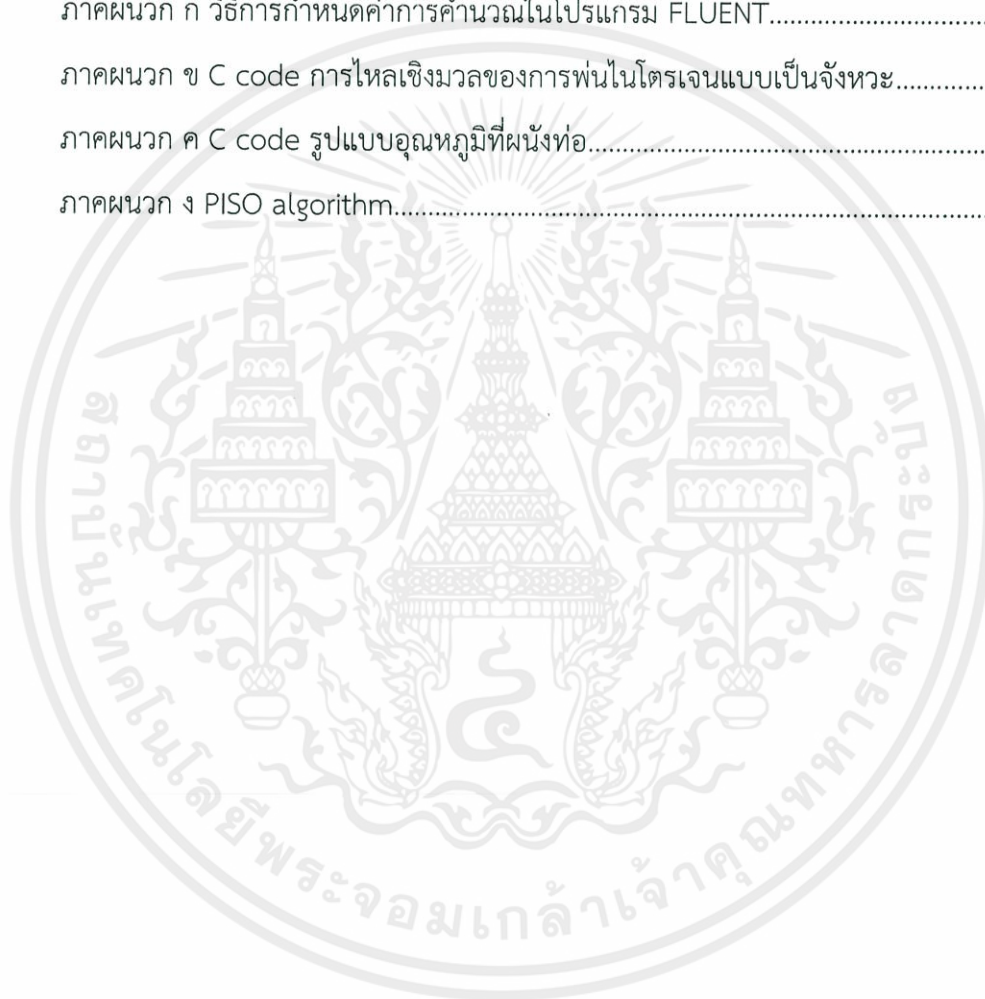
หน้า

3.1.6	สมการความปั่นป่วน.....	27
3.1.7	วิธีเชิงตัวเลข.....	28
3.2	การจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี.....	28
3.3	ปัจจัยที่ศึกษาในปริศยานิพนธ์.....	29
บทที่ 4	ผลและการวิเคราะห์.....	31
4.1	บทนำ.....	31
4.2	เปรียบเทียบผลได้ของสิ่งกะสืออกไซด์จากการจำลองด้วยแบบจำลองต่างๆ.....	31
4.2.1	การจำลองการไหลแบบเจ็ตภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อด้วย แบบจำลอง k-epsilon.....	32
4.2.2	การจำลองการไหลแบบเจ็ตภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อด้วย แบบจำลอง k-omega.....	33
4.2.3	การจำลองการไหลแบบเจ็ตภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อด้วย แบบจำลอง LES.....	33
4.2.4	การจำลองการไหลแบบเจ็ตภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อด้วย แบบจำลอง laminar.....	33
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	43
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	43
5.1.1	ศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วนที่มีผลต่อการทำนายปรากฏการณ์ การไหลแบบเจ็ตภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ.....	43
5.1.2	ศึกษาปรากฏการณ์การไหลแบบเจ็ต โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในระบบ สามมิติ.....	43
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	44

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บรรณานุกรม.....	45
ภาคผนวก.....	46
ภาคผนวก ก วิธีการกำหนดค่าการคำนวณในโปรแกรม FLUENT.....	47
ภาคผนวก ข C code การไหลเชิงมวลของการพ่นไนโตรเจนแบบเป็นจังหวะ.....	56
ภาคผนวก ค C code รูปแบบอนุกรมที่ผนังท่อ.....	57
ภาคผนวก ง PISO algorithm.....	58



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ความเร็วที่ตำแหน่งที่สนใจของการไหลแบบปั่นป่วน.....	9
รูปที่ 2.2 กลไกการไหลแบบเจ็ต.....	18
รูปที่ 2.3 สังกะสีออกไซด์.....	18
รูปที่ 3.1 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการคำนวณ.....	21
รูปที่ 3.2 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการคำนวณ.....	22
รูปที่ 3.3 ขยายบริเวณทางออกอากาศ.....	22
รูปที่ 3.4 (a) กริดตามพื้นที่หน้าตัดเครื่องปฏิกรณ์ (b) กริดภายในเครื่องปฏิกรณ์.....	23
รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (K) กับระยะทางตามแนวยาวท่อ (m).....	24
รูปที่ 3.6 กราฟการไหลเชิงมวลของการพ่นไนโตรเจนเป็นจังหวะกับเวลา.....	25
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการดำเนินการ.....	29
รูปที่ 3.8 (a) แบบจำลองการพ่นไนโตรเจนเป็นจังหวะที่ตำแหน่ง 5 mm	30
รูปที่ 3.8 (b) แบบจำลองการพ่นไนโตรเจนเป็นจังหวะที่ตำแหน่ง 25 mm	30
รูปที่ 3.8 (c) แบบจำลองการพ่นไนโตรเจนเป็นจังหวะที่ตำแหน่ง 55 mm	30
รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบผลได้ของสังกะสีออกไซด์จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง.....	32
รูปที่ 4.2 (a1), (b1), (c1), (d1) คอนทัวร์ของความเร็ว วินาทีที่ 20 (ไม่มีการพ่นไนโตรเจน) ที่ระยะ 5 mm จากปากทางออกท่ออากาศ	35
รูปที่ 4.3 (a2), (b2), (c2), (d2) คอนทัวร์ของความเร็ว วินาทีที่ 11 (มีการพ่นไนโตรเจน) ที่ระยะ 5 mm จากปากทางออกท่ออากาศ.....	36
รูปที่ 4.4 (a3), (b3), (c3), (d3) คอนทัวร์ของความเร็ว วินาทีที่ 20 (ไม่มีการพ่นไนโตรเจน) ที่ระยะ 25 mm จากปากทางออกท่ออากาศ.....	37
รูปที่ 4.5 (a4), (b4), (c4), (d4) คอนทัวร์ของความเร็ว วินาทีที่ 11 (มีการพ่นของไนโตรเจน) ที่ระยะ 25 mm จากปากทางออกท่ออากาศ.....	38

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.6 (a5), (b5), (c5), (d5) คอนทัวร์ของความเร็ว วินาทีที่ 20 (ไม่มีการพ่นไนโตรเจน) ที่ระยะ 55 mm จากปากทางออกท่ออากาศ.....	39
รูปที่ 4.7 (a6), (b6), (c6), (d6) คอนทัวร์ของความเร็ว วินาทีที่ 11 (มีการพ่นไนโตรเจน) ที่ระยะ 55 mm จากปากทางออกท่ออากาศ.....	40
รูปที่ 4.8 (a7), (b7), (c7), (d7) กระแสการไหลของความเร็ว วินาทีที่ 20 (ไม่มีการพ่นไนโตรเจน) ที่ระยะ 25 mm จากปากทางออกท่ออากาศ.....	41
รูปที่ 4.9 (a8), (b8), (c8), (d8) กระแสการไหลของความเร็ว วินาทีที่ 11 (มีการพ่นของไนโตรเจน) ที่ระยะ 25 mm จากปากทางออกท่ออากาศ	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน $k - \epsilon$	12
ตารางที่ 2.2.คุณสมบัติของสังกะสีออกไซด์.....	19
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์.....	22
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลกริดในเครื่องปฏิกรณ์แบ่งตามระยะห่างระหว่างท่ออากาศและ ท่อพ่นไนโตรเจนเป็นจังหวะ.....	23
ตารางที่ 3.3 ความเร็วแก๊สทางเข้า.....	24
ตารางที่ 3.4 การตั้งค่าระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	28
ตารางที่ 3.5 ตัวแปรภายในแบบจำลองที่ศึกษาทั้งหมด.....	30
ตารางที่ 4.1 ผลได้ของสังกะสีออกไซด์ (g) ในระยะเวลา 22 s ด้วยแบบจำลองต่างๆ.....	31
ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองต่างๆ กับผลการทดลอง.....	34
ตารางที่ 4.3 เวลาที่ใช้ในการคำนวณแต่ละแบบจำลอง.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์

ρ ความหนาแน่นของของไหล

p ความดัน

p' ความดันแกว่ง

u, v, w ความเร็วในทิศทาง x, y, z ตามลำดับ

u', v', w' ความเร็วแกว่งในทิศทาง x, y, z ตามลำดับ

$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ ความเร็วเฉลี่ยในทิศทาง x, y, z ตามลำดับ

u' ความเร็วแกว่ง

\bar{u} ความเร็วเฉลี่ย

U เวกเตอร์ความเร็ว

U' เวกเตอร์ความเร็วแกว่ง

\bar{U} เวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ย

τ เทนเซอร์ของความเค้น

V ความเร็วของของไหล

μ ความหนืดของของไหล

t เวลา

k thermal conductivity

k Therbulent kinetic energy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ค่าคงที่อัตรา
 ไม่สามารถใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุผลแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T	อุณหภูมิ
\bar{J}_i	Diffusion flux of species i
Y_i	Mass fraction of species i
S_h	Energy source term
S_i	Species source term
S_k	Turbulent kinetic energy source term
S_{Mx}, S_{My}, S_{Mz}	Momentum source term ในแนวแกน x,y,z ตามลำดับ
S_E	Dissipation rate of turbulent kinetic energy source term
δ_{ij}	Kronecker delta
ε	Dissipation rate of turbulent kinetic energy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

การไหลแบบเจ็ตเป็นลักษณะของการไหลรูปแบบหนึ่งที่สามารถพบเห็นได้ในงานด้านวิศวกรรมทั่วไป เช่น การไหลแบบเจ็ตที่ปล่อยควันของโรงงานอุตสาหกรรมหรือท่อปล่อยน้ำเสียออกจากโรงงาน ลักษณะการไหลเฉพาะของเจ็ตคือ เป็นการไหลแบบเฉือนทำให้เกิดการเหนียวนำของไหลภายนอกมาผสมภายในลำเจ็ตและมีส่วนที่เป็นการผสมเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนในระดับสเกลเล็กและใหญ่ ทำให้สามารถผสมสารในการสังเคราะห์สารผลิตภัณฑ์อย่างมีประสิทธิภาพ การสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์ในวัฏภาคแก๊ส เป็นหนึ่งในการประยุกต์ใช้การไหลแบบเจ็ตเพื่อช่วยให้เกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างสังกะสีกับแก๊สออกซิเจนที่อยู่ในอากาศ

ปัจจุบันนิยมใช้ผลิตภัณฑ์สังกะสีออกไซด์ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย เช่น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมยาง ใช้ผลิตยางล้อรถยนต์ สายเคเบิล เซรามิก และสารป้องกันแสงแดดในเครื่องสำอาง จึงมีความน่าสนใจที่จะศึกษาออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ที่จะตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมดังกล่าว ซึ่งขณะนี้ได้มีการนำเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) มาใช้ในงานด้านวิศวกรรมมากขึ้น โปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยความสามารถของคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณสามารถวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลได้ในระยะเวลาอันสั้นและประหยัดค่าใช้จ่าย ทำให้กระบวนการออกแบบมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแบบเดิมที่ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้มีการใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณอย่างแพร่หลายมากขึ้นและเข้ามามีบทบาทต่อการศึกษาในปัจจุบันเพราะพฤติกรรมการไหลของของไหลสามารถอธิบายโดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แก้ไขปัญหาทั้งทางด้าน aerospace engineering และ fluid dynamics บางกรณีการทดลองในห้องปฏิบัติการไม่สามารถทำได้ แต่เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถทำได้ ทั้งนี้ต้องเข้าใจปัญหาและสมการที่ใช้อย่างแท้จริง จึงนับได้ว่าเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเหมาะที่จะนำมาศึกษาในปริญญานิพนธ์นี้โดยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถทำนายแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยา โดยอาศัยสมการการไหล สนามอุณหภูมิความปั่นป่วน นำไปสู่การออกแบบที่ถูกต้องและไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประหยัดค่าใช้จ่ายที่สุด จากงานวิจัยของเอกราช [2] เรื่องการศึกษาด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในด้านอิทธิพลของการพ่นไนโตรเจนเป็นจังหวะที่มีต่อการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันที่ใช้ความร้อนในรูปแบบ 2 มิติ มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการไหลแบบเจ็ตมีความปั่นป่วนซึ่งเป็นลักษณะการไหลที่แสดงออกมาในรูปแบบ 3 มิติ การจำลองในรูปแบบ 2 มิติ จึงถือเป็นการทำลายธรรมชาติของความปั่นป่วนไป ทำให้ผลการศึกษาที่มีความผิดพลาดบางส่วน จากข้อจำกัดดังกล่าวจึงเกิดปริญญานิพนธ์นี้เพื่อเพิ่มความถูกต้องในการจำลองเพื่ออธิบายปรากฏการณ์การไหลแบบเจ็ตและเป็นข้อมูลในการประยุกต์ใช้กับการสังเคราะห์สารอื่นๆ ในรูปแบบนี้ต่อไป โดยการศึกษาลักษณะการไหลแบบเจ็ตด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) จะสร้างแบบจำลองและกริดขึ้นโดยโปรแกรม GAMBIT และใช้โปรแกรม FLUENT ในการคำนวณ ก่อนนำผลการจำลองมาวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อสำหรับการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานปริญญานิพนธ์

- 1.2.1 ศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเบื้องต้น
- 1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองที่มีต่อการทำนายปรากฏการณ์การสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์
- 1.2.3 ศึกษาปรากฏการณ์การไหลแบบเจ็ตในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในระบบสามมิติ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมในการคำนวณการไหลแบบเจ็ตในระบบสามมิติ ได้แก่ แบบจำลอง standard k-epsilon, k-omega และ large eddy simulation (LES) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อสำหรับการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์

1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการพ่นไนโตรเจนเป็นจังหวะที่ตำแหน่ง 5, 25 และ 55 mm จากปากทางออกของอากาศในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อสำหรับการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมกับการอธิบายปรากฏการณ์การไหลแบบเจ็ตในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อสำหรับการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์

1.4.2 เข้าใจปรากฏการณ์การไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์

1.4.3 เป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ในวัฏภาคแก๊ส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (computational fluid dynamics, CFD) [1]

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (computational fluid dynamics, CFD) เป็นการคำนวณและวิเคราะห์ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ของไหล (fluid dynamics) โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งอาศัยการแปลงโดเมนต่อเนื่องให้เป็นโดเมนไม่ต่อเนื่อง โดยส่วนใหญ่แล้วมักใช้การแบ่งช่วงของโดเมนปริภูมิให้เป็นเซลล์เล็กๆ เพื่อก่อให้เกิดโครงตาข่ายเชิงปริมาตร (volume mesh) หรือกริด (grid) แล้วใช้อัลกอริธึม (algorithm) ที่เหมาะสมในการแก้สมการของการเคลื่อนที่ โครงตาข่ายอาจมีลักษณะรูปทรงแบบมีโครงสร้างแน่นอน (structured mesh) หรือแบบไม่มีโครงสร้างที่แน่นอน (unstructured mesh) ถ้าปัญหามีพลวัต (dynamic) สูงและมีสเกลขนาดใหญ่อาจมีการปรับความละเอียดของโครงตาข่ายแบบอแดปทีฟ (adaptive mesh refinement methods) ตัวอย่างการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในแต่ละด้านมีดังนี้

- วิศวกรรมเคมี เช่น การไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ การแยกสาร
- วิศวกรรมเครื่องกล เช่น การไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้า เช่น การทำความเย็นบนอุปกรณ์และแผงวงจรไฟฟ้า
- วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เช่น การกระจายตัวของมลพิษในอากาศ
- วิศวกรรมชีวการแพทย์ เช่น การไหลในหลอดเลือดแดงและหลอดเลือดดำ
- อุตุนิยมวิทยา เช่น การทำนายสภาพอากาศ
- อุทกวิทยาและชลศาสตร์ เช่น การไหลในแม่น้ำ ปากน้ำ และมหาสมุทร
- อากาศพลศาสตร์ของเครื่องบินและยานพาหนะ เช่น การหาแรงยกและแรงต้าน

2.2 การทำงานของโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [1]

การทำงานของโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่

2.2.1 กระบวนการก่อนการคำนวณ (pre processor)

กระบวนการก่อนการคำนวณเป็นกระบวนการเตรียมความพร้อมก่อนการคำนวณ เช่น

เอกสารนี้ กำหนดโดเมนของการคำนวณ (computational domain) , การสร้างกริด (grid) , การเลือกสมการก้ำ
ไม่ว่ากรณี ในการคำนวณกำหนดคุณสมบัติของของไหล เป็นต้น อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 กระบวนการคำนวณ (solver)

วิธีเชิงตัวเลขที่สำคัญแบ่งเป็น 3 วิธีคือ วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (finite difference method: FDM) วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method: FEM) และวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method: FVM) ขั้นตอนของกระบวนการคำนวณประกอบไปด้วย การประมาณค่าตัวแปรการไหลที่ไม่ทราบค่าด้วยการเฉลี่ยฟังก์ชันอย่างง่าย การแยก (discretisation) คือการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ให้เป็นสมการพีชคณิต (algebraic equations) และการหาคำตอบของสมการพีชคณิต

2.2.3 กระบวนการหลังการคำนวณ (post processor)

เป็นกระบวนการแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ สามารถแสดงในรูปแบบของกราฟ คอนทัวร์ เวกเตอร์ พื้นผิว 2 มิติ และ 3 มิติ การติดตามอนุภาค เป็นต้น

2.3 สมการที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์การไหล [1]

2.3.1 สมการควบคุม (governing equations)

สมการควบคุมจะใช้กฎทางฟิสิกส์ 3 ข้อ ซึ่งประกอบไปด้วย กฎการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (conservation of momentum) และกฎการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) โดยจะเขียนสมการควบคุมได้ดังนี้

2.3.1.1 สมการการอนุรักษ์มวล (continuity equation)

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

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

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (3)$$

2.3.1.2 สมการโมเมนตัม (momentum equation)

จากกฎข้อที่สองของนิวตันกล่าวว่า แรงคืออัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม ซึ่งสามารถแบ่งแรงออกเป็น 2 ประเภท คือ

- แรงกระทำต่อพื้นผิวของไหล (surface force) ประกอบด้วย แรงดัน (pressure force) และแรงเนื่องจากความหนืด (viscous force)

- แรงกระทำต่อปริมาตรของไหล เช่น แรงโน้มถ่วง แรงหนีศูนย์กลาง เป็นต้น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการโมเมนตัมในรูปแบบอนุพันธ์

สมการโมเมนตัมในแนวแกน x

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (4)$$

สมการโมเมนตัมในแนวแกน y

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (5)$$

สมการโมเมนตัมในแนวแกน z

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + S_{Mz} \quad (6)$$

2.3.1.3 สมการพลังงาน (energy equation)

จากกฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์พลังงานไม่มีการสูญหายหรือสร้างขึ้นใหม่ได้แต่พลังงานเปลี่ยนแปลงจากพลังงานรูปแบบหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง อัตราความร้อนทั้งหมดที่เข้าสู่อนุภาคของไหลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร แสดงได้ดังนี้

$$-\nabla q = -k \nabla \cdot (k \nabla T)$$

อัตราของงานทั้งหมดที่กระทำต่ออนุภาคของไหลโดยแรงเนื่องจากแรงกระทำต่อพื้นผิวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} -\nabla \cdot (\rho u) + \left(\frac{\partial (u \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (u \tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u \tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial (v \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (v \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (u \tau_{yz})}{\partial z} + \frac{\partial (w \tau_{xz})}{\partial x} \right. \\ \left. + \frac{\partial (w \tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (v \tau_{zz})}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

ดังนั้นเขียนสมการพลังงานรวมได้ดังนี้

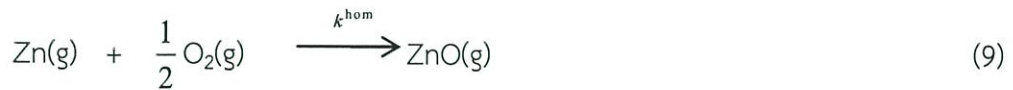
$$\begin{aligned} \rho \frac{DE}{Dt} = -\nabla \cdot (\rho u) + \left(\frac{\partial (u \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (u \tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u \tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial (v \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (v \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (u \tau_{yz})}{\partial z} \right. \\ \left. + \frac{\partial (w \tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (w \tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (v \tau_{zz})}{\partial z} \right) + \nabla \cdot (k \nabla T) + S_E \end{aligned} \quad (8)$$

โดย S_E คือ แหล่งพลังงาน (energy source)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 สมการปฏิกิริยาเคมี (reaction rate)

ในกระบวนการออกซิเดชันโดยอาศัยความร้อนการออกซิไดซ์ของไอสังกะสีออกไซด์ เป็นไปตามปฏิกิริยาเอกพันธ์ในวัฏภาคแก๊ส



อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสมการนี้เป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$-r_{\text{Zn}} = r_{\text{ZnO}} = k_0 [\text{Zn}][\text{O}_2]^{1/2} \quad (10)$$

$$K_0 = 8.0 \times 10^8 \exp\left(-\frac{1.29 \times 10^8}{RT}\right) \text{m}^{3/2} \cdot \text{mol}^{-1/2} \cdot \text{s}^{-1} \quad (11)$$

2.3.3. สมการอนุรักษ์มวลสาร (species mass transport)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho Y_i \bar{U}_j) = \frac{\partial \bar{J}_i}{\partial x_j} + R_i + S_i \quad (12)$$

$$\text{เมื่อ } \bar{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_i}{Sc_i}\right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T}$$

2.4 ความปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน [1]

2.4.1 ความปั่นป่วน (turbulent)

การไหลแบบปั่นป่วนหรือการไหลที่ไม่เป็นระเบียบ เป็นการไหลชนิดหนึ่ง ซึ่งรูปแบบการไหลของของไหลสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) การไหลแบบทรานซิชัน (transition flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (turbulence flow) โดยรูปแบบการไหลสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยตัวเลขเรย์โนลด์ (reynolds number: Re) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของแรงเฉื่อย (inertia force) และแรงเนื่องจากความหนืด (viscous force) แสดงได้ดังนี้

$$\text{Re} = \frac{\text{Inertia force}}{\text{Viscous force}} = \frac{\rho \bar{v}^2}{\mu \bar{v} / L_c} = \frac{\rho \bar{v} L_c}{\mu} = \frac{\bar{v} L_c}{\nu}$$

โดย \bar{v} คือ ความเร็วเฉลี่ย

L_c คือ ความยาวคุณลักษณะ (characteristic length)

ν คือ ความหนืดเชิงจลน์ (kinetic viscosity: $\nu = \mu / \rho$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเพื่อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองการไหลพบว่าที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำกว่าตัวเลขเรย์โนลด์วิกฤต (critical reynolds number: Re_{crit}) การไหลนั้นจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ คือ ชั้นของไหลแต่ละชั้นจะไหลผ่านชั้นของของไหลอื่นตามลำดับ ถ้าสภาวะขอบเขตไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการไหลจะเป็นการไหลแบบคงตัว (steady) และที่ตัวเลขเรย์โนลด์สูงกว่าตัวเลขเรย์โนลด์วิกฤตจะเกิดความซับซ้อนซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการไหล ที่สภาวะสุดท้ายพฤติกรรมของการไหลจะเป็นแบบสุ่ม (random) และปั่นป่วนวุ่นวาย (chaotic) ถึงแม้ว่ากำหนดให้สภาวะขอบเขตคงที่ และเรียกลักษณะการไหลแบบนี้ว่าการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow)

การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) โดยทั่วไปเกิดขึ้นกับของไหลที่มีค่าความหนืด (viscosity) ต่ำและไหลด้วยความเร็วสูง หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ของไหลไหลผ่านมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของไหลที่ไหลภายในท่อ รูปแบบการไหลของของไหลมีทิศทางและความเร็วที่ไม่แน่นอน และมีการผสมกันระหว่างชั้นของไหลในขณะเคลื่อนที่

2.4.2 ลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วน (characteristics of the turbulent flow)

การไหลแบบปั่นป่วนมีลักษณะดังต่อไปนี้

2.4.2.1 การไหลแบบปั่นป่วนมีความไม่คงตัวสูง (highly unsteady): โดยคุณสมบัติการไหลเป็นฟังก์ชันกับเวลา ตัวอย่างการวัดความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วน ดังรูปที่ 2.1

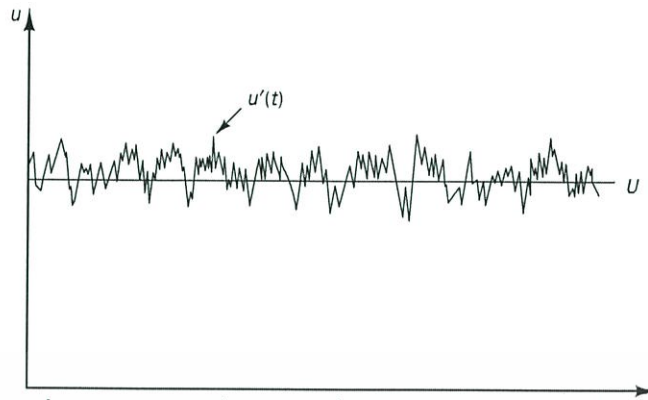
2.4.2.2 การไหลแบบปั่นป่วนมีลักษณะไม่ปกติ (irregularity): เป็นลักษณะการไหลที่ทำให้การหาค่าตอบแบบแม่นยำตรงเป็นไปไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีทางสถิติ (statistical)

2.4.2.3 การแพร่กระจาย (diffusivity): การไหลแบบปั่นป่วนต้องแสดงลักษณะการแพร่กระจาย ถ้ารูปแบบการไหลมีลักษณะสุ่ม (random) แต่ไม่แสดงการกระจายตัวของการแกว่งไปมาของความเร็วที่รอบๆของไหล การไหลนี้จะไม่เรียกว่าการไหลแบบปั่นป่วน ลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วนนี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็วและเพิ่มอัตราการถ่ายโอนของโมเมนตัม ความร้อนและมวล

2.4.2.4 การไหลแบบปั่นป่วนเกิดขึ้นในสามมิติ (three dimensional): การไหลแบบปั่นป่วนเป็นการไหลแบบสามมิติและเกิดการหมุนวน (rotational) ของของไหล

2.4.2.5 การสลายตัว (dissipative): การไหลแบบปั่นป่วนสามารถสลายตัวได้

2.4.2.6 ตัวเลขเรย์โนลด์ (reynolds number): การไหลแบบปั่นป่วนมักเกิดที่ตัวเลขเรย์โนลด์สูงแต่ไม่จำเป็นเสมอไปที่เลขเรย์โนลด์ต่ำก็สามารถเกิดการไหลแบบปั่นป่วนได้



รูปที่ 2.1 ความเร็วที่ตำแหน่งที่สนใจของการไหลแบบปั่นป่วน

2.4.3 สมการเรย์โนลด์เฉลี่ยนาเวียร์-สโตกส์ (Reynolds average Navier–Stokes equations: RANS)

จากลักษณะการไหลที่ไม่ปกติของการไหลแบบปั่นป่วนทำให้การคำนวณการเคลื่อนที่ของอนุภาคของไหลทั้งหมดไม่ได้ สามารถแก้ได้โดยใช้วิธีทางสถิติ ซึ่งคุณสมบัติการไหลฉับพลัน φ (instantaneous flow property) สามารถแยกได้เป็นคุณสมบัติการไหลเฉลี่ยตามเวลา $\bar{\varphi}$ (time-averaged flow property) และคุณสมบัติของของไหลแกว่ง φ' (fluctuation flow property) แสดงได้ดังนี้

$$\varphi(t) = \bar{\varphi} + \varphi'(t) \quad (13)$$

กระบวนการนี้เรียกว่าการแยกเรย์โนลด์ (Reynolds decomposition) โดย Osborne Reynolds เป็นคนแรกที่เสนอวิธีนี้ นิยามของคุณสมบัติการไหลเฉลี่ยตามเวลาและคุณสมบัติการไหลแกว่งเฉลี่ยตามเวลาแสดงได้ดังนี้

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi(t) dt \quad (14)$$

$$\overline{\varphi'} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi'(t) dt \equiv 0 \quad (15)$$

ข้อมูลการแกว่งของการไหลหาได้จากค่าเฉลี่ยกำลังสองของการแกว่งแสดงได้ดังนี้

$$\varphi_{rms} = \sqrt{\overline{(\varphi')^2}} = \left[\frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} (\varphi')^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

พลังงานจลน์ปั่นป่วนต่อหน่วยมวลนิยามเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังสงวนลิขสิทธิ์ไว้ด้วย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไป (17)

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

ความเข้มข้นของความปั่นป่วน (turbulence intensity: T_i) เป็นความเชื่อมโยงระหว่างพลังงานจลน์ปั่นป่วนและความเร็วอ้างอิง (U_{ref})

$$T_i = \frac{\left(\frac{2}{3}k\right)^{\frac{1}{2}}}{U_{ref}} \quad (18)$$

การแยกเรย์โนลด์ของความดันเวกเตอร์ความเร็วและองค์ประกอบความเร็วซึ่งประกอบด้วยความเร็วในแนวแกน x y และ z แสดงได้ดังนี้

$$p(t) = \bar{p} + p'(t) \quad (19)$$

$$U(t) = \bar{U} + U'(t) \quad (20)$$

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (21)$$

$$v(t) = \bar{v} + v'(t) \quad (22)$$

$$w(t) = \bar{w} + w'(t) \quad (23)$$

อิทธิพลของการแกว่งที่มีต่อการไหลเฉลี่ยสามารถหาได้จากการแทนที่สมการที่ (19) - (23) ลงในสมการควบคุมและใช้นิยามของการเฉลี่ยคุณสมบัติการไหลตามเวลาดังแสดงในสมการที่ (14) และ (15)

สมการความต่อเนื่องของของไหลอัดตัวได้สำหรับการไหลเฉลี่ยแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{w}) = 0 \quad (24)$$

หรือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U}) = 0 \quad (25)$$

สมการโมเมนตัมของของไหลอัดตัวได้ในทิศทาง x ทิศทาง y และทิศทาง z สำหรับการไหลเฉลี่ยแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{U}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} + \left[-\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{u'^2}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{u'w'}) \right] + S_{Mx} \quad (26)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{U}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} + \left[-\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{v'u'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{v'^2}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{v'w'}) \right] + S_{My} \quad (27)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{w}) + \nabla \cdot (\rho \bar{w} \bar{U}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} + \left[-\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{w'u'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{w'v'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{w'^2}) \right] + S_{Mz} \quad (28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีการเผยแพร่ข้อมูลใดๆและสิ่งอื่นใดที่อาจก่อให้เกิดความเสียหาย
เรียกสมการที่ (26) - (28) ว่าสมการเรย์โนลด์ (Reynolds equation) และใน
วงเล็บที่เพิ่มขึ้นมาในสมการที่ (26) - (28) มีความสัมพันธ์กับความเร็วแกว่งปั่นป่วน (turbulent

velocity fluctuation) ส่วนความเค้นปั่นป่วน (turbulent stress) พิเศษนี้เรียกว่าความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds stress) ใช้อธิบายธรรมชาติของการแพร่กระจายความปั่นป่วนเพื่อความสะดวก ความเค้นเรย์โนลด์สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\tau_{ij}^{(t)} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_i \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (29)$$

โดย μ_i คือ ความหนืดปั่นป่วน (turbulent viscosity) หรือความหนืดหมุนวน (eddy viscosity) ซึ่งขึ้นกับตำแหน่ง

ความสัมพันธ์ในสมการที่ (29) นำเสนอโดย Boussinesq ในปี ค.ศ. 1877 ดังนั้นสมการที่ (26), (27) และ (28) สามารถแสดงใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{U}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu_{eff} \nabla^2 \bar{u} + S_{Mx} \quad (30)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{U}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu_{eff} \nabla^2 \bar{v} + S_{My} \quad (31)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{w}) + \nabla \cdot (\rho \bar{w} \bar{U}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu_{eff} \nabla^2 \bar{w} + S_{Mz} \quad (32)$$

โดย μ_{eff} คือ ความหนืดประสิทธิภาพ (Effective viscosity: $\mu_{eff} = \mu + \mu_i$)

แบบจำลองความปั่นป่วนเป็นวิธีคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนในงานเชิงวิศวกรรม

2.4.4 แบบจำลองมาตรฐาน k-epsilon

แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่นิยมใช้ซึ่งคิดค้นขึ้นโดย Launder และ Spalding แบบจำลองประกอบไปด้วยสมการการถ่ายโอนพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและสมการการถ่ายโอนอัตราการผลิตตัวของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

สมการการถ่ายโอนพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (33)$$

สมการการถ่ายโอนอัตราการผลิตตัวของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (34)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{โดย } \mu_t &= \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \\ G_k &= -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \\ G_b &= \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \\ Y_M &= 2\rho \varepsilon M_t^2 \\ C_{3\varepsilon} &= \tanh\left|\frac{y}{u}\right| \end{aligned}$$

และค่าคงต่างๆในแบบจำลองแสดงค่าตามตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน k - epsilon

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ε
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

2.4.5 แบบจำลองมาตรฐาน k-omega [7]

ใน ANSYS FLUENT ใช้แบบจำลองของ Wilcox ซึ่งในการคำนวณผลกระทบของตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ (low-Reynolds effects) การอัด (compressibility) การกระจายตัวของการไหลแบบเฉือน (shear flow spreading) ซึ่ง standard model เป็นแบบจำลองที่ได้มาจากการทดลองด้วยสมการการถ่ายโอนของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (kinetic energy, k) และอัตราการสลายตัวเฉพาะ (specific dissipation rate, ω) โดยแบบจำลองนี้ได้รับการแก้ไขให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น และเมื่อนำสมการการถ่ายโอนของ Wilcox's model นี้มาใช้ใน FLUENT สมการเป็นดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (35)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (36)$$

โดย G_k คือ การสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเร็วเกรเดียนท์

G_ω คือการสร้าง ω ซึ่งถูกนิยามได้จากพื้นที่รอบข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 Γ_k, Γ_ω คือ ประสิทธิภาพการแพร่กระจายของ k และ ω ตามลำดับ

Y_k, Y_ω คือ การสลายตัวของ k และ ω เนื่องจากความปั่นป่วน

S_k, S_ω คือ แหล่งกำเนิด (Source terms) ที่จะนิยามตามการใช้งาน

การจำลองประสิทธิภาพการแพร่กระจาย

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (37)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (38)$$

โดย σ_k, σ_ω คือ ตัวเลข Prandtl ที่ปั่นป่วนสำหรับ k และ ω

μ คือ ความหนืดปั่นป่วนที่ถูกคำนวณโดยรวม k และ ω ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (39)$$

ตัวปรับแก้ที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ

สัมประสิทธิ์ α^* ซึ่งเป็นตัวปรับแก้สำหรับตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ ทำให้ความหนืดปั่นป่วนลดลง กำหนดให้

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left(\frac{\alpha_0^* + \text{Re}_t / R_k}{1 + \text{Re}_t / R_k} \right) \quad (40)$$

การจำลองการเกิดการปั่นป่วน

การเกิดพลังงานจลน์การปั่นป่วน k

พจน์ของ G_k คือ พลังงานจลน์การปั่นป่วน เป็นดังต่อไปนี้

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (41)$$

G_k ที่สอดคล้องกับสมมติฐานของ Boussinesq คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (42)

โดยที่ S คือ โมดูลัสของเทนเซอร์เฉลี่ยของอัตราความเครียดซึ่งเป็นวิธีเดียวกับรูปแบบของ $k - \epsilon$

การเกิดอัตราการผลิตเฉพาะ (ω)

การเกิดของอัตราการผลิตตัวจำเพาะกำหนดโดย

$$G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k \quad (43)$$

ค่าคงที่ที่ใช้ในแบบจำลองนี้ประกอบด้วย

$$\alpha_\infty^* = 1, \alpha_\infty = 0.52, \alpha_0 = \frac{1}{9}, \beta_\infty^* = 0.09, \beta_i = 0.072, R_\beta = 8$$

$$R_k = 6, R_\omega = 2.95, \zeta^* = 1.5, M_{i0} = 0.25, \sigma_k = 2.0, \sigma_\omega = 2.0$$

2.5 large eddy simulation (LES) model [8]

แบบจำลองนี้เป็นการปรับปรุงเทคนิค DNS ให้ง่ายต่อการคำนวณมากยิ่งขึ้น การคำนวณสมการนาเวียร์-สโตกส์โดยตรงเฉพาะการหมุนวนขนาดใหญ่และส่งผลต่อปรากฏการณ์ไหลมากเท่านั้น ในส่วนของการหมุนวนขนาดเล็กจะทำการจำลองโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนที่อาศัยข้อมูลทางสถิติของการหมุนวนขนาดเล็กมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งการคำนวณด้วยวิธีนี้จะใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าแบบ DNS

ในการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนสมการควบคุมการไหลทั้งสองเข้าสู่กระบวนการกรอง (filtering process) เพื่อทำการแบ่งแยกตัวแปร Φ ออกเป็นองค์ประกอบของการหมุนวนขนาดใหญ่ (large scale, $\bar{\Phi}$) และองค์ประกอบของการหมุนวนขนาดเล็ก (small scale, ϕ) ดังสมการที่ (40)

$$\Phi = \bar{\Phi} + \phi \quad (44)$$

จากความจริงที่ว่า การหมุนวนขนาดใหญ่ในกระแสน้ำไหลมีผลกระทบโดยตรงอย่างมากต่อลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน โดยโครงสร้างและขนาดของสเกลขนาดใหญ่จะขึ้นกับรูปทรงหรือธรรมชาติของการไหล ในขณะที่การหมุนวนขนาดเล็กจะมีขนาดและรูปทรงค่อนข้างคงที่ในทุกรูปแบบการไหล อีกทั้งพลังงานส่วนมากในการไหลแบบปั่นป่วนจะแฝงอยู่ในการหมุนวนขนาดใหญ่ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของหลักการของ LES เนื่องจาก การหมุนวนขนาดเล็กมีผลกระทบน้อยมากต่อการไหลแบบปั่นป่วน LES จึงมิได้ทำการจำลองด้วยแบบจำลองสเกลขนาดเล็ก (subgrid scale models) ส่วนการหมุนวนขนาดใหญ่ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อการไหล LES ได้ทำการคำนวณหาผลเฉลยบนกริดที่ใช้คำนวณ

2.5.1 แบบจำลองสเกลขนาดเล็ก (subgrid scale models)

แบบจำลองสเกลขนาดเล็ก (τ_{ij}) ใช้เป็นตัวแทนของผลของสเกลขนาดเล็กที่มีต่อการไหลแบบปั่นป่วน โดยจำลองเทอมนี้ลงในสมการโมเมนตัม ซึ่งการจำลอง τ_{ij} จะยึดหลักเดียวกับ eddy-viscosity model ที่ว่า

$$\tau_{ij} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} \quad (45)$$

ค่า eddy-viscosity (ν_t) สามารถหาได้จากหลายแบบจำลอง ในการศึกษานี้แบบจำลองที่ใช้คือแบบจำลองของ Smagorinsky-Lilly model

2.5.1.1 Smagorinsky-Lilly model

ค่า eddy-viscosity ในแบบจำลอง Smagorinsky-Lilly จำลองโดย

$$\nu_t = \rho L_s^2 |s| \quad (46)$$

$$|s| \equiv \sqrt{2s_{ij}s_{ij}} \quad (47)$$

โดย L_s คือ ค่าเฉลี่ยความกว้างของการกรอง mixing length for subgrid scales จะถูกคำนวณจาก

$$L_s = \min \left(Kd, C_s V^{\frac{1}{3}} \right) \quad (48)$$

- เมื่อ K คือ ค่าคงที่ Von Karman = 0.42
- D คือ ระยะที่ใกล้ผนังมากที่สุด
- C_s คือ ค่าคงที่ของ Smagorinsky = 0.1
- V คือ ปริมาตรของเซลล์ที่ใช้คำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ finite-rate (laminar finite-rate model) [7]

แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ finite-rate จะคำนวณ source term ของปฏิกิริยาเคมีโดยใช้สมการอาร์เรเนียส และผลจากการแกว่งของความปั่นป่วน (turbulent fluctuation) ได้สมการดังนี้

$$R_i = M_{w,i} \sum_{r=1}^{N_R} \hat{R}_{i,r} \quad (49)$$

โดย $M_{w,i}$ คือ น้ำหนักโมเลกุลขององค์ประกอบ i

$\hat{R}_{i,r}$ คือ อัตราอาร์เรเนียสเชิงโมลของการเกิดและสลายขององค์ประกอบ i ในปฏิกิริยา r

ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ที่สังกะสีออกไซด์เป็นปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้ จึงสามารถคำนวณค่า $\hat{R}_{i,r}$ ได้จาก

$$\hat{R}_{i,r} = \Gamma (v_{i,r}'' - v_{i,r}') \left(k_{f,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{(\eta_{j,r}' + \eta_{j,r}'')} \right) \quad (50)$$

โดย $C_{j,r}$ คือ ความเข้มข้นเชิงโมลขององค์ประกอบ j ในปฏิกิริยา r , (kmol/m^3)

$\eta_{j,r}'$ คือ อัตรากำลังขององค์ประกอบ j ของสารตั้งต้น ในปฏิกิริยา r

$\eta_{j,r}''$ คือ อัตรากำลังขององค์ประกอบ j ของผลิตภัณฑ์ ในปฏิกิริยา r

Γ คือ ผลรวมของผลจากทั้ง 3 เทอม ในอัตราการเกิดปฏิกิริยา หาได้จาก

$$\Gamma = \sum_j^N \gamma_{j,r} C_j \quad (51)$$

โดย $\gamma_{j,r}$ คือ เทอม efficiency ทั้ง 3 เทอมขององค์ประกอบ j ในปฏิกิริยา r

$k_{f,r}$ คือ อัตราของปฏิกิริยา r ไปข้างหน้า หาได้จากสมการอาร์เรเนียส ได้ดังนี้

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r - E_r / RT} \quad (52)$$

โดย A_r คือ แฟกซ์แฟคเตอร์เบื้องต้น (pre-exponential factor)

β_r คือ เลขชี้กำลังอุณหภูมิ (temperature exponent), เทอมไร้หน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกร ใช้กันเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น E_r อีกหนึ่ง คือ พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา, J/kmol เป็นเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส, $\text{J}/\text{kmol}\cdot\text{K}$

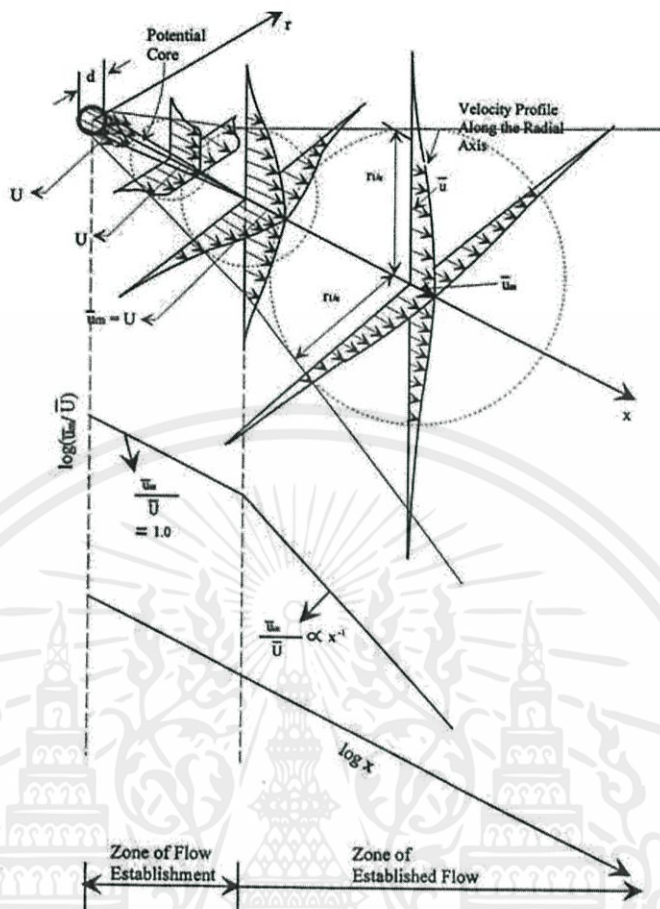
2.7 การไหลแบบเจ็ต (jet) [3]

การไหลแบบเจ็ต คือ การไหลแบบเฉือน (shear flow) ที่พบมากที่สุด ซึ่งเป็นการไหลของของไหลชนิดหนึ่งไหลออกจากช่องเปิดพุ่งไปสู่ของไหลอีกชนิดหนึ่ง เจ็ตอิสระ (free jet) คือ ของไหลที่มีความเร็วพุ่งออกจากหัวฉีดสู่ของไหลที่อยู่รอบๆ โดยที่บริเวณแกนกลางของเจ็ตจะมีความเร็วสูงสุดและความเร็วของเจ็ตจะลดลงอย่างต่อเนื่องในแนวแกนรัศมีของหน้าตัดเจ็ต

2.7.1 กลไกการไหลแบบเจ็ต

ลักษณะการไหลแบบเจ็ตปั่นป่วนที่ออกจากหัวฉีด สามารถแบ่งบริเวณการไหลที่สำคัญได้ 2 บริเวณ ได้แก่ บริเวณของ potential core region และ บริเวณถัดจาก potential core region เมื่อเจ็ตปั่นป่วนถูกปล่อยออกจากหัวฉีดด้วยความเร็ว (U) บริเวณนี้ความเร็วเฉลี่ยที่จุดกึ่งกลางท่อ (U_m) จะมีความเร็วของเจ็ตคงที่เกือบเท่ากับความเร็วที่ปากทางออกของหัวฉีด (U) เนื่องจากแรงหนืดที่เกิดจากผลต่างของความเร็วระหว่างเจ็ตกับของไหลที่อยู่รอบๆ ทำให้บริเวณส่วนของ potential core ของเจ็ตมีขนาดเล็กลงและของไหลบริเวณรอบๆ เจ็ตถูกดูดให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น หน้าตัดของเจ็ตจึงขยายตัวกว้างขึ้นตามระยะทางที่ห่างจากปากทางออก บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในหน้าตัดเจ็ตจาก potential core จนถึงบริเวณที่ของไหลหยุดนิ่งอยู่กับที่เรียกว่า shear layer ยิ่งห่างจากปากทางออกหัวฉีด ความหนาของ shear layer จะเพิ่มขึ้นและ potential core จะลดลง ซึ่งจากหัวฉีดจนถึงบริเวณที่ความเร็วเฉลี่ยที่จุดกึ่งกลางท่อยังไม่ถูกรบกวนจากความปั่นป่วน เรียกบริเวณนี้ว่า zone of flow establishment (ZFE) ถัดจากบริเวณนี้ไปเป็นส่วนของ developing zone โดยเรียกบริเวณนี้ว่า zone of established flow (ZEF) นั่นคือ ความปั่นป่วนจะเกิดเข้าที่ความเร็วจุดกึ่งกลางท่อ ทำให้ความเร็วเฉลี่ยสูงสุด (U_m) เริ่มลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น (x) มีการขยายตัวของหน้าตัดเจ็ตในแนวแกนรัศมี ค่าความแปรปรวน (turbulent intensity) ที่แกนของเจ็ตมีค่าเพิ่มมากขึ้นในช่วงนี้จนเกิดเป็น fully developed zone เป็นบริเวณต่อจาก developing zone ของเจ็ตที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วภายในเจ็ตอย่างสมบูรณ์แล้ว โดยเรียกบริเวณนี้ว่า zone of established flow (ZEF) และพบว่า jet width จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นเช่นกัน นั่นคือพื้นที่โดยรอบของไหลที่เกิดการดึงของไหลเข้า (entrained) เข้าไปในขอบเขตเจ็ตจะเพิ่มมากขึ้น อธิบายได้ดังรูปที่ 2.2

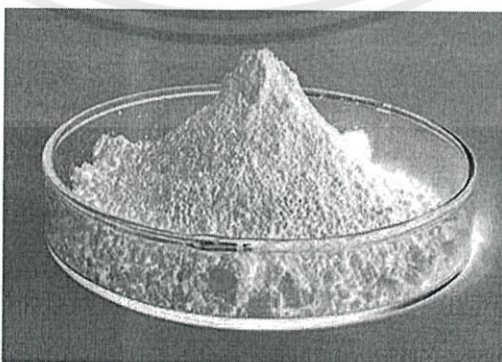
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 กลไกการไหลแบบเจ็ต

2.8 สังกะสีออกไซด์ (ZnO)

เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีสูตรทางเคมีว่า ZnO มีลักษณะเป็นผงสีขาวไม่ละลายน้ำ มักใช้เป็นสารเติมแต่งในวัสดุเคลือบและผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ยาง พลาสติก เซรามิก แก้ว ซีเมนต์ สี แบตเตอรี่ วัสดุทนไฟ เป็นต้น ตามธรรมชาติอยู่ในรูปแร่ซิงค์ไซต์ (Zincite) แต่สังกะสีออกไซด์ส่วนใหญ่จะได้รับการสังเคราะห์



รูปที่ 2.3 สังกะสีออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้

ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของสังกะสีออกไซด์

คุณสมบัติ	
สูตรโมเลกุล	ZnO
มวลโมเลกุล	81.408 g/mol
ความหนาแน่น	5.606 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	1975 °C
ความสามารถในการละลายน้ำ	0.16 mg/100 mL (30 °C)
ช่องว่างแถบพลังงาน	3.3 eV

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การศึกษาด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในด้านอิทธิพลของการพ่นเป็นจังหวะที่มีต่อการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันที่ใช้ความร้อน

เอกราช [2] ศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการพ่นเป็นจังหวะต่อร้อยละผลได้โดยใช้โปรแกรม FLUENT จากการจำลองพบว่า สังกะสีออกไซด์เกิดขึ้นปริมาณมากที่สุดที่ตำแหน่งการพ่นเป็นจังหวะเท่ากับตำแหน่งที่เกิดความเร็วเหนี่ยวนำสูงสุด (entrainment velocity) เนื่องจากที่ตำแหน่งนี้จะเกิดการเหนี่ยวนำให้อากาศของสังกะสีเข้าไปทำปฏิกิริยากับอากาศซึ่งเป็นผลมาจากเจ็ตของอากาศและการปั่นป่วนที่เกิดจากการพ่นเป็นจังหวะ ลักษณะการพ่นแบบต่อเนื่องจะทำให้ปริมาณของสังกะสีออกไซด์มากกว่าการพ่นเป็นจังหวะ อันเป็นผลมาจากพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (turbulent kinetic energy) และตำแหน่งการปล่อยอากาศแบบตามกระแส (co-current) จะมีผลได้ของสังกะสีออกไซด์สูงกว่าการปล่อยอากาศแบบขวางกระแส (cross current)

2.9.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของสังกะสีออกไซด์ด้วยเทคนิคการพ่นเป็นจังหวะในกระบวนการออกซิเดชันโดยอาศัยความร้อน

บุษราคัม [4] ศึกษาการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์ด้วยเทคนิคการพ่นเป็นจังหวะโดยใช้แก๊สพาหะเพื่อนำพาไอสังกะสีจากบริเวณแผ่นสังกะสีซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดให้ทำปฏิกิริยากับอากาศที่ป้อนเข้าในทิศทางเดียวกัน การศึกษาผลที่พ่นเป็นจังหวะสองลักษณะ แบบแรกคือ การพ่นในทิศทางเดียวกัน พบว่าสังกะสีออกไซด์มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรและมีวาแคนซีของออกซิเจนสูง แบบที่สองคือ มีการพ่นของก๊าซพาหะอีกสายหนึ่งในทิศขวางการไหลของสังกะสีและอากาศ พบว่า

สังกะสีออกไซด์มีขนาดในระดับนาโนเมตร แต่เนื่องจากความดันไอออกซิเจนลดลงจากการพ่นไนโตรเจนเป็นจังหวะ จึงลดความสามารถในการออกซิไดซ์กับไอสังกะสีลง สังกะสีออกไซด์ที่ได้มีความบกพร่องของผลึกมากขึ้น

2.9.3 การศึกษาผลกระทบของตัวเลขเรย์โนลด์ที่มีผลต่อลักษณะการไหลแบบเจ็ตที่ไม่มีแรงลอยตัว

Seok Jae Kwon และ Won Seo (2005) [3] ศึกษาการไหลแบบเจ็ตของน้ำที่ถูกปล่อยออกจากหัวฉีด(nozzle) ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ศึกษาอยู่ในช่วง 177 - 5,142 จากผลการทดลองพบว่าโปรไฟล์ของความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวตัดขวางในช่วงการไหลแบบราบเรียบ (laminar) ไม่แสดงลักษณะการกระจายตัวแบบเป็นเส้นตรงด้านบน (top-hat) แต่เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์สูงกว่า 437 จะพบการกระจายแบบเป็นเส้นตรงด้านบน ระยะทางของ zone of flow establishment (ZFE) จะลดลงเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้นและความเร็วแนวแกนลดลงอย่างรวดเร็ว สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent) ความเร็วแนวแกนจะลดลงแบบคงที่ต่ำกว่าที่พบตามทฤษฎีเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นเพราะใช้หัวฉีดแบบลดหน้าตัด (contraction nozzle) ความเร็วที่ได้จากการทดลองเหมาะที่จะประมาณโดยใช้ Gaussian curve เฉพาะช่วงการไหลของเจ็ตแบบปั่นป่วนเท่านั้น โดยทั่วไปแล้วการไหลแบบปั่นป่วนจะมีความรุนแรงของความปั่นป่วน (turbulence intensity) ตลอดแนวแกนและจะเพิ่มขึ้นตามระยะทางเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนระดับความเค้นเฉือนจะเพิ่มขึ้นเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

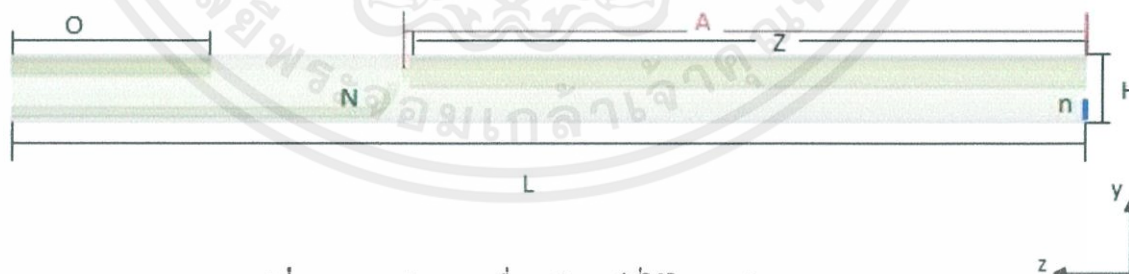
การจำลอง

การศึกษาการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์ในรูปแบบ 3 มิติ ขั้นตอนแรกคือการสร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อสำหรับการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์ด้วยโปรแกรม GAMBIT โดยกำหนดขนาดแบบจำลองเท่ากับขนาดที่ใช้ในงานวิจัยของบุษราคัม [4] และใช้โปรแกรม FLUENT ในการคำนวณหาผลได้ของสังกะสีออกไซด์ เพื่อวิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสมในการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ แล้วนำมาเปรียบเทียบผลได้ของสังกะสีออกไซด์จากการจำลองกับผลจากการทดลอง

3.1 การกำหนดค่าแบบจำลอง

3.1.1 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์สังกะสีออกไซด์แบบท่อ

การออกแบบแบบจำลองสำหรับการศึกษานี้ ได้กำหนดค่าตามแบบการทดลองของบุษราคัม [4] โดยระบบเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อในระบบ 3 มิติ ที่มีความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 650 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 42 mm ประกอบด้วยท่อทางด้านบนสำหรับปล่อยอากาศท่อไนโตรเจน (แก๊สพาหะ) และไอสังกะสี ท่อพ่นไนโตรเจนแบบเป็นจังหวะที่ตำแหน่งต่างๆ ได้แก่ท่อพ่นที่ตำแหน่ง 5, 25 และ 55 mm จากปากทางออกท่ออากาศ ทางเข้าไนโตรเจนและทางออกสารแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

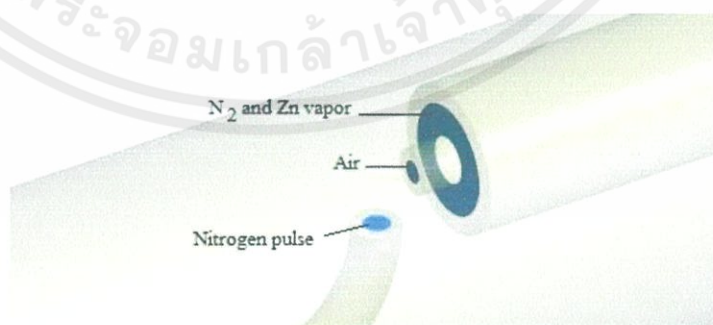
ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์

สัญลักษณ์	ชื่อ	ความยาว (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)
L	ความยาวเครื่องปฏิกรณ์	650	-
H	ความสูงเครื่องปฏิกรณ์	42	-
Z	ท่อไนโตรเจนและไอสังกะสี	410	0.008
A	ท่ออากาศ	415	0.003
N	ท่อพ่นเป็นจิงหะของไนโตรเจน	แบ่งเป็น 3 ลักษณะ*	0.0035
O	ท่อทางออกสาร	120	0.0085
n	ทางเข้าไนโตรเจน	-	0.0065

*หมายเหตุ 3 ลักษณะได้แก่ ปลายท่อพ่นไนโตรเจนแบบเป็นจิงหะห่างจากท่ออากาศเป็นระยะทาง 5, 25 และ 55 mm



รูปที่ 3.2 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการคำนวณ



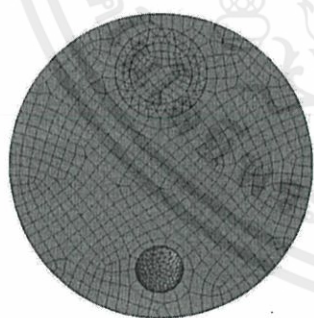
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่รูปที่ 3.3 ขยายบริเวณทางออกอากาศสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การสร้างกริดและการกำหนดค่า

สร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์สังกะสีออกไซด์แบบท่อในโปรแกรม GAMBIT เริ่มจากการสร้างรูปของแบบจำลองตามขนาดที่กำหนดข้างต้น จากนั้นสร้างกริดเพื่อนำแบบจำลองนี้ไปใช้ในส่วนของการคำนวณแบบปริมาตรสี่เหลี่ยมในโปรแกรม FLUENT ต่อไป กำหนดรูปแบบในการสร้างกริดที่ใช้ในปริภูมิกำหนดนี้ ได้จำนวน nodes และ elements ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงข้อมูลกริดในเครื่องปฏิกรณ์แบ่งตามระยะห่างระหว่างท่ออากาศและท่อพ่นไนโตรเจนแบบเป็นจังหวะ

ระยะห่างระหว่างท่ออากาศและท่อพ่นไนโตรเจนแบบเป็นจังหวะ	5 mm	25 mm	55 mm
จำนวน nodes	497,679	395,443	398,168
จำนวน Elements	616,265	520,987	518,328
tetrahedra	185,213	179,849	173,132
pyramids	8,176	8,176	8,185
hexahedra	422,876	332,962	337,011



(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ดิฉันทั้งห้าเป็นผู้ดูแลเรื่องเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4 (a) กริดตามพื้นที่หน้าตัดของเครื่องปฏิกรณ์

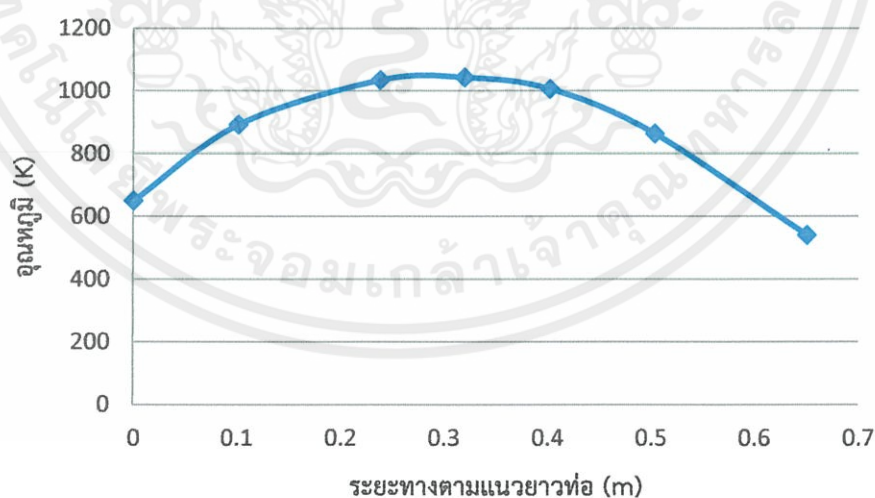
(b) กริดภายในเครื่องปฏิกรณ์

3.1.3 การกำหนดสภาวะขอบเขต

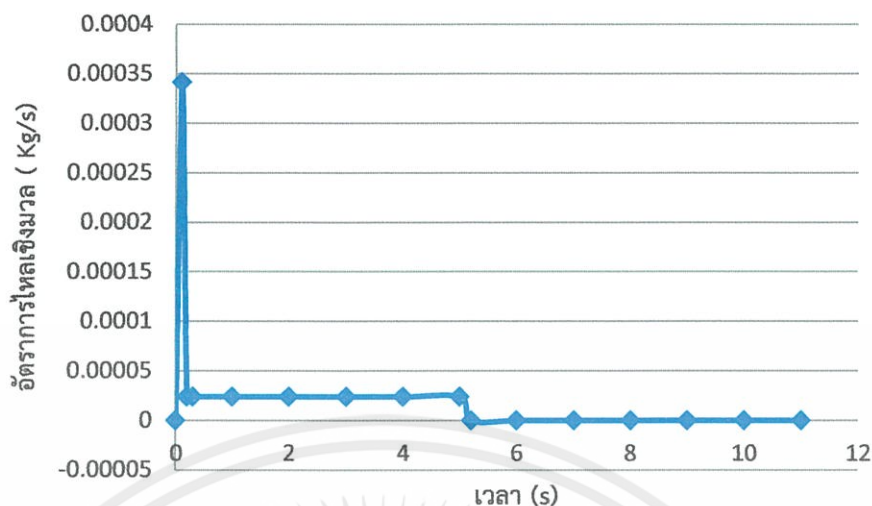
สภาวะขอบเขตถูกกำหนดค่าตามการทดลองของบุษราคัม [4] โดยรูปแบบการไหลของแก๊สที่ทางเข้า สมมติให้มีลักษณะการไหลแบบคงที่ตลอดพื้นที่หน้าตัด (uniform flow) ความเร็วแก๊สทางเข้าแสดงได้ดังตารางที่ 3.3 กำหนดที่ผนังไม่มีการเลื่อน (no-slip boundary condition) โปรไฟล์ของอุณหภูมิตามระยะทางแนวแกนท่อและอัตราการไหลเชิงมวลของการพ่นแบบเป็นจังหวะของไนโตรเจน ถูกเขียนเป็นภาษาซีซึ่งใช้ในส่วนของการคำนวณต่อไป แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิดังรูปที่ 3.5 และรูปแบบค่าการไหลโดยมวลของการพ่นแบบเป็นจังหวะของไนโตรเจนแสดงดังรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.3 ความเร็วแก๊สที่ทางเข้า

สายป้อน	ความเร็ว (m/s)	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
อากาศ	5.478	1.27×10^{-5}
ไนโตรเจน	1.408	2.37×10^{-5}
ไนโตรเจนและไอของสังกะสี	0.590	2.74×10^{-5}
การพ่นเป็นจังหวะของไนโตรเจน	-	แสดงดังรูปที่ 3.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (K) กับระยะทางตามแนวยาวท่อ (m) ด้านการกำเนิดพลาสมาแบบเป็นจังหวะของไนโตรเจน. ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 กราฟการไหลเชิงมวลของการฟักไนโตรเจนแบบเป็นจังหวะกับเวลา

3.1.4 สมมติฐานของแบบจำลอง

3.1.3.1 กำหนดลักษณะแก๊สที่ใช้เป็นแก๊สในอุดมคติ

3.1.3.2 พิจารณาของไหลเป็นของไหลแบบอัดตัวไม่ได้

3.1.3.3 การไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์เป็นการไหลแบบปั่นป่วน

3.1.5 สมการควบคุมแบบจำลอง

ในการคำนวณแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อสำหรับการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์ มีสมการควบคุมทั้งหมด 7 สมการ ได้แก่สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัมในแนวแกน x สมการโมเมนตัมในแนวแกน y สมการโมเมนตัมในแนวแกน z สมการอนุรักษ์มวลสาร (species mass transport) สมการพลังงาน สมการปฏิกิริยาเคมีในการคำนวณเป็นแบบ transient แสดงสมการที่ใช้ในการคำนวณได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

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

สมการโมเมนตัมในแนวแกน x

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (4)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการโมเมนตัมในแนวแกน y

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (5)$$

สมการโมเมนตัมในแนวแกน z

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + S_{Mz} \quad (6)$$

สมการอนุรักษ์มวลสาร (species mass transport)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho Y_i \bar{U}_j) = \frac{\partial \bar{J}_i}{\partial x_j} + R_i + S_i \quad (12)$$

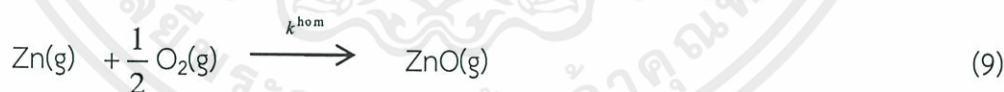
$$\text{เมื่อ } \bar{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_i}{Sc_i} \right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T}$$

สมการพลังงาน

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\nabla \cdot (\rho u) + \left(\frac{\partial (u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (v\tau_{yz})}{\partial z} + \frac{\partial (w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (w\tau_{zz})}{\partial z} \right) + \nabla \cdot (k\nabla T) + S_E \quad (8)$$

สมการปฏิกิริยาเคมี

ในกระบวนการออกซิเดชันโดยอาศัยความร้อนการออกซิไดซ์ของไอสังกะสีออกไซด์เป็นไปตามปฏิกิริยาเอกพันธ์ในวัฏภาคแก๊ส



อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสมการนี้เป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$-r_{\text{Zn}} = r_{\text{ZnO}} = k_0 [\text{Zn}][\text{O}_2]^{1/2} \quad (10)$$

$$K_0 = 8.0 \times 10^8 \exp\left(-\frac{1.29 \times 10^8}{RT}\right) \text{m}^{3/2} \cdot \text{mol}^{-1/2} \cdot \text{s}^{-1} \quad (11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 สมการความปั่นป่วน

สมการ k-epsilon

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon \bar{u}_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) \\ &- C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (34)$$

สมการ k-omega

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (35)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (36)$$

สมการ large eddy simulation (LES)

องค์ประกอบของการหมุนวนขนาดใหญ่ ($\bar{\Phi}$) และองค์ประกอบของการหมุนวนขนาดเล็ก (ϕ)

$$\Phi = \bar{\Phi} + \phi \quad (44)$$

แบบจำลองสเกลขนาดเล็ก

$$\tau_{ij} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} \quad (45)$$

สมการ laminar finite-rate

$$R_i = M_{w,i} \sum_{r=1}^{N_R} \hat{R}_{i,r} \quad (49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีโทษให้ปรับ $\hat{R}_{i,r} = \Gamma (v''_{i,r} - v'_{i,r}) \left(k_{f,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{(\eta_{j,r} + \eta'_{j,r})} \right)$ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (50)

3.1.7 วิธีเชิงตัวเลข

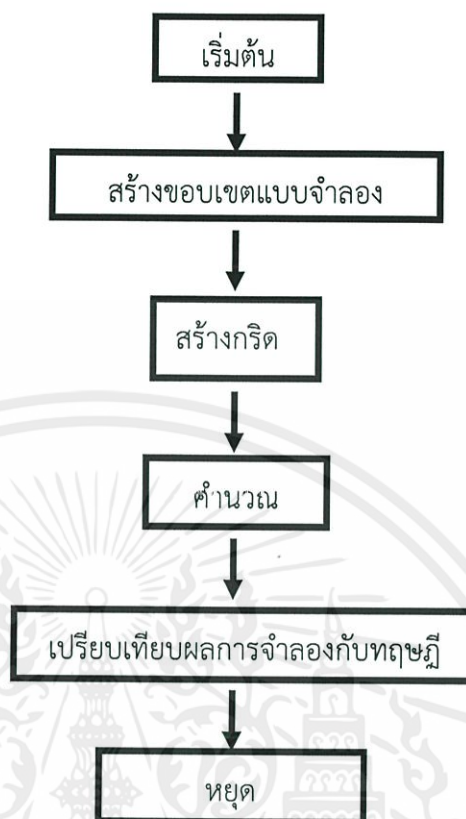
ขั้นตอนการคำนวณที่ใช้โปรแกรม FLUENT โดยวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม การคำนวณจะเริ่มจากการแบ่งขอบเขตการคำนวณเป็นเซลล์เล็กๆ และอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ให้เป็นสมการพีชคณิต และจะคำนวณจนได้สนามการกระจายตัวของตัวแปรตามต้องการ การตั้งค่าระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สรุปได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การตั้งค่าระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

รายละเอียด	รูปแบบ
pressure-velocity coupling	PISO
gradient	least squares cell base
pressure	standard
momentum	second order upwind
turbulent kinetic energy	second order upwind
turbulent dissipation	second order upwind

3.2 การจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี

ผลการจำลองที่ได้จากการคำนวณในโปรแกรม FLUENT จะนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง โดยการดำเนินงานเริ่มจากการสร้างแบบจำลองจากโปรแกรม GAMBIT ตามขนาดที่ได้แสดงดังตารางที่ 3.1 และกำหนดสภาวะขอบเขตดังรูปที่ 3.3 และสร้างกริดที่เหมาะสม เมื่อกำหนดแบบจำลองเรียบร้อยแล้ว จึงคำนวณด้วยโปรแกรม FLUENT และนำผลที่ได้จากการคำนวณ (ผลได้ของสังกะสีออกไซด์) มาเปรียบเทียบกับผลได้ของสังกะสีออกไซด์จากการทดลอง เพื่อวิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสมและวิเคราะห์ลักษณะการไหลต่อไป แสดงขั้นตอนการดำเนินการดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการดำเนินการ

3.3 ปัจจัยที่ศึกษาในปริศยานิพนธ์

ปัจจัยที่มีผลต่อผลได้ของสั้งกะสืออกไซด์มีหลายประการ ในปริศยานิพนธ์นี้ ได้ศึกษาเฉพาะตำแหน่งการพ่นเป็นจังหวะของไนโตรเจน ที่ตำแหน่งต่างๆ ได้แก่ 5, 25 และ 55 mm จากปากทางออกของอากาศ แสดงแบบจำลองทั้ง 3 แบบ ดังรูปที่ 3.8 (a) - (c) และศึกษาผลของแบบจำลองที่ใช้ในการจำลอง ได้แก่ แบบจำลอง k-epsilon, k-omega , large eddy simulation (LES) และ laminar โดยอ้างอิงผลการศึกษากับการทดลองของบุษราคัม [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nitrogen pulse

รูปที่ 3.8 (a) แบบจำลองการพ่นไนโตรเจนเป็นจิงหระที่ตำแหน่ง 5 mm

Nitrogen pulse

รูปที่ 3.8 (b) แบบจำลองการพ่นไนโตรเจนเป็นจิงหระที่ตำแหน่ง 25 mm

Nitrogen pulse

รูปที่ 3.8 (c) แบบจำลองการพ่นไนโตรเจนเป็นจิงหระที่ตำแหน่ง 55 mm

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรภายในแบบจำลองที่ศึกษาทั้งหมด

	ตำแหน่งท่อพ่นไนโตรเจนจาก ทางออกอากาศ (mm)	แบบจำลองที่ใช้
แบบจำลองที่ 1	5	- ske
		- k-omega
		- LES
		- laminar
แบบจำลองที่ 2	25	- ske
		- k-omega
		- LES
		- laminar
แบบจำลองที่ 3	55	- ske
		- k-omega
		- LES
		- laminar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์

4.1 บทนำ

การทำนายการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ ในรูปแบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม FLUENT ในส่วนที่ 4.2 เริ่มจากการเปรียบเทียบผลได้ของสังกะสีออกไซด์จากการจำลองโดยใช้แบบจำลองต่างๆ ได้แก่ แบบจำลอง k-epsilon, k-omega, LES (large eddy simulation) และ laminar มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ในหัวข้อ 4.3 เป็นการศึกษาลักษณะการไหลแบบเจ็ตในรูปแบบ 3 มิติ

4.2 เปรียบเทียบผลได้ของสังกะสีออกไซด์จากการจำลองด้วยแบบจำลองต่างๆ

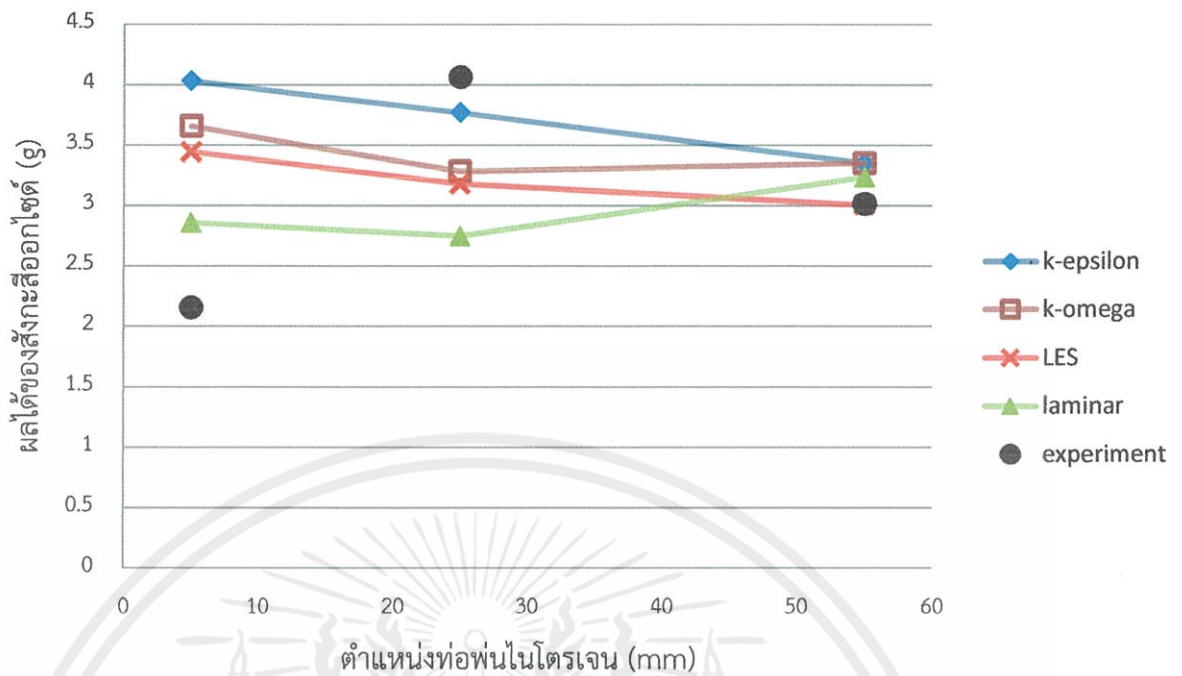
ผลได้ของสังกะสีออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อในรูปแบบ 3 มิติ จำลองด้วย แบบจำลอง k-epsilon, k-omega, LES (large eddy simulation) และ laminar เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ผลได้ของสังกะสีออกไซด์แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลได้ของสังกะสีออกไซด์เฉลี่ย (g) ในระยะเวลา 22 s ด้วยแบบจำลองต่างๆ

แบบจำลอง ระยะท่อพัน (mm)	การทดลอง	k-epsilon	k-omega	LES	laminar
5	2.15	4.03	3.66	3.44	2.85
25	4.06	3.77	3.28	3.18	2.75
55	3.01	3.35	3.35	3.01	3.23

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ผลจากการทดลองที่ตำแหน่งท่อพันไนโตรเจนใกล้ปากทางออกท่ออากาศ ให้ผลได้ของสังกะสีออกไซด์ต่ำที่สุด ผลได้ของสังกะสีออกไซด์สูงสุดที่ตำแหน่ง 25 mm และจะลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ผลจากการจำลองด้วยแบบจำลอง k-epsilon, k-omega และ LES (large eddy simulation) ผลได้ของสังกะสีออกไซด์สูงสุดบริเวณใกล้ปากทางออกท่ออากาศและจะลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น แบบจำลอง laminar ผลได้ของสังกะสีออกไซด์สูงสุดบริเวณใกล้ปากทางออก

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบผลได้ของสังกะสีออกไซด์จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง

4.2.1 การจำลองการไหลแบบเจ็ตภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อด้วยแบบจำลอง

k-epsilon

การทำนายการไหลแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง k-epsilon พบว่าแนวโน้มผลได้ของสังกะสีออกไซด์ลดลงเมื่อระยะทางของท่อพ่นไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้แนวโน้มผลได้ของสังกะสีออกไซด์แตกต่างจากการทดลองเนื่องจาก แบบจำลองนี้ทำนายลักษณะการไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วนตั้งแต่ระยะแรก คือ อากาศที่ฉีดออกจากท่อมีความปั่นป่วนตั้งแต่บริเวณใกล้ปากทางออกของท่อ ความปั่นป่วนสูงทำให้บริเวณนี้เกิดการดึงมวลสาร (entrainment) ของไอสังกะสีจากบริเวณข้างเคียงลำอากาศเข้ามา และเกิดการผสมกันระหว่างไอของสังกะสีกับออกซิเจน จึงเกิดปฏิกิริยาขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ต้น เมื่อติดตั้งท่อพ่นแบบเป็นจันทะของไนโตรเจนที่ระยะทาง 5 mm จากปากทางออกของอากาศ จะช่วยเพิ่มความปั่นป่วนในบริเวณนี้ให้สารเข้าทำปฏิกิริยากันดีขึ้น ผลได้ของสังกะสีออกไซด์จึงสูงที่สุด ส่วนการติดตั้งท่อพ่นไนโตรเจนแบบเป็นจันทะที่บริเวณ 25 และ 55 mm พบว่าผลได้ของสังกะสีออกไซด์ลดลง เนื่องจากสารมีแนวโน้มกระจายตัวออกไปจากบริเวณที่ทำปฏิกิริยา แม้มีการติดตั้งท่อพ่นเพิ่มความปั่นป่วน ทำให้สารตั้งต้นกระจายออกจากกัน แต่ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยาหมดไปแล้วบางส่วนในช่วงต้น ทำให้

ผลได้ของสังกะสีออกไซด์ที่ตำแหน่งท่อพ่นไนโตรเจนเป็นจังหวัดที่ระยะ 25 และ 55 mm ลดลงตามลำดับ

4.2.2 การจำลองการไหลแบบเจ็ตภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อด้วยแบบจำลอง k-omega

การทำนายการไหลแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง k-omega แบบจำลองนี้เหมาะที่จะใช้ในการทำนายปรากฏการณ์การไหลที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ พบว่าแนวโน้มผลได้ของสังกะสีออกไซด์ลดลงเมื่อระยะทางของท่อพ่นไนโตรเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากแบบจำลองความปั่นป่วนนี้จะจำลองการไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วนตั้งแต่เริ่มแรกเช่นเดียวกับแบบจำลอง k-epsilon ทำให้แนวโน้มผลได้ของสังกะสีออกไซด์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังเหตุผลข้างต้นที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2.1

4.2.3 การจำลองการไหลแบบเจ็ตภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อด้วยแบบจำลอง LES

การทำนายการไหลแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง LES แบบจำลองนี้แบ่งกระบวนการจำลองเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการคำนวณ (คำนวณบริเวณ large eddy scale) และส่วนของการจำลองด้วย Smagorinsky-Lilly Model (จำลองบริเวณ small eddy scale) พบว่าแนวโน้มผลได้ของสังกะสีออกไซด์จะลดลงเมื่อระยะทางของท่อพ่นไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับแบบจำลอง k-epsilon และ k-omega ทั้งนี้แบบจำลองนี้ใช้ระยะเวลาในการจำลองยาวนานและสิ้นเปลืองพลังงานมาก

4.2.4 การจำลองการไหลแบบเจ็ตภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อด้วยแบบจำลอง laminar

การทำนายการไหลแบบเจ็ตด้วยแบบจำลอง laminar พบว่า ผลได้ของสังกะสีออกไซด์ช่วงแรกมีแนวโน้มคงที่ แต่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางของท่อพ่นไนโตรเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากแบบจำลองนี้เป็นการจำลองลักษณะการไหลแบบราบเรียบ ทำให้การไหลบริเวณใกล้ปากทางออกของท่ออากาศไม่มีความปั่นป่วน ลักษณะการไหลเป็นการไหลแบบคงตัว แม้ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่การผสมกันระหว่างออกซิเจนกับไอของสังกะสีเกิดได้น้อย เมื่อมีการติดตั้งท่อพ่นไนโตรเจนแบบเป็นจังหวัดที่ระยะ 5 และ 25 mm จากปากทางออกของอากาศ จึงช่วยเพิ่มความปั่นป่วนบริเวณนี้มากขึ้น ทำให้สารตั้งต้นเกิดการผสมกันและเกิดสังกะสีออกไซด์ แนวโน้มผลได้ของสังกะสีออกไซด์ในช่วงแรกจึงต่ำ และเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นสารจะเกิดการกระจายตัวเพิ่มขึ้น มีพื้นที่ทำปฏิกิริยามากขึ้น การติดตั้งท่อพ่นไนโตรเจนแบบเป็นจังหวัดที่ระยะ 55 mm จะช่วยเพิ่มความปั่นป่วน ทำให้ผลได้ของ

สังกะสีออกไซด์ที่ระยะนี้สูงกว่าระยะใกล้ปากทางออกท่ออากาศ แสดงผลได้ของสังกะสีออกไซด์
ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 เปรอ์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการจำลองต่างๆ กับผลการทดลอง

ตำแหน่งท่อพ่น ไนโตรเจน (mm)	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด			
	k-epsilon	k-omega	LES	laminar
5	87.33	69.96	60.06	32.83
25	7.15	19.10	21.67	32.31
55	11.30	11.30	0.16	7.42

ตารางที่ 4.3 เวลาที่ใช้คำนวณในแต่ละแบบจำลอง

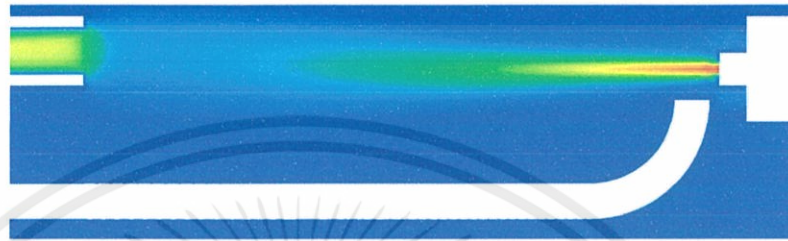
ตำแหน่งท่อพ่น ไนโตรเจน (mm)	เวลาในการคำนวณ (ชั่วโมง)			
	k-epsilon	k-omega	LES	laminar
5	62	21	132	264
25	25	22	145	98
55	23	24	148	121

จากตารางที่ 4.3 พบว่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลอง k-epsilon และ k-omega
ใช้เวลาน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลอง LES และ laminar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แบบจำลอง k-epsilon (a1)



แบบจำลอง k-omega (b1)



แบบจำลอง LES (c1)



แบบจำลอง laminar (d1)



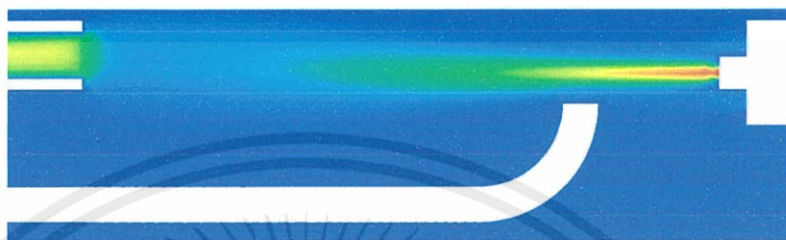
เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.2 (a1), (b1), (c1), (d1) คอนทัวร์ของความเร็ว วินาทีที่ 20 (ไม่มีการพันไนโตรเจน) ในการกัก
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 ที่ระยะ 5 mm จากปากทางออกสู่อากาศ



เอกสารนี้เป็นเอกสาร
รูปที่ 4.3 (a2), (b2), (c2), (d2) คอนทัวร์ของความเร็ว วินาทีที่ 11 (มีการพ่นไนโตรเจน)
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 ที่ระยะ 5 mm จากปากทางออกท่ออากาศ



แบบจำลอง k-epsilon (a3)



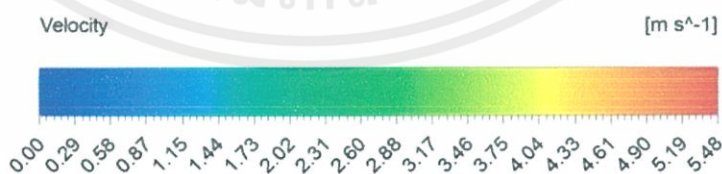
แบบจำลอง k-omega (b3)



แบบจำลอง LES (c3)



แบบจำลอง laminar (d3)



รูปที่ 4.4 (a3), (b3), (c3), (d3) คอนทัวร์ของความเร็ว วินาทีที่ 20 (ไม่มีการพ่นไนโตรเจน)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปเผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ที่ระยะ 25 mm จากปากทางออกท่ออากาศ



แบบจำลอง k-epsilon (a4)



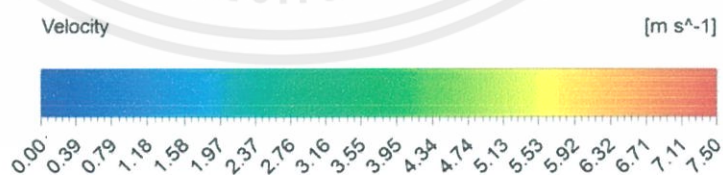
แบบจำลอง k-omega (b4)



แบบจำลอง LES (c4)



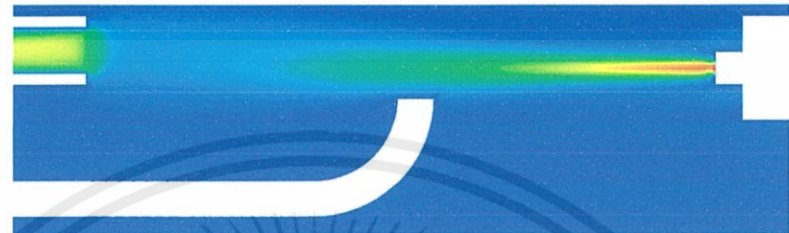
แบบจำลอง laminar (d4)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจท) เมื่อวันที่ 11 มกราคม 2564 (มีการพ่นของไนโตรเจน) การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ที่ระยะ 25 mm จากปากทางออกท่ออากาศ



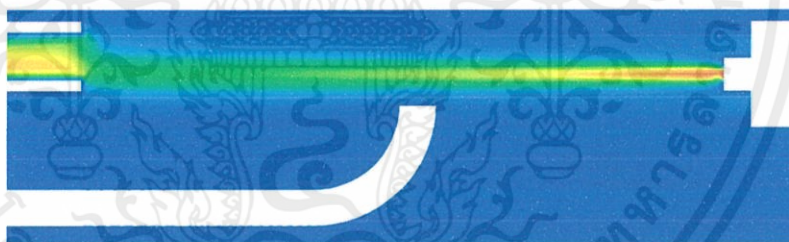
แบบจำลอง k-epsilon (a5)



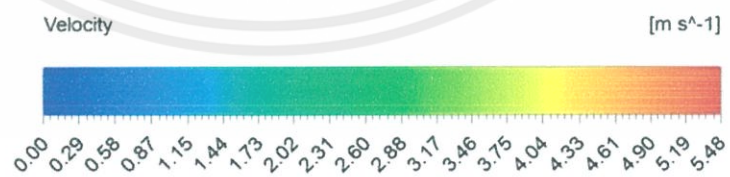
แบบจำลอง k-omega (b5)



แบบจำลอง LES (c5)

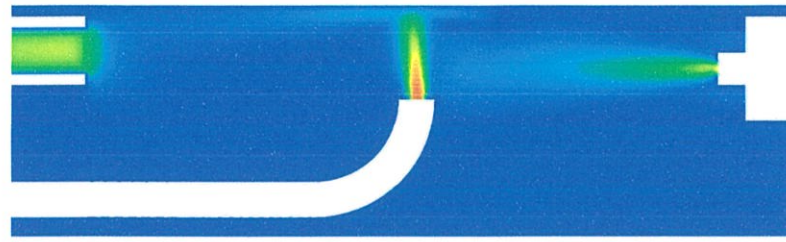


แบบจำลอง laminar (d5)

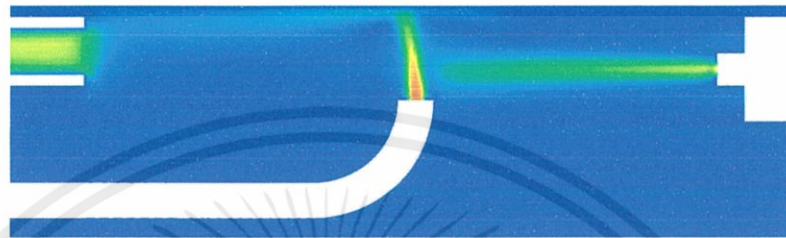


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.6 (a5), (b5), (c5), (d5) คอนทัวร์ของความเร็ว วินาทีที่ 20 (ไม่มีการพันไนโตรเจน)

ที่ระยะ 55 mm จากปากทางออกท่ออากาศ



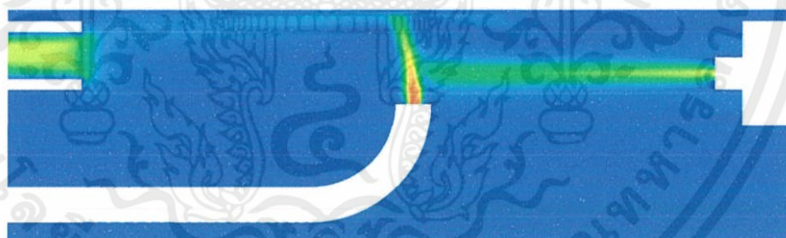
แบบจำลอง k-epsilon (a6)



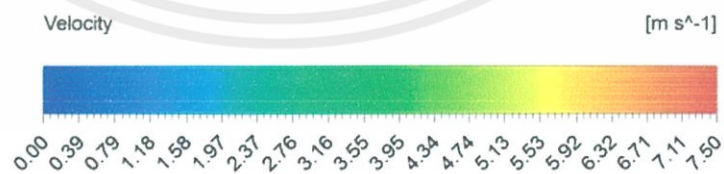
แบบจำลอง k-omega (b6)



แบบจำลอง LES (c6)

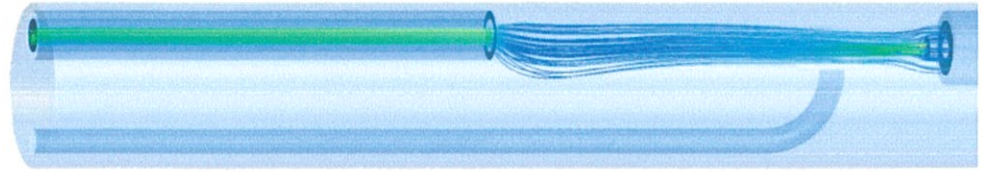


แบบจำลอง laminar (d6)

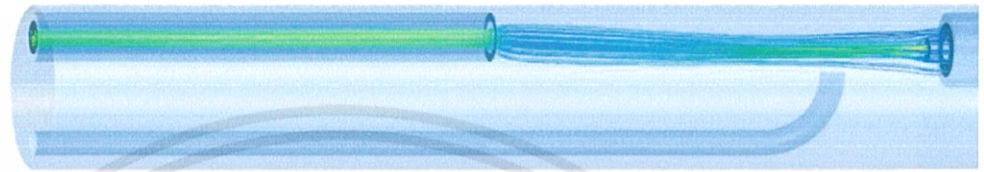


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.7 (a6), (b6), (c6), (d6) คอนทัวร์ของความเร็ว วินาทีที่ 11 (มีการพ่นไนโตรเจน)

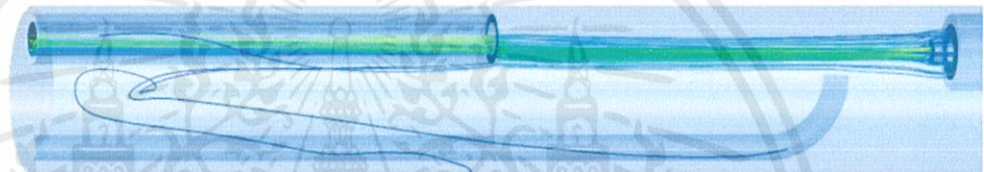
ที่ระยะ 55 mm จากปากทางออกท่ออากาศ



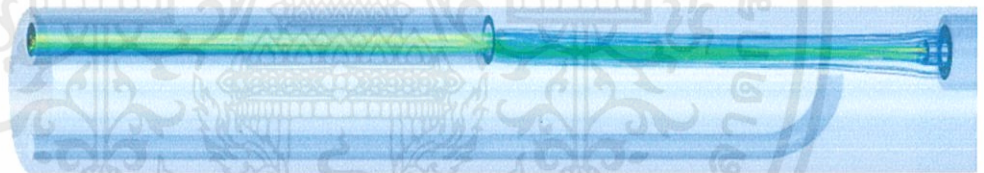
แบบจำลอง k-epsilon (a7)



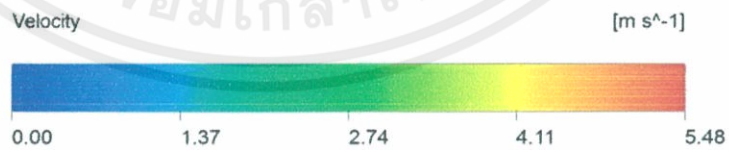
แบบจำลอง k-omega (b7)



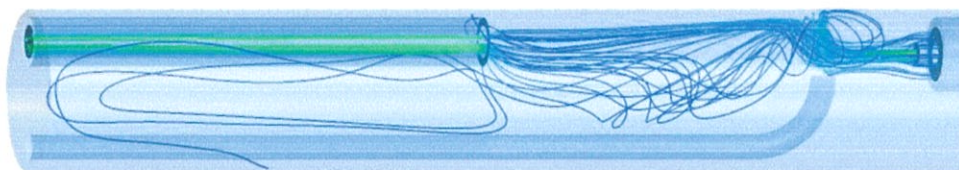
แบบจำลอง LES (c7)



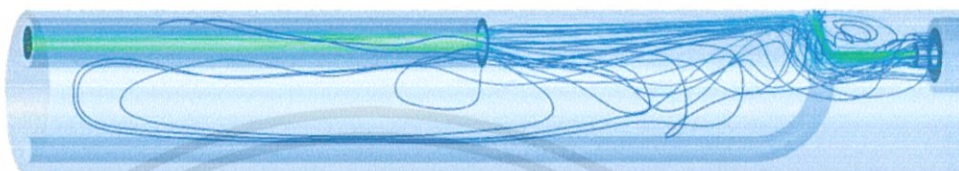
แบบจำลอง laminar (d7)



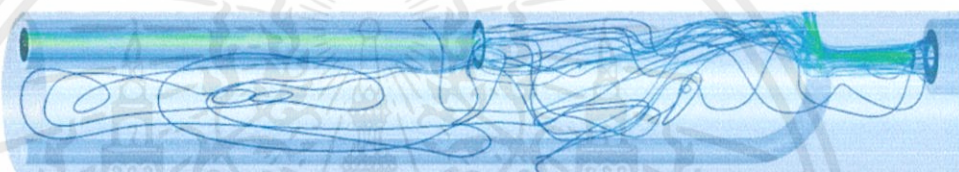
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยชื่อนักวิชาการ
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมิให้ดำเนินการเผยแพร่หรือดัดแปลงในเชิงพาณิชย์ของเอกสารฉบับนี้ที่การนำไปใช้
 (ไม่มีการพนันในโตรเจน) ที่ระยะ 25 mm จากปากทางออกท่ออากาศ



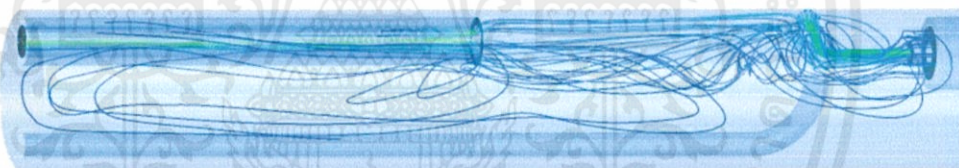
แบบจำลอง k-epsilon (a8)



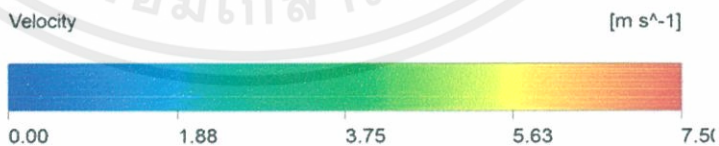
แบบจำลอง k-omega (b8)



แบบจำลอง LES (c8)



แบบจำลอง laminar (d8)



รูปที่ 4.9 (a8), (b8), (c8), (d8) กระแสการไหลของความเร็ว วินาทีที่ 11
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 (มีการพนของไนโตรเจน) ที่ระยะ 25 mm จากปากทางออกท่ออากาศ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีผลทางลิขสิทธิ์และต้องแจ้งให้เจ้าของลิขสิทธิ์ทราบหากมีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากปริศยานิพนธ์การศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันที่ใช้ความร้อนโดยการพ่นเป็นจังหวะ โดยวัตถุประสงค์ของปริศยานิพนธ์นี้คือศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเบื้องต้น เกี่ยวกับอิทธิพลของแบบจำลองที่มีต่อการทำนายปรากฏการณ์การไหลแบบเจ็ตและศึกษาปรากฏการณ์การไหลแบบเจ็ต โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในระบบสามมิติ สรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1.1 ศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วนที่มีผลต่อการทำนายปรากฏการณ์การไหลแบบเจ็ตภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ

การจำลองการไหลแบบเจ็ตที่ถูกต้องจำเป็นต้องใช้การจำลองแบบ DNS แต่เนื่องจากการใช้การจำลอง DNS ใช้ระยะเวลาและสิ้นเปลืองพลังงานมาก จากการศึกษาด้วยแบบจำลอง k-epsilon, k-omega, LES และ laminar สรุปได้ว่า แบบจำลองที่เหมาะสมที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหลแบบเจ็ตภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ ควรเลือกใช้ แบบจำลอง k-epsilon หรือแบบจำลอง k-omega เนื่องจากทั้งสองแบบจำลองให้ผลการจำลองที่ผิดพลาดไม่แตกต่างกัน แต่ใช้ระยะเวลาในการคำนวณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลอง LES ทำให้ประหยัดพลังงานในการคำนวณการไหลแบบเจ็ตที่มีลักษณะการไหลแบบราบเรียบมีระยะสั้น แบบจำลอง laminar จึงให้ผลการจำลองที่ถูกต้องเพียงช่วงแรก ดังนั้นจึงไม่เลือกใช้แบบจำลอง laminar เพราะผิดธรรมชาติของเจ็ต ลักษณะการไหลแบบเจ็ตส่วนใหญ่เป็นการไหลในลักษณะปั่นป่วน

5.1.2 ศึกษาปรากฏการณ์การไหลแบบเจ็ต โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในระบบสามมิติ

จากการศึกษาแบบจำลอง k-epsilon, k-omega, LES และ laminar ให้ผลได้ของสังกะสีออกไซด์คลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง คือ แบบจำลองแต่ละแบบให้ผลได้ของสังกะสีออกไซด์ถูกต้องที่ตำแหน่งท่อพ่นต่างกัน จากแบบจำลอง laminar มีแนวโน้มผลได้ของสังกะสีออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับผลการทดลองในช่วงแรก แสดงให้เห็นว่าการไหลแบบเจ็ตภายในเครื่องปฏิกรณ์เป็นการไหลแบบราบเรียบในช่วงแรก ผลได้ของสังกะสีออกไซด์ของการพ่นที่ตำแหน่งใกล้

ปากทางออกจึงต่ำ ส่วนแบบจำลองความปั่นป่วน k -epsilon, k -omega และ LES ให้ผลได้ของสังกะสีออกไซด์ลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับการทดลองในช่วงหลัง นั่นคือ การไหลแบบเจ็ตที่ระยะห่างจากปากทางออกท่อจะให้ลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ปรับค่าคงที่ในแต่ละแบบจำลองให้เหมาะสมกับสถานะในเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากการคำนวณค่าคงที่ในแบบจำลองที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นจากโปรแกรม
2. คำนวณหากริดที่เหมาะสม (grid independence) ที่ทำให้ผลการคำนวณไม่เปลี่ยนแปลงเพื่อความถูกต้องในแบบจำลองต่างๆ ส่วนแบบจำลอง LES ต้องสร้างกริดระดับ micro scale จึงจะได้ผลการคำนวณที่ถูกต้องที่สุด
3. เลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนชนิดอื่นๆ เช่น Realizable k - ϵ model
4. เลือกใช้กริดแบบ tetrahedra บริเวณทางออกท่อเก็บสารแทน hexahedra เนื่องจากกริดแบบ hexahedra ให้ผลที่เบี่ยงเบนความจริงเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ. (2556). พื้นฐานพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. พิมพ์ครั้งที่ 1: ห้องปฏิบัติการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] Eakarach Bumrunghthaichaichan, Ms.D. thesis, Computational fluid dynamics study on effect of pulse injection on zinc oxide synthesis by thermal oxidation, Chulalongkorn University, Bangkok, 2012.
- [3] Seok Jae Kwon.and Il Won Seo, Experiments in Fluids (2005), Reynolds number effects on the behavior of a non-buoyant round jet, Published online: 29 April 2005, PP 802-812.
- [4] Busarakam Charnhattakorn, Ph.D. thesis, Synthesis of zinc oxide nanoparticles via pulsed thermal oxidation process, Chulalongkorn University, Bangkok, 2010.
- [5] รุ่งโรจน์ วัฒนจิรานนท์ และ สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์, การศึกษาลักษณะเฉพาะของเจ็ตแบบระนาบในกระแสขวางโดยใช้แบบจำลอง Low-Reynolds Number $k-\epsilon$ (2555), วารสารวิจัยพลังงานปีที่ 9, หน้า 59-72.
- [6] จอมภพ แววศักดิ์, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) (2549), วารสารวิทยาศาสตร์ทักษิณ, ม.ค.-มิ.ย.2549, หน้า 32-42.
- [7] ANSYS FLUENT 14.0, Theory Guide, 2011.
- [8] นราธิป ศุโข และคณะ. 2545. การจำลองแบบลาร์จเอ็ดดีดี สำหรับการไหลในช่องลมที่มีการฉีดทำมุมด้านข้าง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16. ภูเก็ต. 14-16 ตุลาคม 2545.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

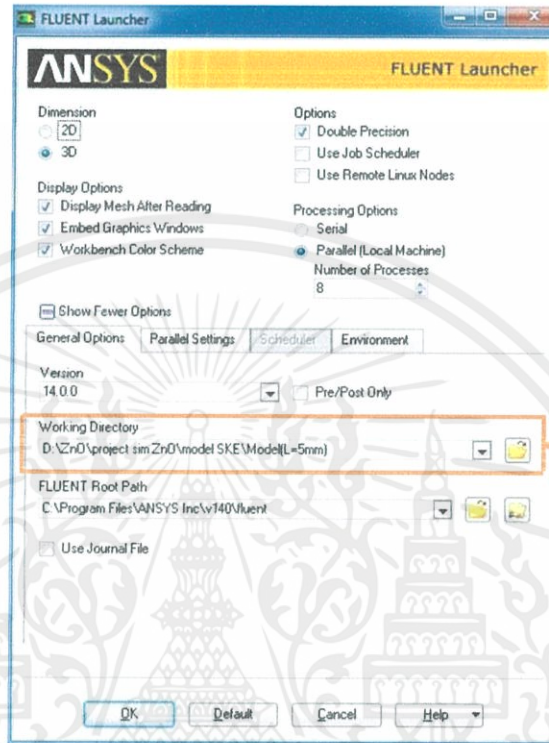


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีการกำหนดค่าการคำนวณในโปรแกรม FLUENT

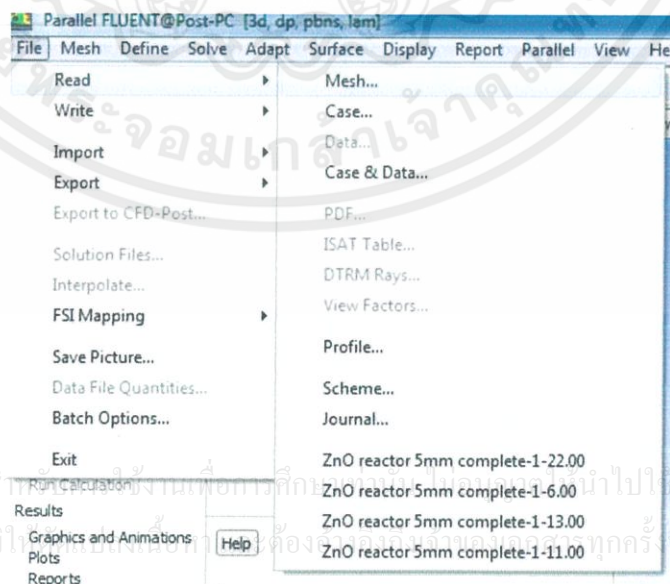
1. เปิดโปรแกรม FLUENT > กำหนดค่า FLUENT Launcher ดังแสดงในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 การกำหนดค่าที่ FLUENT Launcher

2. เปิดไฟล์กริดของปริญญานิพนธ์

2.1 File > Read > Mesh > ZnO reactor (ไฟล์กริด)



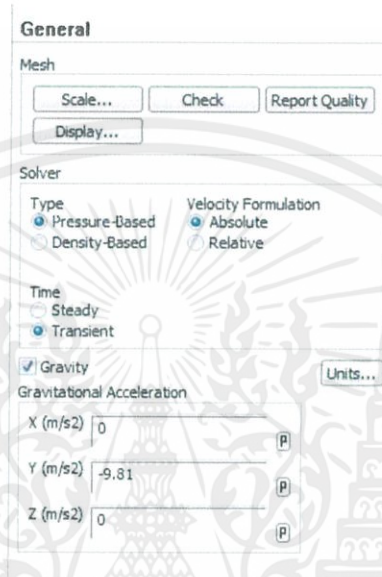
รูปที่ ก.2 การเปิดไฟล์กริด

3. เริ่มจากการตั้งค่า General setting

3.1 General > Scale > Mesh was created in > mm > Scale > View length unit in > m > Close

3.2 Mesh > Check

3.3 Solver setting แสดงการตั้งค่าดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 การตั้งค่า Solver

4 การเลือกโมเดล (Models selection)

4.1 Models > Energy > Edit > Select Energy equation > OK

4.2 เลือกรูปแบบโมเดล ในที่นี้แสดงตัวอย่าง k-epsilon model

Models > Viscous > Edit > Select k-epsilon (2 eqn) > OK

4.3 Select species

Models > Species > Edit > Select species transport > Select volumetric for reactions > Select Finite-rate/Eddy-dissipation > OK

5. การตั้งค่า material

5.1 Materials > Fluid > User-Defined database > Browse > เลือกไฟล์ Zn > OK > Change/Create

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายเอกสารที่แจ้งชื่อไว้ด้านบนไปใช้

หมายเหตุ ทำข้อ 5.1 อีกครั้ง แต่เลือกไฟล์จาก Zn เป็น ZnO แทน (เขียนข้อมูลของ Zn , ZnO เป็นภาษาซีไว้ก่อนแสดงข้อมูลดังตารางที่ ก.1 และตารางที่ ก.2)

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติของแก๊สที่ใช้

Properties	Unit	Coefficient	Gases			
			Nitrogen	Oxygen	Zinc	Zinc oxide
Formular			N ₂	O ₂	Zn	ZnO
Density @ 300K	[kg/m ³]		1.145	1.308	-	-
Molecular weight	[kg/kmol]		28.013	31.999	65.39	81.389
Characteristic energy	[K]		97.53	107.4	1,356	1,356
Collision diameter	[Angstroms]		3.621	3.458	2.556	2.556
Standard state enthalpy	[J/kgmol]		0	0	1.30E-08	0
Standard state entropy	[J/(kgmol-K)]		191,494.8	205,026.9	160,980	43,640
Specific heat		A	-	-	323.108	300.483
Cp=A+BT+CT ² +DT ³ +ET ⁴	[J/(kg-K)]	B	-	-	-2.03E-02	4.30E-01
		C	-	-	1.13E-05	-4.88E-04
		D	-	-	-2.72E-09	2.50E-07
		E	-	-	2.52E-13	-4.65E-11

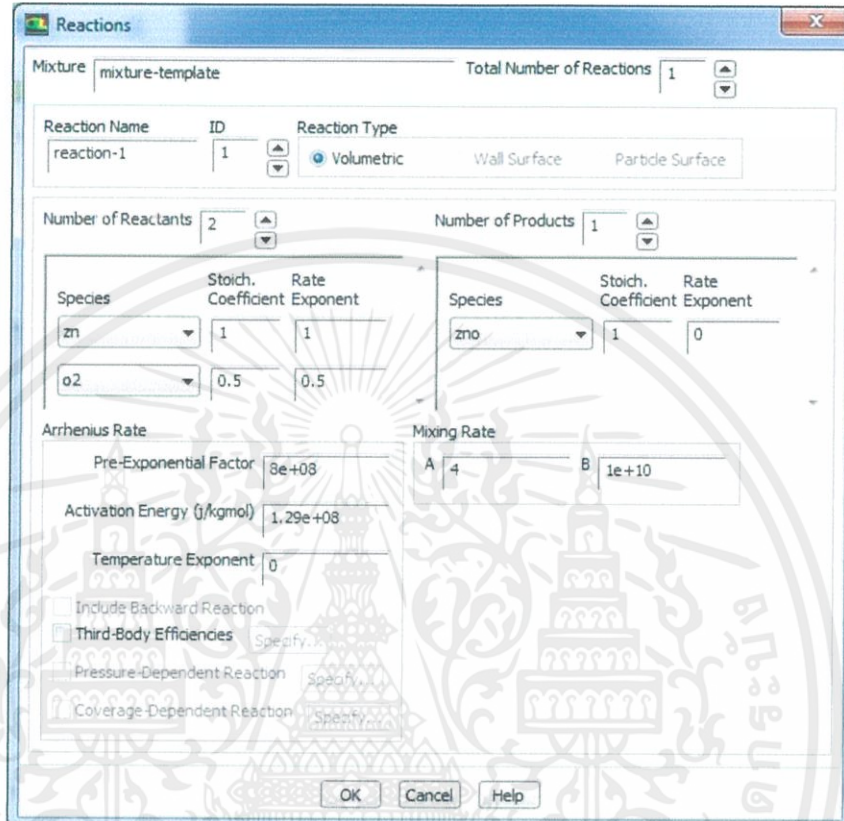
ตารางที่ ก.2 การตั้งค่าแก๊สที่ใช้

Properties	Unit	Gases			
		Nitrogen	Oxygen	Zinc	Zinc oxide
Formular		N ₂	O ₂	Zn	ZnO
Heat capacity (Cp)	[J/(kg-K)]	Polynomial	Polynomial	Polynomial	Polynomial
Thermal conductivity (k)	[W/(m-K)]	Polynomial	Polynomial	Kinetic theory	Kinetic theory
Viscosity	[kg/(m-s)]	Polynomial	Polynomial	Kinetic theory	Kinetic theory
Molecular weight	[kg/kgmol]	FLUENT default	FLUENT default	65.39	81.389
Standard state enthalpy	[J/kgmol]	FLUENT default	FLUENT default	1.304E+08	0
Standard state entropy	[J/(kgmol-K)]	FLUENT default	FLUENT default	160,980	43,640
Reference temperature	[K]	298.15	298.15	298.15	298.15
L-J Characteristic length	[Angstroms]	FLUENT default	FLUENT default	2.556	2.556
L-J Energy parameter	[K]	FLUENT default	FLUENT default	1356	1356

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 Mixture > Mixture species Edit > เลือก water vapor > remove > กดเลือก Zn
> Add > เลือก ZnO > Add > OK

5.3 Mixture > Reaction Edit > ตั้งค่าดังแสดงในรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 การตั้งค่า reaction

5.4 Density > Ideal-gas

5.5 Cp (Specific heat) > Mixing law

5.6 Thermal conductivity > Ideal-gas-mixing-law

5.7 Viscosity > Ideal-gas-mixing-law

5.8 Mass Diffusivity > Kinetic-theory > Change/Create

6. Cell zone condition > Fluid > Operating conditions > variable density parameters >

เลือก Specified Operating density > กำหนดค่า Operating density เท่ากับ 0 > OK

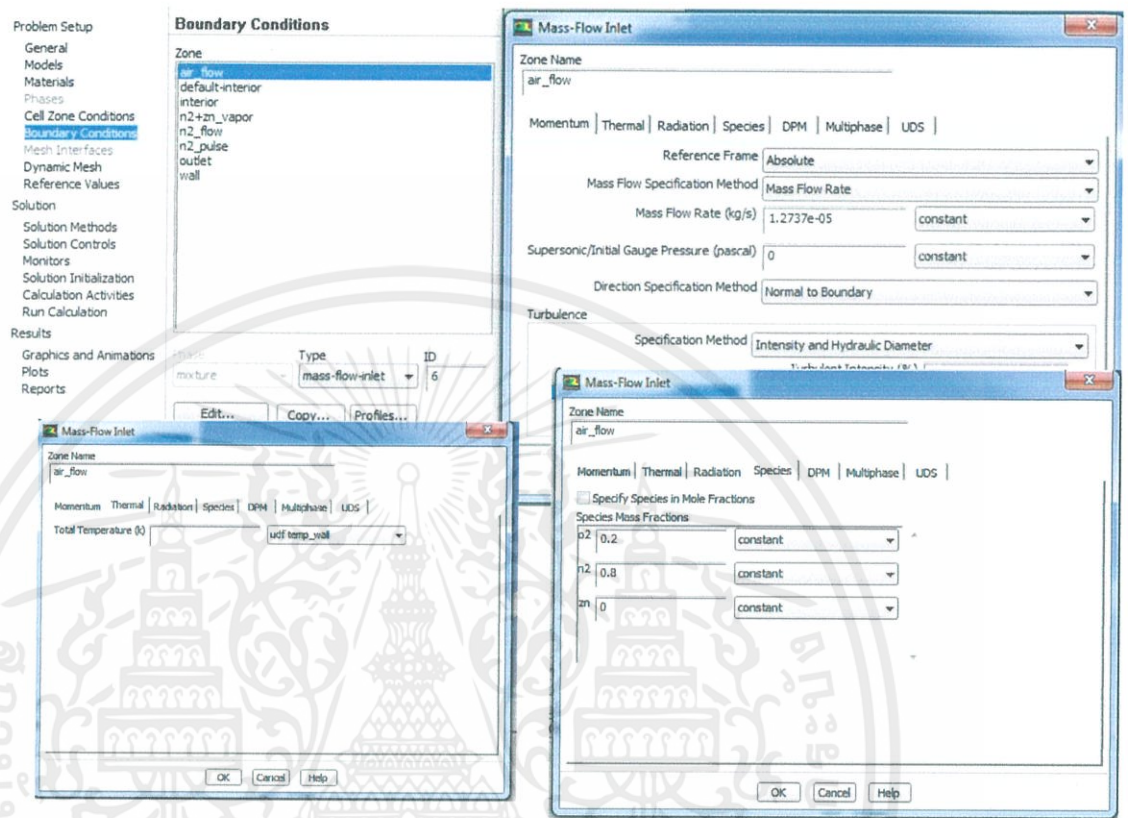
7. Boundary condition setting

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1 define > User-defined > functions > Interpreted > Browse > เลือก UDF

mass flow rate > interpret

7.2 ตั้งค่า Boundary Condition ดังรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 การตั้งค่าสภาวะขอบเขตของ Air flow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ค่าของสภาวะขอบเขตที่ทางเข้าและทางออก

Tube (Name)	A(Reactor)	B(N ₂ carrier)		C (Air feed)		D (Product outlet)	E (N ₂ pulse)		F (N ₂ flow)	
Material & Mass fraction, [-]	Mixture	N ₂	0.86343	N ₂	0.8	Mixture	N ₂	1	N ₂	1
		Zn	0.13657	O ₂	0.2					
Inner radius, [m]	0.02100	0.00700		0.00150		0.00425	0.00175		0.00325	
Flow area, [m ²]	1.39E-03	1.26E-04		6.61E-06		5.62E-05	9.19E-06		3.21E-05	
Hydraulic diameter, [m]	0.0420	0.0080		0.0030		0.0085	0.0035		0.0065	
(Mass flow rate, [kg/s])	-	2.75E-05		1.27E-05		-	Time, [s]	Q, [kg/s]	2.37E-05	
							0.1	34.14E-05		
							0.2	2.37E-05		
							5.0	2.37E-05		
5.2	1.18E-05									
Velocity, [m/s]	-	0.59043		5.47683		-	11		1.40817	
(Reynolds Number, [-])	-	-		164.97		-	0		91.60	

8. Reference Values > Reference zone > fluid

Problem Setup

- General
- Models
- Materials
- Phases
- Cell Zone Conditions
- Boundary Conditions
- Mesh Interfaces
- Dynamic Mesh
- Reference Values
- Solution
- Solution Methods
- Solution Controls
- Monitors
- Solution Initialization
- Calculation Activities
- Run Calculation
- Results
- Graphics and Animations
- Plots
- Reports

Reference Values

Compute from:

Reference Values

Area (m²): 1

Density (kg/m³): 1.225

Enthalpy (J/kg): 0

Length (m): 1

Pressure (pascal): 0

Temperature (K): 288.16

Velocity (m/s): 1

Viscosity (kg/m-s): 1.7894e-05

Ratio of Specific Heats: 1.4

Reference Zone: fluid

Help

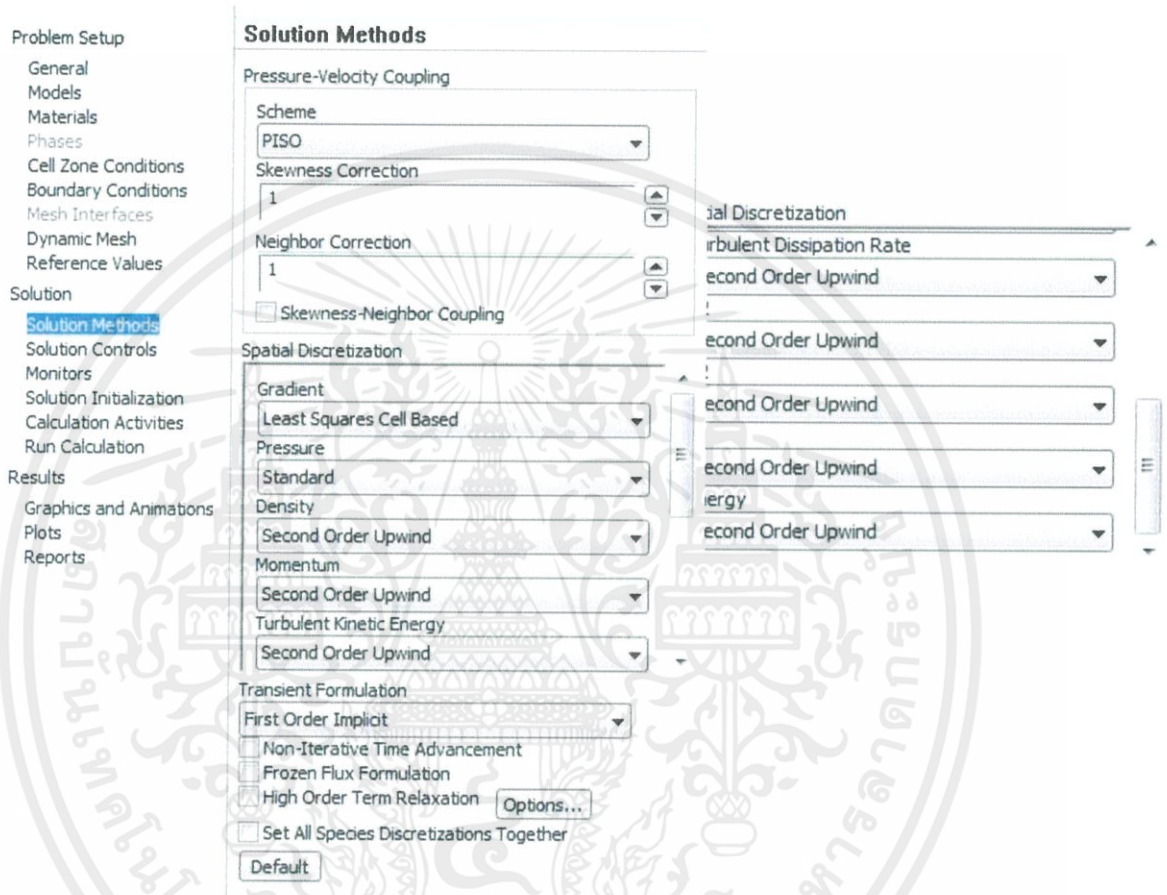
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่ออ้างอิงเท่านั้น ไม่แนะนำให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ ก.6 การตั้งค่า Reference Values
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. Solution > Solution Methods

9.1 Scheme > PISO

9.2 Spatial Discretization ตั้งค่าดังรูปที่ ก.7

9.3 Transient Formulation > First Order Implicit



รูปที่ ก.7 การตั้งค่า Solution Methods

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. Solution Controls > Under-Relaxation Factors ตั้งค่าตามรูปที่ ก.8

The screenshot shows the 'Solution Controls' dialog box in ANSYS Fluent. The 'Under-Relaxation Factors' section is expanded, showing the following values:

Parameter	Value
Pressure	0.7
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.3
Turbulent Kinetic Energy	0.8

The 'Under-Relaxation Factors' section is also expanded, showing the following values:

Parameter	Value
Turbulent Dissipation Rate	0.8
Turbulent Viscosity	0.8
o2	0.8
n2	0.8
zn	0.8
Energy	0.8

Buttons: Default, Equations..., Limits..., Advanced..., Set All Species URFs Together, Help.

รูปที่ ก.8 การตั้งค่า Solution Controls

11. การตั้งค่า Solution Initialization

The screenshot shows the 'Solution Initialization' dialog box in ANSYS Fluent. The 'Initialization Methods' section is expanded, showing the following values:

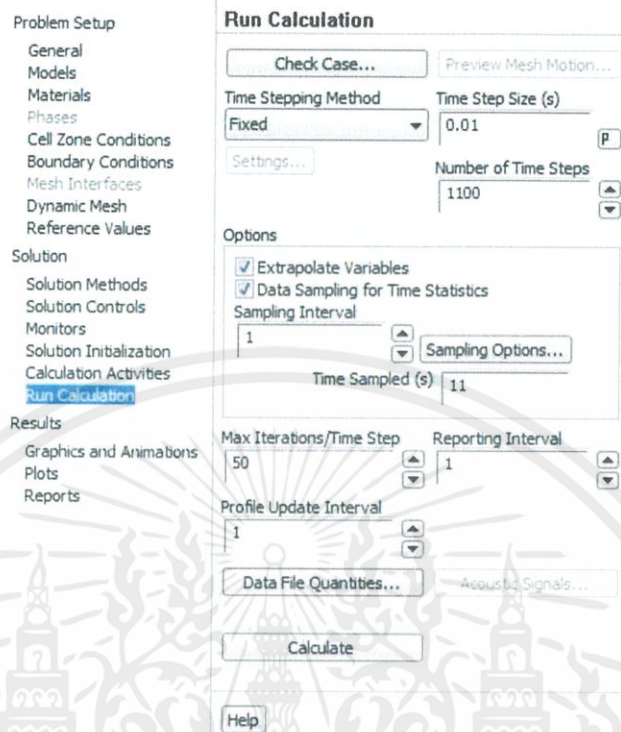
Parameter	Value
Gauge Pressure (pascal)	0
X Velocity (m/s)	0
Y Velocity (m/s)	0
Z Velocity (m/s)	0
Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)	0.0002643942
Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)	0.009425951
o2	0.007623268
n2	0.8934983
zn	0.09887841
Temperature (k)	880.0944

Buttons: Initialize, Reset, Patch..., Reset Statistics.

รูปที่ ก.9 การตั้งค่า Solution Initialization

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. การตั้งค่า Run Calculation



รูปที่ ก.10 การตั้งค่า Run Calculation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

C code การไหลเชิงมวลของการพ่นไนโตรเจนแบบเป็นจังหวะ

```

// Mass flow rate profile at inlet boundary
#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE(N2_pulse,thread,index)
{
    face_t f1;
    real t = CURRENT_TIME;
    begin_f_loop(f1,thread)
    {
        real tmod11 = t - (11 * floor(t / 11));
        real y;
        if (tmod11 < 0.1) {
            y = 3.414e-3* tmod11;
        } else if (tmod11 < 0.2) {
            y = (-3.17692e-3* tmod11) + 6.59092e-4;
        } else if (tmod11 < 5) {
            y = 2.37083e-5;
        } else if (tmod11 < 5.2) {
            y = (-1.18542e-4* tmod11) + 6.16416e-4;
        } else {
            y = 0;
        }
        F_PROFILE(f1,thread,index) = y;
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

C code รูปแบบอุณหภูมิที่ผนังท่อ

```
// Temperature profile at wall boundary
#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE(temp_wall,thread,position)
{
    real r[3];
    real x;
    face_t f3;
    begin_f_loop(f3,thread)
    {
        F_CENTROID(r,f3,thread);
        x = r[2];
        F_PROFILE(f3,thread,position) = 229049.89*x*x*x*x*x*x -
        401566.64*x*x*x*x*x + 255764.26*x*x*x*x - 70248.54*x*x*x +
        2711.18*x*x + 2616.07*x + 650.54;
    }
    end_f_loop(f3,thread)
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

PISO Algorithm

ระเบียบวิธีแบบ PISO

PISO ย่อมาจาก Pressure-Implicit with Splitting of Operators นำเสนอโดย Issa ในปี ค.ศ.1986 เดิมกระบวนการการคำนวณความดันและความเร็วได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อนำไปใช้กับการ ในคำนวณสถานะไม่คงตัวของของไหลอัดตัวไม่ได้ ต่อมาได้รับการปรับปรุงเพื่อใช้สำหรับแก้ปัญหาที่ สถานะคงตัว PISO มีการทำนาย 1 ขั้นตอน และมีการปรับแก้ 2 ขั้นตอน ซึ่งเป็นการเพิ่มเติมจาก SIMPLE ในส่วนของการตรวจสอบ

ขั้นตอนการทำนาย

สมการโมเมนตัมแยก

$$a_{i,j}u_{i,j} = \sum a_{ub}u_{ub} + (p_{I-1,j} - p_{I,j})A_{i,j} + b_{i,j} \quad (49)$$

$$a_{i,j}v_{i,j} = \sum a_{ub}v_{ub} + (p_{I,j-1} - p_{I,j})A_{i,j} + b_{i,j} \quad (50)$$

เริ่มจากการคาดเดาค่าหรือกำหนดค่าสนามการไหล p^* แล้วคำนวณสมการโมเมนตัมแยกที่ แสดงดังสมการ (49) และ (50) โดยใช้สนามความดันคาดเดา p' เพื่อให้ได้องค์ประกอบความเร็ว u^* และ v^* หากค่าความดันปรับแก้จาก

$$a_{i,j}p'_{i,j} = a_{I+1,j}p'_{I+1,j} + a_{I-1,j}p'_{I-1,j} + a_{I,j+1}p'_{I,j+1} + a_{I,j-1}p'_{I,j-1} + b_{i,j} \quad (51)$$

จะสามารถหาค่าความดันจริง p ได้จาก

$$\begin{aligned} p &= p^* + p' \\ u &= u^* + u' \\ v &= v^* + v' \end{aligned} \quad (52)$$

ซึ่งเป็นวิธีการเช่นเดียวกับวิธีแบบ SIMPLE

ขั้นตอนการปรับแก้ที่ 1

สนามการไหล u^* และ v^* ยังไม่ต่อเนื่องจนกว่าจะได้ค่าสนามความดัน p^* ที่ถูกต้อง การปรับแก้ขั้นแรกของระเบียบวิธีแบบ SIMPLE จะได้ค่าสนามความเร็ว (u^{**}, v^{**}) ที่เหมาะสมกับสมการ ความต่อเนื่องแยก ผลลัพธ์ของสมการที่ได้จะเหมือนกับผลลัพธ์ของสมการสนามความเร็วจริงของวิธี

แบบ SIMPLE แต่มีการปรับแก้ค่าเพิ่มขึ้นในระเบียบวิธีนี้ ในขั้นตอนปรับแก้ที่ 2 และเรียกสมการความต่อเนื่องแยกที่ถูกแทนด้วยสมการปรับแก้ความดันว่าสมการปรับแก้ความดันลำดับ 1

ขั้นตอนการปรับแก้ที่ 2

นำค่าสนามความเร็ว (u^{**}, v^{**}) มาแก้สมการโมเมนตัมแยก และหาค่าความดันปรับแก้จากสมการปรับแก้ความดันลำดับ 2

$$a_{i,j} u_{i,j}^{**} = \sum a_{ub} u_{ub}^* + (p_{i-1,j}^{**} - p_{i,j}^{**}) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (53)$$

$$a_{i,j} v_{i,j}^{**} = \sum a_{ub} v_{ub}^* + (p_{i,j-1}^{**} - p_{i,j}^{**}) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (54)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้