

แบบจำลองการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนด้วย

ทฤษฎี MIXTURE FRACTION

A SIMULATION OF COMBUSTION AND HEAT TRANSFER
BY MIXTURE FRACTION THEORY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-201-7

แบบจำลองการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนด้วย
ทฤษฎี MIXTURE FRACTION

A SIMULATION OF COMBUSTION AND HEAT TRANSFER
BY MIXTURE FRACTION THEORY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974 - 648 - 201 - 7



เลขที่.....
เลขชั้น.....
เลขปี.....
40018
20 ก.ค. 2544

สงวนลิขสิทธิ์... สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

**A SIMULATION OF COMBUSTION AND HEAT TRANSFER
BY MIXTURE FRACTION THEORY**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQRIMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2001

ISBN 974 - 648 - 201 - 7



COPYRIGHT 2001

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การจำลองการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนด้วยทฤษฎี Mixture Fraction
A SIMULATION OF COMBUSTION AND HEAT TRANSFER BY
MIXTURE FRACTION THEORY

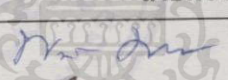
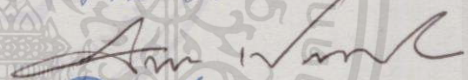

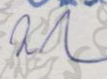
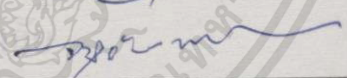
ชื่อนักศึกษา นายนิวัฒน์ นาคะโยธินสกุล

รหัสประจำตัว 41062018

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.พงษ์เจด พรหมวงศ์	
ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์	
ดร.ชินรักษ์ เขียรพงษ์	
รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์	
ผศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 19 เมษายน 2544 เวลา 12.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว



วันที่.....A.....เดือน.....เดือน.....พ.ศ. ๒๕๔๔

หัวข้อวิทยานิพนธ์

แบบจำลองการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนด้วยทฤษฎี

Mixture Fraction

นักศึกษา

นาย นิวัฒน์ นาคะ โยธินสกุล

รหัสประจำตัว

41062018

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

พ.ศ.

2544

อาจารย์ผู้คุมวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรรูวัตร เจริญสุข

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เสนอการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของก๊าซภายในเตาเผาโดยการนำทฤษฎี Mixture Fraction มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการเทคนิคการคำนวณเชิงตัวเลขที่เรียก วิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume Method) และผสมผสานกับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนต้นแบบที่ได้รับการพัฒนามาก่อนหน้านี้แล้ว[12] แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในคือวิธีสมการ $k-\epsilon$ โดยที่สมการการถ่ายเทมวล โมเมนตัมและปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ด้วย ค่าสัดส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์ จะถูกคำนวณได้จากค่า Mixture Fraction ด้วยฟังก์ชันอย่างง่าย ลักษณะของเตาเผาไหม้เป็นทรงกระบอกกลมแนวนอนและเปลวไฟติดในแนวด้านข้างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวเท่ากับ 0.21 และ 1.90 เมตรตามลำดับ ท่อส่งเชื้อเพลิงและอากาศที่ส่งเข้าหัวเผาได้ถูกกำหนดให้มีความยาวเท่ากับ 0.70 เมตรเพื่อให้แน่ใจว่าสภาพของไหลที่ทางเข้าเตาเผาเป็นแบบพัฒนาเต็มตัว (Fully Developed) แบบจำลองนี้ที่ใช้สมมุติฐานที่ว่าอัตราเจลาของการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างรวดเร็วและไม่คิดผลของปฏิกิริยาที่ไม่เสถียรโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ซึ่งทำให้เมื่อเสร็จสิ้นขบวนการเผาไหม้จะมีสารที่เกิดขึ้นคือ ผลิตภัณฑ์หรือเชื้อเพลิงหรืออากาศเท่านั้น ในการทดลองได้กำหนดเงื่อนไขที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนสภาวะทางเข้าไว้ 4 กรณีคือ Reynolds Number, สัดส่วนโดยมวล, การหมุนของอากาศและการกระจายความเร็ว ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ได้ทำการวัดการกระจายตัวของค่า Mixture Fraction ซึ่งสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ได้และพบว่าในแต่ละกรณีที่ไม่มี การหมุนของอากาศผลการทำนายได้ให้ค่า Mixture Fraction ต่ำกว่าผลการทดลองทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิของการเผาไหม้มีค่าสูงกว่าปกติภายใต้สมมุติฐานที่ไม่คิดผลของการถ่ายเทความร้อนที่ผิวผนัง ความหนาแน่นของก๊าซและ Turbulent Viscosity มีค่าลดลงซึ่งมีผลทำให้เทอมของการแพร่ต่ำกว่าผลการทดลอง สำหรับในแต่ละกรณีที่มีการหมุนของอากาศซึ่งมีคุณลักษณะเป็นแบบ Anisotropic ผลการทำนายจะถูกจำกัดโดยแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้คือ สมการ $k-\epsilon$ ซึ่งมีสมมุติฐานแบบ

Isotropic

Thesis Title	A Simulation of Combustion and Heat Transfer by Mixture Fraction Theory
Student	Mr. Nivat Nakayothinskul
Student ID.	41062018
Degree	Master of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2001
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Jarruwat Charoensuk

ABSTRACT

This thesis presents a study on gas combustion behavior in a combustor using mixture fraction theory and the numerical finite volume method. This model is incorporated with the original turbulence flow model which has been developed earlier [12]. The two equation $k - \varepsilon$ is used for turbulence modelling. The mass fraction of fuel, air and product are calculated from a mixture fraction by a simple function. Fast kinetic reactions are assumed and the intermediate reactions are ignored therefore the final results which contain three species; fuel, air or product, will occur under this assumption. Complete combustion is assumed and the occurred product will contain only carbon dioxide and water. The combustion chamber is horizontally side-fire type cylindrical shape with 0.21 m. in inside diameter and 1.90 m. in length. The fuel and air supply pipes are fixed at 0.70 m. in length to ensure that the flow condition at combustor inlet will be fully developed. Four parameters at inlet condition, namely Reynolds number, fuel-air ratio, air swirl and velocity profiles are varied in order to study their effect on flow aerodynamics. The calculated mixture fraction value at each point within combustion chamber is monitored. It is found that all cases except swirl cases, a predicted mixture fraction is lower than an existing experiment. It is explained that the mixture temperature has raised due to an adiabatic assumption. Therefore, the mixture density including turbulent viscosity will decrease and this effects on the diffusion term that is lower than an experiment. For cases including the effect of swirl, the predicted results are limited by turbulence modelling. Isotropic turbulent flow is assumed for the two equation $k - \varepsilon$ whilst swirl condition to be anisotropic.

กิตติกรรมประกาศ

การทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างดีก็ด้วยคำแนะนำ คำปรึกษาและความกรุณาจาก ผศ. ดร. จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกราบซึ่งในความอนุเคราะห์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.จำลอง ปรามแก้ว ที่กรุณาให้คำแนะนำและช่วยเหลือข้อมูลเกี่ยวกับเอกสารที่นำมาใช้กับงานวิจัยชิ้นนี้และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้

ขอขอบคุณ นาย ปิณญา แดงวิไลลักษณ์ นาย ภาสกร เวสสะโกศล และเพื่อนนักศึกษาปริญญาโทที่ช่วยหาข้อมูลและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา และ มารดา เป็นอย่างยิ่ง ที่เฝ้าเลี้ยงดู อบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จ

ถ้าปราศจากบุคคลเหล่านี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยอำนวยการความสุขสวัสดิ์ถึงมีแก่ทุกท่าน

นิวัฒน์ นาคะโยธินสกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	4
2.1 ปฏิกริยาเคมีของการเผาไหม้.....	4
2.2 แบบจำลอง Eddy break-up.....	6
2.3 แบบจำลอง Laminar flamelet.....	9
บทที่ 3 สมการพื้นฐานของแบบจำลอง.....	10
3.1 บทนำ.....	10
3.2 แบบจำลองของก๊าซ.....	10
3.3 แบบจำลองการเผาไหม้.....	19
บทที่ 4 การประยุกต์วิธี Finite volume กับทฤษฎี Mixture Fraction ภายในห้องเผาไหม้ของก๊าซ...28	
4.1 การประยุกต์ใช้วิธี Finite volume.....	28
4.2 โครงสร้างของโปรแกรมโดยทั่วไป.....	31

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 การแก้เมทริกซ์โดยวิธี TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm)	34
4.4 โครงสร้างโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ	37
บทที่ 5 การจำลองการเผาไหม้ของเตาเผาของก๊าซภายในเตาเผา.....	41
5.1 บทนำ.....	41
5.2 ลักษณะห้องเผาไหม้.....	42
5.3 ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผล.....	42
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	63
6.1 สรุปผลงานวิจัย.....	63
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	64
เอกสารอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก.....	65
ภาคผนวก ก. คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของเชื้อเพลิงผสม.....	70
ภาคผนวก ข. วิธีการตรวจสอบผลการคำนวณที่ได้จากทฤษฎี.....	73
ภาคผนวก ค. ผลการทำนายแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนวิธีสมการ $k - \epsilon$	77
ภาคผนวก ง. การหาความเร็วเฉลี่ยของเชื้อเพลิงและอากาศที่สภาวะทางเข้า.....	80
ภาคผนวก จ. การกำหนดจำนวนเซลล์และค่าสภาวะเงื่อนไขเริ่มต้น.....	82
ภาคผนวก ฉ. ผลงานทางวิชาการเกี่ยวกับงานวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์.....	86
ประวัติผู้เขียน.....	94

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของเชื้อเพลิงผสมที่มีโครงสร้างไฮโดรคาร์บอน.....	4
3.1 ค่าคงที่ของแบบจำลองสำหรับแบบจำลองของ $k - \epsilon$	14
5.1 แสดงค่าเงื่อนไขของสภาวะที่ทางเข้าสำหรับการจำลองการเผาไหม้.....	43
5.2 แสดงค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้โดยแบบจำลองการเผาไหม้.....	43
ผ.ก.1 แสดงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของก๊าซผสม.....	72
ผ.ข.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณใหม่กับค่าที่ได้จากแบบจำลอง.....	76
ผ.ค.1 แสดงค่าสภาวะที่ทางเข้าและลักษณะของห้องทดสอบ.....	78
ผ.ง.1 ค่าความเร็วที่ทางเข้าของก๊าซเชื้อเพลิงและอากาศที่ใช้ในการจำลองการเผาไหม้.....	81



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การจัดเรียงโมเลกุลของมีเทน.....	5
2.2 ก และ ข แสดงผลการศึกษาของ Magnussen และ Hjertager (1976) ซึ่งได้ทำนาย ผลการ กระจายตัวของอนุภาคนิวมิภายในเตาเผาด้วยแบบจำลอง Eddy break-up.....	7
2.3 แสดงผลที่ได้จากการพัฒนาแบบจำลอง Eddy break-up โดย Gosman <i>et al</i> (1978).....	8
2.4 แสดงผลการทำนายการเผาไหม้โดย Nikjooy <i>et al</i> (1988).....	9
4.1 เซลล์ของสเกลาร์และเวกเตอร์ในระบบ Staggered grid	28
4.2 สนามความดันที่เกิด Checker-board.....	29
4.3 การถ่ายเท 1 มิติ ของฟลักซ์ผ่านขอบเขตระหว่างตำแหน่ง I และ P.....	30
4.4 รูปร่าง Quadratic function ใช้ใน Quick scheme.....	33
4.5 อธิบายโครงสร้างของ Subroutine ที่คำนวณหาค่า Mixture Fraction.....	38
4.6 อธิบายโครงสร้าง PISO algorithm.....	39
4.7 อธิบายโครงสร้างของโปรแกรมหลักที่ใช้คำนวณการเผาไหม้ ด้วยทฤษฎี Mixture Fraction.....	40
5.1 ลักษณะโครงสร้างของเตาเผา.....	41
5.2 โครงสร้างของหัวเผา	42
5.3 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของค่า f ที่สภาวะ Re เท่ากับ 16,300 และ 10,867 ตามแนวหน้าตัดขวางที่ระยะต่างๆตามแนวแกนความยาว.....	45
5.4 การเปรียบเทียบค่า f ระหว่างการทำนายและการทดลองที่สภาวะ Re เท่ากับ 10,867 ตามหน้าตัดขวางที่ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนความยาว.....	46
5.5 การเปรียบเทียบค่า f ระหว่างการทำนายและการทดลองที่สภาวะ Re เท่ากับ 16,300 ตามหน้าตัดขวางที่ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนความยาว.....	46
5.6 การกระจายตัวของอนุภาคนิวมิจากผลการทำนายที่ Re เท่ากับ 16,300.....	47
5.7 การกระจายตัวของสัดส่วนโดยมวลของอากาศจากผลการทำนายที่ Re เท่ากับ 16,300.....	47
5.8 การกระจายตัวของสัดส่วนโดยมวลของผลิตภัณฑ์จากผลการทำนายที่ Re เท่ากับ 16,30.....	48
5.9 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทดลองที่ F/A เท่ากับ 0.0635.....	50
5.10 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทดลองที่ F/A เท่ากับ 0.0786.....	50
5.11 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทำนายที่ F/A เท่ากับ 0.0635.....	51
5.12 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทำนายที่ F/A เท่ากับ 0.0786.....	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 การเปรียบเทียบค่า f ระหว่างการทำนายและการทดลองที่สภาวะ F/A เท่ากับ 0.0635 ตามหน้าตัดขวางที่ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนความยาว.....	52
5.14 การเปรียบเทียบค่า f ระหว่างการทำนายและการทดลองที่สภาวะ F/A เท่ากับ 0.0786 ตามหน้าตัดขวางที่ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนความยาว.....	52
5.15 การเปรียบเทียบค่า f ตามแนวแกนกลางความยาวระหว่างการทำนายและการทดลองที่สภาวะค่า F/A เท่ากับ 0.0635.....	53
5.16 การกระจายตัวของอุณหภูมิจากผลการทำนายที่ F/A เท่ากับ 0.0635.....	53
5.17 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทดลองที่มุมการหมุนเท่ากับ 30° และ 60°	53
5.18 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทำนายที่มุมการหมุนเท่ากับ 30°	53
5.19 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทำนายที่มุมการหมุนเท่ากับ 30°	54
5.20 การเปรียบเทียบค่า f ระหว่างการทำนายและการทดลองที่มุมการหมุนเท่ากับ 30° ตามหน้าตัดขวางที่ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนความยาว.....	54
5.21 การกระจายตัวของอุณหภูมิจากผลการทำนายที่มุมการหมุนเท่ากับ 30°	47
5.22 แสดงลักษณะการกระจายความเร็วทั้งสองแบบ.....	58
5.23 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทดลองที่สภาวะ Re เท่ากับ 16,300 และ F/A เท่ากับ 0.0635 และไม่มี การหมุนของอากาศ.....	59
5.24 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทำนายที่สภาวะไม่มี การหมุนของอากาศและการกระจายความเร็วที่ทางเข้าเป็นแบบไม่สมมาตร.....	59
5.25 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทำนายที่สภาวะไม่มี การหมุนของอากาศและการกระจายความเร็วที่ทางเข้าเป็นแบบสมมาตร.....	60
5.26 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทดลองที่สภาวะ Re เท่ากับ 20,460 และ F/A เท่ากับ 0.0623 และมี การหมุนของอากาศที่มุมเท่ากับ 45°	60
5.27 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทำนายที่สภาวะการหมุนของอากาศที่มุมเท่ากับ 45° และการกระจายความเร็วที่ทางเข้าเป็นแบบไม่สมมาตร.....	61
5.28 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทำนายที่สภาวะการหมุนของอากาศที่มุมเท่ากับ 45° และการกระจายความเร็วที่ทางเข้าเป็นแบบสมมาตร.....	61
5.29 การเปรียบเทียบค่า f ระหว่างการทำนายและการทดลองที่มุมการหมุนเท่ากับ 45° ตามหน้าตัดขวางที่ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนความยาว.....	62

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.30 การกระจายตัวของอนุภาคที่ไม่มีภาระหนักของอากาศและการกระจายความเร็ว เป็นแบบสม่ำเสมอ.....	62
ผ.ข.1 อธิบายโครงสร้างของชั้นตอนที่ใช้ในการคำนวณใหม่.....	74
ผ.ข.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการอ้างอิงพิคค์.....	75
ผ.ค.1 ลักษณะของห้องทดสอบที่ใช้ในการทดลองของ Yoon.....	77
ผ.ค.2 การเปรียบเทียบผลการทำนายและผลการทดลองที่สภาวะที่ไม่มีภาระหนักของอากาศ.....	79
ผ.ค.3 การเปรียบเทียบผลการทำนายและผลการทดลองที่มีภาระหนักของอากาศเท่ากับ 45°	79
ผ.ง.1 พื้นที่หน้าตัดขวางของท่อเชื้อเพลิงและอากาศของหัวเผาที่ใช้ในการทดลอง.....	81
ผ.จ.1 การแบ่งแนวกริดของเตาเผาทดสอบในมาตราส่วนจริง.....	83
ผ.จ.2 ลักษณะการกำหนดระยะแนวกริดของเตาเผาทดสอบ.....	84
ผ.จ.3 ค่าสภาวะเงื่อนไขเริ่มต้นของค่า Mixture Fraction.....	85

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัด
$a_{E,P,W,N,S}$	ตัวแปรไร้มิติที่ตำแหน่ง E, P, W, N และ S ตามลำดับ
C	คาร์บอนอะตอม
C_D	สัมประสิทธิ์แรงดูด (Drag coefficient)
CH_4	มีเทน
CO	คาร์บอนมอนนอกไซด์
CO_2	คาร์บอนไดออกไซด์
c_p	ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่
D	สัมประสิทธิ์การแพร่
D_{eff}	สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล
D_e	สัมประสิทธิ์การแพร่ที่ตำแหน่ง e
D_w	สัมประสิทธิ์การแพร่ที่ตำแหน่ง w
d	เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเผา
E	พลังงานการกระตุ้นของปฏิกิริยา
F_d	แรงดูด
F_e	แรงกระทำที่ตำแหน่ง e
F_i	แรงกระทำภายนอกที่ตำแหน่งต่าง ๆ
F_w	แรงกระทำที่ตำแหน่ง w
F/A	สัดส่วนโดยมวลระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ
f	Mixture Fraction
f_{st}	Mixture Fraction ที่สภาวะเชื้อเพลิงและอากาศทำปฏิกิริยากันจนหมดพอดี
g	แรงโน้มถ่วงของโลก
g_e	ฟลักซ์ของการพาและการแพร่ที่ตำแหน่ง e
g_i	ฟลักซ์ของการพาและการแพร่ทั้งหมด
g_w	ฟลักซ์ของการพาและการแพร่ที่ตำแหน่ง w
H	ไฮโดรเจนอะตอม
H_2	ไฮโดรเจน
H_2O	น้ำ
h	เอนทัลปีสัมบูรณ์

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

h_f	Enthalpy of Formation
h_s	Sensible enthalpy
h_f^0	เอนทัลปีที่สภาวะอ้างอิง
k	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
K_A	ค่าคงที่ของ Arrhenius
k_g	ค่าการนำความร้อนของก๊าซ
m	มวล
MW	น้ำหนักโมเลกุล
N	จำนวนโมล
N_2	ก๊าซไนโตรเจน
O	ออกซิเจนอะตอม
O_2	ก๊าซออกซิเจน
Pe	Peclet number
P	ความดันสัมบูรณ์
Pr	Prandtl number
Pr	สารผลิตภัณฑ์
p	ความดัน
Q	ค่าความร้อนทั้งหมด
R	ค่าคงที่จำเพาะของก๊าซ
R_u	ค่าคงที่สากลของก๊าซ
Re	ค่า Reynolds number
r	พิกัดตามแนวรัศมี
s	สัดส่วนที่เชื้อเพลิงและอากาศทำปฏิกิริยากันจนหมดพอดี
$S_{v,i}$	อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตร
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์
t	เวลา
\tilde{U}_g	ค่าความเร็วเฉลี่ยของก๊าซ
u	ความเร็วตามแนวแกน
u_r	สัดส่วนของความเร็ว

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

V	ปริมาตร
v	ความเร็วตามแนวรัศมี
w	พิกัดตามแนวเส้นรอบวง
X	ตัดส่วนโดยโมล
Y	ตัดส่วนโดยมวล
y	ระยะห่างจากผนัง
y^+	ตัวแปรไร้มิติของระยะใกล้ผนัง
z	พิกัดตามแนวแกน
$[\]$	เทอมของมิติ
Σ	ผลของการบวก
δ_{ij}	Diagonal unit vector
ε	อัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน
Γ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
κ	ค่าคงที่ของ Von Karman
μ	สัมประสิทธิ์ของความหนืด
μ_{ed}	Eddy viscosity
μ_{eff}	Effective viscosity
μ_l	Laminar viscosity
μ_t	Turbulent viscosity
ρ	ความหนาแน่นของก๊าซ
τ_{ij}	Shear stress
τ_w	ความเค้นเฉือนที่ผนัง
\emptyset	ค่าคุณสมบัติของการไหล
\emptyset'	ค่าคุณสมบัติของการไหลที่มีการแกว่งไปมา
$\bar{\emptyset}$	ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติของการไหล
ASTM	American Society for Testing and Materials
CFD	Computational Fluid Dynamics
ICSTM	Imperial College of Science, Technology and Medicine
PISO	Pressure Implicit Split Operator

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

PDF	Probability Density Distribution Function
PSICT	Partical Source In Cell Techniques
SAO	Single Annular Orifice
SCRS	Simple Chemical Reacting System
TDMA	Tri-Diagonal Matrix Algorithm



บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาทางด้านงานวิศวกรรมและได้มีการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาโดยการสร้างแบบจำลองขึ้นมาเพื่อทดแทนการทำการทดลอง เช่น แบบจำลองการไหล แบบจำลองกลศาสตร์วัสดุ แบบจำลองการถ่ายเทความร้อน แบบจำลองการเผาไหม้ เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากความได้เปรียบในเรื่องของภาระต้นทุน (Cost), ความรวดเร็วของคำตอบที่ได้ (Speed) สามารถจำลองสภาวะแท้จริงของปัญหาได้โดยไม่จำเป็นต้องย่อ (Small-scale) ขนาดของปัญหาลง เป็นต้น โปรแกรมจำนวนมากได้ถูกเขียนขึ้นเพื่อใช้กับการจำลองปัญหาต่างๆ เช่น โปรแกรม TEACH-C, PHOENICS, FLUENT, FLOW3D, STAR-CD, GENMIX และ CFD2000 เป็นต้น การสร้างแบบจำลองให้เป็นที่ยอมรับได้จะต้องประกอบด้วยปัจจัยหลายอย่างเช่น จะต้องมีความแม่นยำ รวดเร็ว สะดวก และต้นทุนที่ต่ำลงและน่าจะเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ตัวโปรแกรมเกิดการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบัน ในการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้โดยทฤษฎี Mixture fraction ได้นำโปรแกรมการไหลแบบปั่นป่วนต้นแบบ [12] ที่ใช้วิธีสมการ $k-\epsilon$ มาทำการพัฒนาโดยการเพิ่มเติมโปรแกรมน้อยที่เกี่ยวกับทฤษฎี Mixture fraction และสมการการเผาไหม้อย่างง่าย วิธีการนี้ได้ถูกคาดหวังว่าจะเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่น่าจะสามารถตอบสนองต่อการพัฒนาขีดความสามารถของแบบจำลองการเผาไหม้ได้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ได้พัฒนากันมาอย่างต่อเนื่อง ในปี 1967 Pun และ Spalding ได้เสนอวิธีการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ที่มีชื่อว่า The Simple Chemical Reacting System (SCRS) [16] โดยการสมมุติฐานว่าปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเร็วมากและปฏิกิริยาที่ไม่เสถียรในระหว่างการเผาไหม้มีผลน้อยมาก ต่อมาในปี 1971 Spalding ได้เสนอแบบจำลองที่มีชื่อว่า Eddy break-up [22] โดยได้กำหนดให้อัตราการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์ ถูกควบคุมโดยผลของอัตราการสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และอัตราการลดลงของพลังงานจลน์ (ϵ) ซึ่งจะทำให้มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของขบวนการเผาไหม้ ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องอยู่ในระดับที่ยอมรับได้แต่จะถูกจำกัดโดยประสิทธิภาพของแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulent model) ที่ใช้สำหรับแบบจำลองที่ได้รับความนิยมอีกแบบหนึ่งคือ Laminar Flamelet [16] โดยข้อมูลที่ใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mixture Fraction กับ ค่าสัดส่วน โดยมวล ที่อุณหภูมิใดๆ จะได้จาก

ผลการทดลองซึ่งข้อจำกัดของแบบจำลองนี้คือข้อมูลที่ได้จะมาจากการทดลองที่เป็นแบบ Laminar diffusion flames

ในการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้สามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หาค่าการกระจายตัวของเชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์ได้ สมการการเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลาร์ (Scalar Transport Equation) ได้ถูกนำไปใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะพบว่าระบบสมการจะมีมากขึ้นตามจำนวนสารที่ต้องการหา ในกรณีที่กำหนดให้สารผลิตภัณฑ์เป็นสารผลิตภัณฑ์รวม สมการการเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลาร์จะมีจำนวน 3 สมการเพื่อหาค่าการกระจายตัวของเชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์

การนำทฤษฎี Mixture fraction ซึ่งได้ใช้ในแนวความคิดเดียวกับวิธี SCRS โดยการใช้สมการการเคลื่อนย้ายเพียง 1 สมการเพื่อหาค่าการกระจายตัวของค่า Mixture fraction และนำไปสู่การหาค่าการกระจายตัวของเชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์โดยการใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย ซึ่งได้ทำให้การสร้างแบบจำลองโดยวิธี Mixture Fraction มีขั้นตอนที่ซับซ้อนน้อยลง มีผลทำให้การใช้เนื้อที่บนหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ลดน้อยลงและการหาผลลัพธ์จะมีความรวดเร็วมากขึ้น

1.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. นำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ที่ลดจำนวนสมการการเคลื่อนย้าย (Transport equation) ลงและประยุกต์กับสมการทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย
2. เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ภายใต้เงื่อนไขที่สภาวะทางเข้า (Boundary conditions) ที่ได้กำหนดไว้

1.2 สมมุติฐานของการศึกษา

1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างรวดเร็วมากและผลของปฏิกิริยาที่ไม่เสถียรในระหว่างขบวนการเผาไหม้น้อยมาก
2. ขบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นเป็นการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ สารที่ได้จากการเผาไหม้จะประกอบไปเชื้อเพลิงหรืออากาศหรือผลิตภัณฑ์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะประกอบไปด้วยน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น
3. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของการเคลื่อนย้ายปริมาณเชื้อเพลิง อากาศ และผลิตภัณฑ์ มีค่าเท่ากัน
4. คุณสมบัติของความหนืดเป็นแบบ Isotropic

5. ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง อากาศ และผลิตภัณฑ์มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับอุณหภูมิของการเผาไหม้
6. ไม่คิดเทอมของ Boussinesq
7. ความเร็วในแนวแกน θ สำหรับกรณีที่มีการหมุนของอากาศจะมีความสัมพันธ์อย่างง่ายแบบเชิงเส้นกับความเร็วในแกน z
8. ค่า Schmidt / Prandtl Number มีค่าเท่ากันทุกทิศทาง
9. ไม่คิดผลของการถ่ายเทความร้อนที่ผ่านผิวผนังเตา (Adiabatic)

1.3 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.4.1 วิเคราะห์แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนต้นแบบเพื่อทำการประยุกต์เข้ากับปัญหาที่กำลังศึกษา
- 1.4.2 ศึกษาความหมายและวิธีการคิดของทฤษฎี Mixture fraction เพื่อหาแนวทางประยุกต์เข้าสู่วิธีการสร้างแบบจำลอง
- 1.4.3 นำข้อมูลที่ได้มาทำการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้และประกอบเข้ากับแบบจำลองที่มีอยู่เดิมโดยการเขียน โปรแกรมขึ้นมาในส่วนที่จำเป็น
- 1.4.4 ทดสอบและแก้ไขแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่มีผู้อื่นได้ทำไว้แล้ว

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถทำนายผลกระทบที่เกิดขึ้นกับพฤติกรรมกาเผาไหม้ภายในเตาเผาทรงกระบอก โดยการศึกษาสภาวะของพารามิเตอร์ที่ทางเข้าที่ได้กำหนดไว้

วรรณกรรมปริทรรศน์

2.1 ปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้

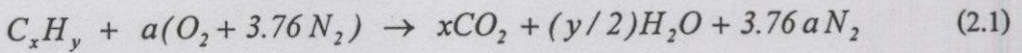
ในขบวนการเผาไหม้จะเกิดจากเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนซึ่งประกอบอยู่ในอากาศด้วยสัดส่วน 21% โดยปริมาตรทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารต่างๆ กับพลังงานความร้อนออกมาส่วนหนึ่ง สำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะประกอบไปด้วยน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ เชื้อเพลิงที่ใช้มีหลายประเภททั้งในสถานะของก๊าซเช่น ก๊าซมีเทน(CH_4) ก๊าซหุงต้ม(LPG) หรือในสถานะของเหลวเช่น น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล หรือในสถานะของแข็งเช่น ถ่านหิน ลิกไนต์ เป็นต้น เชื้อเพลิงที่กล่าวมาทั้งหมดจะมีสารไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักโดยคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของเชื้อเพลิงที่มีโครงสร้างไฮโดรคาร์บอนต่างๆ ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1.1 จะพบว่าเชื้อเพลิงที่มีโครงสร้างไฮโดรคาร์บอนจำนวนมากจะมีโครงสร้างโมเลกุลที่สลับซับซ้อนซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่เสถียรพร้อมกับการเกิดสารต่างๆ ขึ้นเป็นจำนวนมากถึงแม้จะมีความร้อนที่สูงก็ตาม

ตารางที่ 1.1 แสดงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของเชื้อเพลิงที่มีโครงสร้างไฮโดรคาร์บอนต่างๆ ที่สภาวะอุณหภูมิ 295.15 K และความดัน 1 บรรยากาศ [17]

Formula	Fuel	Mol. wt. (kg/kmol)	h_f° (kJ/kmol)	h_f° (kJ/kmol)	s° (kJ/kmol-K)	HHV ¹ (kJ/kg)	LHV ¹ (kJ/kg)	Bolling pt. (°C)	h_{fg} (kJ/kg)	T_{ad}° (K)	ρ_{ad} (kg/m ³)
CH ₄	Methane	16.043	-74,831	-50,794	186.188	55,528	50,016	-164	509	2226	300
C ₂ H ₂	Acetylene	26.038	226,748	209,200	200.819	49,923	48,225	-84	—	2539	—
C ₂ H ₄	Ethene	28.054	52,283	68,124	219.827	50,313	47,161	103.7	—	2369	—
C ₂ H ₆	Ethane	30.069	-84,667	-32,886	229.492	51,901	47,489	88.6	488	2259	370
C ₃ H ₄	Propylene	42.080	20,414	62,718	266.939	48,936	45,784	-47.4	437	2334	514
C ₃ H ₈	Propane	44.096	-103,847	-23,489	269.910	50,368	46,357	-42.1	425	2267	500
C ₄ H ₈	1-Butene	56.107	1,172	72,036	307.440	48,471	45,319	-63	391	2322	595
C ₄ H ₁₀	n-Butane	58.123	-124,733	-15,707	310.034	49,546	45,742	-0.5	386	2270	579
C ₅ H ₁₀	1-Pentene	70.134	-20,920	78,605	347.607	48,152	45,000	30	358	2314	641
C ₅ H ₁₂	n-Pentane	72.150	-146,440	-8,201	348.402	49,032	45,355	36.1	358	2272	626
C ₆ H ₆	Benzene	78.113	82,927	129,658	269.199	42,277	40,579	80.1	393	2342	879
C ₆ H ₁₂	1-Hexene	84.161	-41,673	87,027	385.974	47,955	44,803	63.4	335	2308	673
C ₆ H ₁₄	n-Hexane	86.177	-167,193	209	386.811	48,696	45,105	69	335	2273	659
C ₇ H ₁₄	1-Heptene	98.188	-62,132	95,563	424.383	47,817	44,665	93.6	—	2305	—
C ₇ H ₁₆	n-Heptane	100.203	187,820	8,745	425.262	48,456	44,926	98.4	316	2274	684
C ₈ H ₁₆	1-Octene	112.214	-82,927	104,140	462.792	47,712	44,560	121.3	—	2302	—
C ₈ H ₁₈	n-Octane	114.230	-208,447	17,322	463.671	48,275	44,791	125.7	300	2275	703
C ₉ H ₁₈	1-Nonene	126.241	-103,512	112,717	501.243	47,631	44,478	—	—	2300	—
C ₉ H ₂₀	n-Nonane	128.257	-229,032	25,857	502.080	48,134	44,686	150.8	295	2276	718
C ₁₀ H ₂₀	1-Decene	140.268	-124,139	121,294	539.652	47,565	44,413	170.6	—	2298	—
C ₁₀ H ₂₂	n-Decane	142.284	-249,659	34,434	540.531	48,020	44,602	174.1	277	2277	730
C ₁₁ H ₂₂	1-Undecene	154.295	-144,766	129,830	578.061	47,512	44,360	—	—	2296	—
C ₁₁ H ₂₄	n-Undecane	156.311	-270,286	43,012	578.940	47,926	44,532	195.9	265	2277	740

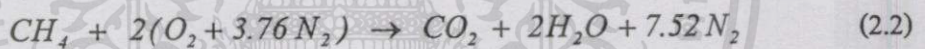
หมายเหตุ 1. T_{ad} คำนวณที่สภาวะ Stoichiometric กับ อากาศ (79% N_2 , 21% O_2)

ปฏิกิริยาของการเผาไหม้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงที่มีไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสามารถเขียนในรูปทั่วไปดังต่อไปนี้

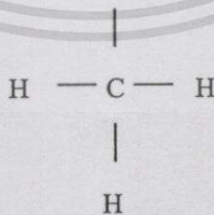


โดยที่ $a = x + y/4$, x และ y คือจำนวนอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงตามลำดับ เพื่อความสะดวกเราได้กำหนดให้ในอากาศประกอบไปด้วยก๊าซออกซิเจนจำนวน 21% และก๊าซไนโตรเจนจำนวน 79% โดยปริมาตรนั่นคือทุกๆ 1 โมลในอากาศจะมีก๊าซไนโตรเจน 3.76 โมล

มีเทนเป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้นิยมทำการศึกษาอย่างแพร่หลายเนื่องจากการที่ตัวของมันมีโครงสร้างโมเลกุลง่ายที่สุดคือ ใน 1 โมเลกุลจะประกอบไปด้วยคาร์บอน 1 อะตอมและไฮโดรเจน 4 อะตอมซึ่งการจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุลจะเป็นดังรูปที่ 1 ได้มีการศึกษาปฏิกิริยาการเผาไหม้ของมีเทน[17] พบว่ากลไกของการเกิดปฏิกิริยามีจำนวน 149 ขั้นตอน ในจำนวนนี้เป็นปฏิกิริยาที่ย้อนกลับได้จำนวน 144 ปฏิกิริยาและสารต่างๆที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผาไหม้มีจำนวน 33 ชนิด ปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์ของมีเทนหาได้โดยการดุลสมการเคมีและเขียนได้ดังนี้



สำหรับปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีโครงสร้างไฮโดรคาร์บอนอื่นสามารถหาได้โดยการดุลสมการเคมีเช่นเดียวกับในกรณีของการหาแบบของมีเทน



รูปที่ 2.1 การจัดเรียงโมเลกุลของมีเทน

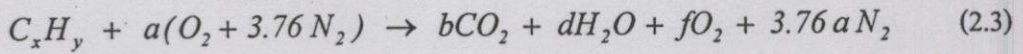
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้จริงโอกาสที่จะเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์น้อยมากหรือแทบจะไม่เกิดเลย สภาวะที่เกิดขึ้นจริงสามารถแบ่งได้เป็น 3 สภาวะคือ สภาวะปริมาณเชื้อเพลิงเหลือ (Rich Condition) สภาวะปริมาณอากาศเหลือ (Lean Condition) สภาวะปริมาณเชื้อเพลิงและอากาศ

ทำปฏิกิริยากันจนหมดพอดี (Stoichiometric Condition) ซึ่งแต่ละสภาวะสามารถอธิบายได้ในรูป

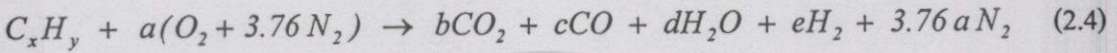
เอกสารอ้างอิงทั้งสิบ คือทั้งห้ามีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสมการเคมี โดยที่สภาวะเชื้อเพลิงและอากาศทำปฏิกิริยากันจนหมดพอดีอยู่ในรูปสมการที่.1 ส่วนสภาวะที่เหลือจะเป็นดังนี้

ที่สภาวะอากาศเหลือ



ที่สภาวะเชื้อเพลิงเหลือ



โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ a, b, c, d, e และ f คือค่าจำนวนโมลของสารต่างๆ ในปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการดุลสมการเคมีโดยผลที่ได้จะเป็นระบบสมการจำนวนมากซึ่งการแก้ระบบสมการดังกล่าวจะที่มีความยุ่งยากมาก เราสามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้ได้จาก Water-Gas Equilibrium [17]

2.2 แบบจำลอง Eddy break-up

ในปี 1971 Spalding ได้นำเสนอแบบจำลอง Eddy break-up โดยมีแนวความคิดที่ว่าอัตราการสลายของเชื้อเพลิงจะถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันกับคุณสมบัติของการไหลปกติ (Local flow property) อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะถูกควบคุมโดยอัตราการผสมกัน (Mixing) ซึ่งได้อธิบายไว้ในเทอมของมาตราส่วนเวลาแบบปั่นป่วน (Turbulence time scale) ของ k/ε โดยที่ k หมายถึงการสร้างพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนและ ε หมายถึงอัตราการสลายตัวของค่า k แบบจำลองจะพิจารณาถึงอัตราการสลายตัวของเชื้อเพลิง ออกซิเจนและผลิตภัณฑ์ โดยที่อัตราการสลายตัวที่มีค่าต่ำสุดจะถูกกำหนดให้เป็นอัตราการทำปฏิกิริยาของเชื้อเพลิงซึ่งอาจจะอธิบายค่าอัตราการสลายตัวของสารต่างๆ ได้ดังนี้

$$R_{fu} = -C_R \rho m_{fu} \frac{\varepsilon}{k} \quad (2.5)$$

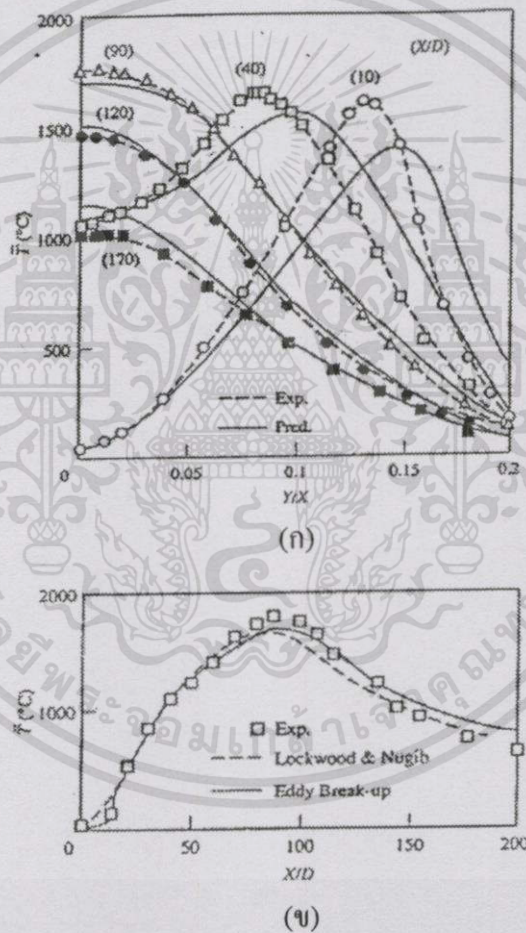
$$R_{oxu} = -C_R \rho \frac{m_{ox}}{s} \frac{\varepsilon}{k} \quad (2.6)$$

$$R_{pr} = -C'_R \rho \frac{m_{pr}}{(1+s)} \frac{\varepsilon}{k} \quad (2.7)$$

นั่นคืออัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเท่ากับ

$$S_{fu} = -\rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left[C_R m_{fu}, C_R \frac{m_{ox}}{s}, C'_R \frac{m_{pr}}{1+s} \right] \quad (2.8)$$

โดยที่ C_R และ C'_R คือค่าคงที่ของแบบจำลอง การหาค่าตัดด้วยโดยมวลของเชื้อเพลิงทำได้โดยการใช้สมการการเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลาร์ (Scalar Transport Equation) ซึ่งในที่นี้คือ m_{fu} , m_{ox} และ m_{pr} รูปที่ 2.2 ก และ ข แสดงให้เห็นถึงผลการศึกษาของ Magnussen และ Hjertager (1976) [31] ซึ่งได้ทำนายผลการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในเตาเผาด้วยแบบจำลอง Eddy break-up ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำสูง

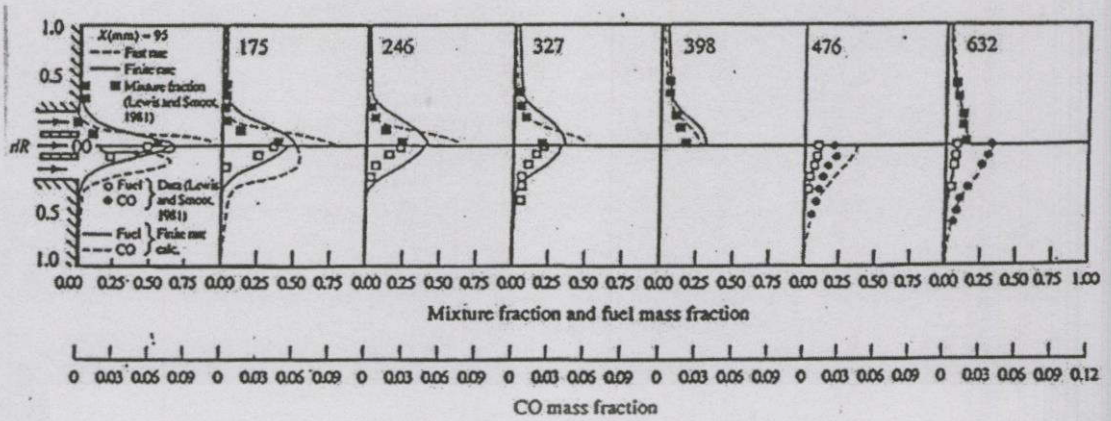


รูปที่ 2.2 ก และ ข แสดงผลการศึกษาของ Magnussen และ Hjertager (1976) ซึ่งได้ทำนายผลการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในเตาเผาด้วยแบบจำลอง Eddy break-up

ส่วนรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาแบบจำลอง Eddy break-up โดยการประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธี PDF เพื่อหาค่าการแกว่งตัวของอนุภาคน้ำมันในเตาเผาของปริมาณสเกลาร์โดย Gosman *et al* (1978) [23] ซึ่งผลการทำนายที่ได้มีความแม่นยำมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง นอกจากนี้ได้มีการ

นำแบบจำลอง Eddy break-up ไปใช้กับอัตราการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยเทอมของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น คือทั้งห้ามมิให้ตัดแ่งเองเบ็ดเตล็ด และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงผลการทำนายการเผาไหม้ โดย Nikjooy et al (1988)

2.3 แบบจำลอง Laminar flamelet

แบบจำลองการเผาไหม้ที่ได้รับความนิยมอีกวิธีหนึ่งคือแบบจำลอง Laminar flamelet ในวิธีนี้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mixture fraction ค่าสัดส่วนโดยมวลและอุณหภูมิจะหาได้จากข้อมูลจากการทดลองที่ได้ปรับแต่งค่าแล้ว ข้อมูลจะถูกวัดจาก Laminar diffusion flame ตามชื่อของแบบจำลอง ค่า Mixture fraction จะถูกหาได้จากสมการการเคลื่อนย้ายและค่าสัดส่วนโดยมวลของสารต่างๆหาได้จากความสัมพันธ์ในขั้นตอนแบบ Laminar flamelet การศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองนี้สามารถอ้างอิงได้จาก Liew *et al* (1984) [24], Bray *et al* (1985) [22], Askari-Sardhai *et al* (1985) [21] และ Peters (1986) [28]

บทที่ 3

สมการพื้นฐานของแบบจำลอง

3.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ของก๊าซด้วยทฤษฎี Mixture Fraction โดยการพัฒนาจากแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนคั่นแบบ แบบจำลองที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการจำลองกระบวนการเผาไหม้ของก๊าซตามรายละเอียดที่จะกล่าวถึงในบทถัดไป

นอกจากนี้ จึงได้กล่าวถึงสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการอธิบายพลศาสตร์การไหลของก๊าซในห้องเผาไหม้แบบปั่นป่วนซึ่งได้ใช้แบบจำลอง $k-\epsilon$ มาอธิบายพฤติกรรมดังกล่าวและจากนั้นจะเป็นสมการการเผาไหม้ของก๊าซที่ได้อธิบายถึงสมการเคมีของการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้และ สมการของทฤษฎี Mixture fraction ที่สามารถนำไปใช้หาค่าความสัมพันธ์ของค่าสัดส่วนโดยมวลของก๊าซต่างๆ ได้ รวมทั้งสมการเอนทาลปี สมการสถานะและสมการการแผ่รังสี

3.2 แบบจำลองของก๊าซ [1]

สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับก๊าซอยู่บนพื้นฐานของ Eulerian ซึ่งได้พิจารณาสมมูลกับคุณสมบัติเฉพาะเพื่อพิจารณาถึงปริมาตรควบคุมที่อยู่ภายใต้การคำนวณและกระทำอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องโดยการใช้สมการ Reynolds ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเฉพาะที่ตำแหน่งและเวลา นอกจากนี้สมการของอัตราการสร้างคุณสมบัติ สมการการเกิด Net flux ของคุณสมบัติ สมการการถ่ายเทสำหรับมวล โมเมนตัม และพลังงานจะถูกแสดงในหัวข้อถัดไป

3.2.1 การไหลของอากาศพลศาสตร์ สมมุติว่าของไหลที่พิจารณาอยู่ในสถานะก๊าซและอัดตัวได้ ดังนั้นสมการอนุรักษ์มวลจะเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3.1)$$

I II III

เมื่อ I คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลต่อหน่วยปริมาตร

II คือ มวลที่ไหลเข้าหรือออกที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของการไหล

III คือ อัตราการสะสมสำหรับการใช้ของมวลต่อหน่วยปริมาตร

สมการ Navier-Stoke ที่ใช้สำหรับการไหลของของไหลที่มีความหนืดแบบอัดตัวได้ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\underbrace{\frac{\partial \rho u_i}{\partial t}}_I + \underbrace{\frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j}}_II = \underbrace{\rho g_i}_{III} - \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x_i}}_IV + \underbrace{\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}}_V + \underbrace{S_{v,i}}_VI \quad (3.2)$$

I : อัตราการสะสมของโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตร

II : อัตราของโมเมนตัมที่เข้าหรือออกที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของการไหล

III: แรงโน้มถ่วงต่อหน่วยปริมาตรของของไหล (กรณีส่วนใหญ่สามารถตัดทิ้งได้ ยกเว้นสำหรับการไหลที่มี Froude number ต่ำ)

IV : เกรเดียนต์ของแรงตั้งฉากกับพื้นผิวปริมาตรควบคุมต่อหน่วยพื้นที่ซึ่งเกิดจากความดัน Hydrostatic

V : เกรเดียนต์ของแรงเฉือนสัมผัสและแรงตั้งฉากกับพื้นผิวปริมาตรควบคุมซึ่งเกิดจากความเค้นความหนืด ซึ่งอาจจะเขียนให้อยู่ในรูปของเกรเดียนต์ของความเร็วได้ดังนี้

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3.3)$$

VI: อัตราการเปลี่ยนแปลงของ โมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรภายในปริมาตรควบคุม อันเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อม เช่น การถ่ายเท โมเมนตัมของอนุภาคสู่ก๊าซ เป็นต้น

3.2.1.1 สมการความต่อเนื่องและโมเมนตัมเฉลี่ยของการไหลแบบปั่นป่วน การไหลแบบปั่นป่วนคือการเคลื่อนที่แบบไม่มีกฎเกณฑ์และมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การพิจารณาพฤติกรรมของความปั่นป่วนได้ถูกนำเสนอเป็น 2 วิธีก็คือ

วิธีที่ 1. ตัวแปรต่าง ๆ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่คงที่ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ย(Mean) และส่วนที่ไม่คงที่ที่มีการแกว่งไปมา (Fluctuation) ดังเช่นสมการ

$$\varnothing = \bar{\varnothing} + \varnothing' \quad (3.4)$$

$$\bar{\varnothing} = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \varnothing dt \quad (3.5)$$

ดังนั้นค่าคุณสมบัติของการไหลแบบปั่นป่วนจะประกอบด้วยค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติของ

การไหล ($\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p}, \text{etc.}$) กับค่าของคุณสมบัติที่มีการแกว่งไปมาคือ ($u', v', w', p', \text{etc.}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีที่ 2. ถูกแนะนำโดย [6] ซึ่งวิธีนี้ได้อธิบายคุณสมบัติของของไหลซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยในรูปแบบอย่างง่ายโดย

$$\bar{\phi} = \tilde{\phi} + \phi'' \quad (3.6)$$

$$\tilde{\phi} = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\bar{\rho} \Delta t} \int_{t'}^{t'+\Delta t} \rho \phi dt \quad (3.7)$$

$$\bar{\rho} \tilde{\phi} = \overline{\rho \phi} \quad (3.8)$$

การกำหนดนิยามเหล่านี้ได้ถูกนำไปแทนที่ไปในสมการความต่อเนื่องและสมการ Navier-Stoke ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = \bar{S}_m \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = \bar{\rho} g_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial (\bar{\tau}_{ij} - \rho u_i'' u_j'')}{\partial x_j} + \bar{S}_{v,i} \quad (3.10)$$

ค่า $\rho u_i'' u_j''$ ในสมการที่ 3.10 เรียกว่า Reynolds stress ซึ่งเกิดขึ้นจากพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วนนั่นเอง

3.2.1.2 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนในครั้งนี้อยู่ที่วิธีสมการ $k-\varepsilon$ (Two equation $k-\varepsilon$ model) ของ W.P. Jones [7] เป็นที่รู้จักกันดีอยู่แล้วว่าการจำลองการไหลด้วยวิธีสมการ $k-\varepsilon$ จะมีข้อผิดพลาดเมื่อถูกนำไปใช้กับการทำนายการไหลที่มีรูปร่างที่ซับซ้อน เช่นการไหลที่มีความเร็วของอากาศสูง การแก้ข้อผิดพลาดดังกล่าวอาจทำได้โดยใช้แบบจำลองชั้นสูงเช่น แบบจำลอง Algebraic stress และ Reynolds stress อย่างไรก็ตามแบบจำลองด้วยวิธีสมการ $k-\varepsilon$ ที่นำมาใช้นี้มีความเสถียรสูงจึงเหมาะกับการใช้งานในกรณีที่มีการเผาไหม้

แบบจำลอง $k-\varepsilon$ ที่นำมาใช้กับการไหลแบบปั่นป่วนในครั้งนี้เป็นไปตามข้อสมมติฐานของ Boussinesq ที่ว่า Reynolds stress เป็นสัดส่วนกับเกรเดียนต์ของความเร็วเฉลี่ย สมการของ Boussinesq ถูกแก้ไขสามารถจะเขียนได้ดังนี้ [8]

$$\varepsilon = \frac{\mu_l}{\bar{\rho}} \left(\frac{\partial \tilde{u}_j''}{\partial x_j} \right)^2$$

การสลายตัวของความปั่นป่วน

การสลายตัวของความปั่นป่วน (ε) คืออัตราการสลายตัวของพลังงานแบบปั่นป่วน สมการการถ่ายเทของการสลายตัวของความปั่นป่วนสามารถเขียนได้ดังนี้ [7]

$$\bar{\rho} \tilde{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_{ed}}{\sigma_\varepsilon} + \mu_l \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[\frac{\overline{\rho u_i'' u_j''}}{\partial x_j} \frac{\partial \tilde{u}_i''}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.16)$$

ซึ่ง σ_ε คือ Prandtl / Schmidt number ของอัตราการสลายตัวแบบปั่นป่วน และ $C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$ และ C_μ คือ ค่าคงที่ Eddy viscosity ซึ่งอาจจะแสดงอยู่ในเทอมของพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนและอัตราการสลายตัวของมันคือ

$$\mu_{ed} = C_\mu \bar{\rho} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.17)$$

ค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับปรับจำลองความปั่นป่วนนี้ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ของแบบจำลองสำหรับแบบจำลองของ $k-\varepsilon$ [7]

σ_k	σ_ε	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	C_μ
1.0	1.3	1.44	1.92	0.99

3.2.2 สมการการเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลาร์ สมการการเคลื่อนย้ายพลังงานและมวลของก๊าซที่มีการเผาไหม้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบเดียวกับสมการโมเมนตัมได้ สมการการเคลื่อนย้ายเหล่านี้ประกอบด้วยองค์ประกอบอยู่ 3 เทอมคือ การพา การแพร่และการสร้างหรือการสลายตัว ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{\phi})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{\phi})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_\phi \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j'' \phi''} \right) + \bar{S}_\phi \quad (3.18)$$

พจน์แรกภายในวงเล็บทางขวามือของสมการเป็นผลของเทอมการแพร่ของคุณสมบัติ (ϕ) และพจน์ที่สองเป็นผลจากพฤติกรรมความปั่นป่วน ผลของความปั่นป่วนอาจจะแสดงในรูปแบบ

เอกสารเกี่ยวกับกรณีของโมเมนตัมได้ดังนี้ งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปว่ากรอ์โดยทั้งสิบ ลึกทั้งห้าปีให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-\overline{\rho u_j \theta''} = \frac{\mu_{ed}}{\sigma_{\theta,i}} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_j} \quad (3.19)$$

ซึ่ง $\sigma_{\theta,i}$ คือ Schmidt number ที่ใช้กับกรณีของมวลก๊าซ หรือค่า Prandtl number ที่ใช้กับกรณีของเอนทาลปี จากสมการ 3.18 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{\theta})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{\theta})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{\mu_{ed}}{\sigma_{\theta,i}} + D_\theta \right) \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_j} \right) + \bar{S}_\theta \quad (3.20)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่มีการเผาไหม้จะมีข้อสมมุติว่า Schmidt และ Prandtl number เป็นค่าคงที่

3.2.3 สมการในรูปของพิกัดทรงกระบอก สมการที่ใช้ในการคำนวณได้ถูกเขียนอยู่ในรูปพิกัดทรงกระบอกโดยพิจารณาเป็นแบบสมมาตรดังแสดงตามสมการข้างล่างนี้

3.2.3.1 สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u}) = \bar{S}_m \quad (3.21)$$

\bar{S}_m คือ การเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรควบคุมจากการเคลื่อนย้ายอนุภาคในระหว่างการเผาไหม้

3.2.3.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

ทิศทางการแนวรัศมี (r)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v} \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{v}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} \right) + \bar{S}_v \quad (3.22)$$

$$\text{ซึ่ง } \bar{S}_v = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} \right) + \frac{\bar{\rho} \tilde{v}^2}{r} - 2\mu_{eff} \frac{\tilde{v}}{r^2} \quad (3.23)$$

ทิศทางการแนวแกน (z)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v} \tilde{u}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{u}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} \right) + \bar{S}_u \quad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และมีการใช้งานโดยไม่เห็นแก่ค่าตอบแทนในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง
$$\bar{S}_u = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} \right) \quad (3.25)$$

ทิศทางตามแนวเส้นรอบวง (θ)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v} \tilde{w}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{w}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial z} \right) + \bar{S}_w \quad (3.26)$$

ซึ่ง
$$\bar{S}_w = -\tilde{w} \left(\frac{\bar{\rho} \tilde{v}}{r} + \frac{\mu_{eff}}{r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mu_{eff}}{\partial r} \right) \quad (3.27)$$

3.2.3.3 สมการการเคลื่อนย้ายความปั่นป่วน พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและ อัตราการสลายตัวของมันสามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบได้ดังนี้
สมการการการเคลื่อนย้ายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v} k) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u} k) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + G + \bar{\rho} \varepsilon \quad (3.28)$$

ซึ่ง
$$G = \mu_{eff} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \tilde{v}}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\tilde{v}}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial \tilde{u}}{\partial r} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial \tilde{w}}{\partial z} \right)^2 + \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\tilde{w}}{r} \right) \right]^2 \right\} \quad (3.29)$$

สมการการเคลื่อนย้ายของอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v} \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u} \varepsilon) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G + C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.30)$$

3.2.3.4 การเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลาร์

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v} \tilde{\theta}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{\theta}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_{eff} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{eff} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial z} \right) + \bar{S}_\theta \quad (3.31)$$

$$D_{eff} = D_\theta + \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\theta,r}} \quad (3.32)$$

3.2.4 การคำนวณค่าที่บริเวณผนัง บริเวณที่ใกล้ผนังจะมีพฤติกรรมการไหลแบบลามินาร์ซึ่งการใช้สมการก่อนหน้าในการคำนวณหาผลลัพท์จะได้ค่าที่ไม่ถูกต้อง ได้มีอยู่ 2 ข้อสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณการเคลื่อนย้ายโมเมนตัม พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและความร้อนที่บริเวณใกล้ผนังนั้นคือ 1) ความเค้นเฉือนของของไหลเท่ากับความเค้นเฉือนที่ผนัง และ 2) ผลของการพาและแพร่มีปริมาณน้อย ดังนั้นอัตราการเกิดพลังงานความปั่นป่วนอาจจะเท่ากับอัตราการสลายตัว [10]

เมื่อกำหนดให้ y^+ คือ ตัวแปรไร้มิติของการไหลใกล้ผนังซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\mu_1} \quad (3.33)$$

โดยที่ y คือระยะทางห่างจากผนัง และ u_τ คือสัดส่วนของความเร็วซึ่งอธิบายได้ตามสมการข้างล่างนี้

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3.34)$$

ซึ่ง τ_w คือ ความเค้นเฉือนที่ผนัง สำหรับขอบเขตของการไหลใกล้ผนังได้ถูกพิจารณาเป็น 2 บริเวณคือ

- 1) ที่บริเวณ $0 < y^+ < 11.63$: เป็นบริเวณของการไหลแบบราบเรียบที่มีการฟุ้งกระจายแบบราบเรียบเป็นส่วนสำคัญ ($\mu_1 \gg \mu_2$) และสมมุติให้การไหลเป็นแบบ Newtonian
- 2) ที่บริเวณ $11.63 < y^+ < 300$: เป็นบริเวณของการไหลแบบปั่นป่วนที่มีการฟุ้งกระจายแบบปั่นป่วนเป็นส่วนสำคัญ ($\mu_2 \gg \mu_1$)

3.2.4.1 สมการอนุกรมโมเมนตัมที่บริเวณใกล้ผนัง ความเค้นเฉือนของการอนุกรมโมเมนตัมที่บริเวณใกล้ผนัง มีอยู่ 2 ขอบเขต คือ

- 1) ชั้นการไหลแบบราบเรียบ: ในชั้นนี้ผลของความเค้นเฉือนจะเกิดจากผลที่ได้จากความหนืดและเกรเดียนต์ของความเร็ว ซึ่งจะขนานกับผนัง ($\tau = \mu_1 \frac{du}{dy} = \tau_w$)
- 2) ชั้นการไหลแบบปั่นป่วน: ในชั้นนี้ผลของความเค้นเฉือนเกิดขึ้นโดย $\tau = \mu_2 \frac{du}{dy} = \tau_w$

ซึ่งค่า Eddy viscosity มีค่าเท่ากับ $\mu_2 = \rho \kappa y u_\tau$ [10] และ κ เป็นค่าคงที่ของ Von Karman สำหรับรูปแบบของความเค้นเฉือนได้มาจาก

$$\tau = \bar{\rho} k^{1/2} C_{\mu}^{1/4} \frac{\kappa \tilde{u}}{\ln(y^+)} \quad (3.35)$$

3.2.4.2 สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและการสลายตัวที่บริเวณใกล้ผนัง
สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนไม่คำนวณผลของเทอมการพาและการแพร่ ดังนั้นอัตราการ
ก่อตัวของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนจะเท่ากับอัตราการสลายตัวดังนี้

$$-\overline{\rho u''v''} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y} = \bar{\rho} \varepsilon \quad (3.36)$$

เมื่อใช้กับข้อสมมติฐานของ Boussinesq กับการไหลที่ใกล้บริเวณผนัง ดังนั้นความเค้น
เฉือนสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\tau_{turb} = -\overline{\rho u''v''} = \mu_t \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y} \quad (3.37)$$

โดยพิจารณาความเค้นเฉือนที่ใกล้บริเวณผนังและชั้นของกรไหล จะพบว่าอัตราการก่อตัว
และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ที่บริเวณใกล้ผนังสามารถเขียนได้ดังนี้

$$k = C_{\mu}^{-1/2} \frac{\tau_w}{\rho} \quad (3.38)$$

$$\varepsilon = \frac{C_{\mu}^{3/4} k^{2/3}}{\kappa y} \quad (3.39)$$

3.3 แบบจำลองการเผาไหม้

แบบจำลองการเผาไหม้จะถูกพิจารณาจากสมการการเผาไหม้และสมการการถ่ายเทปริมาตร
ถ่วงโดยการนำความรู้เกี่ยวกับค่า Mixture fraction มาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
สมการการเผาไหม้ที่ใช้จะเป็นปฏิกิริยาการเผาไหม้อย่างง่ายโดยอยู่บนสมมติฐานที่ว่าอัตราการ
เกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงไม่คิดปฏิกิริยาที่ไม่เสถียรและไม่เกิดสารใด ๆ นอกเหนือจากเชื้อ
เพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์

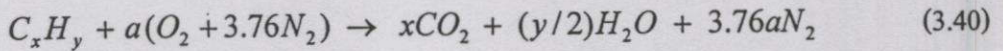
3.3.1 สมการการเผาไหม้ ในระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับอากาศให้สาร
ผลิตภัณฑ์พร้อมพลังงานความร้อนออกมาส่วนหนึ่งในการเผาไหม้สมบูรณ์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะ
ประกอบไปด้วยน้ำ (H_2O) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สำหรับการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ซึ่ง
อาจจะอยู่ในสถานะเชื้อเพลิงเหลือ (Rich Condition) หรืออากาศเหลือ (Lean Condition) ผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกิดขึ้นก็จะประกอบไปด้วยสารที่มากกว่านี้เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H_2) เป็นต้น

สำหรับเชื้อเพลิงที่เป็นไฮโดรคาร์บอนและการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างสมบูรณ์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นดังนี้



โดยที่ $a = x + y/4$. และ x, y คือจำนวนอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงตามลำดับ

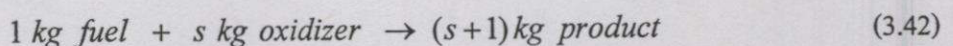
สำหรับค่าสัดส่วนโดยมวลระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ทำให้ปฏิกิริยากันพอดี (The stoichiometric air-fuel ratio) จะหาได้จาก

$$(A/F)_{stoic} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}} \right) = \frac{4.76a}{1} \frac{MW_{air}}{MW_{fuel}} \quad (3.41)$$

m_{air}, m_{fuel} คือมวลของอากาศและเชื้อเพลิงตามลำดับ และ MW_{air}, MW_{fuel} คือมวลโมเลกุลของเชื้อเพลิงและอากาศตามลำดับ

ค่าที่ได้นี้จะทำให้ทราบถึงสถานะของการเผาไหม้ กล่าวคือถ้าค่า (A/F) น้อยกว่าค่า $(A/F)_{stoic}$ นั่นคือปริมาณอากาศน้อยเกินไปและทำให้เกิดสถานะเชื้อเพลิงเหลือ สถานะที่เกิดขึ้นจะกลับกันหากค่า (A/F) มากกว่าค่า $(A/F)_{stoic}$

3.3.2 ทฤษฎี Mixture Fraction เมื่อพิจารณาการเผาไหม้ที่การเกิดปฏิกิริยาประกอบไปด้วยสาร 3 ชนิดคือเชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์ เราจะสามารถเขียนปฏิกิริยาการเผาไหม้โดยพิจารณามวลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาได้ดังนี้



โดยที่ s คือค่าสัดส่วนระหว่างมวลของอากาศกับมวลของเชื้อเพลิงที่ทำให้ปฏิกิริยากันพอดี สำหรับกรณีที่เป็นออกซิเจนมวลของอากาศที่พิจารณาจะคือมวลของออกซิเจน

เราสามารถนิยามความหมายของคำว่า Mixture fraction [17] ไว้ว่าคือสัดส่วนระหว่างปริมาณองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่กระจายไปอยู่ตามสารต่างๆที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผาไหม้ต่อ

เอกสารนี้มวลของสารผสม (Mixture) จากนิยามข้างต้นเราอาจจะอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้ ระโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น ดึงทั้งห้ามนิให้ตัดแบ่งเบ็ดหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f = \left(\frac{\text{kg fuel stuff}}{\text{kg fuel}} \right) \left(\frac{\text{kg fuel}}{\text{kg mixture}} \right) + \left(\frac{\text{kg fuel stuff}}{\text{kg products}} \right) \left(\frac{\text{kg products}}{\text{kg mixture}} \right) \quad (3.43)$$

$$+ \left(\frac{\text{kg fuel stuff}}{\text{kg oxidizer}} \right) \left(\frac{\text{kg oxidizer}}{\text{kg mixture}} \right)$$

โดยที่ *fuel stuff* หมายถึงปริมาณองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่กระจายไปอยู่ตามสารต่างๆ ซึ่งจากสมการที่ 3.46 เราสามารถจะเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$f = (1) Y_F + \left(\frac{1}{s+1} \right) Y_{pr} + (0) Y_{ox} \quad (3.44)$$

โดยที่ *f* คือค่า Mixture fraction ส่วน Y_F , Y_{OX} และ Y_{PR} คือค่าสัดส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์ตามลำดับ

สำหรับเชื้อเพลิงที่เป็นไฮโดรคาร์บอนจะมีองค์ประกอบคือคาร์บอน(C)และไฮโดรเจน(H) สังเกตว่าในกระแสอากาศ(Air Stream)จะไม่มีปริมาณเชื้อเพลิงอยู่เลยซึ่งทำให้ปริมาณองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่กระจายอยู่ในกระแสอากาศเป็นศูนย์ ดังนั้นเราสามารถสรุปสมการ Mixture fraction ได้ใหม่ดังนี้

$$f = Y_F + \left(\frac{1}{s+1} \right) Y_{pr} \quad (3.45)$$

ค่า *f* จะมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 1 ($0 \leq f \leq 1$) โดยที่ค่า $f = 0$ หมายถึงไม่มีปริมาณเชื้อเพลิงอยู่เลยในขณะที่ค่า $f = 1$ หมายถึงไม่มีปริมาณอากาศอยู่เลย สังเกตว่าที่ค่าดังกล่าวจะไม่เกิดการเผาไหม้ขึ้น ในทำนองเดียวกันหากเราให้ความสำคัญกับปริมาณของอากาศในนิยามของ Mixture fraction แล้ว เราจะสามารถหาค่า *f* ได้ใหม่ในแบบเดียวกับวิธีการข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้ว

สภาวะที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้จะมีอยู่ 3 แบบคือ ที่สภาวะเชื้อเพลิงเหลือ(Rich condition) ที่สภาวะอากาศเหลือ(Lean condition) และที่สภาวะเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับอากาศจนหมดพอดี (Stoichiometric condition) ในแต่ละสภาวะจะให้ค่าสัดส่วนโดยมวลของสารแต่ละชนิดแตกต่างกันไป ตัวแปรที่บอกให้ทราบว่า การเผาไหม้อยู่ในสภาวะใดคือค่า Stoichiometric mixture fraction, (f_{st})

เราทราบว่าในสภาวะที่เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับอากาศจนหมดพอดีจะไม่มีเชื้อเพลิงหรืออากาศเหลืออยู่ ดังนั้นสารตั้งปฏิกิริยาทั้งหมดจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ นั่นคือ $Y_F = Y_{OX} = 0$ และ $Y_{PR} = 1$ โดยการแทนค่าในสมการที่ 3.48 จะได้ว่า

$$f_{st} = \frac{1}{1+s} \quad (3.46)$$

โดยที่ f_{st} คือค่า Mixture fraction ที่สภาวะเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับอากาศจนหมดพอดี จะพบว่าหากค่า f น้อยกว่า f_{st} นั่นคือที่สภาวะที่เกิดขึ้นคือสภาวะอากาศเกิน ในขณะที่เดียวกันถ้าค่า f มากกว่า f_{st} สภาวะที่เกิดขึ้นก็จะอยู่ในสภาวะเชื้อเพลิงเหลือ ค่าสัดส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิงที่สภาวะต่างๆหาได้จากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายดังนี้

ที่สภาวะอากาศเหลือ ($0 \leq f < f_{st}$)

$$Y_F = 0 \quad (3.47ก)$$

$$Y_{OX} = 1 - \frac{f}{f_{stoic}} \quad (3.47ข)$$

$$Y_{PR} = \frac{f}{f_{stoic}} \quad (3.47ค)$$

ที่สภาวะทำปฏิกิริยากันจนหมดพอดี ($f = f_{st}$)

$$Y_F = 0 \quad (3.48ก)$$

$$Y_{OX} = 0 \quad (3.48ข)$$

$$Y_{PR} = 1 \quad (3.48ค)$$

ที่สภาวะเชื้อเพลิงเหลือ ($f_{st} < f \leq 1$)

$$Y_F = \frac{f - f_{stoic}}{1 - f_{stoic}} \quad (3.49ก)$$

$$Y_{Ox} = 0 \quad (3.49ข)$$

$$Y_{pr} = \frac{1 - f}{1 - f_{stoic}} \quad (3.49ค)$$

จะสังเกตได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า f กับค่า Y_F, Y_{OX}, Y_{PR} เป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย โดยที่ผลรวมทั้งหมดของสัดส่วนโดยมวลของสารต่างๆต้องเท่ากับหนึ่งซึ่งจะได้ว่า

$$\sum_i Y_i = 1 \quad (3.50)$$

Y_i แทนสัดส่วนโดยมวลของสารที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผาไหม้ ในกรณีนี้จะมีสารเพียง 3 ชนิดเท่านั้นคือ เชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจะเขียนอธิบายได้ว่า

$$Y_F + Y_{OX} + Y_{PR} = 1 \quad (3.51)$$

ในกรณีที่ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ สารผลิตภัณฑ์ที่ได้จะประกอบไปด้วยน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซเฉื่อย(Inert gas) ซึ่งในกรณีคือไนโตรเจน(N_2) โดยจะประกอบอยู่ในอากาศประมาณ 79 % โดยปริมาตรและในการเผาไหม้ปริมาณไนโตรเจนก่อนทำปฏิกิริยาจะเท่ากับหลังทำปฏิกิริยา เราสามารถหาค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนได้ตามสัดส่วนที่เกิดขึ้นในสารผลิตภัณฑ์ ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$Y_{H_2O} = \left(\frac{m_{H_2O}}{m_{PR}} \right) Y_{PR} \quad (3.52ก)$$

$$Y_{CO_2} = \left(\frac{m_{CO_2}}{m_{PR}} \right) Y_{PR} \quad (3.52ข)$$

$$Y_{N_2} = \left(\frac{m_{N_2}}{m_{PR}} \right) Y_{PR} \quad (3.52ค)$$

และ

$$m_{H_2O} = N_{H_2O} MW_{H_2O} \quad (3.53ก)$$

$$m_{CO_2} = N_{CO_2} MW_{CO_2} \quad (3.53ข)$$

$$m_{N_2} = N_{N_2} MW_{N_2} \quad (3.53ค)$$

$$m_{PR} = m_{H_2O} + m_{CO_2} + m_{N_2} \quad (3.54)$$

โดยที่ Y, MW, N และ m แทนถึงค่าสัดส่วนโดยมวล น้ำหนักโมเลกุล จำนวนโมลและมวลตามลำดับ ในขณะที่สัญลักษณ์ตัวห้อย H_2O, CO_2, PR และ N_2 หมายถึงน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ผลิตภัณฑ์และไนโตรเจนตามลำดับ นั่นคือผลรวมของค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนจะเท่ากับผลิตภัณฑ์รวมซึ่งจะสรุปได้ดังนี้

$$Y_{PR} = Y_{H_2O} + Y_{CO_2} + Y_{N_2} \quad (3.55)$$

ในสภาวะการเผาไหม้จริงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจจะไม่ใช้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ดังนั้นสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีมากกว่าน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์(CO) ไฮโดรเจน(H_2) เป็นต้น การหาค่าสัดส่วนโดยมวลของสารต่างๆในสารผลิตภัณฑ์จะมีจำนวนสมการที่มากขึ้นโดยเราสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3.53 ในกรณีนี้ความยากของการหาค่าสัดส่วนโดยมวลจะขึ้นอยู่กับวิธีการดุลสมการเคมีเพื่อหาจำนวนโมลของสารต่างๆในปฏิกิริยา สำหรับผู้ที่สนใจสามารถศึกษาได้จากวิธี Water-Gas Equilibrium [17] ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการดุลสมการเคมี

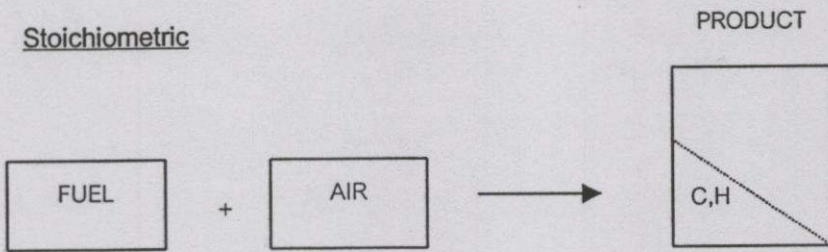
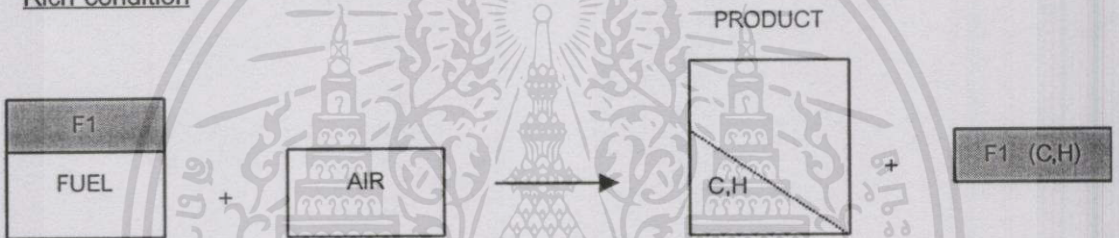
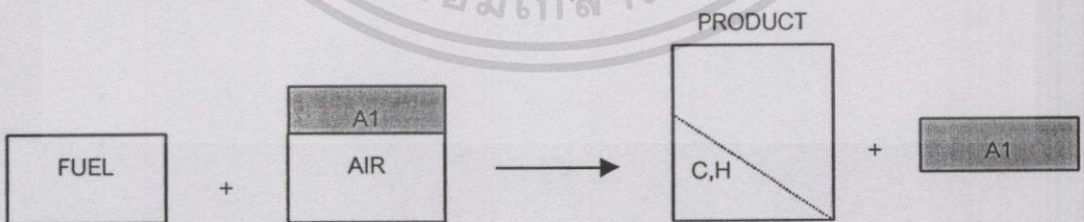
เพื่อความกระจ่างเราสามารถอธิบายความหมายของค่า f ได้ตามแผนภาพต่อไปนี้ ซึ่งจะพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากันในทุกสภาวะเนื่องจากปริมาณสารตั้งปฏิกิริยาคือเชื้อเพลิงหรืออากาศถูกกำหนดไว้อย่างแน่นอน เชื้อเพลิงหรืออากาศที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาจะเป็นผลทำให้ค่าของ f เกิดการเปลี่ยนแปลงกล่าวคือถ้ามีปริมาณเชื้อเพลิงเหลือจากการเผาไหม้จะทำให้ f มีค่ามากขึ้นเนื่องจากเทอมของเชื้อเพลิงมีค่ามากขึ้น ในทำนองเดียวกันถ้ามีอากาศเหลือจากการเผาไหม้จะทำให้ f มีค่าน้อยลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณของสารผสม

จากวิธีการที่ได้อธิบายไว้ข้างต้นหากเราหาค่า f ได้ในแต่ละตำแหน่งใดๆของเตาเผาได้แล้ว เราก็จะสามารถหาค่า Y_F, Y_{OX} และ Y_{PR} ได้ตามความสมการที่ 3.50 ก ถึง 3.52 ค ในการกระจายตัวของค่า f ทั้งหมดเตาเผาจะเป็นผลมาจากเทอมที่สำคัญ 2 เทอมคือเทอมของการแพร่และการพา (Diffusion and Convection) การวิเคราะห์รูปร่างของเตาเผาได้ถูกกำหนดให้เป็นแบบ 2 มิติโดยมีการสมมาตรในแนวแกน θ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาค่าการกระจายตัวของ f แบบปั่นป่วน 2 มิติคือสมการที่ 3.31 และ 3.32 และเนื่องจากค่า f เป็นปริมาณสเกลาร์ซึ่งจะไม่มีปริมาณของ f ที่ถูกสร้างขึ้นหรือสูญหายไปในแต่ละปริมาตรควบคุม นั่นคือรูปสมการการเคลื่อนย้ายจะไม่มีเทอมของ Source หรือ Sink เกิดขึ้น ดังนั้นสมการการเคลื่อนย้ายปริมาณ f จะเขียนได้ดังนี้คือ

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho \bar{v} f) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \bar{u} f) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_{eff} \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{eff} \frac{\partial f}{\partial z} \right) \quad (3.56)$$

$$D_{eff} = D_f + \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{f,i}} \quad (3.57)$$

f คือ ค่า Mixture fraction r คือระยะในแนวรัศมี z คือระยะในแนวแกนความยาว u, v คือความเร็วในแนวแกนรัศมีและแกนความยาวตามลำดับ D_{eff} คือค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่แบบปั่นป่วน D_f คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่แบบราบเรียบ μ_{eff} คือค่าความหนืดแบบปั่นป่วนและ $\sigma_{f,i}$ คือค่า Schimidt Number ของการกระจายตัวของค่า f แบบปั่นป่วน

StoichiometricRich conditionLean Condition

3.3.3 สมการเอนทัลปี พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้สามารถหาได้จากค่าเอนทัลปีของสารผสม(Mixture Enthalpy) ซึ่งประกอบไปด้วยเอนทัลปีของเชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์ตามสัดส่วนโดยมวลที่เกิดขึ้นจากขบวนการเผาไหม้ จากขนาดของเตาเผาทำพิจารณาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ผิดทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าผลของการแพร่รังสีความร้อนมีค่าน้อยมาก ดังนั้นค่าเอนทัลปีของสารผสมสามารถหาได้จากค่า Mixture Fraction ด้วยความสัมพันธ์อย่างง่ายดังนี้ [18]

$$h = f h_{fu} + (1 - f) h_{air} \quad (3.58)$$

โดยที่ h คือเอนทัลปีของสารผสมและ h_{fu} และ h_{air} คือค่าเอนทัลปีของเชื้อเพลิงและอากาศ ที่สภาวะทางเข้าตามลำดับ

เอนทัลปีที่พิจารณาจะเป็นเอนทัลปีสมบูรณ์ (absolute enthalpy) ซึ่งจะประกอบไปด้วยผลรวมของ 2 เทอมที่สำคัญคือเทอมแรกเป็นพลังงานที่ต้องใช้ในการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลซึ่งเราเรียกว่า Enthalpy of Formation (h_f) ส่วนในเทอมที่สองเป็นเอนทัลปีที่ขึ้นอยู่กับผลต่างของระดับอุณหภูมิเรียกว่า sensible enthalpy (h_s) สมการเอนทัลปีสมบูรณ์สามารถเขียนได้ตามสมการข้างล่างนี้

$$h = h_f + \Delta h_s \quad (3.59)$$

อุณหภูมิของสารผสม (Mixture Temperature) ภายในเตาเผาจะมีค่าต่างกันไปในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งเราสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$h = \sum Y_i h_{f,i} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (3.60)$$

Y_i คือสัดส่วนโดยมวลของสารใดๆ $h_{f,i}$ คือเอนทัลปีของสารใดๆ ที่สภาวะอ้างอิง c_p คือ ความจุความร้อนของสารผสม (The Specific heat of mixture) T คืออุณหภูมิของสารผสมและ T_{ref} คืออุณหภูมิที่สภาวะอ้างอิงจะมีค่าเท่ากับที่อุณหภูมิ 298 องศาเคลวิน ($^{\circ}K$) และความดันที่ 1 บรรยากาศ (atm)

สารแต่ละชนิดมีค่าความจุความร้อนไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารนั้น นอกจากนี้ผลความแตกต่างของระดับอุณหภูมิทำให้ค่าความจุความร้อนของสารต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นในการหาค่าความจุความร้อนของสารผสมหาได้โดยการเฉลี่ยค่าความจุความร้อนของสารแต่ละตัวคือ เชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์ตามสัดส่วนโดยมวลที่ระดับอุณหภูมิใดๆ ดังสมการต่อไปนี้

$$c_p = \sum Y_i c_{p,i} \quad (3.61)$$

$c_{p,i}$ คือค่าความจุความร้อนของเชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นอยู่กับระดับอุณหภูมิ และได้ถูกแสดงไว้ในบทที่ 5 ในตารางที่ 5.2

จากค่าในตารางจะพบค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุความร้อนกับอุณหภูมิจะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น หากต้องการความแม่นยำที่มากขึ้นจากการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะ สามารถทำได้โดยการใช้วิธี Curvefit Coefficients [32] ซึ่งจะเป็นความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ที่เป็น High order และจะมีความยุ่งยากในขั้นตอนของการคำนวณ

3.3.4 สมการสถานะ ความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ระหว่างความดัน (P) อุณหภูมิ (T) และปริมาตร (V) สามารถอธิบายได้ด้วยสมการสถานะ ในระหว่างการเผาไหม้ อุณหภูมิของการเผาไหม้จะมีค่าสูงมากทำให้ปริมาตรของก๊าซขยายตัวและแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลจะมีค่าน้อยลง นั่นคือก๊าซจะมีความหนาแน่นต่ำมาก พฤติกรรมดังกล่าวอาจถูกสมมุติให้เป็นลักษณะของก๊าซสมบูรณ์ (Ideal gas) ได้ สมการสถานะของก๊าซสมบูรณ์อธิบายได้ดังนี้

$$p = \rho RT \quad (3.62)$$

P คือความดันของก๊าซ ρ คือความหนาแน่นของก๊าซ R คือค่าคงที่จำเพาะของก๊าซและ T คืออุณหภูมิของก๊าซ

ก๊าซผสมจะประกอบไปด้วยก๊าซที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผาไหม้หลายชนิด คุณสมบัติของก๊าซผสมจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของก๊าซใดๆ ตามสัดส่วนที่เกิดขึ้น ความหนาแน่นของก๊าซผสมหาได้จากสมการที่ 3.66 ดังนี้

$$\rho_{mix} = \frac{p}{R_{mix} T_{mix}} \quad (3.63)$$

$R_{mix} = R_u / MW_{mix}$ และค่า MW_{mix} คือค่าน้ำหนักโมเลกุลของก๊าซผสมที่จะประกอบไปด้วยค่าเฉลี่ยของน้ำหนักโมเลกุลของเชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์ตามสัดส่วนโดยมวล ซึ่งหาได้จาก

$$MW_{mix} = \frac{1}{\sum_i (y_i / MW_i)} \quad (3.64)$$

MW_i คือน้ำหนักโมเลกุลของเชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์ จะสังเกตว่าค่าน้ำหนักโมเลกุลของก๊าซผสมจะมีค่าอยู่ในช่วงของน้ำหนักโมเลกุลของเชื้อเพลิงกับน้ำหนักโมเลกุลของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้จัดทำไม่มีให้ตัดแบ่ง แจกจ่าย และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศ ($MW_F \leq MW_{mix} \leq MW_{AIR}$) โดยบริเวณที่มีปริมาณเชื้อเพลิงอยู่เป็นจำนวนมากค่า MW_{mix} ก็จะมีค่าใกล้เคียงกับค่า MW_F และบริเวณที่ใดมีปริมาณอากาศอยู่เป็นจำนวนมากค่า MW_{mix} ก็จะมีค่าใกล้เคียงกับค่า MW_{AIR}



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ดิถีทั้งห้าเป็นให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

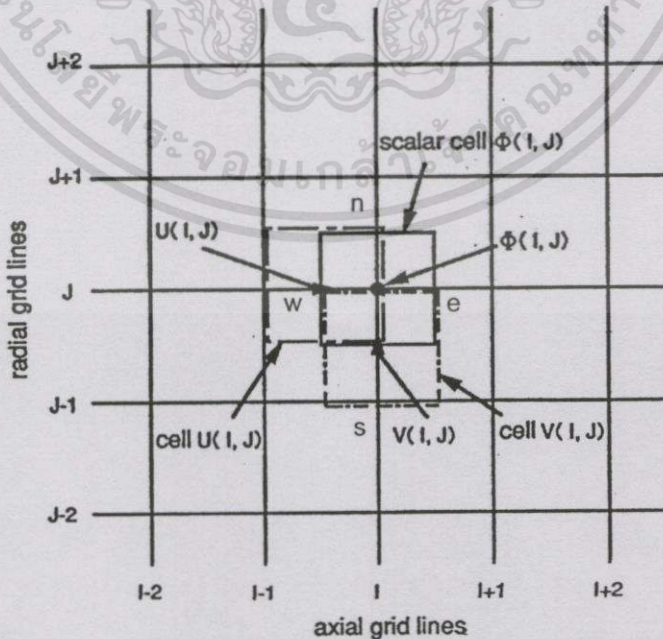
การประยุกต์วิธี Finite volume กับทฤษฎี Mixture Fraction ภายในห้องเผาไหม้ของก๊าซ

4.1 การประยุกต์วิธี Finite volume [4]

สมการที่ให้ไว้ในบทที่ 3 เป็นการพิจารณาสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบการเผาไหม้ของก๊าซที่เกิดขึ้นในปริมาตรควบคุม (Control volume) สมการที่นำมาใช้จะอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยตามสมการที่ 3.20 โดยพิจารณาการแก้ปัญหาโดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical method) ด้วยวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม รูปแบบทั่วไปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการเผาไหม้ของก๊าซแบบ Steady-state สามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปของการพา การแพร่ และ Source term ได้ดังนี้

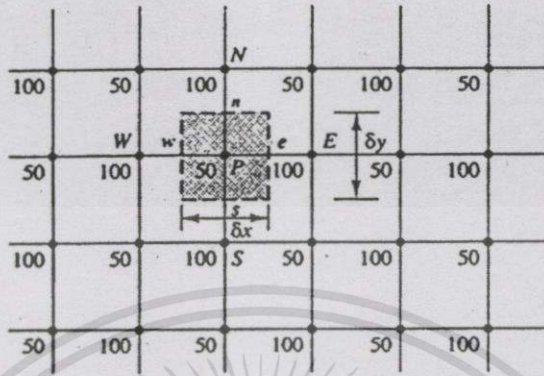
$$\frac{\partial}{\partial x_i} [\rho \bar{u}_i \bar{\Phi}] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_{\phi, eff} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x_j} \right] + S_{g, \phi} \quad (4.1)$$

$S_{g, \phi}$ คือ Source term ของก๊าซ และสัญลักษณ์ $\bar{\phi}$ อ้างถึงแบบเดียวกับ $\bar{\phi}$ ตามสมการต้นแบบ



รูปที่ 4.1 เซลล์ของสเกลาร์และเวกเตอร์ในระบบ Staggered grid [16]

การแบ่งกริดภายในห้องเผาไหม้ตามรูปที่ 4.1 เป็นแบบ Staggered grid ในการแบ่งกริดแบบธรรมดาจะเกิดปัญหาบางอย่างเช่น บางกรณีสนามความดันอาจจะเกิดค่าความสูงต่ำดังรูปที่ 4.2 [16]



รูปที่ 4.2 สนามความดันที่เกิด Checker-board [16]

พิจารณารูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่า ความดันที่ e และ w หาได้โดยวิธีการประมาณค่าแบบเชิงเส้น เทอมของเกรเดียนต์ของความดัน $\partial p / \partial x$ ในสมการ u-momentum เขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{p_e - p_w}{\delta x} = \frac{\left(\frac{p_E + p_P}{2}\right) - \left(\frac{p_P + p_W}{2}\right)}{\delta x} \\ &= \frac{p_e - p_w}{2\delta x} \end{aligned} \tag{4.2}$$

และ เกรเดียนต์ของความดัน $\partial p / \partial y$ สำหรับในสมการ v-momentum เขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{p_N - p_S}{2\delta y} \tag{4.3}$$

นำค่าความดันจากรูปที่ 4.2 แทนลงในสมการ 4.2 และ 4.3 จะพบว่า เกรเดียนต์ทุก ๆ จุดมีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากเกรเดียนต์ของความดัน ในโมเมนต์หายไป ทำให้คำตอบที่ได้มาไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในความเป็นจริง ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวแบบจำลองห้องเผาไหม้นี้จึงได้แบ่งกริดเป็นแบบ Staggered grid ซึ่งถูกเสนอโดย [5]

การแก้ปัญหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Finite volume จะจัดสมการให้อยู่ในรูปแบบของปริมาตรควบคุมโดยทำการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของปริมาตรควบคุมที่มีขนาดจำกัด ซึ่งสมการทั่ว ๆ ไปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \bar{u}_j \bar{\Phi} - \Gamma_{\phi, eff} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x_j} \right] - S_{\phi, r} = 0 \tag{4.4}$$

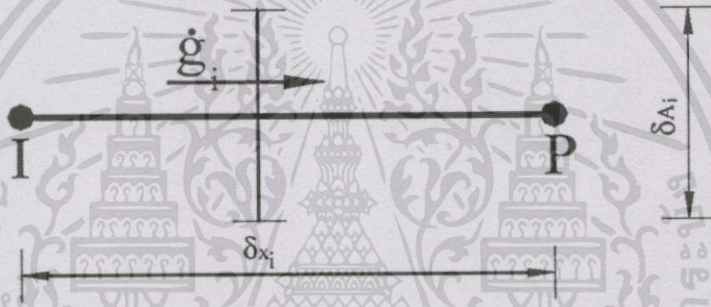
รูปอินทิเกรตในสมการที่ 4.2 ภายในปริมาตรควบคุมสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\sum \int_{A_j} \left(\rho \bar{u}_j \bar{\Phi} - \Gamma_{p,eff} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x_j} \right) dA_j - \int_V S_{p,i} \cdot dV = 0 \quad \text{เมื่อ } j = n, w, s, e$$

$$- \mathcal{G}_w + \mathcal{G}_e - \mathcal{G}_s + \mathcal{G}_n - \int_V S_{p,i} \cdot dV = 0 \quad (4.5)$$

เมื่อ

$$\mathcal{G}_i = \int_{A_i} \left(\rho \bar{u}_i \bar{\Phi} - \Gamma_{p,eff} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x_i} \right) \cdot dA_i \quad (4.6)$$



รูปที่ 4.3 การถ่ายเท 1 มิติ ของฟลักซ์ผ่านขอบเขตระหว่างตำแหน่ง I และ P

ค่าอินทิเกรตของ \mathcal{G}_i คือฟลักซ์ของการพาและการแพร่ทั้งหมดที่ผ่านพื้นผิวของปริมาตรควบคุมซึ่งสามารถหาค่าของคำตอบแบบแม่นยำ (Exact Solution) ได้ สำหรับการเคลื่อนย้ายฟลักซ์แบบ 1 มิติผ่านขอบเขต A_i ดังรูปที่ 4.3 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\mathcal{G}_i = F_i \left(\Phi_P + \frac{\Phi_P - \Phi_I}{\exp(P_{e_i}) - 1} \right) \quad (4.7)$$

เมื่อ $P_{e_i} = \frac{(\rho u)_e (\delta x)_e}{\Gamma_e} = \frac{F_e}{D_e}$ คือค่า Peclet number ที่ตำแหน่งเซลล์

จากสมการที่ 4.5 แทนลงในปริมาตรควบคุม ซึ่ง $\mathcal{G}_e - \mathcal{G}_w = 0$ จะได้ว่า

$$F_e \left(\phi_P + \frac{\phi_P - \phi_E}{\exp(P_{e_e}) - 1} \right) - F_w \left(\phi_W + \frac{\phi_W - \phi_P}{\exp(P_{e_w}) - 1} \right) = 0 \quad (4.8)$$

ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบพื้นฐานได้ดังนี้

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_w \phi_w$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} a_E &= \frac{F_e}{\exp(F_e/D_e) - 1} \\ a_w &= \frac{F_w \exp(F_w/D_w)}{\exp(F_w/D_w) - 1} \\ a_p &= a_E + a_w + (F_e - F_w) \end{aligned} \quad (4.9)$$

4.2 โครงสร้างของโปรแกรมโดยทั่วไป [16]

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ได้ทำการคำนวณความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ คุณสมบัติต่าง ๆ ของการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ โดยใช้สมการความต่อเนื่อง โมเมนตัม การเคลื่อนย้ายพลังงานของความร้อน อัตร่า $\bar{p}, \bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, k, \varepsilon$ สมการการเผาไหม้ เป็นต้น สำหรับความดันจะไม่มีสมการที่เกี่ยวข้องโดยตรงแต่จะถูกรวมไว้กับความเร็วในสมการโมเมนตัม ในขั้นตอนของการกระทำซ้ำเพื่อหาค่าจากตัวแปรต่างๆ ได้ถูกประยุกต์ใช้โดยวิธี PISO algorithm (Pressure Implicit Split Operator) ซึ่งโครงสร้างของ PISO สามารถอธิบายโดยรูป 4.6 และการหาค่าตัวแปรของสมการทำได้โดยใช้ scheme ต่างๆ วิธี Hybrid scheme ได้ถูกนำมาใช้กับสมการโมเมนตัมเพื่อหาค่า $\bar{p}, \bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ และ \bar{f} ส่วนวิธี Quick scheme ใช้สมการการเคลื่อนย้ายเพื่อหาค่า k, ε โดยวิธี TDMA จะถูกนำมาใช้เพื่อให้ได้คำตอบของระบบสมการ

4.2.1 The Hybrid scheme จากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่จัดอยู่ในเทอมของการพาและการแพร่ตามสมการที่ 4.4 นั้น เราสามารถหาค่าตอบแม่นยำตรงได้โดยการอินทิเกรตทั้งปริมาตรควบคุม เราสามารถสร้างวิธี Hybrid ได้โดยการเชื่อมโยงกับวิธี Exponential scheme ซึ่งสามารถที่จะเขียนสัมประสิทธิ์ a_E หรือตัวแปรไร้มิติ a_E/D_e เป็นฟังก์ชันของ Peclet number, P_e ได้และจากสมการที่ 4.7 เราจะจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{a_E}{D_e} = \frac{P_e}{\exp(P_e) - 1} \quad (4.10)$$

สำหรับ $P_e < -2$

$$\frac{a_E}{D_e} = -P_e$$

สำหรับ $-2 \leq P_e \leq 2$

$$\frac{a_E}{D_e} = 1 - \frac{P_e}{2}$$

สำหรับ $P_e > 2$,

$$\frac{a_e}{D_e} = 0$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$\frac{g_f}{(\rho \bar{u} A)_i} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[(1 + P_e^{-1}) \bar{\Phi}_i + (1 - P_e^{-1}) \bar{\Phi}_p \right] & \text{for } -2 < P_e < 2 \\ \bar{\Phi}_i & \text{for } P_e > 2 \\ \bar{\Phi}_p & \text{for } P_e < -2 \end{cases} \quad (4.11)$$

นำสมการที่ 4.9 มาแทนในสมการที่ 4.4 เพื่อจะได้สมการดังนี้

$$(a_p - S_p) \bar{\Phi}_p = \sum a_i \bar{\Phi}_i + S_u \quad (4.12)$$

ซึ่ง Source term ของสมการ 4.3 จะมีค่าดังนี้

$$\int_V S_\phi . dV = S_{g,\phi}$$

และ Source term ของก๊าซมีค่าเท่ากับ

$$S_{g,\phi} = S_{u,\phi} + S_{p,\phi} \bar{\Phi}_p$$

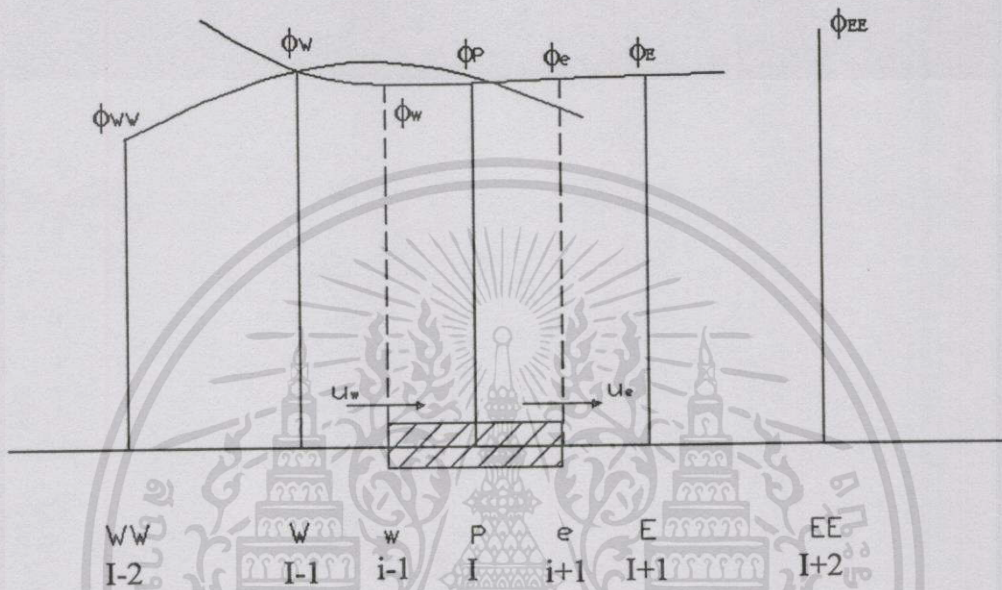
สัมประสิทธิ์ของสมการ 4.10 กำหนดได้ดังนี้

$$a_p = \sum_i a_i = a_n + a_w + a_s + a_e$$

$$\sum_i a_i \bar{\Phi}_i = a_n \bar{\Phi}_n + a_w \bar{\Phi}_w + a_s \bar{\Phi}_s + a_e \bar{\Phi}_e$$

$$a_i = (\rho \bar{u} A f)_i = \left[\left(\frac{\rho \bar{u}}{2} - \frac{\mu}{\delta l} \right) A \right]_i$$

4.2.2 The Quick scheme เป็นวิธีการที่ใช้การประมาณค่าแบบฟังก์ชัน Quadratic เพื่อหาค่าฟลักซ์ของคุณสมบัติที่ผ่านพื้นผิวปริมาตรควบคุมที่พิจารณา วิธีการนี้จะใช้จุดจำนวน 3 จุดเพื่อสร้างความสัมพันธ์ด้วย 2 จุดแรกจะอยู่ที่ต้นทางของพื้นผิวที่พิจารณาซึ่งอยู่นอกปริมาตรควบคุม ส่วนอีก 1 จุดจะอยู่หลังพื้นผิวที่อยู่ในปริมาตรควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 รูปร่าง Quadratic function ใช้ใน Quick scheme [16]

สมการที่ใช้ในการหาค่าคุณสมบัติที่ผิวหน้าเซลล์โดยวิธี Quick scheme เป็นดังนี้

$$\Phi_{face} = \frac{6}{8}\Phi_{i-1} + \frac{3}{8}\Phi_i - \frac{1}{8}\Phi_{i-2}$$

ถ้า $F_w > 0$ และ $F_e > 0$

$$\Phi_w = \frac{6}{8}\Phi_W + \frac{3}{8}\Phi_P - \frac{1}{8}\Phi_{WW}$$

$$\Phi_e = \frac{6}{8}\Phi_P + \frac{3}{8}\Phi_E - \frac{1}{8}\Phi_W$$

ถ้า $F_s > 0$ และ $F_n > 0$

$$\Phi_s = \frac{6}{8}\Phi_S + \frac{3}{8}\Phi_P - \frac{1}{8}\Phi_{SS}$$

$$\Phi_n = \frac{6}{8}\Phi_P + \frac{3}{8}\Phi_N - \frac{1}{8}\Phi_S$$

ถ้า $F_w < 0$ และ $F_e < 0$

$$\Phi_w = \frac{6}{8}\Phi_P + \frac{3}{8}\Phi_W - \frac{1}{8}\Phi_E$$

$$\Phi_e = \frac{6}{8}\Phi_E + \frac{3}{8}\Phi_P - \frac{1}{8}\Phi_{EE}$$

ถ้า $F_s < 0$ และ $F_n < 0$

$$\Phi_s = \frac{6}{8}\Phi_P + \frac{3}{8}\Phi_S - \frac{1}{8}\Phi_N$$

$$\Phi_n = \frac{6}{8}\Phi_N + \frac{3}{8}\Phi_P - \frac{1}{8}\Phi_{NN}$$

เมื่อรวมสมการทั้งหมดและทำการจัดรูปใหม่จะได้ว่า

$$a_p \Phi_p = a_E \Phi_E + a_w \Phi_w + a_{EE} \Phi_{EE} + a_{ww} \Phi_{ww} + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + a_{NN} \Phi_{NN} + a_{SS} \Phi_{SS} + S_U$$

โดยที่

$$\Phi = u, v, T, P$$

$$a_p = a_E + a_w + a_{EE} + a_{ww} + a_N + a_S + a_{NN} + a_{SS} + a_p^0 + \Delta F - S_p$$

$$\Delta F = F_e - F_w + F_n - F_s$$

$$a_w = D_w + \frac{6}{8} \alpha_w F_w + \frac{1}{8} \alpha_e F_e + \frac{3}{8} (1 - \alpha_w) F_w$$

$$a_{ww} = -\frac{1}{8} \alpha_w F_w$$

$$a_E = D_e - \frac{3}{8} \alpha_e F_e - \frac{6}{8} (1 - \alpha_e) F_e - \frac{1}{8} (1 - \alpha_w) F_w$$

$$a_{EE} = \frac{1}{8} (1 - \alpha_e) F_e$$

$$\alpha_w = 1 \text{ สำหรับ } F_w > 0 \text{ และ } \alpha_e = 1 \text{ สำหรับ } F_e > 0$$

$$\alpha_w = 0 \text{ สำหรับ } F_w < 0 \text{ และ } \alpha_e = 0 \text{ สำหรับ } F_e < 0$$

$$a_s = D_s + \frac{6}{8} \alpha_s F_s + \frac{1}{8} \alpha_n F_n + \frac{3}{8} (1 - \alpha_s) F_s$$

$$a_{SS} = -\frac{1}{8} \alpha_s F_s$$

$$a_N = D_n - \frac{3}{8} \alpha_n F_n - \frac{6}{8} (1 - \alpha_n) F_n - \frac{1}{8} (1 - \alpha_s) F_s$$

$$a_{NN} = \frac{1}{8} (1 - \alpha_n) F_n$$

$$\alpha_s = 1 \text{ สำหรับ } F_s > 0 \text{ และ } \alpha_n = 1 \text{ สำหรับ } F_n > 0$$

$$\alpha_s = 0 \text{ สำหรับ } F_s < 0 \text{ และ } \alpha_n = 0 \text{ สำหรับ } F_n < 0$$

$$S_U = S_u \Delta V$$

$$S_p = S_p \Delta V$$

4.3 การแก้เมทริกซ์โดยวิธี TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm)

ในการพิจารณาปัญหาการเผาไหม้ของก๊าซภายในห้องเผาไหม้โดยใช้วิธี PISO มีลำดับการทำงานดังรูปที่ 4.6 โดยจะได้ระบบสมการซึ่งสามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้โดยใช้วิธี TDMA ในการแก้เมทริกซ์ เพื่อให้ได้คำตอบที่เราต้องการ โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

เมื่อได้สมการของแต่ละโหนด เราซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \phi_1 &= C_1 \\
 -\beta_2\phi_1 + D_2\phi_2 - \alpha_2\phi_3 &= C_2 \\
 -\beta_3\phi_2 + D_3\phi_3 - \alpha_3\phi_4 &= C_3 \\
 -\beta_4\phi_3 + D_4\phi_4 - \alpha_4\phi_5 &= C_4 \\
 &\vdots \\
 -\beta_n\phi_{n-1} + D_n\phi_n - \alpha_n\phi_{n+1} &= C_n \\
 \phi_{n+1} &= C_{n+1}
 \end{aligned}$$

โดย ϕ คือค่าคุณสมบัติใด ๆ ที่พิจารณาภายในห้องเผาไหม้เช่น ความเร็วในทิศทางต่าง ๆ ความดัน ค่า Mixture Fraction เป็นต้น เราสามารถเขียนรูปทั่วไปของสมการในแต่ละแถวได้ดังนี้

$$-\beta_j\phi_{j-1} + D_j\phi_j - \alpha_j\phi_{j+1} = C_j$$

สำหรับ ϕ_2 ถึง ϕ_n สามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ต่อไปนี้

$$\phi_2 = \frac{\alpha_2}{D_2}\phi_3 + \frac{\beta_2}{D_2}\phi_1 + \frac{C_2}{D_2}$$

$$\phi_3 = \frac{\alpha_3}{D_4}\phi_4 + \frac{\beta_3}{D_3}\phi_2 + \frac{C_3}{D_3}$$

$$\phi_n = \frac{\alpha_n}{D_n}\phi_{n+1} + \frac{\beta_n}{D_n}\phi_{n-1} + \frac{C_n}{D_n}$$

ในขั้นตอนการหาคำตอบ เราจะใช้วิธี Back-substitution ยกตัวอย่างเช่นในการหาค่าของ ϕ_3 เราจะใช้ค่าของ ϕ_2 มาแทนในสมการของ ϕ_3 จึงจะได้คำตอบตามต้องการ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\phi_3 = A_3\phi_4 + C'_3$$

โดย

$$A_3 = \frac{\alpha_3}{D_3 - \beta_3 A_2}$$

และ

$$C'_3 = \frac{\beta_3 C'_2 + C_3}{D_3 - \beta_3 A_2}$$

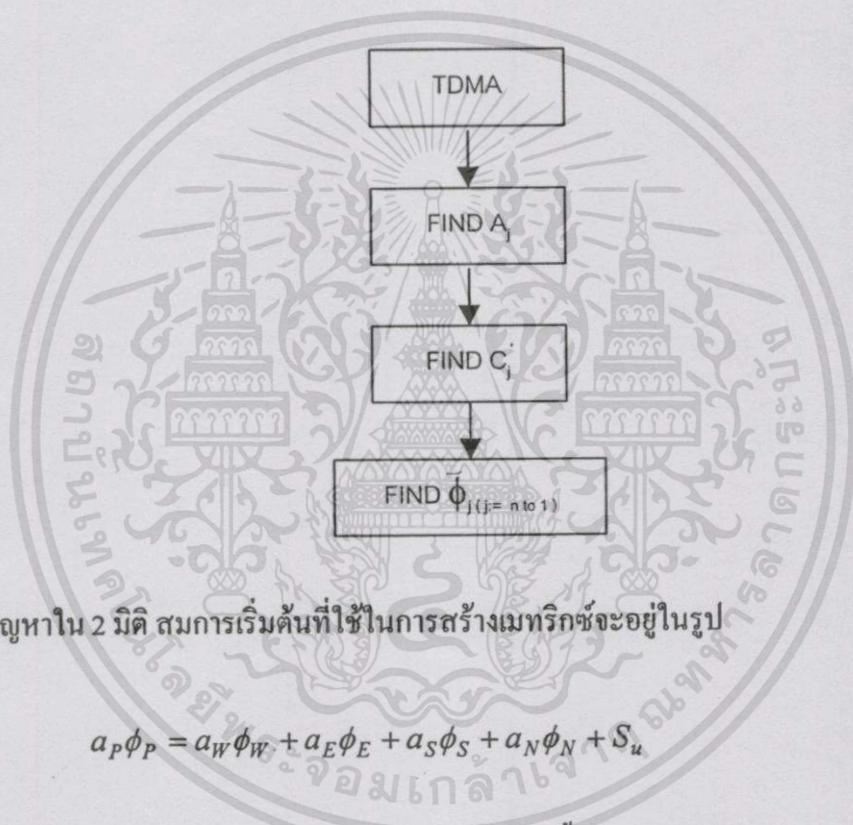
เราสามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$\phi_j = A_j \phi_{j+1} + C'_j$$

$$A_j = \frac{\alpha_j}{D_j - \beta_j A_{j-1}}$$

$$C'_j = \frac{\beta_j C'_{j-1} + C_j}{D_j - \beta_j A_{j-1}}$$

สำหรับการแก้สมการหาค่า ϕ จะเริ่มการหาค่า A_j และ C'_j สำหรับทุกค่า j ($j=1$ ถึง $j=n$) แล้วจึงหาค่า ϕ ย้อนกลับจาก ϕ_n ไปหา ϕ_1 หรือเขียนเป็นขั้นตอนดังนี้



สำหรับปัญหาใน 2 มิติ สมการเริ่มต้นที่ใช้ในการสร้างเมทริกซ์จะอยู่ในรูป

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + S_u$$

ในการแก้สมการเราจะเริ่มทำในแนว N-S ก่อน (ทิศ r) ดังนั้นสมการ จึงเป็น

$$-a_S \phi_S + a_P \phi_P - a_N \phi_N = a_W \phi_W + a_E \phi_E + S_u$$

กำหนดให้ $\alpha_j = a_N$

$$\beta_j = a_S$$

$$D_j = a_P$$

$$C_j = a_W \phi_W + a_E \phi_E + S_u$$

จากนั้นจึงใช้ขั้นตอนในข้างต้นแก้สมการหาค่า ϕ ในแนว N-S ก่อนโดยกำหนดค่าเริ่มต้น (Initial) สำหรับ ϕ ที่เราไม่ทราบค่า (ยกตัวอย่างเช่น ϕ_W สำหรับแนวกวาดแฉกแรก ($i=1$) ในการ

เอกสารนี้ค่าในรอบที่ 1 (Iteration ครั้งที่ 1) งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

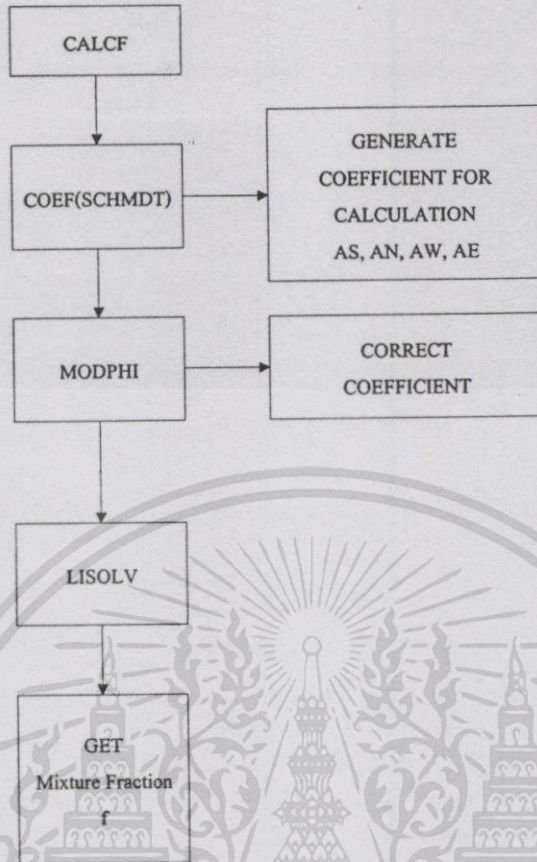
ไปว่าครกปีดงทั้งสี่ ลึกทั้งห้าเป็นให้ตัดแปลงเป็นอีก และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากหาค่า ϕ ในแนว N-S ทุก ๆ แนวแล้ว (จบ Iteration ครั้งที่ 1) จึงเริ่มทำซ้ำจนกว่าค่าความแตกต่างระหว่าง ϕ_{new} และ ϕ_{old} จะน้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้ ($|\phi_{new} - \phi_{old}| \leq e$) และวิธี TDMA ที่อธิบายข้างต้นนี้จะถูกเขียนไว้ใน Subroutine ที่ชื่อ LISOLV ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณคุณสมบัติต่าง ๆ

4.4 โครงสร้างโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ

ประกอบด้วยโปรแกรมหลัก (Main program) และ โปรแกรมย่อย (Subroutine) ต่าง ๆ ดังนี้

- โปรแกรมหลัก (Main program) ทำหน้าที่จัดลำดับการทำงานของ Subroutine ต่าง ๆ ให้ทำงานตามขั้นตอน
- โปรแกรมย่อย (Subroutine) ทำหน้าที่คำนวณค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ต้องใช้ประกอบด้วย
- SEED ทำหน้าที่เป็น Input file ซึ่งเก็บค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไว้ในตัวแปรที่กำหนดขึ้น
- INIT ทำหน้าที่กำหนดค่าของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณให้มีค่าเป็นศูนย์ก่อนเริ่มการคำนวณ
- PROPS ทำหน้าที่คำนวณความหนืดของของไหล
- CALCF ทำหน้าที่คำนวณหาค่า Mixture Fraction ภายในห้องเผาไหม้
- CALCON ทำหน้าที่คำนวณหาค่าสัดส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์ภายในห้องเผาไหม้
- CALCHM ทำหน้าที่คำนวณเอนทัลปีและอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้
- CALCU ทำหน้าที่คำนวณความเร็วในทิศตามความยาวของห้องเผาไหม้ (z Direction)
- CALCV ทำหน้าที่คำนวณความเร็วในทิศทางรัศมีของห้องเผาไหม้ (r Direction)
- CALCP ทำหน้าที่คำนวณค่าของความดันและแก้ไขค่าของความเร็วในทิศทาง z และ r โดยได้ใช้ Algorithm แบบวิธี PISO
- CALCW ทำหน้าที่คำนวณความเร็วในทิศทางวนรอบแกนของห้องเผาไหม้ (θ Direction)
- CALCTE ทำหน้าที่คำนวณค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (k) ภายในห้องเผาไหม้
- CALCED ทำหน้าที่คำนวณค่าอัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน (ε) ภายในห้องเผาไหม้
- PROMOD ประกอบด้วย MODU, MODV, MODW, MODU1, MODP, MODHM และทำหน้าที่แก้ไข ค่าของสัมประสิทธิ์ในการคำนวณ ความเร็ว ความดัน เอนทัลปี ค่า Mixture Fraction
- LISOLV ทำหน้าที่แก้สมการที่ได้จากการสร้างสัมประสิทธิ์และ Source term โดยอาศัย TDMA (จากบทที่ 4) ในการแก้สมการหาค่าของพารามิเตอร์ใด ๆ
- PRINT ทำหน้าที่สร้าง Output file ที่ได้จากการคำนวณ

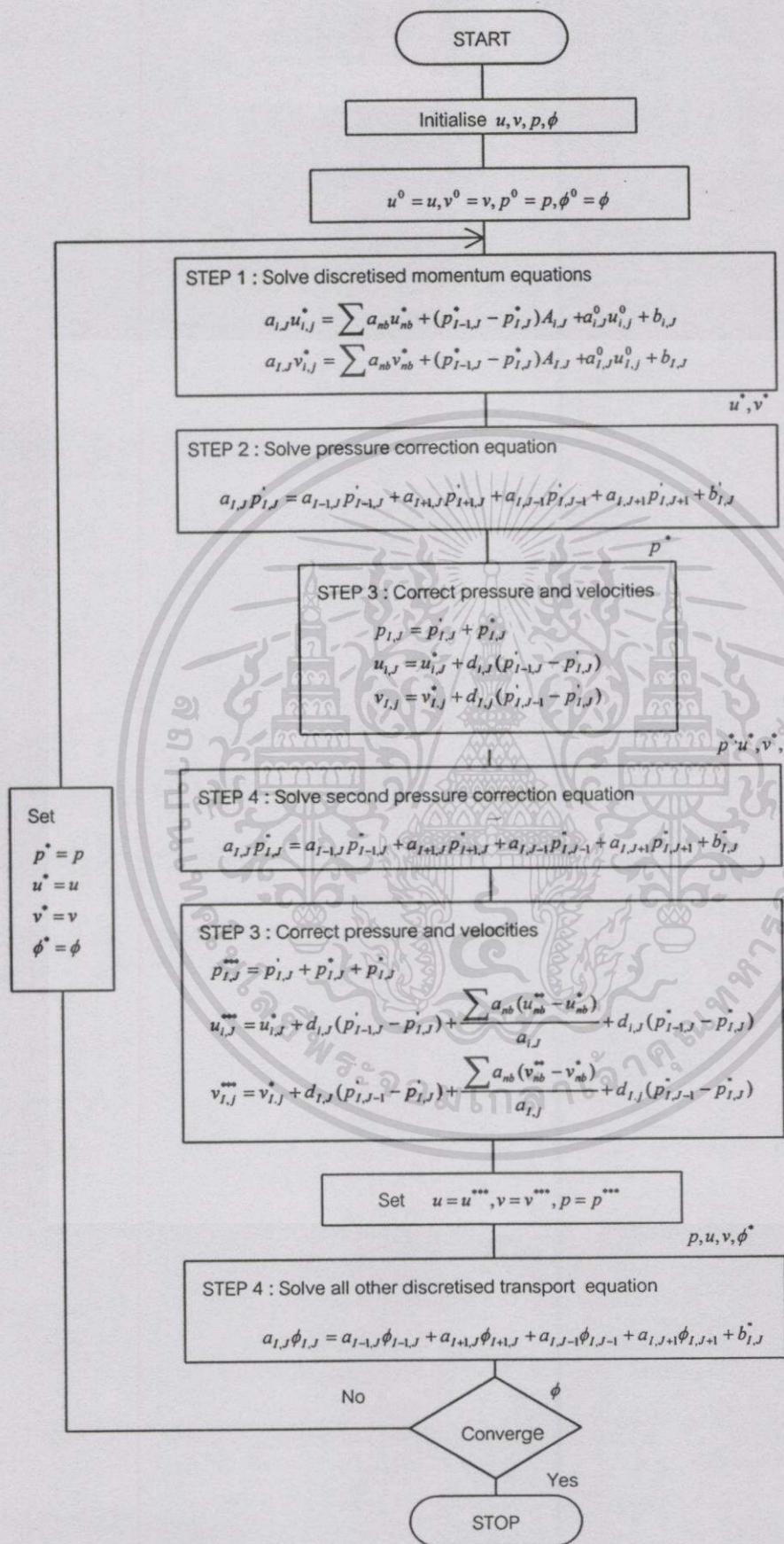


รูปที่ 4.5 อธิบายโครงสร้างของ Subroutine ที่คำนวณหาค่า Mixture Fraction

ซึ่งลำดับการทำงานของโครงสร้างโปรแกรมหลักนี้สามารถอธิบายได้ด้วยแผนผังการทำงานซึ่งแสดงไว้รูปที่ 4.7 เมื่อโปรแกรมหลักรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณจาก Input file ที่ชื่อ SEED เข้ามาแล้ว ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ก็จะถูกทำการแยกข้อมูลสำหรับโปรแกรมย่อยแต่ละชุดเพื่อทำการคำนวณหาคำตอบที่เราต้องการ โดยแสดงผลที่ Output Files ที่ชื่อ FAFOUT ซึ่งจะได้ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ที่แต่ละตำแหน่งภายในห้องเผาไหม้ เช่น ความเร็ว ความดัน ค่า Mixture Fraction ค่าสัดส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์ เป็นต้น รูปที่ 4.5 เป็นแผนผังที่แสดงลำดับการทำงานสำหรับ Subroutine CALCF ซึ่งทำหน้าที่คำนวณหาค่า Mixture Fraction ที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ โปรแกรมจะสิ้นสุดการทำงานเมื่อผลลัพธ์ที่ได้ลู่เข้าหาคำตอบ (Convergence) หรือผลต่างระหว่างค่าคำตอบที่ได้ใหม่กับคำตอบเดิมน้อยกว่าค่า Convergence criteria ที่ตั้งไว้ การกำหนดเกณฑ์ดังกล่าวทำได้โดยการปรับเปลี่ยนค่า Convergence criteria ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งคำตอบที่ได้ซึ่งได้แก่ ค่าคุณสมบัติต่างๆที่ได้จากสมการการเคลื่อนย้ายซึ่งประกอบไปด้วย ค่าความเร็ว ค่าความดัน ค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ค่าการสูญเสียของพลังงานจลน์และค่า Mixture Fraction ไม่เปลี่ยนแปลง จากวิธีดังกล่าวพบว่าค่า Convergence criteria มีค่าเท่ากับ 0.4×10^{-2} ค่า Convergence criteria นี้จะเปลี่ยนไปตามความเหมาะสมขึ้นอยู่กับปัญหาที่พิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

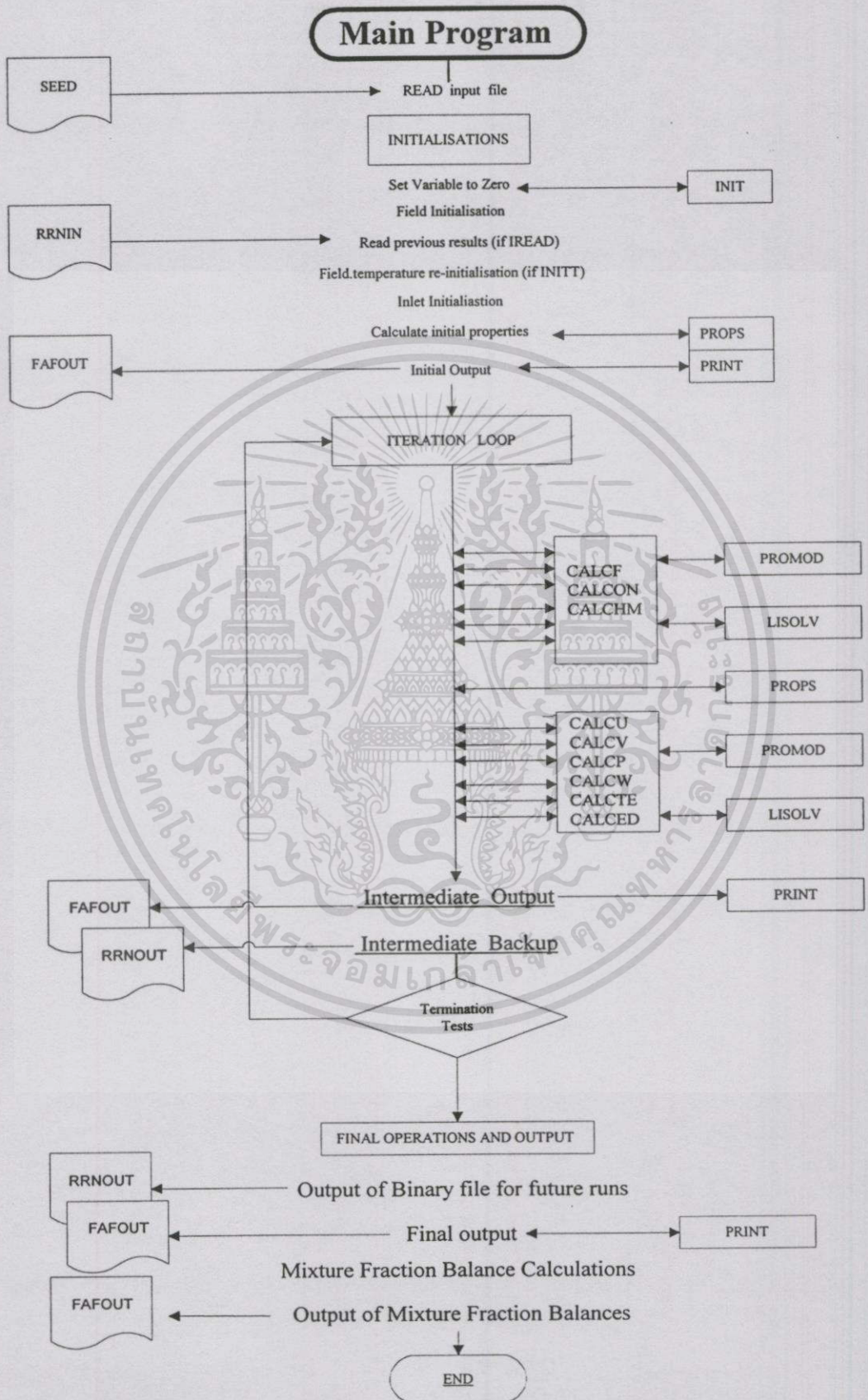
ไปว่ากรออีโดงทั้งลึบ ลึกทั้งห้าบมิให้ตัดแบ่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 อธิบายโครงสร้าง PISO algorithm [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ใช้ทั้งหมดยังมีหน้าที่ดูแลตนเอง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 อธิบายโครงสร้างโปรแกรมหลักที่ใช้คำนวณการเผาไหม้ด้วยทฤษฎี Mixture Fraction เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อข้อผิดพลาด และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

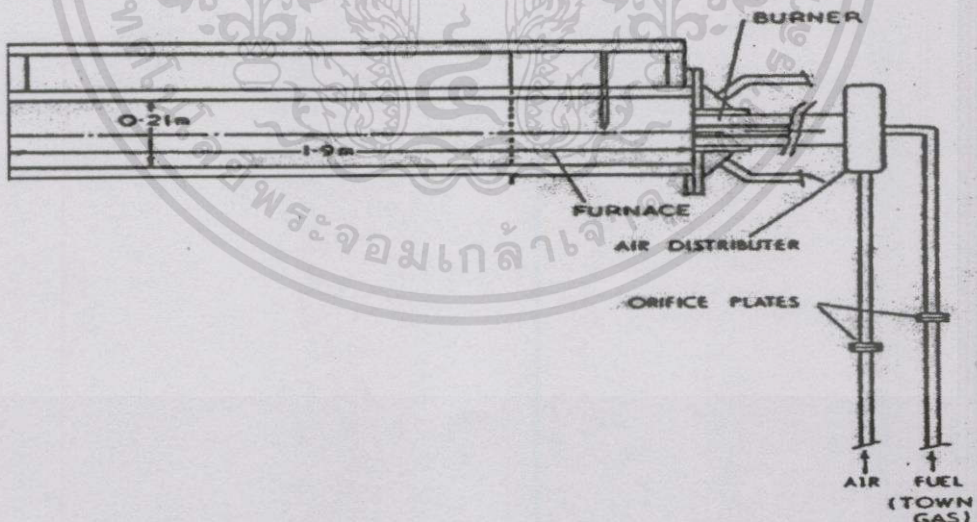
การจำลองการเผาไหม้ของก๊าซภายในเตาเผา

5.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลการจำลองการเผาไหม้ด้วยทฤษฎี Mixture fraction ภายในห้องเผาไหม้ทรงกระบอกซึ่งเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมที่มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักและได้ประยุกต์ใช้กับวิธี Finite volume โดยพิจารณาเนื้อที่ภายในห้องเผาไหม้ประกอบไปด้วยปริมาตรเล็กๆดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 ผสมผสานกับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่ได้พัฒนาแล้วซึ่งได้พิจารณาถึงสมการการถ่ายเทมวล โมเมนตัมและพลังงาน

5.2 ลักษณะห้องเผาไหม้ [18]

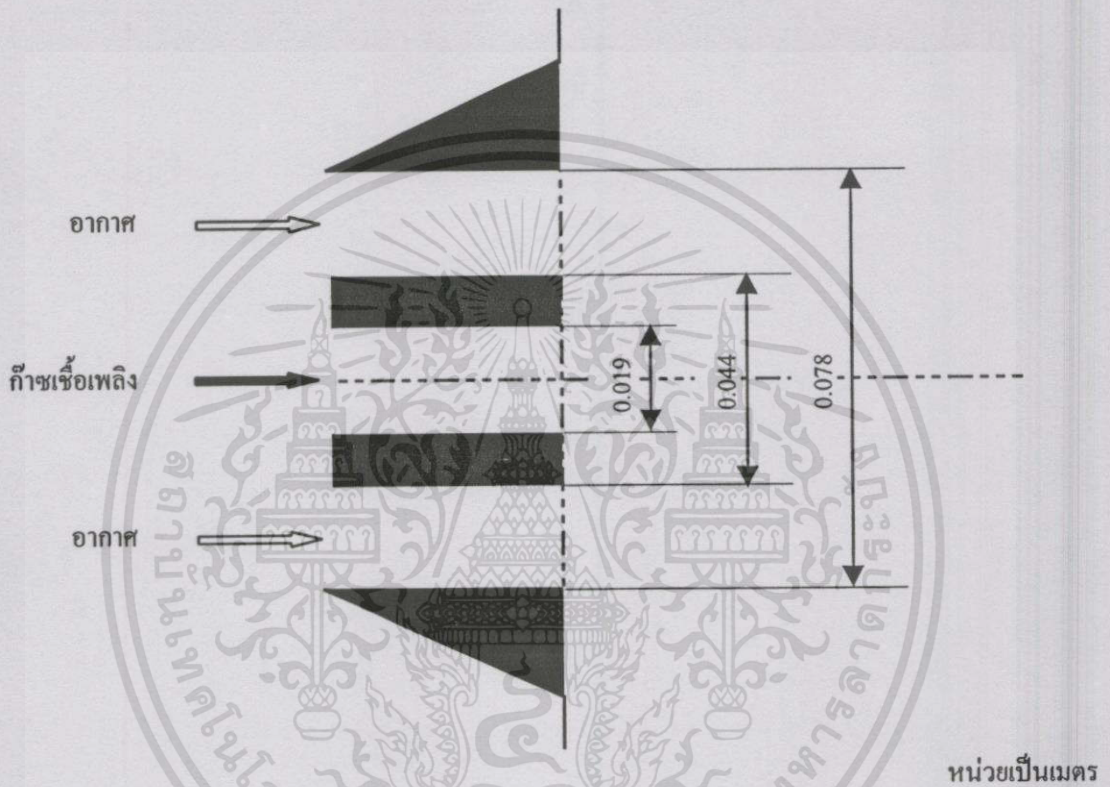
ห้องเผาไหม้ที่ใช้ในการจำลองการเผาไหม้เป็นลักษณะเตาเผาทรงกระบอกยาวโดยมีหัวเผาอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งของเตาเผา ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยเตาเผามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวเท่ากับ 0.21 และ 1.90 เมตร ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 ลักษณะโครงสร้างของเตาเผา

หัวเผาที่ใช้ประกอบด้วยท่ออากาศที่ห่อหุ้มท่อจ่ายก๊าซเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งศูนย์กลางของหัวเผาดังในรูปที่ 5.2 โดยท่อเชื้อเพลิงมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.0195 เมตรและท่ออากาศมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ 0.045 และ 0.0784 เมตรตามลำดับ ที่ปลายท่ออากาศจะมีการ

สร้างระบบใบปรับที่สามารถปรับการหมุนได้ 3 ระดับซึ่งมีวัตถุประสงค์สำหรับปรับมุมมองการหมุนของอากาศให้ได้ที่ 30, 45 และ 60 องศา ตามลำดับ ความยาวของท่อส่งก๊าซเชื้อเพลิงและอากาศถูกกำหนดให้มีความยาวเท่ากับ 0.70 เมตรเพื่อให้แน่ใจว่าที่ปลายทางออกของท่อจะมีสภาพการไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มตัว (Fully development)



รูปที่ 5.2 โครงสร้างของหัวเผา

5.3 ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผล

เราจะทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลลัพท์ที่เกิดขึ้น โดยการกำหนดเงื่อนไขของสภาวะที่ทางเข้าไว้ 4 กรณีคือ 1) ผลของค่า Reynold Number 2) ผลของค่าสัดส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิงและอากาศ (F/A) 3) ผลของการเกิดการหมุนของอากาศ (Swirl) และ 4) ผลของการกระจายความเร็ว ตารางที่ 5.1 แสดงค่าเงื่อนไขของสภาวะที่ทางเข้าที่ใช้ในการจำลองการเผาไหม้และตารางที่ 5.2 แสดงค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการทดลอง สำหรับการกำหนดแนวกริดของเตาเผาทดสอบเพื่อใช้ในการจำลองการเผาไหม้ได้ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก จ

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าเงื่อนไขของสภาวะที่ทางเข้าสำหรับการจำลองการเผาไหม้ [18]

Description	Re	F/A	Swirl Angle	Turbulent intensity	Schmidt No
1. Case "A" For Re Effect	16,300 10,867	0.0786	0°	0.925	0.85
2. Case "B" For F/A Effect	16,300	0.0635 0.0786	0°	0.925	0.85
3. Case "C" For Swirl Effect	20,520	0.0652	30° 60°	1.500	0.85
4. Case "D" For Vel-Profiles Effect	16300 20,460	0.0635 0.0623	0° 45°	1.756	0.85

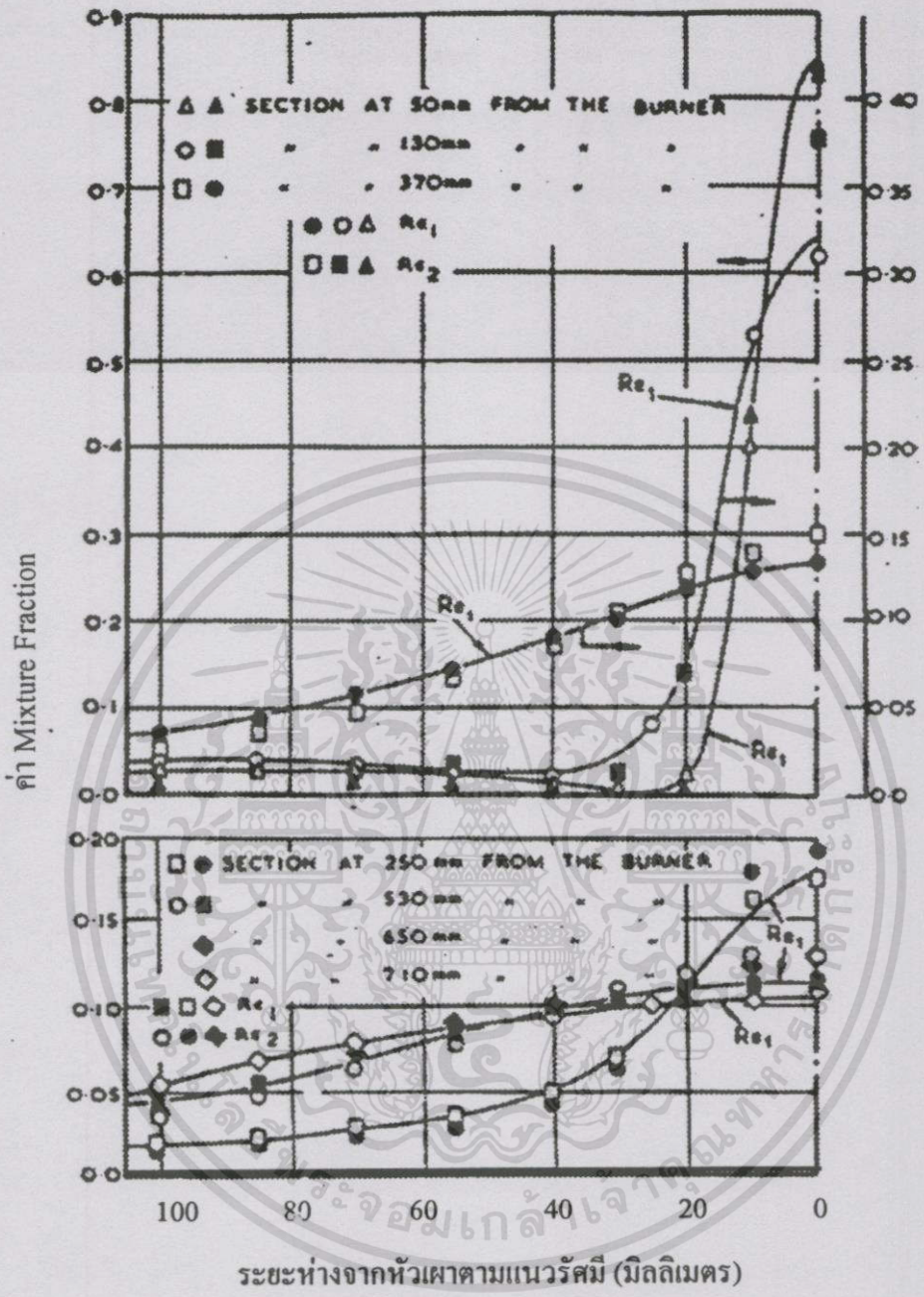
ตารางที่ 5.2 แสดงค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้โดยแบบจำลองการเผาไหม้ [18]

อุณหภูมิอ้างอิง, T_{ref}	298 °K
ความดันอ้างอิง, P	101,300 N/m^2
ความจุความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง, $c_{p,FU}$	$2.11 + 1.67 \times 10^{-3} T$ (kJ/kg.c)
ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, $c_{p,AIR}$	$1.00 + 1.21 \times 10^{-4} T$ (kJ/kg.c)
ความจุความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์, $c_{p,PR}$	$1.08 + 2.71 \times 10^{-4} T$ (kJ/kg.c)
ความหนาแน่นที่สภาวะทางเข้าของเชื้อเพลิง, ρ_F	0.4826 kg/m^3
ความหนาแน่นที่สภาวะทางเข้าของอากาศ, ρ_A	1.1614 kg/m^3
ค่า Stoichiometric Mixture Fraction, f_{st}	0.087

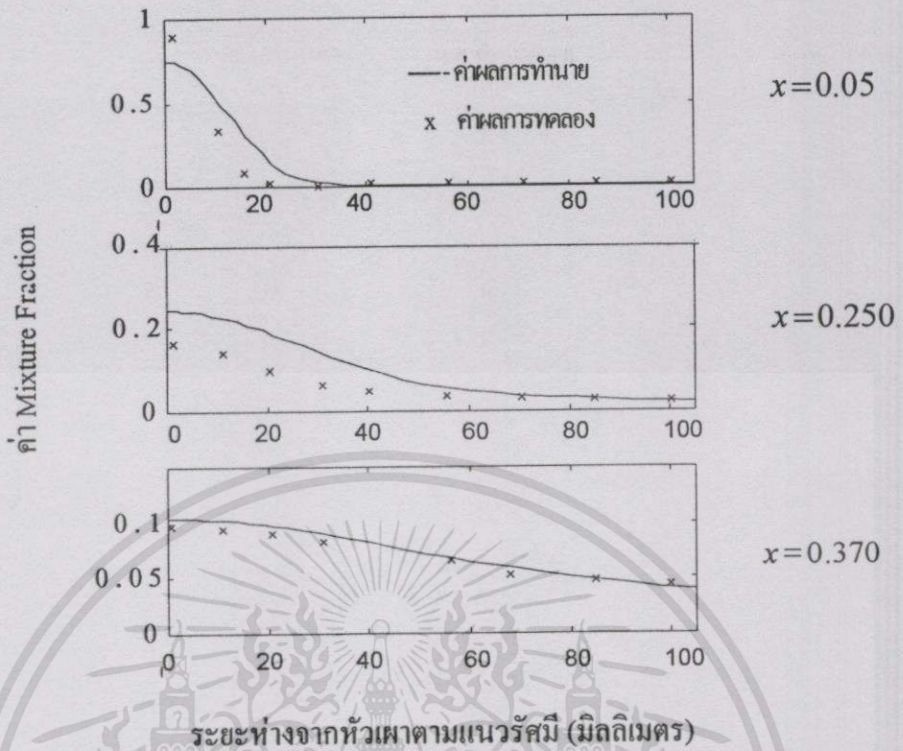
5.3.1 ผลของค่า Reynolds Number ที่สภาวะทางเข้า ค่า Re เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับสภาพของการไหล คุณสมบัติที่มีผลต่อค่า Re คือ ความเร็ว ความหนืด และ ขนาดของเตาเผา การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติดังกล่าวมีผลทำให้ค่า Re เปลี่ยนแปลงไป จากคุณสมบัติข้างต้นจะพบว่า Re ยังมีค่ามากพฤติกรรมการปั่นป่วนจะสูงตาม ดังนั้นการปรับเปลี่ยนค่า Re จึงมีผลกระทบต่อพฤติกรรมการเผาไหม้แบบปั่นป่วน สำหรับการทดลองเราได้กำหนด Re ไว้ 2 สภาวะคือสภาวะแรกเท่ากับ 16,300 และสภาวะที่สองจะมีค่าน้อยกว่า 1.5 เท่า หรือเท่ากับ 10,867 โดยมีเงื่อนไขที่ F/A เท่ากับ 0.0786 และไม่มีลมของอากาศ

รูปที่ 5.3 เป็นผลการทดลองที่ได้จากการวัดการกระจายตัวของค่า f ที่สภาวะ Re เท่ากับ 16,300 และ 10,867 ตามหน้าตัดขวางที่ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนความยาว ซึ่งจะพบว่า การกระจายตัวของ f มีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่า Re มีผลกระทบต่อพฤติกรรมการเผาไหม้แบบปั่นป่วนน้อยมาก

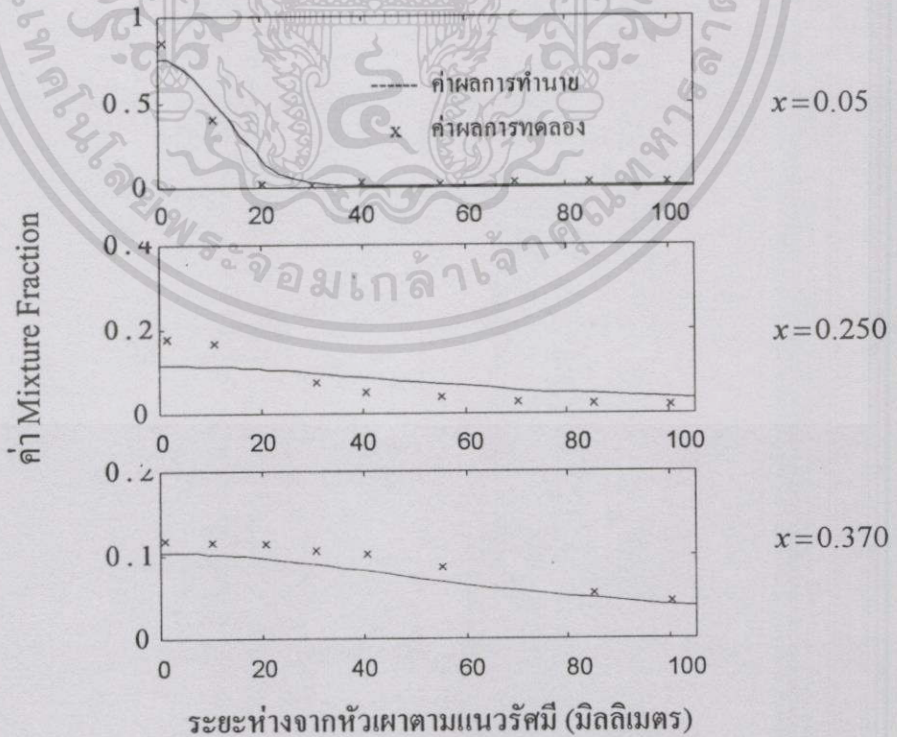
รูปที่ 5.4 และ 5.5 แสดงผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของค่า f จากการทำนายและการทดลองตามหน้าตัดขวางที่ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนความยาวเท่ากับ 0.05, 0.250, 0.530, 0.710 เมตรที่สภาวะ Re กับ 16,300 เท่าและ 10,867 ตามลำดับ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการจำลองได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 Case "A" จะพบว่าที่บริเวณทางเข้าของเตาเผาในช่วงที่ห่างจากหัวเผาตามแนวรัศมีเท่ากับ 0.06 เมตรแรกผลการทำนายเริ่มใกล้เคียงกับผลการทดลองและจะมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นเมื่อยิ่งห่างจากบริเวณดังกล่าวไปจนถึงผนังเตา สำหรับค่า f ตามแนวแกนความยาวจะใกล้เคียงกับผลการทดลองมากขึ้นเมื่อยิ่งห่างจากหัวเผา สำหรับการกระจายตัวของอุณหภูมิของการเผาไหม้ที่ได้จากการทำนายได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.6 ส่วนผลการทำนายของค่าสัดส่วนโดยมวลของอากาศและผลิตภัณฑ์แสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของค่า f ที่สภาวะ Re เท่ากับ 16,300 และ 10,867 ตามแนวหน้าตัดขวางที่ระยะต่างๆตามแนวแกนความยาว [18]



รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบค่า f ระหว่างการทำนายและการทดลองที่สภาวะ Re เท่ากับ 10,867 ตามหน้าตัดขวางที่ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนความยาว

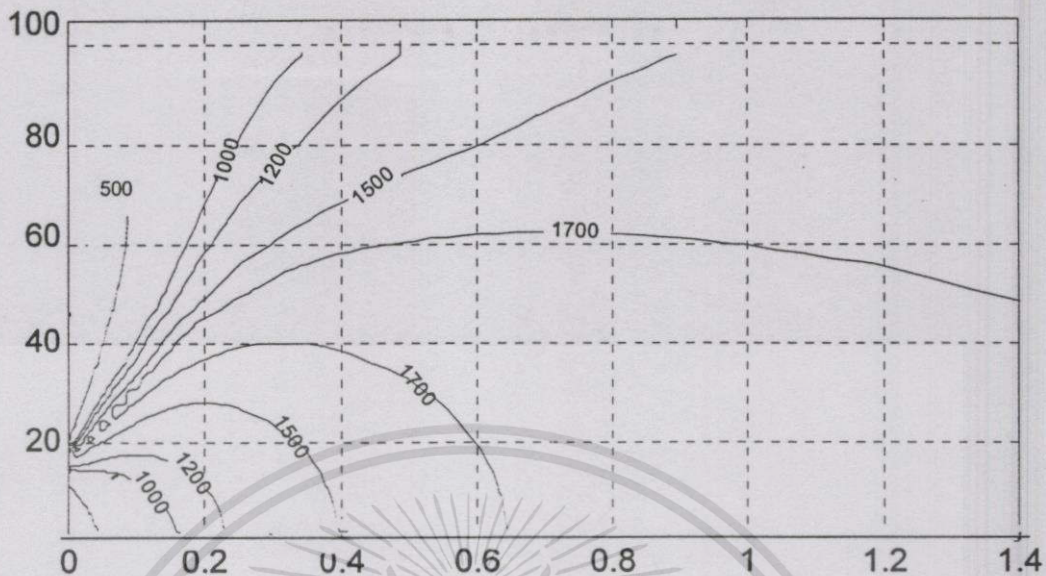


รูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบค่า f ระหว่างการทำนายและการทดลองที่สภาวะ Re เท่ากับ 16,300 ตามหน้าตัดขวางที่ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนความยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปว่ากรณีใดที่ขึ้น ลึกทั้งห้ามีให้ดัดแปลงเพื่อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

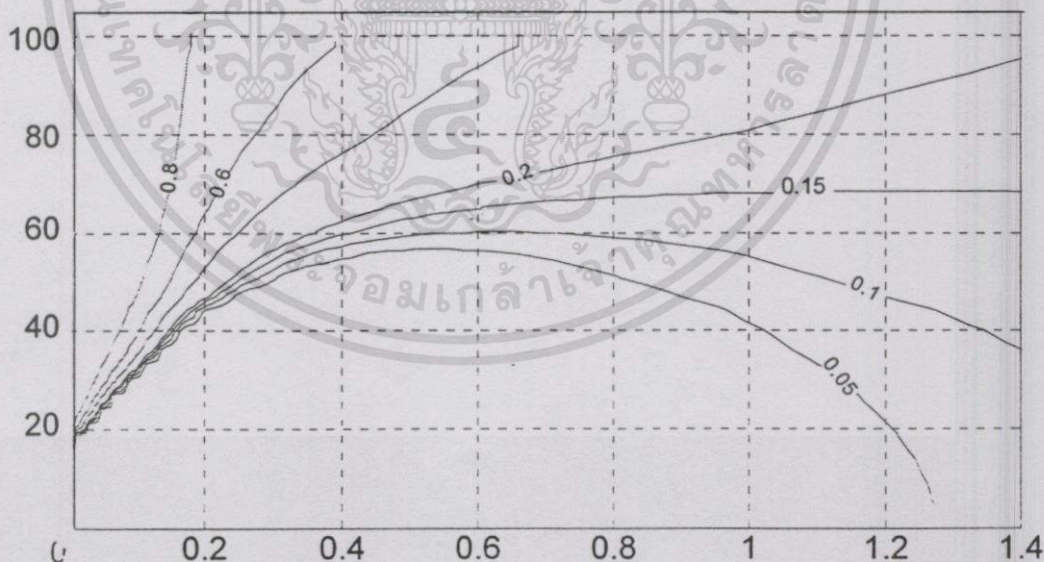
ระยะห่างจากหัวเสาตามแนวแกนรัศมี (มิลลิเมตร)



ระยะห่างจากหัวเสาตามแนวแกนความยาว (เมตร)

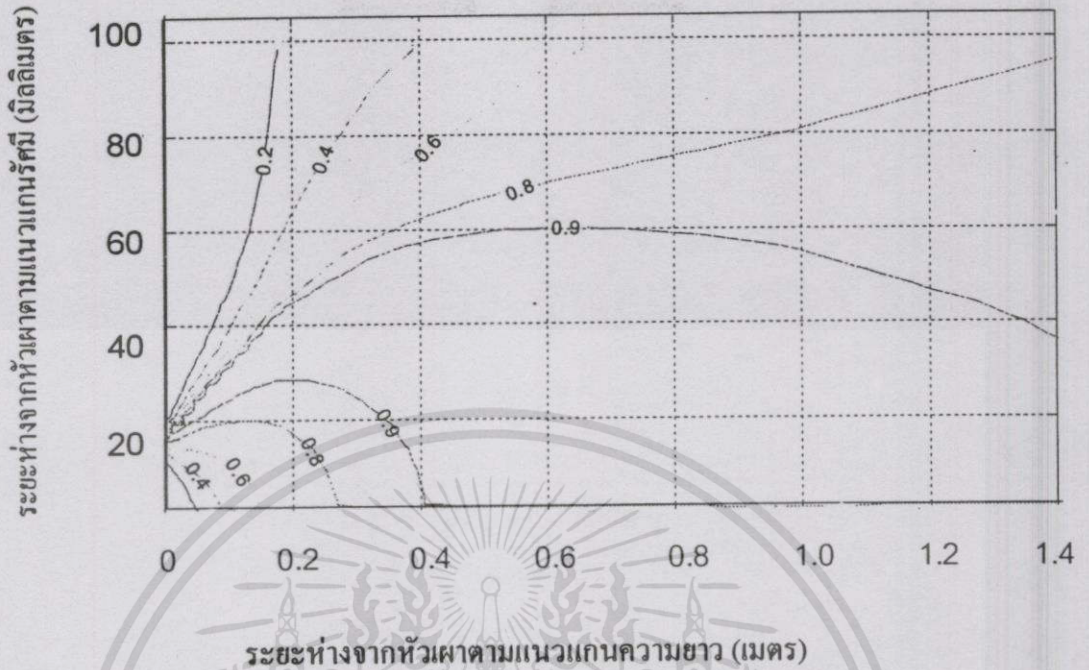
รูปที่ 5.6 การกระจายตัวของอุณหภูมิจากผลการทำนายที่ Re เท่ากับ 16,300 (K)

ระยะห่างจากหัวเสาตามแนวแกนรัศมี (มิลลิเมตร)

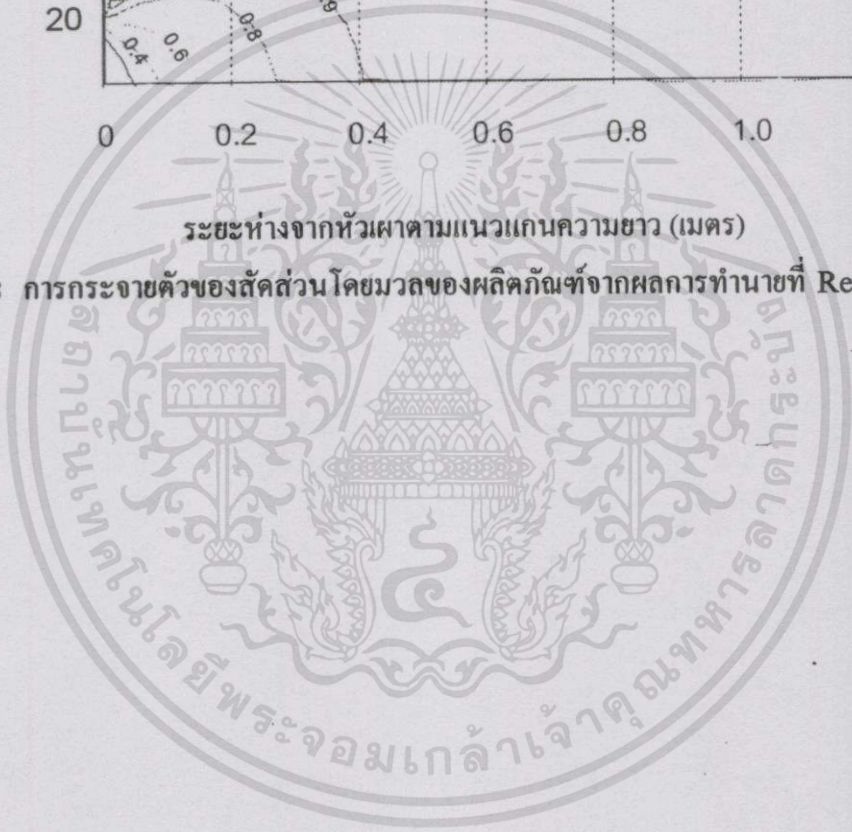


ระยะห่างจากหัวเสาตามแนวแกนความยาว (เมตร)

รูปที่ 5.7 การกระจายตัวของสัดส่วนโดยมวลของอากาศจากผลการทำนายที่ Re เท่ากับ 16,300



รูปที่ 5.8 การกระจายตัวของสัดส่วนโดยมวลของผลิตภัณฑ์จากผลการทำนายที่ Re เท่ากับ 16,300

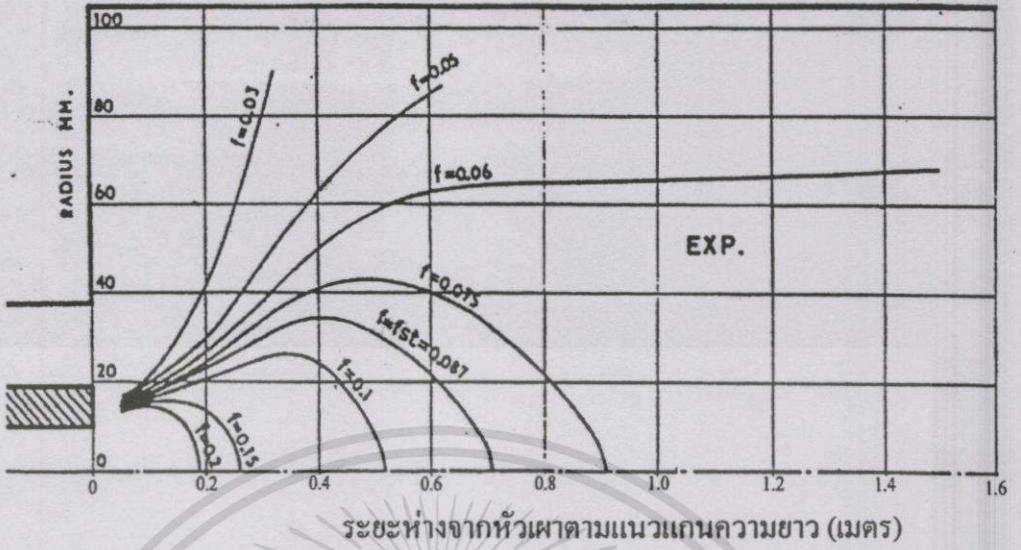


5.3.2 ผลของค่าสัดส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิงและอากาศที่สภาวะทางเข้า เราได้กำหนดสภาวะเงื่อนไขตามตารางที่ 5.1 Case “B” โดยได้พิจารณาที่ค่า F/A เท่ากับ 0.0635 และ 0.0786 ภายใต้อุณหภูมิ Re มีค่าเท่ากับ 16,300 และ ไม่มีการหมุนของอากาศ

รูปที่ 5.9 แสดงผลการทดลองที่ค่า F/A เท่ากับ 0.0635 โดยได้แสดงให้เห็นเส้นกราฟที่ค่า f เท่ากับ 0.2, 0.15, 0.10, 0.087, 0.075, 0.06, 0.05 และ 0.03 ส่วนรูปที่ 5.10 แสดงผลการทดลองที่ค่า F/A เท่ากับ 0.0786 โดยแสดงเส้นกราฟที่ f เท่ากับ 0.2, 0.15, 0.10, 0.087, 0.075 และ 0.03 พิจารณาระยะตามแนวแกนความยาวและแนวรัศมีที่พิกัด $x = 0.2$ และ $y = 0.02$ ตามลำดับ เราพบว่าค่า f วัดได้เท่ากับประมาณ 0.1 และ 0.12 ตามลำดับ ซึ่งที่ตำแหน่งดังกล่าวพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า F/A ทำให้เกิดผลกระทบต่อค่า f จากรูปทั้งสองจะพบว่าในแต่ละตำแหน่งภายในเตาเผา ค่า f ที่สภาวะ F/A เท่ากับ 0.0786 จะสูงกว่าที่สภาวะ 0.0635 นั่นคือ การเพิ่มขึ้นของ F/A จะมีปริมาณของเชื้อเพลิงที่เหลืออยู่ในสารผลิตภัณฑ์ในจำนวนที่สูง ทั้งนี้เป็นเพราะว่าปริมาณมวลของเชื้อเพลิงที่มากกว่าเมื่อเทียบกับหนึ่งหน่วยมวลของอากาศ

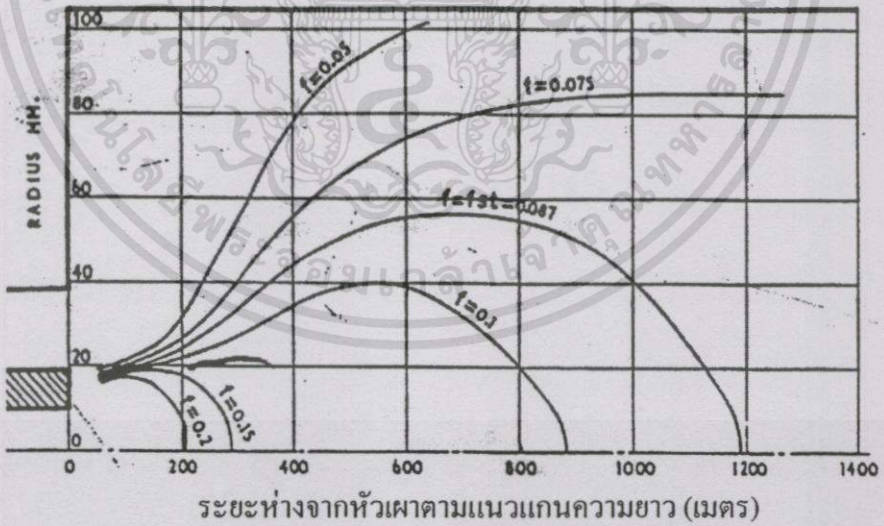
รูปที่ 5.11 และ 5.12 แสดงผลการทำนายค่ากระจายตัวของค่า f ที่สภาวะ F/A เท่ากับ 0.0635 และ 0.0786 ตามลำดับ จากรูปทั้ง 2 จะพบว่าบริเวณระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนความยาวและแนวแกนรัศมีไม่เกิน 0.60 และ 0.06 เมตร ตามลำดับ จะมีค่า f ที่แต่ละตำแหน่งสูงกว่าผลการทดลองหรืออาจกล่าวได้ว่าการกระจายตัวของ f จากแบบจำลองต่ำกว่าการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของการเผาไหม้มีค่าสูงกว่าปกติภายใต้สมมุติฐานที่ไม่เกิดผลของการถ่ายเทความร้อนที่ผิวผนัง ผลดังกล่าวได้ทำให้ความหนาแน่นของก๊าซมีค่าลดลง ซึ่งทำให้ค่า Turbulent Viscosity ลดลงตามสมการที่ 3.17 และมีผลทำให้เทอมของการแพร่ต่ำกว่าผลการทดลอง จากการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 5.1 Case “B” ได้ทำให้บริเวณที่เหลือมีผลลัพธ์ที่ดีขึ้น ส่วนรูปที่ 5.13 และ 5.14 แสดงผลการเปรียบเทียบกระจายตัวของค่า f จากการทำนายและการทดลองตามตามหน้าตัดขวางที่ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนความยาวเท่ากับ 0.05, 0.250, 0.530 เมตรที่สภาวะ F/A กับ 0.0635 และ 0.0786 ตามลำดับ จะพบว่าผลการทำนายที่ได้ที่ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนความยาวเท่ากับ 0.05 และ 0.25 เมตรยังมีค่าสูงกว่าผลการทดลอง ความความคลื่อนดังกล่าวจะลดลงเมื่อระยะห่างเท่ากับ 0.37 เมตร ส่วนรูปที่ 5.15 แสดงผลการเปรียบเทียบกระจายตัวของค่า f จากการทำนายและการทดลองตามแนวแกนกลางความยาวที่สภาวะ F/A กับ 0.0635 ซึ่งจะสอดคล้องกับรูปที่ 5.13 พบว่าช่วงระยะระยะห่างจากหัวเผาดั้งแต่ 0.10 จนถึง 0.6 เมตรผลทำนายที่ได้สูงกว่าผลการทดลองและจะเริ่มใกล้เคียงมากขึ้นเมื่อห่างจากบริเวณดังกล่าว คุณสมบัติของการเผาไหม้ที่ได้จากการทำนายแสดงไว้ในรูปที่ 5.16

ระยะห่างจากหัวเสาตามแนวแกนรัศมี (มิลลิเมตร)

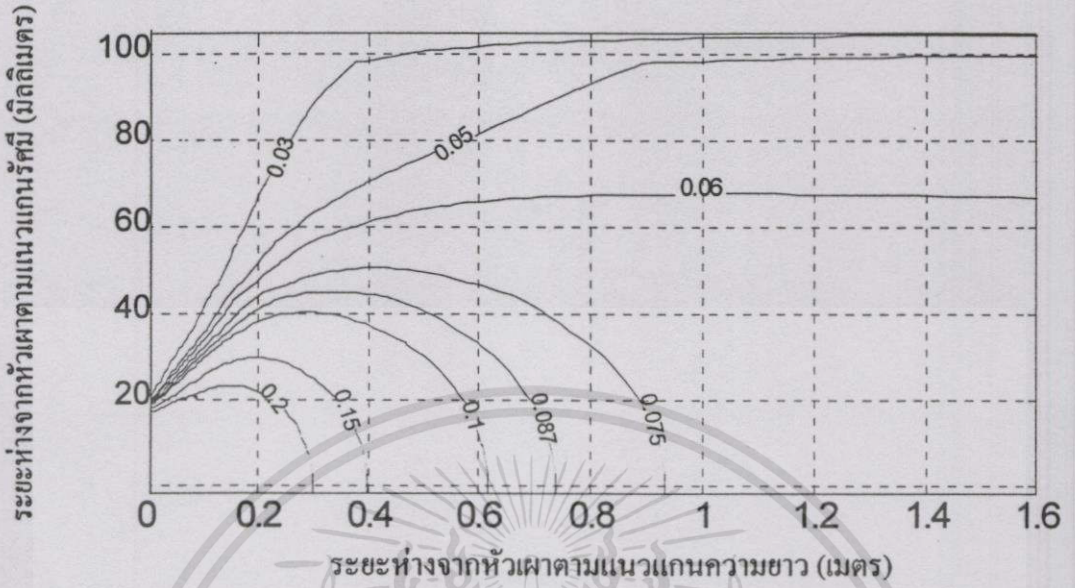


รูปที่ 5.9 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทดลองที่ F/A เท่ากับ 0.0635 [18]

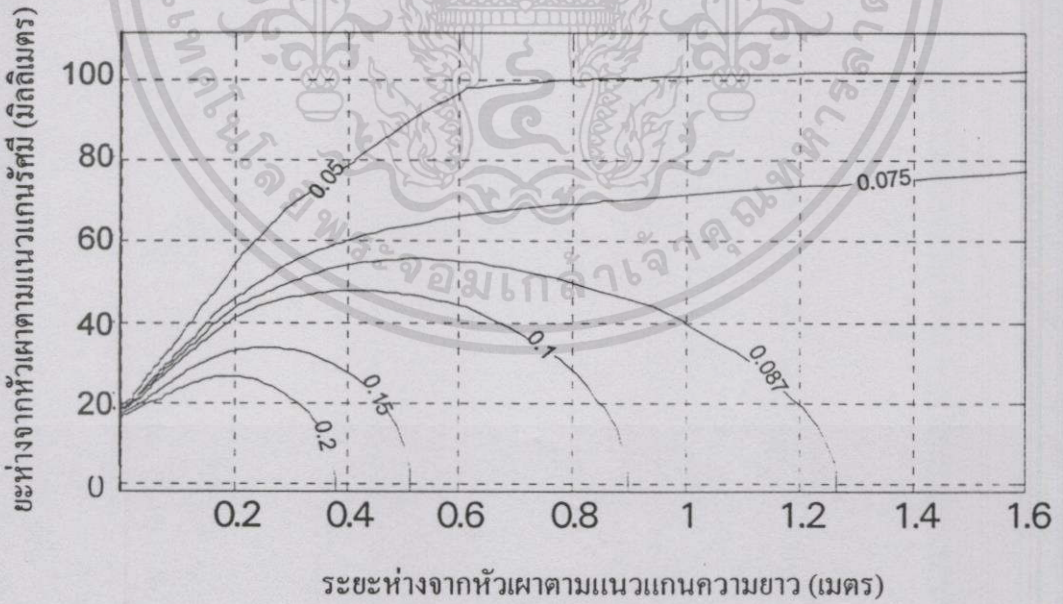
ระยะห่างจากหัวเสาตามแนวแกนรัศมี (มิลลิเมตร)



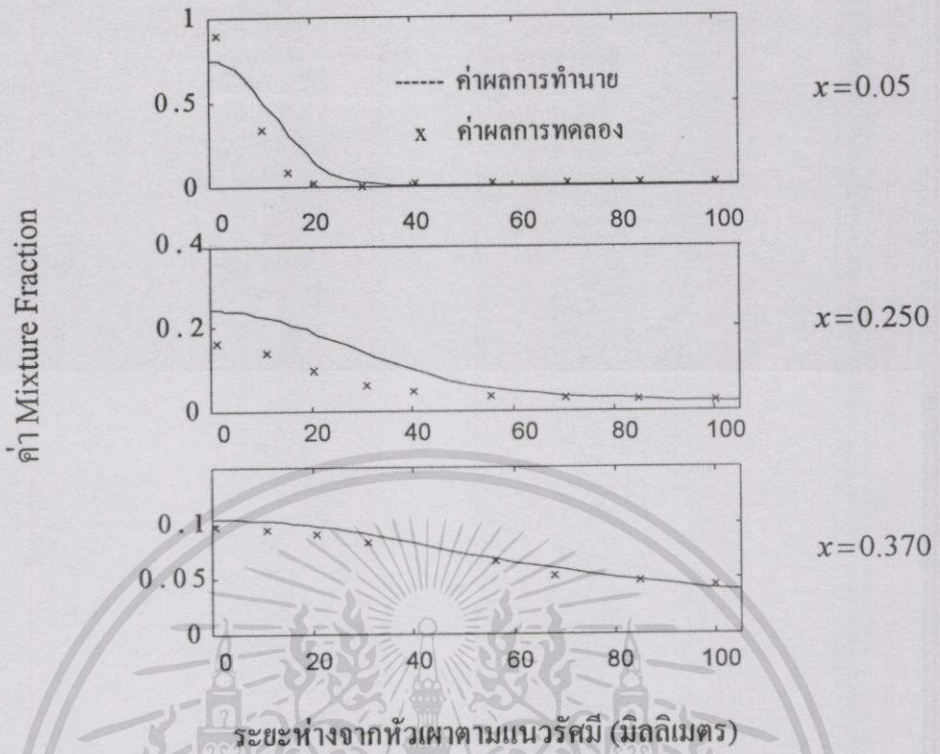
รูปที่ 5.10 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทดลองที่ F/A เท่ากับ 0.0786 [18]



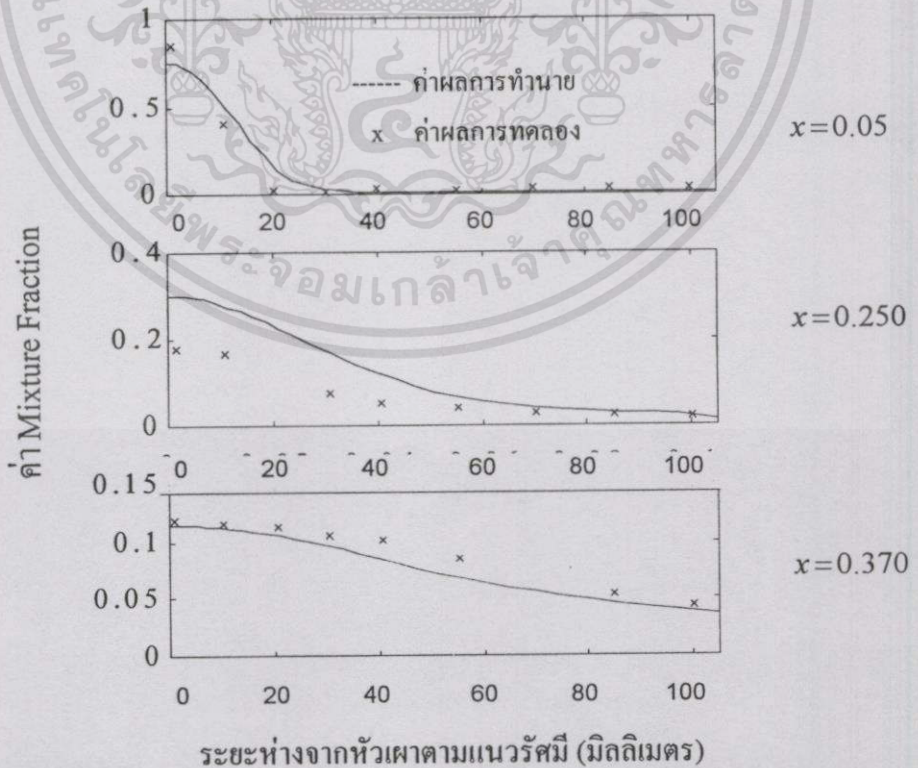
รูปที่ 5.11 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทำนายที่ F/A เท่ากับ 0.0635



รูปที่ 5.12 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทำนายที่ F/A เท่ากับ 0.0786



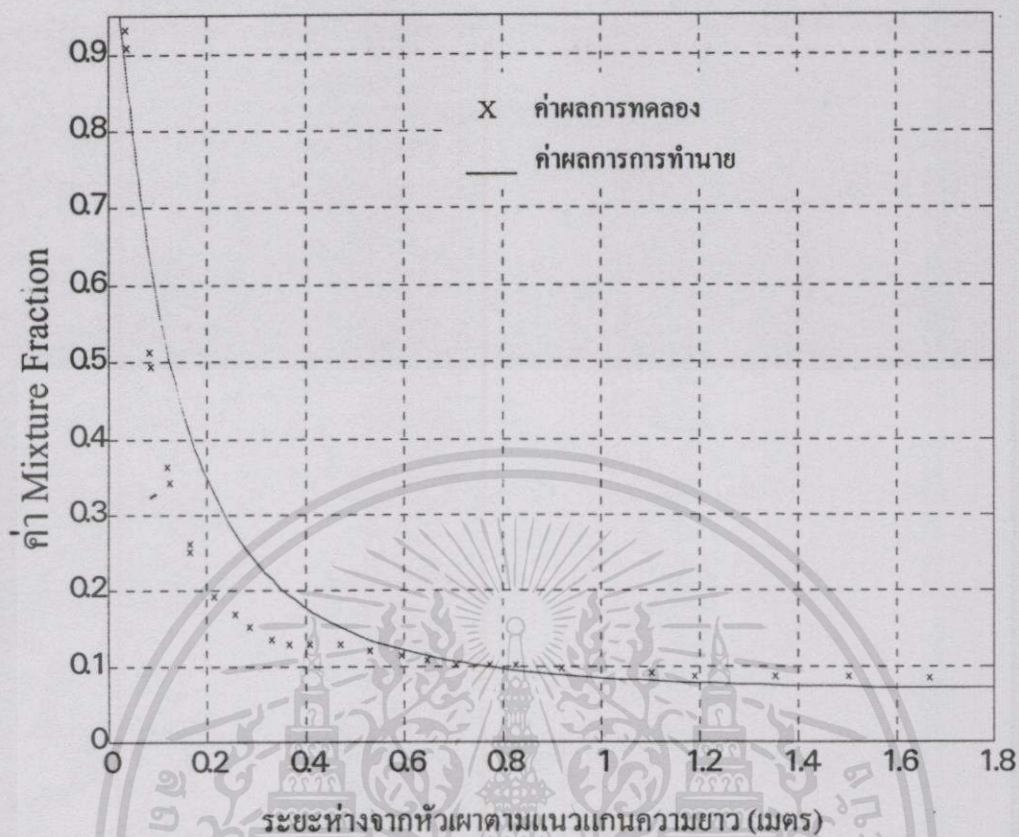
รูปที่ 5.13 การเปรียบเทียบค่า f ระหว่างการทำนายและการทดลอง ที่สภาวะค่า F/A เท่ากับ 0.0635 ตามหน้าตัดขวางที่ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนความยาว



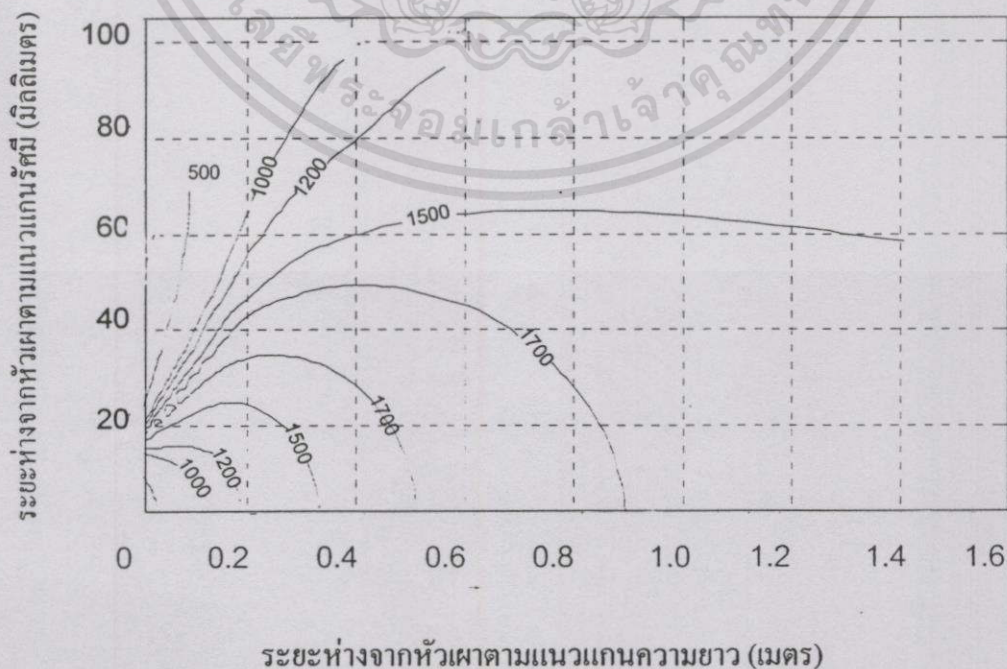
รูปที่ 5.14 การเปรียบเทียบค่า f ระหว่างการทำนายและการทดลอง ที่สภาวะค่า F/A เท่ากับ 0.0786

เอกสารนี้เป็นเอกสารตามหน้าตัดขวางที่ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนความยาว นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 การเปรียบเทียบค่า f ตามแนวแกนกลางความยาวระหว่างการทำนายและการทดลองที่สภาวะค่า F/A เท่ากับ 0.0635

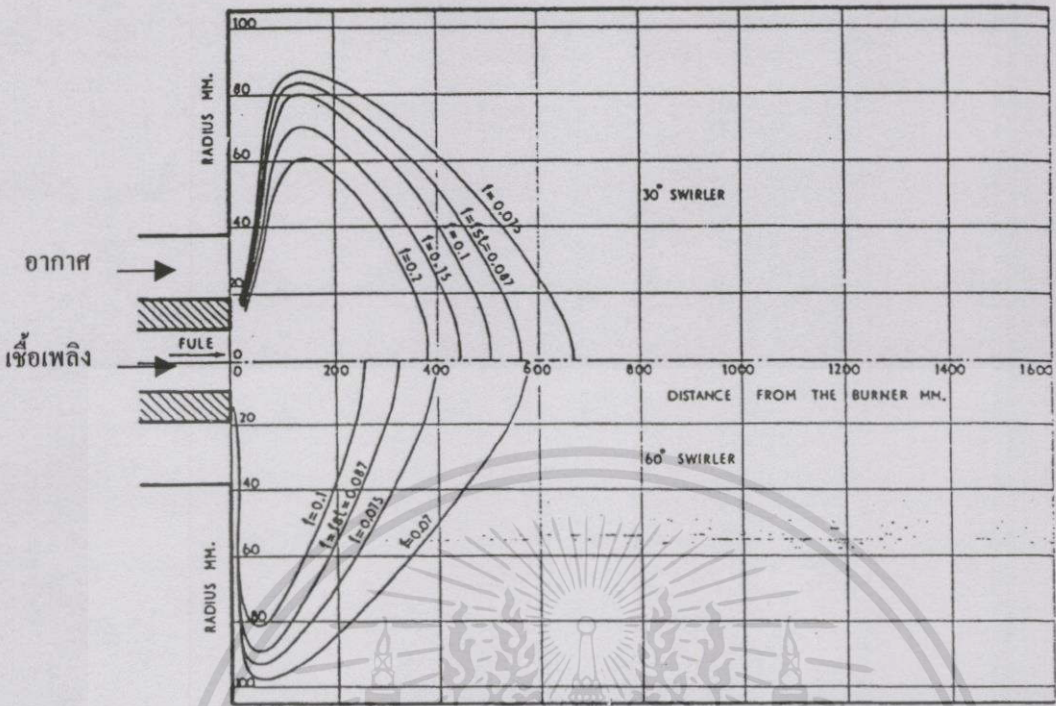


เอกสารรูปที่ 5.16 การกระจายตัวของอุณหภูมิจากผลการทำนายที่ F/A เท่ากับ 0.0635 (K) ระโยชน์ด้านการค้า

ไปว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเป็นให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 ผลของการหมุนของอากาศที่สภาวะทางเข้า การไหลของอากาศที่ทางเข้าสามารถกำหนดให้เกิดการหมุนได้เพื่อให้อากาศเกิดการพุ่งกระจายตัวออกไปและผสมกับเชื้อเพลิงได้ดีขึ้น ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าจะประกอบด้วยความเร็วตามแนวแกนความยาวและแกนมุมโพลาร์ การหาความเร็วตามแนวแกนมุมโพลาร์ให้ตรงกับสภาวะการทดลองจริงไม่สามารถทำได้อย่างสมบูรณ์ เราอาจใช้สมการคณิตศาสตร์อย่างง่ายหาค่าดังกล่าวได้ซึ่งวิธีการดังกล่าวได้ถูกอธิบายไว้ในภาคผนวก ง เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองได้ถูกแสดงไว้ในตาราง 5.1 Case “C” โดยพิจารณาที่มุมการหมุนของอากาศที่ทางเข้าเท่ากับ 30° และ 60°

รูปที่ 5.17 แสดงผลการทดลองของการกระจายตัวของค่า f ที่มุมการหมุน 30° และ 60° โดยได้แสดงให้เห็นเส้นกราฟของค่า f ที่ 0.2, 0.15, 0.1, 0.087, 0.075 ตามลำดับ จะพบว่าที่มุมการหมุนของอากาศเท่ากับ 60° จะมีพฤติกรรมกระจายตัวกระจายตัวของค่า f ตามแนวแกนความยาวลดลงแต่ตามแนวรัศมีจะมีค่าที่มากกว่าขึ้นเมื่อเทียบกับมุมที่ 30° เราสามารถอธิบายได้ว่าการที่มุมการหมุนของอากาศที่ทางเข้าเพิ่มขึ้นได้ทำให้ปริมาณของอากาศตามแนวแกนความยาวลดลงแต่ตามแนวรัศมีเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ตามแนวรัศมีมีมากกว่าตามแนวความยาว จากเหตุผลดังกล่าวได้ทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้ในแนวรัศมีสูงกว่าอุณหภูมิในแนวแกนความยาว จึงทำให้ความหนาแน่นของก๊าซที่บริเวณดังกล่าวมีค่าต่ำและปริมาตรของก๊าซได้ขยายตัวไปในแนวรัศมีอย่างรวดเร็วกว่าในแนวแกนความยาว ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการลดลงของค่า f ตามแนวแกนความยาวเป็นผลมาจากมุมการหมุนของอากาศที่เพิ่มขึ้น รูปที่ 5.18 และ 5.19 แสดงผลการทำนายที่ได้จากมุมการหมุนเท่ากับ 30° และ 60° ตามลำดับ จะพบว่าหากพิจารณาเฉพาะลักษณะของกราฟที่ได้จะสอดคล้องกับเหตุผลของการเพิ่มมุมการหมุนของอากาศซึ่งทำให้การกระจายตัวของค่า f ตามแนวแกนความยาวลดลง แต่ถ้าพิจารณาถึงความแม่นยำของแบบจำลองจะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้คือ สมการ $k-\epsilon$ (สมการที่ 3.14 และ 3.16) ซึ่งมีสมมุติฐานแบบ Isotropic จะมีข้อจำกัดเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับกรณีที่มีการหมุนของอากาศซึ่งเป็นแบบ Anisotropic รูปที่ 5.18 พบว่าในแนวแกนความยาวมีการกระจายตัวที่สูงกว่าแต่ในแนวรัศมีมีผลที่ตรงข้ามกัน เราสามารถอธิบายได้ว่าเทอมของการพาและการแพร่ของแบบจำลองยังมีความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับผลการทดลอง การกระจายค่า f ที่มุมการหมุนเท่ากับ 30° ตามหน้าตัดแสดงดังรูปที่ 5.20 ส่วนรูปที่ 5.19 การกระจายตามแนวแกนรัศมีจะมีเหตุผลเดียวกับรูปที่ 5.18 แต่การกระจายตัวตามแนวแกนความยาวใกล้เคียงกับการทดลอง สำหรับอุณหภูมิของการเผาไหม้แสดงไว้ในรูปที่ 5.20

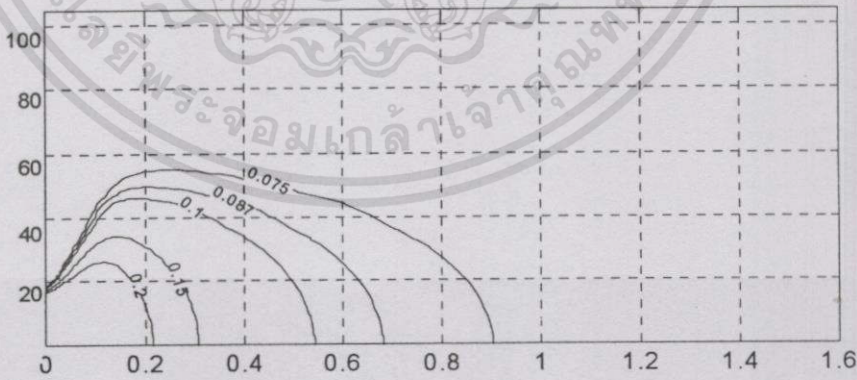


ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนรัศมี (มิลลิเมตร)

ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนความยาว (เมตร)

รูปที่ 5.17 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทดลองที่มุมการหมุนเท่ากับ 30° และ 60° [18]

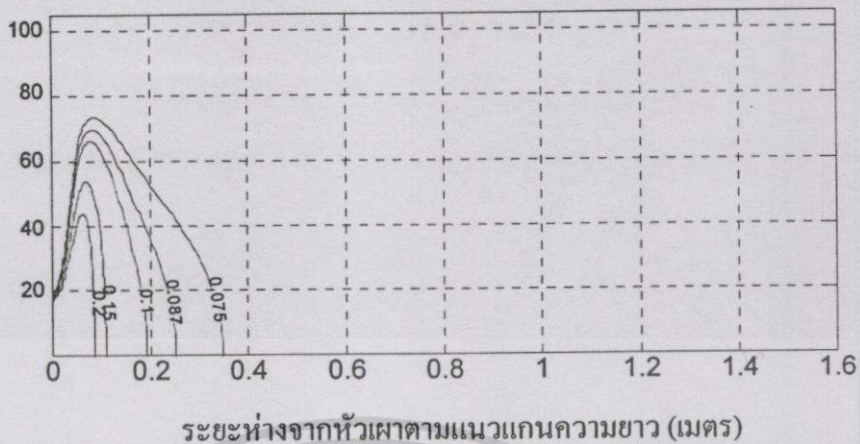
ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนรัศมี (มิลลิเมตร)



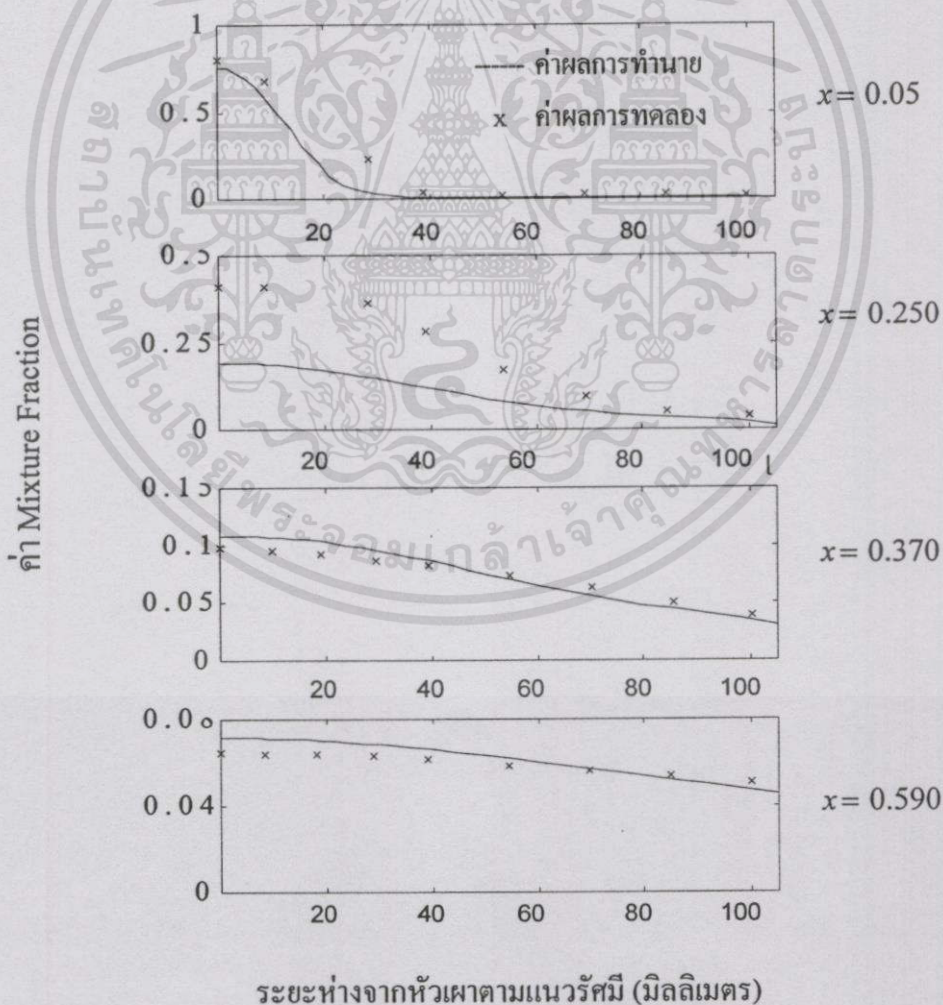
ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนความยาว (เมตร)

รูปที่ 5.18 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทำนายที่มุมการหมุนเท่ากับ 30°

ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนรัศมี (มิลลิเมตร)

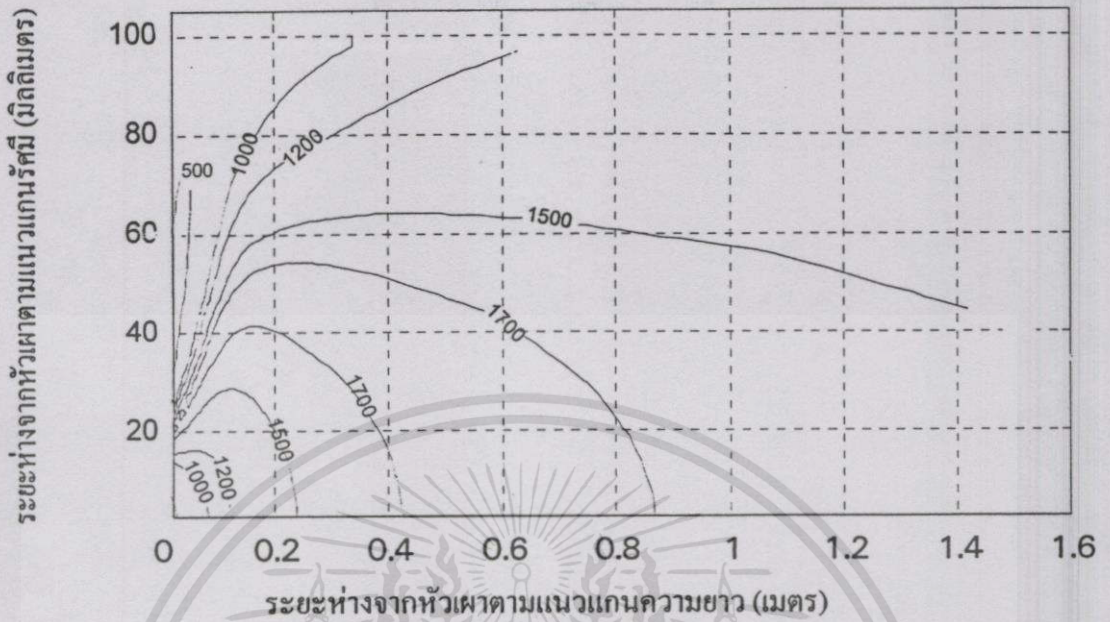


รูปที่ 5.19 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทำนายที่มุมการหมุนเท่ากับ 60°



รูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบค่า f ระหว่างการทำนายและการทดลองที่มุมการหมุนเท่ากับ 30° ตามหน้าตัดขวางที่ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนความยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไปว่ากรณียุติหนังสือพิมพ์ฉบับนี้ให้ขาดไปเลย และต้องอ้างถึงถึงว่าของเอกสารทศครั้งที่มีกรณียุติ

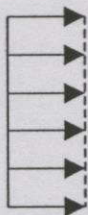


รูปที่ 5.21 การกระจายตัวของอุณหภูมิจากผลการทำนายที่มุมการหมุนเท่ากับ 30° (K)

5.3.4 ผลของการกระจายความเร็วที่ทางเข้า การกำหนดลักษณะความเร็วที่สภาวะทางเข้า จะอยู่ในรูปของการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ(Uniform Profile) และไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform Profiles) ซึ่งในกรณีที่การกระจายตัวแบบไม่สม่ำเสมอหาจากการไหลภายในท่อที่ถูกพิจารณาเป็นแบบพัฒนาตัวอย่างสมบูรณ์ (Fully-Developed) โดยได้คำนวณจากแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนต้นแบบและได้แสดงไว้ดังในรูปที่ 5.22 เงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์มี 2 กรณีคือ กรณีที่มีการหมุนของอากาศและไม่มีการหมุนของอากาศ ค่าสภาวะต่างๆที่ใช้แสดงไว้ตารางที่ 5.1 Case “D”

รูปที่ 5.23 แสดงผลการทดลองโดยวัดการกระจายตัวของค่า f ในกรณีที่ไม่มี การหมุนของอากาศที่สภาวะ Re เท่ากับ 16,300 และ F/A เท่ากับ 0.0635 โดยแสดงเส้นกราฟที่ค่า f เท่ากับ 0.2, 0.15, 0.1, 0.087, 0.075, 0.06, 0.05 และ 0.03 ส่วนรูปที่ 5.24 และ 5.25 แสดงผลการทำนายในเงื่อนไขที่การกระจายความเร็วแบบไม่สม่ำเสมอและแบบสม่ำเสมอที่สภาวะเดียวกันตามลำดับ จะพบว่า การกระจายความเร็วที่ทางเข้าแบบไม่สม่ำเสมอซึ่งเป็นพฤติกรรมของความเร็วที่เกิดขึ้นจริงจะมีผล ทำให้การกระจายตัวของค่า f ใกล้เคียงกับผลการทดลองและจะเริ่มเกิดสภาวะคงตัวได้เร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่การกระจายความเร็วแบบสม่ำเสมอ

รูปที่ 5.26 แสดงผลการทดลองในกรณีที่มีการไหลของอากาศที่ทำมุม 45° โดยได้กำหนดให้ค่า Re เท่ากับ 20,460 และ F/A เท่ากับ 0.0632 สำหรับผลการทำนายที่มีเงื่อนไขการกระจายความเร็วแบบไม่สม่ำเสมอและแบบสม่ำเสมอจะแสดงไว้ในรูปที่ 5.27 และ 5.28 ตามลำดับ จากการพิจารณาการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นโดยวิเคราะห์การกระจายตัวของค่า f จะพบว่า การหมุนของอากาศ จะเกิดผลกระทบต่อความแม่นยำของแบบจำลองเนื่องจากเหตุผลที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.3.3 นั่นคือ การกระจายความเร็วที่ทางเข้าทั้งสองแบบไม่สามารถประยุกต์ใช้กับการทำนายการเผาไหม้ที่มีการหมุนของอากาศได้ ส่วนรูปที่ 5.29 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการทำนายกับผลการทดลองของค่า f ที่สภาวะมุมการหมุนของอากาศเท่ากับ 45° ตามหน้าตัดขวางที่ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนความยาวเท่ากับ 0.05, 0.25 และ 0.37 เมตร อุณหภูมิของการเผาไหม้แสดงดังในรูปที่ 5.30

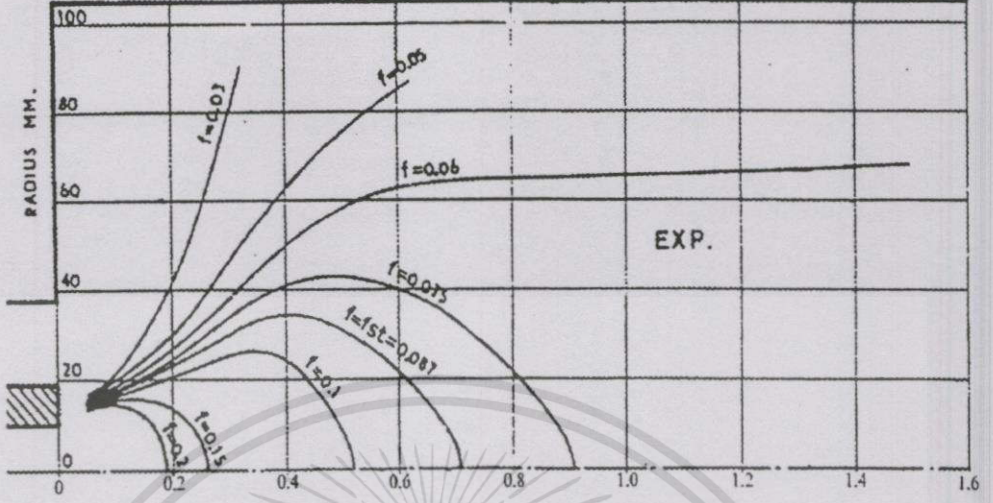


(ก) แบบสม่ำเสมอ



(ข) แบบไม่สม่ำเสมอ

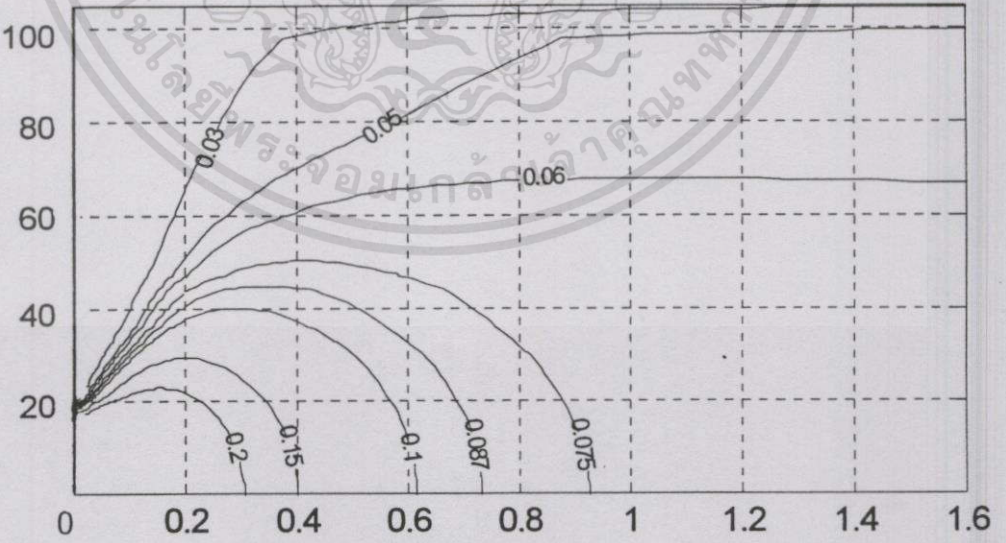
ระยะห่างจากหัวเสาตามแนวแกนรัศมี (มิลลิเมตร)



ระยะห่างจากหัวเสาตามแนวแกนความยาว (เมตร)

รูปที่ 5.23 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทดลองที่สภาวะ Re เท่ากับ 16,300 และ F/A เท่ากับ 0.0635 และไม่มีลมหมุนของอากาศ [18]

ระยะห่างจากหัวเสาตามแนวแกนรัศมี (มิลลิเมตร)

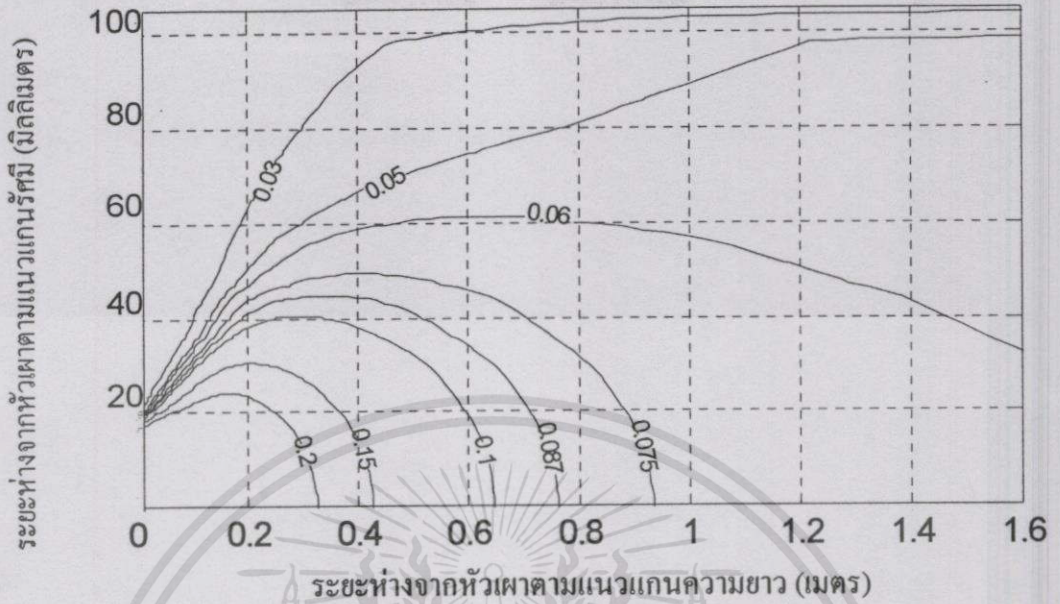


ระยะห่างจากหัวเสาตามแนวแกนความยาว (เมตร)

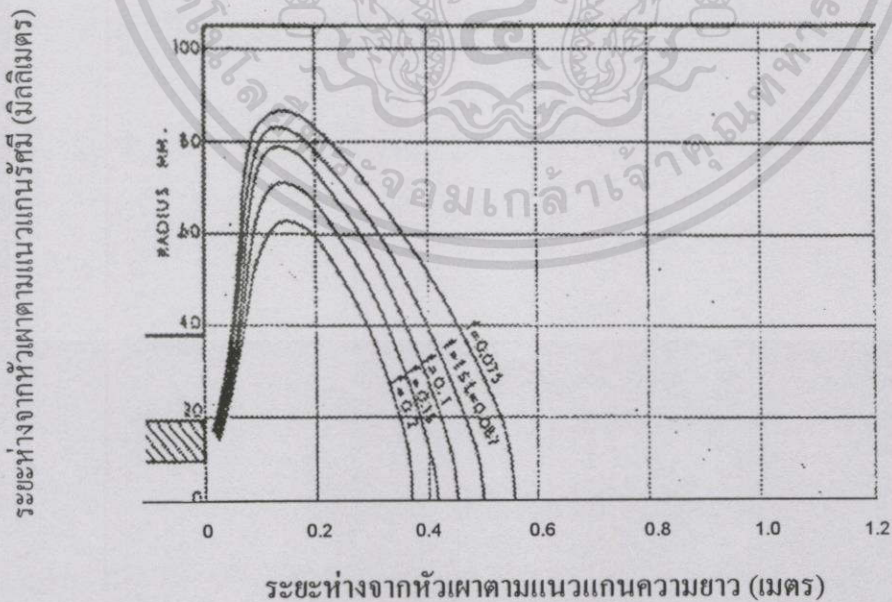
รูปที่ 5.24 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทำนายที่สภาวะไม่มีลมหมุนของอากาศ และการกระจายความเร็วที่ทางเข้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามเวลาสำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ถือทั้งห้าฉบับให้ตัดแปลงเนื้อหา และตัดสิ่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.25 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทำนายที่สภาวะไม่มีการหมุนของอากาศและการกระจายความเร็วที่ทางเข้าเป็นแบบสม่ำเสมอ



รูปที่ 5.26 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทดลองที่สภาวะ Re เท่ากับ 20,460 และ F/A เท่ากับ 0.0623 และมีการหมุนของอากาศที่มุมเท่ากับ 45° [18]

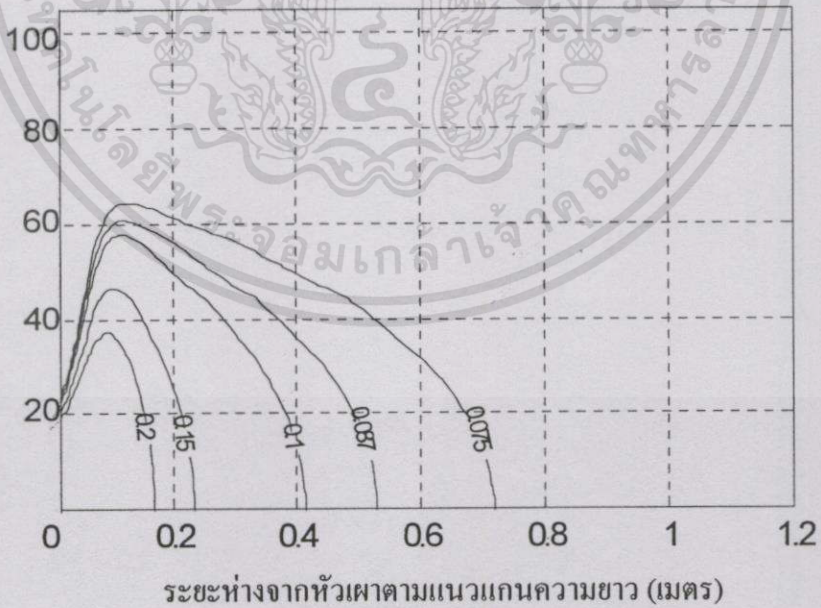
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปเผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนรัศมี (มิลลิเมตร)

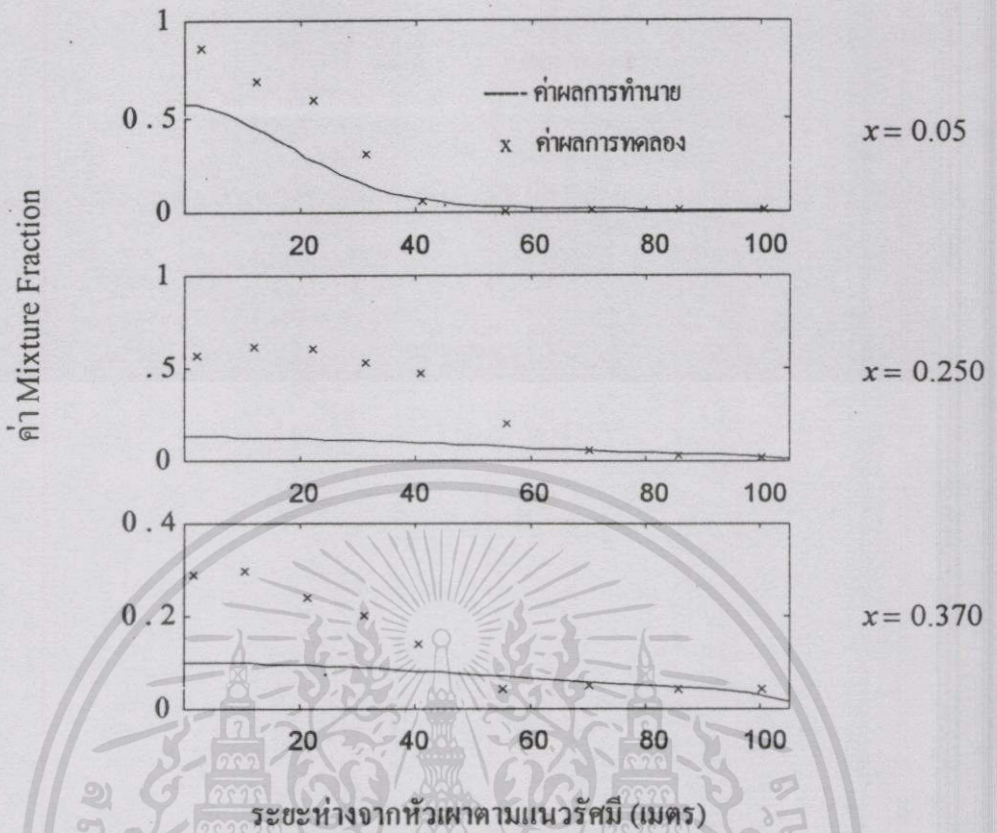


รูปที่ 5.27 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทำนายที่สภาวะการหมุนของอากาศที่มุมเท่ากับ 45° และการกระจายความเร็วที่ทางเข้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ

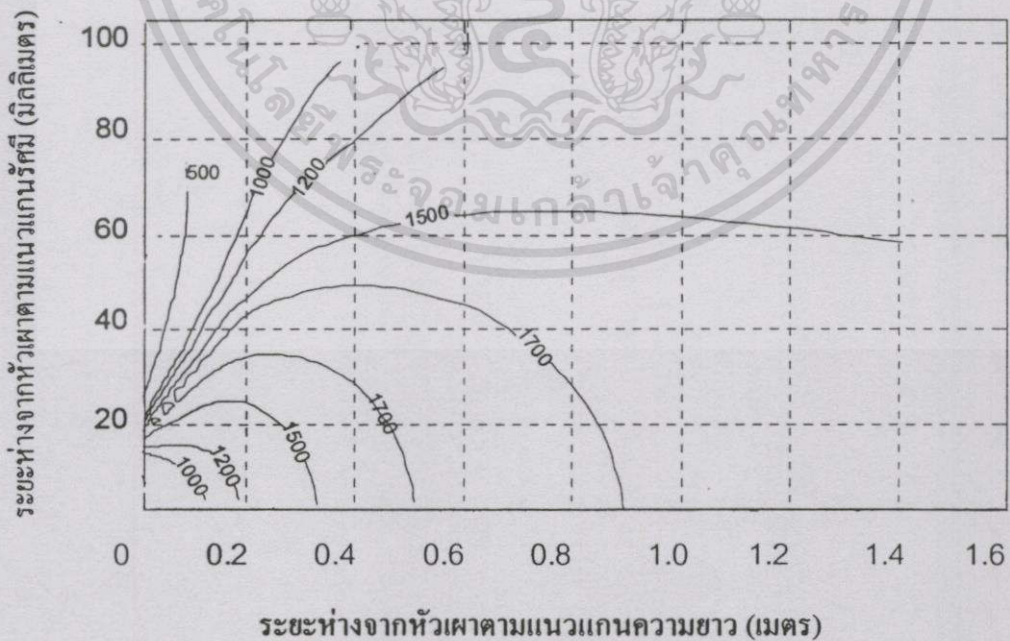
ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนรัศมี (มิลลิเมตร)



รูปที่ 5.28 การกระจายตัวของค่า f จากผลการทำนายที่สภาวะการหมุนของอากาศที่มุมเท่ากับ 45° และการกระจายความเร็วที่ทางเข้าเป็นแบบสม่ำเสมอ



รูปที่ 5.29 การเปรียบเทียบค่า f ระหว่างการทำนายและการทดลองที่มุมการหมุนเท่ากับ 45° ตามหน้าตัดขวางที่ระยะห่างจากหัวเผาตามแนวแกนความยาว



รูปที่ 5.30 การกระจายตัวของอุณหภูมิจากผลการทำนายในกรณีที่มีการกระจายความเร็วแบบไม่สม่ำเสมอและไม่มี การหมุนของอากาศ ที่ F/A เท่ากับ 0.0635 (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไปว่ากรณิดองทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปลงนิตยสาร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลงานวิจัย

แบบจำลองการเผาไหม้ด้วยทฤษฎี Mixture Fraction ได้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้เป็นวิธีการหนึ่งในการจำลองการเผาไหม้โดยได้นำเทคนิคการคำนวณเชิงตัวเลขที่เรียกว่า ปริมาตรสี่เหลี่ยม มาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนคั่นแบบที่ได้รับการพัฒนาแล้วที่ใช้วิธีสมการ $k-\epsilon$ เราได้ตรวจเช็คความถูกต้องของแบบจำลองคั่นแบบตามภาคผนวก.ก เพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่มีความผิดพลาดจากแบบจำลองการไหลคั่นแบบ เราได้ใช้ความสัมพันธ์ของค่า Mixture Fraction, f เพื่อหาค่าสัดส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์ ซึ่งนำไปสู่การหาค่าอุณหภูมิและความหนาแน่นของก๊าซผสมที่เกิดขึ้นในขบวนการเผาไหม้ สมการการเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลาร์ (Scalar Transport Equation) ได้ถูกนำมาใช้ในการหาค่าการกระจายตัวของ Mixture Fraction และในขั้นตอนนี้ได้ลดสมการการเคลื่อนย้ายที่ต้องใช้ในการหาค่าสัดส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์ลง ปฏิกริยาการเผาไหม้อย่างง่ายได้นำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองโดยมีสมมุติฐานที่ว่าอัตราส่วนของปฏิกิริยาเป็นไปอย่างรวดเร็วและไม่เกิดปฏิกิริยาที่ไม่เสถียร เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นก๊าซผสมที่มีมีเทนเป็นองค์ประกอบหลัก

ในการศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้โดยการใช้แบบจำลองทำโดยการวัดการกระจายตัวของ Mixture Fraction ในแต่ละตำแหน่งของเตาเผา เงื่อนไขของสภาวะทางเข้าที่ใช้ประกอบด้วย ค่า Reynolds Number ค่าสัดส่วนโดยมวลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ค่ามุมการหมุนของอากาศและค่าการกระจายความเร็ว ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะพบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่า Re เกิดผลกระทบต่อการกระจายตัวของค่า Mixture Fraction น้อยมากและพบว่าที่บริเวณใกล้หัวเผาผลการทำนายมีค่าสูงกว่าผลการทดลองแต่จะใกล้เคียงมากขึ้นเมื่อเลขบริเวณดังกล่าวไป ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิของการเผาไหม้มีค่าสูงกว่าการทดลองภายใต้สมมุติฐานที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวผนังเตา ดังนั้นความหนาแน่นของก๊าซจะลดลงและได้ลดค่า Turbulent viscosity ลง (สมการที่ 3.17) ซึ่งจะทำให้เทอมของการแพร่ต่ำลงแต่เมื่อได้ทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ (ตารางที่ 5.1) ได้ทำให้บริเวณที่ห่างจากหัวเผามีค่าที่สอดคล้องกับผลการทดลอง สำหรับการเพิ่มสัดส่วนโดยมวลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศได้ทำให้ค่า Mixture Fraction มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากผลของปริมาณของเชื้อเพลิงที่เหลือจากปฏิกิริยาการเผาไหม้และผลการทำนายที่ได้พบว่าเป็นที่น่าพอใจยกเว้นในช่วงบริเวณปากเตาที่มีค่าสูงเนื่องจากเทอมการแพร่มีค่าต่ำและเป็นเหตุผลเดียวกับกรณีของค่า Re ในกรณีการหมุนของอากาศทำให้ทราบว่าการเพิ่มมุมการหมุนได้ทำให้เกิดการลดลงของ

ค่า Mixture Fraction ตามแนวแกนความยาว แต่มีค่าเพิ่มขึ้นตามแนวรัศมีและพบว่าผลการทำนายที่ได้ยังมีขีดจำกัดอยู่เนื่องจากแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้คือ สมการ $k-\epsilon$ (สมการที่ 3.14 และ 3.16) มีสมมติฐานแบบ Isotropic แต่การหมุนของอากาศเป็นแบบ Anisotropic ส่วนการกระจายความเร็วแบบไม่สม่ำเสมอซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศที่ทางเข้าได้ให้ผลการทำนายที่ต่ำกว่าการกระจายความเร็วแบบสม่ำเสมอยกเว้นในกรณีที่มีการหมุนของอากาศที่แบบจำลองยังมีขีดจำกัดอยู่

จากการวิเคราะห์ผลทั้งหมดหลังจากที่ได้ทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแบบจำลองแล้วทำให้สรุปได้ว่า แบบจำลองการเผาไหม้ด้วยทฤษฎี Mixture Fraction สามารถใช้ทำนายการเผาไหม้ที่ไม่มีการหมุนของอากาศโดยผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจยกเว้นในช่วงบริเวณใกล้หัวเผาที่ยังมีค่า Mixture Fraction สูงอยู่บ้างแต่ยังมีข้อจำกัดเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับกรณีที่มีการหมุนของอากาศ

6.2 ข้อเสนอแนะ

แบบจำลองการเผาไหม้ด้วยทฤษฎี Mixture Fraction นี้ได้พัฒนามาภายใต้สมมติฐานต่างๆตามที่ได้กล่าวไว้ในบทนำ แบบจำลองนี้ยังมีข้อจำกัดบางอย่างและข้อจำกัดเหล่านี้ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการกำหนดขอบเขตของปัญหาที่จะทำการวิเคราะห์ ซึ่งมีดังนี้

- 1.เตาเผาที่นำมาวิเคราะห์ต้องเป็นทรงกระบอกต้องมีความสมมาตรตามแนวแกนทุกๆหน้าตัดของห้องเผาไหม้
- 2.แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้มีข้อจำกัดกับการไหลที่มีการหมุนซึ่งมีผลต่อการเผาไหม้ที่ต้องมีการหมุนของอากาศ
- 3.จำกัดเฉพาะการเผาไหม้ที่เป็นแบบ Gas phase
- 4.ไม่เหมาะกับการเผาไหม้แบบ Premixed เนื่องจากไม่สามารถใช้สมมติฐานของ Fast Kinetics Reaction ได้
- 5.ขนาดของเตาต้องเล็กพอจนไม่เกิดผลของการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีของก๊าซ (Radiation loss)
- 6.ไม่สามารถหาปริมาณของสารต่างๆในการเผาไหม้ได้ครบหมดเนื่องจาก Fast Kinetics assumption และ Basic Combustion
- 7.การคิดเอนทัลปีตามสัดส่วนกับค่า Mixture Fraction ทำให้ไม่สามารถคิดถ่ายเทความร้อนที่ผนังเตา
- 8.เชื้อเพลิงที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนหรือไฮโดรคาร์บอนสูงๆจะมีความผิดพลาดได้มาก

แบบจำลองการเผาไหม้ด้วยทฤษฎี Mixture Fraction นี้ยังสามารถถูกพัฒนาเพื่อให้มีความผลลัพธ์ที่ถูกต้องมากขึ้นและสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาต่างๆเพื่อให้มีการใช้งานที่หลากหลายขึ้น ข้อเสนอแนะมีดังนี้

1. พัฒนาให้ใช้กับการเผาไหม้แบบ Non-adiabatic โดยการใช้สมการการเคลื่อนย้ายปริมาณเอนทัลปีและสามารถคิดผลของ Radiation ได้
2. พัฒนาให้ใช้กับปัญหาแบบมีการหมุนของอากาศ (Swirl) โดยการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนชั้นสูง เช่น RSM, ASM [16]
3. พัฒนาให้ใช้กับการเผาไหม้แบบ Two-phase (Gas-Particle) โดยจำเป็นต้องเพิ่มเติมทฤษฎีที่เกี่ยวกับ Gas-Particle และนำมาประยุกต์ใช้กับทฤษฎี Mixture Fraction
4. สามารถเพิ่มความถูกต้องของแบบจำลองโดยการแทนความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซแต่ละชนิดกับอุณหภูมิของการเผาไหม้ด้วยวิธี Curvefit [17]
5. ควรสร้างเดาเผาจริงเพื่อนำผลการทดลองที่สภาวะเงื่อนไขที่ทางเข้าในรูปแบบต่างๆ มาเปรียบเทียบกับผลการทำนายที่ได้จากแบบจำลองและวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นเพื่อดูขอบเขตเพิ่มเติมของแบบจำลองนี้เพื่อให้แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Charoensuk J. "The Application of Mathematical Model for Scaling Pulverized Coal Combustors." Ph.D Thesis. University of London and the Diphoma of Membership of the Imperial College. 1996.
- [2] Elghobashi S.E., Pun W.M. "A Theoretical and Experimental Study of Turbulent Diffusion Flames in Cylindrical Furnaces." The Fifteenth International Symposium on Combustion., The Combustion Institute., 1975. p.1353.
- [3] Lockwood F.C., Naguib A.S. "The Prediction of the Fluctuations in the Properties of Free, Round – jet, Turbulent Diffusion Flames." Combustion and Flame., Vol.24, 1975. p.109.
- [4] Spalding D.B. "Mixing and Chemical Reaction in Steady Confined Turbulent Flames." The Thirteenth International Symposium on Combustion., The Combustion Institute., 1971. p.649.
- [5] Magnussen B.F., Hjertager B.H. "On Mathematical Modelling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion." The Sixteenth International Symposium on Combustion., The Combustion Institute., 1976. p.719.
- [6] Favre A. "Equations des Gaz Turbulence Compressibles." Journal des Mechanique., Vol.4, 1965. p.361.
- [7] Jones W.P., Launder B.E. "The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence." International Journal of Heat and Mass Transfer., Vol.15, 1972. p.301.
- [8] Sloan D.G., Smith P.G., and Smoot L.D. "Modelling of Swirl in Turbulent Flow Systems." Progress in Energy Combustion Science., Vol.12, 1986. p.163.
- [9] Brodkey R.S. **The Phenomena of Fluid Motions.** Addison-Wesley Publishing Company., Reading. MA., 1967.
- [10] Hinze J.O. **Turbulence.** London : McGraw – Hill. 1975.
- [11] Jayatilleke C.L.V. "The Influence of Prandtl Number and Surface Roughness on the Resistance of the Laminar Sub – Layer to Momentum and Heat Transfer." Progress in Heat and Mass Transfer., Vol.1, Pergamon Press, 1969.
- [12] Rizvi S.M.A. "Prediction of Flow, Combustion and Heat Transfer in Pulverized Coal Flames." Ph.D. Thesis. University of London and the Diphoma of Membership of the Imperial College. 1985.

- [13] Anson D., Tindall D. "A General Expression For the Discharge Coefficient of a Burner Register." *Journal of the Institute of Fuel.*, Vol.40, 1957. p.246.
- [14] Gibb J. "Internal Notes : Central Electrical Generating Board." NRM 85., 1973. See Rizvi, 1985.
- [15] Gibb J. "Analytic Solution to a Two - Dimensional Cartesian Geometry." Central Electrical Generating Board. 1977., See Rizvi, 1985.
- [16] Versteeg H.K., Malalaskera W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics : The Finite Volume Method.** Malaysia : John Wiley & Son Inc. 1995.
- [17] Stephen R Turns, " An Introduction To Combustion", McGraw-Hill, Inc, 1996.
- [18] F.C.Lockwood, F.M.El-Mahallawy and D.B. Spalding, "An Experimental and Theoretical Investigation of Turbulent Mixing in a Cylindrical Furnace, Combustion and Flame", Vol.23, pp.283-293, (1974)
- [19] David G. Sloan, Philip J. Smith and L. Douglas Smoot, "Modeling of Swirl in Turbulent Flow Systems, Prog Energy Combust. Sci. 1986, Vol 12, pp 163-250.
- [20] Suhas V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Taylor & Francis, 1978
- [21] Askari-Sardhai, A. Liew, S.K. and Moss, J.B.(1985). Flamelet Modelling of Propane Air Chemistry in Turbulent Non-premixed Combustion. *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 44, pp. 89-95.
- [22] Bray, K. N. C., Libby, P. A. and Moss, J.B.(1985). Unified Modelling Approach for Premixed Turbulent Combustion – Part I: General Formulation. *Combust. Flame*, Vol. 61, pp. 87-102.
- [23] Gosman, A. D., Lockwood, F. C. Solooia, A. P. (1978). The Prediction of Cylindrical Furnaces Gaseous Fuelled with Premixed and Diffusion Burners, Seventeenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.747 –760.
- [24] Liew, S. K., Bray, K. N. and Moss, J.B.(1984). A Stretched Laminar Flamelet Model of Turbulent Non-premixed Combustion, *Combust. Flame*, Vol. 55, pp. 199-213.
- [25] Lockwood, F. C. and Naguib, A. S. (1975). The Prediction of Fluctuations in the Properties of Free, Round Jet Turbulent Diffusion Flame, *Combust. Flame*, Vol. 24, pp. 109-124.
- [26] Lockwood, F. C. and Odidi, A. O. (1975). Measurement and Mean Fluctuating Temperature and Ion Concentration in the Properties of Free, Round Jet Turbulent Diffusion and Premixed Flame, Fifteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute pp. 561.

- [27] Nijoo, M., So, R. M. C. and Peck, R. E.(1988). Modelling of Jet Swirl-Stabilised Reacting Flow in Axisymmetric Combustors, *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 58, pp. 135-153.
- [28] Peters, N. (1986). Laminar Flamelet Concepts in Turbulent combustion. Twenty-first Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute pp. 1250-1321.
- [29] Spalding, D. B. (1971). Mixing and Chemical Reaction in steady Confined Turbulent Flames, Thirteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute pp. 649-657.
- [30] Flenklash, M., Wang., and Rabinowitz, M. J., "Optimization and Analysis of large Chemical Kinetic Mechanism using the Solution Mapping Method-Combustion of Methane". *Progress in Energy and Combustion Science*, 18:47-73(1992).
- [31] Magnussen, B. F. and Hjertager, B. H. (1976). On Mathematical Modelling of turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion, Sixteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute pp. 719-729.
- [32] Kee, R. J., Rupley, F. M., and Miller, J. A., "The Chemkin Thermodynamic Data Base," Sandia National Laboratories Report SAND87-8215 B, March 1991.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของเชื้อเพลิงผสม

เชื้อเพลิงผสมประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิดผสมกัน คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของก๊าซผสมจะเกิดขึ้นตามสัดส่วนของก๊าซแต่ละชนิดที่มีอยู่ในก๊าซผสม คุณสมบัติที่เราสนใจคือ น้ำหนักโมเลกุล เอนทาลปีและความหนาแน่น เราสามารถหาค่าสัดส่วนโดยโมล(Mole fraction)หรือสัดส่วนโดยมวล(Mass fraction)ได้ สำหรับสัดส่วนโดยโมลจะเป็นดังนี้

$$X_i = \frac{N_i}{N_1 + N_2 + \dots + N_i + \dots} = \frac{N_i}{N_{tot}} \quad (\text{ก.1})$$

X_i คือสัดส่วนโดยโมลของก๊าซผสม N_i คือจำนวนโมลของก๊าซแต่ละชนิดและ N_{tot} คือจำนวนโมลทั้งหมดของก๊าซ ในทำนองเดียวกันสัดส่วนโดยมวลของก๊าซผสมจะหาได้ดังนี้

$$Y_i = \frac{m_i}{m_1 + m_2 + \dots + m_i + \dots} = \frac{m_i}{m_{tot}} \quad (\text{ก.2})$$

Y_i คือสัดส่วนโดยมวลของก๊าซผสม m_i คือมวลของก๊าซแต่ละชนิดและ m_{tot} คือมวลรวมทั้งหมดของก๊าซ

จากนิยามเราจะพบว่าผลรวมทั้งหมดของสัดส่วนโดยโมลจะเท่ากับหนึ่ง นั่นคือ

$$\sum_i X_i = 1 \quad (\text{ก.3})$$

และในทำนองเดียวกันกับสัดส่วนโดยมวลจะได้ว่า

$$\sum_i Y_i = 1 \quad (\text{ก.4})$$

น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซผสมหาได้จากความสัมพันธ์ของสัดส่วนโดยโมลหรือโดยมวลดังนี้

$$MW_{mix} = \sum_i X_i MW_i \quad (\text{ก.5})$$

$$MW_{mix} = \frac{1}{\sum_i (Y_i / MW_i)} \quad (ก.6)$$

MW_i คือน้ำหนักโมเลกุลของก๊าซใดๆ และ MW_{mix} คือน้ำหนักโมเลกุลของก๊าซผสม

สำหรับเอนทาลปีของก๊าซผสมสามารถหาได้จากผลรวมของเอนทาลปีของก๊าซแต่ละชนิดตามสัดส่วนที่เกิดขึ้นในก๊าซผสม ซึ่งอธิบายได้ตามสมการดังนี้

$$h_{mix} = \sum_i Y_i h_i \text{ และ } \bar{h}_{mix} = \sum_i X_i \bar{h}_i \quad (ก.7)$$

h_i คือเอนทาลปีต่อหน่วยมวลของก๊าซใดๆ \bar{h}_i คือเอนทาลปีต่อหน่วยโมลของก๊าซใดๆ และ h_{mix} คือเอนทาลปีของก๊าซผสม ในการหาความหนาแน่นของก๊าซผสม เราสามารถหาได้โดยใช้สมการสถานะได้ดังนี้

$$P = \rho RT \quad (ก.8)$$

R คือค่าคงที่จำเพาะของก๊าซซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่สากลของก๊าซ (The Universal gas constant), R_u (8315 J/kmol-K) กับน้ำหนักโมเลกุลดังนี้

$$R = \frac{R_u}{MW} \quad (ก.9)$$

สำหรับที่สภาวะอ้างอิงที่อุณหภูมิ 298 องศาเคลวินและความดัน 1 บรรยากาศ เราหาค่าความหนาแน่นของก๊าซผสมที่สภาวะอ้างอิงได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\rho_{mix} = \frac{P_{ref}}{(R_u / MW_{mix}) T_{ref}} \quad (ก.10)$$

สำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองจะประกอบไปด้วยก๊าซต่างๆหลายชนิด ตารางที่ ผ.ก.1 แสดงให้เห็นถึงสัดส่วนโดยปริมาตร ค่าน้ำหนักโมเลกุลและเอนทาลปีของก๊าซแต่ละชนิดในก๊าซผสม เราสามารถใช้สมการที่ ก.5 และ ก.7 เพื่อหาน้ำหนักโมเลกุลและเอนทาลปีของก๊าซผสมได้จากตารางจะพบว่าก๊าซผสมมีค่าน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 11.804 kg/kmol และค่าเอนทาลปีเท่ากับ

57,803 kJ/kmol ส่วนความหนาแน่นของก๊าซผสมที่สภาวะอ้างอิงหาได้จากสมการที่ ก.10 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.4826 kg/m^3

ตารางที่ ผ.ก.1 แสดงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของก๊าซผสม

ลำดับ	ชนิดก๊าซ	สัดส่วนโดย ปริมาตร	น้ำหนักโมเลกุล, MW (kg/kmol)	เอนทาลปี, h (kJ/kmol)
1	CH_4	27%	16.043	-74,831
2	CO_2	8%	44.011	-393,546
3	N_2	4%	28.013	0
4	H_2	55%	2.016	0
5	CO	4%	28.010	-110,541
6	C_2H_6 และ อื่นๆ	2%	30.069	-84,667
	ก๊าซผสม		11.304	-57,803

หมายเหตุ

1. สำหรับก๊าซในลำดับที่ 6 คือ C_2H_6 และอื่นๆ เพื่อความสะดวกได้ก๊อคนิคมของก๊าซดังกล่าวเป็นเฉพาะ C_2H_6 เท่านั้น
2. ค่าเอนทาลปีที่ได้ คำนวณที่สภาวะมาตรฐานคือที่ อุณหภูมิ 298 องศาเคลวิน และ ความดัน 1 บรรยากาศ

ภาคผนวก ข.

วิธีการตรวจสอบผลการคำนวณที่ได้จากทฤษฎี

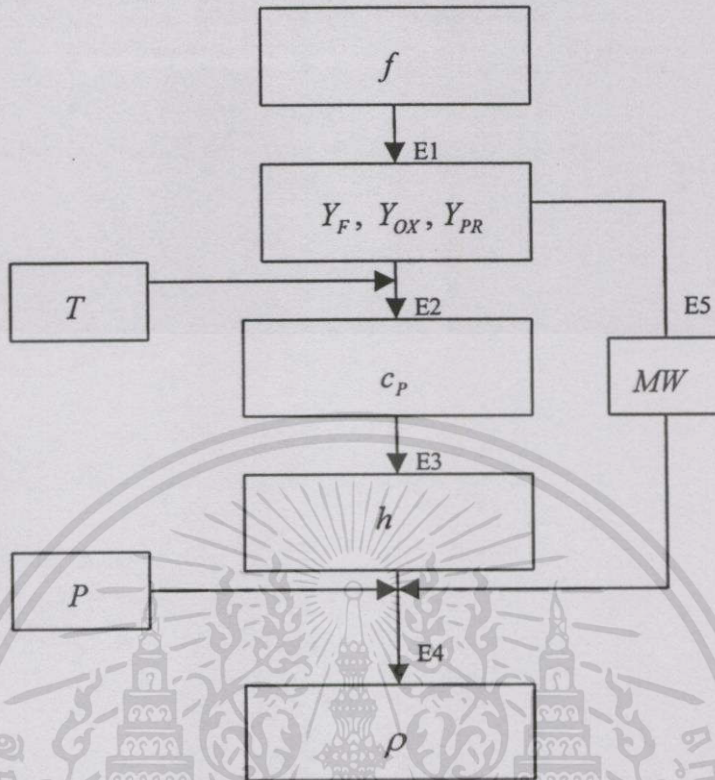
ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการทำนายผลลัพธ์จากปัญหาที่เกิดขึ้นในวงวิศวกรรมด้านต่างๆเพื่อใช้แทนวิธีการทดลอง ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองจะเป็นสิ่งที่ทำให้ทราบได้ว่าแบบจำลองที่ได้มีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะสามารถแยกการพิจารณาออกได้เป็น 2 ขั้นตอน กล่าวคือ

1. ขั้นตอนการตรวจเช็คความผิดพลาดของคำสั่งในโปรแกรม โดยการผลลัพธ์ของตัวแปรที่จำ เป็นทุกตัวที่ได้หลังจากโปรแกรมได้ถูกเข้าหาคำตอบแล้ว (Convergent Program) มาทำการคำนวณตามทฤษฎีอีกครั้ง
2. ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนาย โดยการนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองหรือผลงานวิจัยที่ได้มีการศึกษาค้นคว้ากันมาก่อนแล้ว

ในบางครั้งความผิดพลาดจากขั้นตอนที่ 1 อาจทำให้เกิดความบังเอิญที่ผลลัพธ์ท้ายสุดจะมีความใกล้เคียงกับคำตอบจริงของปัญหาได้ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอาจจะอยู่ในหลายรูปแบบ เช่น การใช้เครื่องหมายทางคณิตศาสตร์ผิดประเภท การสลับตัวแปรที่มีชื่อใกล้เคียงกัน การอ่านค่าตัวแปรผิดความหมาย เหล่านี้เป็นต้น ในการดำเนินการตามขั้นตอนที่ 1 ทำได้โดยการนำตัวแปรทุกตัวที่จำเป็นหลังจากที่โปรแกรมได้ถูกเข้าหาคำตอบแล้วมาทำการคำนวณตามทฤษฎีอีกครั้ง โดยการเลือกสุ่มตัวแปรตามตำแหน่งต่างๆ ภายในขอบเขตของปัญหาตามความเหมาะสม

ในแบบจำลองการเผาไหม้ด้วยทฤษฎี Mixture fraction ได้ตรวจเช็คความถูกต้องของทั้ง 2 ขั้นตอนโดยขั้นตอนที่ 1 จะตรวจสอบตามรายละเอียดในภาคผนวกนี้ ส่วนขั้นตอนที่ 2 ได้ถูกกล่าวถึงในบทก่อนหน้าที่ผ่านมา ตัวแปรที่จำเป็นสำหรับการตรวจเช็คจะแยกออกเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มแรกจะเป็นตัวแปรอ้างอิงจะประกอบไปด้วย ค่า Mixture fraction (f) อุณหภูมิ (T) และความดัน (P) ในกลุ่มที่สอง จะเป็นตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลจะประกอบไปด้วย สัดส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์ (Y_F, Y_{OX}, Y_{PR}) เอนทาลปี (h) ความหนาแน่น (ρ) น้ำหนักโมเลกุล (MW) และความจุความร้อนจำเพาะ (c_p) โดยขั้นตอนของการคำนวณโดยทฤษฎีจะแสดงไว้ดังรูปที่ ผ.ข.1 ซึ่งสามารถอธิบายลำดับขั้นตอนได้ดังนี้

1. เริ่มต้นด้วยการนำค่าตัวแปรอ้างอิง f ที่ได้จากผลลัพธ์ของโปรแกรมมาหาค่า Y_F, Y_{OX}, Y_{PR} ตามสภาวะที่เกิดขึ้น
2. นำค่า Y_F, Y_{OX}, Y_{PR} ที่ได้มาทำการหาค่า MW และหาค่า c_p โดยใช้ค่าตัวแปรอ้างอิง T
3. ค่า c_p ได้ถูกนำมาใช้หาค่า h
4. นำค่า MW จากข้อ 2 พร้อมทั้งใช้ตัวแปรอ้างอิงคือ P มาหาค่าตัวแปรสุดท้ายคือ ρ



E1 = Relations of mixture fraction and species concentration

E2 = Average Specific heat equation

E3 = Total enthalpy equation

E4 = Equation of State

E5 = Average molecular weight Equation

รูปที่ ผ.ข.1 อธิบายโครงสร้างของขั้นตอนที่ใช้ในการคำนวณใหม่

ค่าที่ใช้ทดสอบจะเป็นแบบเดียวกับที่ใช้ในการทดลองโดยดูได้จากเนื้อหภายในเล่ม พิกัดที่ถูกเลือกใช้ได้กำหนดให้มีระยะห่างจากหัวเผาตามแกนยาวจำนวน 4 แนวและในแต่ละแนวได้กำหนดให้มีพิกัดตามแนวรัศมี 2 จุดซึ่งจะทำให้มีจำนวนพิกัดทั้งหมดเท่ากับ 8 จุด รูปที่ ผ.ข.2 ได้แสดงถึงตำแหน่งของพิกัดในห้องเผา ระยะความยาวตามแนวแกนโดยวัดจากหัวเผามีค่าเท่ากับ 0.0495, 0.2539, 0.4906, และ 0.7155 เมตรตามลำดับ ส่วนระยะความยาวตามแนวรัศมีโดยวัดจากแกนสมมาตรมีค่าเท่ากับ 0.016 และ 0.070 เมตร ตามลำดับ เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบจะถูกกำหนดให้มีค่าสัดส่วนระหว่างมวลของเชื้อเพลิงต่อมวลของอากาศเท่ากับ 0.0635 ค่า Re เท่ากับ

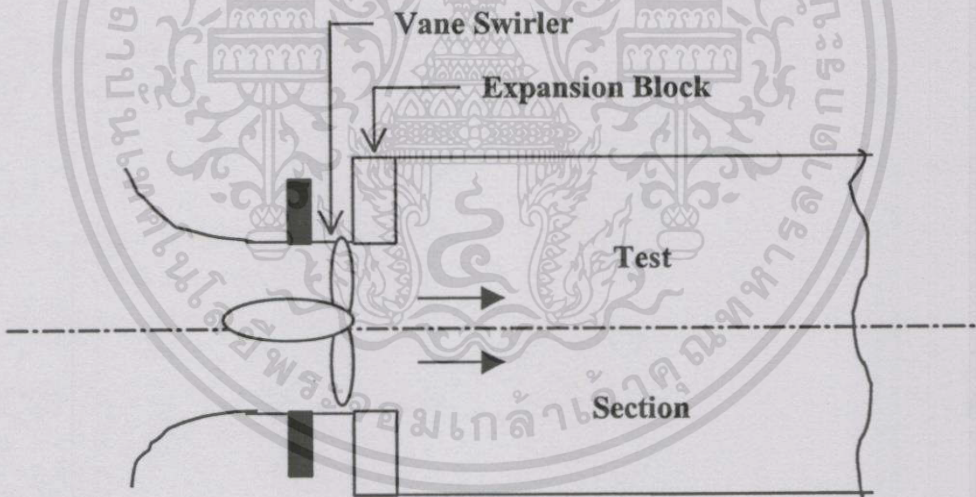
ตารางที่ ผ.ข.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณใหม่กับค่าที่ได้จากแบบจำลอง

	(x, y)				
ϕ	Y_F	Y_{OX}	Y_{PR}	MW	ρ
	(1,1)				
A	0.2808	0.0000	0.7192	19.8400	0.2157
B	0.2808	0.0000	0.7192	19.8473	0.2157
	(2,1)				
A	0.1783	0.0000	0.8217	21.9900	0.2045
B	0.1783	0.0000	0.8217	21.9884	0.2044
	(3,1)				
A	0.0679	0.0000	0.9321	24.8800	0.1923
B	0.0679	0.0000	0.9321	24.8848	0.1923
	(4,1)				
A	0.0282	0.0000	0.9718	26.1200	0.1873
B	0.0282	0.0000	0.9718	26.1240	0.1874
	(1,2)				
A	0.0000	0.9028	0.0970	28.6600	0.7182
B	0.0000	0.9030	0.0970	28.6593	0.7181
	(2,2)				
A	0.0000	0.5349	0.4651	27.9900	0.2961
B	0.0000	0.5352	0.4648	27.9943	0.2961
	(3,2)				
A	0.0000	0.24226	0.7574	27.4900	0.2171
B	0.0000	0.2432	0.7568	27.4880	0.2171
	(4,2)				
A	0.0000	0.1656	0.8344	27.3600	0.2046
B	0.0000	0.1662	0.8337	27.3575	0.2045

ภาคผนวก ก.

ผลการทำนายแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนวิธีสมการ $k-\varepsilon$

แบบจำลองการเผาไหม้ด้วยทฤษฎี Mixture fraction ได้ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนต้นแบบ[12] ด้วยวิธีสมการ $k-\varepsilon$ และเพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลองการเผาไหม้ไม่มีความผิดพลาดเนื่องจากความล้มเหลวของแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนต้นแบบ เราได้นำผลการทดลองของ Yoon[19] มาทำการเปรียบเทียบกับผลการทำนายที่ได้จากแบบจำลอง ลักษณะการทดลองของ Yoon จะทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในห้องทดสอบโดยทำการวัดความเร็วของอากาศตามแนวแกนต่างๆ ลักษณะของห้องทดสอบจะเป็นทรงกระบอกกลมและมีทางเข้าของอากาศทางเดียวดังแสดงในรูป ผ.ค.1 ขนาดของห้องทดสอบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2984 เมตรและยาว 1.50 เมตร ที่ทางเข้าของอากาศมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1492 เมตร



รูป ผ.ค.1 ลักษณะของห้องทดสอบที่ใช้ในการทดลองของ Yoon[19]

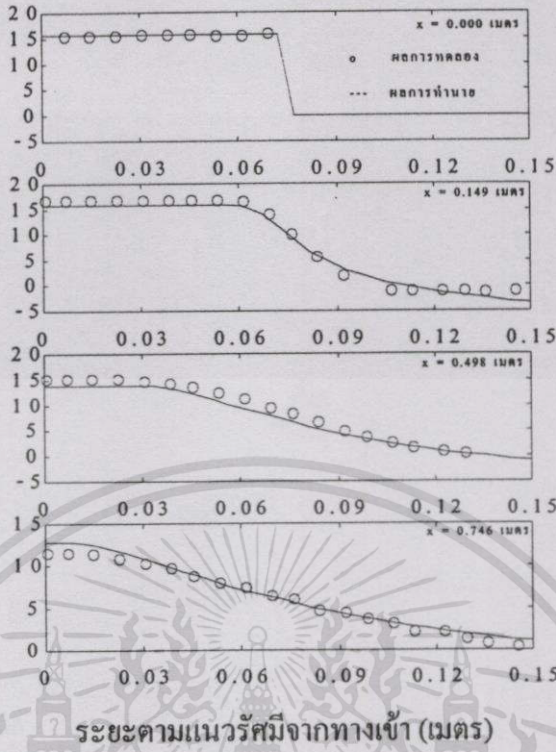
การทดลองได้ถูกพิจารณาออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่การไหลไม่มีการหมุน (No swirl) กับกรณีที่การไหลมีการหมุน (swirl) ค่าสภาวะที่ทางเข้าและข้อมูลของโครงสร้างของห้องทดสอบได้ถูกแสดงไว้ที่ตารางที่ ผ.ค.1 ในกรณีที่การไหลมีการหมุนนั้นจะกำหนดให้มีมุมของการหมุนที่ 45 องศา ในรูปที่ ผ.ค. 2 ได้แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายกับผลการทดลองของ Yoon สำหรับในกรณีที่การไหลไม่มีการหมุนโดยวัดค่าความเร็วตามแกนความยาว (Axial velocity) ของห้องทดสอบที่ตำแหน่งพื้นที่หน้าตัดต่างๆ ส่วนในรูปที่ ผ.ค.3 ได้แสดงถึงผลการเปรียบเทียบ

ในกรณีที่มีการไหลมีการหมุน จากผลที่ได้พบว่าในกรณีที่ไม่มีการหมุนของอากาศผลการทำนายมีความแม่นยำสูง ส่วนในกรณีของการไหลที่มีการหมุนยังแบบจำลองด้านแบบยังมีข้อจำกัดอยู่มาก

ผ.ค.1 แสดงค่าสภาวะที่ทางเข้าและลักษณะของห้องทดสอบ

รายการ	ลักษณะการไหล	
	ไม่มีการหมุน	มีการหมุน
ลักษณะของห้องทดสอบ		
- มุมของการหมุน (องศา)	0	45
- ความยาว (เมตร)		1.50
- เส้นผ่าศูนย์กลาง (เมตร)		0.2984
- เส้นผ่าศูนย์กลางที่ทางเข้า (เมตร)		0.1492
คุณสมบัติของของไหลที่ทางเข้า		
- ชนิดของไหล		อากาศ
- อุณหภูมิอากาศ (K)		293.15
- ความดันอากาศ (Pa)		100125.0
- ความหนาแน่นอากาศ ($kg m^{-3}$)		1.190
สภาวะการไหลที่ทางเข้า		
- อัตราการไหลของมวล ($kg sec^{-1}$)	0.3063	0.2457
- ความเร็วเฉลี่ย ($m sec^{-1}$)	15.7	12.6
- Average turbulence intensity ($m sec^{-1}$)	0.625	1.756

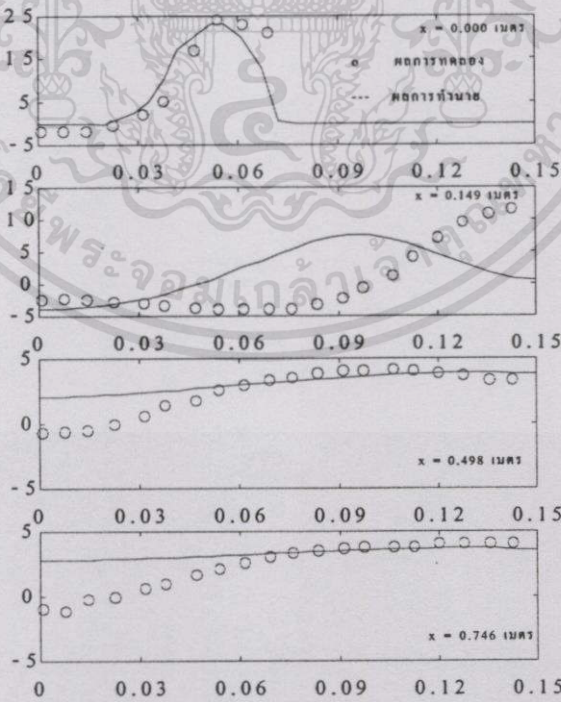
ความเร็วในแนวแกนความยาว



ระยะตามแนวรัศมีจากทางเข้า (เมตร)

รูปที่ ผ.ค.2 การเปรียบเทียบผลการทำนายและผลการทดลองของความเร็วตามแกนความยาวที่สถานะไม่มีการหมุนของอากาศ

ความเร็วในแนวแกนความยาว



ระยะตามแนวรัศมีจากทางเข้า (เมตร)

รูปที่ ผ.ค.3 การเปรียบเทียบผลการทำนายและผลการทดลองของความเร็วตามแกนความยาวที่

สถานะมีการหมุนของอากาศที่มุม 45 องศา

ภาคผนวก ง.

การหาความเร็วเฉลี่ยของเชื้อเพลิงและอากาศที่สภาวะทางเข้า

ความเร็วของก๊าซเชื้อเพลิงและอากาศที่สภาวะทางเข้าห้องเผาไหม้ ณ ตำแหน่งใดๆจะมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งการหาค่าความเร็วที่แท้จริงในแต่ละตำแหน่งดังกล่าวเพื่อใช้ในการจำลองการเผาไหม้ เป็นเรื่องที่ยากลำบาก การหาความเร็วเฉลี่ยจึงเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการกำหนดค่าความเร็วที่ทางเข้า ความเร็วเฉลี่ยที่สภาวะทางเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศถูกหาได้จากสมการ Reynolds Number [18] และค่าสัดส่วนโดยมวลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ทำปฏิกิริยากัน (F/A) ดังนี้

สมการ Reynolds Number

$$Re = \frac{4 (\dot{m}_{FU} + \dot{m}_A)}{\pi \mu_{ref} d} \quad (ง.1)$$

ค่าสัดส่วนโดยมวลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ทำปฏิกิริยากัน (F/A)

$$F/A = \frac{\dot{m}_{FU}}{\dot{m}_{AIR}} = \frac{\dot{m}_{FU}}{\dot{m}_{AIR}} \quad (ง.2)$$

โดยที่ \dot{m}_{FU} และ \dot{m}_{AIR} คือ อัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศที่ทางเข้า (kg/s)

\dot{m}_{FU} และ \dot{m}_{AIR} คือ มวลของเชื้อเพลิงและอากาศตามลำดับ

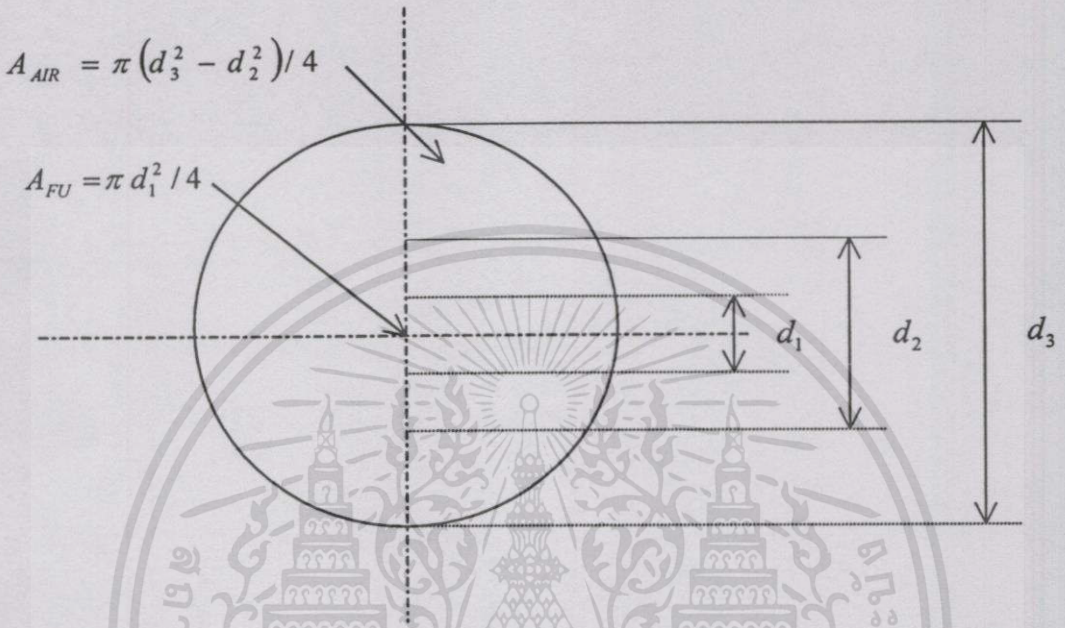
μ_{ref} คือ ค่าความหนืดของอากาศที่ทางเข้ามีค่าเท่ากับ $2.03 \times 10^{-5} kg/ms$

d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของเตาเผา (m)

จากสมการที่ ง.1 และ ง.2 จะสามารถหาค่า \dot{m}_{FU} และ \dot{m}_{AIR} ได้ ส่วนความเร็วเฉลี่ยที่ทางเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศหาได้จากสมการการไหลของมวลดังนี้

$$\dot{m} = \rho u A \quad (ง.3)$$

โดยที่ \dot{m}, ρ, u และ A คือ อัตราการไหล (kg/s) ความหนาแน่น (kg/m^3) ความเร็วเฉลี่ย (m/s) และ พื้นที่หน้าตัดของท่อ (m^2) ของเชื้อเพลิงหรืออากาศที่เราจะหาตามลำดับ รูปที่ ผ.ง.1 แสดงหน้าตัดขวางของท่อเชื้อเพลิงและอากาศของหัวเผาที่ใช้ในการทดลองตามบทที่ 5



รูปที่ ผ.ง.1 พื้นที่หน้าตัดขวางของท่อเชื้อเพลิงและอากาศของหัวเผาที่ใช้ในการทดลอง

ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกนสัมผัส, w (สำหรับการไหลที่มีการหมุน) เราอาจใช้สมการคณิตศาสตร์อย่างง่ายเพื่อคำนวณค่า w ได้โดยสมการ $w = u \tan \theta$ โดยที่ u และ w คือความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกนความยาวและแกนสัมผัสตามลำดับ ส่วน θ คือมุมของการหมุน สำหรับค่าความเร็วที่ทางเข้าของก๊าซเชื้อเพลิงและอากาศที่ใช้ในการจำลองการเผาไหม้ในกรณีต่างๆซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ Re และ F/A ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ ผ.ง.1

ตารางที่ ผ.ง.1 ค่าความเร็วที่ทางเข้าของก๊าซเชื้อเพลิงและอากาศที่ใช้ในการจำลองการเผาไหม้

Description	\dot{m}_{FU}	\dot{m}_{AIR}	m_{FU}	m_{AIR}
1. $Re = 16,300$ $F/A = 0.0635$	0.003206	0.050549	22.2813	13.4332
2. $Re = 16,300$ $F/A = 0.0786$	0.003978	0.050618	27.6471	13.4683
3. $Re = 10,867$ $F/A = 0.0786$	0.002653	0.033751	18.4366	8.9792
4. $Re = 20,520$ $F/A = 0.0652$	0.004207	0.064525	29.2387	17.1685
5. $Re = 20,460$ $F/A = 0.0623$	0.004019	0.064511	27.9320	17.1650

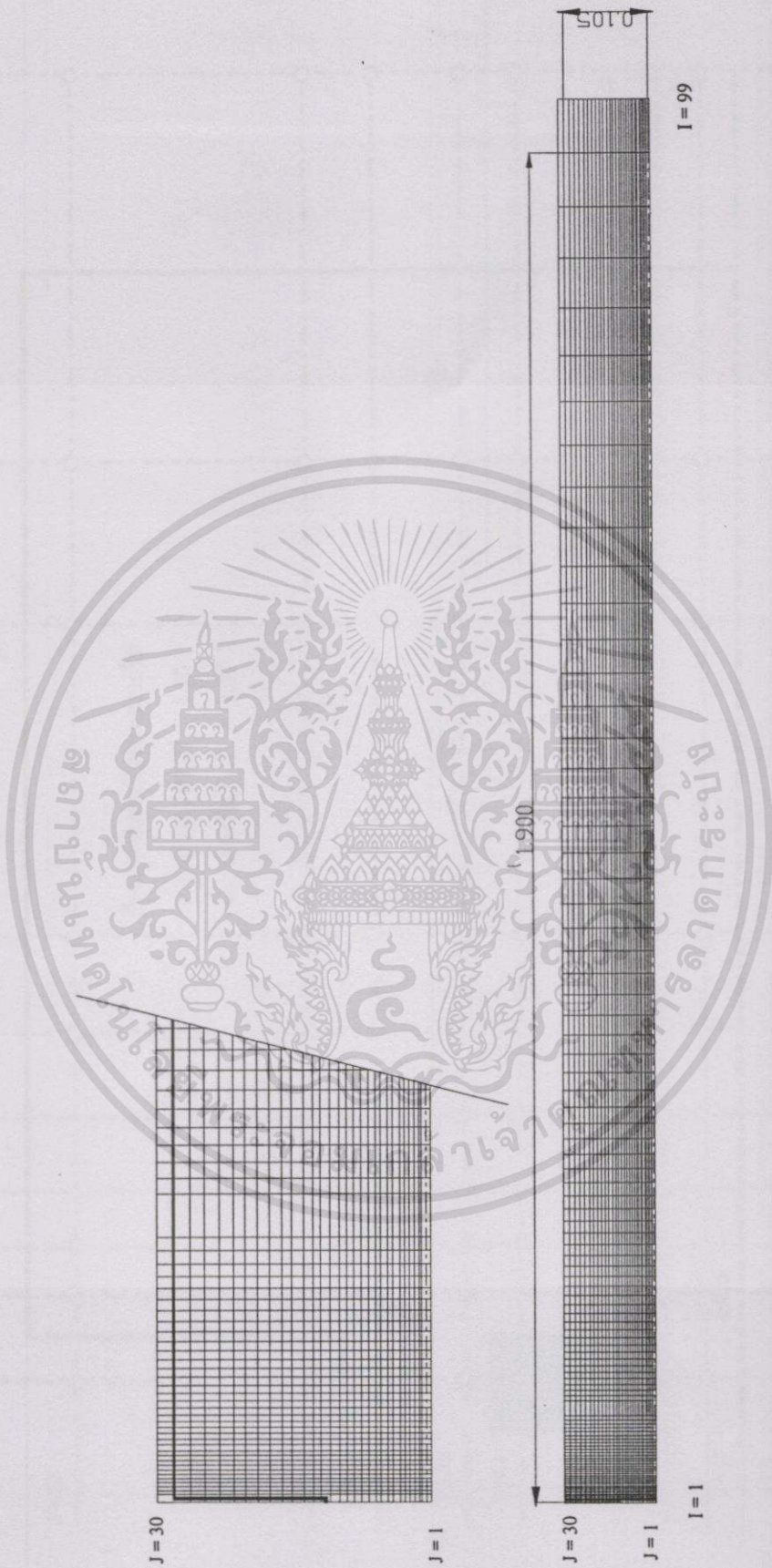
ภาคผนวก จ.

การกำหนดจำนวนเซลล์และค่าสถานะเงื่อนไขเริ่มต้น

ลักษณะของเตาเผาทดสอบที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลมวางในแนวนอนตามที่อธิบายไว้ในบทที่ 5 เนื่องจากหน้าตัดขวางของเตาทดสอบมีความสมมาตรตลอดแนวแกนความยาวดังนั้นสามารถพิจารณารูปร่างของเตาทดสอบให้เป็นแบบ Axissymetry และกำหนดให้ปัญหาเป็นแบบ 2 มิติได้โดยพิจารณาเฉพาะแกนความยาว และ แกนรัศมี เท่านั้น

แนวของเซลล์หรือแนวกริด (Grid line) ได้ถูกกำหนดไว้ที่กึ่งกลางของแต่ละเซลล์และใช้ในการหาค่าคุณสมบัติใดๆในแต่ละตำแหน่งภายในเตาเผาทดสอบ สำหรับการจัดแนวกริดได้กำหนดให้ระยะห่างระหว่างแนวกริดมีการขยายตัวออกไปด้วยอัตราส่วนแบบเชิงเส้น (Linear ratio) ในช่วงบริเวณทางเข้าของเตาทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าคุณสมบัติเป็นอย่างมาก ดังนั้นระยะห่างระหว่างแนวกริดจะถูกกำหนดให้มีความละเอียดมากเพื่อช่วยให้ผลลัพธ์มีความถูกต้องมากขึ้นและระยะห่างระหว่างแนวกริดจะเริ่มมากขึ้นเมื่อห่างจากบริเวณดังกล่าวออกไป การกำหนดแนวกริดได้พิจารณาถึงจำนวนของกริด (No. of grid) และระยะห่างระหว่างแนวกริด (Expansion ratio) โดยใช้หลักเกณฑ์ที่ว่า การเพิ่มขึ้นของจำนวนกริดหรือระยะห่างระหว่างแนวกริดจะมีผลการเปลี่ยนแปลงน้อยมากต่อค่าคุณสมบัติซึ่งในที่นี้เรากำหนดให้มีความเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.01% ค่านี้อาจจะเปลี่ยนไปตามความเหมาะสมขึ้นอยู่กับปัญหาที่พิจารณา จากการทดลองปรับเปลี่ยนจำนวนกริดและระยะห่างระหว่างแนวกริดโดยการพิจารณาค่า Mixture Fraction ที่ตำแหน่งต่างๆจำนวน 8 ตำแหน่งดังแสดงไว้ในรูปที่ ผ.ข.2 ได้ผลว่าจำนวนกริดในแนวแกนความยาวและแกนรัศมีเท่ากับ 99 และ 30 ตามลำดับซึ่งทำให้มีจำนวนเซลล์ทั้งหมดเท่ากับ 2970 เซลล์ ในขณะที่ระยะห่างระหว่างแนวกริดจะมีอัตราการขยายตัวตามแนวแกนความยาวและแกนรัศมีเท่ากับ 1.10 และ 1.03 ตามลำดับ รูปที่ ผ.จ.1 และ ผ.จ.2 แสดงแนวกริดของเตาเผาทดสอบ

การกำหนดค่าสถานะเงื่อนไขเริ่มต้นของคุณสมบัติต่างๆเพื่อใช้ในการคำนวณหาคำตอบจากสมการการเคลื่อนย้ายได้ถูกพิจารณาเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของการไหลได้ใช้ค่าสถานะเงื่อนไขเริ่มต้นตามโปรแกรมต้นแบบ [12] ยกเว้นส่วนที่เป็นค่าสถานะที่ทางเข้าของความเร็วดตามแนวแกน (u, v, w) ซึ่งค่าที่ได้คำนวณจากผลการทดลองที่ใช้ในการเปรียบเทียบตามที่แสดงไว้ในตารางที่ ผ.จ.1 สำหรับส่วนที่สองที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ ค่าคุณสมบัติที่พิจารณาคือค่า Mixture Fraction รูปที่ ผ.จ.3 แสดงค่าสถานะต่างๆของค่า Mixture Fraction จะพบว่าที่ทางเข้าของท่อเชื้อเพลิงจะกำหนดให้ $f = 1$ เนื่องจากมีเฉพาะเชื้อเพลิงอย่างเดียว ในขณะที่ทางเข้าของท่ออากาศจะกำหนดให้ $f = 0$ เนื่องจากไม่มีเชื้อเพลิงผสมอยู่ สำหรับค่า Mixture Fraction ที่สถานะเริ่มต้นได้กำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์

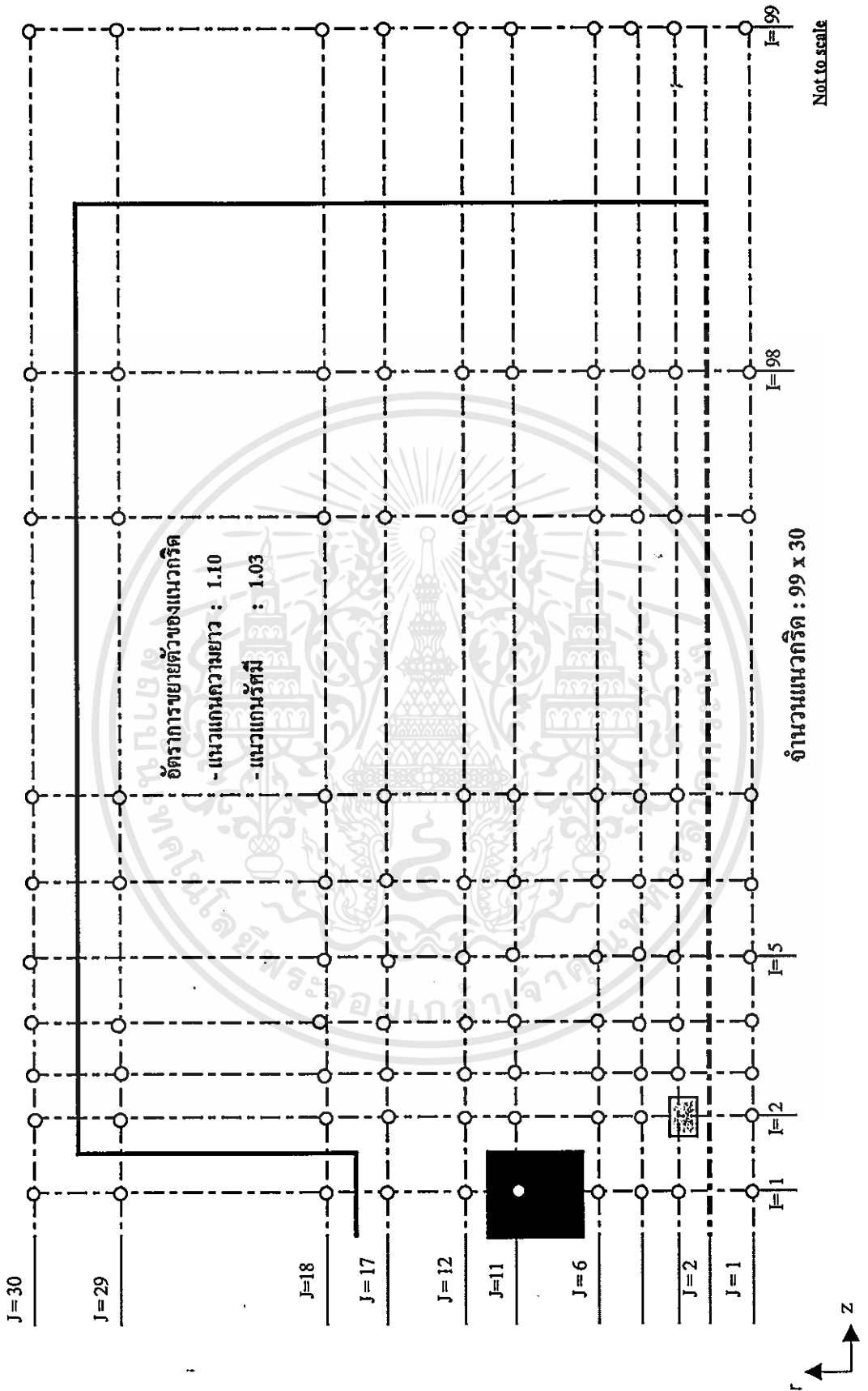


(ก) ขยายบริเวณปากเตาเผา (ข) แนวกริดของเตาเผาทดสอบ

รูปที่ ผ.จ.1 ลักษณะแนวกริดของเตาเผาทดสอบในมาตราส่วนจริง

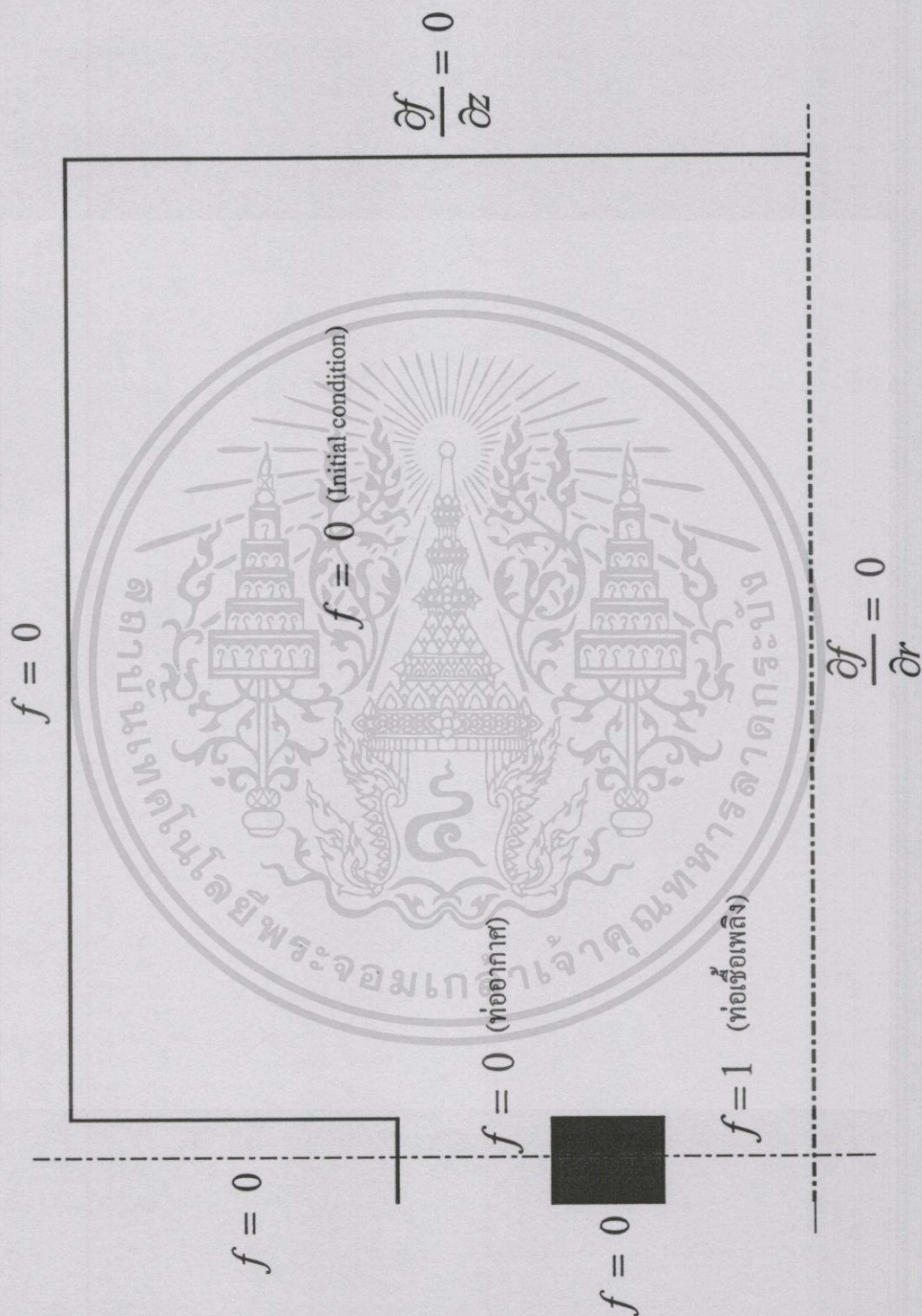
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.จ.1 การแบ่งแนวกริดของเตาเผาทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.จ.2 แสดงค่าสถานะเงื่อนไขเริ่มต้นของค่า Mixture Fraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ดิฉกทั้งห้าขงมิให้ดัดแปลงเบื้อหว และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ.

ผลงานทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับงานวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 17 ฉบับที่ 4

ธันวาคม 2543

1. วงจร บุคสเตรป ซิมอส อินเวอร์เตอร์ ที่คักคาไฟเลี้ยงค่าและสวิตช์ได้เต็มย่าน
ทวิช ชูเมือง กอบชัย เดชหาญ วิษณ กอพยัคฆ์พันธ์ 5
2. ตัวต้านทานลอยตัวที่ปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ใช้ทรานซิสเตอร์ซิมอส
สิทธิพร เพ็ชรกิจ กอบชัย เดชหาญ 11
3. วงจรคุณและหารสัญญาณที่เชิงจรสายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแส
วิจิตรา เพ็ชรกิจ สิทธิพร เพ็ชรกิจ 17
4. การจัดการความกว้างของแบนด์ของ ATM สวิตช์โดยใช้ทฤษฎีแควรวอคอย
ประพันธ์ ตริวิญญู กอบชัย เดชหาญ อัครพล ตริวิญญู เชื้อชาย เนตบุตร 23
5. อุปกรณ์ป้องกันการล้นของฟีดแบ็คโดยใช้ฮาร์ดแวร์ผ่านพอร์ตยูเอสบี
ศาวดี ทองทา นเรศ มาลัย สมศักดิ์ มีตะดา ชม กิมปาน กอบชัย เดชหาญ 29
6. การพัฒนาระบบแสดงผลจลุดข้อมูลในโครงข่ายเคเบิลใยแก้วนำแสง
รุ่ง พวงดอกไม้ พิเชฐ ม่วงนวล มนูญ สุขเกษม อวิวิฬ พิงมา 35
7. การเปรียบเทียบวิธีการประมาณแบบออดิโวลูชันกับวิธีการประมาณแบบอื่น ๆ สำหรับการเข้ารหัสเสียงพูดแบบอะแด็ปทีฟ
ดิฟเฟอร์เรนเชียลพัลส์โคดมอดูเลชัน
อรรดลสิทธิ์ วงศ์ธรรมศักดิ์ชัย วรการ วงศ์สายเชื้อ ไกรสิน สังวัฒนา 41
8. วิเคราะห์การสทอนของสัญญาณเนื่องจากฝนในย่าน KU-Band ด้วยอุปกรณ์ เรดิโอไมโครที่มุมซิมิท
คณิศ ไบศรี ณรงค์ เหมกรรม 47
9. การประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม PID แบบปรับค่าอัตโนมัติ
เลิศเลขา ธนะชัยพันธ์ วิศรุต ศรีวิริยะ พิทยา ป่านนิต ประสิทธิ์ จุลเสวรงค์ กิตติ ตีระเศรษฐ 53
10. ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วแรง-บิดสำหรับสเต็ปมิ่งมอเตอร์แบบสเต็ปย้อยด้วยค่าการเก็บประจุรวม
สาทร ทองถึง ชนัญญา แซ่ตั้ง 58
11. การคิดราคาตลาดของไฟฟ้าในธุรกิจไฟฟ้า
สุนทร ฝ่ายหมื่นไวย่ สุลี บรรจงจิตร์ นัทคน กฤษณจินดา 64
12. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่จากการสูญเสียในการผลิตและการชะงะของระบบไฟฟ้ากำลัง
ศุภชัย แซ่เจียม เอกราช พลน้อย มณฑล สีลาจินดาไกรฤกษ์ 69
13. การหาจำนวนสลอตของโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอาศัยโรเตอร์สลอตซาร์โมนิคส์
เฉลิมชาติ มานพ อรรถดี สารมาศ วิจิตร-กิมเรศ 75
14. มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก
ประภาช ไพรสุวรรณ พูนศรี วรรณการ วรภัทป์ ลิมเจริญ 81
15. การใช้คอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลพริคค่าความส่องสว่างโดยอาศัยข้อมูลจาก IES File
ทิมาญ ดิษสุธรรม วรภัทป์ ลิมเจริญ นัทคน กฤษณจินดา สุลี บรรจงจิตร์ 86
16. การแก้ค่าตัวประกอบกำลังวงจรเรียงกระแสตามเฟส
โสภณ สวัสดิ์นาวิน ประภาช ไพรสุวรรณ ชัย ชมภูอินท 92
17. ระบบป้องกันหลักของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง
เขาดุทธิ ธรรมเพียร มณฑล สีลาจินดากรฤกษ์ สมโภชน์ ประไพ 98
18. การออกแบบของระบบต่อลงดินสถานีไฟฟ้าย่อยโดยใช้คอมพิวเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 479
ศักดา ธารเวทย์ มณฑล สีลาจินดาไกรฤกษ์ 104
19. การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่เชื่อมโยงถึงกัน
วี พงษ์ศิริพานิช อิติ เอี่ยมมงคล สุลี บรรจงจิตร์ นัทคน กฤษณจินดา 110
20. การประเมินค่าความปลอดภัยในการออกแบบระบบกราวด์
จิรพงษ์ เผือกคล้าย สมชาติ จิรวินากร สุลี บรรจงจิตร์ 115
21. ผลกระทบของสภาวะที่ทางเข้าต่อการผสมแบบปั่นป่วนในเตาเผาทรงกระบอก
นิวัฒน์ นาคะโยธินสกุล จารวัตร เจริญสุข 121
22. พฤติกรรมการหล่อลื่นของแบริงเพลากลมด้วยสารหล่อลื่นนอน-นิวตรอนเนี่ยน โดลาแดนท์
มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ดาวรัตน์ ปัญญากาญจน์ 127
23. การเพิ่มกำลังของเครื่องยนต์แก๊สลิ้นโดยการดูดไอเสีย
อัครเดช สิ้นสุภัก สุนทร ละอองนวล 131
24. การวิเคราะห์ %wt. Coke Yield ซึ่งเป็นตัวแปรตัวหนึ่งในการผลิตน้ำมันให้มีคุณภาพสูงสุดในหน่วยแตกน้ำมัน
อภิชัย พุทธเนียม ธวัชชัย นาคพิพัฒน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าการถือครองลิขสิทธิ์ ลิขสิทธิ์หรือทรัพย์สินทางปัญญา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบของสถานะที่ทางเข้าต่อการผสมแบบปั่นป่วนในเตาเผา ทรงกระบอก

Effects of Inlet Condition on Turbulent Mixing in a Cylindrical Furnace

นิวัฒน์ นาคะโยธินสกุล จารุวัตร เจริญสุข

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของค่า Mixture fraction ภายใต้สภาวะการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) 2 มิติ การจำลองการเผาไหม้ได้การนำทฤษฎี Mixture fraction มาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการประมาณค่าเชิงตัวเลขที่เรียกว่า วิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume method) เพื่อหาการกระจายตัวของค่า Mixture fraction ภายในเตาเผาไหม้แบบทรงกระบอก แบบจำลองการเผาไหม้ด้วยทฤษฎี Mixture fraction ได้พัฒนามาจากแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนต้นแบบ [5] ซึ่งได้ใช้สมการ $k - \epsilon$ สำหรับการจำลองความปั่นป่วน ในการศึกษาถึงการกระจายตัวของค่า Mixture fraction ทำโดยการปรับเปลี่ยนสถานะที่ทางเข้าคือค่า Reynolds number, turbulent intensity และการกระจายความเร็ว เราพบว่า Reynolds number มีผลต่อการกระจายตัวของค่า Mixture fraction น้อยมากในขณะที่ค่า turbulent intensity และการกระจายความเร็ว มีผลต่อการกระจายตัวของค่า Mixture fraction อย่างสังเกตเห็นได้ ผลการทำนายที่ได้ทำการปรับค่าแล้วเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่าเป็นที่น่าพอใจ

ABSTRACT

This paper presents a study on distribution of mixture fraction in two-dimensional turbulent flow. Combustion of mixed gas was simulated based on mixture fraction theory. The model is embedded in a numerical approximation, Finite Volume Method, to obtain the solution in a cylindrical combustion chamber. This combustion model is developed from the original turbulent flow model [5] and a standard $k - \epsilon$ model was used for this turbulence model. From a study, an inlet Reynolds number, turbulent intensity and velocity distribution were varied and it was found that an effect of inlet Reynolds number was trivial whereas inlet turbulent intensity and inlet velocity profile play an important role on the solution downstream. The solution with calibrated inlet condition was in good agreement with exiting experimental data.

1. บทนำ

ในการออกแบบและพัฒนาเตาเผาข้อมูลที่ได้ยังคงมีพื้นฐานมาจากการทดลองและการสร้างแบบจำลองด้วยเทคนิคต่างๆ ในการหาข้อมูลจากผลการทดลองจำเป็นต้องสร้างอุปกรณ์ขึ้นมาทดสอบซึ่งคงหลีกเลี่ยงไม่พ้นในเรื่องของต้นทุน ในปัจจุบันการหาข้อมูลด้วยระบบคอมพิวเตอร์เป็นทางเลือกหนึ่งที่ได้มีการพัฒนาใช้กันอย่างกว้างขวาง ในบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการหนึ่งที่ได้ใช้ระบบคอมพิวเตอร์ในการหาผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นโดยการนำทฤษฎี Mixture fraction มาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการประมาณค่าเชิงตัวเลขที่เรียกว่า วิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume method) ภายใต้สภาวะการไหลแบบปั่นป่วน 2 มิติ ในการสร้างแบบจำลองได้ใช้สมการ $k - \epsilon$ ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับโดยทั่วไปสำหรับกรณีไม่มีการกวนวน (No Swirl) ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาเพื่อคุณพุดิกรรณการกระจายตัวของค่า Mixture fraction คือตัวแปรที่สภาวะทางเข้าประกอบด้วยค่า Reynolds number, turbulence intensity และลักษณะความเร็วที่ทางเข้า รูปร่างของเตาเผาเป็นทรงกระบอกมีขนาดเล็กพอที่จะไม่คิดผลจากรadiation loss แต่ในขณะที่เดียวกันก็ต้องใหญ่มากพอที่จะทำให้แน่ใจว่าสภาวะการไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มตัว (Fully turbulent) สำหรับท่อส่งเชื้อเพลิงและท่อส่งอากาศจะถูกแยกจากกันก่อนเข้าสู่เตาเผาไหม้ เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงผสมที่มี มีเทน (CH_4) เป็นองค์ประกอบหลัก

2. ทฤษฎีพื้นฐาน

การกระจายตัวของค่า Mixture fraction ในสภาวะการไหลแบบปั่นป่วน สามารถอธิบายได้ด้วยขบวนการแพร่และการพา (Diffusion and convection processes) [1] และเนื่องจากค่า Mixture fraction เป็น ปริมาณสเกลาร์ซึ่งปริมาณ Mixture fraction จะไม่สูญหายหรือถูกสร้างขึ้นใหม่ ดังนั้นเราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการการเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลาร์ (Scalar transport equation) ในพิกัดทรงกระบอก ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\rho \bar{v}_r f \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \bar{v}_z f \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_{eff} \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{eff} \frac{\partial f}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$D_{eff} = D_f + \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{f,i}} \quad (2)$$

โดยที่ f คือ ค่า Mixture fraction

r คือระยะในแนวรัศมี

z คือระยะในแนวแกนความยาว

u, v คือความเร็วในแนวแกนรัศมีและแกนความยาวตามลำดับ

D_{eff} คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่แบบปั่นป่วน

D_f คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่แบบราบเรียบ

μ_{eff} คือค่าความหนืดแบบปั่นป่วน

σ_f คือค่า Schimidt / Prandtl Number

สมการเรย์โนลด์และสมการความต่อเนื่อง [1] ได้ถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าความเร็วในแนวแกน แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่ใช้คือ สมการ $k - \epsilon$ และจะทำให้ได้ค่า μ_{eff} ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ 2 ตัวแปรคือ ค่าการสร้างพลังงานจลน์ (k) และ ค่าอัตราการผลิตพลังงานจลน์ (ϵ)

ในขบวนการเผาไหม้อย่างง่ายเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับอากาศให้สารผลิตภัณฑ์เกิดขึ้น หากการเกิดปฏิกิริยาถูกสมมุติว่าเป็นไปอย่างรวดเร็วมากนั้นคือไม่คิดปฏิกิริยาที่ไม่เสถียรและคิดว่าผลจากการเกิด Radiation loss น้อยมาก เราสามารถหาค่าเอนทาลปีจำเพาะ (Specific enthalpy) ได้ในรูปสมการเชิงเส้นที่สัมพันธ์กับค่า f ดังนี้

$$h = fh_{fu} + (1 - f)h_{air} \quad (3)$$

โดยที่ h คือ ค่าเอนทาลปีจำเพาะและ ตัวห้อย fu และ air คือค่าที่ทางเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศตามลำดับ

สำหรับสารผสม (Mixture) ที่ประกอบด้วยสารเชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์จะสามารถหาค่าอุณหภูมิของสารผสมได้ดังนี้

$$h = \int_{T_{ref}}^T \bar{c}_p dT + m_{fu} H \quad (4)$$

โดยที่ \bar{c}_p คือค่าความจุความร้อนเฉลี่ยของเชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์

T คืออุณหภูมิของสารผสม

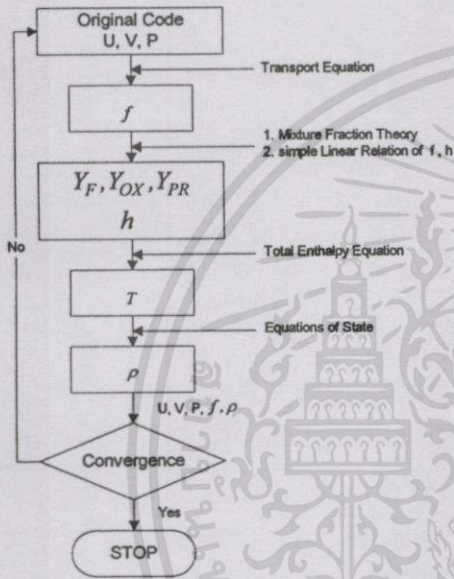
m_{fu} คือค่าสัดส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิง

H คือ Calorific value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ได้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปว่าควรปฏิบัติอย่างไรบ้าง ลึกซึ้งกว่านี้ให้ดูแบบฉบับนี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการอ้างอิง

ค่าสัดส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์ หาได้จากค่า f [2], เนื่องจากในการเผาไหม้คุณสมบัติของสารผสมมีค่าสูงดังนั้นเราสามารถใช้อีกฎก๊าซสมบูรณ์ (Ideal gas law) หาค่าความหนาแน่นของสารผสมและค่าน้ำหนักโมเลกุลของสารผสมหาได้โดยการเฉลี่ยของน้ำหนักโมเลกุลเชื้อเพลิง อากาศและผลิตภัณฑ์ เราสามารถสรุปขั้นตอนการการจำลองการเผาไหม้ด้วยทฤษฎี Mixture fraction ได้ตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 ฟังก์ชันจำลองการเผาไหม้

3. การประยุกต์วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม [1]

เราได้นำวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมมาประยุกต์ใช้กับการหาการกระจายตัวของ f โดยเราได้ทำการแบ่งปริมาตรภายในเตาเผาออกเป็นเซลล์เล็กๆ จำนวนมากและโดยการอินทิเกรตสมการการเคลื่อนย้ายทั้งปริมาตรควบคุม เราสามารถสร้างสมการผลลัพธ์ของสมการ Discretised ได้ดังนี้

$$A_p \phi_p = A_w \phi_w + A_e \phi_e + A_n \phi_n + A_s \phi_s + S_U \tag{5}$$

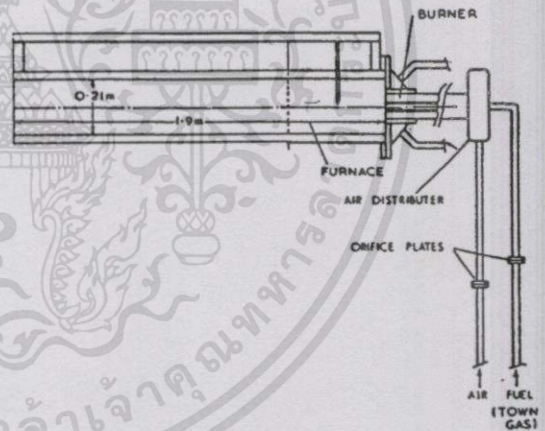
$$\text{และ } A_p = A_w + A_e + A_n + A_s - S_p \tag{6}$$

โดยที่ ϕ คือค่าคุณสมบัติใดๆ A_p, A_w, A_e, A_n, A_s คือค่าสัมประสิทธิ์ที่พิกัดของเซลล์ที่พิจารณาและเซลล์โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รอบ และ S_p, S_U คือ SOURCE TERM และระบบสมการที่ได้ถูกแก้โดยวิธีการ TDMA แบบ Line by Line

4. ลักษณะของเตาเผา

เตาเผาที่ใช้เป็นเตาเผาทรงกระบอก [3] ในแนวนอนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.21 เมตรและยาว 1.90 เมตร หัวเผาคิดตั้งอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งของเตาดังรูปที่ 2 หัวเผาจะประกอบไปด้วยท่อส่งเชื้อเพลิงที่อยู่ภายในท่อส่งอากาศ โดยท่อเชื้อเพลิงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.0195 เมตรและท่ออากาศมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ 0.0445 และ 0.0781 เมตรตามลำดับ ทั้งท่อส่งเชื้อเพลิงและท่อส่งอากาศถูกแยกออกจากกันก่อนเข้าเตาเผาและได้กำหนดให้ท่อมีความยาว 0.70 เมตร เพื่อให้แน่ใจว่าสภาพการไหลที่ปลายทางออกของท่อจะพัฒนาด้วยอย่างสมบูรณ์ (Fully developed)



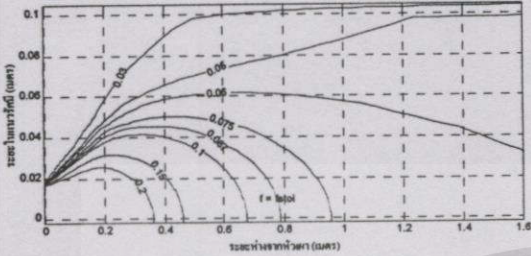
รูปที่ 2 ลักษณะของเตาเผา

5. เงื่อนไขและผลการวิเคราะห์

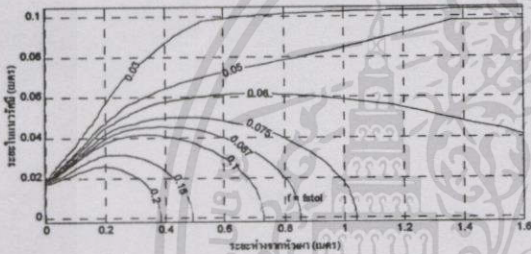
5.1 ผลของค่า Reynolds number ที่ทางเข้า

ในการพิจารณาจะทำการปรับเปลี่ยนค่า Re ที่ทางเข้าเป็น 3 กรณีคือในกรณีแรกที่ค่าเริ่มต้น Re เท่ากับ 16,030 ในกรณีที่สองจะลดค่า Re เหลือ 50% และกรณีสุดท้ายจะเพิ่มค่า Re เป็น 150% ซึ่งจะทำให้ได้ค่า Re เท่ากับ 8,315 และ 24,045 ตามลำดับ ทุกสภาวะได้กำหนดให้ค่าสัดส่วนระหว่างมวลเชื้อเพลิงกับมวลอากาศ (F/A) เท่ากับ 0.0635 และการกระจายความเร็วที่ทางเข้าสม่ำเสมอ ส่วน

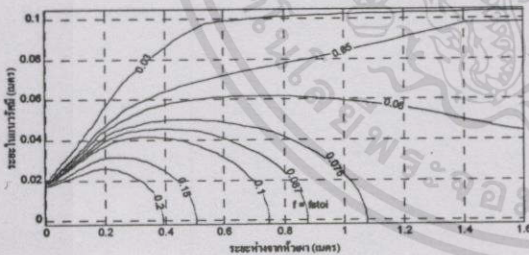
ค่า Turbulent intensity กำหนดให้มีค่าเป็น 0.6250 [4] รูปที่ 3,4,5 แสดงให้เห็นถึงกรณีที่ Re มีค่าเท่ากับ 8,315, 16,030 และ 24,045 ตามลำดับ



รูปที่ 3 . การกระจายตัวของ Mixture fraction ที่ Reเท่ากับ 8,315



รูปที่ 4 . การกระจายตัวของ Mixture fraction ที่ Reเท่ากับ 16,030



รูปที่ 5 . การกระจายตัวของ Mixture fraction ที่ Reเท่ากับ 24,045

จากกราฟที่ตำแหน่งพิกัดข้างอิงที่ได้จากการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ ที่ระยะห่างจากแนวแกนความยาว(x) และแกนรัศมี (y) เท่ากับ 0.2012 และ 0.0212 เมตร ตามลำดับ พบว่าค่าที่ได้คือ ที่ค่า Re เท่ากับ 16,030, $f = 0.3687$ ที่ค่า Re เท่ากับ 8,315, $f = 0.3500$ และที่ ค่า Re เท่ากับ 24,045, $f = 0.3715$ จะเห็นว่ากรณีที่ค่า Re ลดลง 50% ทำให้ค่า f ลดลงประมาณ 5% และค่า Re เพิ่ม

ขึ้น 50% การเปลี่ยนค่า Re ทำให้ค่า f เพิ่มขึ้นประมาณ 0.76% เท่านั้น แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า Re มีผลต่อการกระจายตัวของค่า Mixture fraction น้อยมาก นั่นคือการเปลี่ยนขนาดความเร็วที่ทางเข้าโดยให้ค่าสัดส่วนระหว่างมวลเชื้อเพลิงกับมวลอากาศยังคงที่จะไม่กระทบกับค่า Mixture fraction มากนัก

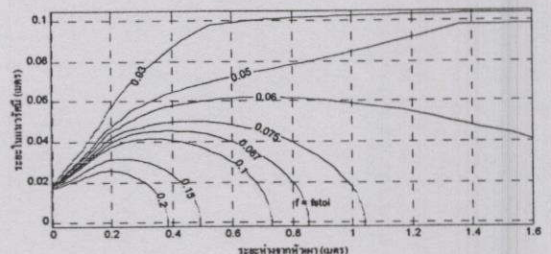
5.2 ผลของการกระจายความเร็วที่ทางเข้า

ในการพิจารณาความเร็วที่ทางเข้าของท่อส่งเชื้อเพลิงและท่อส่งอากาศนั้นจะถูกกำหนดให้มีลักษณะการกระจายเป็นแบบสม่ำเสมอ(Uniform)และแบบไม่สม่ำเสมอ(Non-uniform) ซึ่งในกรณีที่การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอจะหาได้จากกรโหลภายในท่อที่ถูกพิจารณาเป็นแบบพัฒนาตัวอย่างสมบูรณ์(Fully Developed)โดยได้คำนวณจากแบบจำลองกรโหลแบบปั่นป่วนดันแบบ [5] รูปที่ 6 ได้แสดงถึงลักษณะของการกระจายความเร็วทั้งสองกรณี



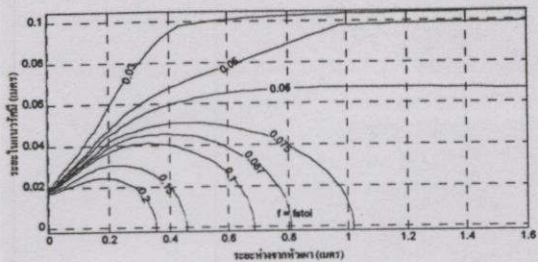
รูปที่ 6. (a) แบบสม่ำเสมอ (b) แบบไม่สม่ำเสมอ

ทุกกรณีได้กำหนดให้ Re เท่ากับ 16,030 และค่าสัดส่วนระหว่างมวลเชื้อเพลิงกับมวลอากาศมีค่า 0.0635 ส่วนค่า Turbulence intensity กำหนดให้มีค่าเป็น 0.6250 รูปที่ 7,8 แสดงถึงกรณีที่การกระจายความเร็วที่ทางเข้าเป็นแบบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอตามลำดับ



รูปที่ 7 . การกระจายตัวของ Mixture fraction

ที่การกระจายความเร็วเป็นแบบสม่ำเสมอ

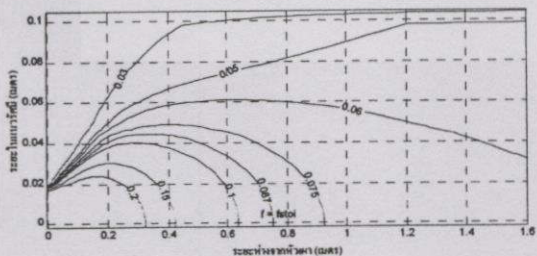


รูปที่ 8 . การกระจายตัวของ Mixture fraction ที่การกระจายความเร็วเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ

จากกราฟจะพบว่า การกระจายความเร็วที่ทางเข้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอซึ่งเป็นพฤติกรรมของความเร็วที่เกิดขึ้นจริงนั้นจะมีผลทำให้การกระจายตัวของ Mixture fraction ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่มีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอและจะเริ่มเกิดสภาวะคงที่ได้เร็วกว่าการกระจายความเร็วแบบสม่ำเสมอ

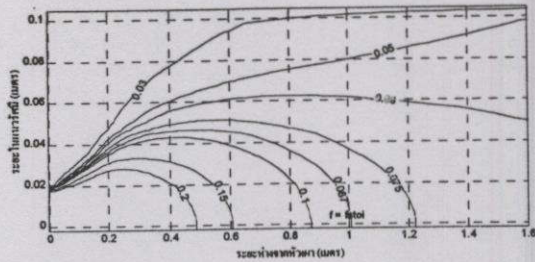
5.3 ผลของค่า Turbulence intensity

ค่า Turbulence intensity ที่ใช้ในการพิจารณาคือที่ค่า 0.3125 และ 0.9375 ซึ่งค่าทั้งสองหาได้จากการเปลี่ยนค่า Turbulence intensity เป็น 50% และ 150% ของค่าเริ่มต้นที่ 0.6250 ตามลำดับ ทั้งสองกรณีได้กำหนดให้ ค่า Re เท่ากับ 16,030 และค่าสัดส่วนระหว่างมวลเชื้อเพลิงกับมวลอากาศมีค่าเท่ากับ 0.0635 โดยการกระจายความเร็วที่ทางเข้าเป็นแบบสม่ำเสมอ รูปที่ 9,10 แสดงให้เห็นถึงกรณีที่ Turbulence intensity มีค่าเท่ากับ 0.3125 และ 0.9375 ตามลำดับ



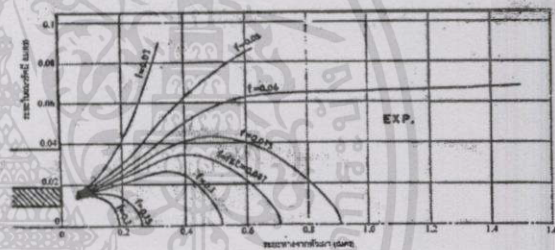
รูปที่ 9 . การกระจายตัวของ Mixture fraction ที่ ค่า Turbulence intensity เท่ากับ 0.9375

จากกราฟพบว่า การเพิ่มค่า Turbulence intensity

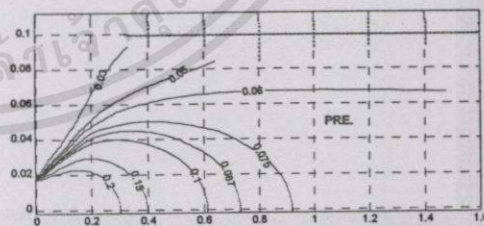


รูปที่ 10 . การกระจายตัวของ Mixture fraction ที่ ค่า Turbulence intensity เท่ากับ 0.3125

หรือการทำให้การไหลมีความปั่นป่วนมากขึ้นได้ทำให้รูปร่างของกราฟมีลักษณะกลมนั้นคือการกระจายตัวของค่าค่า Mixture fraction ดีขึ้นเนื่องจากผลของเทอมการแพร่ที่มากขึ้นและจะมีผลกลับกันในกรณีที่ค่า turbulence intensity ลดลง



รูปที่ 11 . ผลการทดลองหาการกระจายตัวของ Mixture fraction ที่ Re เท่ากับ 16,030 และ F/A เท่ากับ 0.0635



รูปที่ 12 . ผลการทำนายหาการกระจายตัวของ Mixture fraction ที่ Re เท่ากับ 16,030 และ F/A เท่ากับ 0.0635

รูปที่ 11 . แสดงให้เห็นถึงค่าการกระจายตัวของค่า Mixture fraction ที่ได้จากการทดลอง[3] โดยที่กำหนดให้ค่า Re เท่ากับ 16,030 และค่าสัดส่วนระหว่างมวลเชื้อเพลิงกับมวลอากาศมีค่า 0.0635 ส่วนรูปที่ 12 เป็นผลการ

ทำนายที่ได้จากค่าสภาวะเงื่อนไขเดียวกัน เราได้ทำการปรับแต่งค่าตัวแปรที่ทางเข้าเพื่อให้ผลที่ได้มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองและพบว่าค่าที่ได้เป็นดังนี้ การกระจายความเร็วที่ทางเข้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอและค่า Turbulent intensity เท่ากับ 0.9250 จากผลการทำนายพบว่าในช่วงบริเวณทางเข้าค่าการกระจายตัวของ Mixture fraction ที่ได้จากการทำนายจะมีค่าสูงกว่าผลการทดลองและผลการทำนายจะเริ่มใกล้เคียงกับผลการทดลองมากขึ้นเมื่อระยะเริ่มห่างไกลจากบริเวณทางเข้า

6. บทสรุป

การศึกษาพฤติกรรมของค่า Mixture fraction ภายใต้อุณหภูมิการไหลแบบปั่นป่วนใน 2 มิติ ได้ถูกอธิบายโดยการนำทฤษฎี Mixture fraction มาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีเชิงตัวเลขที่เรียกว่า วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method) และได้นำสมการ $k - \epsilon$ มาใช้ในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน รูปร่างของห้องเผาไหม้เป็นทรงกระบอกกลมที่ถูกกำหนดให้มีขนาดเหมาะสมต่อการเกิดการไหลแบบ Fully developed แต่ในขณะเดียวกันผลของการเกิด Radiation loss มีค่าน้อยมาก ในการพิจารณาผลกระทบจากตัวแปรที่ทางเข้าพบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของค่า Re โดยที่สัดส่วนระหว่างมวลของเชื้อเพลิงและมวลของอากาศคงที่พบว่าผลต่อการกระจายตัวของค่า Mixture fraction น้อยมาก การที่การกระจายความเร็วเป็นแบบสม่ำเสมอซึ่งเป็นสภาวะที่เกิดขึ้นจริงจะทำให้ค่า Mixture fraction มีการกระจายตัวเหมาะสมขึ้น สำหรับเปลี่ยนแปลงค่า Turbulent intensity พบว่าค่า Turbulent intensity ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Mixture fraction กระจายตัวได้ดี ปัจจัยที่สำคัญคือเทอมของการแพร่ที่มีค่ามากขึ้นซึ่งจะสังเกตได้จากรูปร่างของกราฟที่มีรูปร่างกลมขึ้น พฤติกรรมดังกล่าวจะกลับกันในกรณีที่ค่า Turbulent intensity ลดลง จากการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยการเทียบกับผลการทดลองที่มีสภาวะ Re และค่าสัดส่วนระหว่าง

มวลเชื้อเพลิงกับมวลอากาศเดียวกันพบว่าค่าเหมาะสมที่นำมาใช้คือ การกระจายความเร็วที่ทางเข้าแบบไม่สม่ำเสมอและค่า Turbulent intensity เท่ากับ 0.9250 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นที่น่าพอใจ

7. ภาคผนวก

สัดส่วนเชื้อเพลิงผสมและคุณสมบัติ

CH_4 27% CO_2 8% N_2 4%

H_2 55% CO 4% C_2H_6 and other 2%

-สัดส่วนระหว่างมวลเชื้อเพลิงกับมวลอากาศที่ทำปฏิกิริยา

พอดี: 10.59

-Calorific Value: 2.63×10^4 kJ/kg

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] H.K. Versteeg and W. Malalasekera, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method", Longman Scientific & Technical, 1995.
- [2] R. Stephen, "An Introduction To Combustion", McGraw-Hill, Inc, 1996.
- [3] F.C. Lockwood, F.M.El-Mahallawy and D.B. Spalding, "An Experimental and Theoretical Investigation of Turbulent Mixing in a Cylindrical Furnace", Combustion and Flame, Vol.23, pp.283-293, (1974).
- [4] G. David, J. Philip and L.Douglas Smoot, "Modeling of Swirl in Turbulent Flow Systems, Prog Energy Combust. Sci.1986, Vol 12, pp 163-250.
- [5] S.M.A. Rizvi, "Prediction of Flow Combustion and Heat Transfer in Pulverized Coal Flames", Ph.D. Thesis, University of London, (1985).

ประวัติผู้เขียน

นายนิวัฒน์ นาคะโยธินสกุล เกิดเมื่อวันที่ 21 กันยายน พ.ศ. 2513 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล (เกียรตินิยมอันดับ 2) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2533 ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ “ผลกระทบของสภาวะที่ทางเข้าต่อการผสมแบบปั่นป่วนในเตาเผาทรงกระบอก” วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ปีที่ 17, ฉบับที่ 4, 2543 ประสบการณ์การทำงานในปี 2534 - 2540 ตำแหน่งวิศวกรอาวุโสออกแบบและติดตั้งงานระบบปรับอากาศสุขาภิบาลตามโครงการต่างๆ ปี 2543-2543 หัวหน้าฝ่ายวางแผนของ Combustion Group (CG) ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี 2543 - ปัจจุบัน ตำแหน่งวิศวกรงานระบบ Environmental Control System “โครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเหนือ” ของ กิจการร่วมค้า ไอ โอ เอ็น

