



แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาวัสดุพูนชนิดเหนียวนำอากาศด้วยตัวเอง

นายเอนก บุญกว้าง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปีการศึกษา 2556

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเหวักสุพรรณชนิดเหนียวนำอากาศด้วยตัวเอง

นายเอนก บุญกว้าง วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ดร.อมรรัตน์ แก้วประดับ)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ศ. ดร.สำเริง จักรใจ)

..... กรรมการ

(ผศ. ดร.กนกกาญจน์ ว่องวัชรพร)

..... กรรมการ

(ดร.อุษา มากมูล)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาวัสดุพูนชนิดเหนียวนำอากาศด้วยตัวเอง
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายเอนก บุญกว้าง
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศ. ดร. สำเริง จักรใจ
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

โดยปกติแล้วหัวเผาวัสดุพูนชนิดเหนียวนำอากาศด้วยตัวเอง (SPMB) ทำงานที่สภาวะการเผาไหม้ไอดีหนา (Rich condition) เนื่องจากข้อจำกัดของปริมาณการเหนียวนำอากาศส่วนแรก (Primary aeration) กระบวนการเหนียวนำอากาศของเจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซเป็นผลมาจากกระบวนการถ่ายโอนโมเมนตัมระหว่างเจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซความเร็วสูงกระทำต่ออากาศที่อยู่หนึ่งที่สภาวะความดันบรรยากาศบริเวณทางเข้าท่อผสม (Mixing tube) จากข้อจำกัดดังกล่าวทำให้เปลวไฟส่วนที่สอง (Post flame) ของหัวเผาวัสดุพูนชนิดเหนียวนำอากาศด้วยตัวเองค่อนข้างยาว ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาหัวเผาวัสดุพูนชนิดเหนียวนำอากาศด้วยตัวเองโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical simulation) เพื่อให้เข้าใจถึงสมรรถนะของหัวเผาและรายงานผลการศึกษาในรูปของประสิทธิภาพ ใช้การศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบ 1 dimensional volume-average approach และ local thermal non-equilibrium พร้อมกับการจำลองในส่วนของเจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซโดยการประยุกต์ทฤษฎีพื้นฐานของเจ็ต (basic jet theorem) ใช้เทคนิคของ Schvab-Zelovich Transformation ของเจ็ตทรงกระบอกแลมินาร์ที่พุ่งสู่อากาศนิ่ง อัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิง LPG ใช้สมการ single-step Arrhenius การเผาไหม้ส่วนแรกสามารถเสถียรอยู่ได้ในวัสดุพูน (Al_2O_3) ดังนั้นประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของการหมุนเวียนความร้อนของวัสดุพูน โดยกระบวนการ

หมุนเวียนความร้อนจากทางด้าน Downstream ไปสู่ทางด้าน Upstream ผ่านทางการนำความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุพูน ส่วนไอดีที่ถูกป้อนเข้าห้องเผาไหม้ที่อุณหภูมิบรรยากาศจะถูกยกระดับพลังงานความร้อนสัมผัส (Sensible enthalpy) ก่อนการกระบวนการเผาไหม้ โดยการพาความร้อนระหว่างของแข็งกับก๊าซส่งผลให้อุณหภูมิการเผาไหม้มากกว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ทางทฤษฎี ผลการจำลองพบว่า การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนทางด้าน Downstream ระหว่างการจำลองกับการทดลอง มีความสอดคล้องกันเป็นที่น่าสนใจ และโครงสร้างทางความร้อนจากการจำลองและการทดลองในส่วน ของวัสดุพูนได้ผลลัพธ์และแนวโน้มสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ส่วนของการเผาไหม้เจ็ทเชื้อเพลิงก๊าซได้มีการ แสดงผลการจำลองของการกระจายตัวตามแนว Axial และแนว Radial เช่น โครงสร้างของอุณหภูมิ เศษส่วนมวลของเชื้อเพลิง อากาศ และผลิตภัณฑ์ (ทั้งภายนอกและภายในเปลวไฟ) เป็นต้น

คำสำคัญ : หัวเผาวัสดุพูนชนิดเหนียวนำอากาศด้วยตัวเอง / อากาศส่วนแรก / สภาวะการเผาไหม้ไอดี
 หนา

Thesis Title	Numerical Simulation of a Self-aspirating Porous Medium Burner
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Anek Bunkwang
Thesis Advisor	Prof. Dr. Sumrerng Jugjai
Program	Master of Engineering
Field of Study	Mechanical Engineering
Department	Mechanical Engineering
Faculty	Engineering
Academic Year	2013

Abstract

A self-aspirating porous medium burner (SPMB) always operates on the rich conditions limiting by primary air aeration. The primary air entrainment is accomplished by the naturally entrained effect of momentum transferred (inlet region of mixing tube) between high velocity fuel jet on quiescent ambient air at the atmospheric pressure. As aforementioned restriction, the post flames of SPMB are quite a long length. Consequently, this paper deals with the numerical simulation on SPMB and the burner performances is analyzed and reported in term of efficiencies. The simulation of SPMB is analyzed using one dimensional, volume-average approach and local thermal non-equilibrium model coupling with adopting the basic jet theorem (Composite Variable by Schvab-Zelovich Transformation) on cylindrical laminar jet in case of the combustion of free jet of fuel issuing into quiescent air. The rate of fuel consumption is described by single-step Arrhenius rate equation and liquefied petroleum gas (LPG) is served as fuel. The flame locations of SPMB can be anchored inside the packed bed of Al_2O_3 pellets hence the combustion efficiency is enhanced by the effect of energy recirculation. Heat recuperation is occurred at the upstream porous media via solid conduction and solid-to-solid radiation for raising the

sensible enthalpy of cold incoming LPG-air mixture by solid-to-gas convection, yielding in enhanced flame speed and local flame temperature above adiabatic flame temperature. The results indicate that the comparisons with the output radiant efficiency and the experiment are agreeable. The temperature profiles throughout porous section predicted by simulation result and trend agree with the experiments. In addition, the distribution profiles of jet modeling such as axial and radial temperatures, mass fractions of fuel, oxygen and products (inside and outside flame route) are also presented.

Keywords: Self-aspirating porous medium burner / Primary air entrainment / Rich condition

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำเร็จลง โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย รวมทั้งเอกสาร ตำราและบทความที่ใช้ประกอบการค้นคว้าวิจัยและอ้างอิง ทำให้เกิดแนวคิดในการวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.สำเริง จักรใจ ซึ่งเป็นเมธีวิจัย ดร.อมรรัตน์ แก้วประดับ และ ผศ.ดร.กนกกาญจน์ ว่องวัชรพร ซึ่งเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้สละเวลาในการให้คำแนะนำปรึกษา ตรวจสอบความถูกต้องตาม จุดประสงค์ของขอบเขตการวิจัย พร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางแก้ไขเพื่อให้วิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ท้ายสุดขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโท ปริญญาเอก และพนักงานวิจัยที่ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์และการเผาไหม้ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำช่วยเหลือในงานวิจัยตลอดมา และกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้องทุกคนที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือทางด้านทุนทรัพย์ งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	๖
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๗
กิตติกรรมประกาศ	๘
สารบัญ	๙
รายการตาราง	๑๐
รายการรูปประกอบ	๑๑
รายการสัญลักษณ์	๑๒
ประมวลศัพท์และคำย่อ	๑๓

บทที่

1	บทนำ	1
1.1	ที่มาและความสำคัญ	1
1.2	วัตถุประสงค์	2
1.3	ขอบเขตของงานวิจัย	2
2	ผลงานวิจัยที่ผ่านมา	3
3	หลักการและทฤษฎี	7
3.1	สมมุติฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	7
3.2	สมการที่เกี่ยวข้องในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	8

หน้า

3.2.1	สมการสำหรับแบบจำลองที่ 1 (Porous domain)	8
3.2.2	สมการการคำนวณที่เกี่ยวข้องในรูปสมการไร้มิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับส่วนวัสดุพรุน (Porous domain)	10
3.2.3	สมการ Local Energy Balance และ Global Energy Balance	11
3.2.4	สมการสำหรับแบบจำลองที่ 2 (Jet Domain)	13
3.2.5	สมการการคำนวณ Net Radiative Heat Flux ของเปลวไฟ	22
4	ขั้นตอนและวิธีที่ใช้ในการแก้สมการ	25
4.1	Finite Difference Method	25
4.2	สมการ Finite Difference ของส่วนของวัสดุพรุน (Porous domain)	27
4.3	กลุ่มสมการไร้มิติที่ใช้ในการพิจารณาประสิทธิภาพในส่วนวัสดุพรุน (Porous domain)	28
4.4	สมการที่ใช้จำลองของส่วนการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ (Jet domain)	29
4.5	วิธีการคำนวณ	31
5	ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	33
5.1	ผลจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของวัสดุพรุน (Porous domain)	34
5.1.1	การเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างทางความร้อนจากการทดลองกับการจำลองทาง คณิตศาสตร์ของหัวเผาวัสดุพรุนที่เหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง	34
5.1.2	Local Energy Balance ของระบบหัวแบบวัสดุพรุนที่เหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง	35
5.1.3	Radiative Heat Flux ของระบบหัวแบบวัสดุพรุนที่เหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง	35
5.1.4	การเปรียบเทียบโครงสร้างทางความร้อนของผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ Firing rate ต่างๆ	36
5.1.5	ประสิทธิภาพทางความร้อนของหัวเผาวัสดุพรุนแบบเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง	36
5.1.6	อิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อโครงสร้างทางความร้อนภายในระบบหัวเผาวัสดุพรุน แบบเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง	37

5.2	ผลจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ (Jet domain) 40 kW	49
5.2.1	เปรียบเทียบความยาวของเปลวไฟตามแนวแกน Axial ของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ	49
5.2.2	การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ	49
5.2.3	อิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อโครงสร้างทางความร้อนต่อการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ ที่ผ่านสู่อากาศนิ่ง	50
6	สรุปและข้อเสนอแนะ	58
6.1	สรุปผลการศึกษา	58
6.1.1	การศึกษาส่วนแรก (Porous domain)	58
6.1.2	การศึกษาส่วนที่สอง (Jet domain)	59
6.2	ข้อเสนอแนะ	59
	เอกสารอ้างอิง	60
	ภาคผนวก	
ก	อุปกรณ์และผลการทดลอง	63
ข	ตัวอย่างการคำนวณ	71
ค	ผลของการคำนวณด้วยโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาวัสดุพูนแบบ เหนียวนำอากาศด้วยตัวเอง	86
ง	โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาวัสดุพูนแบบเหนียวนำอากาศด้วยตัวเอง	111
	ประวัติผู้วิจัย	179

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 Mean beam lengths for gas-surface exchange	23
5.1 Burner physical properties	33
ก.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Firing rate และ Primary aeration ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดเท่ากับ 1.5 มม.	64
ก.2 แสดง Output radiation efficiency และ Radiative heat loss ของ Free flame	64
ข.1 ข้อมูลของสารที่สภาวะอ้างอิงมาตรฐาน 25 °C (298 K)	73
ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Kp กับอุณหภูมิตามคำแนะนำของเอกสารอ้างอิงที่ [11]	74

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 แสดงอุปกรณ์การทดลองของวสันต์	5
2.2 แสดงแบบจำลองการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกของอกินันต์	6
3.1 ลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	7
3.2 Hemisphere filled with isothermal gas	22
4.1 ตำแหน่งตัวแปรที่ใช้ในวิธี Implicit Finite Difference	26
4.2 นิยามของ Preheat zone และ Reaction zone	28
4.3 โครงสร้างของเจ็ตเปลวไฟทรงกระบอก	29
4.4 ลำดับขั้นตอนการแก้ระบบสมการ	32
5.1 โครงสร้างทางความร้อนภายในหัวเผาวัสดุพูนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (FR = 40 kW)	38
5.2 Local energy balance of gas phase ของหัวเผาในส่วนวัสดุพูน (FR = 40 kW)	38
5.3 Local energy balance of solid phase ของหัวเผาในส่วนวัสดุพูน (FR = 40 kW)	39
5.4 Radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพูน (FR = 40 kW)	39
5.5 Divergence of net radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพูน (FR = 40 kW)	40
5.6 การเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างทางความร้อนภายในหัวเผาวัสดุพูนจากการทดลองกับการจำลองทางคณิตศาสตร์ (FR = 23 kW)	40
5.7 การเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างทางความร้อนภายในหัวเผาวัสดุพูนจากการทดลองกับการจำลองทางคณิตศาสตร์ (FR = 40 kW)	41
5.8 การเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างทางความร้อนภายในหัวเผาวัสดุพูนจากการทดลองกับการจำลองทางคณิตศาสตร์ (FR = 61 kW)	41
5.9 การเปรียบเทียบโครงสร้างอุณหภูมิก๊าซของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ Firing rate ต่างๆ	42
5.10 การเปรียบเทียบโครงสร้างอุณหภูมิของแข็งของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ Firing rate ต่างๆ	42
5.11 การเปรียบเทียบ Net Radiative Heat Flux ของการจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ Firing rate ต่างๆ	43
5.12 ประสิทธิภาพการหมุนเวียนความร้อนของหัวเผาวัสดุพูนส่วน Preheat zone	43
5.13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนของหัวเผาทางด้าน Downstream	44
5.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนของหัวเผาทางด้าน Upstream	44
5.15 อิทธิพล Equivalence ratio ต่อโครงสร้างอุณหภูมิก๊าซในหัววัสดุพูน	45
5.16 อิทธิพล Equivalence ratio ต่อโครงสร้างอุณหภูมิของแข็งในหัววัสดุพูน	45

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
5. 17 อิทธิพล Firing rate ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิก๊าซในหัวเผาวัสดุพูน	46
5.18 อิทธิพล Firing rate ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิของแข็งในหัวเผาวัสดุพูน	46
5.19 อิทธิพล Optical thickness ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิก๊าซในหัวเผาวัสดุพูน	47
5.20 อิทธิพล Optical thickness ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิของแข็งในหัวเผาวัสดุพูน	47
5.21 อิทธิพล Ambient oxygen content ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิก๊าซในหัวเผาวัสดุพูน	48
5.22 อิทธิพล Ambient oxygen content ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิของแข็งในหัวเผาวัสดุพูน	48
5.23 เปรียบเทียบความยาวของเปลวไฟตามแนวแกน Axial ของการเผาไหม้เจ็ดเชื้อเพลิงก๊าซ (FR = 40 kW)	51
5.24 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้เจ็ดเชื้อเพลิงก๊าซ ที่ X=0.15 m (FR = 40 kW)	51
5.25 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้เจ็ดเชื้อเพลิงก๊าซ ที่ X=1.2 m (FR = 40 kW)	52
5.26 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้เจ็ดเชื้อเพลิงก๊าซ ที่ X=2.25 m (FR = 40 kW)	52
5.27 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้เจ็ด เชื้อเพลิงก๊าซ (FR = 40 kW)	53
5.28 เปรียบเทียบความยาวของเปลวไฟตามแนวแกน Axial ของการเผาไหม้เจ็ดเชื้อเพลิงก๊าซ (FR = 23 kW)	53
5. 29 เปรียบเทียบความยาวของเปลวไฟตามแนวแกน Axial ของการเผาไหม้เจ็ดเชื้อเพลิงก๊าซ (FR = 40 kW)	54
5.30 เปรียบเทียบความยาวของเปลวไฟตามแนวแกน Axial ของการเผาไหม้เจ็ดเชื้อเพลิงก๊าซ (FR = 61 kW)	54
5.31 โครงสร้างทางความร้อนตามแนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลางการเผาไหม้เจ็ดเชื้อเพลิงก๊าซ	55
5.32 อิทธิพล Equivalence ratio ต่อ โครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้เจ็ดเชื้อเพลิงก๊าซ ตามแนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลาง	55
5.33 อิทธิพล Firing rate ต่อ โครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้เจ็ดเชื้อเพลิงก๊าซ ตามแนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลาง	56

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
5.34 อิทธิพล Optical thickness ต่อโครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซตามแนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลาง	56
5.35 อิทธิพล Ambient oxygen content ต่อโครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซตามแนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลาง	57
ก.1 โครงสร้างทางความร้อนภายในหัวเผาวัสดุพูนแบบเหนียวนำอากาศด้วยตัวเอง	65
ก.2 ภาพถ่ายเปลวไฟ ณ เวลาใดๆที่ค่า Firing rate ต่างๆ	65
ก.3 Alumina spheres with particle diameter of $d = 0.015$ m (porous medium)	66
ก.4 ภาพร่างแสดงมิติของหัวเผาสำหรับส่วนของวัสดุพูนของ SPMB	66
ก.5 ภาพถ่ายหัวเผาวัสดุพูนแบบเหนียวนำอากาศด้วยตัวเอง (SPMB)	67
ก.6 Emissivity of carbon monoxide	67
ก.7 Emissivity of carbon dioxide	68
ก.8 Emissivity of water vapor	69
ก.9 Planck-mean absorption coefficient for carbon dioxide and water vapor	70
ก.10 Planck-mean absorption coefficient for carbon monoxide, methane and nitric oxide	70
ข.1 แสดงวิธีการหาตำแหน่งทางเดินเปลวไฟโดยวิธีการกราฟ	83
ข.2 แสดงตำแหน่งทางเดินเปลวไฟ	84
ข.3 แสดงอุณหภูมิเปลวไฟทางทฤษฎีของ LPG	84
ข.4 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเปลวไฟทางทฤษฎีกับอุณหภูมิการทดลองของ LPG	85
ค.1 การเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างทางความร้อนภายในหัวเผาจากการทดลองกับการจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพูน (FR = 23 kW)	87
ค.2 Local energy balance of gas phase ของหัวเผาในส่วนวัสดุพูน (FR = 23 kW)	87
ค.3 Local energy balance of solid phase ของหัวเผาในส่วนวัสดุพูน (FR = 23 kW)	88
ค.4 Radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนวัสดุพูน (FR = 23 kW)	88
ค.5 Divergence of net radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนวัสดุพูน (FR = 23 kW)	89
ค.6 เปรียบเทียบความยาวของเปลวไฟตามแนวแกน Axial ของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ (FR = 23 kW)	89

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
ค.7 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้ เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซที่ $X=0.15$ m (FR = 23 kW)	90
ค.8 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้ เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซที่ $X=0.83$ m (FR = 23 kW)	90
ค.9 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้ เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซที่ $X=1.5$ m (FR = 23 kW)	91
ค.10 การเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างทางความร้อนภายในหัวเผาจากการทดลองกับ การจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพอร์น (FR = 40 kW)	91
ค.11 Local energy balance of gas phase ของหัวเผาในส่วนวัสดุพอร์น (FR = 40 kW)	92
ค.12 Local energy balance of solid phase ของหัวเผาในส่วนวัสดุพอร์น (FR = 40 kW)	92
ค.13 Radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนวัสดุพอร์น (FR = 40 kW)	93
ค.14 Divergence of net radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนวัสดุพอร์น (FR = 40 kW)	93
ค.15 เปรียบเทียบความยาวของเปลวไฟตามแนวแกน Axial ของการเผาไหม้ เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ (FR = 40 kW)	94
ค.16 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้ เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซที่ $X=0.15$ m (FR = 40 kW)	94
ค.17 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้ เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซที่ $X=1.2$ m (FR = 40 kW)	95
ค.18 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้ เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซที่ $X=2.25$ m (FR = 40 kW)	95
ค.19 การเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างทางความร้อนภายในหัวเผาจากการทดลองกับ การจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาในส่วนวัสดุพอร์น (FR = 60 kW)	96
ค.20 Local energy balance of gas phase ของหัวเผาในส่วนวัสดุพอร์น (FR = 60 kW)	96
ค.21 Local energy balance of solid phase ของหัวเผาในส่วนวัสดุพอร์น (FR = 60 kW)	97
ค.22 Radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนวัสดุพอร์น (FR = 60 kW)	97
ค.23 Divergence of net radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนวัสดุพอร์น (FR = 60 kW)	98

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
ค.24 เปรียบเทียบความยาวของเปลวไฟตามแนวแกน Axial ของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ (FR = 60 kW)	98
ค.25 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ ที่ X=0.15 m (FR = 60 kW)	99
ค.26 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ ที่ X=1.7 m (FR = 60 kW)	99
ค.27 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ ที่ X=3.27 m (FR = 60 kW)	100
ค.28 อิทธิพล Firing rate ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิก๊าซในหัววัสดุพูน	100
ค.29 อิทธิพล Firing rate ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิของแข็งในหัววัสดุพูน	101
ค.30 อิทธิพล Firing rate ต่อ โครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ ตามแนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลาง	101
ค.31 อิทธิพล Firing rate ต่อ Radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพูน	102
ค.32 อิทธิพล Firing rate ต่อ Divergence of net radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพูน	102
ค.33 อิทธิพล Equivalence ratio ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิก๊าซในหัววัสดุพูน	103
ค.34 อิทธิพล Equivalence ratio ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิของแข็งในหัววัสดุพูน	103
ค.35 อิทธิพล Equivalence ratio ต่อ โครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ ตามแนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลาง	104
ค.36 อิทธิพล Equivalence ratio ต่อ Radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพูน	104
ค.37 อิทธิพล Equivalence ratio ต่อ Divergence of net radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพูน	105
ค.38 อิทธิพล Optical thickness ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิก๊าซในหัววัสดุพูน	105
ค.39 อิทธิพล Optical thickness ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิของแข็งในหัววัสดุพูน	106
ค.40 อิทธิพล Optical thickness ต่อ โครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ ตามแนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลาง	106
ค.41 อิทธิพล Optical thickness ต่อ Radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพูน	107

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
ค.42	อิทธิพล Optical thickness ต่อ Divergence of net radiative heat flux ของห้วเผาในส่วนของวัสดุพูน	107
ค.43	อิทธิพล Ambient oxygen content ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิของแข็งในห้วเผาวัสดุพูน	108
ค.44	อิทธิพล Ambient oxygen content ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิของแข็งในห้วเผาวัสดุพูน	108
ค.45	อิทธิพล Ambient oxygen content ต่อ โครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ ตามแนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลาง	109
ค.46	อิทธิพล Ambient oxygen content ต่อ Radiative heat flux ของห้วเผาในส่วนของวัสดุพูน	109
ค.47	อิทธิพล Ambient oxygen content ต่อ Divergence of net radiative heat flux ของห้วเผาในส่วนของวัสดุพูน	110
ค.48	เปรียบเทียบความยาวเปลวไฟและความเข้มการแผ่รังสีของเปลวไฟ	110

รายการสัญลักษณ์

A	=	Pre-exponential factor	
b	=	Composite variable	
C	=	Specific heat capacity at Constant Pressure	[J/kg K]
$Cd_{\text{eff-g}}$	=	Thermal Conductivity Ratio between Solid and Gas	[-]
D	=	Diffusivity of gas	[m ² /s]
d	=	Diameter	[m]
E_n	=	Exponential Integral Function	[-]
F	=	Fuel	[kg]
F_i	=	View Factor	[-]
f	=	Mass ratio between fuel and oxygen	[-]
ΔH	=	Heating value	[J/kg]
h	=	Enthalpy	[J/kg]
h_v	=	Volumetric heat transfer coefficient	[W/m ³ K]
$h_{i,f}^o$	=	Heat of Formation of Species i	[J/kg]
I_0	=	Intensity of Radiation on Inlet Plane	[W/m ²]
I_b	=	Black Body Radiation Intensity	[W/m ²]
I_e	=	Intensity of Radiation on Outlet Plane	[W/m ²]
MP_v	=	Volumetric Nusselt Number	[-]
Nr_g	=	Conduction Radiation Parameter	[-]
O	=	Oxygen	[kg/kmol]

n_p	=	Number Density of Particle	$[m^{-3}]$
Pr	=	Prandtl Number	$[-]$
$\dot{Q}$	=	Radiative heat flux	$[W]$
$\dot{q}'''$	=	Heat of combustion	$[W/s\ m^3]$
q_r	=	Radiative Heat Flux	$[W/m^2]$
R	=	Universal Gas Constant	$[J/kmol\ K]$
R, r	=	Radius	$[m]$
Re	=	Reynolds Number	$[-]$
S	=	Dimensionless Time Domain	$[-]$
t	=	Time	$[s]$
T	=	Temperature	$[K]$
T_o	=	Ambient Temperature	$[K]$
u	=	Axial velocity	$[m/s]$
x	=	Distance	$[m]$
x_B	=	Length of Porous Burner	$[m]$
$W, \dot{W}'''$	=	Production Rate of Species or Sink Term	$[kg/s\ m^3]$
X	=	Dimensionless Distance	$[-]$
y	=	Mass Fraction of Species	$[-]$
θ	=	Dimensionless Temperature	$[-]$
ϵ	=	Porosity or Emissivity or Turbulent eddy diffusivity	$[-]$

κ	=	Absorption Coefficient	$[\text{m}^{-1}]$
λ, k	=	Thermal Conductivity	$[\text{W/m K}]$
μ	=	Dynamic Viscosity	$[\text{kg/m s}]$
ν	=	Kinematic Viscosity, Molecular diffusivity	$[\text{m}^2/\text{s}]$
ρ	=	Density	$[\text{kg/m}^3]$
ρ^d	=	Reflective fraction	$[-]$
σ	=	Stefan –Boltzmann Constant	$[\text{W/m}^2\text{K}^4]$
Φ	=	Equivalence Ratio	$[-]$
Γ	=	Thermal Capacity Ratio	$[-]$
τ	=	Optical Thickness = κx	$[-]$
τ_e	=	Total Optical Thickness	$[-]$
δ	=	Boundary	$[-]$
ν	=	Radial velocity	$[\text{m/s}]$

สัญลักษณ์กำกับบน

+	=	Positive Direction
-	=	Negative Direction
n	=	Net
r	=	Radiation

สัญลักษณ์กำกับล่าง

Avg = Average

g = Gas

s = Solid

sg = Solid to Gas

0,i = Initial

B = Black Body

C = Combustion

Eff = Effective

E = Exit

F = Fuel

O, O ∞ = Oxidizer

P = Product of Combustion

r, rad = Radiation

T = Temperature

∞ = Infinity

JetTip = End of Jet Combustion

ประมวลศัพท์และคำย่อ

CB	=	Convectional Burner
SPMB	=	Self-aspirating Porous Medium Burner
CV	=	Dimensionless Convection
CD	=	Dimensionless Conduction
INT	=	Dimensionless Interaction
RR	=	Reaction Rate
Y	=	Mass Fraction
H	=	Dimensionless Radiative Heat Flux
DHT	=	Divergence of Net Radiative Heat Flux

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันนี้ ประชากรในประเทศหันมาใช้เชื้อเพลิงก๊าซมากขึ้น[1] เนื่องจากที่ใช้ในการหุงต้มอาหารหรือการใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ในสภาวะความดันบรรยากาศเพื่อจุดประสงค์อื่นๆ แล้ว ในปัจจุบันยังนำมาใช้ในการเผาไหม้ในสภาวะสูงกว่าความดันบรรยากาศด้วย ตัวอย่างเช่นการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ เป็นต้น ซึ่งการเผาไหม้ทั้งในสภาวะความดันบรรยากาศและในสภาวะสูงกว่าความดันบรรยากาศนั้น ย่อมมีการปล่อยก๊าซไอเสียออกมาทั้งสิ้น ซึ่งก๊าซไอเสียนั้นถ้ารวมตัวกันมากๆ เมื่อสัมผัสกับแสงแดดและอากาศภายนอกจะส่งผลกับสภาวะบรรยากาศโลก ยกตัวอย่างเช่น ภาวะเรือนกระจกและ ฝนกรด เป็นต้น การวิจัยและพัฒนาระบบการเผาไหม้ของหัวเผาให้มีประสิทธิภาพสูงเพื่อลดปริมาณไอเสียที่จะถูกปล่อยสู่บรรยากาศ และให้ได้มาซึ่งการใช้พลังงานเชื้อเพลิงให้คุ้มค่าที่สุดที่สุดก็เป็นการช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ โดยระบบการเผาไหม้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ก็คือการเผาไหม้ภายในวัสดุพอร์น เนื่องจากการเผาไหม้ในวัสดุพอร์นทำให้เกิดการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อน (Heat - Recirculation Combustion) ได้ด้วยตัวเอง ซึ่งลักษณะเด่นของวัสดุพอร์น (Porous Medium) คือมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ทำให้ส่งผลดีต่อการถ่ายเทความร้อนทั้งการนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดการอุ่นอากาศก่อนเกิดการเผาไหม้ (Air Preheating) ทำให้การเผาไหม้ภายในวัสดุพอร์นนั่นช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ภายในตัวเองจาก Downstream ไปยังด้าน Upstream ทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์มากขึ้น สามารถให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่าทางทฤษฎี และส่งผลให้เกิดเปลวไฟแบบซูเปอร์อะเดียแบติก (Super adiabatic flame) ทำให้ความเร็วในการเผาไหม้ (Burning Velocity) เพิ่มขึ้น ความเข้มของการเผาไหม้ (Combustion Intensity) สูง นั้นหมายความว่าขนาดห้องเผาไหม้ (Combustion Chamber) จะมีขนาดเล็กลง ความเข้มของการแผ่รังสีมาก ดังนั้นอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จึงสูงสม่ำเสมอ ขยายช่วงการทำงานให้สามารถเผาไหม้ที่สภาวะเจือจาง (Lean) มากเกินกว่า Flammability Limits หรือสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำที่ไม่สามารถเผาไหม้ในเตาทั่วไปได้ อีกทั้งมลพิษที่ปลดปล่อยก็มีค่าต่ำ

จากข้อดีดังกล่าว จึงเป็นที่มาของหัวข้อวิทยานิพนธ์ “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของห้วเผาวัสดุพูนชนิดเหนียวนำอากาศด้วยตัวเอง” ซึ่งจำเป็นต่อการศึกษาและเข้าใจถึงปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน (การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน) ของวัสดุพูน ตลอดจนอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อโครงสร้างทางความร้อนของระบบการเผาไหม้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในระบบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงก๊าซในเตาวัสดุพูนที่เหนียวนำอากาศเผาไหม้ด้วยตัวเอง

1.2.2 ศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อโครงสร้างทางความร้อนของระบบ เช่น อุณหภูมิก๊าซ อุณหภูมิของแข็ง เป็นต้น พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่มีอยู่แล้ว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ออกแบบและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงก๊าซในห้วเผาวัสดุพูน

1.3.2 ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองที่มีอยู่

บทที่ 2

ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

การเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซที่ผ่านมาเป็นการเผาไหม้แบบสถานะเดี่ยว (Single Phase) ซึ่งก็คือ ก๊าซและเป็นแบบไหลทิศทางเดียว (One Way Flow) ซึ่งนับได้ว่าเป็นการเผาไหม้แบบเก่าซึ่งได้รับความนิยมน้อย หรือล้าสมัยแก่การใช้งานอีกต่อไปในปัจจุบันเพราะว่ามีจุดอ่อนมากมาย เช่น การถ่ายเทความร้อนในเปลวไฟถูกควบคุมโดยการนำความร้อน (Heat Conduction) แต่เพียงอย่างเดียว ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าต่ำ เกิดการสูญเสียความร้อนเป็นอย่างมาก โดยการพาความร้อนไปกับก๊าซไอเสียซึ่งไหลออกจากเตาด้วยความเร็วสูง เป็นต้น สำหรับเทคนิคที่นำมาใช้ช่วยส่งเสริมกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซในปัจจุบันนี้คือการนำวัสดุพอร์มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการเผาไหม้ซึ่งเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป และได้มีการศึกษาอย่างจริงจัง ทั้งทางด้านการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยวัสดุพอร์จะก่อให้เกิดการหมุนเวียนความร้อนภายในระบบ ซึ่งมีข้อดีคือมีการหมุนเวียนความร้อนจากก๊าซไอเสียทางด้าน Downstream กลับไปอุ่นส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงทางด้าน Upstream โดยการแผ่รังสีความร้อน และการนำความร้อนภายในเนื้อวัสดุพอร์ ทำให้ได้คุณลักษณะการเผาไหม้เป็นแบบ Excess Enthalpy Flame [2,3] ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่าของเปลวไฟแบบปกติ (Conventional Open Premixed Flame) ที่สภาวะเดียวกันการเผาไหม้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ความเร็วการเผาไหม้ (Burning Velocity) [6] และค่าความเข้มของการเผาไหม้ (Combustion Intensity) ที่สูงขึ้น รวมถึงค่าความเข้มของการแผ่รังสีความร้อน (Radiative Heat Flux) ที่สูง [4] และยังช่วยขยายขอบเขตการเผาไหม้ (Flammability Limits) ได้กว้างขึ้น

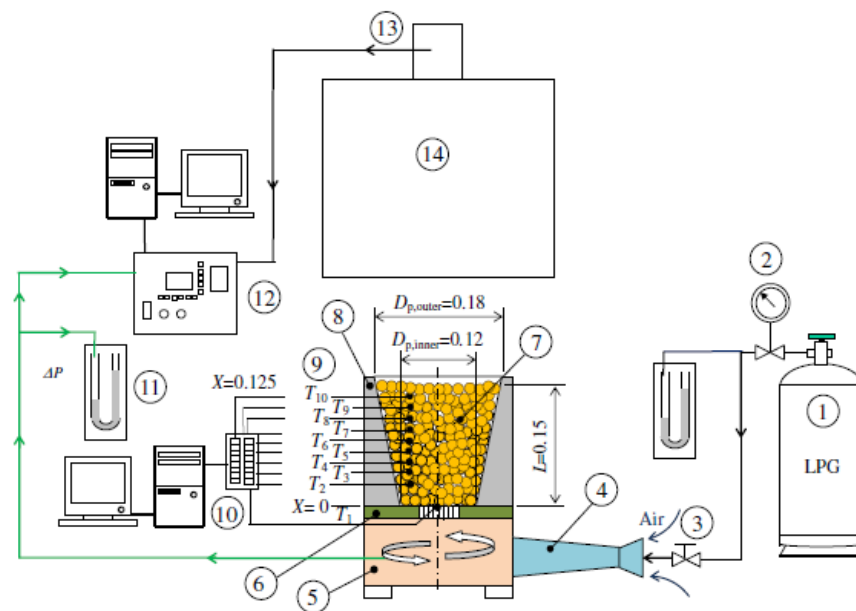
Yoshizawa และ Echico [5] ได้ทำการศึกษาถึงผลของการแผ่รังสีในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้วัสดุพอร์ (Porous Medium) เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและพลังงานที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้จะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานการแผ่รังสีความร้อน วัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้ก็เพื่อพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน (Radiant Heater) ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น โดยการพยายามทำให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนนั้นสามารถที่จะเปลี่ยนพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ทั้งหมดไปเป็นพลังงานการแผ่รังสีความร้อนโดยอาศัยหลักการของวัสดุพอร์ ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้จะประกอบไปด้วยส่วนหลัก ๆ 2 ส่วนคือ หัวเผา (Burner) และ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ซึ่งจากการทดลองทำให้ทราบว่า อุณหภูมิภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความ

ร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน โดยส่วนใหญ่จะถูกควบคุมโดยการแผ่รังสีความร้อนจากตัวของวัสดุพอร์น ดังนั้นจากการทดลองนี้ทำให้สามารถสรุปได้ว่าค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ไปเป็นพลังงานการแผ่รังสีความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดถึง 88%

Barra และ Ellzey [6] ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในหัวเผาแบบวัสดุพอร์น (Porous radiant burner) ซึ่งตำแหน่งการเผาไหม้นั้นเกิดขึ้นบริเวณด้านในวัสดุพอร์น โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะเป็นแบบ 1 มิติ การคิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นแบบ Multi-step chemical kinetics และใช้เชื้อเพลิงมีเทน (Methane) ในการจำลอง โดเมนของแบบจำลองมีสองค่าความพอร์น (Porosity) โดยที่ค่าทางด้านต้นน้ำ (Upstream) จะมีค่าความพอร์นน้อยกว่าเมื่อเทียบกับทางด้านปลายน้ำ (Downstream) ผลจากการจำลองพบว่าความสามารถในการลามของเปลวไฟ (Effective flame speed) เพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) เข้าใกล้ค่า Stoichiometry และค่าความสามารถในการลามของเปลวไฟสูงสุดได้รับผลกระทบจากอัตราส่วนสมมูลน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าต่ำสุด โดยที่ค่าต่ำสุดจะน้อยลงเรื่อยๆเมื่อค่าอัตราส่วนสมมูลเข้าใกล้ Stoichiometry ที่เปลวไฟยังสามารถเสถียรในวัสดุพอร์นได้ ประสิทธิภาพการหมุนเวียนความร้อน (Heat recirculation efficiency) มาทางด้านต้นน้ำมีค่าน้อยลงเมื่อค่าของอัตราส่วนสมมูลและค่าความสามารถในการลามของเปลวไฟเพิ่มขึ้น ที่ค่าอัตราส่วนสมมูลต่ำๆ ประสิทธิภาพการหมุนเวียนความร้อนโดยแผ่รังสี (Preheat radiant efficiency) จะมีความสำคัญน้อยกว่าเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการหมุนเวียนความร้อนโดยการนำความร้อน (Preheat conduction efficiency) ในทางตรงกันข้ามที่ค่าอัตราส่วนสมมูลเข้าใกล้ค่า Stoichiometry ประสิทธิภาพการหมุนเวียนความร้อนโดยแผ่รังสีจะมีความสำคัญมากกว่าเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการหมุนเวียนความร้อนโดยการนำความร้อนของตัววัสดุพอร์นเอง ส่วนประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนไปทางปลายน้ำ (Radiant output efficiency) มีค่าลดลงเมื่อความสามารถในการลามของเปลวไฟมีค่าเพิ่มขึ้นและค่าอัตราส่วนสมมูลเข้าใกล้ค่า Stoichiometry

Yoksenakul และ Jugjai [7] ได้ทำออกแบบหัวเผาวัสดุพอร์นใหม่โดยการเปลี่ยนจากหัวเผาแบบ CB (convective gaseous fuel, free flame burners) มาเป็นหัวเผาแบบ SPMB (self-aspirating porous medium burner) โดยการออกแบบจะยังคงไว้ซึ่ง mixing tube และ fuel nozzle เดิมของหัวเผาแบบ CB ทั้งขนาดและรูปร่าง และได้ทำการศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงก๊าซ LPG กับอากาศในหัวเผาวัสดุพอร์น (SPMB) โดยที่วัสดุพอร์นที่ใช้คือ alumina spheres การคำนวณค่าความดันตกคร่อมตลอดชั้นวัสดุพอร์นที่บรรจุในหัวเผา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ alumina spheres และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเผา โดยใช้สมการของ Ergun ร่วมกับ Peclet number โดยที่หัวเผาแบบ SPMB จะให้เปลวไฟแบบฝังลงไปในตัวเผา

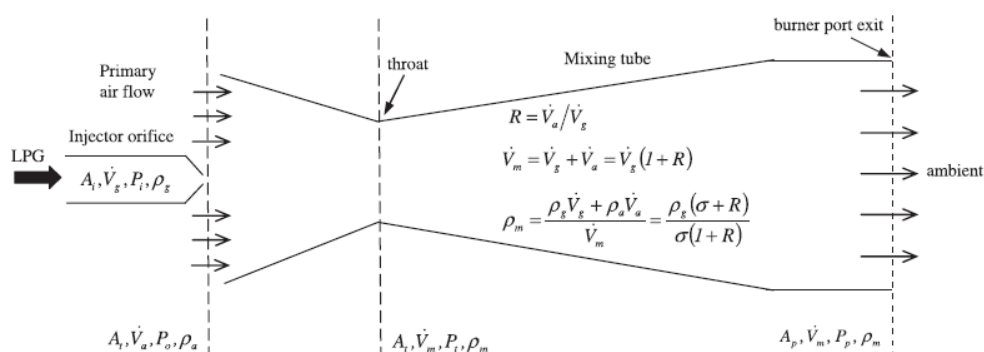
พร้อมกับให้ค่าความเข้มข้นในการแผ่รังสีจากด้าน Downstream ไปสู่ Upstream สูง ประสิทธิภาพการแผ่รังสีจากหัวเผาสูงถึง 23 % และมีช่วงการทำงานของเตาที่กว้างจาก 23 ถึง 61 Kw โดยที่ค่า Turn-down ratio เท่ากับ 2.65 หัวเผาแบบ SPMB ให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์โดยมีค่า CO น้อยกว่า 200 ppm และค่า NO_x น้อยกว่า 98 ppm ซึ่งสามารถยอมรับได้เมื่อเปรียบเทียบกับหัวเผาแบบ CB ตลอดทั้งช่วงการทำงานของหัวเผา



รูปที่ 2.1 แสดงอุปกรณ์การทดลองของวสันต์

อภินันต์ นามเขต และ ลำเรง จักรใจ [8] ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรก (Primary air entrainment characteristics) ของหัวเผาแบบ Self-aspirating ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งมีหลักการทำงานคืออาศัยเพียงเจ็ตความเร็วสูงของก๊าซที่พ่นโดยหัวฉีดก๊าซ (Injector orifice) เข้าสู่คอคออดของท่อผสม (Mixing tube) เพื่อเหนี่ยวนำอากาศเข้ามาผสมกับก๊าซเชื้อเพลิงจนสามารถให้เปลวไฟแบบผสมมาก่อน (Premixed flame) ได้โดยไม่ต้องอาศัยพัดลมช่วยตัวอย่างเช่น เตาก๊าซหุงต้ม โดยอากาศจะต้องมีปริมาณที่เพียงพอต่อการเผาไหม้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ สมการการคำนวณปริมาณอากาศส่วนแรกที่ใช้ในการเผาไหม้ (Primary air aeration) ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมพบว่าการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ชนิดของเชื้อเพลิง มิตินของหัวฉีด มิตินของท่อผสม และมิตินของหัวเผา การทดลองมี 2 แบบ คือแบบ Cold test และ Hot test การวัดอากาศส่วนแรกใช้ Oxygen sensor และ Particle Image Velocimetry System ผลจากการทดลองจะใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าที่ประมาณได้จากสมการทำนายอากาศส่วนแรกที่ได้สร้างขึ้นเพื่อความแม่นยำ จากผลการเปรียบเทียบ

พบว่ามีความสอดคล้องกัน (กรณีที่ใช้ระบบคล้ายกัน) ปริมาณของอากาศส่วนแรกจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม Momentum rate ของเชื้อเพลิงก๊าซ ค่าอากาศส่วนแรกจากผลการทดลอง Cold test จะมากกว่า Hot test อยู่ที่ 22 % เพราะว่าผลกระทบจากการอุ่นอากาศเนื่องจากระบบมีการเผาไหม้ และสำหรับการออกแบบชุดหัวเผาแบบ Self-aspirating ที่มีประสิทธิภาพสูงในอนาคตไม่ควรที่จะละเลยผลกระทบจากการอุ่นอากาศ

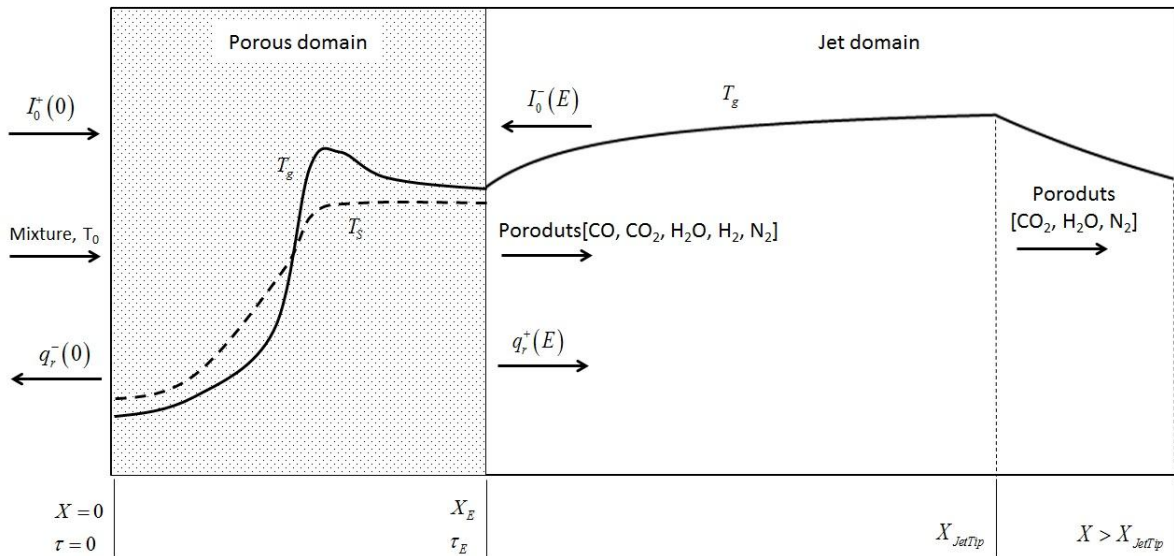


รูปที่ 2.2 แสดงแบบจำลองการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกของอกินันต์

จากงานวิจัยทั้งหมดที่กล่าวมาจึงเป็นที่มาของหัวข้อวิทยานิพนธ์เรื่อง “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาวัสดุพูนชนิดเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง” ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาและเข้าใจถึงปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน (การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน) ของวัสดุพูน ตลอดจนเข้าใจถึงอิทธิพลของ ตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อโครงสร้างทางความร้อนของระบบการเผาไหม้เตาวัสดุพูนชนิดเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎี



รูปที่ 3.1 ลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.1 สมมุติฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

- (ก) การไหลของไหลมีลักษณะไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ยุบตัวไม่ได้ (Incompressible flow) ที่สภาวะคงที่ (Steady state)
- (ข) พิจารณาการไหลและการแผ่รังสีความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพอร์นเป็นแบบ 1 มิติในแนวแกน x ความเร็วของไอดีจะสมมุติให้คงที่ตลอดหน้าตัดของหัวเผา
- (ค) ไม่คิดการแผ่รังสีความร้อนของก๊าซ (Porous domain) เนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบการแผ่รังสีความร้อนของของแข็ง
- (ง) เชื้อเพลิงและอากาศผสมกันบางส่วน (Partial Premixed) และจากนั้นก็ไหลเข้าไปเกิดการเผาไหม้ภายในวัสดุพอร์น (Porous Domain) หลังจากนั้นเชื้อเพลิงที่ยังไม่ได้เกิดการเผาไหม้ก็จะถูกเผาไหม้บริเวณด้านนอกวัสดุพอร์น (Diffusion flame) ในส่วน Jet Domain

- (จ) Lewis number มีค่าเท่าหนึ่ง (ค่าการแพร่ของความร้อนจะเท่ากับค่าการแพร่ของมวล)
- (ฉ) ไม่คิดอิทธิพลของแรงลอยตัว และไม่คิดผลของความแตกต่างของความดันในเจ็ต
- (ช) การเผาไหม้เป็นแบบอย่างง่ายและเกิดขึ้นขั้นตอนเดียว (Simple single step reaction)
- (ซ) คุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ของของแข็ง มีค่าคงที่ไม่ขึ้นตามอุณหภูมิโดยใช้คุณสมบัติที่อุณหภูมิเฉลี่ย
- (ณ) คุณสมบัติของก๊าซมีค่าคงที่ และประพจน์ตัวตามกฎของก๊าซอุดมคติ

3.2 สมการที่เกี่ยวข้องในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.2.1 สมการสำหรับแบบจำลองที่ 1 (Porous domain)

สมการอนุรักษ์พลังงานของก๊าซ

$$\rho_g c_{pg} \varepsilon \frac{\partial T_g}{\partial t} + \rho_g u_g c_{pg} \varepsilon \frac{\partial T_g}{\partial x} = \lambda_g \varepsilon \frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} - h_v (T_g - T_s) + \varepsilon h_o W \quad (3.1)$$

สมการอนุรักษ์มวลย่อย

$$\rho_g \varepsilon \frac{\partial y}{\partial t} + \rho_g u_g \varepsilon \frac{\partial y}{\partial x} = D \rho_g \varepsilon \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \varepsilon W \quad (3.2)$$

Reaction Rate

$$W = A \rho (1 - y) \exp(-E / RT) \quad (3.3)$$

สมการอนุรักษ์พลังงานของของแข็ง

$$\rho_s c_{ps} (1 - \varepsilon) \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_{s,eff} \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} - \frac{\partial q_r^n}{\partial x} + h_v (T_g - T_s) \quad (3.4)$$

Boundary Condition

ส่วนที่ 1 (Porous domain)

ที่ $x = 0$

$$T_g = T_{mix}$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} = \text{Constant} \quad (3.5)$$

$$Y_p = 0$$

ที่ $x = x_E$

$$\frac{\partial T_g}{\partial x} = \text{Constant}$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} = \text{Constant} \quad (3.6)$$

$$Y_p = Y_{exit}$$

โดยพจน์ Divergence of net radiative heat flux , $\frac{\partial q_r^n}{\partial x}$

$$\frac{\partial q_r^n(\tau)}{\partial x} = 4\pi k I_b(\tau) - 2\pi k \left[I_0 E_2(\tau) + I_e E_2(\tau_e - \tau) + \int_0^{\tau_e} I_b(\tau') E_1(|\tau - \tau'|) d\tau' \right] \quad (3.7)$$

โดย τ' คือ Dummy Variable of Integration และ $E_n(\tau)$ คือ Exponential integral function

$$\text{ซึ่งกำหนดโดย } E_n(\tau) = \int_0^1 \mu^{n-2} \exp(-\tau / \mu) d\mu ; n=1,2,3 \quad (3.8)$$

$$\text{และ } \int_0^{\tau_e} I_b(\tau') E_1(|\tau - \tau'|) d\tau' = \int_0^{\tau} I_b(\tau') E_1(\tau - \tau') d\tau' + \int_{\tau}^{\tau_e} I_b(\tau') E_1(\tau' - \tau) d\tau' \quad (3.9)$$

Radiative Heat Flux

$$q_r(\tau) = q_r^+(\tau) + q_r^-(\tau) \quad (3.10)$$

$$q_r^+(\tau) = 2\pi[I_o E_3(\tau) + \int_0^\tau I_b(\tau') E_2(\tau - \tau') d\tau'] \quad (3.11)$$

$$q_r^-(\tau) = -2\pi[I_e E_3(\tau_e - \tau) + \int_{\tau'}^{\tau_e} I_b(\tau') E_2(\tau' - \tau) d\tau'] \quad (3.12)$$

$$\text{โดยที่ } I_b = \frac{\sigma T_s^4}{\pi} \quad (3.13)$$

3.2.2 สมการการคำนวณที่เกี่ยวข้องในรูปสมการไร้หน่วยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับส่วนวัสดุพรุน (Porous domain)

เมื่อทราบถึงสมการที่เกี่ยวข้องในการคำนวณทั้งหมดพร้อมทั้ง Boundary และ Initial Conditions แล้ว ในขั้นต่อมาจึงทำการเปลี่ยนสมการต่างๆ เหล่านั้น ซึ่งเป็นสมการมีหน่วยให้เป็นสมการไร้หน่วย โดยใช้กลุ่มตัวแปรไร้หน่วยดังนี้

$$\begin{aligned} X &= x/x_e, S = tu_g/x_e, Re_g = u_g x_e \rho_g / \mu_g, Pr_g = \mu_g c_{pg} / \lambda_g, Rs_g = x_e^2 \rho_g A / \mu_g, Le = \lambda_g / (D \rho_g c_{pg}) = 1, \\ Ea &= E / (RT_o), \theta_g = T_g / T_o, \theta_s = T_s / T_o, Mp_v = h_v x_e^2 / \lambda_g, H_o = h_o / (c_{pg} T_o), \Gamma_{sg} = \rho_s c_{ps} / (\rho_g c_{pg}), \\ Cd_{g,eff} &= \lambda_{s,eff} / \lambda_g, \tau_e = k x_e, Nr_g = \kappa \lambda_g / (4\sigma T_o^3), H = q_r / (4\sigma T_o^4) \end{aligned}$$

สมการอนุรักษ์พลังงานของก๊าซ

$$\varepsilon \frac{\partial \theta_g}{\partial S} + \varepsilon \frac{\partial \theta_g}{\partial X} = \frac{\varepsilon}{Re_g Pr_g} \frac{\partial^2 \theta_g}{\partial X^2} - \frac{Mp_v}{Re_g Pr_g} (\theta_g - \theta_s) + \frac{\varepsilon H_o RR}{Re_g Pr_g} \quad (3.14)$$

สมการอนุรักษ์มวลย่อย

$$\varepsilon \frac{\partial y}{\partial S} + \varepsilon \frac{\partial y}{\partial X} = \frac{\varepsilon}{Re_g Pr_g Le} \frac{\partial^2 y}{\partial X^2} + \frac{\varepsilon RR}{Re_g Pr_g} \quad (3.15)$$

อัตราการผลิตของผลิตภัณฑ์

$$RR = R_s \times Pr_g \times (1 - Y) \exp(-E_a / \theta_g) \quad (3.16)$$

สมการอนุรักษ์พลังงานของของแข็ง

$$\varepsilon \frac{\partial \theta_g}{\partial S} + \varepsilon \frac{\partial \theta_g}{\partial X} = \frac{\varepsilon}{Re_g Pr_g} \frac{\partial^2 \theta_g}{\partial X^2} - \frac{Mp_v}{Re_g Pr_g} (\theta_g - \theta_s) + \frac{\varepsilon H_o RR}{Re_g Pr_g} \quad (3.17)$$

Divergence of Net Radiative Heat Flux

$$\frac{\partial H(\tau)}{\partial \tau} = -\frac{1}{2} \left[J_0 E_2(\tau) + J_e E_2(\tau_e - \tau) - 2\theta_s^4(\tau) + \int_0^{\tau_e} \theta_s^4(\tau') E_1(|\tau - \tau'|) d\tau' \right] \quad (3.18)$$

Radiative Heat Flux, $q_r(\tau)$

$$H(\tau) = H^+(\tau) + H^-(\tau) \quad (3.19)$$

$$H^+(\tau) = \frac{1}{2} \left[J_0 E_3(\tau) + \int_0^{\tau} \theta_s^4(\tau') E_2(\tau - \tau') d\tau' \right] \quad (3.20)$$

$$H^-(\tau) = -\frac{1}{2} \left[J_e E_3(\tau_e - \tau) + \int_{\tau}^{\tau_e} \theta_s^4(\tau') E_2(\tau' - \tau) d\tau' \right] \quad (3.21)$$

3.2.3 สมการ Local Energy Balance และ Global Energy Balance

ความแม่นยำของการคำนวณตรวจสอบได้โดยการทำ Local Energy Balance และ Global Energy Balance โดยสมการ Local Energy Balance เป็นสมการที่แสดงถึงสมดุลพลังงานของแต่ละ Element ว่า ณ ตำแหน่ง x ใดๆ Element ที่พิจารณาจะมีกลไกการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบต่างๆ เป็นปริมาณเท่าใดและสมดุลกันมากน้อยเพียงไร โดยจะพิจารณาแยกสมการพลังงานของของแข็งและก๊าซ ส่วน Global Energy Balance จะแสดงถึงสมดุลพลังงานทั้งระบบ โดยจะรวมสมการพลังงานของของแข็งและก๊าซเข้าด้วยกัน แล้วจึงอินทิเกรตตลอดสมการซึ่งจะมีรูปสมการดังนี้

Local Energy Balance of Gas phase

$$-\varepsilon \frac{\partial \theta_g}{\partial S} - \varepsilon \frac{\partial \theta_g}{\partial X} + \frac{\varepsilon}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} \frac{\partial^2 \theta_g}{\partial X^2} - \frac{Mp_v}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} (\theta_g - \theta_s) + \frac{\varepsilon H_o RR}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} = 0 \quad (3.22)$$

$$\frac{\varepsilon}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} \frac{\partial^2 \theta_g}{\partial X^2} \quad = \text{Gas conduction term}$$

$$-\frac{Mp_g}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} (\theta_g - \theta_s) \quad = \text{Interaction term}$$

$$-\varepsilon \frac{\partial \theta_g}{\partial X} \quad = \text{Gas convection term}$$

$$-\varepsilon \frac{\partial \theta_g}{\partial S} \quad = \text{Heat storage term}$$

$$\frac{\varepsilon H_o RR}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} \quad = \text{Reaction term}$$

Local Energy Balance of Solid phase

$$-(1-\varepsilon) \Gamma_{sg} \frac{\partial \theta_s}{\partial S} + \frac{Cd_{g,eff}}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial X^2} - \frac{\tau_e^2}{\text{Re}_g \text{Pr}_g Nr_g} \frac{\partial H}{\partial \tau} + \frac{Mp_v}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} (\theta_g - \theta_s) = 0 \quad (3.23)$$

$$\frac{Cd_{eff-g}}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial X^2} \quad = \text{Solid conduction term}$$

$$-\frac{\tau_e^2}{\text{Re}_g \text{Pr}_g Nr_g} \frac{\partial H}{\partial \tau} \quad = \text{Radiation term}$$

$$\frac{Mp_v}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} (\theta_g - \theta_s) \quad = \text{Interaction term}$$

$$-(1-\varepsilon) \Gamma_{sg} \frac{\partial \theta_s}{\partial S} \quad = \text{Heat storage term}$$

Global Energy Balance

$$\int_1^{NE} \left\{ -\varepsilon \frac{\partial \theta_g}{\partial X} + \frac{\varepsilon}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} \frac{\partial^2 \theta_g}{\partial X^2} + \frac{\varepsilon H_o RR}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} + \frac{Cd_{g,eff}}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial X^2} - \frac{\tau_e^2}{\text{Re}_g \text{Pr}_g \text{Nr}_g} \frac{\partial H}{\partial \tau} \right\} dx = 0 \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} & -\varepsilon [\theta_g(NE) - \theta_g(1)] + \frac{\varepsilon}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} \int_1^{NE} \frac{d\theta_g}{dX} + \frac{\varepsilon H_o}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} \int_1^{NE} RR dX + \frac{Cd_{g,eff}}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} \int_1^{NE} \frac{d\theta_s}{dX} \\ & - \frac{\tau_e}{\text{Re}_g \text{Pr}_g \text{Nr}_g} [H(NE) - H(1)] = 0 \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$-\varepsilon [\theta_g(NE) - \theta_g(1)] \quad = \text{Gas convection term}$$

$$\frac{\varepsilon}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} \int_1^{NE} \frac{d\theta_g}{dX} \quad = \text{Gas conduction term}$$

$$\frac{\varepsilon H_o}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} \int_1^{NE} RR dX \quad = \text{Reaction term}$$

$$\frac{Cd_{g,eff}}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} \int_1^{NE} \frac{d\theta_s}{dX} \quad = \text{Solid phase conduction term}$$

$$- \frac{\tau_e}{\text{Re}_g \text{Pr}_g \text{Nr}_g} [H(NE) - H(1)] \quad = \text{Radiation term}$$

3.2.4 สมการสำหรับแบบจำลองที่ 2 (Jet Domain)

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$ru \frac{\partial u}{\partial x} + rv \frac{\partial u}{\partial r} = (v + \varepsilon) \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial u}{\partial r} \quad (3.26)$$

สมการอนุรักษ์พลังงานของก๊าซ

$$ru \frac{\partial (T - T_\infty)}{\partial x} + rv \frac{\partial (T - T_\infty)}{\partial r} = (v + \varepsilon) \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial (T - T_\infty)}{\partial r} + \frac{\dot{q}''' r}{\rho c} \quad (3.27)$$

สมการอนุรักษ์มวลย่อย

$$ru \frac{\partial y_j}{\partial x} + rv \frac{\partial y_j}{\partial x} = (v + \varepsilon) \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial y_j}{\partial r} + \frac{\dot{W}_j'''}{\rho} \quad (3.28)$$

การเผาไหม้เจ็ทเชื้อเพลิงก๊าซที่พุ่งเข้าไปในอากาศที่อยู่หนึ่งที่มีออกซิเจนปนอยู่ด้วยความเข้มข้น Y_{∞} เป็นผลทำให้สมการโมเมนตัม สมการอนุรักษ์พลังงาน และสมการอนุรักษ์มวลย่อย ของการเผาไหม้เจ็ทเชื้อเพลิงก๊าซเกิดความยุ่งยากมาก เพราะว่าการลดลงของความเข้มข้นของเชื้อเพลิงและออกซิเจนหรือเทอมที่แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ที่เพิ่ม (Sink terms) เข้ามาในสมการอนุรักษ์มวลย่อยของมวลย่อยแต่ละชนิด และเทอมผลิตพลังงานที่ปรากฏในสมการอนุรักษ์พลังงานของก๊าซ (Source terms) จะมีความเกี่ยวเนื่องซึ่งกันและกันอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทำให้การแก้สมการเพื่อหาโปรไฟล์ความเร็ว u โปรไฟล์อุณหภูมิและโปรไฟล์ส่วนประกอบตามระยะ x ไม่ง่ายเลย อย่างไรก็ตามสามารถที่จะลดรูปสมการทั้งสามดังกล่าวนี้เพื่อเกิดความง่ายต่อการพิจารณา โดยจัดตัวแปรเสียใหม่ให้อยู่ในรูปตัวแปรแบบผสม (Composite Variable) เรียกเทคนิคดังกล่าวว่า Schvab-Zelovich Transformation

สมมุติให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเจ็ทเป็นแบบอย่างง่ายและเกิดขึ้นขั้นตอนเดียว (Simple single step reaction) ตามสมการ (3.29)

$f \text{ gms}$ ของเชื้อเพลิง $F + 1 \text{ gm}$ ของออกซิเจน O

$$\rightarrow (1 + f) \text{ gms ของสารผลิตภัณฑ์ } P + f \Delta H \text{ cals ของความร้อน} \quad (3.29)$$

ซึ่งทำให้เราสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสลายและอัตราการผลิตมวลย่อย (F, O และ P) หรือ Sink terms ของสารผลิตภัณฑ์ และอัตราการปลดปล่อยความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Source terms) ดังสมการ (3.30)

$$-\frac{\dot{W}_F'''}{f} = -\dot{W}_O''' = +\frac{\dot{W}_P'''}{1+f} = +\frac{\dot{q}'''}{f \Delta H} \quad (3.30)$$

เมื่อจัดสมการ (3.30) โดยจัดให้มาเท่ากันเป็นคู่ๆระหว่างเทอมทั้ง 4 ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\dot{W}_F'''}{f} + \frac{\dot{W}_P'''}{1+f} = 0$$

$$\frac{\dot{W}_F'''}{f} + \frac{\dot{q}'''}{f \Delta H} = 0$$

$$\frac{\dot{W}_F'''}{f} - \dot{W}_O''' = 0 \quad (3.31)$$

$$\dot{W}_O''' + \frac{\dot{W}_P'''}{1+f} = 0$$

$$\dot{W}_O''' + \frac{\dot{q}'''}{f \Delta H} = 0$$

จากนั้นหาทางกำจัด Source terms ($\dot{q}'''$) ของพลังงานและ Sink terms ($\dot{W}'''$) ของมวลย่อยแต่ละชนิดที่ทำให้การแก้สมการยุ่งยากยากไปเสียก่อนโดยนำสมการ (3.27) และสมการ (3.28) มารวมกัน ภายหลังจากคูณสมการทั้งสองด้วยค่าคงตัวที่เหมาะสมเพื่อผลรวมของ Source terms และ Sink terms เป็นไปตามเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่งของสมการ (3.31) ช่วยให้การรวมสมการเป็นไปในลักษณะที่เกิดตัวแปรแบบผสมขึ้นและที่สำคัญคือทั้ง Source terms และ Sink terms ก็หายไปไม่ปรากฏอยู่ในสมการอีกต่อไปสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิงที่ [9] ทำให้ทั้งสมการอนุรักษ์พลังงานและสมการอนุรักษ์มวลย่อยอยู่ในรูปตัวแปรแบบผสมในรูปทั่วไปดังสมการ (3.32)

$$ru \frac{\partial b}{\partial x} + rv \frac{\partial b}{\partial r} = (v + \varepsilon) \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial b}{\partial r} \quad (3.32)$$

เมื่อ b คือตัวแปรแบบผสมมีรูปแบบที่เป็นไปได้ทั้งสิ้น 5 แบบตามสมการ (3.33) ขึ้นอยู่กับการจับคู่รวมกันระหว่างสมการ (3.27) และ (3.28)

$$\begin{aligned} b_{FP} &= \left(Y_F + \frac{f}{1+f} Y_P \right) - \frac{f}{1+f} (1 - Y_{O\infty}) \\ b_{OP} &= \left(Y_O + \frac{1}{1+f} Y_P \right) - \left(\frac{1+fY_{O\infty}}{1+f} \right) \\ b_{FT} &= \left(\frac{C(T-T_\infty)}{\Delta H} + Y_F \right) \\ b_{OT} &= \left(\frac{C(T-T_\infty)}{f \Delta H} + Y_O \right) - Y_{O\infty} \\ b_{FO} &= \left(Y_O - \frac{Y_F}{f} \right) - Y_{O\infty} \end{aligned} \quad (3.33)$$

Boundary Condition

ส่วนที่ 2 (Jet domain)

$$\text{ที่ } x = x_E$$

$$0 \leq r \leq \frac{d_i}{2}$$

$$b = b_i \tag{3.34}$$

$$T_i = T_{g,Avg,exit}$$

$$Y_p = Y_{exit}$$

$$\text{ที่ } x = \infty$$

$$0 \leq r \leq \infty$$

$$b = 0$$

$$\frac{\partial b}{\partial r} = 0 \tag{3.35}$$

$$Y_p = 1$$

$$\text{ที่ } r = 0$$

$$0 \leq x \leq \infty$$

$$v = 0 \tag{3.36}$$

$$\frac{\partial b}{\partial r} = 0$$

$$\text{ที่ } r \geq \delta$$

$$0 \leq x \leq \infty$$

$$b = 0 \tag{3.37}$$

$$\frac{\partial b}{\partial r} = 0$$

ในการทำนายหาคุณลักษณะของเปลวไฟในด้านต่างๆคือ รูปร่างเปลวไฟ ความยาวเปลวไฟ โพรไฟล์ขององค์ประกอบตลอดหน้าตัดของเปลวไฟจะใช้สมการ (3.33) และ (3.38)

$$\frac{b}{b_i} = F(x, r) \tag{3.38}$$

เมื่อ

$$F(x, r) = \left[1 + \frac{48x}{\text{Re}_i d_i} \right]^{-1} \left(1 - 2 \frac{r}{d_i} \left[1 + \frac{48x}{\text{Re}_i d_i} \right]^{-1} \right) \quad (3.39)$$

3.2.4.1 รูปร่างเปลวไฟ

ที่บริเวณเปลวไฟทั้งเชื้อเพลิงและออกซิเจนมาพบกันในส่วนที่เป็นไปตามสโตยชิโอเมตรีแล้วเกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นในบริเวณนี้ $Y_F = Y_O = 0$ ดังนั้นสมการ (3.33) ได้

$$b_{FO} = -Y_{O\infty} \text{ (ตำแหน่งของเปลวไฟ)}$$

และ

$$b_{FO} = -\left(\frac{1}{f} + Y_{O\infty} \right) \text{ (ตำแหน่งทางออกของหัวฉีด)}$$

แทนค่าทั้งสองลงในสมการ (3.38) ได้

$$\frac{Y_{O\infty}}{Y_{O\infty} + \frac{1}{f}} = F(x_c, r_c) \quad (3.40)$$

3.2.4.2 ความยาวเปลวไฟ

ความยาวเปลวไฟ $\bar{x}_c$ หรือความสูงของเปลวไฟคือระยะทางยาวที่สุดที่เปลวไฟจะยืดออกไปเผาไหม้สามารถหาได้จากสมการ (3.40) โดยกำหนดให้ $r_c = 0$ ดังนั้นได้สมการเพื่อหา $\bar{x}_c$

$$\frac{fY_{O\infty}}{fY_{O\infty} + 1} = \left(1 + \frac{48\bar{x}_c}{\text{Re}_i d_i} \right)^{-1} \quad (3.41)$$

แก้สมการ (3.41) ได้ความยาวของเปลวไฟของเจ็ตทรงกระบอกแบบแลมินาร์คือ

$$\bar{x}_c = \frac{u_i d_i^2}{48 \nu f Y_{O\infty}} \quad (3.42)$$

3.2.4.3 โพรไฟล์เศษส่วนมวลของเชื้อเพลิง Y_F

จากสมการ (3.33)

$$b_{FO} = Y_O - \frac{Y_F}{f} - Y_{O\infty}$$

ที่ทางออกของหัวฉีด $x=0, Y_O=0, Y_F=1$ ได้

$$b_{FOi} = -\left(Y_{O\infty} + \frac{1}{f}\right)$$

แทนค่า b_{FO}, b_{FOi} ลงในสมการ (3.38) ได้

$$\frac{Y_O - \frac{Y_F}{f} - Y_{O\infty}}{-\left(Y_{O\infty} + \frac{1}{f}\right)} = F(x, r) \quad (3.43)$$

เนื่องจากตามแนวแกน x ใดๆ พิจารณาตามแนวแกนเจ็ตและพิจารณาภายในเปลวไฟ ($0 \leq |r| \leq r_c$) ดังนั้น ($Y_O=0$) สมการ(3.43) จึงลดรูปเป็นสมการ (3.44)

$$\frac{Y_F + fY_{O\infty}}{1 + fY_{O\infty}} = F(x, r) \quad (3.44)$$

เมื่อแก้สมการหาค่า Y_F จะได้โพรไฟล์ร็อกประกอบของเชื้อเพลิง

$$Y_F = (1 + fY_{O\infty})F(x, r) - fY_{O\infty} \quad (3.45)$$

3.2.4.4 โพรไฟล์เศษส่วนมวลของออกซิเจน Y_O

ที่ระยะ x ใดๆ พิจารณาตามแนวแกนเจ็ตและพิจารณาภายนอกเปลวไฟ ($r_c \leq |r| \leq \delta$) ดังนั้น ($Y_F=0$) สมการ(3.43) จึงลดรูปเป็นสมการ (3.46)

$$\frac{Y_O - Y_{O\infty}}{(1 + fY_{O\infty})} = F(x, r)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้โพรไฟล์เศษส่วนมวลของออกซิเจน

$$Y_O = Y_{O\infty} - \frac{(1 + fY_{O\infty})}{f} F(x, r) \quad (3.46)$$

3.2.4.5 โพรไฟล์เศษส่วนมวลของสารผลิตภัณฑ์ Y_p ที่ภายนอกเปลวไฟ

โพรไฟล์เศษส่วนมวลของสารผลิตภัณฑ์ Y_p ที่ภายนอกเปลวไฟ $r_C \leq |r| \leq \delta$ โดยการพิจารณาตัวแปรผสม b_{FP} ตามสมการ (3.33)

$$b_{FP} = \left(Y_F + \frac{f}{1+f} Y_p \right) - \frac{f}{1+f} (1 - Y_{O\infty})$$

ที่ทางออกของหัวฉีด $x=0, Y_F=1, Y_p=0$ ได้

$$b_{FPi} = \frac{1 + fY_{O\infty}}{1 + f}$$

แทนค่า b_{FP}, b_{FPi} ลงในสมการ (3.38) ได้

$$\frac{\left(Y_F + \frac{f}{1+f} Y_p \right) - \frac{f(1 - Y_{O\infty})}{1+f}}{\frac{1 + fY_{O\infty}}{1+f}} = F(x, r)$$

เนื่องจากว่าที่ภายนอกเปลวไฟ $Y_F=0$ จัดการสมการข้างบนใหม่จะได้

$$Y_p = \frac{1 + fY_{O\infty}}{f} F(x, r) + (1 - Y_{O\infty}) \quad (3.47)$$

3.2.4.6 โพรไฟล์เศษส่วนมวลของสารผลิตภัณฑ์ Y_p ที่ภายในเปลวไฟ

และเช่นเดียวกันสำหรับการพิจารณาโพรไฟล์เศษส่วนมวลของสารผลิตภัณฑ์ Y_p ที่ภายในเปลวไฟ $0 \leq |r| \leq r_C$ โดยการพิจารณาตัวแปรผสม b_{OP} ตามสมการ (3.33)

$$b_{OP} = \left(Y_O + \frac{1}{1+f} Y_p \right) - \left(\frac{1 + fY_{O\infty}}{1+f} \right)$$

ที่ทางออกของหัวฉีด $x=0, Y_O=0, Y_P=1$ ได้

$$b_{OPi} = -\left(\frac{1+fY_{O\infty}}{1+f}\right)$$

แทนค่า b_{OP}, b_{OPi} ลงในสมการ (3.38) ได้

$$\frac{\left(Y_O + \frac{Y_P}{1+f}\right) - \left(\frac{1+fY_{O\infty}}{1+f}\right)}{-\left(\frac{1+fY_{O\infty}}{1+f}\right)} = F(x, r)$$

เนื่องจากว่าที่ภายในเปลวไฟ $Y_O=0$ จัดการสมการข้างบนใหม่จะได้

$$Y_P = (1+fY_{O\infty})[1-F(x, r)] \quad (3.48)$$

3.2.4.7 โพรไฟล์อุณหภูมิภายในเปลวไฟ

สำหรับการพิจารณาโพรไฟล์อุณหภูมิภายในเปลวไฟ $0 \leq |r| \leq r_C$ โดยพิจารณาตัวแปรผสม b_{OT} ตามสมการ(3.33)

$$b_{OT} = \frac{C(T-T_\infty)}{f\Delta H} + Y_O - Y_{O\infty}$$

ที่ทางออกของหัวฉีด $x=0, T=T_i, Y_O=0$ ได้

$$b_{OTi} = \frac{C(T_i-T_\infty)}{f\Delta H} - Y_{O\infty}$$

แทนค่า b_{OT}, b_{OTi} ลงในสมการ (3.38) ได้

$$\frac{\frac{C(T-T_\infty)}{f\Delta H} + Y_O - Y_{O\infty}}{\frac{C(T_i-T_\infty)}{f\Delta H} - Y_{O\infty}} = F(x, r)$$

เนื่องจากว่าที่ภายในเปลวไฟ $Y_O=0$ จัดการสมการข้างบนใหม่จะได้

$$T = \left[(T_i - T_\infty) - \frac{Y_{O\infty} f \Delta H}{C} \right] F(x, r) + \left(\frac{Y_{O\infty} f \Delta H}{C} \right) + T_\infty \quad (3.49)$$

3.2.4.8 โพรไฟล์อุณหภูมิภายนอกเปลวไฟ

สำหรับการพิจารณาโพรไฟล์อุณหภูมิภายในเปลวไฟ $r_c \leq |r| \leq \delta$ โดยการพิจารณาตัวแปรผสม b_{FT} ตามสมการ (3.33)

$$b_{FT} = \frac{C(T - T_\infty)}{\Delta H} + Y_F$$

ที่ทางออกของหัวฉีด $x = 0, T = T_i, Y_F = 1$ ได้

$$b_{FTi} = \frac{C(T_i - T_\infty)}{\Delta H} + 1$$

แทนค่า b_{FT}, b_{FTi} ลงในสมการ (3.38) ได้

$$\frac{\frac{C(T - T_\infty)}{\Delta H} + Y_F}{\frac{C(T_i - T_\infty)}{\Delta H} + 1} = F(x, r)$$

เนื่องจากว่าที่ภายนอกเปลวไฟ $Y_F = 0$ จัดการสมการข้างบนใหม่จะได้

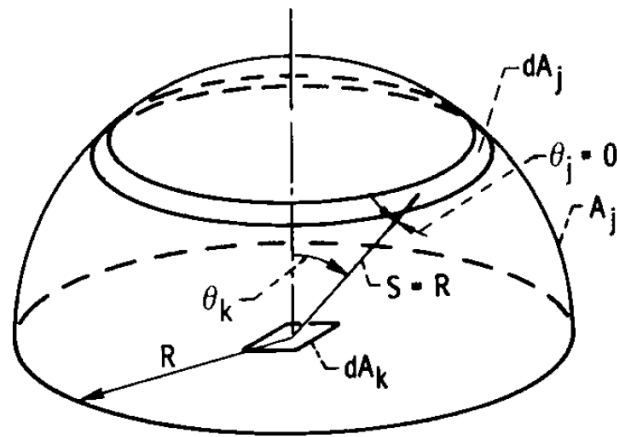
$$T = \left[(T_i - T_\infty) + \frac{\Delta H}{C} \right] F(x, r) + T_\infty \quad (3.50)$$

3.2.4.9 อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ

สำหรับการพิจารณาอุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟได้โดยการแทนค่า $F(x, r)$ สมการ (3.40) ลงในสมการ (3.49) หรือสมการ (3.50) ซึ่งจะให้อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟเท่ากัน

$$T_C = \left[(T_i - T_\infty) + \frac{\Delta H}{C} \right] \left[\frac{fY_{\infty}}{1 + fY_{\infty}} \right] + T_\infty \quad (3.51)$$

3.2.5 สมการการคำนวณ Net Radiative Heat Flux ของเปลวไฟ



รูปที่ 3.2 Hemisphere filled with isothermal gas

กำหนดให้การแผ่รังสีของเปลวไฟเป็นแบบ Hemisphere isotropically radiation ไม่คิดการ Scattering ของก๊าซไอเสีย [18] การพิจารณาการแผ่รังสีของกลุ่มก๊าซที่ตำแหน่งใดๆในเปลวไฟ (Emitter) ผ่านกลุ่มก๊าซ (Absorber) โดยการประยุกต์หลักการของ Mean beam length เพื่อประมาณค่าความเข้มข้นการแผ่รังสีของเปลวไฟที่จุดศูนย์กลางของฐาน โดยการเปลี่ยนเปลวไฟที่ถูกแบ่งคิดเป็นช่วงๆในลักษณะทรงกระบอกไปอยู่ในรูปของ Effective hemisphere volume จากนั้นทำการเลือกความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงกระบอกกับครึ่งทรงกลมเพื่อทราบค่า Equivalent radius of Hemisphere หรือ Mean beam length (l_m) ที่เงื่อนไข Semi-finite cylinder radiating to center of base จากตารางที่ 3.1 เพื่อการแทนค่าในสมการ (3.52) ทำให้ทราบค่าปริมาณความร้อนจากการแผ่รังสีโดยเปลวไฟที่ตำแหน่งใดๆในกลุ่มก๊าซมายังทางออกของหัววัสดุพูน

$$\dot{Q}_R = \int_{A_{burner}} \frac{\sigma \varepsilon_g T_g^4}{\pi} e^{-k_g l_m} dA \quad (3.52)$$

โดยค่า ε_g และ k_g คำนวณเฉลี่ยโดยปริมาตรเมื่อเราสามารถทราบจำนวนโมลของมวลย่อยของส่วนผสมของก๊าซหลังจากการเผาไหม้ส่วนแรก (Porous domain) นั่นคือ CO CO₂ H₂ H₂O และ N₂ โดยที่ H₂ และ N₂ ไม่นำมาคำนวณหาค่า ε_g และ k_g เพราะว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ CO CO₂ และ H₂O [15,17] รายละเอียดของ Total emissivity และ Absorption coefficient ที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ก.

ตารางที่ 3.1 Mean beam lengths for gas-surface exchange

Shape	Characterizing Dimension D	L_0/D	L_m/D	L_m/L_0
Sphere	Diameter	2/3	0.63	0.95
Infinite cylinder	Diameter	1	0.94	0.94
Semi-infinite cylinder radiating to center of base	Diameter	1	0.9	0.9
Same, radiating to entire base	Diameter	0.814	0.65	0.80
Right-circular cylinder, height = diameter, radiating to center of base ..	Diameter	0.764	0.71	0.92
Same, radiating to whole surface	Diameter	2/3	0.60	0.9
Right circular cylinder, height = 0.5 diameter, radiating to end	Diameter	0.475	0.43	0.90
Same, radiating to side	Diameter	0.525	0.46	0.88
Same, radiating to total surface	Diameter	0.500	0.45	0.89
Right-circular cylinder, height = 2.0 diameters, radiating to ends	Diameter	0.730	0.60	0.82
Same, radiating to side	Diameter	0.817	0.76	0.93
Same, radiating to total surface	Diameter	0.800	0.73	0.91
Infinite cylinder, half-circular cross section. Radiating to spot on middle of flat side	Radius		1.26	
Rectangular parallelepipeds:				
1:1:1 (cube)	Edge	2/3	0.60	0.92
1:1:4, radiating to 1×4 face		0.90	0.82	0.91
radiating to 1×1 face	Shortest	0.86	0.71	0.83
radiating to all faces	Edge	0.89	0.81	0.91
1:2:6, radiating to 2×6 face		1.18	See Table 7-5	
radiating to 1×6 face		1.24		
radiating to 1×2 face		1.18		
radiating to all faces		1.20		
1: ∞ : ∞ (infinite parallel planes)	Distance between planes	2	1.76	0.88
Space outside infinite bank of tubes, centers on equilateral triangles; tube diameter = clearance	Clearance	3.4	2.8	0.83
Same as preceding, except tube diameter = 1/2 clearance	Clearance	4.45	3.8	0.86
Same, except tube centers on squares, diameter = clearance	Clearance	4.1	3.5	0.85

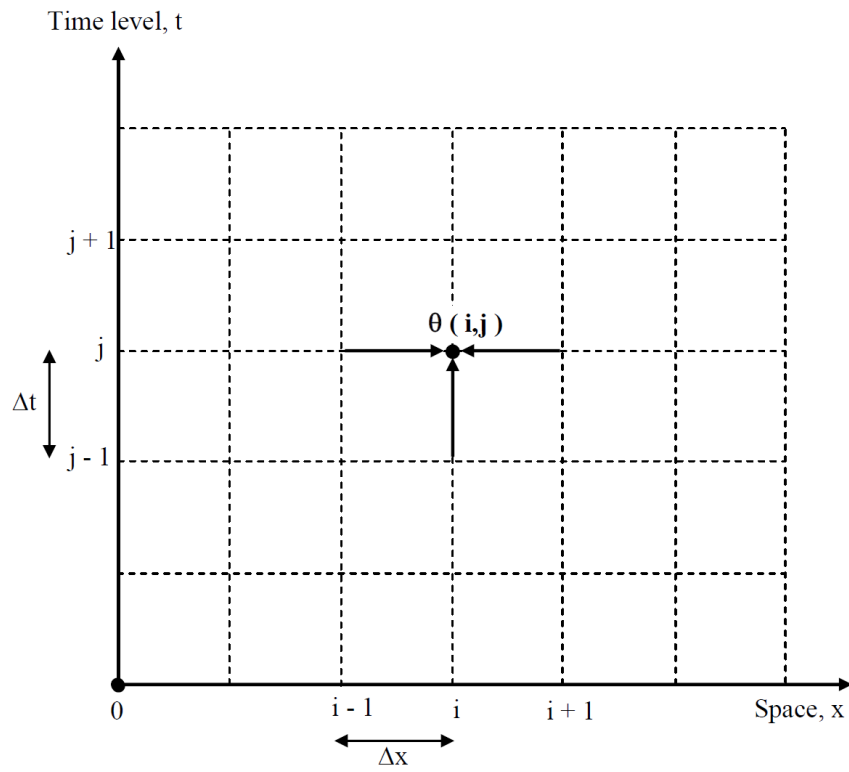
บทที่ 4

ขั้นตอนและวิธีที่ใช้ในการแก้สมการ

เมื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปสมการที่เกี่ยวข้องพร้อมทั้งได้เปลี่ยนรูปให้เป็นสมการไร้มิติเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการแก้สมการ ซึ่งในขั้นตอนของการแก้สมการจะมีอยู่สองขั้นตอนใหญ่ๆ โดยในขั้นแรกจะทำการเปลี่ยนรูปสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปผลต่างเพื่อความสะดวกและเหมาะสมต่อการแก้สมการ ส่วนขั้นสุดท้ายก็จะเป็นขั้นตอนการคำนวณเพื่อแก้สมการ ส่วนการแก้สมการที่เกี่ยวข้องในแบบจำลองการเผาไหม้ของเจ็ตที่พุ่งสู่อากาศนั้นจะเป็นการแก้สมการโดยจัดตัวแปรเสียใหม่ให้อยู่ในรูปตัวแปรแบบผสม (Composite Variable) เรียกเทคนิคดังกล่าวว่า Schvab-Zelovich Transformation

4.1 Finite Difference Method

การแก้สมการหาค่าของตัวแปรต่างๆ ที่อยู่ในรูปสมการไร้มิติจะต้องทำการเปลี่ยนรูปสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปผลต่างหรือที่เรียกว่าสมการ Finite Difference ทั้งส่วนของเวลาและระยะทางด้วยวิธี Finite Difference Method เพื่อความสะดวกในการแก้สมการในรูป Non-linear ด้วยวิธี Implicit Finite Difference ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งตัวแปรที่ใช้ในวิธี Implicit Finite Difference

โดยการประมาณค่าของสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยมจะแทนอนุพันธ์อันดับหนึ่งด้วย Backward difference และแทนอนุพันธ์อันดับสองด้วย Central difference ดังนี้

$$\frac{\partial \theta}{\partial S} = \frac{\theta_i^j - \theta_i^{j-1}}{\Delta S} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} = \frac{\theta_i^j - \theta_{i-1}^j}{\Delta X} \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} = \frac{\theta_{i+1}^j - 2\theta_i^j + \theta_{i-1}^j}{(\Delta X)^2} \quad (4.3)$$

4.2 สมการ Finite Difference ของส่วนของวัสดุพรุน (Porous domain)

$$Y_i^j = \frac{1}{\left[\frac{\varepsilon}{\Delta S} + \frac{\varepsilon}{\Delta X} + \frac{2\varepsilon}{\text{Re}_g \text{Pr}_g \text{Le} (\Delta X)^2} + \varepsilon \text{ARR}_i^j \right]} \left[\frac{\varepsilon}{\Delta S} Y_i^{j-1} + \frac{\varepsilon}{\Delta X} Y_{i-1}^j + \frac{\varepsilon}{\text{Re}_g \text{Pr}_g \text{Le} (\Delta X)^2} Y_{i+1}^j + \frac{\varepsilon}{\text{Re}_g \text{Pr}_g \text{Le} (\Delta X)^2} Y_{i-1}^j + \varepsilon \text{ARR}_i^j \right] \quad (4.4)$$

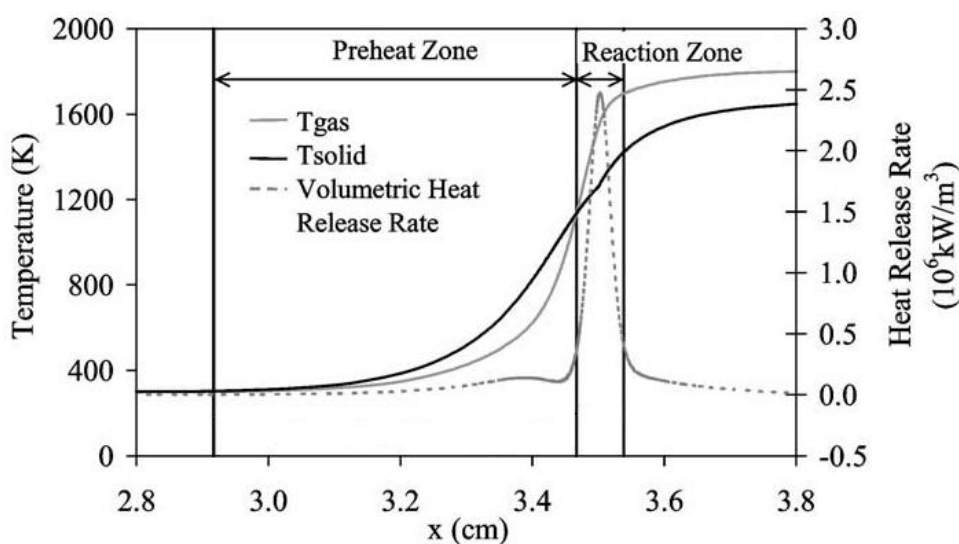
$$\theta_{g(i)}^j = \frac{1}{\left[\frac{\varepsilon}{\Delta X} + \frac{\varepsilon}{\Delta S} + \frac{M p_v}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} + \frac{2\varepsilon}{\text{Re}_g \text{Pr}_g (\Delta X)^2} \right]} \left[\frac{\varepsilon}{\text{Re}_g \text{Pr}_g (\Delta X)^2} \theta_{g(i+1)}^j + \frac{\varepsilon}{\text{Re}_g \text{Pr}_g (\Delta X)^2} \theta_{g(i-1)}^j + \frac{M p_v}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} \theta_{s(i)}^j + \frac{\varepsilon}{\Delta S} \theta_{g(i)}^{j-1} + \frac{\varepsilon}{\Delta X} \theta_{g(i-1)}^j + \frac{\varepsilon H_o (RR)_i^j}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} \right] \quad (4.5)$$

$$\theta_{s(i)}^j = \frac{1}{\left[\frac{(1-\varepsilon)\Gamma_{sg}}{\Delta s} + \frac{M p_v}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} + \frac{2C d_{g,eff}}{\text{Re}_g \text{Pr}_g (\Delta X)^2} \right]} \left[\frac{C d_{g,eff}}{\text{Re}_g \text{Pr}_g (\Delta X)^2} \theta_{s(i+1)}^j + \frac{C d_{g,eff}}{\text{Re}_g \text{Pr}_g (\Delta X)^2} \theta_{s(i-1)}^j - \frac{\tau_e^2}{\text{Re}_g \text{Pr}_g N r_g} \frac{\partial H}{\partial \tau} + \frac{M p_v}{\text{Re}_g \text{Pr}_g} \theta_{g(i)}^j + \frac{(1-\varepsilon)\Gamma_{sg}}{\Delta s} \theta_{s(i)}^{j-1} \right] \quad (4.6)$$

4.3 กลุ่มสมการไร้มิติที่ใช้ในการพิจารณาประสิทธิภาพในส่วนวัสดุพรุน

(Porous domain)

นิยามของ Preheat zones [6] ตามรูปที่ 4.2 จะเริ่มบริเวณที่อุณหภูมิก๊าซเพิ่มขึ้น 1 เปอร์เซ็นต์ จากอุณหภูมิเดิมของก๊าซ (Mixture) ที่บริเวณทางเข้าของห้องเผาไหม้ โดยบริเวณนี้อุณหภูมิของของแข็งจะสูงกว่าอุณหภูมิของก๊าซ และขอบเขตของ Preheat zones และ Reaction zones จะเป็นบริเวณที่อุณหภูมิของของแข็งเท่ากับอุณหภูมิของก๊าซ ส่วนบริเวณ Reaction zones นี้อุณหภูมิของก๊าซจะสูงกว่าอุณหภูมิของของแข็งและจะสิ้นสุดลงตรงที่เส้น Heat release rate ตัดกับแกน X



รูปที่ 4.2 นิยามของ Preheat zone และ Reaction zone

นิยามของประสิทธิภาพการหมุนเวียนความร้อน (Heat recirculation efficiency) คือปริมาณของพลังงานที่ถูกส่งผ่านไปที่บริเวณ Preheat zone เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณพลังงานความร้อนที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบ (Firing rate) ดังสมการ (4.7) ส่วนงานวิจัยนี้จะนิยามปริมาณพลังงานความร้อนที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบนี้ใหม่ คือปริมาณพลังงานความร้อนที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ที่สามารถเกิดขึ้นได้จริงทางทฤษฎี โดยคำนวณจากค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) ที่วัดได้จากการทดลองดังสมการ (4.8)

$$\text{Heat recirculation efficiency} = \frac{\text{solid-to-gas convection in preheat zone}}{\text{firing rate}} \quad (4.7)$$

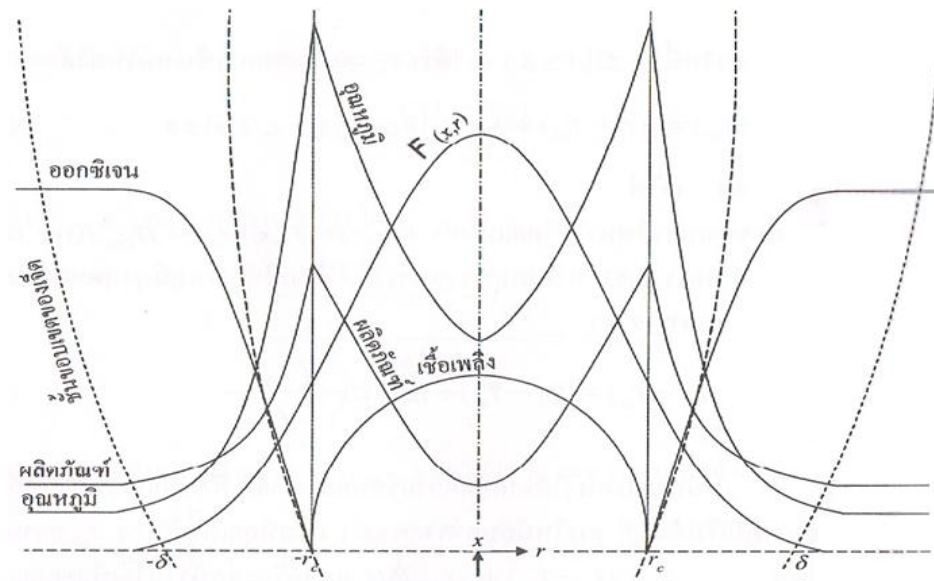
$$\text{Heat recirculation efficiency} = \frac{\text{solid-to-gas convection in preheat zone}}{\text{firing rate (Primary)}} \quad (4.8)$$

$$\text{Preheat conduction efficiency} = \frac{\text{solid conduction into preheat zone}}{\text{firing rate (Primary)}} \quad (4.9)$$

$$\text{Preheat radiant efficiency} = \frac{\text{radiation into preheat zone}}{\text{firing rate (Primary)}} \quad (4.10)$$

$$\text{Output radiant efficiency} = \frac{\text{output radiation}}{\text{firing rate (Primary)}} \quad (4.11)$$

4.4 สมการที่ใช้จำลองของส่วนการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ (Jet domain)



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของเจ็ตเพลวไฟทรงกระบอก

โพรไฟล์เศษส่วนมวลของเชื้อเพลิง Y_F พิจารณาภายในเปลวไฟ ($0 \leq |r| \leq r_C$)

$$Y_F = (1 + fY_{O\infty})F(x, r) - fY_{O\infty} \quad (4.12)$$

โพรไฟล์เศษส่วนมวลของออกซิเจน Y_O พิจารณานอกเปลวไฟ ($r_C \leq |r| \leq \delta$)

$$Y_O = Y_{O\infty} - \frac{(1 + fY_{O\infty})}{f} F(x, r) \quad (4.13)$$

โพรไฟล์เศษส่วนมวลของสารผลิตภัณฑ์ Y_P ที่ภายนอกเปลวไฟ $r_C \leq |r| \leq \delta$

$$Y_P = \frac{1 + fY_{O\infty}}{f} F(x, r) + (1 - Y_{O\infty}) \quad (4.14)$$

โพรไฟล์เศษส่วนมวลของสารผลิตภัณฑ์ Y_P ที่ภายในเปลวไฟ $0 \leq |r| \leq r_C$

$$Y_P = (1 + fY_{O\infty})[1 - F(x, r)] \quad (4.15)$$

โพรไฟล์อุณหภูมิภายในเปลวไฟ $0 \leq |r| \leq r_C$

$$T = \left[(T_i - T_\infty) - \frac{Y_{O\infty} f \Delta H}{C} \right] F(x, r) + \left(\frac{Y_{O\infty} f \Delta H}{C} \right) + T_\infty \quad (4.16)$$

โพรไฟล์อุณหภูมิภายนอกเปลวไฟ $r_C \leq |r| \leq \delta$

$$T = \left[(T_i - T_\infty) + \frac{\Delta H}{C} \right] F(x, r) + T_\infty \quad (4.17)$$

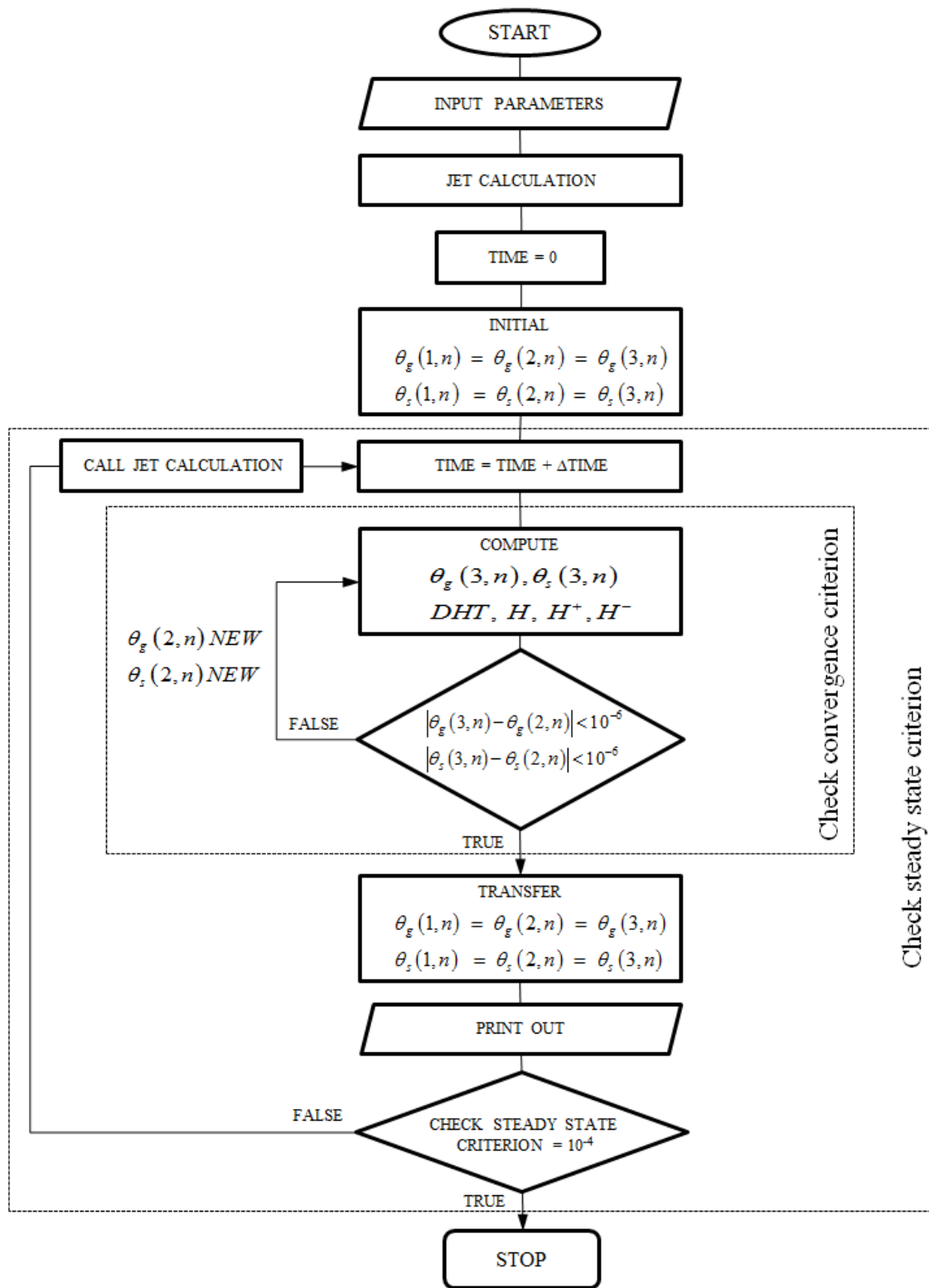
สมการ Radiation Intensity ของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ

$$I_{\text{Flame}} = \sum_{i=1}^n I_i \quad (4.18)$$

โดยที่ n คือ Flame elements

4.5 วิธีการคำนวณ

หลังจากสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสมการที่เกี่ยวข้องทั้งหมด พร้อมทั้งเปลี่ยนรูปสมการไร้มิติให้อยู่ในรูปสมการ Finite Difference จึงมาสู่ขั้นตอนการแก้สมการ ขั้นตอนแรกจะเป็นการจำลองในส่วนของการเผาไหม้เจ็ทเชื้อเพลิงก๊าซ (Jet domain) โดยระบบจะสมมติให้อยู่ในสภาวะ Local Thermal Equilibrium เป็นแบบ 2 มิติ (Axial และ Radial axes) และจำนวน Mesh ที่ใช้ในการคำนวณเท่า 100 และ 400 Mesh ทิศทางแกน Axial และ Radial ตามลำดับ อุณหภูมิเริ่มต้นใช้ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่ทางออกจากการทดลอง [7] และค่าความร้อนของการเผาไหม้เจ็ทเชื้อเพลิงก๊าซ ได้จากการทำสมดุลทางเคมีการเผาไหม้ (Chemical Equilibrium) โดยการทราบค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) คำนวณจากค่า Primary aeration ที่ได้จากการทดลอง จากนั้นทำการแก้สมการในส่วนของการเผาไหม้เจ็ทเชื้อเพลิงก๊าซ เพื่อคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิภายในเปลวไฟและการกระจายตัวของเศษส่วนมวลต่างๆ เช่น เชื้อเพลิง อากาศ ผลิตภัณฑ์ เป็นต้น และสุดท้ายเป็นการคำนวณหาความเข้มการแผ่รังสีของเปลวไฟ (Jet Flame Radiation Intensity) หลังจากทราบค่าความเข้มการแผ่รังสีของเปลวไฟก็จะทำการแก้สมการในส่วนของวัสดุพอร์น (Porous domain) เพื่อหาคำตอบของการกระจายอุณหภูมิของก๊าซ อุณหภูมิของแข็ง ฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux) และ Divergence of Net Radiative Heat Flux ภายใน Porous domain ความยาว 0.15 m ถูกแบ่งออกเป็น 100 Mesh หรือ 101 Node พร้อมทั้งสมมติค่าคำตอบ (Unknowns) ให้ครบทุก Node แล้วคำนวณเพื่อหาคำตอบในแต่ละช่วงเวลา (Time Step) โดยใช้วิธีการคำนวณซ้ำ (Iterative Procedure) จนกระทั่งผลลัพธ์ที่คำนวณได้เข้าสู่หาคำตอบและผ่านเงื่อนไขการลู่เข้าหาคำตอบ (Convergence Criterion = 10^{-6}) จากนั้นก็คำนวณหาคำตอบใน Time Step ถัดไป โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณใน Time Step ครั้งที่แล้ว จะถูกนำมาใช้เป็นค่าเริ่มต้นของการหาคำตอบใน Time Step ปัจจุบันและจะมีขั้นตอนการคำนวณซ้ำเช่นเดิมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่วนการพิจารณาคำตอบในช่วง Steady State จะใช้เงื่อนไข Steady State Criterion ที่มีค่าน้อยกว่า 10^{-4} การพิจารณา Steady State Criterion จะพิจารณาจากโครงสร้างทางความร้อนที่ได้จากการคำนวณที่เวลาหนึ่งเปรียบเทียบกับโครงสร้างทางความร้อนที่ได้จากการคำนวณที่เวลาก่อนหน้า อีกทั้งมีการพิจารณาคำตอบในช่วง Steady State ส่วนการเผาไหม้เจ็ทเชื้อเพลิงก๊าซ โดยการเปรียบเทียบระหว่างค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเจ็ท (Jet Heating Value) ของการคำนวณก่อนหน้ากับค่าปัจจุบัน โดยถ้ามีความแตกต่างกันน้อยกว่า 10^{-4} ในทุกๆ Node จะเป็นการเสร็จสิ้นการคำนวณทันทีแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ลำดับขั้นตอนการแก้ระบบสมการ

บทที่ 5

ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลการศึกษาจะถูกรายงานโดยการเปรียบเทียบโครงสร้างทางอุณหภูมิจากหัวเผาแบบเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง (Self-aspirating porous media burner: SPMB) กับผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยคุณสมบัติทางกายภาพของหัวเผาดังกล่าวที่ใช้ในการจำลองแสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 Burner physical properties

XE (packed bed length)	0.15	m
d_p	0.015	m
n_p	3.54943×10^5	m^{-3}
D_h	0.14	m
ρ_s (density)	2316	$kg\ m^{-3}$
ε (porosity)	0.419	-
ε (emissivity)	0.94	-
λ_s (thermal conductivity)	7.12	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$
C_{ps} (specific heat capacity)	1331	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$

5.1 ผลจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของวัสดุพรุน (Porous domain)

5.1.1 การเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างทางความร้อนจากการทดลองกับการจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาวัสดุพรุนที่เหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง

รูปที่ 5.6 รูปที่ 5.7 และ รูปที่ 5.8 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิก๊าซและของแข็งตามแนวแกน Axial บริเวณจุดศูนย์กลางภายในหัวเผาแบบวัสดุพรุนระหว่างผลการจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง โดยพิจารณาที่ค่าอัตราการป้อนพลังงานความร้อน (Heat input) เท่ากับ 40 kW และค่า $\phi = 2.025$ จากรูปพบว่าแนวโน้มที่ได้จากการจำลองทั้งสามกรณีมีความสอดคล้องกับผลจากการทดลองเป็นอย่างดี ในขณะที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ (อุณหภูมิก๊าซ) ให้ค่าสูงกว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ทางทฤษฎีทุกกรณี เมื่อพิจารณาอุณหภูมิทั้งระบบ (อุณหภูมิของแข็งและก๊าซ) ให้ค่าสูงกว่าการทดลองบริเวณ Upstream และให้ค่าต่ำกว่าการทดลองบริเวณ Downstream ทุกกรณี เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีการเผาไหม้ของแบบจำลองกำหนดให้เป็น Simple single step reaction และแบบจำลองของการเผาไหม้เจ็ดเชื้อเพลิงก๊าซที่พ่นสู่อากาศหนึ่งเป็นการไหลแบบลามินา ส่งผลให้เปลวไฟที่ทำนายได้ยาวกว่าเปลวไฟจากการทดลอง ทำให้ผลของ Flame radiation intensity ที่ตกกระทบตรงบริเวณทางออกของหัวเผาน้อยกว่าเปลวไฟที่ต้นซึ่งเกิดขึ้นจริงจากการทดลองดังรูปที่ ค.48 อีกทั้งทุกกรณีของการจำลองค่า Physical properties ของวัสดุพรุนถูกกำหนดไว้ไม่ให้ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจากการทดลองเป็นตัวกำหนด แต่อย่างไรก็ตามที่กรณี 40 kW และ 61 kW ผลจากแบบจำลองปรากฏค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลอง พิจารณาดำเนินการเผาไหม้ (ตำแหน่งที่อุณหภูมิสูงสุด) อยู่ทางด้าน Upstream มากกว่าตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุดจากการทดลอง พิจารณาด้าน Upstream อุณหภูมิของแข็ง (Solid phase) จะสูงกว่าอุณหภูมิของก๊าซ (Gas phase) ดังนั้นพลังงานความร้อนจะถูกถ่ายเทจากของแข็งไปยังก๊าซที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ในทางตรงกันข้ามพิจารณาที่ด้าน Downstream อุณหภูมิของก๊าซจะสูงกว่าอุณหภูมิของแข็ง ดังนั้นพลังงานความร้อนจะถูกถ่ายเทจากก๊าซไปยังของแข็งและตัวของแข็งเองจะเกิดกระบวนการหมุนเวียนพลังงานเกิดขึ้น โดยการหมุนเวียนเอาพลังงานความร้อนบริเวณ Downstream ที่อุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณ Upstream ที่อุณหภูมิต่ำ โดยกระบวนการการนำความร้อนผ่านเนื้อของแข็งที่ต่อกันเป็นโครงข่าย และโดยกระบวนการแผ่รังสีความร้อนโดยตัวของของแข็งเอง ดังนั้นอุณหภูมิของก๊าซจะลดต่ำลงก่อนไหลออกจากหัว ส่วนอุณหภูมิของของแข็งจากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกันกับการทดลอง และอุณหภูมิการเผาไหม้ในวัสดุพรุนให้แนวโน้มสูงกว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ทางทฤษฎี เมื่อค่าอัตราส่วนสมมูลมีค่ามากขึ้นดังรูปที่ ข.4

5.1.2 Local Energy Balance ของระบบหั่วแบบวัสดุพูนที่เหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง

รูปที่ 5.1 ถึง รูปที่ 5.5 แสดงกระบวนการมาตรฐานในการจำลองการเผาไหม้ของหั่วเผาวัสดุพูน รูปที่ 5.2 และ รูปที่ 5.3 แสดง Local Energy Balance ภายในระบบหั่วแบบวัสดุพูนแยกแสดงระหว่าง Gas phase และ Solid phase เมื่อพิจารณา INT (Interaction term แสดงถึงการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับของแข็ง) จะพบว่าบริเวณก่อนตำแหน่งการเผาไหม้ (Preheat zone) ค่าของ INT มีค่าเป็นบวกแสดงให้เห็นถึงการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากของแข็งไปยังก๊าซที่เกิดจากกระบวนการหมุนเวียนพลังงานความร้อนของวัสดุพูนตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.3 จะเป็นการอุ่นไอดีให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนกระบวนการเผาไหม้ (Excess enthalpy) ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่าอุณหภูมิอะเดียติก และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งการเผาไหม้ตลอดทั้งกราฟของ Gas phase และ Solid phase จะเห็นได้ว่า CV (แสดงการพาความร้อนของก๊าซ) มีบทบาทที่สำคัญในการกักเก็บพลังงานความร้อนที่ถูกปลดปล่อยจากกระบวนการเคมีการเผาไหม้ (Reaction) เป็นอันดับแรก หลังจากนั้นก็จะถ่ายเทพลังงานความร้อนไปที่กับของแข็งโดยพลังงานที่ถูกถ่ายเทส่วนมากผ่านทาง CD (แสดงการนำความร้อนของของแข็ง) และการสมดุลพลังงานทั้งระบบมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.61 เปอร์เซ็นต์

5.1.3 Radiative Heat Flux ของระบบหั่วแบบวัสดุพูนที่เหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง

รูปที่ 5.4 แสดง Radiative Heat Flux ของหั่วเผาในส่วน of วัสดุพูนโดยพิจารณาที่ค่าอัตราการป้อนพลังงานความร้อน (Heat input) เท่ากับ 40 kW และค่า $\phi = 2.025$ สัญลักษณ์ H^+ และ H^- แทนทิศทางของ Net Radiative Heat Flux จากขวาไปซ้าย และซ้ายไปขวาตามลำดับ ส่วน H คือผลรวมระหว่าง H^+ และ H^- จากกราฟแสดงให้เห็นว่าบริเวณ Upstream ทิศทางของ Net Radiative Heat Flux จะมาจากบริเวณการเผาไหม้และมีค่าเป็นลบ (H^-) และในทางตรงกันข้ามบริเวณ Downstream หลังจากบริเวณการเผาไหม้ Radiative heat flux ก็จะมีค่าเป็นบวก (H^+)

รูปที่ 5.5 แสดง Divergence of Net Radiative Heat flux (DHT) ของระบบหั่วแบบวัสดุพูนที่เหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเองโดยพิจารณาที่ค่าอัตราการป้อนพลังงานความร้อน (Heat input) เท่ากับ 40 kW และค่า $\phi = 2.025$ พิจารณาค่า DHT เป็นบวกและลบที่ปรากฏในกราฟ สำหรับ DHT^+ จะให้ความหมายบริเวณดังกล่าวที่วัสดุพูนอยู่ในสถานะเป็นตัวแผ่รังสีความร้อน (Emitter) ปรากฏที่บริเวณด้าน Downstream ในทางตรงกันข้ามที่ค่า DHT^- วัสดุพูนอยู่ในสถานะตัวดูดกลืนรังสีความร้อน (Absorber) ปรากฏที่บริเวณด้าน Upstream ส่วนบริเวณที่ DHT มีค่าเท่ากับศูนย์แสดงว่าบริเวณดังกล่าววัสดุพูนอยู่ในสถานะ Radiative Equilibrium

5.1.4 การเปรียบเทียบโครงสร้างทางความร้อนของผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ Firing rate ต่างๆ

รูปที่ 5.9 และ รูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างอุณหภูมิก๊าซและของแข็งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ Firing rate ต่างๆ จะพบว่าเมื่อค่า Firing rate เพิ่มขึ้นอุณหภูมิภายในระบบหัวเผาเพิ่มขึ้นและตำแหน่งของเปลวไฟจะเคลื่อนไปบริเวณ Upstream มากขึ้น อีกทั้งค่า Equivalence ratio ของหัวเผาแบบเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเองนั้นก็มีการเปลี่ยนแปลงกับ Firing rate ด้วยเช่นกัน โดยที่ค่า Equivalence ratio จะมีค่า Lean มากขึ้นเรื่อยๆตาม Firing rate ที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งที่ $FR = 45 \text{ kW}$ หลังจากนั้น Equivalence ratio จะมีค่า Rich มากขึ้นตาม Firing rate ที่เพิ่มขึ้น และ รูปที่ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบ Net Radiative Heat Flux ของการจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ Firing rate ต่างๆ พบว่าเมื่อ Firing rate เพิ่มขึ้น Net Radiative Heat Flux จะมากขึ้นตามไปด้วย พร้อมการมีการแผ่รังสีไปทางด้าน Upstream และ Downstream มากขึ้นเช่นกัน

5.1.5 ประสิทธิภาพทางความร้อนของหัวเผาวัสดุพูนแบบเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง

รูปที่ 5.12 แสดงประสิทธิภาพการหมุนเวียนความร้อนของหัวเผาวัสดุพูนแบบเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเองเป็นฟังก์ชันกับ Firing rate สำหรับค่า Firing rate ค่ามีประสิทธิภาพการหมุนเวียนความร้อนที่สูงกว่าที่ค่า Firing rate สูง โดยการหมุนเวียนความร้อนผ่านการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุพูนมีบทบาทความสำคัญมากกว่า เมื่อเทียบกับการหมุนเวียนความร้อนผ่านการนำความร้อนโดยเนื้อวัสดุพูนเอง ภายใต้สภาวะการเผาไหม้ที่ไอดีหนามาก และสอดคล้องกับการรายงานผลการพิจารณาประสิทธิภาพการหมุนเวียนความร้อนตามเอกสารอ้างอิงที่ [6]

รูปที่ 5.13 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนของหัวเผาทางด้าน Downstream กับการทดลอง ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันและแนวโน้มมีลักษณะสอดคล้องกัน โดยที่ผลจากการจำลองต่ำกว่าผลจากการทดลอง ประการแรกคือ โครงสร้างอุณหภูมิภายในหัวเผาวัสดุพูนที่ได้จากการจำลองมีค่าต่ำกว่าผลการทดลอง ประการที่สองคือ การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการจำลองทางคณิตศาสตร์กับการคำนวณด้วยผลการทดลอง [7] ในส่วนของการคำนวณด้วยผลการทดลองไม่คิดการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟ แต่การจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นเราก็คำนวณการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟด้วย เพราะว่าพลังงานความร้อนที่เกิดจากกระบวนการเคมีเผาไหม้ภายในวัสดุพูนประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบหัวเผา นั้นหมายความว่าพลังงานที่เหลือจะต้องเกิดขึ้นที่ภายนอกวัสดุพูน (Jet domain) ด้วยเหตุดังกล่าวนี้นี้จึงไม่ควรที่จะละเลยการเผาไหม้ส่วนที่เหลือ

รูปที่ 5.14 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนของหัวเผาทางด้าน Upstream ปรากฏค่าที่สูงกว่าผลจากการทดลองทุก Firing rate เนื่องจากว่าอุณหภูมิของหัวเผาวัสดุพูนสูงกว่าอุณหภูมิจากการทดลองรวมทั้งเหตุผลที่ได้บรรยายไว้ในหัวข้อ 5.1.1

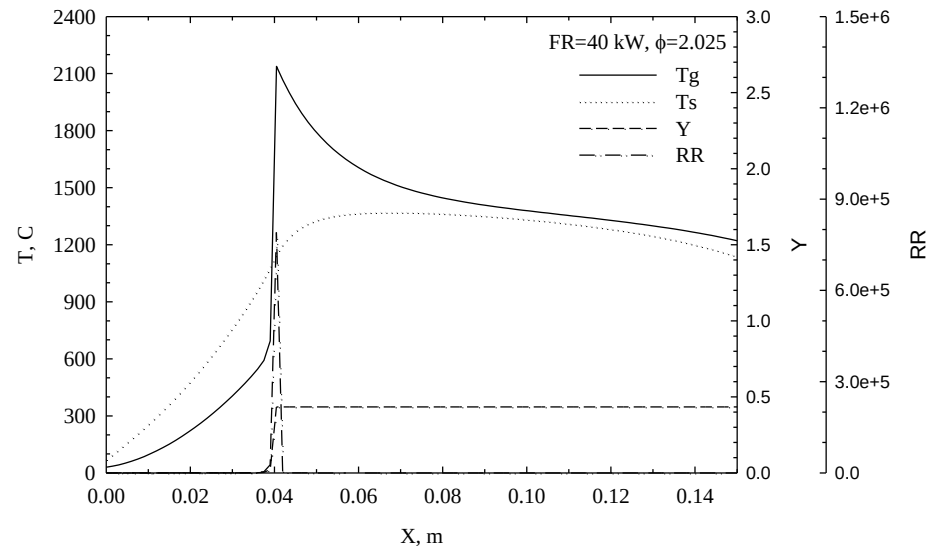
5.1.6 อิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อโครงสร้างทางความร้อนภายในระบบหัวเผาวัสดุพูนแบบเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง

รูปที่ 5.15 และ รูปที่ 5.16 แสดงอิทธิพลของ Equivalence ratio ต่อโครงสร้างอุณหภูมิในหัวเผาวัสดุพูนที่ Firing rate เท่ากับ 40 kW พบว่าเมื่อค่า Equivalence ratio มากขึ้นอุณหภูมิภายในระบบมีค่าน้อยลง (กระบวนการเผาไหม้แย่ลงเนื่องจากคุณภาพของไอดีแย่ลง) และตำแหน่งการเผาไหม้เคลื่อนไปทางด้าน Upstream (แม้ว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำลงแต่ความเร็วของเปลวไฟยังสามารถลามและเสถียรอยู่ได้ในวัสดุพูนเป็นผลจากการหมุนเวียนความร้อนในวัสดุพูน)

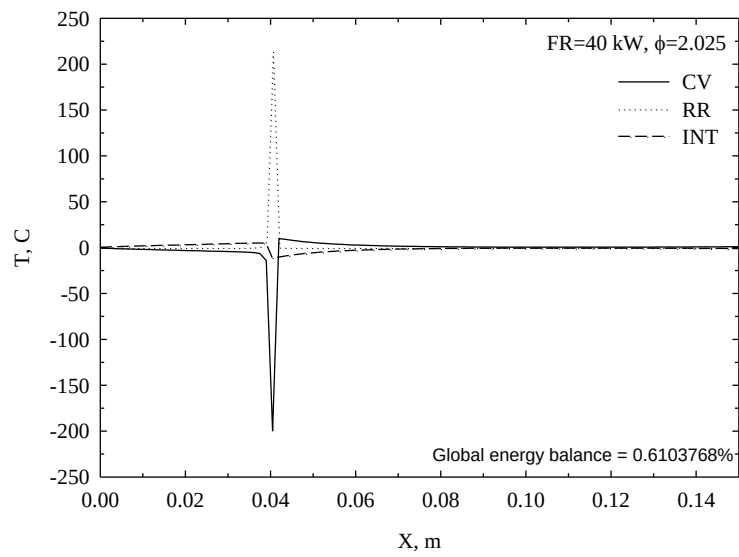
รูปที่ 5. 17 และ รูปที่ 5.18 แสดงอิทธิพลของ Firing rate ต่อโครงสร้างอุณหภูมิในหัวเผาวัสดุพูนที่ Equivalence ratio เท่ากับ 2.025 เมื่อ Firing rate เพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิในระบบจะสูงขึ้นและตำแหน่งของเปลวไฟจะเคลื่อนไปทางด้าน Upstream

รูปที่ 5.19 และ รูปที่ 5.20 แสดงอิทธิพลของ Optical thickness ต่อโครงสร้างอุณหภูมิในหัวเผาวัสดุพูนที่ Firing rate เท่ากับ 40 kW และค่า Equivalence ratio เท่ากับ 2.025 พบว่าเมื่อค่า Optical thickness เพิ่มขึ้นอุณหภูมิภายในระบบจะสูงขึ้น และตำแหน่งของเปลวไฟเคลื่อนไปทางด้าน Upstream เนื่องจากการเพิ่มค่า Optical thickness โดยที่ค่าความยาวตามแนวแกนของระบบเท่าเดิมนั้นหมายความว่าค่าความหนาเชิงแสงมากขึ้น ทำให้วัสดุพูนสามารถดูดกลืนรังสีความร้อนได้มากขึ้น และการแผ่รังสีก็จะมีค่ามากขึ้น เช่นเดียวกัน

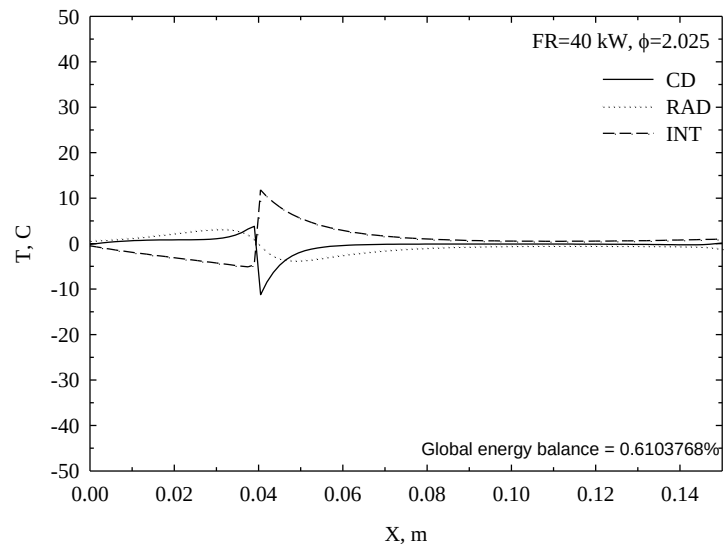
รูปที่ 5.21 และ รูปที่ 5.22 แสดงอิทธิพลของ Ambient oxygen content ต่อโครงสร้างทางความร้อนของหัวเผาวัสดุพูนที่ Firing rate เท่ากับ 40 kW พบว่าที่ค่า Ambient oxygen ค่าต่างๆ (โดยปริมาตร) ไม่ค่อยมีผลกระทบต่อโครงสร้างทางความร้อนภายในหัวเผาวัสดุพูน



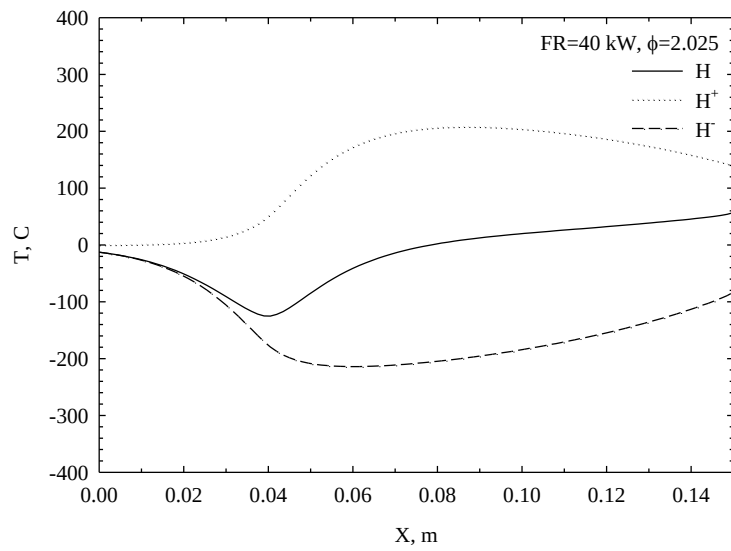
รูปที่ 5.1 โครงสร้างทางความร้อนภายในหัวเผาวัสดุพูนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (FR = 40 kW)



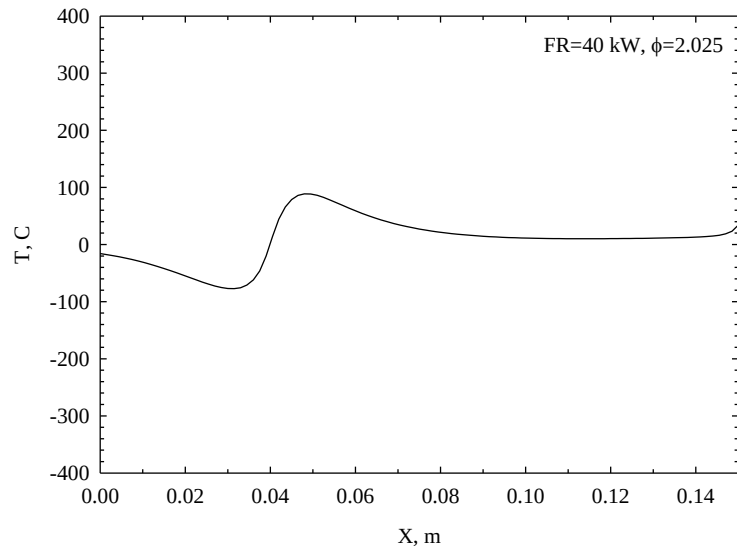
รูปที่ 5.2 Local energy balance of gas phase ของหัวเผาในส่วนวัสดุพูน (FR = 40 kW)



รูปที่ 5.3 Local energy balance of solid phase ของหัวเผาในส่วนวัสดุพูน (FR = 40 kW)

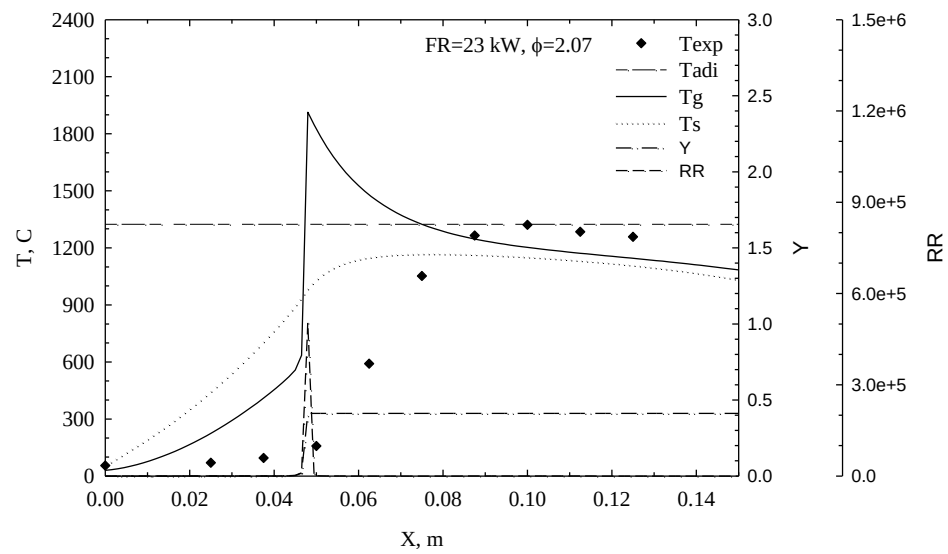


รูปที่ 5.4 Radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพูน (FR = 40 kW)



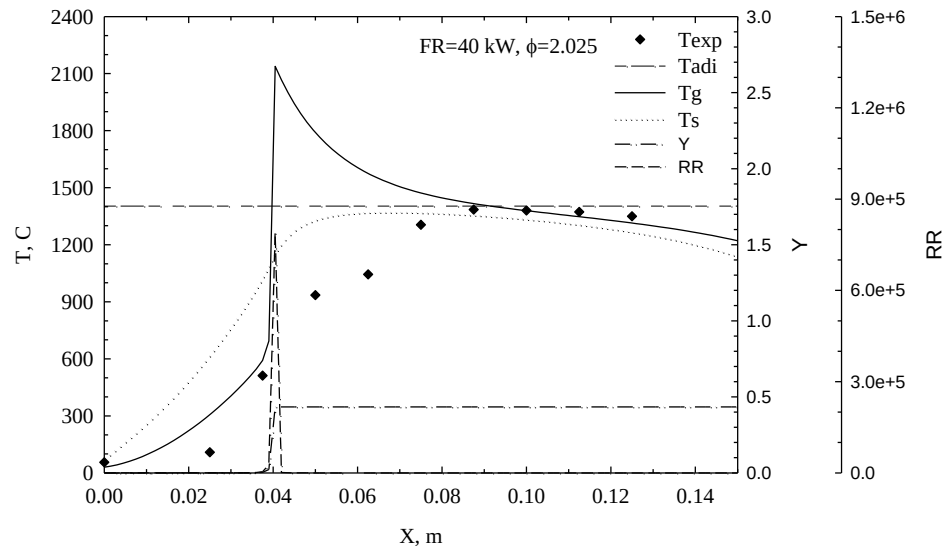
รูปที่ 5.5 Divergence of net radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพูน

(FR = 40 kW)

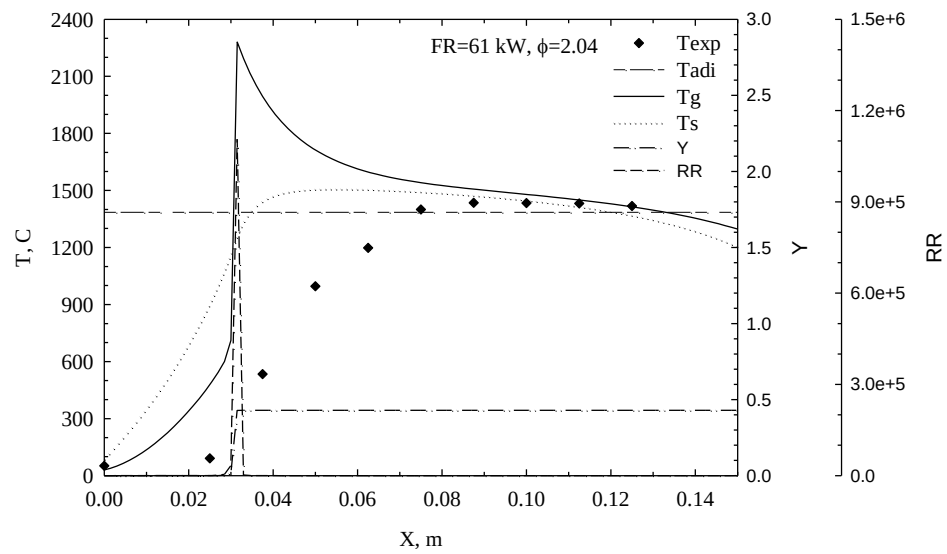


รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างทางความร้อนภายในหัวเผาวัสดุพูน

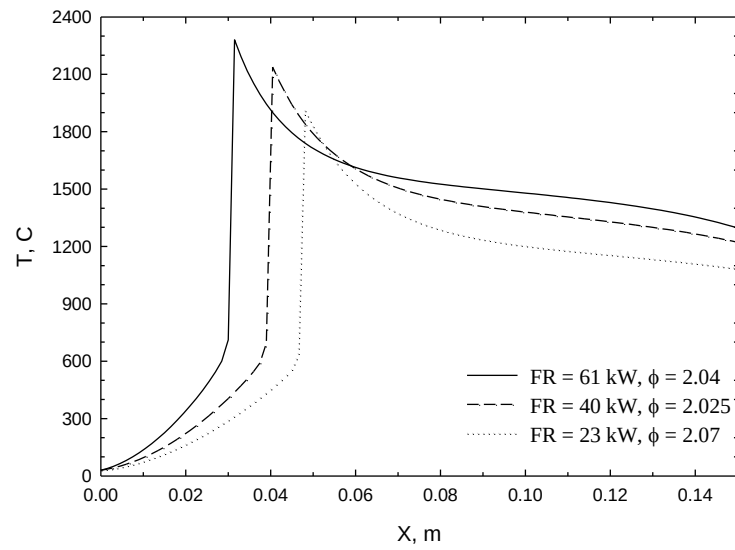
จากการทดลองกับการจำลองทางคณิตศาสตร์ (FR = 23 kW)



รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างทางความร้อนภายในหัวเผาวัสดุพูนจากการ
ทดลองกับการจำลองทางคณิตศาสตร์ (FR = 40 kW)

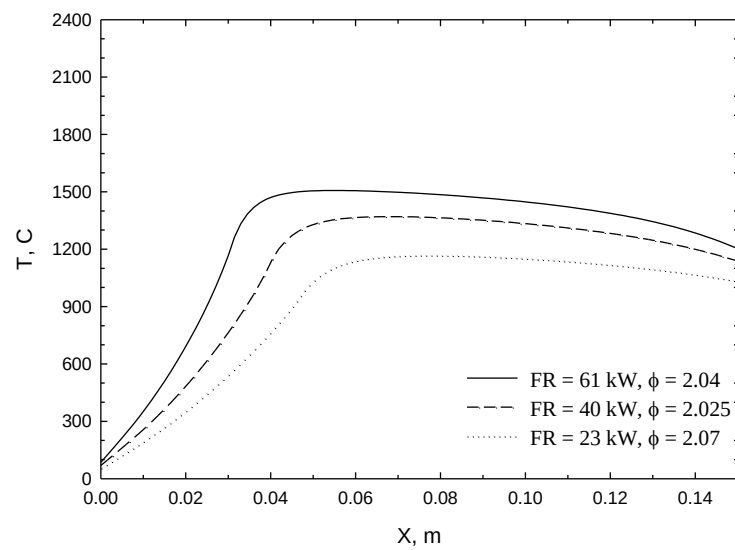


รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างทางความร้อนภายในหัวเผาวัสดุพูนจากการ
ทดลองกับการจำลองทางคณิตศาสตร์ (FR = 61 kW)



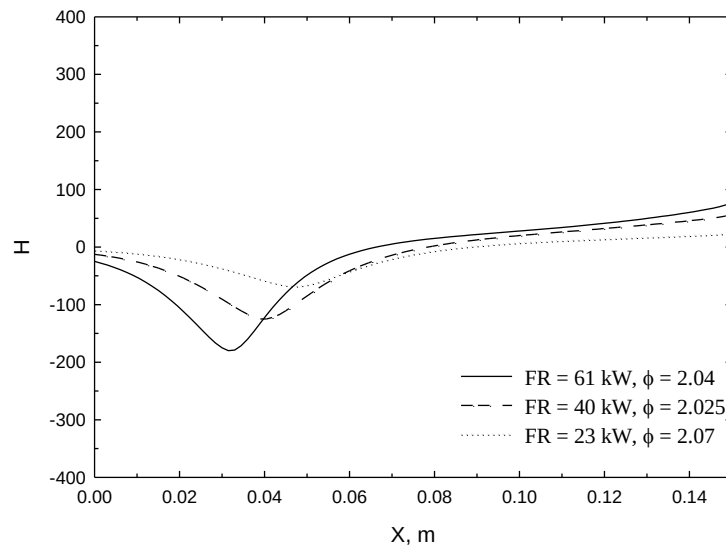
รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบโครงสร้างอุณหภูมิก๊าซของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ที่ Firing rate ต่างๆ

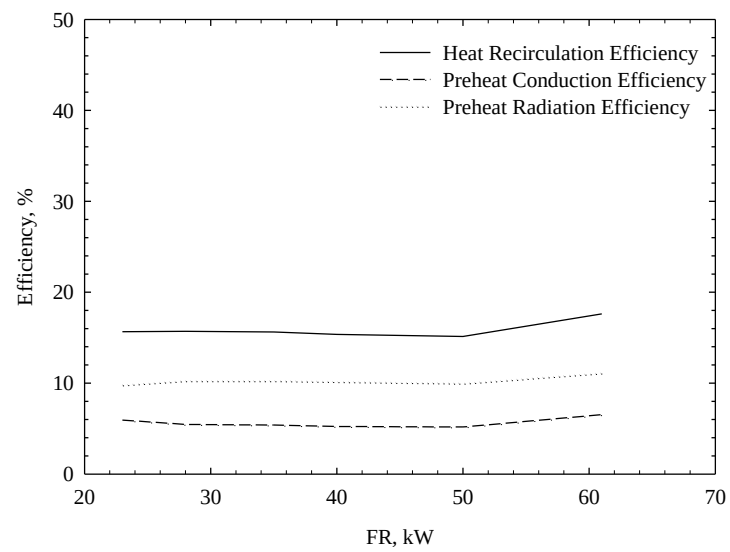


รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบโครงสร้างอุณหภูมิของแข็งของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

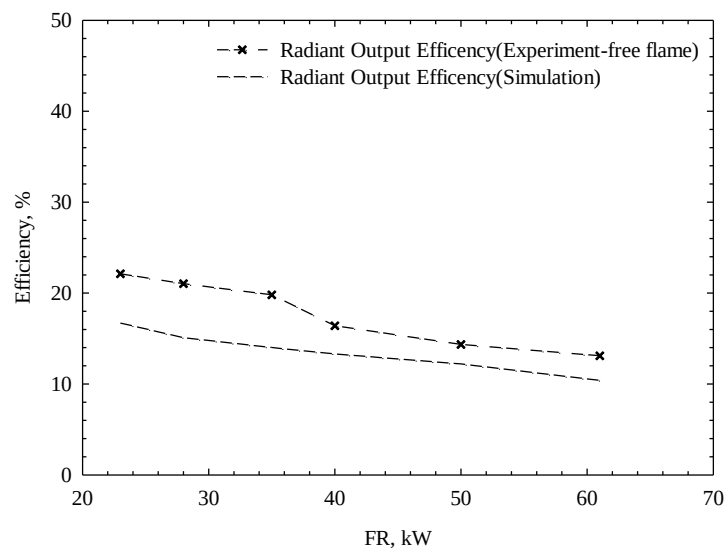
ที่ Firing rate ต่างๆ



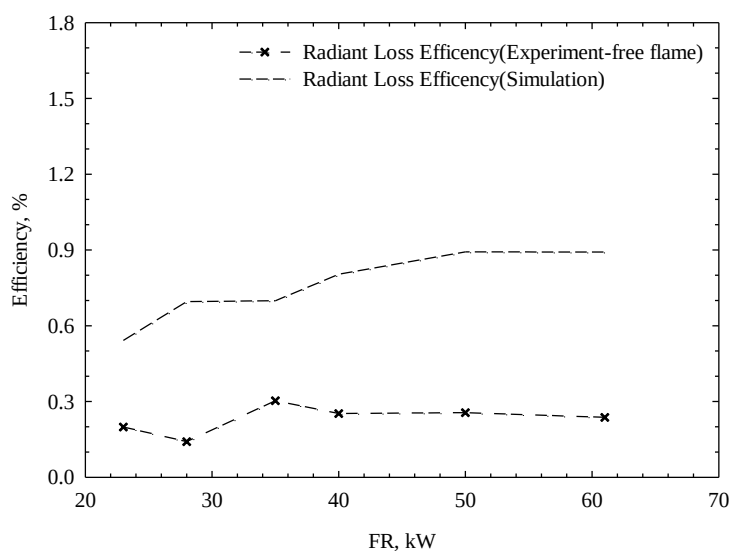
รูปที่ 5.11 การเปรียบเทียบ Net Radiative Heat Flux ของการจำลองทางคณิตศาสตร์
ที่ Firing rate ต่างๆ



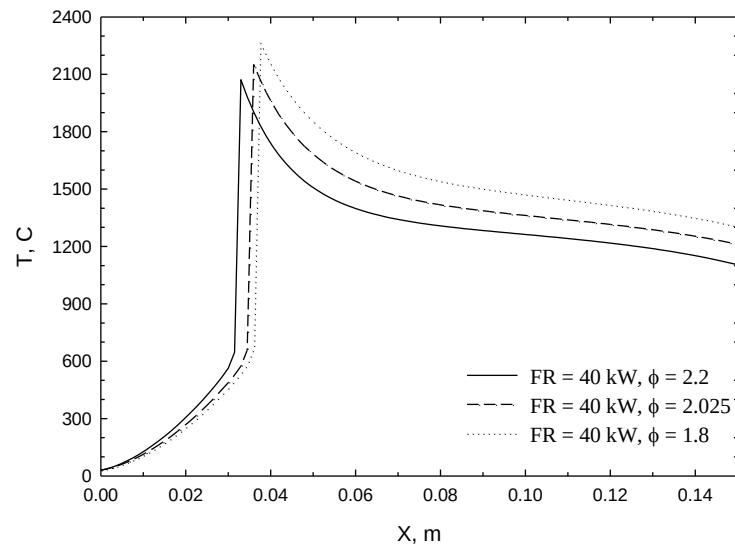
รูปที่ 5.12 ประสิทธิภาพการหมุนเวียนความร้อนของหัวเผาวัสดุพูนส่วน Preheat zone



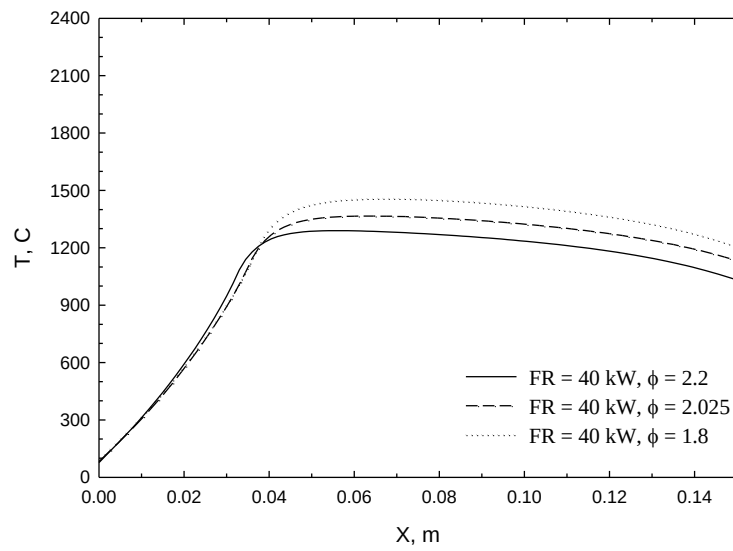
รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนของหัวเผาทางด้าน Downstream



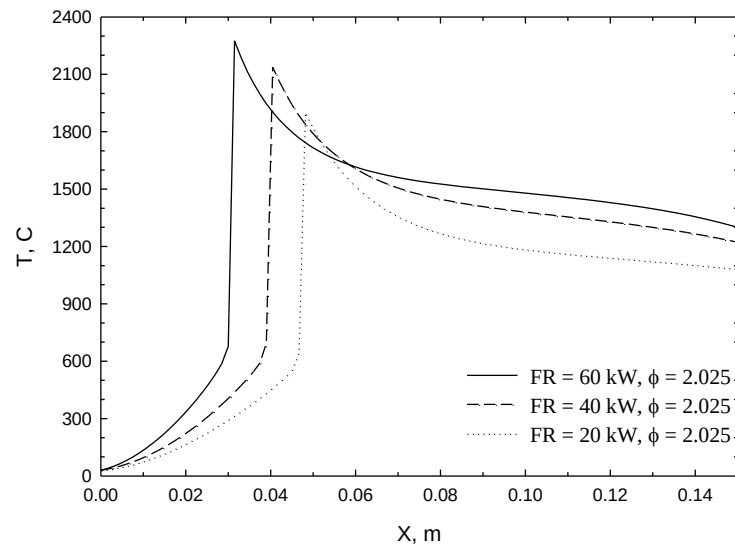
รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนของหัวเผาทางด้าน Upstream



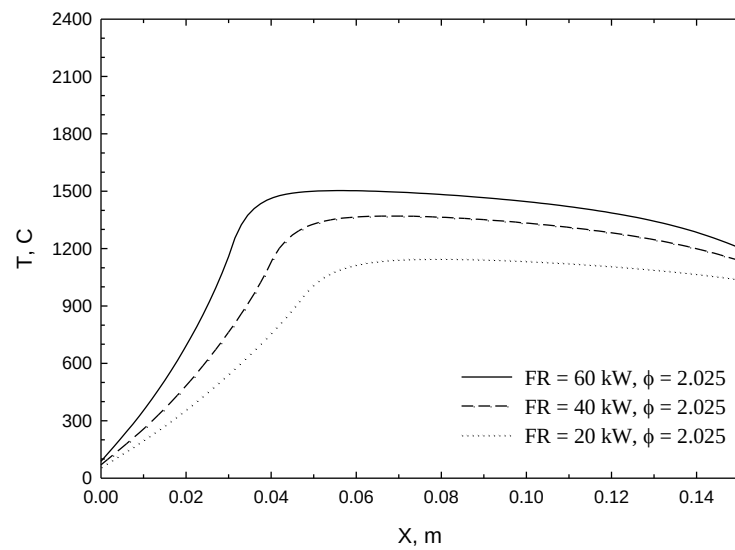
รูปที่ 5.15 อิทธิพล Equivalence ratio ต่อโครงสร้างอุณหภูมิก๊าซในหัววัสดุพอรุน



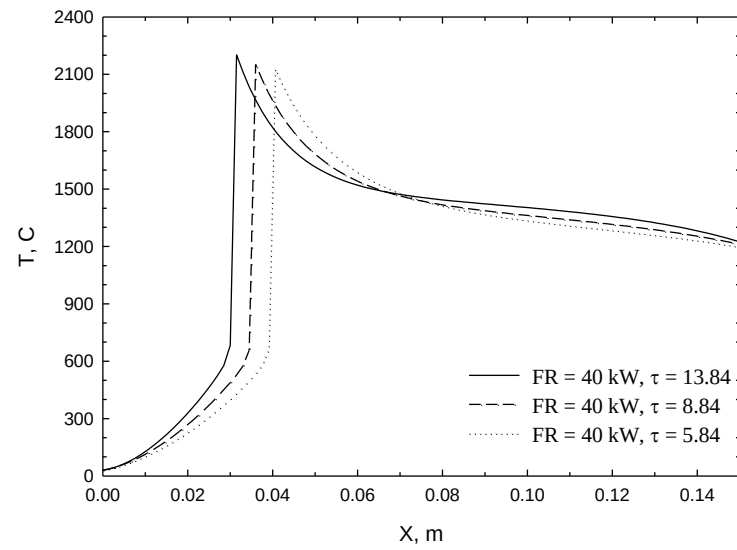
รูปที่ 5.16 อิทธิพล Equivalence ratio ต่อโครงสร้างอุณหภูมิของแข็งในหัววัสดุพอรุน



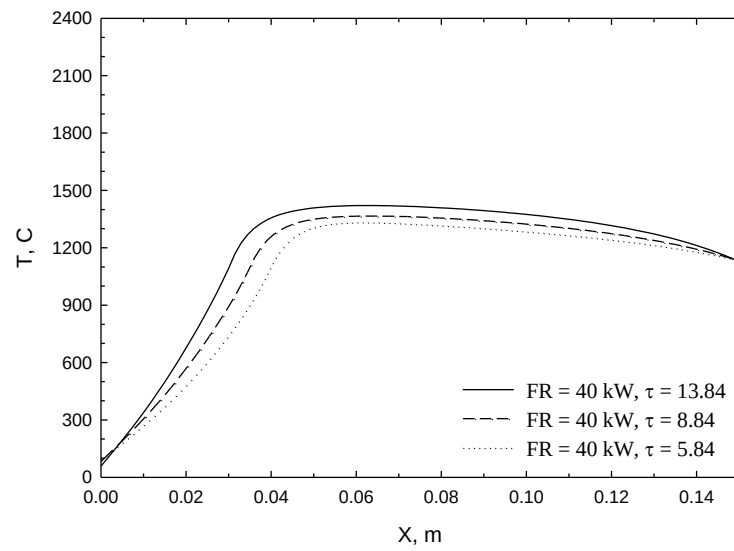
รูปที่ 5.17 อิทธิพล Firing rate ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิก๊าซในหัวเผาวัสดุพูน



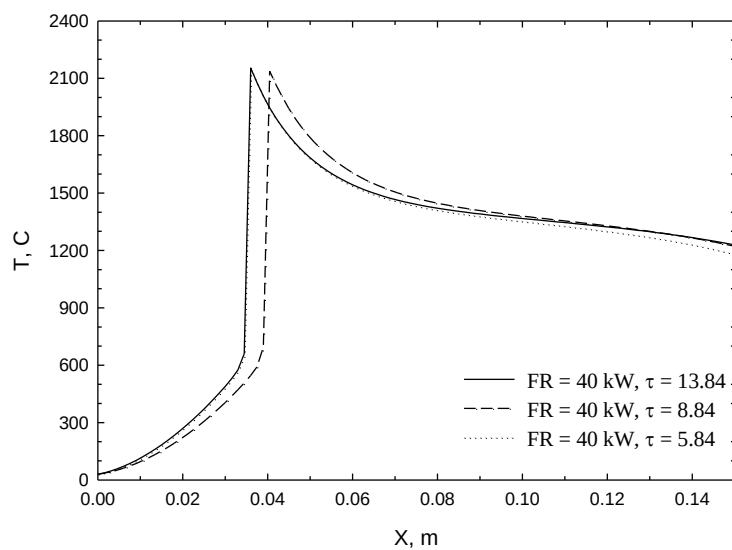
รูปที่ 5.18 อิทธิพล Firing rate ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิของแข็งในหัวเผาวัสดุพูน



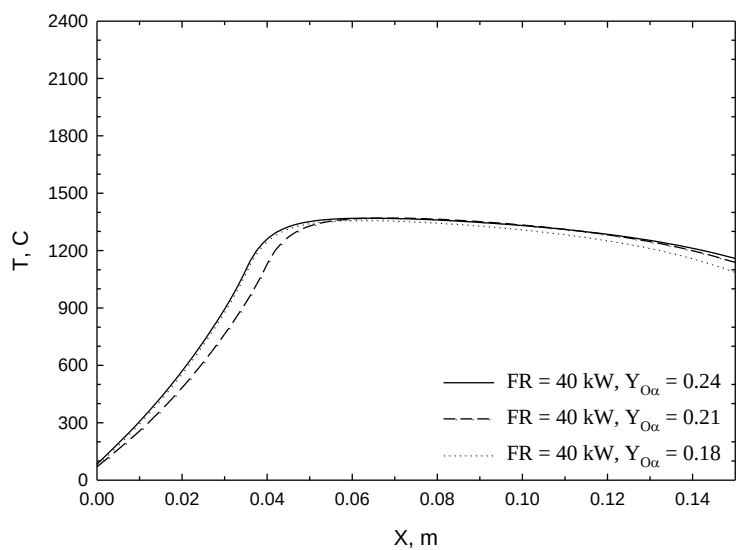
รูปที่ 5.19 อิทธิพล Optical thickness ต่อโครงสร้างอุณหภูมิก๊าซในหัวเผาวัสดุพูน



รูปที่ 5.20 อิทธิพล Optical thickness ต่อโครงสร้างอุณหภูมิของแข็งในหัวเผาวัสดุพูน



รูปที่ 5.21 อิทธิพล Ambient oxygen content ต่อโครงสร้างอุณหภูมิก๊าซในหัวเผาวัสดุพูน



รูปที่ 5.22 อิทธิพล Ambient oxygen content ต่อโครงสร้างอุณหภูมิของแข็งในหัวเผาวัสดุพูน

5.2 ผลจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของการเผาไหม้เจ็ทเชื้อเพลิงก๊าซ

(Jet domain) 40 kW

5.2.1 เปรียบเทียบความยาวของเปลวไฟตามแนวแกน Axial ของการเผาไหม้เจ็ทเชื้อเพลิงก๊าซ

รูปที่ 5.28 รูปที่ 5.29 และ รูปที่ 5.30 แสดงการเปรียบเทียบความยาวของเปลวไฟตามแนวแกน Axial ของการเผาไหม้เจ็ทเชื้อเพลิงก๊าซจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลอง พบว่าความยาวของการเผาไหม้เจ็ทเชื้อเพลิงก๊าซจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยาวกว่าการทดลองทุกกรณี เหตุผลอันดับแรกคือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ใช้หลักการของการเผาไหม้เจ็ทเชื้อเพลิงก๊าซที่พ่นสู่ภาคนิ่งแบบลามินาร์ ซึ่งความเป็นจริงแล้วเปลวไฟจะมีการปั่นป่วน (Turbulence) สามารถสังเกตได้จากภาพถ่ายรูปเปลวไฟที่เวลาใดๆ ได้ในภาคผนวก ก เหตุผลอันดับที่สองคือ ความยาวของเปลวไฟจากการทดลองที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นใช้ข้อมูลในงานวิจัยของเอกสารอ้างอิงที่ [7] ซึ่งจะเห็นว่าภาพถ่ายเปลวไฟนั้นมีเพียงหนึ่งภาพต่อหนึ่งเงื่อนไขการเผาไหม้ซึ่งค่อนข้างที่จะน้อยในการประมาณค่าความยาวของเปลวไฟจากภาพถ่ายเหล่านี้

5.2.2 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้เจ็ทเชื้อเพลิงก๊าซ

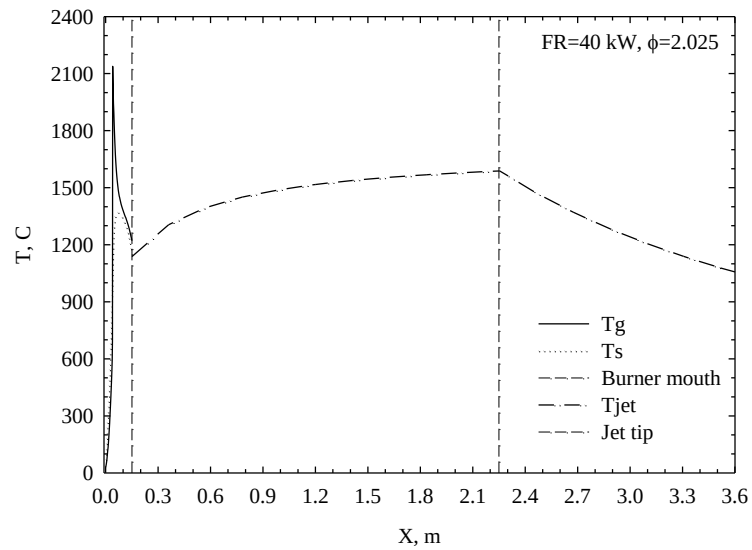
รูปที่ 5.23 ถึง รูปที่ 5.27 แสดงกระบวนการมาตรฐานในการจำลองการเผาไหม้ของหัวเผาวัสดุพูนสำหรับการเผาไหม้เจ็ทเชื้อเพลิงก๊าซ โดยที่ รูปที่ 5.24 แสดงการกระจายตัวตามแนวรัศมีของการเผาไหม้เจ็ทเชื้อเพลิงก๊าซพบว่าบริเวณการเผาไหม้ของเปลวไฟจะเป็นบริเวณที่อุณหภูมิสูงสุดหรือบริเวณอัตราส่วนสมมูลเท่ากับหนึ่งตามทฤษฎีของการเผาไหม้โดยการแพร่ (Diffusion flame) และเศษส่วนโมลของผลิตภัณฑ์สูงสุดตรงข้ามกับเศษส่วนโมลของเชื้อเพลิงและออกซิเจนโดยถูกใช้ในการเผาไหม้หมดไป ตามทฤษฎีการเผาไหม้เจ็ทเชื้อเพลิงก๊าซที่พ่นสู่ภาคนิ่งดังรูปที่ 4.3 ส่วน รูปที่ 5.25 และรูปที่ 5.26 แสดงการกระจายตัวตามแนวรัศมีของการเผาไหม้เจ็ทเชื้อเพลิงก๊าซที่ระยะทางตามแนวแกน $X = 1.2$ และ 2.25 เมตร ตามลำดับ ที่ตำแหน่ง $X=2.25$ เมตร เป็นบริเวณจุดปลายของเปลวไฟ (Flame tip) หรือจุดสิ้นสุดการเผาไหม้ โดยที่เชื้อเพลิงถูกเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ทั้งหมด และเปลวไฟมีการขยายตัวเมื่อระยะทางตามแนวแกน X เพิ่มขึ้นจากนั้นก็ลดลงและมีค่า $R = 0$ ที่บริเวณจุดปลายของเปลวไฟ และ รูปที่ ข.2

5.2.3 อิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อโครงสร้างทางความร้อนต่อการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซที่พ่นสู่อากาศนิ่ง

รูปที่ 5.31 แสดงอุณหภูมิตามแนวแกน X ที่จุดศูนย์กลางของหัวเผา โดยมีการเปลี่ยนแปลงทั้ง Firing rate และ Equivalence ratio พบว่าความยาวของเปลวไฟเพิ่มขึ้นเมื่อ Firing rate เพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิของเปลวไฟจะเพิ่มตาม Firing rate ในช่วงแรกเท่านั้น เนื่องจากว่าในช่วงแรก ($\phi \leq 45kW$) Firing rate เพิ่มขึ้นจะทำให้ Equivalence ratio มีค่า Lean มากขึ้นเรื่อยๆเหตุผลคือเจ็ตเชื้อเพลิงยังสามารถเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรก (Primary aeration) ได้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดจาก Nozzle [8] โดยเราจะสังเกตอิทธิพลของ Equivalence ratio ที่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซได้จากรูปที่ 5.32 และรูปที่ 5.33 จากนั้นที่ ($\phi > 45kW$) อุณหภูมิของเปลวไฟจะลดลง แม้ว่า Firing rate จะเพิ่มขึ้นก็ตามเนื่องจากการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกของเจ็ตเชื้อเพลิงแย่ง ส่งผลให้ Equivalence ratio มีค่า Rich มากขึ้นซึ่งมีผลกระทบต่ออุณหภูมิของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซมากกว่า Firing rate

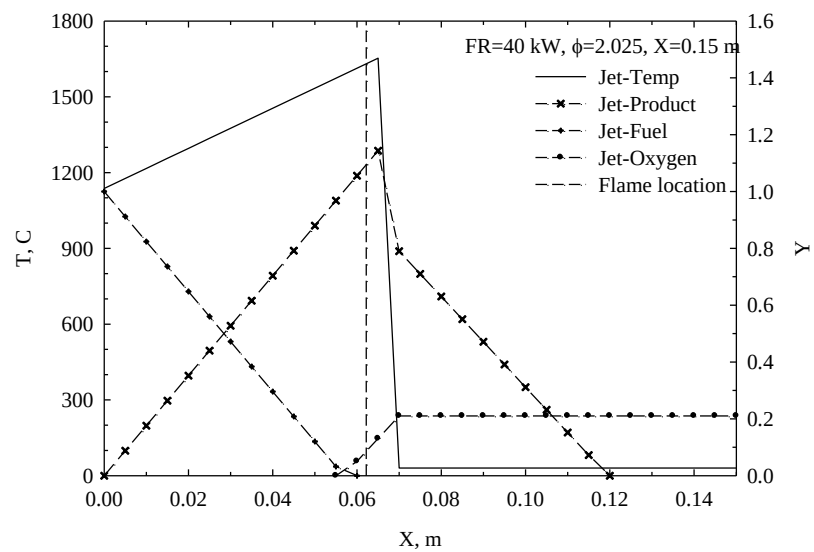
รูปที่ 5.34 แสดงอิทธิพลของ Optical thickness ต่อโครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซตามแนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลางที่ Firing rate = 40 kW พบว่า Optical thickness ไม่มีผลกระทบต่อความยาวของเปลวไฟ

รูปที่ 5.35 แสดงอิทธิพลของ Ambient oxygen ต่อโครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซตามแนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลางที่ Firing rate = 40 kW พบว่าเมื่อค่า Ambient oxygen มากขึ้นจะส่งผลให้ความยาวเปลวไฟลดลง เนื่องจากว่าเชื้อเพลิงมีโอกาสทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่ายขึ้น จึงส่งผลให้เชื้อเพลิงถูกเผาผลาญหมดไปเร็วขึ้น หรือในทางตรงกันข้ามที่ Ambient oxygen น้อยลง อาจจะมองว่าเชื้อเพลิงที่ถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซนั้นมีปริมาณก๊าซเฉื่อยผสมอยู่มาก จึงส่งผลทำให้เชื้อเพลิงมีโอกาสทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ยากลำบากมากขึ้นนั่นเอง



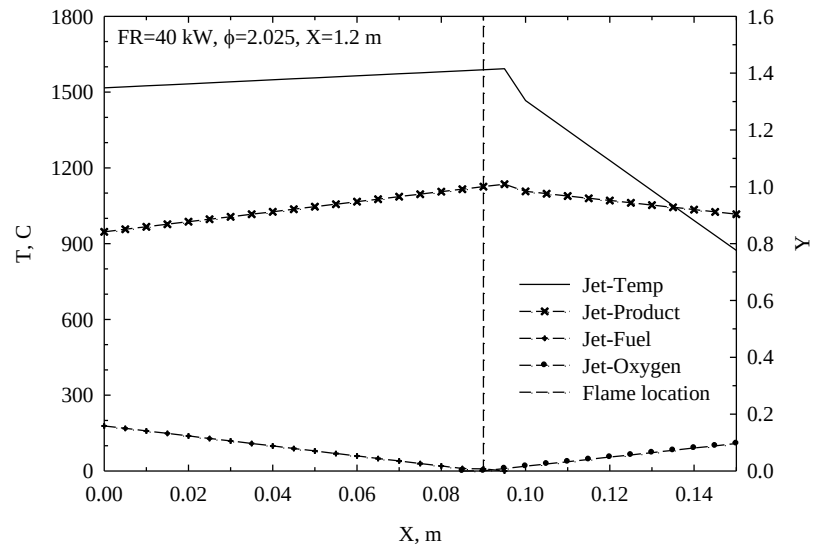
รูปที่ 5.23 เปรียบเทียบความยาวของเปลวไฟตามแนวแกน Axial ของการเผาไหม้

เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ (FR = 40 kW)



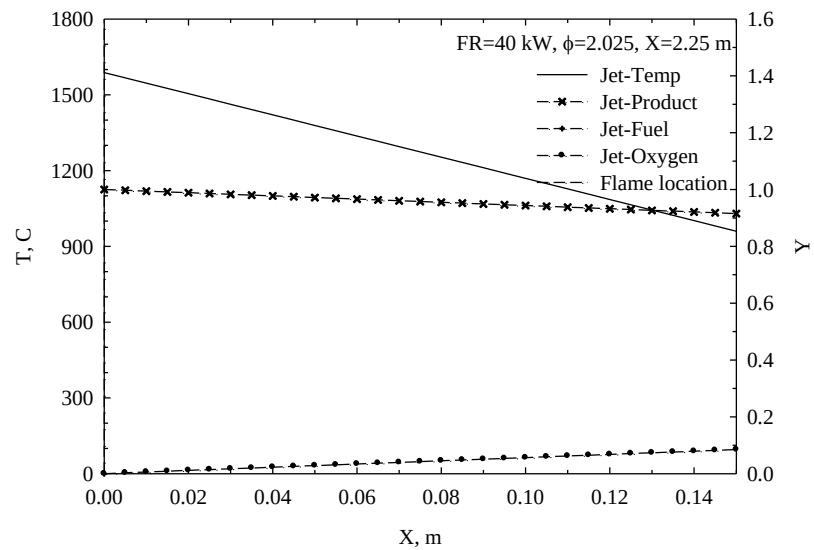
รูปที่ 5.24 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้

เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซที่ $X=0.15$ m (FR = 40 kW)



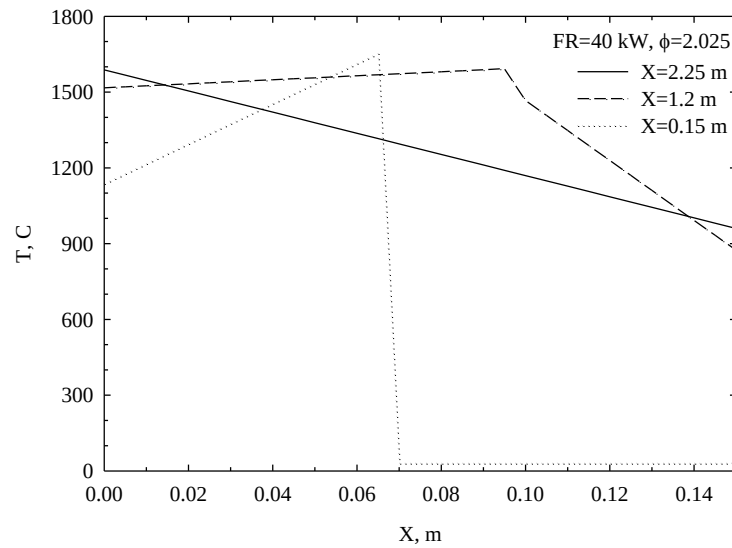
รูปที่ 5.25 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้เจ็ต

เชื้อเพลิงก๊าซที่ $X=1.2$ m (FR = 40 kW)



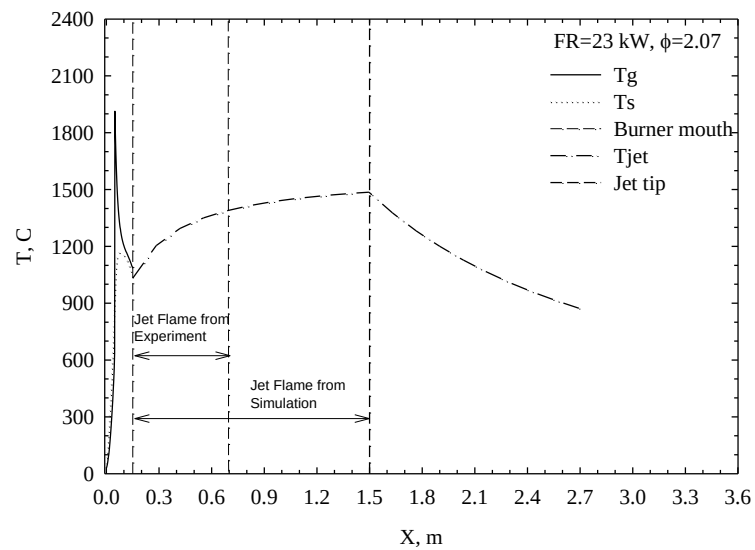
รูปที่ 5.26 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้เจ็ต

เชื้อเพลิงก๊าซที่ $X=2.25$ m (FR = 40 kW)



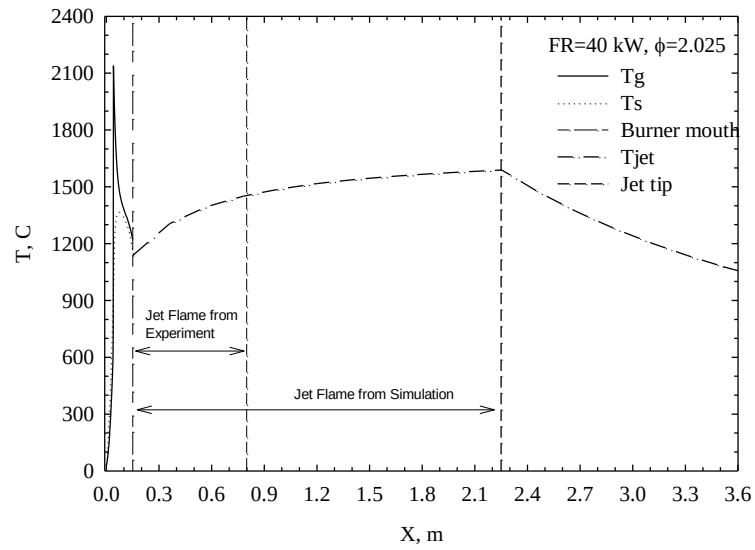
รูปที่ 5.27 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวรัศมี (Radial distribution profile)

ของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ ($FR = 40 \text{ kW}$)



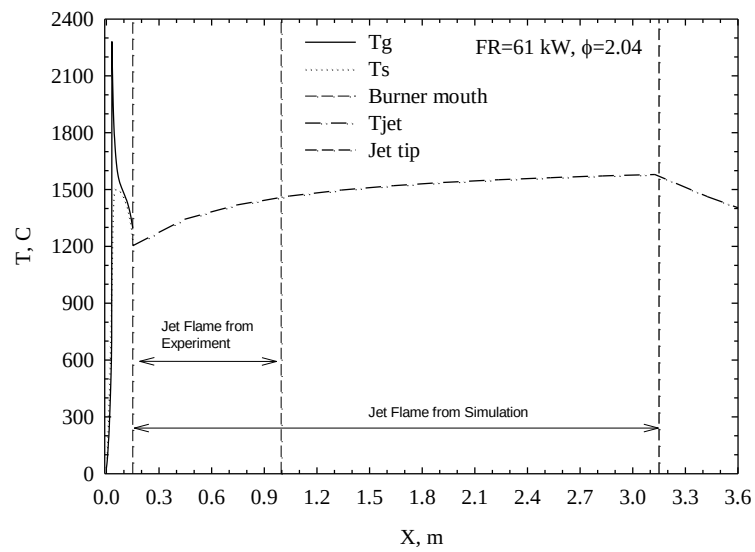
รูปที่ 5.28 เปรียบเทียบความยาวของเปลวไฟตามแนวแกน Axial ของการเผาไหม้

เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ ($FR = 23 \text{ kW}$)



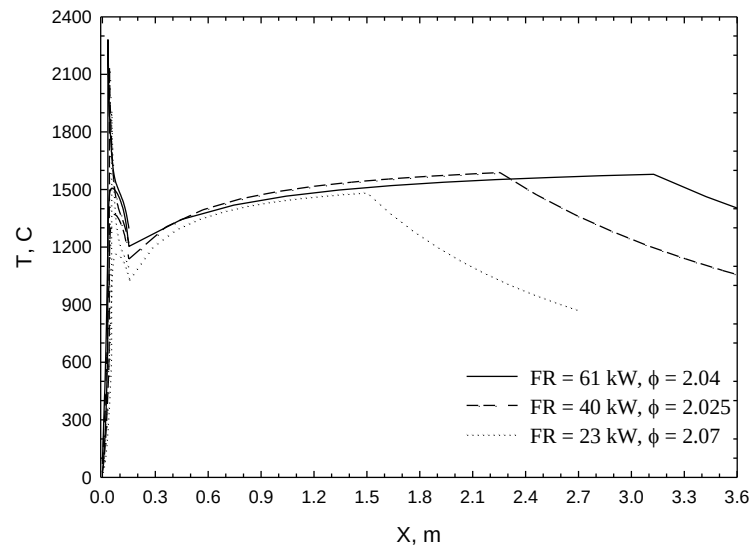
รูปที่ 5.29 เปรียบเทียบความยาวของเปลวไฟตามแนวแกน Axial ของการเผาไหม้

เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ ($FR = 40 \text{ kW}$)

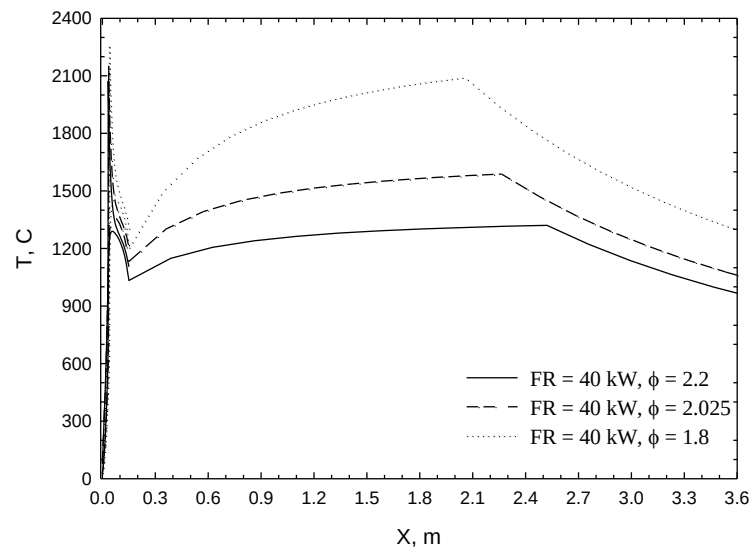


รูปที่ 5.30 เปรียบเทียบความยาวของเปลวไฟตามแนวแกน Axial ของการเผาไหม้

เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ ($FR = 61 \text{ kW}$)

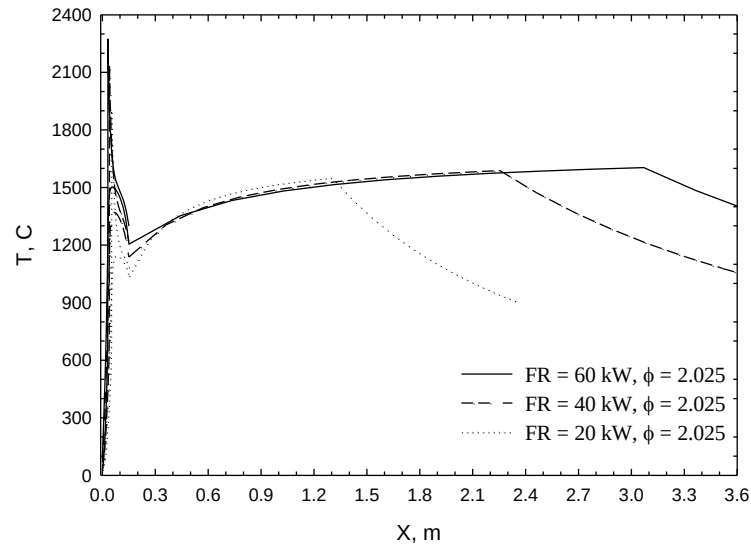


รูปที่ 5.31 โครงสร้างทางความร้อนตามแนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลางการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ



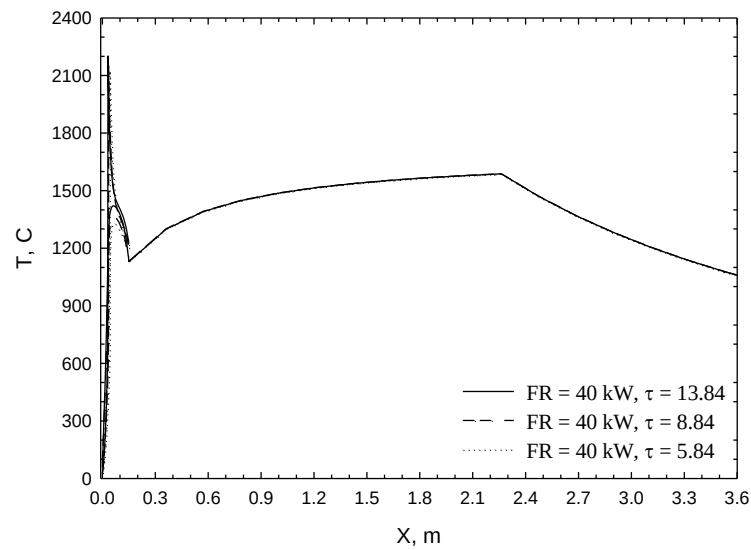
รูปที่ 5.32 อิทธิพล Equivalence ratio ต่อโครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้เจ็ต

เชื้อเพลิงก๊าซตามแนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลาง



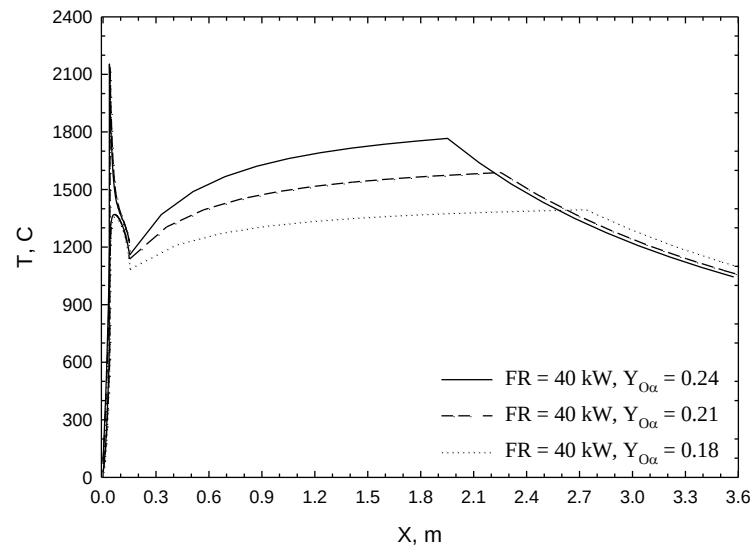
รูปที่ 5.33 อิทธิพล Firing rate ต่อ โครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ

ตามแนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลาง



รูปที่ 5.34 อิทธิพล Optical thickness ต่อ โครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิง

ก๊าซตามแนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลาง



รูปที่ 5.35 อิทธิพล Ambient oxygen content ต่อโครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้เจ็ต

เชื้อเพลิงก๊าซตามแนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลาง

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาวัสดุพอร์นชนิดเหนียวนำอากาศด้วยตัวเองได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการศึกษาโครงสร้างทางความร้อนของหัวเผาวัสดุพอร์น (Porous domain) พร้อมทั้งการเปรียบเทียบอุณหภูมิจากผลการจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลอง ส่วนที่สองคือการศึกษาโครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซผ่านสู่อากาศนิ่ง (Jet domain) พร้อมทั้งเปรียบเทียบความยาวของเจ็ตจากผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองโดยการประมาณค่าจากภาพถ่ายของความยาวเปลวไฟจากการทดลอง

6.1.1 การศึกษาส่วนแรก (Porous domain)

ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี โดยอุณหภูมิจากผลการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง และมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเผาไหม้ทางทฤษฎี (adiabatic flame temperature)

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อน (Output radiant efficiency) ของผลการจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มที่ปรากฏในทิศทางเดียวกัน ส่วนการเปรียบเทียบ Radiant loss efficiency มีแนวโน้มที่ปรากฏทิศทางเดียวกัน แต่มีค่าที่สูงกว่าผลการทดลอง

Equivalence ratio และ Firing rate เพิ่มขึ้นส่งผลให้ตำแหน่งเปลวไฟ (Combustion location) เคลื่อนที่ไปทางด้าน Upstream มากขึ้น ส่วนอุณหภูมิภายในระบบยกตัวสูงขึ้นเมื่อ Firing rate เพิ่มขึ้น แต่ให้ผลตรงกันข้ามกับค่า Equivalence ratio

6.1.2 การศึกษาส่วนที่สอง (Jet domain)

ความยาวของเปลวไฟแสดงผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ค่อนข้างยาวกว่าผลการทดลองมาก เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้การเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซทรงกระบอกแบบลามินาร์ และความยาวเปลวไฟเพิ่มขึ้นเมื่อ Firing rate เพิ่มขึ้น

อิทธิพลของ Equivalence ratio ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิภายในเปลวไฟมากกว่า Firing rate โดยผลปรากฏชัดเจนที่ Firing rate มากกว่า 45 kW จะทำให้ค่า Equivalence ratio มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น (ไอดีหนา) เรื่อยๆตาม Firing rate ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเปลวไฟต่ำลง

6.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาทางทฤษฎีของหัวเผาวัสดุพูนชนิดเหนียวนำอากาศด้วยตัวเองในอนาคต ควรเพิ่มการจำลองในส่วนของหัวฉีดเชื้อเพลิง (Fuel nozzle) โดยได้มีผู้ศึกษาและสร้างความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะการเหนียวนำอากาศส่วนแรก (Primary air entrainment characteristics) ของหัวเผาแบบ Self-aspirating [8] เรียบร้อยแล้ว และในส่วน of แบบจำลองการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซซึ่งสำคัญในการศึกษาเชิงทฤษฎีของหัวเผาวัสดุพูนชนิดเหนียวนำอากาศด้วยตัวเอง การประยุกต์ใช้หลักการการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซทรงกระบอกแบบเทอร์บิวเลนเพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความใกล้เคียงกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริง

เอกสารอ้างอิง

1. Energy Policy and Planning Office. **Energy database** [Online], Available: <http://www.eppo.go.th/info/index.html>;2013. [2014, April 28]
2. Weinberg, F., 1996, “Heat - Recirculating Burners: Principles and Some Recent Developments”, **Combustion Science and Technology**, Vol. 121, pp. 3-22.
3. Yoshizawa, Y., Sasaki, K. and Echigo, R., 1988, “Analytical Study of the Structure of Radiation Controlled Flame”, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Vol. 31, No. 2, pp. 311-319.
4. Sathe, S.B., Kulkarni, H.R. and Tong, T.W., 1990, “An Experimental and Theoretical Study of Porous Radiant Burner Performance”, **Twenty-Third Symposium (International) on Combustion**, Pittsburgh, The Combustion Institute, pp. 1011-1018.
5. Yoshizawa, Y., Echigo, R. and Tomimura, T., 1987, “A Study on A High Performance Radiant Heater”, **Proceedings of the 2nd ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference**, Vol. 5, pp. 317-323.
6. Amanda, J. B. and Janet, L. E., 2004, “Heat recalculation and heat transfer in porous burners”, **Combustion and Flame**, Vol. 137, pp. 230-241.
7. Yoksenakul W., 2011, “**Improvement of Thermal Efficiency of Heat-recirculating Gas Burner**”, D.Eng. Thesis, Department of Mechanical Engineering, King Mongkut’s University of Technology Thonburi (KMUTT).
8. Namkhat, A. and Jugjai, S., 2009, “Primary Air Entrainment for a Self-aspirating Burner: Model and Experiments”, **Energy**, Vol. 35, pp. 1701-1708.
9. สำเร็จ จักรใจ, 2547, **การเผาไหม้**, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

10. Pertti Auerkari., 1996, “Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics”, **Technical Research Centre of Finland**, VTT Tiedotteita-Meddelanden-Research notes 1792, ISBN 951-38-4987-2, 26
11. Stephen, R. T., 2011, **An Introduction to Combustion – Concepts and Applications**, 3rd Edition, New York, McGraw-Hill,
12. Wongwatcharaphon K., 2011, “**Numerical Simulation of High Efficiency Porous Burner for Liquid Fuel Combustion without Spray Atomization**”, D.Eng. Thesis, Department of Mechanical Engineering, King Mongkut’s University of Technology Thonburi (KMUTT).
13. Lawrence, A. K. and Serguei, I. F., 2000, “Chemical Structures of Methane-air Filtration Combustion Wave for Fuel-lean and Fuel-rich Conditions”, **Proceedings of the Combustion Institute**, Vol. 28, pp. 1431-1438.
14. B. A., Younglove and J. F., Ely., 1987, “Thermophysical Properties of Fluids. II. Methane, Ethane, Propane, Isobutane, and Normal Butane”,**The American Institute of Physics and the American Chemical Society**, Vol.16, No.4, pp. 578-798.
15. H. C., Hottel and A. F., Sarofin, (1967), **Radiative Transfer**, New York, McGraw-Hill,
16. M. N., Ozisik, (1985), **Radiative Transfer and Interaction with Conduction and Convection**, New York, JOHN WILEY & SONS, INC.,
17. H. Zhang and M. F., Modest, 2001, “Evaluation of the Planck-mean absorption coefficients from HITRAN and HITEMP databases”, **Journal of Quatitative Spectroscopy & Radiative Transfer**, Vol. 73, pp. 649-653.

18. T. Kolb and W. F., Farmayan, 1987, "The Contribution of Radiation to the Ignition of a Confined Turbulent Coal-Water Slurry Diffusion Flame", **Journal of Quatitative Spectroscopy & Radiative Transfer**, Vol. 73, pp. 649-653.

ภาคผนวก ก.

อุปกรณ์และผลการทดลอง

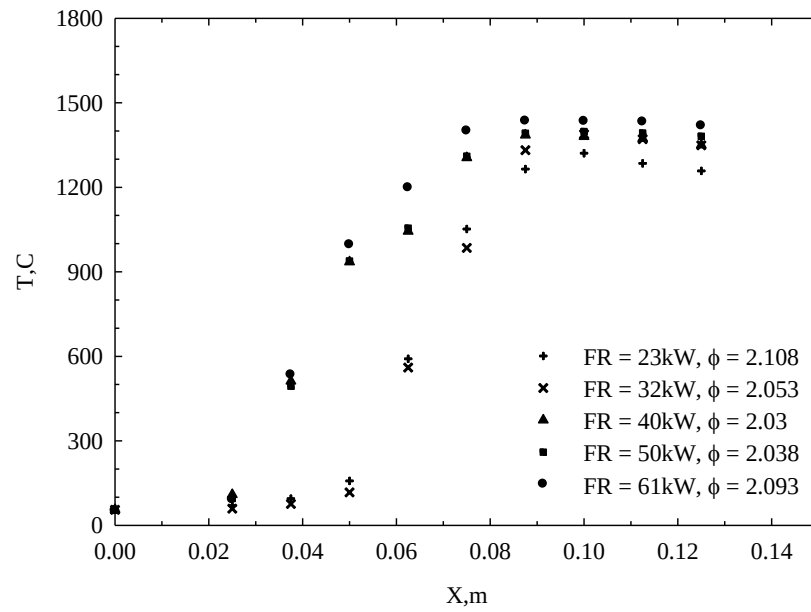
ตารางที่ ก.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Firing rate และ Primary aeration ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

หัวฉีดเท่ากับ 1.5 มม.

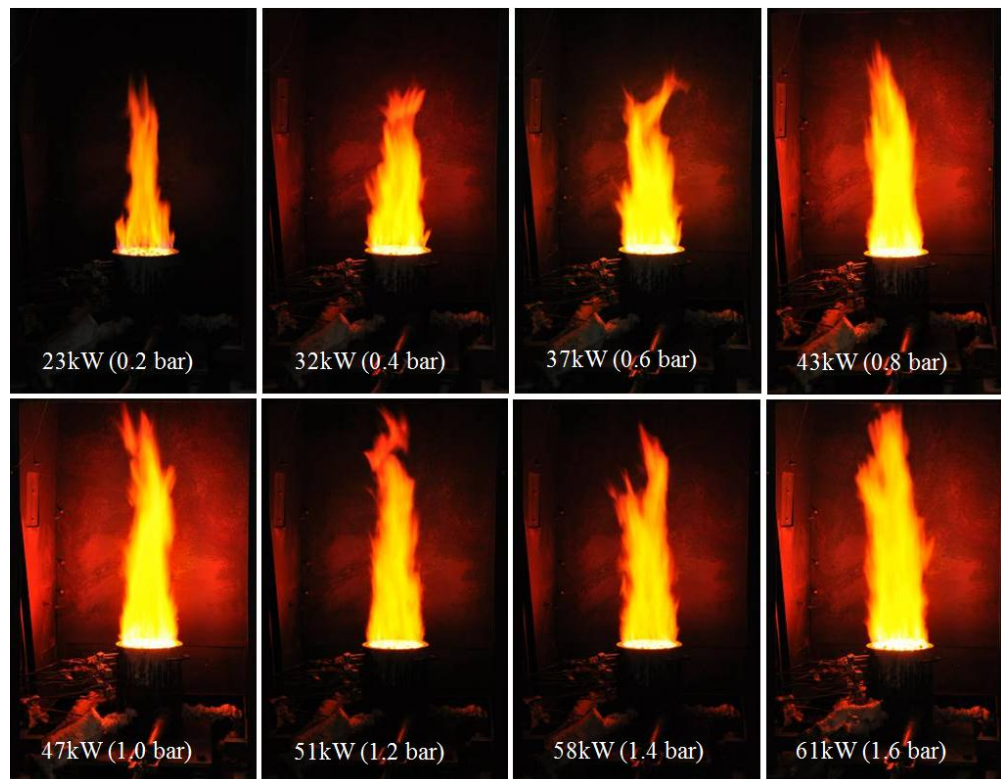
Nozzle 1.5 mm	FR, kW	PA %	Equivalence ratio
	19.33	46.54	2.149
	26.1	48.59	2.058
	31.81	48.91	2.045
	36.62	49.25	2.03
	40.73	49.32	2.028
	45.23	49.64	2.015
	49.24	49.61	2.016
	53.67	2.03	2.026

ตารางที่ ก.2 แสดง Output radiation efficiency และ Radiative heat loss ของ Free flame

CL , kW	$\eta_{rad,loss}$, %	η_{rad} , %	$q_r^n(0)$, W/m ²	$q_r^n(\tau_E)$, W/m ²
23.26	0.1992	22.1148	2,621.44	291,029.25
28.37	0.1613	21.0402	2,589.58	337,742.43
32.46	0.1417	20.3248	2,603.28	373,287.93
35.27	0.1280	19.8030	2,553.87	395,205.04
37.31	0.1142	19.3626	2,410.20	408,817.42
40.38	0.3029	16.3802	6,920.84	374,274.47
42.68	0.2891	16.2486	6,981.27	392,413.86
44.98	0.2597	15.8959	6,610.44	404,586.60
46.77	0.2522	15.4966	6,673.61	410,110.86
49.58	0.2440	14.7999	6,846.62	415,215.91
51.37	0.2436	14.3443	7,081.78	416,955.22
53.92	0.2556	14.6775	7,798.89	447,866.19
57.50	0.2435	13.7603	7,922.43	447,736.44
59.30	0.2422	13.4028	8,128.28	449,785.54
61.08	0.2368	13.0851	8,183.27	452,260.64



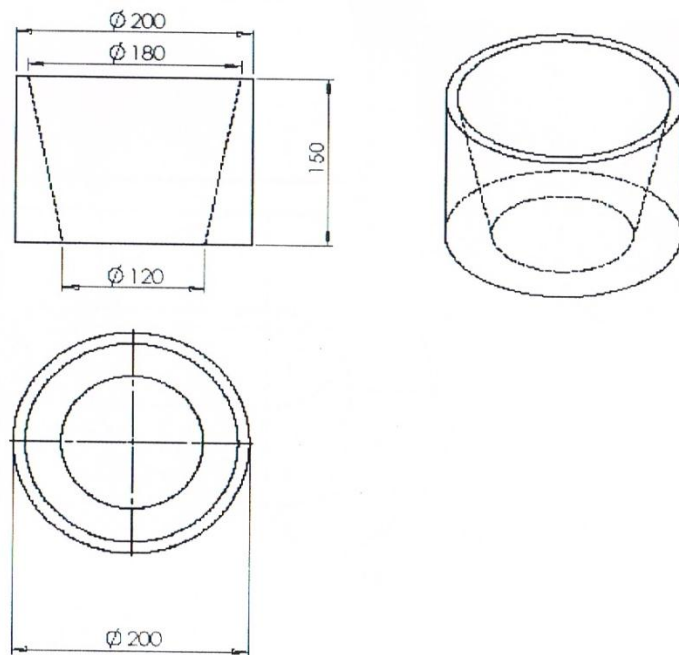
รูปที่ ก.1 โครงสร้างทางความร้อนภายในหัวเผาวัสดุพูนแบบเหนียวนำอากาศด้วยตัวเอง



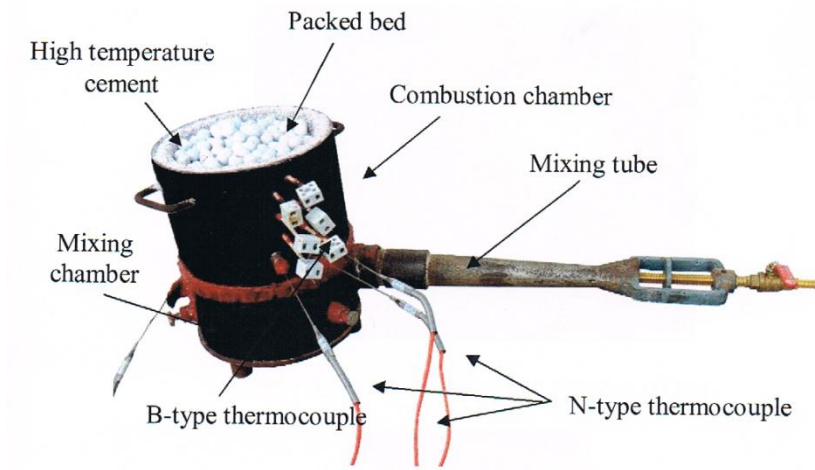
รูปที่ ก.2 ภาพถ่ายเปลวไฟ ณ เวลาใดๆที่ค่า Firing rate ต่างๆ



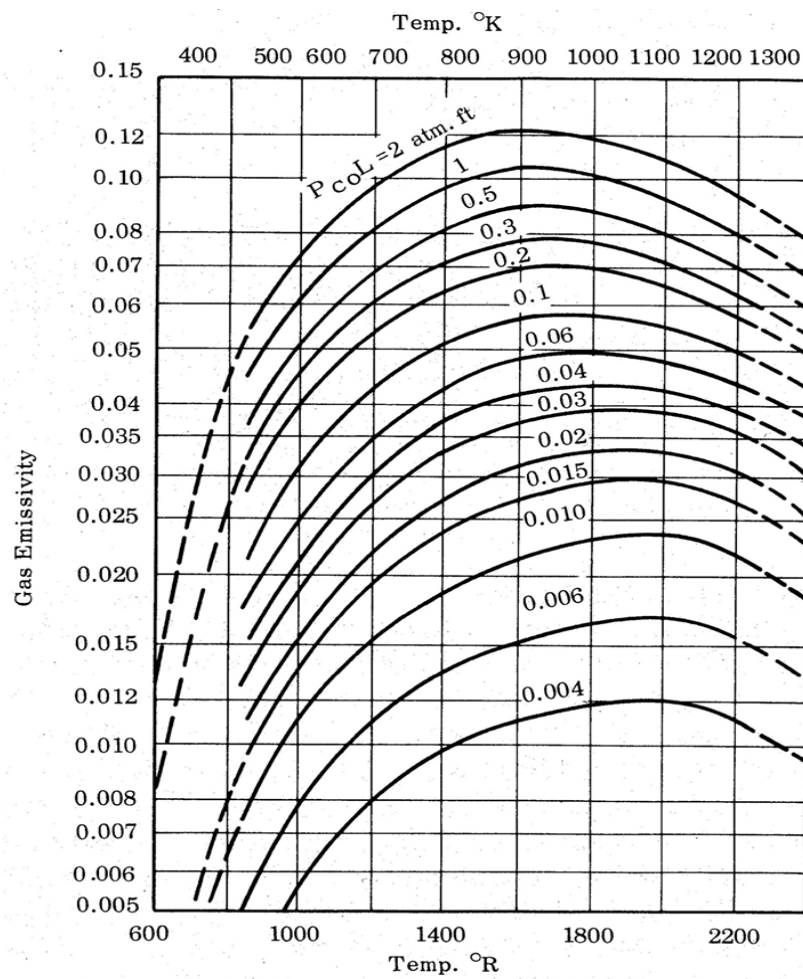
รูปที่ ก.3 Alumina spheres with particle diameter of $d = 0.015$ m (porous medium)



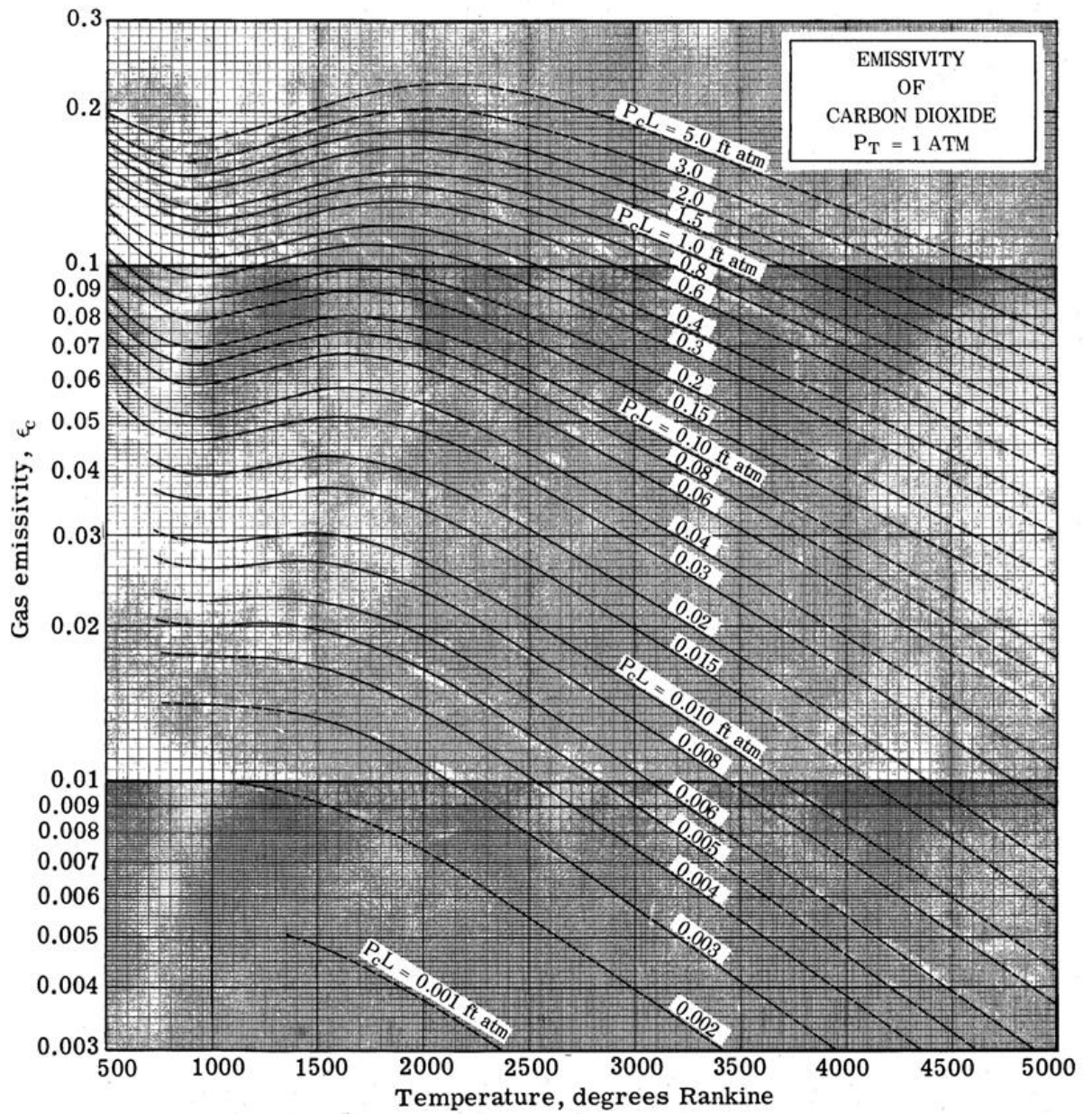
รูปที่ ก.4 ภาพร่างแสดงมิติของหัวเผาสำหรับส่วนของวัสดุพรุนของ SPMB



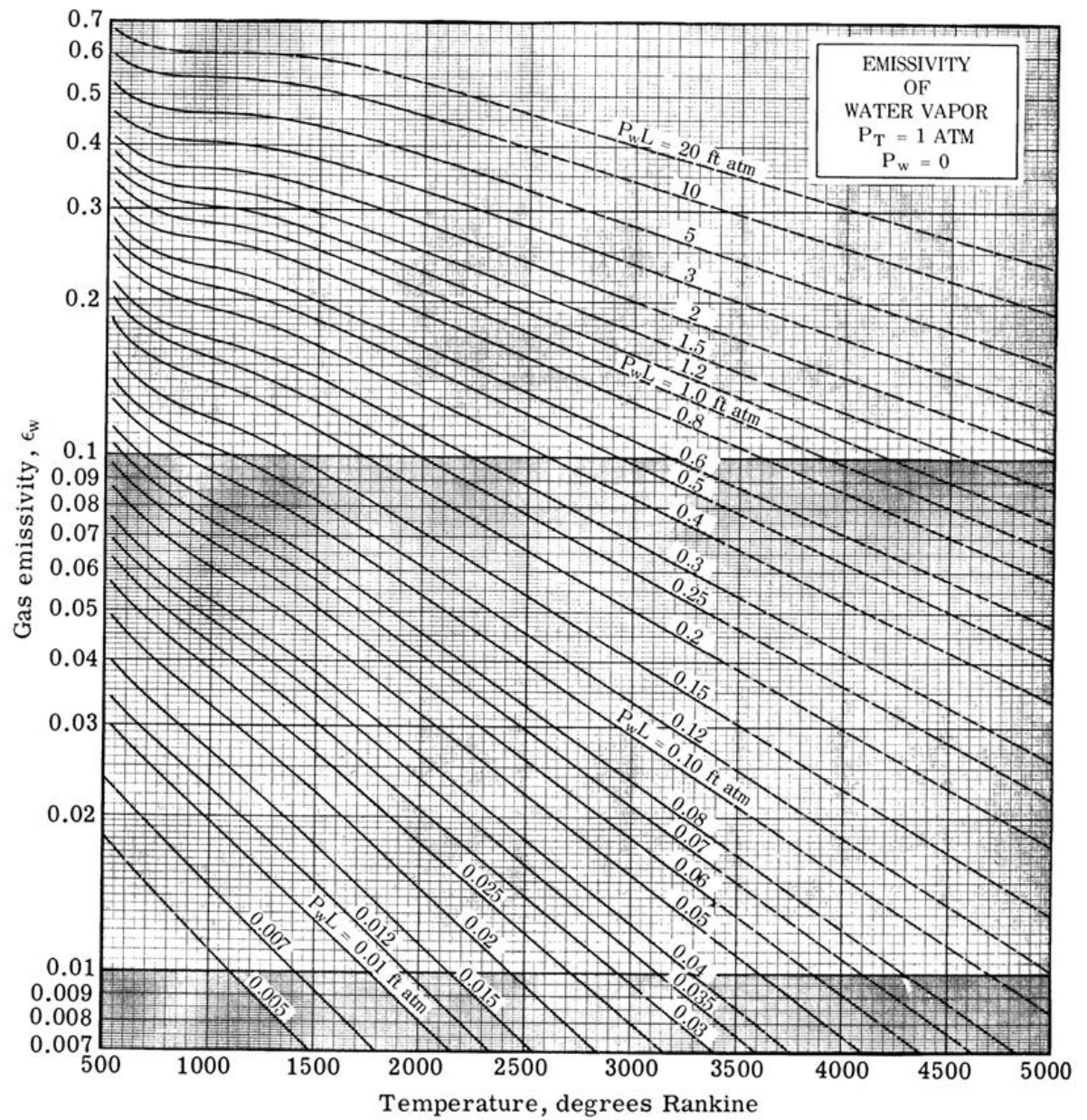
รูปที่ ก.5 ภาพถ่ายหัวเผาวัสดุพูนแบบเหนียวนำอากาศด้วยตัวเอง (SPMB)



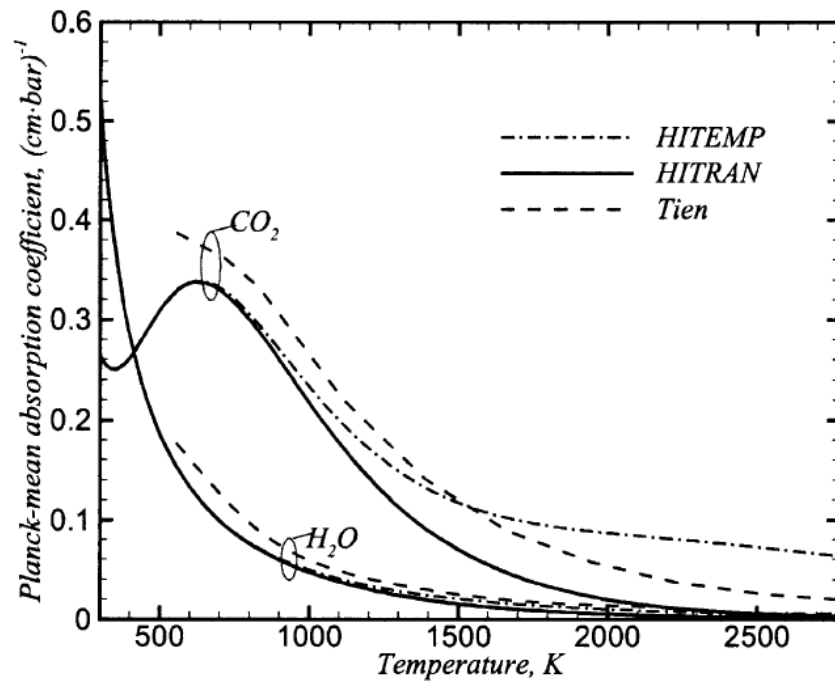
รูปที่ ก.6 Emissivity of carbon monoxide



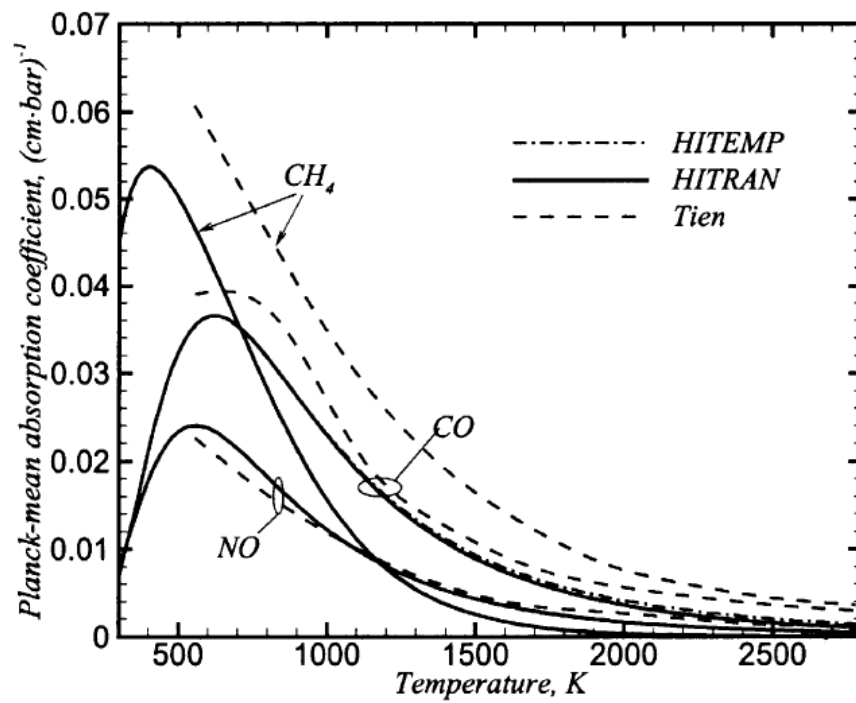
រូបទី ៣.៧ Emissivity of carbon dioxide



รูปที่ ๓.๘ Emissivity of water vapor



รูปที่ ๓.๙ Planck-mean absorption coefficient for carbon dioxide and water vapor



รูปที่ ๓.๑๐ Planck-mean absorption coefficient for carbon monoxide, methane and nitric oxide

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างการคำนวณ

แสดงตัวอย่างการคำนวณค่าความหนาเชิงแสง (Optical thickness)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Al_2O_3 (d) = 0.015 m

ขนาดความสูงของ Packed bed (x_e) = 0.15 m

ความหนาแน่นของ Al_2O_3 = 2316 kg/m³

Number of density = 354943 m⁻³

สูตรคำนวณ Absorption Coefficient

$$k = \varepsilon_{\text{Al}_2\text{O}_3} \pi \left(\frac{d_p}{2} \right)^2 n_p \quad \text{โดยที่ } \varepsilon_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 0.62 \quad (\text{ข 1})$$

$$k = 0.62 \times \frac{22}{7} \times \left(\frac{0.015}{2} \right)^2 \times 354943$$

$$k = 38.9 \text{ m}^{-1}$$

สูตรคำนวณ Optical thickness

$$\tau_e = kx_e \quad (\text{ข 2})$$

$$\tau_e = 38.9 \times 0.15$$

$$\tau_e = 5.84$$

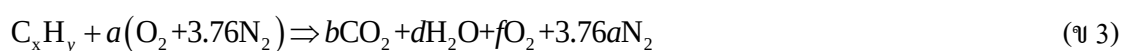
แสดงตัวอย่างการคำนวณค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Lower heating value)

เชื้อเพลิง LPG ($C_{3.6}H_{9.2}$) ใช้ Propane 40 % และ n-Butane 60% โดยปริมาตร

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลของสารที่สภาวะอ้างอิงมาตรฐาน 25 °C (298 K)

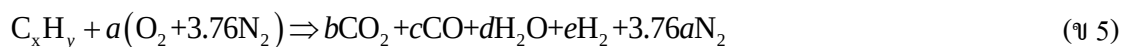
Substance	$\bar{h}_f^\circ \left(\frac{kJ}{kmol} \right)$	$\bar{h}_{298}^\circ \left(\frac{kJ}{kmol} \right)$
LPG	-116379	-
CO	-110541	8669
CO ₂	-393546	9364
H ₂ O	-241845	9904
O ₂	0	8682
N ₂	0	8669
H ₂	0	8468

สมดุลเคมีการเผาไหม้สำหรับสภาวะการเผาไหม้ไอดีเจือจาง (Lean burned) และสภาวะสตอยคิโอเมตริก



$$\text{โดยที่ } a = \frac{x + \frac{y}{4}}{\phi}, \quad b = x, \quad d = \frac{y}{2}, \quad f = \frac{1-\phi}{\phi} \left(x + \frac{y}{4} \right) \quad (\text{ข } 4)$$

สมดุลเคมีการเผาไหม้สำหรับสภาวะการเผาไหม้ไอดีหนา (Rich burned)

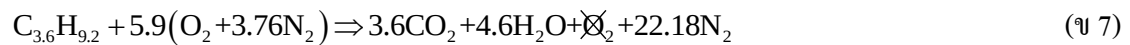


$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } a &= \frac{x + \frac{y}{4}}{\phi}, \quad c = x - b, \quad d = 2a - b - x, \quad e = -2a + b + x + \frac{y}{2}, \\ b &= \frac{2a(K_p - 1) + x + \frac{y}{2}}{2(K_p - 1)} - \frac{1}{2(K_p - 1)} \left[(2a(K_p - 1) + x + \frac{y}{2})^2 - 4K_p(K_p - 1)(2ax - x^2) \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (\text{ข } 6)$$

ตารางที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Kp กับอุณหภูมิตามคำแนะนำของเอกสารอ้างอิงที่ [11]

Temperature, K	Kp	Temperature, K	Kp
298	105000	2000	0.22
500	138.3	2500	0.1635
1000	1.443	3000	0.1378
1500	0.3887	3500	0.1241

คำนวณการเผาไหม้ที่สภาวะสตอยคิโอเมตริก ($\phi=1$)



สูตรคำนวณพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ (Enthalpy of Reaction)

$$\Delta H_R = \sum N_p (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p - \sum N_r \bar{h}_{f,r}^\circ \quad (\text{ข } 8)$$

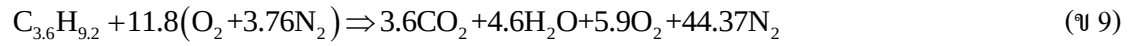
$$\Delta H_R = [3.6 \times (-393546)] + [4.6 \times (-241845)] - [1.0 \times (-116379)] \quad \text{kJ/kmol}_{\text{LPG}}$$

$$\Delta H_R = -2412873.6 \quad \text{kJ/kg}_{\text{LPG}}$$

$$\Delta H_R = -46047.3 \quad \text{kJ/kg}_{\text{LPG}}$$

$$\Delta H_R = -2798.4 \quad \text{kJ/kg}_{\text{mixture}}$$

คำนวณการเผาไหม้ที่สภาวะ ไอดีเจ็อง ($\phi = 0.5$)



$$\Delta H_R = [3.6 \times (-393546)] + [4.6 \times (-241845)] - [1.0 \times (-116379)] \quad kJ/kmol_LPG$$

$$\Delta H_R = -2412873.6 \quad kJ/kg_LPG$$

$$\Delta H_R = -46047.3 \quad kJ/kg_LPG$$

$$\Delta H_R = -1443.1 \quad kJ/kg_mixture$$

คำนวณการเผาไหม้ที่สภาวะ ไอดีหนา ($\phi = 1.5$)



$$\Delta H_R = [1.21 \times (-393546)] + [2.39 \times (-110541)] + [3.05 \times (-241845)] - [1.0 \times (-116379)] \quad kJ/kmol_LPG$$

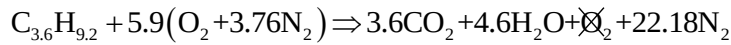
$$\Delta H_R = -1361631.9 \quad kJ/kg_LPG$$

$$\Delta H_R = -25985.4 \quad kJ/kg_LPG$$

$$\Delta H_R = -2300.4 \quad kJ/kg_mixture$$

แสดงตัวอย่างการคำนวณอุณหภูมิเปลวไฟทางทฤษฎี (Adiabatic flame temperature)

คำนวณการเผาไหม้ที่สภาวะstöยคิโอมตรี ($\phi=1$) จากสมการ (ข 7)



สูตรคำนวณพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ (Enthalpy of Reaction)

$$\sum N_p (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p = \sum N_r \bar{h}_{f,r}^\circ \quad (\text{ข 11})$$

ขั้นตอนที่ 1-ก

$$\begin{aligned} & \left[3.6 \times (-393546 + \bar{h}_{CO_2} - 9364) \right] + \left[4.6 \times (-241845 + \bar{h}_{H_2O} - 9904) \right] \\ & \quad + \left[22.18 \times (0 + \bar{h}_{N_2} - 8669) \right] = [1.0 \times (-116379)] \end{aligned}$$

$$\left[3.6 \bar{h}_{CO_2} - 1450476 \right] + \left[4.6 \bar{h}_{H_2O} - 1158045 \right] + \left[22.18 \bar{h}_{N_2} - 192278 \right] = -116379$$

$$3.6 \bar{h}_{CO_2} + 4.6 \bar{h}_{H_2O} + 22.18 \bar{h}_{N_2} = 2684420 \text{ kJ} \quad (\text{ข 12})$$

ขั้นตอนที่ 2-ก

กระทำการเดาอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ (Tp) โดยวิธีการ Trial-and-error โดยการหารทั้งตลอดสมการ (ข 12)

ด้วยจำนวน โมลทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ จะได้

$$H_p = \frac{2684420}{3.6 + 4.6 + 22.18} = 88361 \text{ kJ/kmol}$$

ขั้นตอนที่ 3-ก

เนื่องจากจำนวนโมลส่วนมากในผลิตภัณฑ์คือ N_2 จึงใช้ค่า Sensible Enthalpy ของ N_2 ในการเลือก Tp จะได้

$$T_p = 2650 \text{ K}$$

นำอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ไปเลือก Sensible Enthalpy ของมวลย่อยผลิตภัณฑ์ต่างๆแทนค่าสมการ (ข 12) จะได้

$$[(3.6 \times 140533) + (4.6 \times 116991) + (22.18 \times 88488)] \text{ kJ} = 2684420 \text{ kJ}$$

$$3006741kJ = 2684420 kJ$$

คำตอบของสมการ (ข 12) ยังไม่เป็นจริง จากนั้นกระทำการตามขั้นตอนที่ 3 ใหม่

$$T_p = 2550 K$$

นำอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ไปเลือก Sensible Enthalpy ของมวลย่อยผลิตภัณฑ์ต่างๆแทนค่าสมการ (ข 12) จะได้

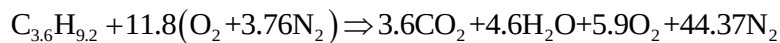
$$[(3.6 \times 134368) + (4.6 \times 111565) + (22.18 \times 84814)] kJ = 2684420 kJ$$

$$2878098 kJ = 2684420 kJ$$

กระทำการตามขั้นตอนที่ 3 ไปเรื่อยๆจนกระทั่งสุดท้ายจะได้ค่า T_p ที่ทำให้สมการ (ข 12) เป็นจริง

$$T_p = T_{adi} = 2399.5 K \approx 2126.5 ^\circ C$$

คำนวณการเผาไหม้ที่สภาวะไอดีเจือจาง ($\phi = 0.5$) จากสมการ (ข 9)



กระทำการแทนค่าสมการ (ข 11) ตามขั้นตอนที่ 1 จะได้

$$\begin{aligned} & [3.6 \times (-393546 + \bar{h}_{CO_2} - 9364)] + [4.6 \times (-241845 + \bar{h}_{H_2O} - 9904)] \\ & + [5.9 \times (0 + \bar{h}_{O_2} - 8682)] + [44.37 \times (0 + \bar{h}_{N_2} - 8669)] = [1.0 \times (-116379)] \end{aligned}$$

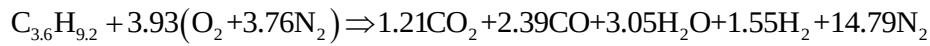
$$\begin{aligned} & [3.6 \bar{h}_{CO_2} - 1450476] + [4.6 \bar{h}_{H_2O} - 1158045] + [5.9 \bar{h}_{O_2} - 51224] \\ & + [44.37 \bar{h}_{N_2} - 384644] = -116379 \end{aligned}$$

$$3.6 \bar{h}_{CO_2} + 4.6 \bar{h}_{H_2O} + 5.9 \bar{h}_{O_2} + 44.37 \bar{h}_{N_2} = 2928010 \quad kJ \quad (\text{ข 13})$$

จากนั้นกระทำตามขั้นตอนที่ 2-ก และ 3-ก ตามลำดับ จนกระทั่งสมการ (ข 13) เป็นจริง จะได้

$$T_p = T_{adi} = 1511 K \approx 1238 ^\circ C$$

คำนวณการเผาไหม้ที่สภาวะไอดีหนา ($\phi = 1.5$) จากสมการ (ข 10)



กระทำการแทนค่าสมการ (ข 11) ตามขั้นตอนที่ 1 จะได้

$$\begin{aligned} & \left[1.21 \times (-393546 + \bar{h}_{CO_2} - 9364) \right] + \left[2.39 \times (-110541 + \bar{h}_{CO} - 8669) \right] \\ & + \left[3.05 \times (-241845 + \bar{h}_{H_2O} - 9904) \right] + \left[1.55 \times (0 + \bar{h}_{H_2} - 8468) \right] \\ & + \left[14.79 \times (0 + \bar{h}_{N_2} - 8669) \right] = [1.0 \times (-116379)] \\ & \left[1.21\bar{h}_{CO_2} - 491550 \right] + \left[2.39\bar{h}_{CO} - 282528 \right] + \left[3.05\bar{h}_{H_2O} - 767835 \right] \\ & + \left[1.55\bar{h}_{H_2} - 13125 \right] + \left[14.79\bar{h}_{N_2} - 128215 \right] = -116379 \end{aligned}$$

$$1.21\bar{h}_{CO_2} + 2.39\bar{h}_{CO} + 3.05\bar{h}_{H_2O} + 1.55\bar{h}_{H_2} + 14.79\bar{h}_{N_2} = 1566874 \text{ kJ} \quad (\text{ข 14})$$

จากนั้นกระทำตามขั้นตอนที่ 2-ก และ 3-ก ตามลำดับ จนกระทั่งสมการ (ข 14) เป็นจริง จะได้

$$T_p = T_{adi} = 1982 \text{ K} \approx 1709^\circ \text{C}$$

ตัวอย่างการคำนวณโปรไฟล์อุณหภูมิภายในเจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ

Firing rate = 40 kW, Equivalence ratio = 2.03

Initial velocity = 0.35 m/s

Reynold number = 219

Burner diameter = 0.14 m

Specific heat capacity of mixture = 3429 J/kg K

Mass ratio of fuel to air (f) = 1.1

Mole fraction of oxygen concentration by volume = 0.21

Enthalpy of combustion = 23918100 J/kg fuel

Ambient temperature = 303 K

Initial temperature = 958 (ใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง)

Kinematic viscosity = $2.24 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

จากสมการที่ 3.51 อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ

$$T_C = \left[(T_i - T_\infty) + \frac{\Delta H}{C} \right] \left[\frac{fY_{\infty}}{1 + fY_{\infty}} \right] + T_\infty$$

$$T_C = \left[(958 - 303) + \frac{23918100}{3429} \right] \left[\frac{1.1 \times 0.21}{1 + (1.1 \times 0.21)} \right] + 303$$

$$T_C = 1734.8 \text{ K}$$

จากสมการที่ 3.42 ความยาวของเปลวไฟของเจ็ตทรงกระบอกแบบแลมินาร์

$$\bar{x}_c = \frac{u_i d_i^2}{48 \nu f Y_{\infty}}$$

$$\bar{x}_c = \frac{0.35 \times 0.14^2}{48 \times 0.000224 \times 1.1 \times 0.21}$$

$$\bar{x}_c = 2.76 \text{ m}$$

จากสมการที่ 3.49 โพรไฟล์อุณหภูมิภายในเจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ

$$T = \left[(T_i - T_\infty) - \frac{Y_{\infty} f \Delta H}{C} \right] F(x, r) + \left(\frac{Y_{\infty} f \Delta H}{C} \right) + T_\infty$$

$$\text{โดยที่ } F(x, r) = \left[1 + \frac{48x}{\text{Re}_i d_i} \right]^{-1} \left(1 - 2 \frac{r}{d_i} \left[1 + \frac{48x}{\text{Re}_i d_i} \right]^{-1} \right)$$

ขั้นตอนที่ 1-ข

แทนค่าสมการ 3.49 จะได้

$$T = \left[(958 - 303) - \frac{0.21 \times 1.1 \times 23918100}{3429} \right] F(x, r) + \left(\frac{0.21 \times 1.1 \times 23918100}{3429} \right) + 303$$

ชั้นตอนที่ 2-ก

ที่ระยะตามแนวแกน $X = 0.01$ m และ $\Delta r = 0.025$ m, $0 \leq |r| \leq r_c$

ชั้นตอนที่ 3-ก

ที่ระยะตามแนวแกน $r = 0.0$ m

$$F(x, r) = \left[1 + \frac{48 \times 0.01}{219 \times 0.14} \right]^{-1} \left(1 - 2 \frac{0}{0.14} \left[1 + \frac{48 \times 0.01}{219 \times 0.14} \right]^{-1} \right) = 0.985$$

$$T = \left[(958 - 303) - \frac{0.21 \times 1.1 \times 23918100}{3429} \right] (0.985) + \left(\frac{0.21 \times 1.1 \times 23918100}{3429} \right) + 303 = 972.4 \text{ K}$$

ที่ระยะตามแนวแกน $r = 0.025$ m

$$F(x, r) = \left[1 + \frac{48 \times 0.01}{219 \times 0.14} \right]^{-1} \left(1 - 2 \frac{0.025}{0.14} \left[1 + \frac{48 \times 0.01}{219 \times 0.14} \right]^{-1} \right) = 0.638$$

$$T = \left[(958 - 303) - \frac{0.21 \times 1.1 \times 23918100}{3429} \right] (0.638) + \left(\frac{0.21 \times 1.1 \times 23918100}{3429} \right) + 303 = 1304.2 \text{ K}$$

ที่ระยะตามแนวแกน $r = 0.05$ m

$$F(x, r) = \left[1 + \frac{48 \times 0.01}{219 \times 0.14} \right]^{-1} \left(1 - 2 \frac{0.05}{0.14} \left[1 + \frac{48 \times 0.01}{219 \times 0.14} \right]^{-1} \right) = 0.292$$

$$T = \left[(958 - 303) - \frac{0.21 \times 1.1 \times 23918100}{3429} \right] (0.292) + \left(\frac{0.21 \times 1.1 \times 23918100}{3429} \right) + 303 = 1634.8 \text{ K}$$

ที่ระยะตามแนวแกน $r = 0.075$ m

$$F(x, r) = \left[1 + \frac{48 \times 0.01}{219 \times 0.14} \right]^{-1} \left(1 - 2 \frac{0.075}{0.14} \left[1 + \frac{48 \times 0.01}{219 \times 0.14} \right]^{-1} \right) = -0.055$$

$$T = \left[(958 - 303) - \frac{0.21 \times 1.1 \times 23918100}{3429} \right] (-0.055) + \left(\frac{0.21 \times 1.1 \times 23918100}{3429} \right) + 303 = 1862.2 \text{ K}$$

ที่ระยะตามแนวแกน $r = 0.1$ m

$$F(x,r) = \left[1 + \frac{48 \times 0.01}{219 \times 0.14} \right]^{-1} \left(1 - 2 \frac{0.1}{0.14} \left[1 + \frac{48 \times 0.01}{219 \times 0.14} \right]^{-1} \right) = -0.401$$

$$T = \left[(958 - 303) - \frac{0.21 \times 1.1 \times 23918100}{3429} \right] (-0.401) + \left(\frac{0.21 \times 1.1 \times 23918100}{3429} \right) + 303 = 2297.8 K$$

จากสมการที่ 3.50 โพรไฟล์อุณหภูมิภายนอกเจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ

$$T = \left[(T_i - T_\infty) + \frac{\Delta H}{C} \right] F(x,r) + T_\infty$$

$$\text{โดยที่ } F(x,r) = \left[1 + \frac{48x}{\text{Re}_i d_i} \right]^{-1} \left(1 - 2 \frac{r}{d_i} \left[1 + \frac{48x}{\text{Re}_i d_i} \right]^{-1} \right)$$

ขั้นตอนที่ 1-ค

แทนค่าสมการ 3.50 จะได้

$$T = \left[(958 - 303) + \frac{23918100}{3429} \right] F(x,r) + 303$$

ขั้นตอนที่ 2-ค

ที่ระยะตามแนวแกน $X = 0.01 \text{ m}$ และ $\Delta r = 0.025 \text{ m}$, $r_c \leq |r| \leq \delta$

ขั้นตอนที่ 3-ค

ที่ระยะตามแนวแกน $r = 0.0 \text{ m}$

$$F(x,r) = \left[1 + \frac{48 \times 0.01}{219 \times 0.14} \right]^{-1} \left(1 - 2 \frac{0}{0.14} \left[1 + \frac{48 \times 0.01}{219 \times 0.14} \right]^{-1} \right) = 0.985$$

$$T = \left[(958 - 303) + \frac{23918100}{3429} \right] (0.985) + 303 = 7933.2 K$$

ที่ระยะตามแนวแกน $r = 0.025 \text{ m}$

$$F(x,r) = \left[1 + \frac{48 \times 0.01}{219 \times 0.14} \right]^{-1} \left(1 - 2 \frac{0.025}{0.14} \left[1 + \frac{48 \times 0.01}{219 \times 0.14} \right]^{-1} \right) = 0.638$$

$$T = \left[(958 - 303) + \frac{23918100}{3429} \right] (0.638) + 303 = 5171.1 K$$

ที่ระยะตามแนวแกน $r=0.05$ m

$$F(x,r) = \left[1 + \frac{48 \times 0.01}{219 \times 0.14} \right]^{-1} \left(1 - 2 \frac{0.05}{0.14} \left[1 + \frac{48 \times 0.01}{219 \times 0.14} \right]^{-1} \right) = 0.292$$

$$T = \left[(958 - 303) + \frac{23918100}{3429} \right] (0.292) + 303 = 2531.1 K$$

ที่ระยะตามแนวแกน $r=0.075$ m

$$F(x,r) = \left[1 + \frac{48 \times 0.01}{219 \times 0.14} \right]^{-1} \left(1 - 2 \frac{0.075}{0.14} \left[1 + \frac{48 \times 0.01}{219 \times 0.14} \right]^{-1} \right) = -0.055$$

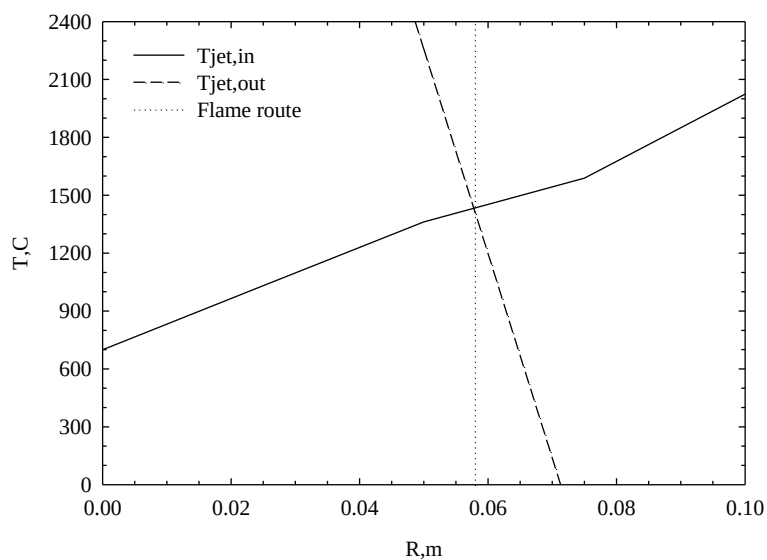
$$T = \left[(958 - 303) + \frac{23918100}{3429} \right] (-0.055) + 303 = -116.7 K$$

ที่ระยะตามแนวแกน $r=0.1$ m

$$F(x,r) = \left[1 + \frac{48 \times 0.01}{219 \times 0.14} \right]^{-1} \left(1 - 2 \frac{0.1}{0.14} \left[1 + \frac{48 \times 0.01}{219 \times 0.14} \right]^{-1} \right) = -0.401$$

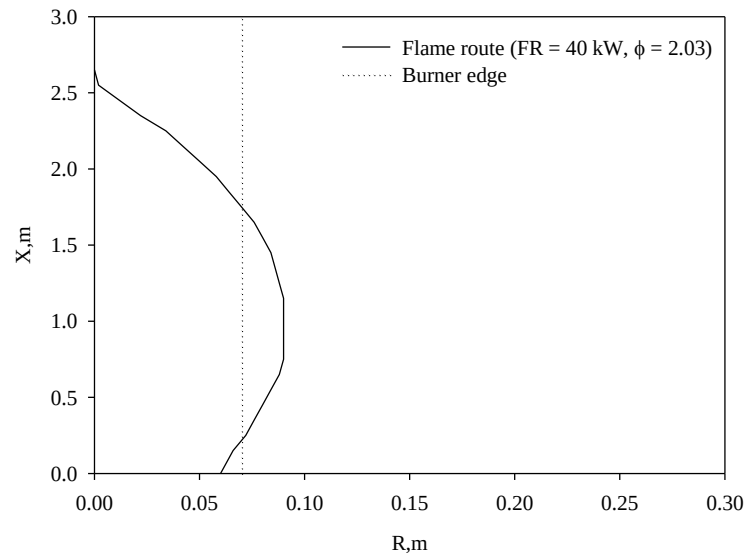
$$T = \left[(958 - 303) + \frac{23918100}{3429} \right] (-0.401) + 303 = -2756.7 K$$

จากการแสดงการคำนวณเพื่อหาโปรไฟล์อุณหภูมิภายในและภายนอกเจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซที่ระยะตามแนวแกน $X = 0.01$ m พร้อมทั้งคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวรัศมี เพื่อทราบตำแหน่งบริเวณการเผาไหม้ หรือตำแหน่งที่เปลวไฟมีอุณหภูมิสูงสุด และจะเป็นตำแหน่งที่ระบุทางเดินเปลวไฟ (Flame route) ตามทฤษฎีการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซแบบแลมินาร์ โดยวิธีการแรกที่สามารถทราบตำแหน่งทางเดินเปลวไฟไปตามแนวแกนรัศมีคือทำการประมาณค่าภายในช่วง (Interpolation) ระหว่าง $0.05 \leq r \leq 0.075$ โดยใช้ข้อมูลสูงสุดของเปลวไฟในการระบุตำแหน่งรัศมี $1634.8 \leq 1734.8 \leq 1862.2$ วิธีที่สองเป็นการหาค่าตำแหน่งทางเดินเปลวไฟโดยวิธีกราฟ (Graphical method) ดังรูปที่ ข.1 โดยในการจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ใช้เทคนิคที่สอง

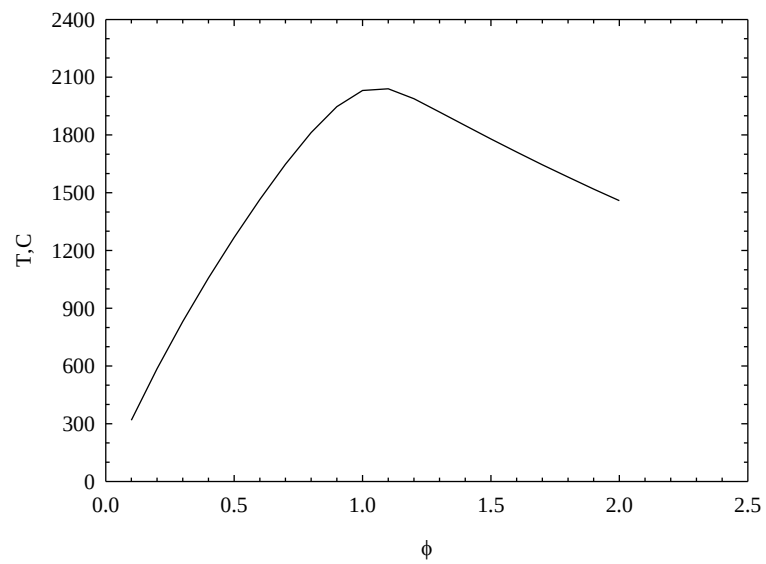


รูปที่ ข.1 แสดงวิธีการหาดำแหน่งทางเดินเปลวไฟโดยวิธีการกราฟ

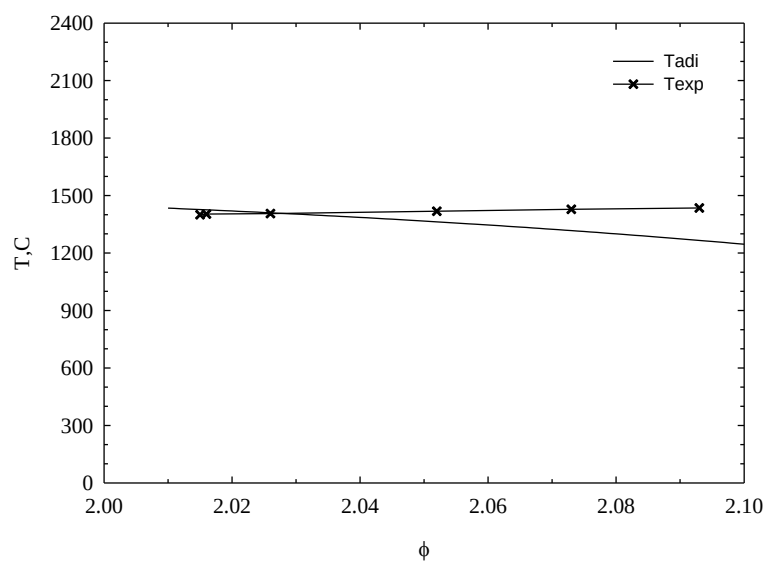
หลังจากทราบตำแหน่งทางเดินเปลวไฟที่ระยะตามแนวแกน $X = 0.01$ m แล้วก็กระทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆที่ตำแหน่ง $X = 0.02, 0.03, 0.04 \dots 2.76$ m จะทำให้สามารถทราบทางเดินของเปลวไฟ และสามารถทราบรูปร่างเปลวไฟที่ทำการจำลองดังรูปที่ ข.2 เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหา Net Radiative Heat Flux รวมถึงความเข้มข้นของการแผ่รังสีความร้อนของเปลวไฟ (Flame Radiation Intensity) เพื่อเป็นเงื่อนไขขอบเขตให้กับการจำลองทางคณิตศาสตร์ส่วนหัวเผาวัสดุพรมต่อไป



รูปที่ ข.2 แสดงตำแหน่งทางเดินเปลวไฟ



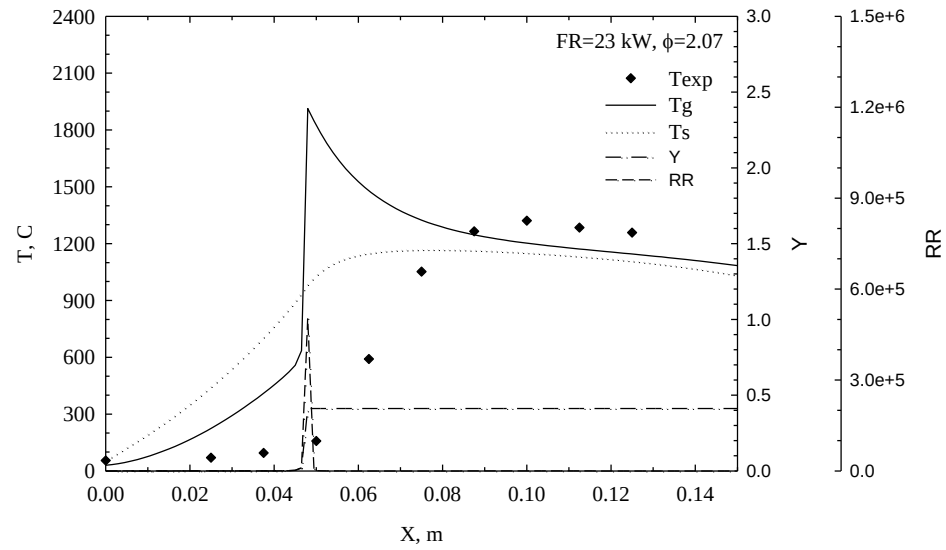
รูปที่ ข.3 แสดงอุณหภูมิเปลวไฟทางทฤษฎีของ LPG



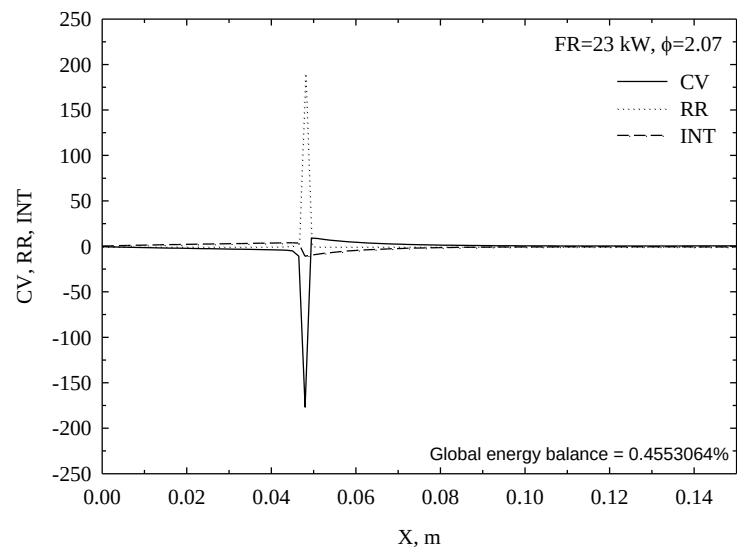
รูปที่ ข.4 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเปลวไฟทางทฤษฎีกับอุณหภูมิการทดลองของ LPG

ภาคผนวก ค.

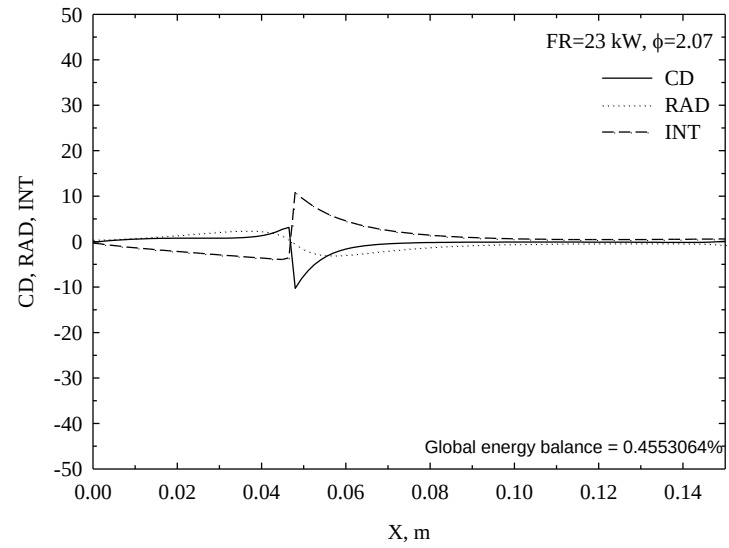
ผลของการคำนวณด้วยโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของห้วเหววัสดุพูนแบบเหนียวนำอากาศ
ด้วยตัวเอง



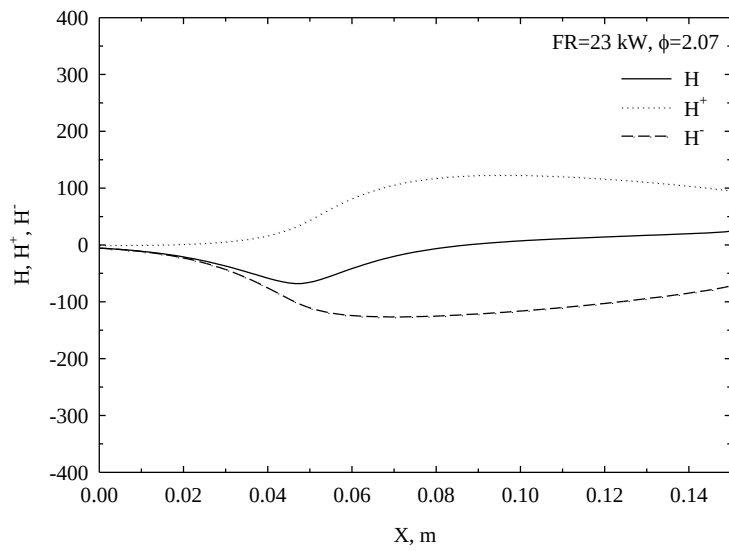
รูปที่ ค.1 การเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างทางความร้อนภายในหัวเผาจากการทดลองกับการจำลอง
ทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพูน ($FR = 23 \text{ kW}$)



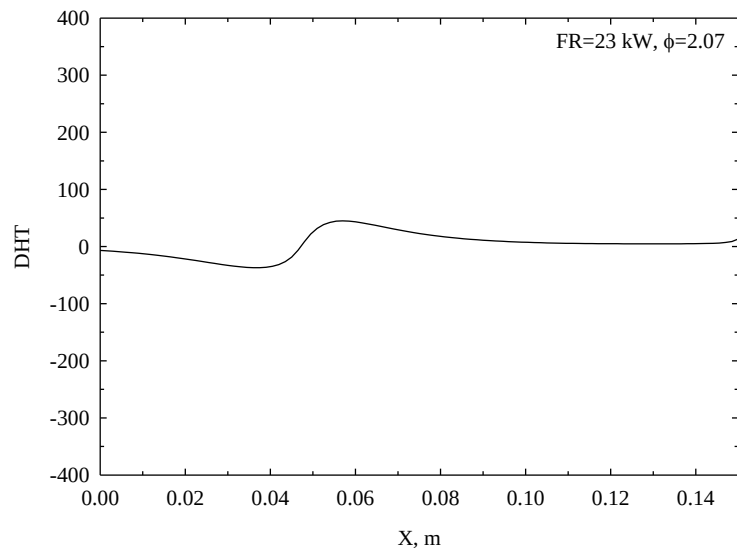
รูปที่ ค.2 Local energy balance of gas phase ของหัวเผาในส่วนวัสดุพูน ($FR = 23 \text{ kW}$)



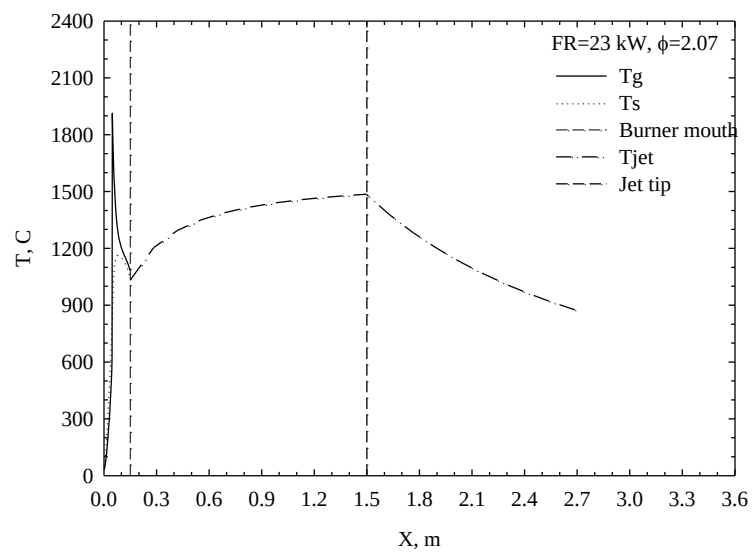
รูปที่ 3.3 Local energy balance of solid phase ของหัวเผาในส่วนวัสดุพูน (FR = 23 kW)



รูปที่ 3.4 Radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพูน (FR = 23 kW)

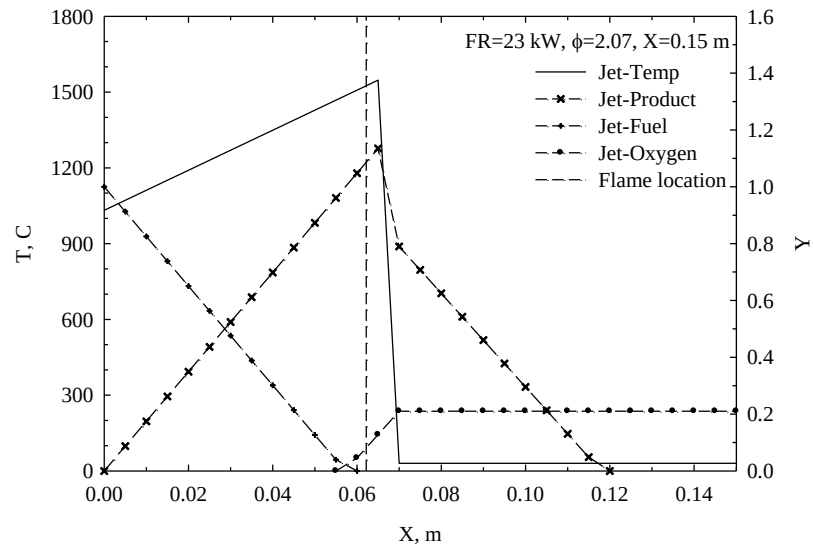


รูปที่ ๑.๕ Divergence of net radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพอร์น (FR = 23 kW)



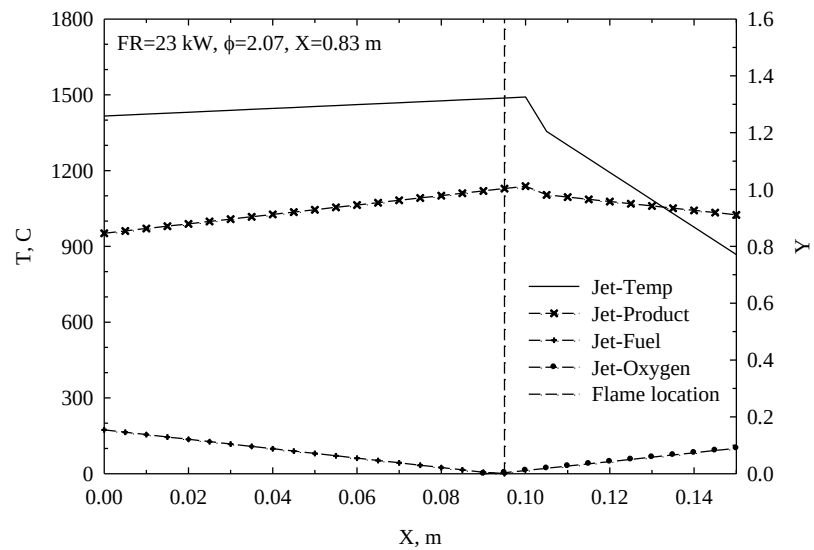
รูปที่ ๑.๖ เปรียบเทียบความยาวของเปลวไฟตามแนวแกน Axial ของการเผาไหม้

เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ (FR = 23 kW)



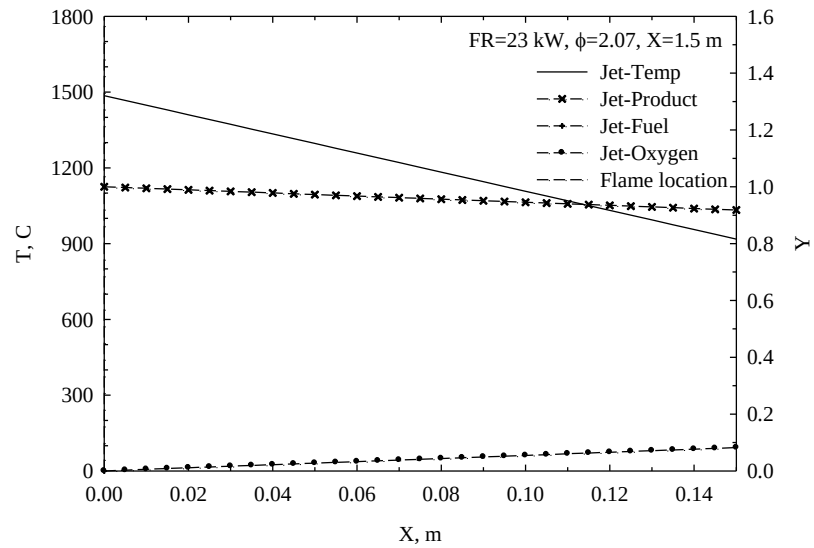
รูปที่ ๗.๗ การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้

เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซที่ $X=0.15$ m (FR = 23 kW)



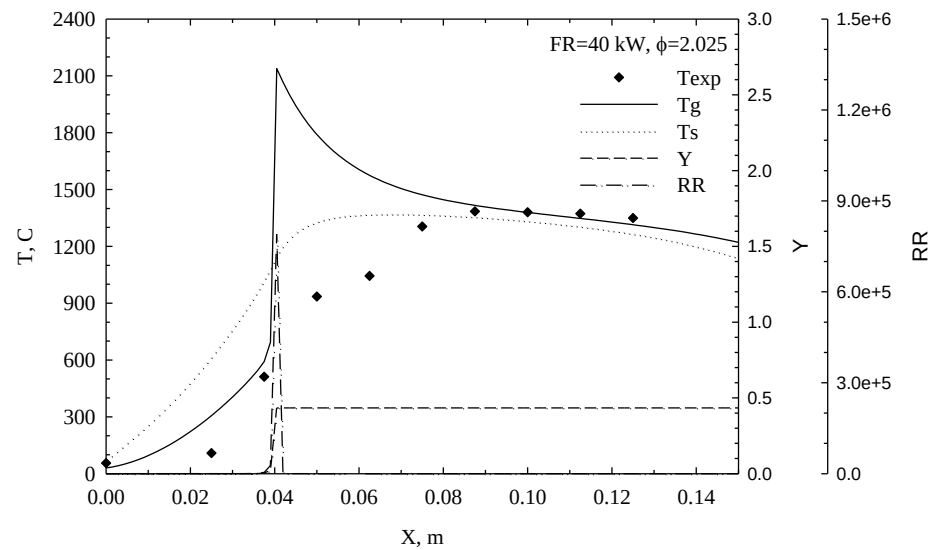
รูปที่ ๗.๘ การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้

เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซที่ $X=0.83$ m (FR = 23 kW)



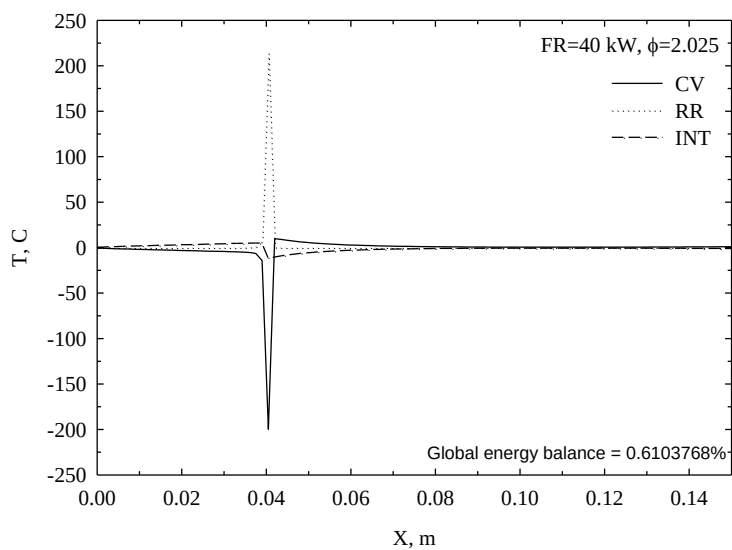
รูปที่ ค.9 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้

เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซที่ $X=1.5$ m ($FR = 23$ kW)

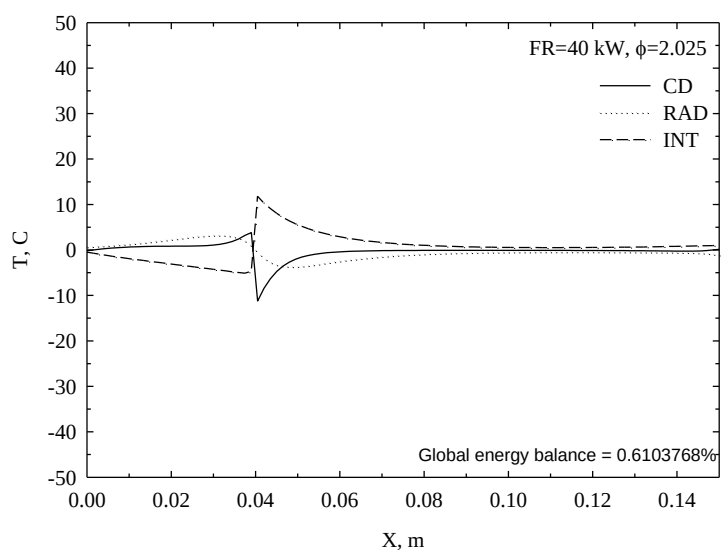


รูปที่ ค.10 การเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างทางความร้อนภายในหัวเผาจากการทดลองกับ

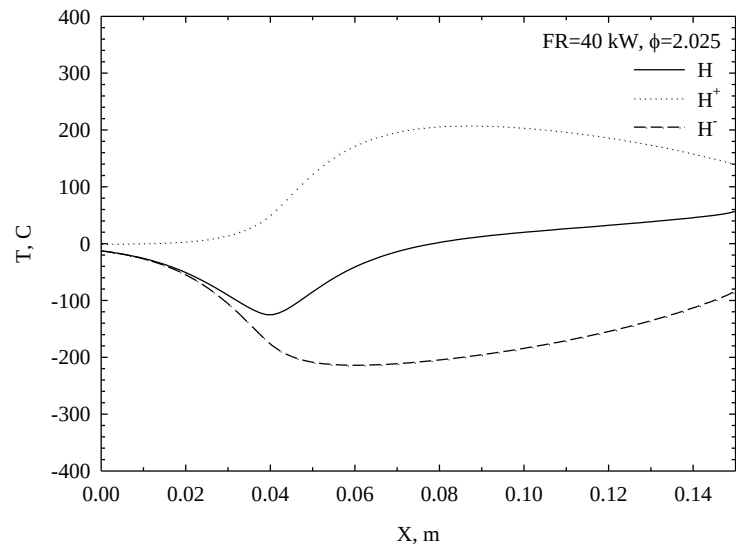
การจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพูน ($FR = 40$ kW)



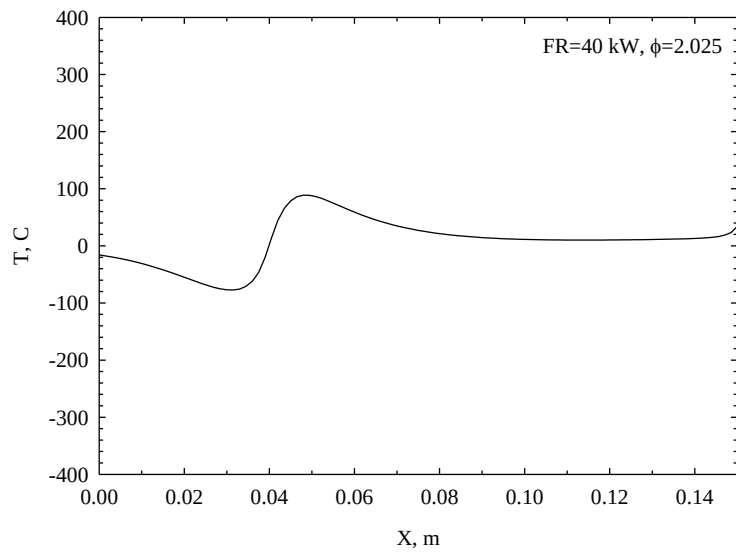
รูปที่ ๑.๑๑ Local energy balance of gas phase ของหัวเผาในส่วนวัสดุพูน (FR = 40 kW)



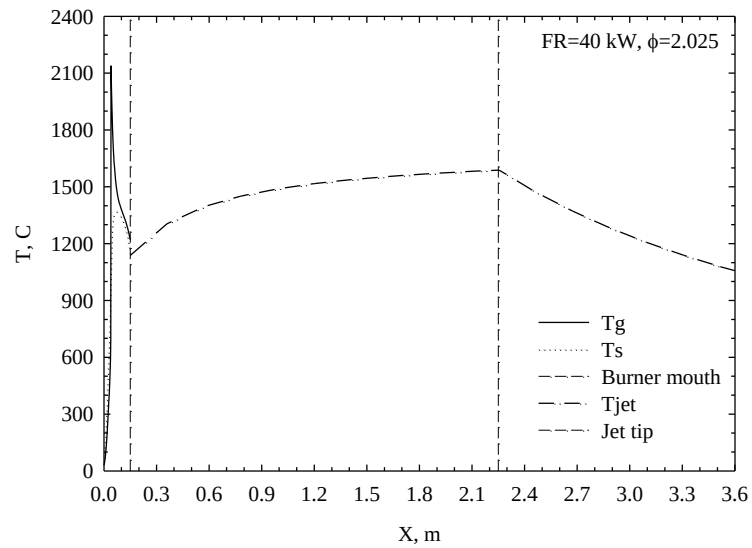
รูปที่ ๑.๑๒ Local energy balance of solid phase ของหัวเผาในส่วนวัสดุพูน (FR = 40 kW)



รูปที่ ๑.๑๓ Radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพอรุน (FR = 40 kW)

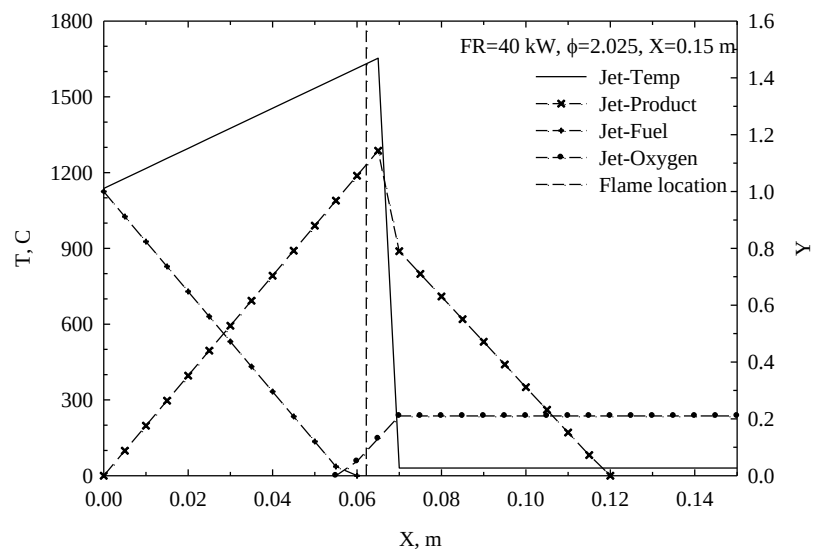


รูปที่ ๑.๑๔ Divergence of net radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพอรุน
(FR = 40 kW)



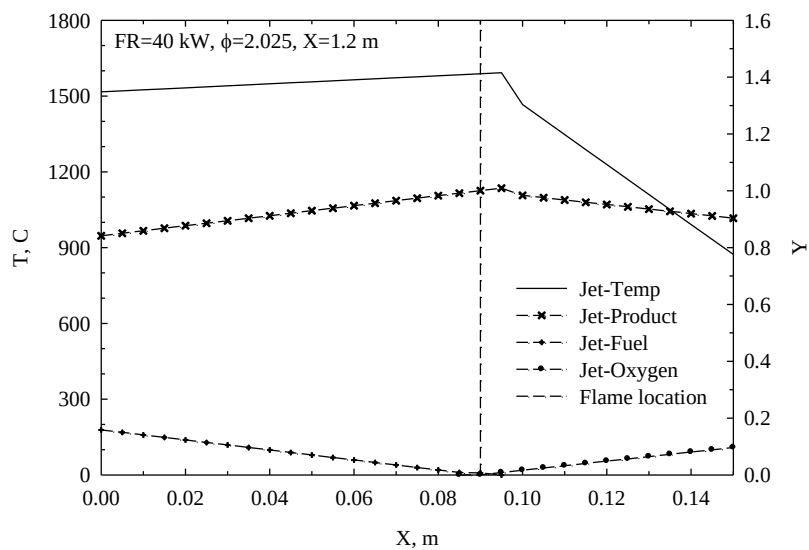
รูปที่ ค.15 เปรียบเทียบความยาวของเปลวไฟตามแนวแกน Axial ของการเผาไหม้

เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซ (FR = 40 kW)



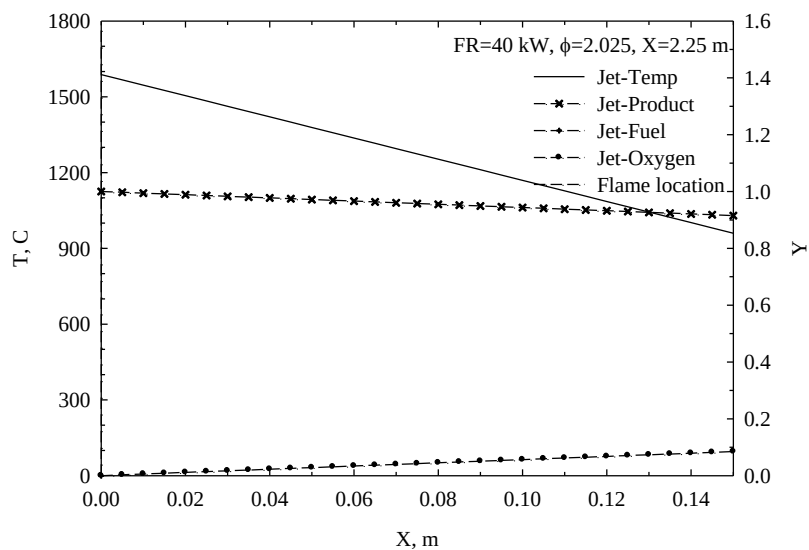
รูปที่ ค.16 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้

เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซที่ X=0.15 m (FR = 40 kW)



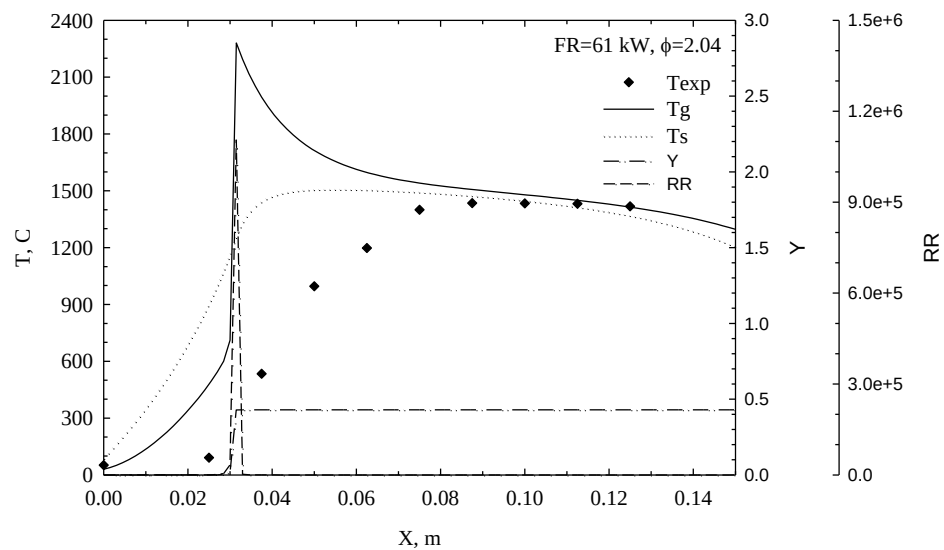
รูปที่ ค.17 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้

เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซที่ X=1.2 m (FR = 40 kW)



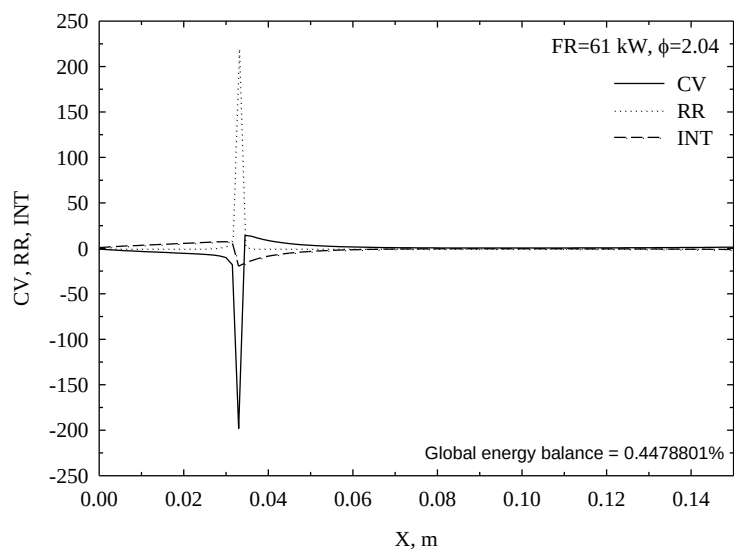
รูปที่ ค.18 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้

เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซที่ X=2.25 m (FR = 40 kW)

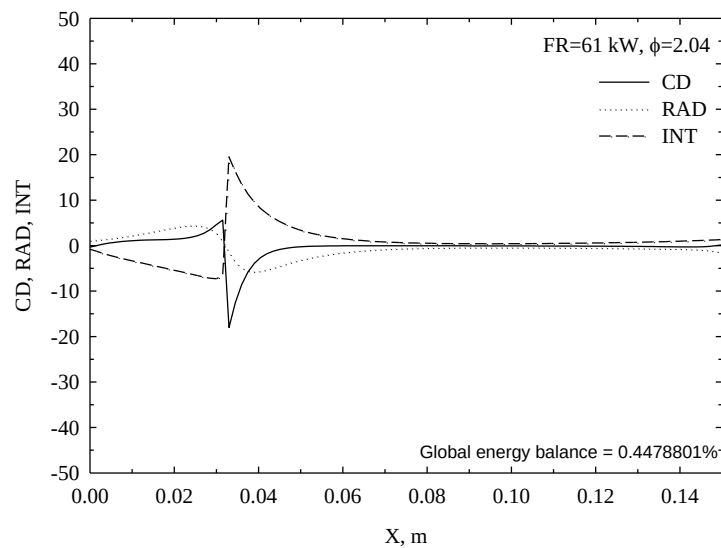


รูปที่ ค.19 การเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างทางความร้อนภายในหัวเผาจากการทดลองกับ

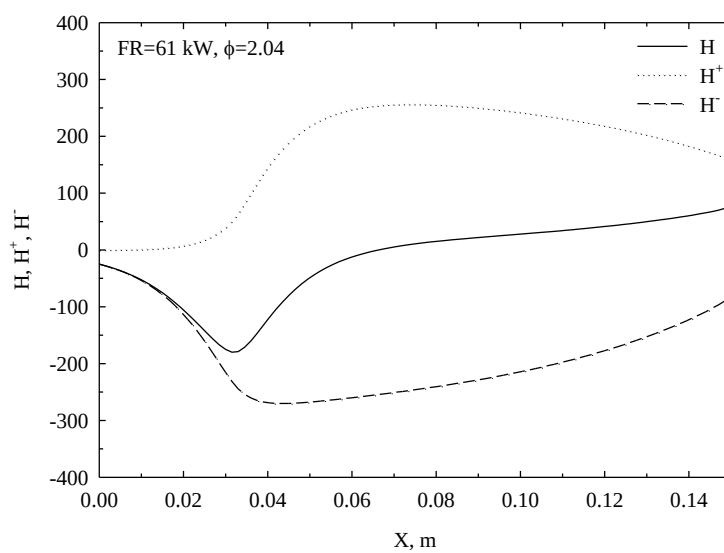
การจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพอรูน (FR = 60 kW)



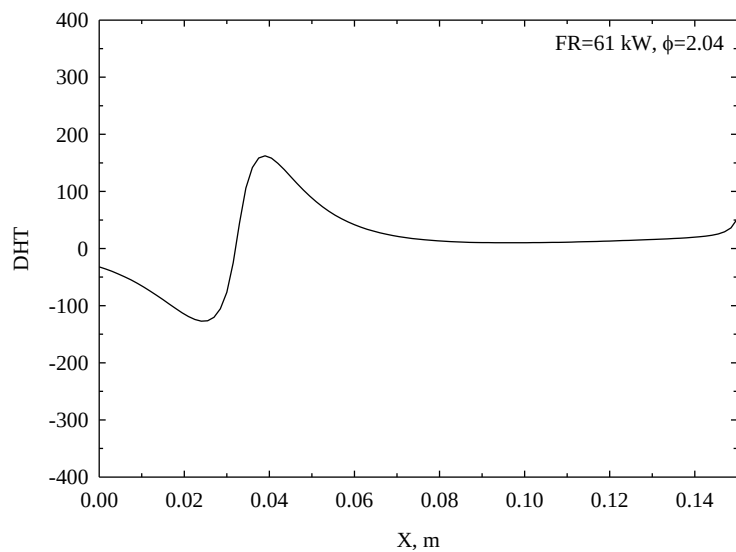
รูปที่ ค.20 Local energy balance of gas phase ของหัวเผาในส่วนวัสดุพอรูน (FR = 60 kW)



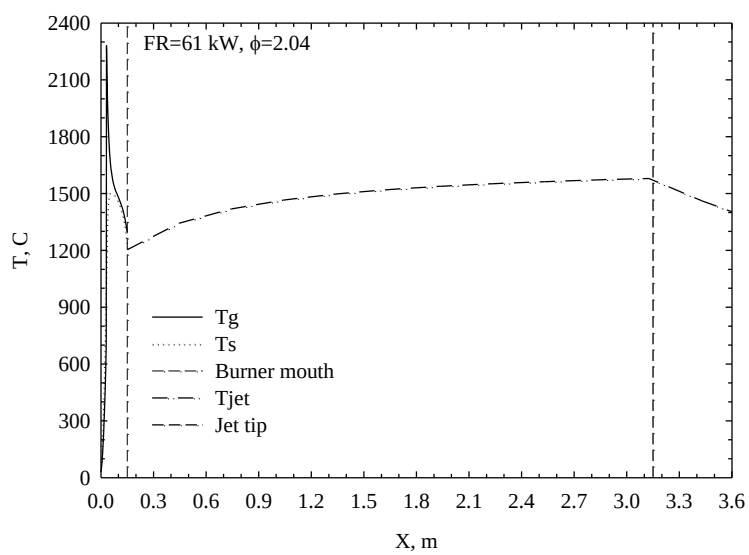
รูปที่ ค.21 Local energy balance of solid phase ของหัวเผาในส่วนวัสดุพูน (FR = 60 kW)



รูปที่ ค.22 Radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพูน (FR = 60 kW)

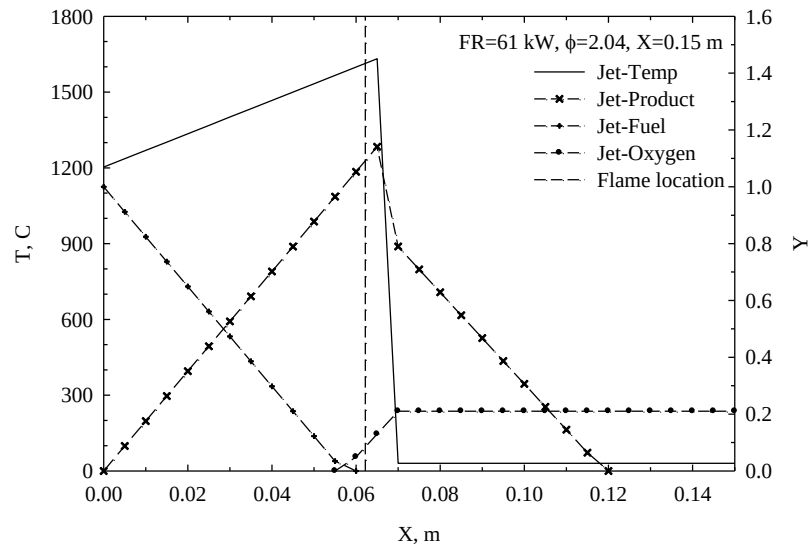


รูปที่ ค.23 Divergence of net radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพอร์น (FR = 60 kW)



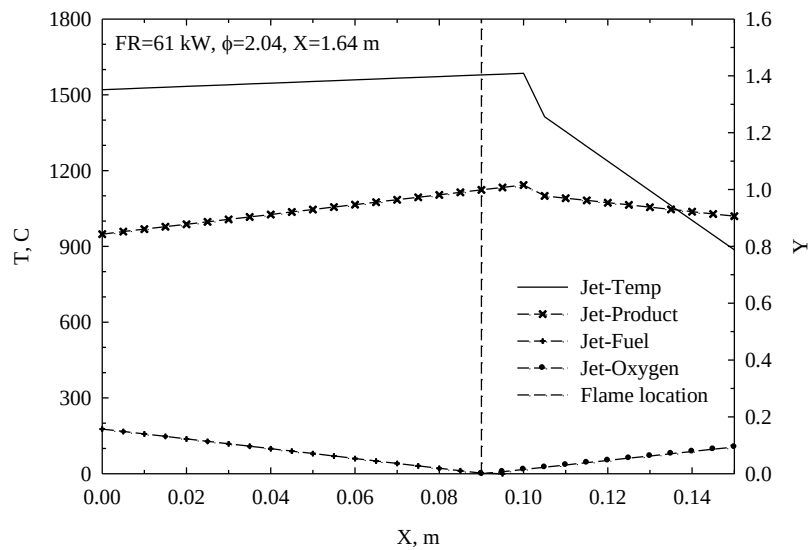
รูปที่ ค.24 เปรียบเทียบความยาวของเปลวไฟตามแนวแกน Axial ของการเผาไหม้เจ็ต

เชื้อเพลิงก๊าซ (FR = 60 kW)



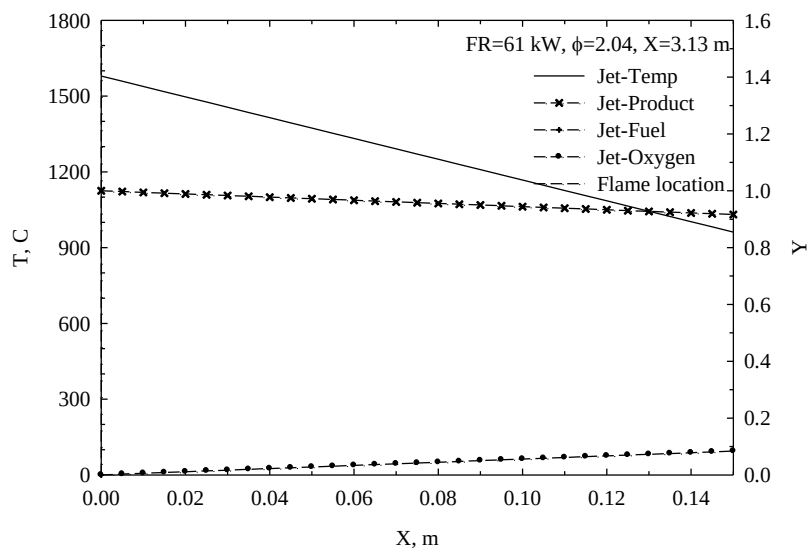
รูปที่ ค.25 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้เจ็ต

เชื้อเพลิงก๊าซที่ $X=0.15$ m (FR = 60 kW)



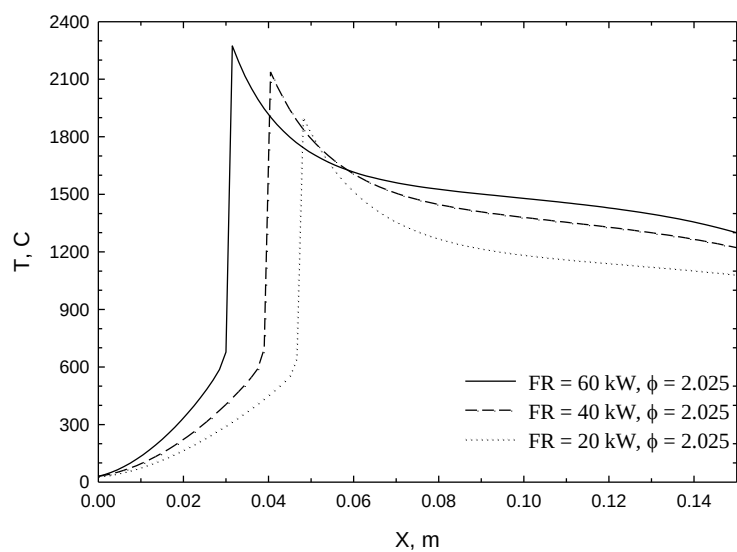
รูปที่ ค.26 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้เจ็ต

เชื้อเพลิงก๊าซที่ $X=1.7$ m (FR = 60 kW)

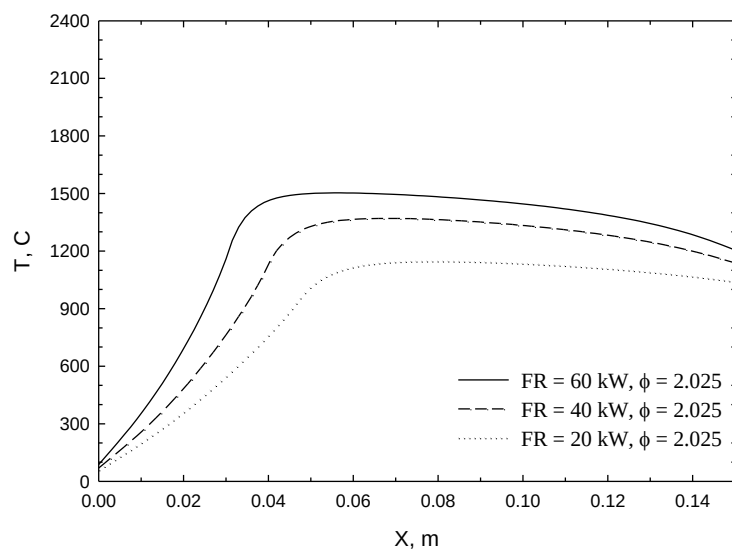


รูปที่ ค.27 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution profile) ของการเผาไหม้เจ็ต

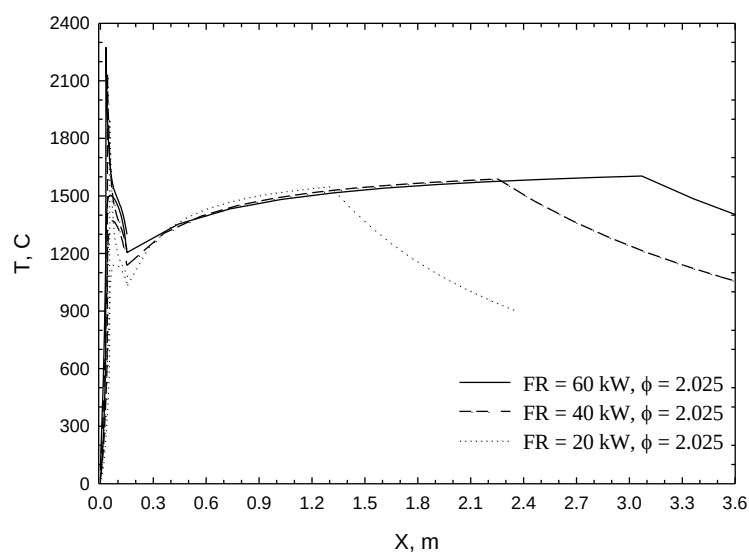
เชื้อเพลิงก๊าซที่ $X=3.27$ m (FR = 60 kW)



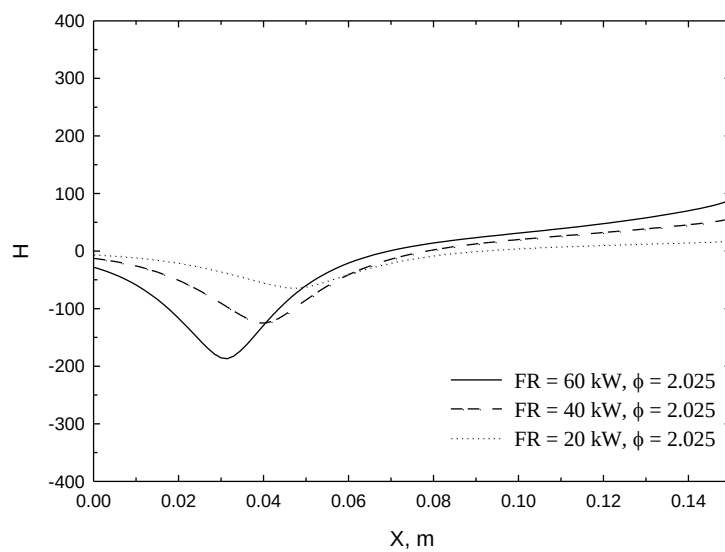
รูปที่ ค.28 อิทธิพล Firing rate ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิก๊าซในหัววัสดุพ่น



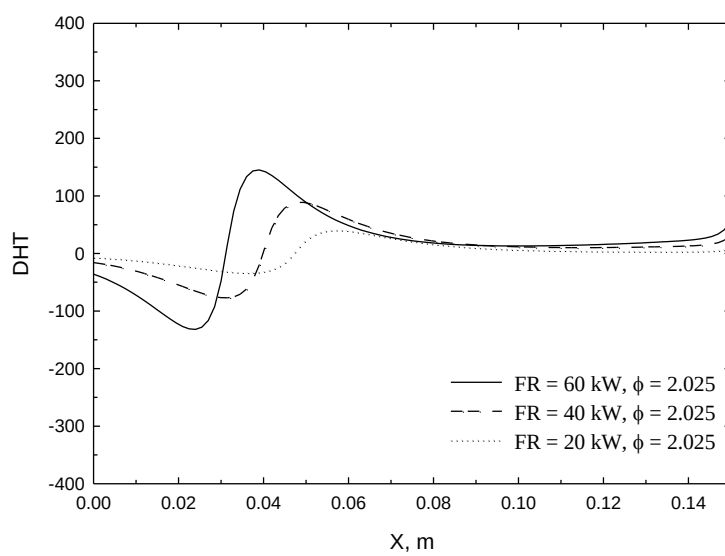
รูปที่ ๒.๒๙ อิทธิพล Firing rate ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิของแข็งในหัววัสดุพอร์น



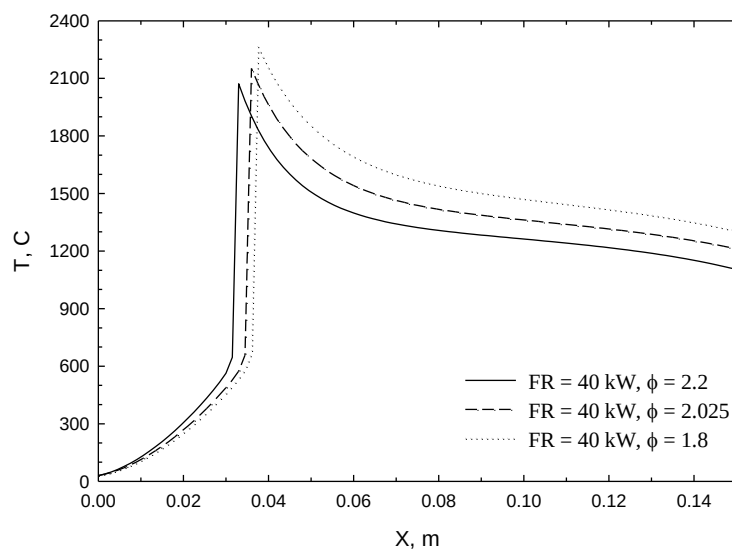
รูปที่ ๒.๓๐ อิทธิพล Firing rate ต่อ โครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซตาม
แนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลาง



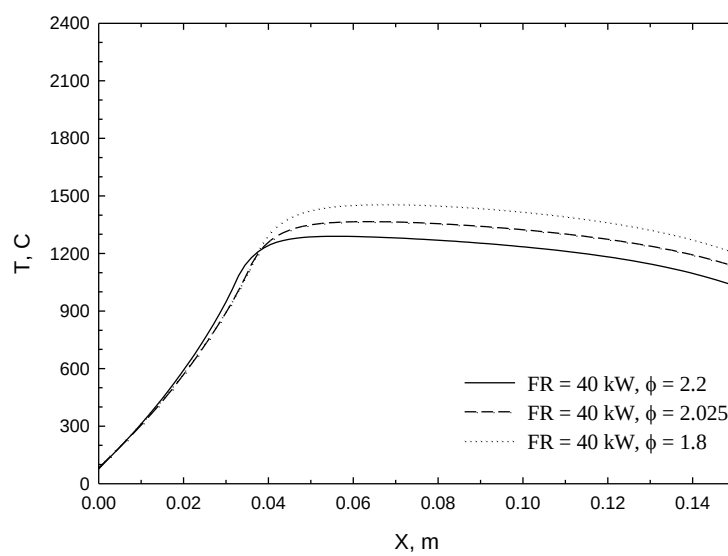
รูปที่ ก.31 อิทธิพล Firing rate ต่อ Radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพูน



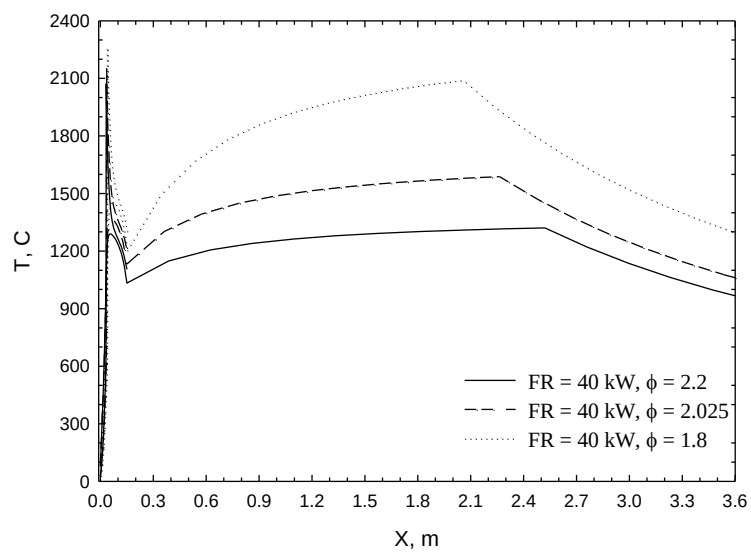
รูปที่ ก.32 อิทธิพล Firing rate ต่อ Divergence of net radiative heat flux ของหัวเผา
ในส่วนของวัสดุพูน



รูปที่ ค.33 อิทธิพล Equivalence ratio ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิก๊าซในหัววัสดุพอรุน

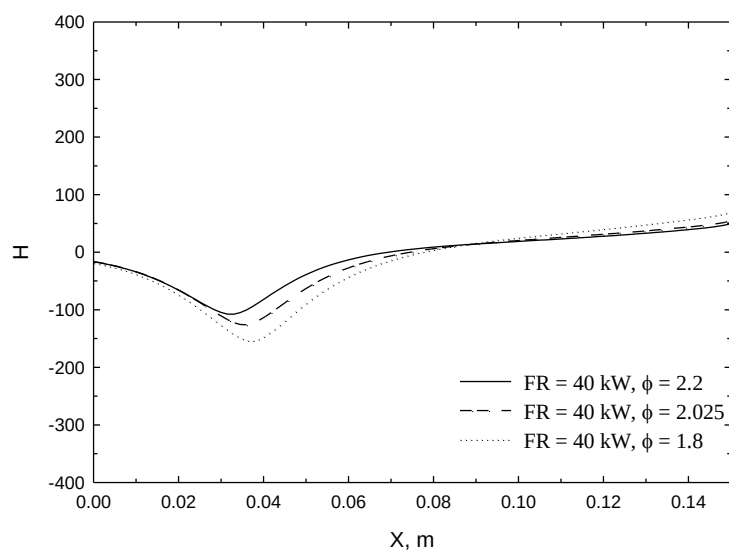


รูปที่ ค.34 อิทธิพล Equivalence ratio ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิของแข็งในหัววัสดุพอรุน



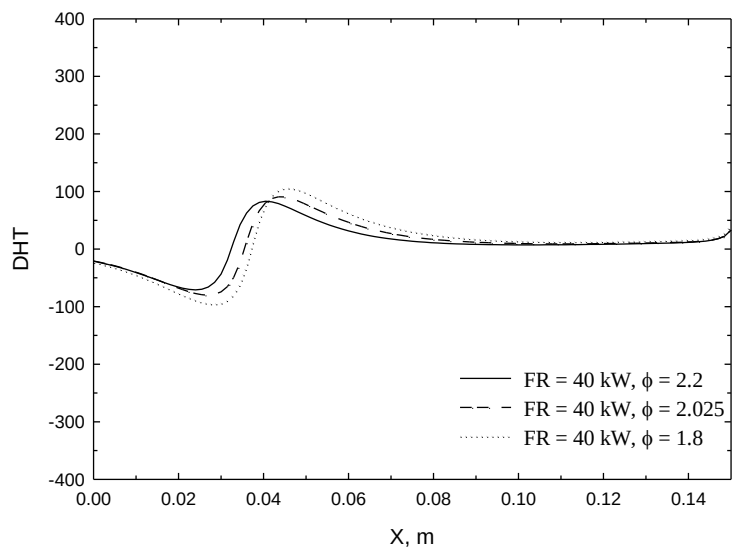
รูปที่ ค.35 อิทธิพล Equivalence ratio ต่อ โครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิง

ก๊าซตามแนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลาง

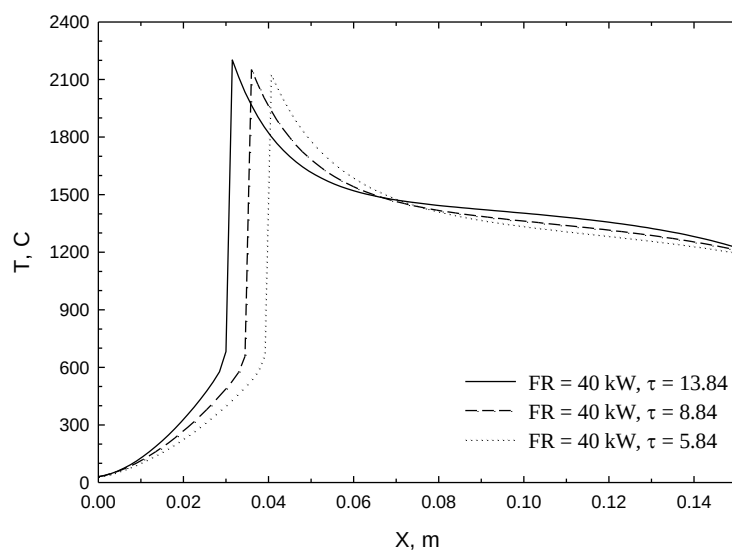


รูปที่ ค.36 อิทธิพล Equivalence ratio ต่อ Radiative heat flux ของหัวเผา

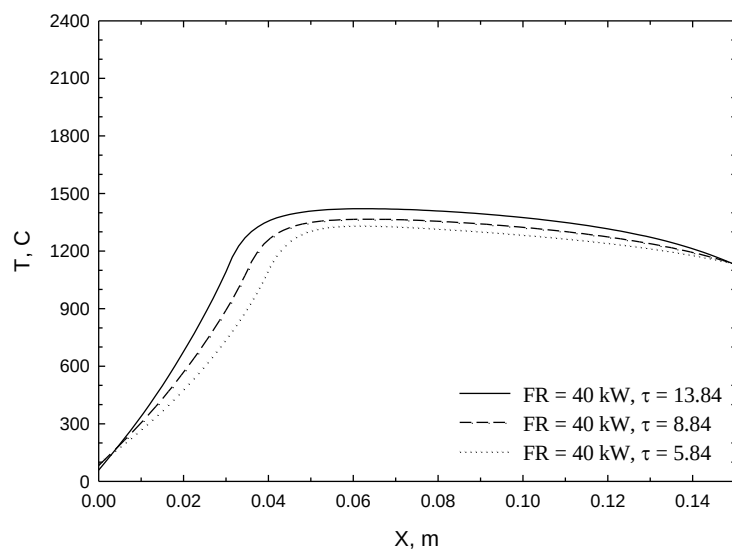
ในส่วนของวัสดุพูน



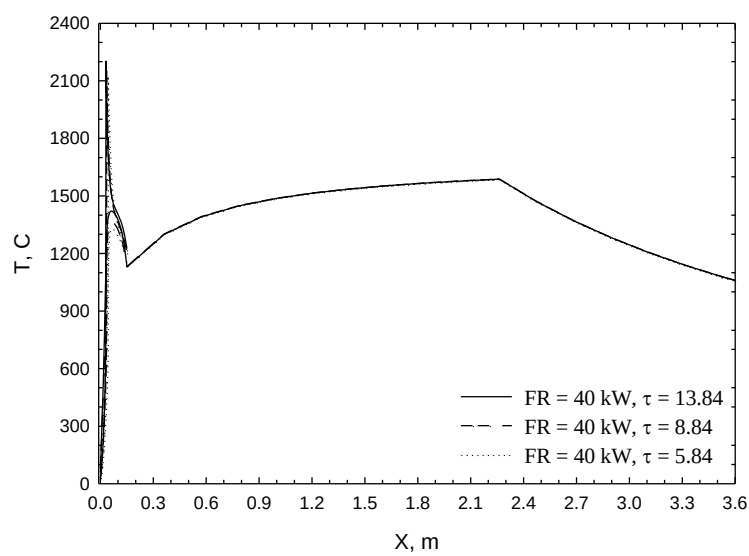
รูปที่ ค.37 อิทธิพล Equivalence ratio ต่อ Divergence of net radiative heat flux
ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพูน



รูปที่ ค.38 อิทธิพล Optical thickness ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิก๊าซในหัววัสดุพูน

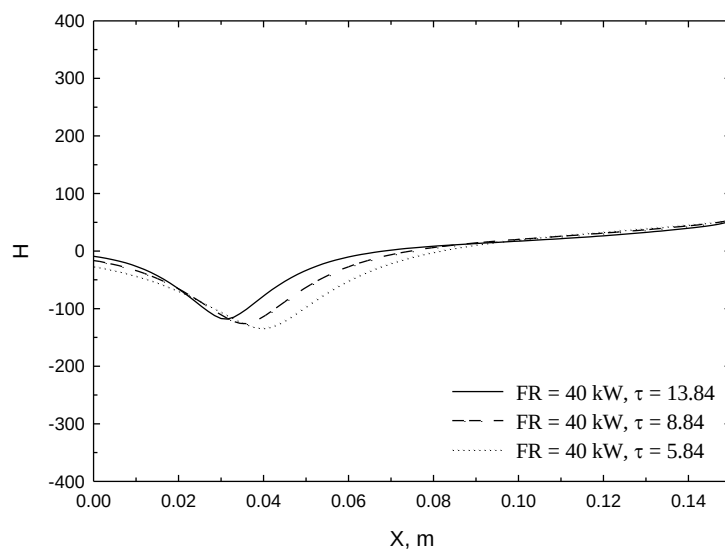


รูปที่ ๓.๓๙ อิทธิพล Optical thickness ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิของแข็งในหัววัสดุพูน



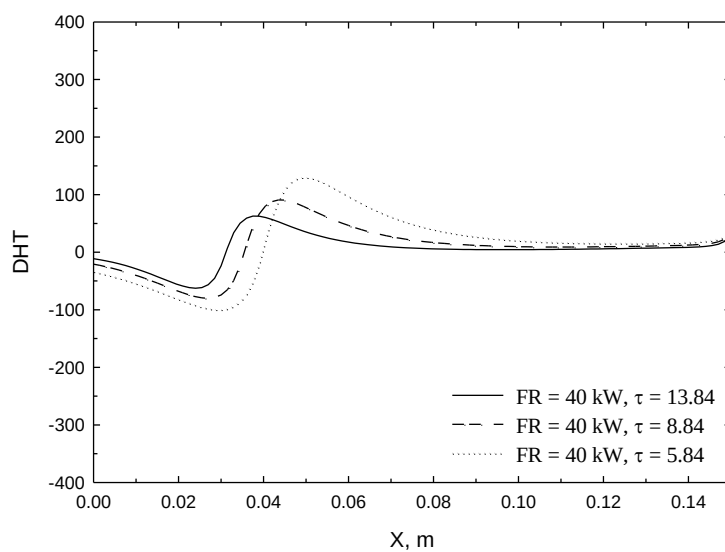
รูปที่ ๓.๔๐ อิทธิพล Optical thickness ต่อ โครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้

เจ็ตเชื้อเพลิงก๊าซตามแนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลาง



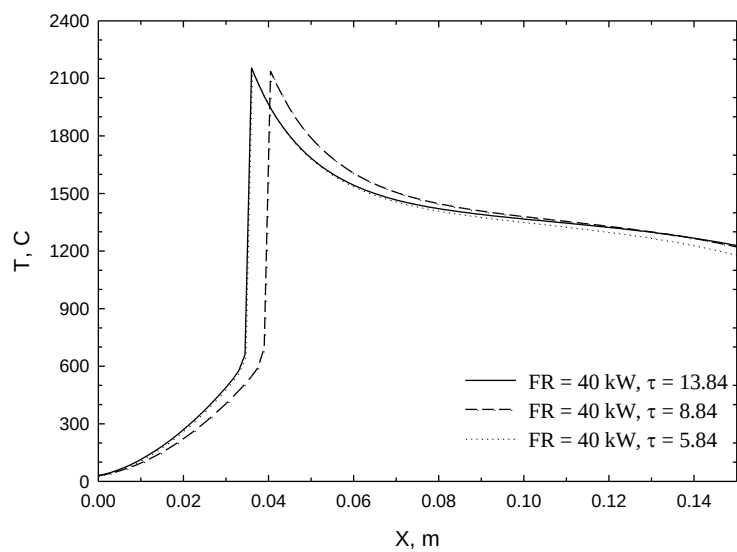
รูปที่ ค.41 อิทธิพล Optical thickness ต่อ Radiative heat flux ของหัวเผา

ในส่วนของวัสดุพอรูน

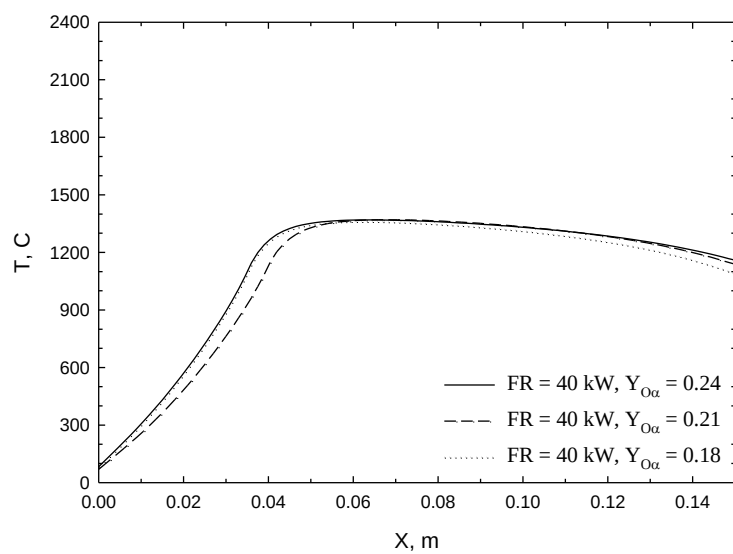


รูปที่ ค.42 อิทธิพล Optical thickness ต่อ Divergence of net radiative heat flux

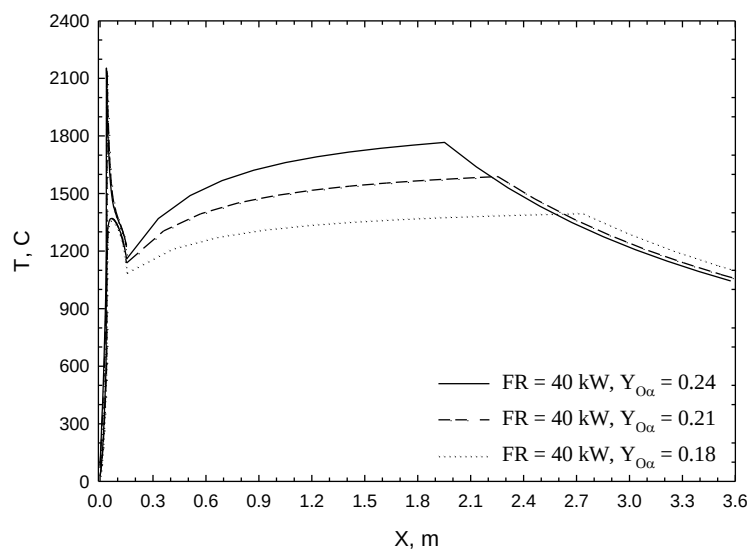
ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพอรูน



รูปที่ ค.43 อิทธิพล Ambient oxygen content ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิของแข็ง
ในหัวเผาวัสดุพูน

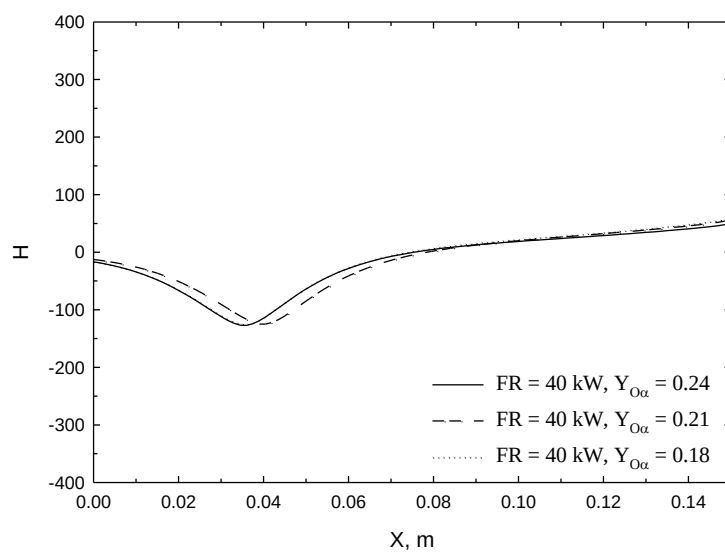


รูปที่ ค.44 อิทธิพล Ambient oxygen content ต่อ โครงสร้างอุณหภูมิของแข็ง
ในหัวเผาวัสดุพูน



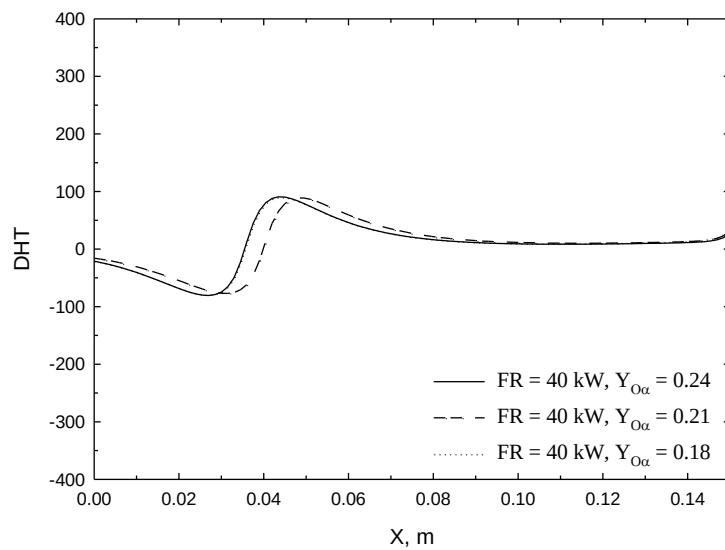
รูปที่ ค.45 อิทธิพล Ambient oxygen content ต่อโครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้เจ็ต

เชื้อเพลิงก๊าซตามแนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลาง

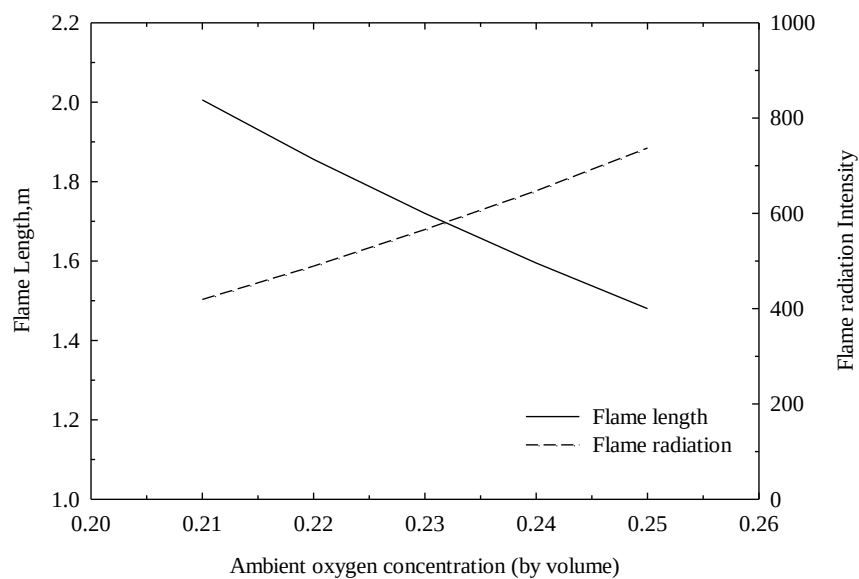


รูปที่ ค.46 อิทธิพล Ambient oxygen content ต่อ Radiative heat flux ของหัวเผา

ในส่วนหน้าของวัสดุพอร์น



รูปที่ ๔.๔๗ อิทธิพล Ambient oxygen content ต่อ Divergence of net radiative heat flux ของหัวเผาในส่วนของวัสดุพอรุน



รูปที่ ๔.๔๘ เปรียบเทียบความยาวเปลวไฟและความเข้มการแผ่รังสีของเปลวไฟ

ภาคผนวก ง.

โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาวัสดุพูนแบบเหนียวนำอากาศด้วยตัวเอง

```

!      COMPUTER PROGRAM FOR SOLVING TEMPERATURE PROFILE
!      BY IMPLICIT METHOD (FINITE DIFFERENCE)

PROGRAM MAINPART

USE MSFLIB

USE PORTLIB

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

COMMON /ALL/ H(300),DHT(300),TM(3,300),TP(3,300),X(300),
&      SS(300),SPT(300),SA(300),E2(300,300),E31(300),
&      E3E(300),HP(300),HM(300),YM(3,300),RR(300)

COMMON /AA/ DX1,NE,AB,DTFL,EA,HO,RS,DX

COMMON /BB/ XE,M,TFL,FMP,RE,PR,GAM,FNR,FJO,FJE,WEIGHT,
&      DS,CD,A,IEND,EPS,NMAX,DT,E,Rg,To,HEATV,CPgas,
&      DenGas,VisGas,FLE,FMASS,FR,
&      STEADY,PORO,Eqv_Ratio,SIGMA,CondGas,Nu,DIA,
&      GasDiff,hv,TherEff,CondSolid,DenSolid,Cpsolid

COMMON /CC/ MM

COMMON /DD/ EEMTM,EEMTP,EEMYM,INDTM,INDTP,INDYM

COMMON /EE/ ICOUNT,ICOUN1

COMMON /LL/ HH(300),HHP(300),HHM(300),DDHT(300),RRR(300)

COMMON /JJJ/ SPOINT,TEMPG

COMMON /VVV/ VELO,TG

COMMON /MBL/ ENGTm1(300),ENGTm2(300),ENGTm3(300),ENGTm4(300),
&      ENGTm5(300),TOTAL_TM(300)

COMMON /PBL/ ENGTP1(300),ENGTP2(300),ENGTP3(300),ENGTP4(300),
&      TOTAL_TP(300)

COMMON /VLE/ ERR_BAL_MAX1,ERR_BAL_MAX2,MAX_I,MAX_J

COMMON /GL/ GL_ENG

COMMON /FED/ BACK

COMMON /Temp/ SWTG,SWTG_P

COMMON /JET/ TempIN(400,100),TempAVG(400),IFLess(400),
&      HEATV_Jet,HEATV_JetOld,JETSTEP,FJETCHECK,
&      TempOUT(400,100),InSECP(400),TJetPP,
&      EmissGas(400),AbsorbGas(400),IFlame(400),
&      TJet,FNU_JJ,VPACT,FMW_O2N2,FMW_JJ,CP_JJ,PMFE,PMFB,

```

```

&      PMFN,PMFD,PMFC,DEQD,DFL,TCMAX,FFRACT,FLAMERAD,
&      UJET,REJET,IFL,FLENGTH,TINL,ReTJet(400,100),EQDAI,
&      YPn(400,100),YPo(400,100),YFF(400,100),YOO(400,100),
&      ReYP(400,100),COAbsorbGas(400)
COMMON /MASS/ Cofa,Cofb,Cofc,Cofd,Cofe,Coff,Cofn
COMMON /GOL/ Eng1,Eng2,Eng3,Eng4,Eng5

!-----!

      TYPE (windowconfig) myscreen
      COMMON /KK/ myscreen
      TYPE (RCCOORD) ROW_COLUMN
      TYPE (qwinfo) winfo
      LOGICAL(4) setwinsize                !Set the size and position of window

!-----!

      REAL(8) TIME1,TIME2,DUM1
      REAL MAX_VAR,RATED,MAX_TMDIFF,SUM_TIME,SUM_LOOP
      REAL AVG_RATED,TOTAL_TIME,MAX_TMDIFF0
      INTEGER MAX_NODE,K,ICOUNT_DUM
      INTEGER LOOPCOUNT
      INTEGER(4) set_bkcolor,set_textcolor,result
      INTEGER(2) cursor,NUM_VAR1,getcon,ass1,ass2
      CHARACTER*8 int_time
      CHARACTER*8 STARTTIME,PRE_TIME,STARTTIME2
      CHARACTER*8 FINISHTIME

!-----

      CALL WININITIAL
      OPEN (UNIT = 40,FILE = 'USER',TITLE = 'Output Graph',
& IOFOCUS = .FALSE.)
      result = FOCUSQQ(0)
      rr=1.0
      TIME1 = 0.
      TIME2 = TIMEF()
      CALL TIME(STARTTIME)                !The function return the system time

!~~~~~

      DO WHILE (.TRUE.)

```

```

!-----CHANGE SCREEN & TEXT COLOR-----+
    set_bkcolor = SETBKCOLORRGB(#FFFFFF)  ! WHITE
    set_textcolor = SETTEXTCOLORRGB(#000000) ! BLACK
    CALL CLEARSCREEN($GCLEARSCREEN)

!-----+

    CALL TIME(STARTTIME2)
    PRE_TIME = STARTTIME2

    TIME1 = TIMEF() !return the number of seconds since the first time it is called,or zero
    cursor = DISPLAYCURSOR($GCURSORON) !start for writing the name
    CALL SETTEXTPOSITION (INT2(1),INT2(1),ROW_COLUMN)
    WRITE(*,*) 'TIME START AT : ',STARTTIME,
    &' CALCULATE START : ',STARTTIME2
    CALL SETTEXTPOSITION (INT2(1),INT2(68),ROW_COLUMN)
    WRITE(*,*) 'Program by A_BUNKWANG : 2013 KMUTT'
    cursor = DISPLAYCURSOR($GCURSOROFF)

!-----*

    LOOPCOUNT = 0
    SUM_TIME = 0.
    SUM_LOOP = 0.
    MAX_TMDIFF0 = 0.

!-----*

    BACK = 0.                !Using for checking diverse
    JETSTEP = 0.             !Including for Jet modeling

!-----*

    CALL INPUT
    CALL INPUTPARA
    CALL PRE
    CALL EXTF
    CALL INIT

!-----+

    CALL FRAME_LEFT(0)
    CALL FRAME_RIGHT(0)
    ICOUNT = 0
    ICOUN1 = 0

```

```

!-----+
888      IF (SWTG.NE.0)CALL INPUT
          CALL EXECUTION
!888      CALL EXECUTION
!%%%%%%%%If back is equal 1 the execution is diverse
          IF(BACK.EQ.1)GOTO 10
!-----*
          ICOUNT_DUM = ICOUN1  !In sub CHECK
!-----*
          SUM_LOOP = SUM_LOOP + ICOUNT_DUM
          MAX_TMDIFF = 0.
          MAX_VAR = 0.
          K = 1
          DO WHILE (K .LE. M)
!Seeking the maximun difference of gas temperature
          TM_DIFF = ABS(TM(3,K)-TM(1,K))
          IF (TM_DIFF .GT. MAX_TMDIFF) THEN
          MAX_TMDIFF = TM_DIFF
          END IF
!Seeking the maximun point and value of gas temperature
          IF (TM(3,K) .GT. MAX_VAR) THEN
          MAX_VAR = TM(3,K)
          MAX_NODE = K
          END IF
          K = K+1
          END DO
!Condition for switching TEMPG
          IF(MAX_TMDIFF.LT.0.1)THEN
          SWTG=1
          SWTG_P=MAX_NODE
          HEATV_JetOld = HEATV_Jet
          JETSTEP = 1.
          ELSE
          ENDIF

```

```

!-----!
      CALL TIME(int_time)      !Finish time
      TIME2 = TIMEF()
!-----*

      RATED = (TIME2 - TIME1)
      SUM_TIME = TIME2
      TOTAL_TIME = SUM_TIME/60
      RATED = RATED/ICOUNT_DUM
      CALL SETTEXTPOSITION (INT2(7),INT2(1),ROW_COLUMN)
      WRITE (*,229) PRE_TIME
      CALL SETTEXTPOSITION (INT2(8),INT2(1),ROW_COLUMN)
      WRITE (*,230) int_time,ICOUNT*DT,ICOUNT
      CALL SETTEXTPOSITION (INT2(9),INT2(1),ROW_COLUMN)
      WRITE (*,231) MAX_NODE,MAX_VAR,MAX_VAR*To
      CALL SETTEXTPOSITION (INT2(10),INT2(1),ROW_COLUMN)
      WRITE (*,232) ICOUNT_DUM
      CALL SETTEXTPOSITION (INT2(11),INT2(1),ROW_COLUMN)
      WRITE (*,233) MAX_TMDIFF,MAX_TMDIFF0
      CALL SETTEXTPOSITION (INT2(12),INT2(1),ROW_COLUMN)
      WRITE (*,234) RATED,M
      CALL SETTEXTPOSITION (INT2(10),INT2(31),ROW_COLUMN)
      WRITE (*,235) TOTAL_TIME
!
229  FORMAT(' PREVIOUS TIME = ',A12)
230  FORMAT(' TIME      = ',A12,
&' :RESULT AT SEC. = ', F9.3,' (COUNT = ',I5,')')
231  FORMAT(' MAX TM('I3,') = ',F12.6,
&' :TEMP',12X,'= ',F9.3,' K')
232  FORMAT(' CONVERT LOOP = ',I8)
233  FORMAT(' STEADY DIFF = ',F12.9,
&' :PREVIOUS = ',F12.9)
234  FORMAT(' AT RATED = ',F12.6,' SEC./LOOP',
&' :MESH SIZE = ', I5)
235  FORMAT(' :ACCUMULATE TIME = ',F12.6,' MINUTE')

```

```

!-----*
      IF (LOOPCOUNT .GT. 1) THEN
      CALL PLOTPREVIOUSGRAPH_LEFT      !Draw the result graphic after the first loop
      CALL PLOTPREVIOUSGRAPH_RIGHT
      END IF
!-----!
      DO 777 NUM_VAR1 = 1 , NE
      DUM1 = H(NUM_VAR1) !Using for drawing in PLOTPREVIOUSGRAPH_RIGHT
      HH(NUM_VAR1) = DUM1
!
      DUM1 = HP(NUM_VAR1)
      HHP(NUM_VAR1) = DUM1
!
      DUM1 = HM(NUM_VAR1)
      HHM(NUM_VAR1) = DUM1
!
      DUM1 = DHT(NUM_VAR1)
      DDHT(NUM_VAR1) = DUM1
!
      DUM1 = RR(NUM_VAR1)
      RRR(NUM_VAR1) = DUM1
777    CONTINUE
!-----!
      CALL PLOTGRAPH_LEFT
      CALL PLOTGRAPH_RIGHT
      CALL TRANS
!
      LOOPCOUNT = 2
      TIME1 = TIME2
      PRE_TIME = int_time
      MAX_TMDIFF0 = MAX_TMDIFF
!
!-----CHECK STEADY STATE-----*
!Keep HEATV_Jet into HEATV_JetOld for checking steady state

```

```

      IF (JETSTEP.EQ.1.)THEN
      FJETCHECK=ABS(HEATV_Jet-HEATV_JetOld)

!----!

      IF (MAX_TMDIFF.LT.STEADY.AND.FJETCHECK.LT.STEADY) GOTO 15
      ELSE
      IF (MAX_TMDIFF.LT.STEADY) GOTO 15
      ENDIF

!----!

      IF (ICOUNT.LT.IEND)GOTO 888
      GOTO 15

!-----*
!----DIVERSE CALCULATION STATUS-----
10      CALL SETTEXTPOSITION (INT2(34),INT2(4),ROW_COLUMN)
      WRITE (*,*) 'Calculation is diverse'
      EXIT

!-----*
!----Final Printed on Screen & Printed Datas Out-----
15      CALL TIME(FINISHTIME)
      AVG_RATED = SUM_TIME/SUM_LOOP
      CALL SETTEXTPOSITION (INT2(35),INT2(4),ROW_COLUMN)
      WRITE (6,300) STARTTIME2,FINISHTIME
      WRITE (6,301) AVG_RATED
      WRITE (6,302) ICOUNT
300      FORMAT (/X,'START : ',A10,2X,'FINISH : ',A10)
301      FORMAT ('   AVG. PERFORMANCE = ',F10.7,' Sec./Loop')
302      FORMAT ('   Main loop count = ',I10)
      result = FOCUSQQ(40)
      winfo.TYPE = QWIN$MAX
      setwinsize = SETWSIZEQQ(0,winfo)

!-----CHANGE SCREEN & TEXT COLOR-----
      set_bkcolor = SETBKCOLORRGB(#FFFFFF)  ! WHITE
      set_textcolor = SETTEXTCOLORRGB(#000000) ! BLACK
      CALL CLEARSCREEN($GCLEARSCREEN)

!-----

```

```

CALL SETTEXTPOSITION (INT2(35),INT2(4),ROW_COLUMN)
WRITE (40,400) STARTTIME2,FINISHTIME
WRITE (40,401) AVG_RATED
400  FORMAT (/X,'  START : ',A10,2X,'FINISH : ',A10)
401  FORMAT ('  AVG. PERFORMANCE = ',F10.7,' Sec./Loop')
!
CALL SETTEXTPOSITION (INT2(36),INT2(45),ROW_COLUMN)
WRITE (40,402) ICOUNT
402  FORMAT ('  Main loop count = ',I10)
!
CALL FRAME_LEFT(40)
CALL FRAME_RIGHT(40)
CALL PLOTGRAPH_LEFT
CALL PLOTGRAPH_RIGHT
!-----After Convergence,Print them all out-----!
result = FOCUSQQ(40)
CALL SETTEXTPOSITION (INT2(2+1),INT2(2),ROW_COLUMN)
WRITE (40,414) TOTAL_TIME
414  FORMAT (' TIME SPEND = ',F12.4,' MINUTE')
CALL SETTEXTPOSITION (INT2(3+1),INT2(2),ROW_COLUMN)
WRITE (40,455) RE
455  FORMAT (' RE = ',F15.2)
CALL SETTEXTPOSITION (INT2(3+1),INT2(2+40),ROW_COLUMN)
WRITE (40,456) TFL
456  FORMAT (' TFL = ',F15.2)
CALL SETTEXTPOSITION (INT2(4+1),INT2(2),ROW_COLUMN)
WRITE (40,457) A
457  FORMAT (' A = ',F15.2)
CALL SETTEXTPOSITION (INT2(4+1),INT2(2+40),ROW_COLUMN)
WRITE (40,459) E
459  FORMAT (' E = ',F15.2)
CALL SETTEXTPOSITION (INT2(12),INT2(1),ROW_COLUMN)
WRITE (40,431) MAX_NODE,MAX_VAR,MAX_VAR*To!Show the node that is highest
431  FORMAT(' MAX TM(',I3,')  = ',F12.6,10X,
```

```
&' :TEMP',5X,'=','F9.3',' K')  
!-----Print Final Data to File-----!  
  
CALL LOCAL_ENERGYBALANCE  
CALL GLOBAL_ENERGYBALANCE  
CALL PRINT4  
CALL PRINT2  
CALL PRINT6  
  
!  
  
result = FOCUSQQ(40)  
cursor = DISPLAYCURSOR($G_CURSORON)  
CALL SETTEXTPOSITION (INT2(37),INT2(4),ROW_COLUMN)  
WRITE (40,*) 'Calculation on this parameter are terminated'  
WRITE(40,*) ' Please enter -C- keyword to continue '  
  
getcon = INCHARQQ()  
ass1 = IACHAR('C')  
ass2 = IACHAR('c')  
  
cursor = DISPLAYCURSOR($G_CURSOROFF)  
IF (.NOT.((getcon .EQ. ass1).OR.(getcon .EQ. ass2))) THEN  
EXIT  
END IF  
  
!  
  
result = FOCUSQQ(0)  
END DO  
  
!~~~~~  
  
cursor = DISPLAYCURSOR($G_CURSOROFF)  
STOP  
END PROGRAM MAINPART  
  
!  
  
!XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX  
!  
  
SUBROUTINE WININITIAL  
USE MSFLIB  
!INTEGER(4) set_textcolor,set_bkcolor  
LOGICAL statusmode
```

```
LOGICAL(4) setwinsize
TYPE (windowconfig) myscreen
TYPE (qwinfo) winfo
COMMON /KK/ myscreen
!OPEN (UNIT = 40,FILE = 'USER',IOFOCUS = .TRUE.) ! BUILD CHILD WINDOWS
winfo.TYPE = QWIN$MAX
setwinsize = SETWSIZEQQ(QWIN$FRAMEWINDOW,winfo)
setwinsize = SETWSIZEQQ(0,winfo)
!
```

```
myscreen.numxpixels = -1
myscreen.numypixels= -1
myscreen.numtextcols = -1
myscreen.numtextrows = -1
myscreen.numcolors = -1
myscreen.fontsize   = -1
myscreen.title ="Output Window # Finite Diff. Implicit Me
&thod # : A_BUNKWANG "C
statusmode = SETWINDOWCONFIG(myscreen)
IF (.NOT. statusmode) statusmode = SETWINDOWCONFIG(myscreen)
statusmode = GETWINDOWCONFIG(myscreen)
RETURN
END
```

```
!
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!
```

```
SUBROUTINE INPUT
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
COMMON /ALL/ H(300),DHT(300),TM(3,300),TP(3,300),X(300),
&          SS(300),SPT(300),SA(300),E2(300,300),E31(300),
&          E3E(300),HP(300),HM(300),YM(3,300),RR(300)
COMMON /AA/ DX1,NE,AB,DFTL,EA,HO,RS,DX
COMMON /BB/ XE,M,TFL,FMP,RE,PR,GAM,FNR,FJO,FJE,WEIGHT,
&          DS,CD,A,IEND,EPS,NMAX,DT,E,Rg,To,HEATV,CPgas,
&          DenGas,VisGas,FLE,FMASS,FR,
```

```

&      STEADY,PORO,Eqv_Ratio,SIGMA,CondGas,Nu,DIA,
&      GasDiff,hv,TherEff,CondSolid,DenSolid,Cpsolid
COMMON /JJJ/ SPOINT,TEMPG
COMMON /VVV/ VELO,TG
COMMON /Temp/ SWTG,SWTG_P
!

COMMON /JET/ TempIN(400,100),TempAVG(400),IFLess(400),
&      HEATV_Jet,HEATV_JetOld,JETSTEP,FJETCHECK,
&      TempOUT(400,100),InSECP(400),TJetPP,
&      EmissGas(400),AbsorbGas(400),IFlame(400),
&      TJet,FNU_JJ,VPACT,FMW_O2N2,FMW_JJ,CP_JJ,PMFE,PMFB,
&      PMFN,PMFD,PMFC,DEQD,DFL,TCMAX,FFRACT,FLAMERAD,
&      UJET,REJET,IFL,FLENGTH,TINL,ReTJet(400,100),EQDAI,
&      YPn(400,100),YPo(400,100),YFF(400,100),YOO(400,100),
&      ReYP(400,100),COAbsorbGas(400)
COMMON /MASS/Cofa,Cofb,Cofc,Cofd,Cofe,Coff,Cofn
!

DT      = 1.0
FJO      = 1.0
FJE      = 1.0
XE      = 0.15
M        = 100
SPOINT= 150
WEIGHT= 0.3
!

A        = 2.6E+8          !1.5E+8
E        = 1.3E+5          !1.25E+5
Rg       = 8.314
To       = 303
TFL      = 8.84
DIA      = 0.015           !84.0D-3
SIGMA    = 5.67E-8
EPS      = 1.0D-6 !CONVERT CRITERIA
STEADY= 1.0D-4

```

```

IEND    = 50000

NMAX    = 250000

PORO    = 0.419

DX1     = XE/M

DX      = XE/M/XE

NE      = M+1

!-----!

Eqv_ratio= 2.025

FR      = 40

!-----!

!Calculation of Properties

CALL PROPERTIES

!-----!

!Calculating Heating value and Velocity of mixture

Call HEAT_VALUE

!-----!

!Jet Calculation and Radiation intensities

Call JET_PROFILE

!-----!

DS      = VELO*DT/XE

GasDiff = 0.5*DIA*VELO

FLE     = 1.0 !CondGas/(GasDiff*DenGas*CPgas)

!

Nu      = 2.+(1.1*(RE**0.6)*(PR**(1/3)))

Hv      = 6.*Poro*Nu*CondGas/(DIA**2)

FMP     = Hv*(XE**2)/CondGas

!

GAM     = DenSolid*CPsolid/(DenGas*CPgas)

TherEff = ((1-PORO)*CondSolid)+(Poro*CondGas)

CD      = TherEff/CondGas

FNR     = TFL*CondGas/(XE*4.0*SIGMA*To**3)

AB      = TFL/XE

DTFL    = AB*DX1

EA      = E/(Rg*To)

```

[illegible]

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

```

COMMON /JET/ TempIN(400,100),TempAVG(400),IFLess(400),
&      HEATV_Jet,HEATV_JetOld,JETSTEP,FJETCHECK,
&      TempOUT(400,100),InSECP(400),TJetPP,
&      EmissGas(400),AbsorbGas(400),IFlame(400),
&      TJet,FNU_JJ,VPACT,FMW_O2N2,FMW_JJ,CP_JJ,PMFE,PMFB,
&      PMFN,PMFD,PMFC,DEQD,DFL,TCMAX,FFRACT,FLAMERAD,
&      UJET,REJET,IFL,FLENGTH,TINL,ReTJet(400,100),EQDAI,
&      YPn(400,100),YPo(400,100),YFF(400,100),YOO(400,100),
&      ReYP(400,100),COAbsorbGas(400)
COMMON /MASS/Cofa,Cofb,Cofc,Cofd,Cofe,Coff,Cofn

```

!

```

TEMPG =(0.0074*FR**3)-(0.9764*FR**2)+(43.184*FR)+1030.8 !AverageMAX-TEMP
TINL  =(0.00002*FR**3)-(0.009*FR**2)+(0.5444*FR)+319.89 !AverageINLET-TEMP
!TEXT  = 1200                                           !AverageTEMP

IF (SWTG.EQ.0)THEN      !Start with SWTG = 0
TJet    =(0.0042*FR**3)-(0.5729*FR**2)+(26.537*FR)+544.62
TJetPP =(0.0042*FR**3)-(0.5729*FR**2)+(26.537*FR)+544.62
ELSE
TJet    =TM(3,NE)*To
TJetPP = TM(3,NE)*To
ENDIF

!-----Properties-----!
!DenGas = 1.16          !kg/m^3 @ 303 K
!CPgas  = 1175 !1141.28 !J/kg.K @ 1000K
!VisGas = 473D-7 !535.943D-7 !425.31D-7 !Pa.s @ 1000K
!CondGas      = 50D-3 !27.69D-3!W/m.K @ 303 K

!-----Air Properties R.Turns-----!
DenGas = 357.45*TINL**(-1.004)
CPgas  =((0.00000008*TEXT**2)+(0.00003*TEXT)+0.999)*1000
VisGas =(-(0.00006*TEXT**2)+(0.5952*TEXT)+101.47)/10000000
CondGas = (18.682*EXP(0.0008*TINL))/1000
CondSolid= 7.12          !W/m.K
DenSolid = 2316          !kg/m^3 !Por(1-epsilon) @1200K VTT
Cpsolid = 1234          !J/kg.K
Pr = VisGas*CPgas/CondGas
RETURN
END

!
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!

SUBROUTINE HEAT_VALUE
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
COMMON /ALL/ H(300),DHT(300),TM(3,300),TP(3,300),X(300),
&          SS(300),SPT(300),SA(300),E2(300,300),E31(300),
&          E3E(300),HP(300),HM(300),YM(3,300),RR(300)

```

```

COMMON /AA/ DX1,NE,AB,DTFL,EA,HO,RS,DX
COMMON /BB/ XE,M,TFL,FMP,RE,PR,GAM,FNR,FJO,FJE,WEIGHT,
&      DS,CD,A,IEND,EPS,NMAX,DT,E,Rg,To,HEATV,CPgas,
&      DenGas,VisGas,FLE,FMASS,FR,
&      STEADY,PORO,Eqv_Ratio,SIGMA,CondGas,Nu,DIA,
&      GasDiff,hv,TherEff,CondSolid,DenSolid,Cpsolid
COMMON /JJJ/ SPOINT,TEMPG
COMMON /VVV/ VELO,TG
COMMON /Temp/ SWTG,SWTG_P

```

!

```

COMMON /JET/ TempIN(400,100),TempAVG(400),IFLess(400),
&      HEATV_Jet,HEATV_JetOld,JETSTEP,FJETCHECK,
&      TempOUT(400,100),InSECP(400),TJetPP,
&      EmissGas(400),AbsorbGas(400),IFlame(400),
&      TJet,FNU_JJ,VPACT,FMW_O2N2,FMW_JJ,CP_JJ,PMFE,PMFB,
&      PMFN,PMFD,PMFC,DEQD,DFL,TCMAX,FFRACT,FLAMERAD,
&      UJET,REJET,IFL,FLENGTH,TINL,ReTJet(400,100),EQDAI,
&      YPn(400,100),YPo(400,100),YFF(400,100),YOO(400,100),
&      ReYP(400,100),COAbsorbGas(400)
COMMON /MASS/Cofa,Cofb,Cofc,Cofd,Cofe,Coff,Cofn

```

!

!%%%%%%%%Informations%%%%%%%%%

```

AtomC  = 3.6
AtomH  = 9.2
FLHV   = 45988. !kJ/kg fuel

```

!%%%%%%%%Standard enthalpy of formation @ 298K%%%%%%%%%

```

Fuel    = -116379.      !kJ/Kmol fuel
CO       = -110541.      !kJ/Kmol CO
CO2      = -393546.      !kJ/Kmol CO2
H2O      = -241845.      !kJ/Kmol H2O
O2       = 0.            !kJ/Kmol O2
N2       = 0.            !kJ/Kmol N2
H2       = 0.            !kJ/Kmol H2

```

!%%%%%%%%Sensible enthalpy at the consideration%%%%%%%%%

```

SEn_CO= 34.801*TempG-13267      !kJ/Kmol CO
SEn_CO2= 57.522*TempG-24429      !kJ/Kmol CO2
SEn_H2O= 45.957*TempG-20472      !kJ/Kmol H2O
SEn_O2 = 36.181*TempG-13600      !kJ/Kmol O2
SEn_N2 = 34.405*TempG-13111      !kJ/Kmol N2
SEn_H2 = 31.917*TempG-11452      !kJ/Kmol H2

!-----From Stephen R Turns-----!

!%%%%%%%%Calculating number of moles of reactants and species

      IF(Eqv_ratio.LE.1.)THEN

!%%%%%%%%CxHy + a(O2+3.76N2) >> bCO2 + dH2O + fO2 + 3.76aN2      %%%%%%%%%%

!%%%%%%%%Number of moles of O2 in the reactants to number of moles of fuel

      Cofa      =(AtomC+(AtomH/4))/Eqv_ratio

!%%%%%%%%Number of moles of products(per mol of fuel burned)

      Cofb      = AtomC

      Cofd      = AtomH/2

      Coff      =((1-Eqv_ratio)/Eqv_ratio)*(AtomC+(AtomH/4))

!%%%%%%%%Enthalpy of Reaction (kJ)%%%%%%%%

      delHRp =(Cofb*CO2) + (Cofd*H2O)

      delHRr =Fuel

      delHR   =delHRp-delHRr

!%%%%%%%%Intensive Enthalpy of Reation%%%%%%%%

      HRfuel   =delHR/(AtomC*12.01+AtomH*1.01)      !kJ/kg fuel

      HRmixture =delHR/(AtomC*12.01+AtomH*1.01+Cofa*(32.+3.76*28.02)) !kJ/kg mixture

      ELSE

!%%%%%%%%CxHy + a(O2+3.76N2) >> bCO2 + cCO + dH2O + eH2 + 3.76aN2      %%%%%%%%%%

!%%%%%%%%Number of moles of O2 in the reactants to number of moles of fuel%%%%%%%%

      Cofa      =(AtomC+(AtomH/4))/Eqv_ratio

!%%%%%%%%Number of moles of CO2%%%%%%%%

!%%%%%%%%Depend upon maximum temperature from experiment

      FKP =200000000*TEMPG**(-2.748)

!%%%%%%%%(2a(Kp-1)+x+(y/2))/(2*(Kp-1))

      FGO1 =(2*Cofa*(FKP-1)+AtomC+(AtomH/2))/(2*(FKP-1))

!%%%%%%%%1/(2*(Kp-1))

      FGO2 =1/(2*(FKP-1))

```

$$!%%%%%%%%(2a(Kp-1)+x+(y/2))^2$$

$$FGO3 = (2 * Cofa * (FKP-1) + AtomC + (AtomH/2)) ** 2$$

$$!%%%%%%%%4Kp(Kp-1)(2ax-x^2)$$

$$FGO4 = 4 * FKP * (FKP-1) * ((2 * Cofa * AtomC) - (AtomC ** 2))$$

!

$$Cofb = FGO1 - FGO2 * (FGO3 - FGO4) ** 0.5$$

$$!%%%%%%%%Number\ of\ moles\ of\ products(per\ mol\ of\ fuel\ burned)%%%%%%%%$$

$$Cofc = AtomC - Cofb$$

$$Cofd = 2 * Cofa - Cofb - AtomC$$

$$Cofe = ((-2) * Cofa) + Cofb + AtomC + (AtomH/2)$$

$$Cofn = 3.76 * Cofa$$

$$!%%%%%%%%Enthalpy\ of\ Reaction\ (kJ)%%%%%%%%$$

$$delHRp = (Cofb * CO2) + (Cofc * CO) + (Cofd * H2O)$$

$$delHRr = Fuel$$

$$delHR = delHRp - delHRr$$

$$!%%%%%%%%Intensive\ Enthalpy\ of\ Reation%%%%%%%%$$

$$HRfuel = delHR / (AtomC * 12.01 + AtomH * 1.01) \quad !kJ/kg\ fuel$$

$$HRmixture = delHR / (AtomC * 12.01 + AtomH * 1.01 + Cofa * (32. + 3.76 * 28.02)) \quad !kJ/kg\ mixture$$

END IF

!-----!

$$!%%%%%%%%Jet\ Model\ calculating\ Intensive\ Enthalpy\ of\ Reation%%%%%%%%$$

$$Cofx = Cofb + Cofc$$

$$Cofy = Cofd + Cofe$$

$$Cofat = ((2 * Cofx) + Cofy - (2 * Cofb) - Cofc - Cofd) / 2$$

$$Cofz = 7.52 / 2 * (Cofa + Cofat)$$

$$!%%%%%%%%Product\ mole\ fractions%%%%%%%%$$

$$SumPMF = Cofb + Cofc + Cofd + Cofe + Cofn$$

$$PMFb = Cofb / SumPMF$$

$$PMFc = Cofc / SumPMF$$

$$PMFd = Cofd / SumPMF$$

$$PMFe = Cofe / SumPMF$$

$$PMFn = Cofn / SumPMF$$

!-----Heat and Mass Transfer Cengel-----!

$$!%%%%%%%%Calculating\ CP\ of\ Products\ Mixture%%%%%%%%$$

$$\begin{aligned}
 CP_CO2 &= (-0.0001 * TJetPP^{**2}) + (0.5436 * TJetPP) + 801 \\
 CP_CO &= (-0.00007 * TJetPP^{**2}) + (0.317 * TJetPP) + 927.19 \\
 CP_H2O &= (-0.0001 * TJetPP^{**2}) + (0.9297 * TJetPP) + 1502.6 \\
 CP_H2 &= (0.00008 * TJetPP^{**2}) + (1.561 * TJetPP) + 13479 \\
 CP_N2 &= (-0.00007 * TJetPP^{**2}) + (0.3215 * TJetPP) + 909.3 \\
 CP_JJ &= (CP_CO2 * PMFb) + (CP_CO * PMFc) + (CP_H2O * PMFd) \\
 &\quad + (CP_H2 * PMFe) + (CP_N2 * PMFn)
 \end{aligned}$$

!%%%%%%%%Calculating Kinematic Viscosity of Products Mixture%%%%%%%%

$$\begin{aligned}
 FNU_CO2 &= 0.0000000001 * TJetPP^{**2} + 0.0000001 * TJetPP - 0.00003 \\
 FNU_CO &= 0.0000000005 * TJetPP^{**2} - 0.0000006 * TJetPP + 0.0003 \\
 FNU_H2O &= 0.0000000003 * TJetPP^{**2} + 0.0000003 * TJetPP - 0.0001 \\
 FNU_H2 &= 0.000000001 * TJetPP^{**2} + 0.000001 * TJetPP - 0.0003 \\
 FNU_N2 &= 0.0000000001 * TJetPP^{**2} + 0.0000002 * TJetPP - 0.00005 \\
 FNU_JJ &= (FNU_CO2 * PMFb) + (FNU_CO * PMFc) + (FNU_H2O * PMFd) \\
 &\quad + (FNU_H2 * PMFe) + (FNU_N2 * PMFn)
 \end{aligned}$$

!%%%%%%%%Calculating Molecular Weights of Products Mixture%%%%%%%%

$$\begin{aligned}
 FMW_CO2 &= Cofb * (12 + 32) \\
 FMW_CO &= Cofc * (12 + 16) \\
 FMW_H2O &= Cofd * (2 + 16) \\
 FMW_H2 &= Cofe * 2 \\
 FMW_N2 &= Cofn * 28 \\
 FMW_JJ &= FMW_CO2 + FMW_CO + FMW_H2O + FMW_H2 + FMW_N2 \\
 FMW_O2N2 &= Cofat * (32 + 3.76 * 28)
 \end{aligned}$$

!-----!

$$\begin{aligned}
 JetHRp &= Cofx * (CO2 - SEn_CO2) + Cofy * (H2O - SEn_H2O) - Cofz * SEn_N2 \\
 JetHRr &= Cofb * (CO2 - SEn_CO2) + Cofc * (CO - SEn_CO) + Cofd * (H2O - SEn_H2O) \\
 &\quad - (Cofe * SEn_H2) - (Cofa * 3.76 * SEn_N2) \\
 JetHR &= jetHRp - jetHRr \\
 JetHRfuel &= JetHR / (Cofc * 28 + Cofe * 2) \quad !kJ/kg \text{ fuel} \\
 !JetHRfuel &= JetHR / (Cofb * 44 + Cofc * 28 + Cofd * 18 + Cofe * 2 + Cofa * 3.76 * 28) \\
 JetHRmix &= JetHR / (Cofb * 44 + Cofc * 28 + Cofd * 18 + Cofe * 2 + Cofa * 3.76 * 28 \\
 &\quad + Cofat * (32 + 3.76 * 28)) \quad !kJ/kg \text{ mixture}
 \end{aligned}$$

!-----!

$$HEATV = ABS(HRmixture) * 1000. \quad !kJ/kg \text{ mixture}$$

```

      HEATV_Jet=ABS(JetHRfuel)*1000. !kJ/kg fuel
!-----!
!%%%%%%%%Calculating interstitial velocity and Reynolds number in packed beds
!%%%%%%%%Stiochiometric Burned%%%%%%%%
      FMWfst = 12.01*3.6+1.01*9.2 !fuel stiochiometry
      FMWast = 5.9*(32+3.76*28.02)!Air stiochiometry
      AFst= FMWfst/FMWast      !Fuel-Air stiochiometry
      VolST = (FMWfst+FMWast)/DenGas
!%%%%%%%%Mass of Fuel Flow rate%%%%%%%%
      FMassKgf = FR/FLHV ! (kg fuel/s)
      FMassKmol=FMassKgf/FMWfst ! (Kmol/s)
!%%%%%%%%Actually Burned%%%%%%%%
      FMWfact = (12.01*3.6+1.01*9.2)*FMassKmol !fuel Actual
      FMWaact = (32+3.76*28.02)*(FMassKmol*Cofa) !Air Actual
      AFact= FMWfact/FMWaact      !Fuel-Air stiochiometry
      VolACT =(FMWfact+FMWaact)/DenGas
      Ag = PORO*((22./7.)*(0.140)**2)/4 !Including Porosity
      Vpst = VolST/Ag
      Vpact = VolACT/Ag
      REst = DenGas*Vpst*XE/VisGas
      REact = DenGas*Vpact*XE/VisGas
      RE = REact
      VELO= VPact
      RETURN
      END
!
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!
      SUBROUTINE JET_PROFILE
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      COMMON /ALL/ H(300),DHT(300),TM(3,300),TP(3,300),X(300),
&      SS(300),SPT(300),SA(300),E2(300,300),E31(300),
&      E3E(300),HP(300),HM(300),YM(3,300),RR(300)
      COMMON /AA/ DX1,NE,AB,DTFL,EA,HO,RS,DX

```

```

COMMON /BB/ XE,M,TFL,FMP,RE,PR,GAM,FNR,FJO,FJE,WEIGHT,
&      DS,CD,A,IEND,EPS,NMAX,DT,E,Rg,To,HEATV,CPgas,
&      DenGas,VisGas,FLE,FMASS,FR,
&      STEADY,PORO,Eqv_Ratio,SIGMA,CondGas,Nu,DIA,
&      GasDiff,hv,TherEff,CondSolid,DenSolid,Cpsolid
COMMON /JJJ/ SPOINT,TEMPG
COMMON /VVV/ VELO,TG
COMMON /Temp/ SWTG,SWTG_P

!

COMMON /JET/ TempIN(400,100),TempAVG(400),IFLess(400),
&      HEATV_Jet,HEATV_JetOld,JETSTEP,FJETCHECK,
&      TempOUT(400,100),InSECP(400),TJetPP,
&      EmissGas(400),AbsorbGas(400),IFlame(400),
&      TJet,FNU_JJ,VPACT,FMW_O2N2,FMW_JJ,CP_JJ,PMFE,PMFB,
&      PMFN,PMFD,PMFC,DEQD,DFL,TCMAX,FFRACT,FLAMERAD,
&      UJET,REJET,IFL,FLENGTH,TINL,ReTJet(400,100),EQDAI,
&      YPn(400,100),YPo(400,100),YFF(400,100),YOO(400,100),
&      ReYP(400,100),COAbsorbGas(400)
COMMON /MASS/Cofa,Cofb,Cofc,Cofd,Cofe,Coff,Cofn

!

!%%%%%%%%%Jet physical parameters calculation
EqDai   = 0.140   !m
Yoxi    = 0.21    !Ambient air mole fraction (by volume)
CPmix   = CP_JJ   !J/kg K
Ffract  = FMW_JJ/FMW_O2N2 !mfuel/mair
UJet    = VPact*PORO
REjet   = UJet*EqDai/FNU_JJ      !REact*PORO !Not considered the porosity effect
Flength = (UJet*EqDai**2)/(48*FNU_JJ*Ffract*Yoxi) !m From Experiment
IFL     = 10                                !Same value of FLength but Using for LOOP INDICES
DFL     = Flength/10.                    !step>>1/10 of Flength
DEqD    = EqDai/28.                    !step>>0.5cm
TCmax   = ((TJetPP-To)+(HEATV_Jet/CPmix))
&      *(Ffract*Yoxi/(1+Ffract*Yoxi))+To

!-----!

```

!%%%%%%%%Calculating inside Flame TEMP for each Positions%%%%%%%%%

SumDFL = 0.

Do 10 I=1,20 !Limite Axial Flame Length

FJet1 = (TJet-To)-(Yoxi*Ffract*HEATV_Jet/CPmix)

FJet2 = (1+(48*SumDFL/(REjet*EqDai)))*(-1)

FJet4 = (Yoxi*Ffract*HEATV_Jet/CPmix)+To

SumDEqD = 0.

Do 20 J=1,100 !Limite Radial Flame Length

FJet3 = (1-(2*SumDEqD/EqDai)*FJet2)

TempIN(I,J) = (FJet1*FJet2*FJet3)+FJet4

SumDEqD = SumDEqD+DEqD

20 CONTINUE

SumDFL=SumDFL+DFL

10 CONTINUE

!%%%%%%%%Calculating outside Flame TEMP for each Positions%%%%%%%%%

SumDFL = 0.

Do 50 I=1,20

FJet1 = (TJet-To)+(HEATV_Jet/CPmix)

FJet2 = (1+(48*SumDFL/(REjet*EqDai)))*(-1)

FJet4 = To

SumDEqD =0.

Do 60 J=1,100

FJet3 = (1-(2*SumDEqD/EqDai)*FJet2)

TempOUT(I,J) = (FJet1*FJet2*FJet3)+FJet4

SumDEqD = SumDEqD+DEqD

60 CONTINUE

SumDFL=SumDFL+DFL

50 CONTINUE

!-----!

!%%%%%%%%Calculating YProducts inside Flame for each Positions%%%%%%%%%

SumDFL = 0.

Do 120 I=1,20

YPn1=(1+Yoxi*Ffract)

SumDEqD =0.

```

Do 130 J=1,100
  YPn2=(1+48*SumDFL/(REjet*EqDai))**(-1)
  YPn2=YPn2*(1-2*(SumDEqD/EqDai)*(1+48*SumDFL/(REjet*EqDai))**(-1))
  YPn(I,J)= YPn1*(1-YPn2)
  SumDEqD      =SumDEqD+DEqD
130  CONTINUE
  SumDFL=SumDFL+DFL
120  CONTINUE
!%%%%%%%%Calculating YProducts outside Flame for each Positions%%%%%%%%
  SumDFL = 0.
  Do 140 I=1,20
    YPo1=(1+Yoxi*Ffract)/Ffract
    SumDEqD      =0.
    Do 150 J=1,100
      YPo2=(1+48*SumDFL/(REjet*EqDai))**(-1)
      YPo2=YPo2*(1-2*(SumDEqD/EqDai)*(1+48*SumDFL/(REjet*EqDai))**(-1))
      YPo(I,J)= YPo1*YPo2+(1-Yoxi)
      SumDEqD      =SumDEqD+DEqD
150  CONTINUE
      SumDFL=SumDFL+DFL
140  CONTINUE

!-----!
!%%%%%%%%Calculating YFuel for each Positions%%%%%%%%
  SumDFL = 0.
  Do 160 I=1,20
    YFF1=(1+Yoxi*Ffract)
    SumDEqD      =0.
    Do 170 J=1,100
      YFF2=(1+48*SumDFL/(REjet*EqDai))**(-1)
      YFF2=YFF2*(1-2*(SumDEqD/EqDai)*(1+48*SumDFL/(REjet*EqDai))**(-1))
      YFF(I,J)= YFF1*YFF2-(Yoxi*Ffract)
      SumDEqD      =SumDEqD+DEqD
170  CONTINUE

```

```

        SumDFL=SumDFL+DFL
160    CONTINUE
!%%%%%%%%Calculating YPair for each Positions%%%%%%%%
        SumDFL = 0.
        Do 180 I=1,20
            YOO1=(1+Yoxi*Ffract)/Ffract
            SumDEqD      =0.
            Do 190 J=1,100
                YOO2=(1+48*SumDFL/(REjet*EqDai))**(-1)
                YOO2=YOO2*(1-2*(SumDEqD/EqDai)*(1+48*SumDFL/(REjet*EqDai))**(-1))
                YOO(I,J)= Yoxi-YOO1*YOO2
                SumDEqD      =SumDEqD+DEqD
190    CONTINUE
            SumDFL=SumDFL+DFL
180    CONTINUE
!-----!
!%%%%%%%%Seeking for inter-section point between Inside & Outside Temperature
        Do 70 I=1,IFL+1
            JJ=1
            Do 80 J=1,100
                IF(TempIN(I,J).GE.TempOUT(I,J))THEN
                    InSECP(I)=JJ
                    GOTO 70
                ELSE
                    JJ=JJ+1  !Inter-Section Points Depend on Radial Axis
            ENDIF
80    CONTINUE
70    CONTINUE
!-----!
!90    CONTINUE
!-----!
!%%%%%%%%Calculating Average Cross-Section Temperature%%%%%%%%
        FlameRad=0.
        SumAP=0.

```

```

Do 30 I=1,IFL+1
    SumT=0.
    SumP=0.
!-----!
!%%%%%%%%Integrate from the center to edge of burner
    Do 40 J=1,INT(EqDai/DEqD/2)!half burner diameter
        IF (SumP.LE.InSECP(I))THEN
            SumT= SumT+TempIN(I,J)
            SumP= SumP+1
        ELSE
            SumT= SumT+TempOUT(I,J)
            SumP= SumP+1
        ENDIF
40    CONTINUE
    TempAVG(I)=SumT/SumP
!
    EmissCO2=(-0.00000001*TempAVG(I)**2)-(0.00003*TempAVG(I))+0.205
    EmissCO=(-0.0000001*TempAVG(I)**2)+(0.0002*TempAVG(I))+0.0544
    EmissH2O=(0.00000000002*TempAVG(I)**3)-(0.00000006*TempAVG(I)**2)
    &          -(0.00007*TempAVG(I))+0.3365
    AbsorbCO2=143155*TempAVG(I)**(-1.274)
    AbsorbCO =13.813*EXP(-0.002*TempAVG(I))
    absorbH2O=57.414*EXP(-0.002*TempAVG(I))
!
    EmissGas(I)=(PMFb*EmissCO2)+(PMFc*EmissCO)+(PMFd*EmissH2O)
    AbsorbGas(I)=(PMFb*AbsorbCO2)+(PMFc*AbsorbCO)+(PMFd*AbsorbH2O)
!
    IF (I.EQ.1)THEN
        COAbsorbGas(I)=AbsorbGas(I)
    ELSE
        SumASGas =0.
        Do 90 J=1,SumAP
            SumASGas =SumASGas+AbsorbGas(J)
90    CONTINUE

```

```

COAbsorbGas(I)=SumASGas/SumAP
ENDIF

!

IF (I.GT.1)THEN
IFlame(I-1)=(EmissGas(I)*SIGMA*TempAVG(I)**4)/(22/7)
&      *EXP(-COAbsorbGas(I-1)*(0.9*2*DEqD*InSECP(I)))
&      *((22/7)*EqDai**2/4) !Watt

IFLess(I-1)=IFlame(I-1)/(SIGMA*To**4*(EqDai**2/4))
FlameRad=FlameRad+IFLess(I-1)
ELSE
ENDIF

SumAP=SumAP+1
30  CONTINUE
FJE=FlameRad
!-----!
!%%%%%%%%Prepare for printing out JET TEMP Profile
Do 100 I=1,400
SumPP=0
Do 110 J=1,INT(EqDai/DEqD)+4      !Declare radial nodes by diff-node !(14+4=18)!
IF (I.LE.IFL) THEN
IF (SumPP.LE.InSECP(I))THEN      !Radial axis must be equal Burner diameter (+4)
ReTJet(I,J)= TempIN(I,J)
ELSE
ReTJet(I,J)= TempOUT(I,J)
ENDIF
SumPP=SumPP+1
ELSE
ReTJet(I,J)= TempOUT(I,J)
ENDIF
110  CONTINUE
100  CONTINUE
!%%%%%%%%Prepare for printing out YP of JET Profile

```

```

Do 210 I=1,400
SumPP=0
      Do 220 J=1,INT(EqDai/DEqD)+4
IF (I.LE.IFL) THEN
IF (SumPP.LE.InSECP(I))THEN
ReYP(I,J)= YPn(I,J)
ELSE
ReYP(I,J)= YPo(I,J)
ENDIF
SumPP=SumPP+1
ELSE
ReYP(I,J)= YPo(I,J)
ENDIF
220    CONTINUE
210    CONTINUE
!
RETURN
END
!
```

!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

```

SUBROUTINE INPUTPARA
USE MSFLIB
USE DIALOGM
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
COMMON /ALL/ H(300),DHT(300),TM(3,300),TP(3,300),X(300),
&          SS(300),SPT(300),SA(300),E2(300,300),E31(300),
&          E3E(300),HP(300),HM(300),YM(3,300),RR(300)
COMMON /BB/ XE,M,TFL,FMP,RE,PR,GAM,FNR,FJO,FJE,WEIGHT,
&          DS,CD,A,IEND,EPS,NMAX,DT,E,Rg,To,HEATV,CPgas,
&          DenGas,VisGas,FLE,FMASS,FR,
&          STEADY,PORO,Eqv_Ratio,SIGMA,CondGas,Nu,DIA,
&          GasDiff,hv,TherEff,CondSolid,DenSolid,Cpsolid
COMMON /JJJ/ SPOINT,TEMPG
```

```

COMMON /VVV/ VELO,TG
INCLUDE 'Resource.FD'
TYPE (dialog) dlg1
TYPE (RCCOORD) ROW_COLUMN
LOGICAL retlog , BottonS
CHARACTER*40 CTFL,CA,CE,CEQVR,CRE ,CFMP
CHARACTER*40 CEPS,CMESH,CTEMPG,CPORO,CFR
REAL(4) RealTFL,RealA,RealE,RealRE,RealFR
REAL(4) RealEPS,RealPORO,RealEQVR,RealFMP
INTEGER(4) IMESH,ITEMPG
BottonS = .FALSE.
retlog = DLGINIT( IDD_DIALOG1, dlg1 )
IF (.not. retlog) THEN
WRITE (*,*) 'ERROR: Dialog not found'
CALL EXIT(-4)
END IF
!-----CONVERT TO REAL-----!
RealA  = A
RealE  = E
RealTFL = TFL
RealRE  = RE
RealEPS = EPS
IMESH  = M
ITEMPG = TEMPG
RealPORO= PORO
RealFMP= FMP
RealEQVR= Eqv_Ratio
RealFR  = FR
!-----!
WRITE (CRE,77) RealRE
WRITE (CE,77) RealE
WRITE (CA,77) RealA
WRITE (CTFL,77) RealTFL
WRITE (CEPS,78) RealEPS

```

```

WRITE (CMESH,79) IMESH
WRITE (CTEMPG,79) ITEMPG
WRITE (CPORO,77) RealPORO
WRITE (CFMP,77) RealFMP
WRITE (CEQVR,76) RealEQVR
WRITE (CFR,77) RealFR
76  FORMAT (F15.5)
77  FORMAT (F15.2)
78  FORMAT (F15.8)
79  FORMAT (I10)

retlog = DLGSET (dlg1,IDC_EDIT1,ADJUSTL(CRE))
retlog = DLGSET (dlg1,IDC_EDIT2,ADJUSTL(CTFL))
retlog = DLGSET (dlg1,IDC_EDIT3,ADJUSTL(CA))
retlog = DLGSET (dlg1,IDC_EDIT4,ADJUSTL(CE))
retlog = DLGSET (dlg1,IDC_EDIT5,ADJUSTL(CEPS))
retlog = DLGSET (dlg1,IDC_EDIT6,ADJUSTL(CMESH))
retlog = DLGSET (dlg1,IDC_EDIT7,ADJUSTL(CTEMPG))
retlog = DLGSET (dlg1,IDC_EDIT8,ADJUSTL(CPORO))
retlog = DLGSET (dlg1,IDC_EDIT9,ADJUSTL(CFMP))
retlog = DLGSET (dlg1,IDC_EDIT10,ADJUSTL(CEQVR))
retlog = DLGSET (dlg1,IDC_EDIT11,ADJUSTL(CFR))

!

retlog = DLGMODAL (dlg1)
retlog = DLGGET (dlg1,IDOK,BottonS)
retlog = DLGGET (dlg1,IDC_EDIT1,CRE)
retlog = DLGGET (dlg1,IDC_EDIT2,CTFL)
retlog = DLGGET (dlg1,IDC_EDIT3,CA)
retlog = DLGGET (dlg1,IDC_EDIT4,CE)
retlog = DLGGET (dlg1,IDC_EDIT5,CEPS)
retlog = DLGGET (dlg1,IDC_EDIT6,CMESH)
retlog = DLGGET (dlg1,IDC_EDIT7,CTEMPG)
retlog = DLGGET (dlg1,IDC_EDIT8,CPORO)
retlog = DLGGET (dlg1,IDC_EDIT9,CFMP)
retlog = DLGGET (dlg1,IDC_EDIT10,CEQVR)

```

```

retlog = DLGGET (dlg1, IDC_EDIT11, CFR)
!      MS$NOFREEFORM
!  READ (CRE,*) RE
!      READ (CTFL,*)TFL
!      READ (CA,*) A
!      READ (CE,*) E
!      READ (CEPS,*) EPS
!      READ (CMESH,*) M
!      READ (CTEMPG,*) TEMPG
      READ (CPORO,*) PORO
!      READ (CFMP,*) FMP
      READ (CEQVR,*) Eqv_Ratio
      READ (CFR,*) FR
      CALL SETTEXTPOSITION (INT2(3),INT2(2),ROW_COLUMN)
      WRITE (*,555) RE
555  FORMAT (' RE = ',F15.2)
      CALL SETTEXTPOSITION (INT2(3),INT2(2+40),ROW_COLUMN)
      WRITE (*,556) TFL
556  FORMAT (' TFL = ',F15.2)
      CALL SETTEXTPOSITION (INT2(4),INT2(2),ROW_COLUMN)
      WRITE (*,557) A
557  FORMAT (' A = ',F15.2)
      CALL SETTEXTPOSITION (INT2(4),INT2(2+40),ROW_COLUMN)
      WRITE (*,559) E
559  FORMAT (' E = ',F15.2)
      CALL SETTEXTPOSITION (INT2(5),INT2(2),ROW_COLUMN)
      WRITE (*,560) PORO
560  FORMAT (' Porosity = ',F5.2)
      CALL SETTEXTPOSITION (INT2(5),INT2(2+40),ROW_COLUMN)
      WRITE (*,561) TEMPG
561  FORMAT (' Inlet Gas Temp = ',F9.3)
      CALL SETTEXTPOSITION (INT2(6),INT2(2),ROW_COLUMN)
      WRITE (*,562) FMP
562  FORMAT (' FMP = ',F15.2)

```

```
CALL SETTEXTPOSITION (INT2(6),INT2(2+40),ROW_COLUMN)
WRITE (*,563) Eqv_Ratio
563   FORMAT (' Equivalence Ratio = ',F15.5)
WRITE (*,564) FR
564   FORMAT (' Firing Rate = ',F15.2)
RETURN
END

!
!XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
!

SUBROUTINE PRE
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
COMMON /ALL/ H(300),DHT(300),TM(3,300),TP(3,300),X(300),
&      SS(300),SPT(300),SA(300),E2(300,300),E31(300),
&      E3E(300),HP(300),HM(300),YM(3,300),RR(300)
COMMON /AA/ DX1,NE,AB,DFTL,EA,HO,RS,DX
COMMON /BB/ XE,M,TFL,FMP,RE,PR,GAM,FNR,FJO,FJE,WEIGHT,
&      DS,CD,A,IEND,EPS,NMAX,DT,E,Rg,To,HEATV,CPgas,
&      DenGas,VisGas,FLE,FMASS,FR,
&      STEADY,PORO,Eqv_Ratio,SIGMA,CondGas,Nu,DIA,
&      GasDiff,hv,TherEff,CondSolid,DenSolid,Cpsolid
COMMON /JJJ/ SPOINT,TEMPG
COMMON /VVV/ VELO,TG
VELO  = RE*VisGas/(DenGas*XE)
DS    = VELO*DT/XE
GasDiff = 0.5*DIA*VELO
FLE    = CondGas/(GasDiff*DenGas*CPgas)

!
Nu      = 2.+(1.1*(RE**0.6)*(PR**(1/3)))
Hv      = 6.*Poros*Nu*CondGas/(DIA**2)
FMP     = Hv*(XE**2)/CondGas

!-----!

GAM     = DenSolid*Cpsolid/(DenGas*CPgas)
TherEff=((1-PORO)*CondSolid)+(Poros*CondGas)
```

```

CD      = TherEff/CondGas
FNR     = TFL*CondGas/(XE*4.0*SIGMA*To**3)
AB      = TFL/XE
DTFL   = AB*DX1
EA      = E/(Rg*To)
HO      = HEATV/(CPgas*To)
RS      = (XE**2)*DenGas*A/VisGas
TG      = TEMPG/To
RETURN
END

!
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!

SUBROUTINE EXTF
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
COMMON /ALL/ H(300),DHT(300),TM(3,300),TP(3,300),X(300),
&          SS(300),SPT(300),SA(300),E2(300,300),E31(300),
&          E3E(300),HP(300),HM(300),YM(3,300),RR(300)
COMMON /AA/ DX1,NE,AB,DTFL,EA,HO,RS,DX
COMMON /BB/ XE,M,TFL,FMP,RE,PR,GAM,FNR,FJO,FJE,WEIGHT,
&          DS,CD,A,IEND,EPS,NMAX,DT,E,Rg,To,HEATV,CPgas,
&          DenGas,VisGas,FLE,FMASS,FR,
&          STEADY,PORO,Eqv_Ratio,SIGMA,CondGas,Nu,DIA,
&          GasDiff,hv,TherEff,CondSolid,DenSolid,Cpsolid
REAL(8) E2_DUM,E2_DUM1,E31_DUM,E3E_DUM
!
CALCULATE E2
DO 1 J=1,NE-1
TJ = (J-1)*DTFL
DO 1 K=J+1,NE
TK = (K-1)*DTFL
TZ = TK-TJ
E2_DUM = E2F(TZ)
E2(J,K) = E2_DUM
E2_DUM1 = E2(J,K)

```

```

        E2(K,J) = E2_DUM1
1      CONTINUE
        DO 4 J=1,NE
        E2(J,J) = 1
4      CONTINUE
!      CALCULATE E3
        DO 1000 J=1,NE
        TZ1 = (J-1)*DTFL
        TZE = TFL-TZ1
        E31_DUM = E3F(TZ1)
        E31(J) = E31_DUM
        E3E_DUM = E3F(TZE)
        E3E(J) = E3E_DUM
1000   CONTINUE
        RETURN
        END

        SUBROUTINE EXTF
!*****
!      E2(X) ; EXPONENTIAL INTEGRAL
!      REAL FUNCTION E2F(X)
        DOUBLE PRECISION FUNCTION E2F(X)
        IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
!
        E2F = 0.0506142681*EXP(-X/0.0198550718)
        & +0.1111905172*EXP(-X/0.1016667613)
        & +0.1568533229*EXP(-X/0.2372337950)
        & +0.1813418917*EXP(-X/0.4082826788)
        & +0.1813418917*EXP(-X/0.5917173212)
        & +0.1568533229*EXP(-X/0.7627662050)
        & +0.1111905172*EXP(-X/0.8983332387)
        & +0.0506142681*EXP(-X/0.9801449282)
        RETURN
        END

```

```

!*****
!      E3(X) ; EXPONENTIAL INTEGRAL
!      REAL FUNCTION E3F(X)
!      DOUBLE PRECISION FUNCTION E3F(X)
!      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
!
      E3F = 0.0032951914*EXP(-X/0.0446339553)
      & +0.0178429027*EXP(-X/0.1443662570)
      & +0.0454393195*EXP(-X/0.2868247571)
      & +0.0791995995*EXP(-X/0.4548133152)
      & +0.1060473594*EXP(-X/0.6280678354)
      & +0.1125057995*EXP(-X/0.7856915206)
      & +0.0911190236*EXP(-X/0.9086763921)
      & +0.0445508044*EXP(-X/0.9822200849)
      RETURN
      END
!
!XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
!
      SUBROUTINE INIT
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      COMMON /ALL/ H(300),DHT(300),TM(3,300),TP(3,300),X(300),
      &      SS(300),SPT(300),SA(300),E2(300,300),E31(300),
      &      E3E(300),HP(300),HM(300),YM(3,300),RR(300)
      COMMON /AA/ DX1,NE,AB,DTFL,EA,HO,RS,DX
      COMMON /BB/ XE,M,TFL,FMP,RE,PR,GAM,FNR,FJO,FJE,WEIGHT,
      &      DS,CD,A,IEND,EPS,NMAX,DT,E,Rg,To,HEATV,CPgas,
      &      DenGas,VisGas,FLE,FMASS,FR,
      &      STEADY,PORO,Eqv_Ratio,SIGMA,CondGas,Nu,DIA,
      &      GasDiff,hv,TherEff,CondSolid,DenSolid,Cpsolid
      COMMON /JJJ/ SPOINT,TEMPG
      COMMON /VVV/ VELO,TG
      REAL(8) Y1,Y2,P,SP
      INTEGER(2) X1,X2

```

```

SP = SPOINT
P = M/150.
IF (SPOINT .LT. 0) THEN
DO 903 I=1, NE
TM(1,I) = 1.0
TP(1,I) = 1.0
903  CONTINUE
DO 907 I=1,NE
YM(1,I) = 0.0
907  CONTINUE
ELSE
X1 = 1      ; X2 = INT2((SP-4)*P)
Y1 = 1.0    ; Y2 = 1.0
DO 1131 I=X1,X2
TM(1,I) = ((I-X1)*(Y2-Y1)/(X2-X1))+Y1
TP(1,I) = ((I-X1)*(Y2-Y1)/(X2-X1))+Y1
1131  CONTINUE
X1 = INT2((SP-4)*P) ; X2 = INT2((SP)*P)
Y1 = 1.0          ; Y2 = TG+0.1
DO 1132 I=X1,X2
TM(1,I) = ((I-X1)*(Y2-Y1)/(X2-X1))+Y1
TP(1,I) = ((I-X1)*(Y2-Y1)/(X2-X1))+Y1
1132  CONTINUE
X1 = INT2((SP)*P) ; X2 = INT2((SP+3)*P)
Y1 = TG+0.1      ; Y2 = TG
DO 1133 I=X1,X2
TM(1,I) = ((I-X1)*(Y2-Y1)/(X2-X1))+Y1
TP(1,I) = ((I-X1)*(Y2-Y1)/(X2-X1))+Y1
1133  CONTINUE
X1 = INT2((SP+3)*P) ; X2 = INT2(0.85*NE)
Y1 = TG            ; Y2 = TG-0.05
DO 1134 I=X1,X2
TM(1,I) = ((I-X1)*(Y2-Y1)/(X2-X1))+Y1
TP(1,I) = ((I-X1)*(Y2-Y1)/(X2-X1))+Y1

```

```

1134  CONTINUE
      X1 = INT2(0.85*NE) ; X2 = INT2(0.90*NE)
      Y1 = TG-0.05      ; Y2 = TG-0.2
      DO 1135 I=X1,X2
      TM(1,I) = ((I-X1)*(Y2-Y1)/(X2-X1))+Y1
      TP(1,I) = ((I-X1)*(Y2-Y1)/(X2-X1))+Y1
1135  CONTINUE
      X1 = INT2(0.90*NE) ; X2 = INT2(0.95*NE)
      Y1 = TG-0.2      ; Y2 = TG-0.5
      DO 1136 I=X1,X2
      TM(1,I) = ((I-X1)*(Y2-Y1)/(X2-X1))+Y1
      TP(1,I) = ((I-X1)*(Y2-Y1)/(X2-X1))+Y1
1136  CONTINUE
      X1 = INT2(0.95*NE) ; X2 = INT2(NE)
      Y1 = TG-0.5      ; Y2 = TG-0.8
      DO 1137 I=X1,X2
      TM(1,I) = ((I-X1)*(Y2-Y1)/(X2-X1))+Y1
      TP(1,I) = ((I-X1)*(Y2-Y1)/(X2-X1))+Y1
1137  CONTINUE
      DO 49 I=1,INT1(SP)
      YM(1,I) = 0.0
49    CONTINUE
      X1 = INT2((SP)*P)  ; X2 = INT2((SP+5)*P)
      Y1 = 0.0          ; Y2 = 1.0
      DO 57 I=X1,X2
      YM(1,I) = ((I-X1)*(Y2-Y1)/(X2-X1))+Y1
57    CONTINUE
      DO 1011 I=INT2((SP+5)*P),NE
      YM(1,I) = 1.00
1011  CONTINUE
      END IF
      DO 3 I=1,NE
      TM(2,I) = TM(1,I)
      TM(3,I) = TM(1,I)

```

```

      TP(2,I) = TP(1,I)
      TP(3,I) = TP(1,I)
      YM(2,I) = YM(1,I)
      YM(3,I) = YM(1,I)
3      CONTINUE
      DO 5 I=1,NE
      SA(I) = TP(2,I)**4.0
5      CONTINUE
!      RETURN
      END
!
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!
```

SUBROUTINE EXECUTION

USE MSFLIB

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

COMMON /ALL/ H(300),DHT(300),TM(3,300),TP(3,300),X(300),

& SS(300),SPT(300),SA(300),E2(300,300),E31(300),

& E3E(300),HP(300),HM(300),YM(3,300),RR(300)

COMMON /AA/ DX1,NE,AB,DTFL,EA,HO,RS,DX

COMMON /BB/ XE,M,TFL,FMP,RE,PR,GAM,FNR,FJO,FJE,WEIGHT,

& DS,CD,A,IEND,EPS,NMAX,DT,E,Rg,To,HEATV,CPgas,

& DenGas,VisGas,FLE,FMASS,FR,

& STEADY,PORO,Eqv_Ratio,SIGMA,CondGas,Nu,DIA,

& GasDiff,hv,TherEff,CondSolid,DenSolid,Cpsolid

COMMON /DD/ EEMTM,EEMTP,EEMYM,INDTM,INDTP,INDYM

COMMON /EE/ ICOUNT,ICOUN1

COMMON /CC/ MM

COMMON /JJJ/ SPOINT,TEMPG

COMMON /VVV/ VELO,TG

COMMON /FED/ BACK

DIMENSION Z(500)

REAL(8) ARR(500),YM1,YM2,YM3,YM4,YM5,FYM

REAL(8) TM1,TM2,TM3,TM4,TM5,TM6,FTM

```

      REAL(8) TP1,TP2,TP3,TP4,TP5,FTP
      REAL(8) TP_DUMM,TM_DUMM,YM_DUMM

!-----!
!      ENTRY LOOP
!-----!
      ICOUNT = ICOUNT+1
!      RETURN
!-----!
!      ENTRY TPTAU
!-----!
999      SPT(1) = (TP(2,2)-TP(2,1))*TP(2,1)**3/DTFL
          DO 10 I=2,NE-1
              SPT(I) =(TP(2,I+1)-TP(2,I-1))*TP(2,I)**3/(2.0*DTFL)
10      CONTINUE
          SPT(NE) =(TP(2,NE)-TP(2,NE-1))*TP(2,NE)**3/DTFL
!      RETURN
!-----!
!      ENTRY SUBH
!-----!
          MM = 0
75      IF (MM.EQ.1) GOTO 600
          DO 700 I = 1,NE
              SS(I)= SPT(I)
700     CONTINUE
          GOTO 900
600     DO 800 I = 1,NE
              SS(I)= SA(I)
800     CONTINUE
!-----CALCULATE HEAT FLUX-(0.GE.X.LE.XE)-----!
900     DO 1 J = 1,NE
          W1 = 0
          IF(J.EQ.1) GOTO 3
!
          NN = 1

```

```

      NNN = J-NN+1
      DO 2 I = NN,J
      Z(I-NN+1) = SS(I)*E2(I,J)
2      CONTINUE
      CALL TRAPEZ(Z,NNN,DTFL,Y)
      W1 = Y
      IF(MM.EQ.0) GOTO 500
3      HP(J)= (FJO*E31(J)+W1)/2.0
500     W2 = 0
      IF(J.EQ.NE) GOTO 410
      NN = NE
      NNN = NN-J+1
      DO 51 I = J,NN
      Z(I-J+1)= SS(I)*E2(J,I)
51      CONTINUE
      CALL TRAPEZ(Z,NNN,DTFL,Y)
      W2 = Y
410     IF(MM.EQ.0) GOTO 850
!
      HM(J) = -(FJE*E3E(J)+W2)/2.0
      H(J) = HP(J)+HM(J)
      GOTO 1
850     DHT(J) = -(FJO*E2(1,J)+FJE*E2(J,NE)-SA(1)*E2(1,J)
&      -SA(NE)*E2(J,NE)-(4.0*W1)+(4.0*W2))/2.0
1      CONTINUE
      MM = MM+1
      IF(MM.EQ.1) GOTO 75
!      RETURN
!-----!
!      ENTRY SUBYM
!-----!
      DO 20 J=2,NE-1
      ARR(J) = RS*PR*EXP(-EA/TM(3,J))/(RE*PR)
      YM1 = PORO*YM(1,J)/DS

```

```

YM2 = PORO*YM(3,J-1)/DX
YM3 = PORO*YM(2,J+1)/(RE*PR*FLE*DX*DX)
YM4 = PORO*YM(3,J-1)/(RE*PR*FLE*DX*DX)
YM5 = PORO*ARR(J)
FYM = (PORO/DS)+(PORO/DX)+(PORO*2.0/(RE*PR*FLE*DX*DX))
&      +(PORO*ARR(J))
YM(3,J) = (YM1+YM2+YM3+YM4+YM5)/FYM
20  CONTINUE
YM(3,NE) = (2.0*YM(3,NE-1))-YM(3,NE-2)
!      RETURN
!-----!
!      ENTRY SUBTM
!-----!
      DO 30 J=1,NE
      RR(J) = RS*PR*(1.0-YM(3,J))*EXP(-EA/TM(3,J))
30  CONTINUE
!
      DO 40 J=2,NE-1
      TM1 = PORO*TM(2,J+1)/(RE*PR*DX*DX)
      TM2 = FMP*TP(3,J)/(RE*PR)
      TM3 = PORO*TM(1,J)/DS
      TM4 = PORO*TM(3,J-1)/(RE*PR*DX*DX)
      TM5 = PORO*TM(3,J-1)/DX
      TM6 = PORO*HO*RR(J)/(RE*PR)
      FTM = (PORO*1.0/DS)+(PORO*1.0/DX)+
&      (PORO*2.0/(RE*PR*DX*DX))+(FMP/(RE*PR))
      TM(3,J) = (TM1+TM2+TM3+TM4+TM5+TM6)/FTM
40  CONTINUE      !From half control volume method      !
      TM(3,NE) = (2.0*TM(3,NE-1))-TM(3,NE-2)      !Keep the same gradient to evaluate!
!      RETURN      !the next node      !
!-----!
!      ENTRY SUBTP
!-----!
      TP(3,1) = (2.0*TP(2,2))-TP(2,3)

```

```

DO 50 J=2,NE-1

TP1    = CD*TP(2,J+1)/(RE*PR*DX*DX)
TP2    = CD*TP(3,J-1)/(RE*PR*DX*DX)
TP3    = -TFL*TFL*DHT(J)/(RE*PR*FNR)
TP4    = FMP*TM(3,J)/(RE*PR)
TP5    = (1-PORO)*GAM*TP(1,J)/DS
FTP    = ((1-PORO)*GAM/DS)+(2.0*CD/(RE*PR*DX*DX))+(FMP/
&      (RE*PR))
TP(3,J) = (TP1+TP2+TP3+TP4+TP5)/FTP
50      CONTINUE
TP(3,NE) = (2.0*TP(3,NE-1))-TP(3,NE-2)
!      RETURN
!-----!
!      ENTRY CHECK
!-----!

EMTM=0.0
EMTP=0.0
EYMY=0.0
EEMTM=0.0
EEMTP=0.0
EEMYM=0.0
ICOUN1=ICOUN1+1
DO 60 J=1,NE
SES=TM(3,J)-TM(2,J)
ES=ABS(SSES)
IF(ES.LE.EEMTM) GOTO 60
EEMTM=ABS(SSES)
EMTM=SES
INDTM=J
60      CONTINUE
!
DO 70 J=1,NE
SES=TP(3,J)-TP(2,J)
ES=ABS(SSES)

```

```

        IF(ES.LE.EEMTP) GOTO 70
        EEMTP=ABS(SES)
        EMTP=SES
        INDTP=J
70    CONTINUE
        DO 80 J=1,NE
        SES=YM(3,J)-YM(2,J)
        ES=ABS(SES)
        IF(ES.LE.EEYM) GOTO 80
        EEYM=ABS(SES)
        EYM=SES
        INDYM=J
80    CONTINUE
!    RETURN
!----CHECK CONVERGENCE OF SOLUTIONS----!
!-----!

        IF (EEMTM.GE.EPS .OR. EEMTP.GE.EPS .OR. EEYM.GE.EPS) THEN
        IF (ICOUN1 .GT. NMAX) THEN
        BACK = 1.
        GOTO 101
        ELSE
!-----!
!    ENTRY CHANGE
!-----!

        DO 90 I=1,NE
        SA(I) = TP(2,I)**4.0
90    CONTINUE
        DO 100 J=1,NE
        TM_DUMM = ((1.0-WEIGHT)*TM(2,J))+(WEIGHT*TM(3,J))
        TM(2,J) = TM_DUMM
        TP_DUMM = ((1.0-WEIGHT)*TP(2,J))+(WEIGHT*TP(3,J))
        TP(2,J) = TP_DUMM
        YM_DUMM = ((1.0-WEIGHT)*YM(2,J))+(WEIGHT*YM(3,J))
        YM(2,J) = YM_DUMM

```

```

100      CONTINUE
          GOTO 999
        ENDIF
      ENDIF
101      RETURN
        END
!
!XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
!
      SUBROUTINE TRAPEZ (Z,NNN,DTFL,VALUE)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      DIMENSION Z(500)
      COMMON /ALL/ H(300),DHT(300),TM(3,300),TP(3,300),X(300),
&          SS(300),SPT(300),SA(300),E2(300,300),E31(300),
&          E3E(300),HP(300),HM(300),YM(3,300),RR(300)
      VALUE = 0.5*DTFL*(Z(1)+Z(NNN))
      IF(NNN.EQ.2) RETURN
      SUM = 0.0
      N1 = NNN-1
      DO 3 J=2,N1
      SUM =SUM+Z(J)
3      CONTINUE
      VALUE = VALUE+DTFL*SUM
!
      RETURN
      END
!
!XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
!
      SUBROUTINE TRANS
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      COMMON /ALL/ H(300),DHT(300),TM(3,300),TP(3,300),X(300),
&          SS(300),SPT(300),SA(300),E2(300,300),E31(300),
&          E3E(300),HP(300),HM(300),YM(3,300),RR(300)

```

```

COMMON /AA/ DX1,NE,AB,DTFL,EA,HO,RS,DX
COMMON /EE/ ICOUNT,ICOUN1

DO 1 I=1,NE
  TM(1,I) = TM(3,I)
  TM(2,I) = TM(3,I)
  TP(1,I) = TP(3,I)
  TP(2,I) = TP(3,I)
  YM(1,I) = YM(3,I)
  YM(2,I) = YM(3,I)
1  CONTINUE
  DO 3 I=1,NE
    SA(I) = TP(2,I)**4.0
3  CONTINUE
  ICOUN1 = 0
  RETURN
  END

!
!XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
!
SUBROUTINE FRAME_LEFT(unitwin)
  USE MSFLIB
  INTEGER(2) numfonts,fontset
  INTEGER(2) return1,x1,y1,x2,y2
  INTEGER(2) linestyle !,color !,x,y
  INTEGER(4) retcolor,color,unitwin
  REAL(8) INTV_Y,SCALE_Y_LEFT
  TYPE (xycoord) xy
  TYPE (fontinfo) font
  TYPE (RCCOORD) ROW_COLUMN
  CALL SETTEXTPOSITION (INT2(15),INT2(4+3),ROW_COLUMN)
  WRITE (unitwin,*) '* Output Graph Temperature Pro *' !*****
  SCALE_Y_LEFT = 5.0
  x1 = 25; y1 = 250
  x2 = 325; y2 = 500

```

```

linestyle = #F0F0
INTV_Y=250.0/SCALE_Y_LEFT
numfonts = INITIALIZEFONTS()
fontset = SETFONT('t"Arial"h16pi')
fontset = GETFONTINFO(font)
color = SETCOLORRRGB(#000000)
CALL MOVETO(35+30,516-10,xy)
CALL OUTGTEXT('Dimensionless Distrance 0.0 - 1.0')          !*****
fontset = SETFONT('t"Arial"h14pi')
CALL MOVETO(16-10,480-30+40,xy)
CALL SETGTEXTROTATION(900)
CALL OUTGTEXT(' Dim.less  TM & TP 0.0 - 5.0 / YM 0.0 - 5.0')
CALL MOVETO(331,470,xy)
CALL OUTGTEXT('Dimensionless  RR  0.0 - 15000')             !*****
!-----Legend on frame-----!
CALL SETLINESTYLE(#FFFFFF)
retcolor = SETCOLORRRGB(#0000FF)
fontset = SETFONT('t"Arial"h12pi')
CALL SETGTEXTROTATION(0)
CALL MOVETO(30,260,xy)
CALL OUTGTEXT('TM ')
CALL MOVETO(30+20,265,xy)
return1 = LINETO(INT2(30+35),INT2(265))
CALL MOVETO(30,290,xy)
CALL OUTGTEXT('YM ')
CALL MOVETO(30+20,295,xy)
return1 = LINETO(INT2(30+35),INT2(295))
retcolor = SETCOLORRRGB(#FF0000)
CALL MOVETO(30,275,xy)
CALL OUTGTEXT('TP ')
CALL MOVETO(30+20,280,xy)
return1 = LINETO(INT2(30+35),INT2(280))
retcolor = SETCOLORRRGB(#FF0000)
CALL MOVETO(30,305,xy)

```

```

CALL OUTGTEXT('RR ')
CALL MOVETO(30+20,310,xy)
return1 = LINETO(INT2(30+35),INT2(310))
!-----!
retcolor = SETCOLORRRGB(#000000)
return1 = RECTANGLE($GBORDER,x1,y1,x2,y2) !$GBORDER $FILLINTERIOR
!-----Border around legend-----!
return1 = RECTANGLE($GBORDER,27,257,70,318)
!-----!
CALL SETLINESTYLE(linestyle)
retcolor = SETCOLORRRGB(#AEEAAA) !CONFIG LINE COLOR
!-----WRITE HORIZONTAL LINE-----!
DO 1195 I=1,INT2(scale_y_left)-1
IF (250+intv_y*I.GT. 318) THEN
CALL MOVETO(INT2(25),INT2(250+intv_y*I),xy)
return1 = LINETO(INT2(325),INT2(250+intv_y*I))
ELSE
CALL MOVETO(INT2(70),INT2(250+intv_y*I),xy)
return1 = LINETO(INT2(325),INT2(250+intv_y*I))
END IF
1195 CONTINUE
!-----WRITE VERTICAL LINE-----!
CALL MOVETO(INT2(25+40-10),INT2(500),xy)
return1 = LINETO(INT2(25+40-10),INT2(318))
CALL MOVETO(INT2(25+40-10),INT2(250),xy)
return1 = LINETO(INT2(25+40-10),INT2(257))
CALL MOVETO(INT2(25+80-20),INT2(500),xy)
return1 = LINETO(INT2(25+80-20),INT2(250))
CALL MOVETO(INT2(25+120-30),INT2(500),xy)
return1 = LINETO(INT2(25+120-30),INT2(250))
CALL MOVETO(INT2(25+160-40),INT2(500),xy)
return1 = LINETO(INT2(25+160-40),INT2(250))
CALL MOVETO(INT2(25+200-50),INT2(500),xy)
return1 = LINETO(INT2(25+200-50),INT2(250))

```

```

CALL MOVETO(INT2(25+240-60),INT2(500),xy)
return1 = LINETO(INT2(25+240-60),INT2(250))
CALL MOVETO(INT2(25+280-70),INT2(500),xy)
return1 = LINETO(INT2(25+280-70),INT2(250))
CALL MOVETO(INT2(25+320-80),INT2(500),xy)
return1 = LINETO(INT2(25+320-80),INT2(250))
CALL MOVETO(INT2(25+360-90),INT2(500),xy)
return1 = LINETO(INT2(25+360-90),INT2(250))

!-----!

linestyle = #FFFF
CALL SETLINESTYLE(linestyle)
RETURN
END

!
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!

SUBROUTINE PLOTGRAPH_LEFT
USE MSFLIB
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
COMMON /ALL/ H(300),DHT(300),TM(3,300),TP(3,300),X(300),
&      SS(300),SPT(300),SA(300),E2(300,300),E31(300),
&      E3E(300),HP(300),HM(300),YM(3,300),RR(300)
COMMON /AA/ DX1,NE,AB,DTFL,EA,HO,RS,DX
COMMON /BB/ XE,M,TFL,FMP,RE,PR,GAM,FNR,FJO,FJE,WEIGHT,
&      DS,CD,A,IEND,EPS,NMAX,DT,E,Rg,To,HEATV,CPgas,
&      DenGas,VisGas,FLE,FMASS,FR,
&      STEADY,PORO,Eqv_Ratio,SIGMA,CondGas,Nu,DIA,
&      GasDiff,hv,TherEff,CondSolid,DenSolid,Cpsolid
COMMON /CC/ MM
COMMON /DD/ EEMTM,EEMTP,EEMYM,INDTM,INDTP,INDYM
COMMON /EE/ ICOUNT,ICOUN1
COMMON /JJJ/ SPOINT,TEMPG
TYPE (xycoord) xy
INTEGER(2) returnposition

```

```

INTEGER(2) I,K
INTEGER(4) retcolor

REAL DELTAX ,SCALE_RR,SCALE_T,SCALE_Y_LEFT,MAX_RR

MAX_RR=15000.0

SCALE_Y_LEFT=5.0

SCALE_T = 250.0/SCALE_Y_LEFT

SCALE_RR = 250.0/MAX_RR          ! 15000 Do not forget to change legent in FRAME_LEFT

DELTAX = 300.0/M                 !3.0

I = 1 ; K = 1

retcolor = SETCOLORRGB(#FF0000)

DO WHILE (K .LE. M)

CALL MOVETO(INT2(25+(K-1)*deltax),INT2(500-scale_T*TP(3,K)),xy)

returnposition = LINETO(INT2(25+K*deltax),

*      INT2(500-scale_T*TP(3,K+1)))

CALL MOVETO(INT2(25+(K-1)*deltax),INT2(500-scale_RR*RR(K)),xy)

returnposition = LINETO(INT2(25+K*deltax),

* INT2(500-scale_RR*RR(K+1)))

K = K+1

END DO

retcolor = SETCOLORRGB(#0000FF)

DO WHILE (I .LE. M)

CALL MOVETO(INT2(25+(I-1)*deltax),INT2(500-scale_T*TM(3,I)),xy)

returnposition = LINETO(INT2(25+I*deltax),

*      INT2(500-scale_T*TM(3,I+1)))

CALL MOVETO(INT2(25+(I-1)*deltax),

*      INT2(500-scale_T*YM(3,I)),xy)

returnposition = LINETO(INT2(25+I*deltax),

*      INT2(500-scale_T*YM(3,I+1)))

I = I+1

END DO

RETURN

END

```

!

[illegible]

!

```

SUBROUTINE PLOTPREVIOUSGRAPH_LEFT
USE MSFLIB
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
COMMON /ALL/ H(300),DHT(300),TM(3,300),TP(3,300),X(300),
&      SS(300),SPT(300),SA(300),E2(300,300),E31(300),
&      E3E(300),HP(300),HM(300),YM(3,300),RR(300)
COMMON /AA/ DX1,NE,AB,DTFL,EA,HO,RS,DX
COMMON /BB/ XE,M,TFL,FMP,RE,PR,GAM,FNR,FJO,FJE,WEIGHT,
&      DS,CD,A,IEND,EPS,NMAX,DT,E,Rg,To,HEATV,CPgas,
&      DenGas,VisGas,FLE,FMASS,FR,
&      STEADY,PORO,Eqv_Ratio,SIGMA,CondGas,Nu,DIA,
&      GasDiff,hv,TherEff,CondSolid,DenSolid,Cpsolid
COMMON /CC/ MM
COMMON /DD/ EEMTM,EEMTP,EEMYM,INDTM,INDTP,INDYM
COMMON /EE/ ICOUNT,ICOUN1
COMMON /LL/ HH(300),HHP(300),HHM(300),DDHT(300),RRR(300)

```

!

```

TYPE (xycoord) xy
INTEGER(2) returnposition
INTEGER(2) I,J,K
INTEGER(4) retcolor
REAL DELTAXX ,SCALE_RRR ,SCALE_T

SCALE_T = 50.0
SCALE_RRR = 250.0/15000.0
DELTAXX = 300.0/M
I = 1 ; K = 1 ; J = 1

!-----
retcolor = SETCOLORRGB(#00FFFF)
DO WHILE (K .LE. M)
CALL MOVETO(INT2(25+(K-1)*deltaxx),INT2(500-scale_T*TP(1,K)),xy)
returnposition = LINETO(INT2(25+K*deltaxx),
&      INT2(500-scale_T*TP(1,K+1)))

```

```
K = K + 1
END DO

!-----

retcolor = SETCOLORRRGB(#00FF00)
DO WHILE (I .LE. M)
CALL MOVETO(INT2(25+(I-1)*deltaxx),INT2(500-scale_T*TM(1,I)),xy)
returnposition = LINETO(INT2(25+I*deltaxx),
&          INT2(500-scale_T*TM(1,I+1)))
CALL MOVETO(INT2(25+(I-1)*deltaxx),INT2(500-scale_T*YM(1,I)),xy)
returnposition = LINETO(INT2(25+I*deltaxx),
&          INT2(500-scale_T*YM(1,I+1)))
I = I+1
END DO

!-----

retcolor = SETCOLORRRGB(#FFFFFF)
DO WHILE (J .LE. M)
CALL MOVETO(INT2(25+(J-1)*deltaxx),INT2(500-scale_RRR*RRR(J)),xy)
returnposition = LINETO(INT2(25+J*deltaxx),
*          INT2(500-scale_RRR*RRR(J+1)))
J = J + 1
END DO
CALL FRAME_LEFT(0)
RETURN
END

!
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!

SUBROUTINE FRAME_RIGHT(unitwin)
USE MSFLIB
INTEGER(2) numfonts,fontset,x_shift,y_shift
INTEGER(2) return1,x1,y1,x2,y2
INTEGER(2) linestyle !,color !,x,y
INTEGER(4) retcolor,color,unitwin
INTEGER(1) A
```

```

TYPE (xycoord) xy
TYPE (fontinfo) font
TYPE (RCCOORD) ROW_COLUMN

!-----

CALL SETTEXTPOSITION (INT2(15),INT2(4+5+46),ROW_COLUMN)

WRITE (unitwin,*) ' * Output Graph Heat Flux * '

x_shift = 390
y_shift = 25
x1 = 25 + x_shift ; y1 = 250
x2 = 325 + x_shift; y2 = 500
linestyle = #F0F0
numfonts = INITIALIZEFONTS()
fontset = SETFONT('t"Arial"h16pi')
fontset = GETFONTINFO(font)
color = SETCOLORRGB(#000000) !Black
CALL MOVETO(35+30+x_shift+5,516-10,xy)
CALL OUTGTEXT('Dimensionless Ditrance 0.0 - 1.0')
fontset = SETFONT('t"Arial"h14pi')
CALL MOVETO(16-10+x_shift,480-30+40-20,xy)
CALL SETGTEXTROTATION(900)
CALL OUTGTEXT('Dimless H & HP & HM -200.0 - +200.0') !*****
CALL MOVETO(331+x_shift,470,xy)
CALL OUTGTEXT('Dimensionless DHT -150.0 - + 150.0') !*****

!-----Legent on frame-----!

retcolor = SETCOLORRGB(#0000FF)
fontset = SETFONT('t"Arial"h12pi')
CALL SETGTEXTROTATION(0)
CALL MOVETO(30+x_shift,260,xy)
CALL OUTGTEXT('HP ')
CALL MOVETO(30+20+x_shift,265,xy)
return1 = LINETO(INT2(30+35+x_shift),INT2(265))
CALL MOVETO(30+x_shift,290,xy)
CALL OUTGTEXT('HM ')
CALL MOVETO(30+20+x_shift,295,xy)

```

```

return1 = LINETO(INT2(30+35+x_shift),INT2(295))
retcolor = SETCOLORRRGB(#FF0000)
CALL MOVETO(30+x_shift,275,xy)
CALL OUTGTEXT('H ')
CALL MOVETO(30+20+x_shift,280,xy)
return1 = LINETO(INT2(30+35+x_shift),INT2(280))
retcolor = SETCOLORRRGB(#FF00FF)
CALL MOVETO(30+x_shift,305,xy)
CALL OUTGTEXT('DHT ')
CALL MOVETO(30+20+x_shift,310,xy)
return1 = LINETO(INT2(30+35+x_shift),INT2(310))
A = 0
retcolor = SETCOLORRRGB(#FFFFFF)
DO WHILE (A .LE. 5)
CALL MOVETO((x2-A),200,xy)
return1 = LINETO(INT2(x2-A),INT2(500))
A = A + 1
END DO

!-----!
retcolor = SETCOLORRRGB(#000000)
return1 = RECTANGLE($GBORDER,x1,y1,x2,y2) !$GBORDER $FILLINTERIOR
!-----Border around legend-----!
return1 = RECTANGLE($GBORDER,27+x_shift,257,70+x_shift,318)
!-----!
CALL SETLINESTYLE(linestyle)
retcolor = SETCOLORRRGB(#AEEAAA) !CONFIG LINE COLOR
!-----WRITE HORIZONTAL LINE-----!
CALL MOVETO(INT2(25+x_shift),INT2(450),xy)
! return1 = LINETO(INT2(425),INT2(450))
return1 = LINETO(INT2(325+x_shift),INT2(450))
CALL MOVETO(INT2(25+x_shift),INT2(450+y_shift),xy)
return1 = LINETO(INT2(325+x_shift),INT2(450+y_shift))
CALL MOVETO(INT2(25+x_shift),INT2(400),xy)
! return1 = LINETO(INT2(425),INT2(400))

```

```

return1 = LINETO(INT2(325+x_shift),INT2(400))
CALL MOVETO(INT2(25+x_shift),INT2(400+y_shift),xy)
!
return1 = LINETO(INT2(425),INT2(400))
return1 = LINETO(INT2(325+x_shift),INT2(400+y_shift))
CALL MOVETO(INT2(25+x_shift),INT2(350),xy)
!
return1 = LINETO(INT2(425),INT2(350))
return1 = LINETO(INT2(325+x_shift),INT2(350))
CALL SETLINESTYLE(#FFFF)
retcolor = SETCOLORRGB(#000000)      !CONFIG LINE COLOR
CALL MOVETO(INT2(25+x_shift),INT2(350+y_shift),xy)
!
return1 = LINETO(INT2(425),INT2(350))
return1 = LINETO(INT2(325+x_shift),INT2(350+y_shift))
CALL SETLINESTYLE(linestyle)
retcolor = SETCOLORRGB(#AEEAAA)      !CONFIG LINE COLOR
CALL MOVETO(INT2(70+x_shift),INT2(300),xy)
!
return1 = LINETO(INT2(425),INT2(300))
return1 = LINETO(INT2(325+x_shift),INT2(300))
CALL MOVETO(INT2(70+x_shift),INT2(300-y_shift),xy)
!
return1 = LINETO(INT2(425),INT2(300))
return1 = LINETO(INT2(325+x_shift),INT2(300-y_shift))
CALL MOVETO(INT2(25+x_shift),INT2(300+y_shift),xy)
!
return1 = LINETO(INT2(425),INT2(300))
return1 = LINETO(INT2(325+x_shift),INT2(300+y_shift))
!-----WRITE VERTICAL LINE-----!
CALL MOVETO(INT2(25+40-10+x_shift),INT2(500),xy)
return1 = LINETO(INT2(25+40-10+x_shift),INT2(318))
CALL MOVETO(INT2(25+40-10+x_shift),INT2(250),xy)
return1 = LINETO(INT2(25+40-10+x_shift),INT2(257))
CALL MOVETO(INT2(25+80-20+x_shift),INT2(500),xy)
return1 = LINETO(INT2(25+80-20+x_shift),INT2(250))
CALL MOVETO(INT2(25+120-30+x_shift),INT2(500),xy)
return1 = LINETO(INT2(25+120-30+x_shift),INT2(250))
CALL MOVETO(INT2(25+160-40+x_shift),INT2(500),xy)
return1 = LINETO(INT2(25+160-40+x_shift),INT2(250))

```

```
CALL MOVETO(INT2(25+200-50+x_shift),INT2(500),xy)
return1 = LINETO(INT2(25+200-50+x_shift),INT2(250))
CALL MOVETO(INT2(25+240-60+x_shift),INT2(500),xy)
return1 = LINETO(INT2(25+240-60+x_shift),INT2(250))
CALL MOVETO(INT2(25+280-70+x_shift),INT2(500),xy)
return1 = LINETO(INT2(25+280-70+x_shift),INT2(250))
CALL MOVETO(INT2(25+320-80+x_shift),INT2(500),xy)
return1 = LINETO(INT2(25+320-80+x_shift),INT2(250))
CALL MOVETO(INT2(25+360-90+x_shift),INT2(500),xy)
return1 = LINETO(INT2(25+360-90+x_shift),INT2(250))
RETURN
END
```

!

!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

!

```
SUBROUTINE PLOTGRAPH_RIGHT
USE MSFLIB
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
COMMON /ALL/ H(300),DHT(300),TM(3,300),TP(3,300),X(300),
&      SS(300),SPT(300),SA(300),E2(300,300),E31(300),
&      E3E(300),HP(300),HM(300),YM(3,300),RR(300)
COMMON /AA/ DX1,NE,AB,DFTL,EA,H0,RS,DX
COMMON /BB/ XE,M,TFL,FMP,RE,PR,GAM,FNR,FJO,FJE,WEIGHT,
&      DS,CD,A,IEND,EPS,NMAX,DT,E,Rg>To,HEATV,CPgas,
&      DenGas,VisGas,FLE,FMASS,FR,
&      STEADY,PORO,Eqv_Ratio,SIGMA,CondGas,Nu,DIA,
&      GasDiff,hv,TherEff,CondSolid,DenSolid,Cpsolid
COMMON /CC/ MM
COMMON /DD/ EEMTM,EEMTP,EEMYM,INDTM,INDTP,INDYM
COMMON /EE/ ICOUNT,ICOUNI
TYPE (xycoord) xy
INTEGER(2) returnposition
INTEGER(2) I,K,Xshift
INTEGER(4) retcolor
```

```

REAL DELTAX ,SCALE ,SCALE_DHT,MAX_DHT,SCALE_Y_RIGHT
MAX_DHT=150.0
SCALE_Y_RIGHT=200.0
SCALE_DHT = 125.0/MAX_DHT
SCALE = 125.0/SCALE_Y_RIGHT
Xshift = 390
DELTAX = 300.0/M
I = 1 ; K = 1

!-----

retcolor = SETCOLORRGB(#FF0000)
DO WHILE (K .LE. M)
CALL MOVETO(INT2(25+xshift+(K-1)*deltax),INT2(375-scale*H(K)),xy)
returnposition = LINETO(INT2(25+xshift+K*deltax),
&      INT2(375-scale*H(K+1)))
K = K+1
END DO

!-----

retcolor = SETCOLORRGB(#0000FF)
DO WHILE (I .LE. M)
CALL MOVETO(INT2(25+xshift+(I-1)*deltax),
&      INT2(375-scale*HP(I)),xy)
returnposition = LINETO(INT2(25+xshift+I*deltax),
&      INT2(375-scale*HP(I+1)))
CALL MOVETO(INT2(25+xshift+(I-1)*deltax),
&      INT2(375-scale*HM(I)),xy)
returnposition = LINETO(INT2(25+xshift+I*deltax),
&      INT2(375-scale*HM(I+1)))
I = I+1
END DO

!-----

K = 1
retcolor = SETCOLORRGB(#FF00FF)
DO WHILE (K .LE. M)
CALL MOVETO(INT2(25+xshift+(K-1)*deltax),

```

```
&      INT2(375-scale_dht*DHT(K)),xy)
returnposition = LINETO(INT2(25+xshift+K*deltax),
&      INT2(375-scale_dht*DHT(K+1)))
K = K+1
END DO
RETURN
END

!
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!
```

```
SUBROUTINE PLOTPREVIOUSGRAPH_RIGHT
USE MSFLIB
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
COMMON /ALL/ H(300),DHT(300),TM(3,300),TP(3,300),X(300),
&      SS(300),SPT(300),SA(300),E2(300,300),E31(300),
&      E3E(300),HP(300),HM(300),YM(3,300),RR(300)
COMMON /AA/ DX1,NE,AB,DFTL,EA,HO,RS,DX
COMMON /BB/ XE,M,TFL,FMP,RE,PR,GAM,FNR,FJO,FJE,WEIGHT,
&      DS,CD,A,IEND,EPS,NMAX,DT,E,Rg,To,HEATV,CPgas,
&      DenGas,VisGas,FLE,FMASS,FR,
&      STEADY,PORO,Eqv_Ratio,SIGMA,CondGas,Nu,DIA,
&      GasDiff,hv,TherEff,CondSolid,DenSolid,Cpsolid
COMMON /CC/ MM
COMMON /DD/ EEMTM,EEMTP,EEMYM,INDTM,INDTP,INDYM
COMMON /EE/ ICOUNT,ICOUN1
COMMON /LL/ HH(300),HHP(300),HHM(300),DDHT(300),RRR(300)
TYPE (xycoord) xy
INTEGER(2) returnposition
INTEGER(2) I,K,Xshf
INTEGER(4) retcolor
REAL DELTAXX,SCALE,SCALE_DHT,MAX_DHT,SCALE_Y_RIGHT
MAX_DHT=150.0
SCALE_Y_RIGHT=200.0
SCALE DHT= 125.0/MAX DHT
```

```

SCALE = 125.0/SCALE_Y_RIGHT
Xshf = 390
DELTAXX = 300.0/M
I = 1 ; K = 1
!-----
    retcolor = SETCOLORRRGB(#0FF000)
    DO WHILE (K .LE. M)
        CALL MOVETO(INT2(25+xshf+(K-1)*deltaxx),INT2(375-scale*HH(K)),xy)
        returnposition = LINETO(INT2(25+xshf+K*deltaxx),
&          INT2(375-scale*HH(K+1)))
        CALL MOVETO(INT2(25+xshf+(K-1)*deltaxx),
&          INT2(375-scale_dht*DDHT(K)),xy)
        returnposition = LINETO(INT2(25+xshf+K*deltaxx),
&          INT2(375-scale_dht*DDHT(K+1)))
        K = K + 1
    END DO
!-----
    retcolor = SETCOLORRRGB(#0FF000)
    DO WHILE (I .LE. M)
        CALL MOVETO(INT2(25+xshf+(I-1)*deltaxx),INT2(375-scale*HHM(I)),xy)
        returnposition = LINETO(INT2(25+xshf+I*deltaxx),
&          INT2(375-scale*HHM(I+1)))
        CALL MOVETO(INT2(25+xshf+(I-1)*deltaxx),INT2(375-scale*HHP(I)),xy)
        returnposition = LINETO(INT2(25+xshf+I*deltaxx),
&          INT2(375-scale*HHP(I+1)))
        I = I+1
    END DO
!-----
    CALL SETLINESTYLE(#FFFF)
    retcolor = SETCOLORRRGB(#FFFFFF)
    I = 1
    DO WHILE (I .LE. 4)
        CALL MOVETO(INT2(25+270+xshf+30-I),INT2(499),xy)
        return1 = LINETO(INT2(25+270+xshf+30-I),INT2(251))

```

```
I = I + 1  
END DO  
  
retcolor = SETCOLORRGB(#000000)  
  
CALL MOVETO(INT2(25+360-90+xshf+30),INT2(500),xy)  
  
returnl = LINETO(INT2(25+360-90+xshf+30),  
&          INT2(250))  
  
CALL FRAME_RIGHT(0)  
  
RETURN  
  
END
```

!

!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

!

```
SUBROUTINE PRINT2  
  
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)  
  
COMMON /ALL/ H(300),DHT(300),TM(3,300),TP(3,300),X(300),  
&    SS(300),SPT(300),SA(300),E2(300,300),E31(300),  
&    E3E(300),HP(300),HM(300),YM(3,300),RR(300)  
  
COMMON /AA/ DX1,NE,AB,DFTL,EA,HO,RS,DX  
  
COMMON /BB/ XE,M,TFL,FMP,RE,PR,GAM,FNR,FJO,FJE,WEIGHT,  
&    DS,CD,A,IEND,EPS,NMAX,DT,E,Rg,To,HEATV,CPgas,  
&    DenGas,VisGas,FLE,FMASS,FR,  
&    STEADY,PORO,Eqv_Ratio,SIGMA,CondGas,Nu,DIA,  
&    GasDiff,hv,TherEff,CondSolid,DenSolid,Cpsolid  
  
COMMON /DD/ EEMTM,EEMTP,EEMYM,INDTM,INDTP,INDYM  
  
COMMON /EE/ ICOUNT,ICOUNI  
  
COMMON /VVV/ VELO,TG  
  
COMMON /JJJ/ SPOINT,TEMPG  
  
COMMON /GL/ GL_ENG  
  
OPEN (UNIT=7,ACCESS='APPEND',FILE='OUTPUT-TM-TP-DHT.TXT')  
OPEN (UNIT=10,ACCESS='APPEND',FILE='OUTPUT-H-HP-HM.TXT')  
OPEN (UNIT=13,ACCESS='APPEND',FILE='OUTPUT-YM-RR.TXT')  
OPEN (UNIT=61,ACCESS='APPEND',FILE='OUTPUT-PARAMETERS.TXT')  
  
WRITE(61,9)
```

9 FORMAT(/6X,'INPUT PARAMETER'./)

```

WRITE(61,10) TFL,FMP,RE,VELO,PR,GAM,FNR,FJO,FJE,XE,
&    M,WEIGHT,DS,CD,EPS,GL_ENG
10  FORMAT(10X,'OPTICAL THICKNESS  = ',F15.7,
&    /10X,'MP          = ',F15.7,
&    /10X,'RENOLD NUMBER   = ',F15.7,
&    /10X,'VELOCITY (m/s)  = ',F15.7,
&    /10X,'PRANDTLE NUMBER = ',F15.7,
&    /10X,'GAMMA          = ',F15.7,
&    /10X,'NR             = ',F15.7,
&    /10X,'JO             = ',F15.7,
&    /10X,'JE             = ',F15.7,
&    /10X,'LENGHT OF POROUS = ',F15.3,
&    /10X,'NUMBER OF MESH  = ',I8,
&    /10X,'RELAXATION FACTOR = ',F15.7,
&    /10X,'TIME(DIMENSIONLESS) = ',F15.7,
&    /10X,'CD             = ',F15.7,
&    /10X,'EPSILON        = ',F15.7,
CLOSE(61)
&    /10X,'GLOBAL_ENERGYBALANCE= ',F15.7,'%')
WRITE(7,510)
WRITE(10,510)
WRITE(13,510)
510  FORMAT(' ')
WRITE(7,100) ICOUNT*DT
WRITE(10,100) ICOUNT*DT
WRITE(13,100) ICOUNT*DT
WRITE(7,90) EEMTM,EEMTP,EEMYM,INDTM,INDTP,INDYM,ICOUN1
WRITE(7,80)
WRITE(10,13)
WRITE(13,14)
DO 17 I=1,NE
WRITE(7,40) X(I),TM(3,I),TP(3,I),DHT(I)
WRITE(10,40) X(I),H(I),HP(I),HM(I)
WRITE(13,41) X(I),YM(3,I),RR(I)

```

```

17    CONTINUE
      !M$NOFREEFORM
90    FORMAT(6X,'TM CONVERSE VALUE  =',F15.10,
      &      /6X,'TP CONVERSE VALUE  =',F15.10,
      &      /6X,'YM CONVERSE VALUE  =',F15.10,
      &      /6X,'NODE CONVERSE OF TM =',I7,
      &      /6X,'NODE CONVERSE OF TP =',I7,
      &      /6X,'NODE CONVERSE OF YM =',I7,
      &      /6X,'LOOP CONVERSE    =',I7)
100   FORMAT(/6X,'AT TIME =',F10.2,' SEC.')
40    FORMAT(5X,F5.3,3X,F20.10,3X,F20.10,3X,F20.10)
41    FORMAT(5X,F5.3,3X,F20.10,3X,F20.10)
80    FORMAT(/8X,'X',20X,'TM',20X,'TP',20X,'DHT')
13    FORMAT(/8X,'X',20X,'H',20X,'HP',20X,'HM')
14    FORMAT(/8X,'X',20X,'YM',20X,'RR')

      CLOSE(7)

      CLOSE(10)

      CLOSE(13)

77    RETURN

      END

!
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!
      SUBROUTINE PRINT4
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      COMMON /ALL/ H(300),DHT(300),TM(3,300),TP(3,300),X(300),
      &      SS(300),SPT(300),SA(300),E2(300,300),E31(300),
      &      E3E(300),HP(300),HM(300),YM(3,300),RR(300)
      COMMON /AA/ DX1,NE,AB,DTFL,EA,HO,RS,DX
      COMMON /BB/ XE,M,TFL,FMP,RE,PR,GAM,FNR,FJO,FJE,WEIGHT,
      &      DS,CD,A,IEND,EPS,NMAX,DT,E,Rg,To,HEATV,CPgas,
      &      DenGas,VisGas,FLE,FMASS,FR,
      &      STEADY,PORO,Eqv_Ratio,SIGMA,CondGas,Nu,DIA,
      &      GasDiff,hv,TherEff,CondSolid,DenSolid,Cpsolid

```

```

COMMON /CC/ MM
COMMON /DD/ EEMTM,EEMTP,EEMYM,INDTM,INDTP,INDYM
COMMON /EE/ ICOUNT,ICOUN1
COMMON /LL/ HH(300),HHP(300),HHM(300),DDHT(300),RRR(300)
COMMON /JJJ/ SPOINT,TEMPG
COMMON /VVV/ VELO,TG
COMMON /MBL/ ENGT1(300),ENGT2(300),ENGT3(300),ENGT4(300),
&      ENGT5(300),TOTAL_TM(300)
COMMON /PBL/ ENGT1(300),ENGT2(300),ENGT3(300),ENGT4(300),
&      TOTAL_TP(300)
COMMON /VLE/ ERR_BAL_MAX1,ERR_BAL_MAX2,MAX_I,MAX_J
COMMON /GL/ GL_ENG
OPEN (UNIT=70,ACCESS='APPEND',FILE='OUTPUT-TEMPERATURE.TXT')
OPEN (UNIT=80,ACCESS='APPEND',FILE='OUTPUT-ENERGYBALANCE.TXT')
WRITE(70,5)ERR_BAL_MAX1,MAX_I,ERR_BAL_MAX2,MAX_J,GL_ENG
5  FORMAT(2X,'MAX_ERROR_GAS_PHASE =',F15.10,2X,'NODE',I4,
&      /2X,'MAX_ERROR_SOLID_PHASE=',F15.10,2X,'NODE',I4,
&      /2X,'GLOBAL_ENERGYBALANCE =',F15.10)
DO 1 I = 1,NE
DUM_I = (I-1.0)
DUM_NE      = (NE-1.0)
DUM_XX      = DUM_I/DUM_NE
X(I)      = DUM_XX
1  CONTINUE
WRITE(70,10)EEMTM,EEMTP,EEMYM
10  FORMAT(F6.4,2X,F6.4,2X,F6.4)
WRITE(70,*)"X-DOMAIN  GAS_TEMP  SOLID_TEMP"
DO 300 I=1,NE
WRITE(70,310)X(I),TM(3,I),TP(3,I)
310  FORMAT(2X,F6.4,7X,F6.4,8X,F6.4)
300  CONTINUE
WRITE(80,*)"X-DOMAIN  Gas_HS  Gas_CV  Gas_CD  Gas_RR
&      Gas_HTPH  TOTAL_TM  Sol_HS  Sol_CD  Sol_RDH  Sol
&      _HTPH  TOTAL_TP"

```

```
DO 400 I=1,N
WRITE(80,410)X(I),ENGTMI(I),ENGTM2(I),ENGTM3(I),ENGTM4(I),
&      ENGMT5(I),TOTAL_TM(I),ENGTP1(I),ENGTP2(I),ENGTP3(I),
&      ENGTP4(I),TOTAL_TP(I)
410   FORMAT(F6.4,3X,F15.10,3X,F15.10,3X,F15.10,3X,F15.10,3X,F15.10,
&      3X,F15.10,3X,F15.10,3X,F15.10,3X,F15.10,3X,F15.10)
400   CONTINUE
      RETURN
      END

!
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!

SUBROUTINE PRINT6
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
COMMON /JJJ/ SPOINT,TEMPG
COMMON /JET/ TempIN(400,100),TempAVG(400),IFLess(400),
&      HEATV_Jet,HEATV_JetOld,JETSTEP,FJETCHECK,
&      TempOUT(400,100),InSECP(400),TJetPP,
&      EmissGas(400),AbsorbGas(400),IFlame(400),
&      TJet,FNU_JJ,VPACT,FMW_O2N2,FMW_JJ,CP_JJ,PMFE,PMFB,
&      PMFN,PMFD,PMFC,DEQD,DFL,TCMAX,FFRACT,FLAMERAD,
&      UJET,REJET,IFL,FLENGTH,TINL,ReTJet(400,100),EQDAI,
&      YPn(400,100),YPo(400,100),YFF(400,100),YOO(400,100),
&      ReYP(400,100),COAbsorbGas(400)
COMMON /MASS/Cofa,Cofb,Cofc,Cofd,Cofe,Coff,Cofn
COMMON /GOL/Eng1,Eng2,Eng3,Eng4,Eng5

!-----

OPEN (UNIT=1001,ACCESS='APPEND',FILE='OUTPUT-MASSF_RACTION.TXT')
Write(1001,1)Cofa,Cofb,Cofc,Cofd,Cofe,Coff,Cofn
1   Format('Oxidizer =',1PE14.6/, 'CO2 =',1PE14.6/, 'CO =',1PE14.6/,
&      'H2O =',1PE14.6/, 'H2 =',1PE14.6/, 'ExcessAir =',1PE14.6/,
&      'N2 =',1PE14.6)
Write(1001,*)('-----Mass Fraction-----')
CLOSE(1001)
```

```

OPEN (UNIT=90,ACCESS='APPEND',FILE='OUTPUT-PARA_VALUES.TXT')
Write(90,4)FLength,IFL,REjet,UJet,FlameRad,HEATV_Jet,Ffract,
&      Vpact,TCmax,TEMPG,TJet,Ffract,DFL,DEqD,FNU_JJ,TJetPP
4  Format('FLength=',F8.4/, 'IFL=',I4/, 'REjet=',F15.2/,
&      'UJet=',F8.2/, 'FlameRad',F15.2/, 'Jet Heating=',F15.3/,
&      'MWf/MWair=',F8.3/, 'Inter-Velo=',F8.4/, 'TCmax=',F8.2/,
&      'TEMPG=',F8.2/, 'TJet=',F8.2/, 'Ffract=',F8.2/, 'DFL=',F8.2/,
&      'DEqD=',F8.2/, 'FNU_JJ=',1PE14.3/, 'TJetPP=',1PE14.3)
CLOSE(90)

OPEN (UNIT=100,ACCESS='APPEND',FILE='OUTPUT-JET_TEMPERATURE.TXT')
DO 1000 I=1,400
Write(100,2000)(ReTJet(I,J),J=1,INT(EqDai/DEqD)+4)
2000  FORMAT(18F7.1)
1000  CONTINUE
CLOSE(100)

OPEN (UNIT=101,ACCESS='APPEND',FILE='OUTPUT-JET_PRODUCTS.TXT')
DO 1001 I=1,400
Write(101,2001)(ReYP(I,J),J=1,INT(EqDai/DEqD)+4)
2001  FORMAT(18F8.4)
1001  CONTINUE
CLOSE(101)

!

OPEN (UNIT=102,ACCESS='APPEND',FILE='OUTPUT-JET_FUEL.TXT')
DO 1002 I=1,400
Write(102,2002)(YFF(I,J),J=1,INT(EqDai/DEqD)+4)
2002  FORMAT(18F8.4)
1002  CONTINUE
CLOSE(102)

OPEN (UNIT=103,ACCESS='APPEND',FILE='OUTPUT-JET_OXYGEN.TXT')
DO 1003 I=1,400
Write(103,2003)(YOO(I,J),J=1,INT(EqDai/DEqD)+4)
2003  FORMAT(18F8.4)
1003  CONTINUE
CLOSE(103)

```

```

OPEN (UNIT=104,ACCESS='APPEND',FILE='OUTPUT-GLOBAL ENERGY.TXT')
WRITE(104,*)"Gas_Conv   Gas_Cond   Reaction   Solid_Cond
&       Radiation"
WRITE(104,2004)Eng1,Eng2,Eng3,Eng4,Eng5
2004   FORMAT(F8.3,5X,F8.3,5X,F8.3,5X,F10.3,5X,F9.3)
CLOSE(104)
RETURN
END

!
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!

SUBROUTINE LOCAL_ENERGYBALANCE
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
COMMON /ALL/ H(300),DHT(300),TM(3,300),TP(3,300),X(300),
&      SS(300),SPT(300),SA(300),E2(300,300),E31(300),
&      E3E(300),HP(300),HM(300),YM(3,300),RR(300)
COMMON /AA/ DX1,NE,AB,DTFL,EA,HO,RS,DX
COMMON /BB/ XE,M,TFL,FMP,RE,PR,GAM,FNR,FJO,FJE,WEIGHT,
&      DS,CD,A,IEND,EPS,NMAX,DT,E,Rg,To,HEATV,CPgas,
&      DenGas,VisGas,FLE,FMASS,FR,
&      STEADY,PORO,Eqv_Ratio,SIGMA,CondGas,Nu,DIA,
&      GasDiff,hv,TherEff,CondSolid,DenSolid,Cpsolid
COMMON /CC/ MM
COMMON /DD/ EEMTM,EEMTP,EEMYM,INDTM,INDTP,INDYM
COMMON /EE/ ICOUNT,ICOUN1
COMMON /LL/ HH(300),HHP(300),HHM(300),DDHT(300),RRR(300)
COMMON /JJJ/ SPOINT,TEMPG
COMMON /VVV/ VELO,TG
COMMON /MBL/ ENGTm1(300),ENGTm2(300),ENGTm3(300),ENGTm4(300),
&      ENGTm5(300),TOTAL_TM(300)
COMMON /PBL/ ENGTP1(300),ENGTP2(300),ENGTP3(300),ENGTP4(300),
&      TOTAL_TP(300)
COMMON /VLE/ ERR_BAL_MAX1,ERR_BAL_MAX2,MAX_I,MAX_J
REAL(8) ERR_BAL_MAX1,ERR_BAL_MAX2,ERR1,ERR2,DIVIDED

```

```

ERR1 = 0.0
ERR2 = 0.0
ERR_BAL_MAX1 = 0.0
ERR_BAL_MAX2 = 0.0
MAX_J = 1
MAX_I = 1
DO 10 I=2,NE-1
  ENGMTM1(I)=-PORO*(TM(3,I)-TM(1,I))/DS      !HS (Heat Storage)
  ENGMTM2(I)=-PORO*(TM(3,I)-TM(3,I-1))/DX    !CV (Convective energy(Enthalpy))
  ENGMTM3(I)=PORO*(TM(3,I+1)-2*TM(3,I)+TM(3,I-1))/(RE*PR*DX*DX)
                                              !CD (Gas phase heat conduction)
  ENGMTM4(I)=PORO*HO*RR(I)/(RE*PR)          !RR (Combustion heat release rate)
  ENGMTM5(I)=-FMP*(TM(3,I)-TP(3,I))/(RE*PR)  !SD (Heat transfer between two phase)
  TOTAL_TM(I)=ENGMTM1(I)+ENGMTM2(I)+ENGMTM3(I)+ENGMTM4(I)+ENGMTM5(I)
  ENGTP1(I)=-((1-PORO)*GAM*(TP(3,I)-TP(1,I))/DS  !HS (Heat Storage)
  ENGTP2(I)=CD*(TP(3,I+1)-2*TP(3,I)+TP(3,I-1))/(RE*PR*DX*DX) !CDs(Solid phase heat conduction)
  ENGTP3(I)=-TFL*TFL*DHT(I)/(RE*PR*FNR)      !RH (Radiation)
  ENGTP4(I)=FMP*(TM(3,I)-TP(3,I))/(RE*PR)     !SD (Heat transfer between two phase)
  TOTAL_TP(I)=ENGTP1(I)+ENGTP2(I)+ENGTP3(I)+ENGTP4(I)
10  CONTINUE
  I=1
  ENGMTM1(I) = (2.*ENGMTM1(2))-ENGMTM1(3)    !HS (Heat Storage)
  ENGMTM2(I) = (2.*ENGMTM2(2))-ENGMTM2(3)    !CV (Convective energy(Enthalpy))
  ENGMTM3(I) =(2.*ENGMTM3(2))-ENGMTM3(3)     !CD (Gas phase heat conduction)
  ENGMTM4(I) = (2.*ENGMTM4(2))-ENGMTM4(3)     !RR (Combustion heat release rate)
  ENGMTM5(I) =(2.*ENGMTM5(2))-ENGMTM5(3)     !SD (Heat transfer between two phase)
  TOTAL_TM(I) =ENGMTM1(I)+ENGMTM2(I)+ENGMTM3(I)+ENGMTM4(I)+ENGMTM5(I)
  ENGTP1(I) = (2.*ENGTP1(2))-ENGTP1(3)       !HS (Heat Storage)
  ENGTP2(I) = (2.*ENGTP2(2))-ENGTP2(3)       !CDs(Solid phase heat conduction)
  ENGTP3(I) = (2.*ENGTP3(2))-ENGTP3(3)       !RH (Radiation)
  ENGTP4(I) = (2.*ENGTP4(2))-ENGTP4(3)       !SD (Heat transfer between two phase)
  TOTAL_TP(I) =ENGTP1(I)+ENGTP2(I)+ENGTP3(I)+ENGTP4(I)
  I=NE
  ENGMTM1(I) = (2.*ENGMTM1(NE-1))-ENGMTM1(NE-2)

```

```

ENGTM2(I) = (2.*ENGTM2(NE-1))-ENGTM2(NE-2)
ENGTM3(I) = (2.*ENGTM3(NE-1))-ENGTM3(NE-2)
ENGTM4(I) = (2.*ENGTM4(NE-1))-ENGTM4(NE-2)
ENGTM5(I) =(2.*ENGTM5(NE-1))-ENGTM5(NE-2)
TOTAL_TM(I) =ENGTM1(I)+ENGTM2(I)+ENGTM3(I)+ENGTM4(I)+ENGTM5(I)
ENGTP1(I) = (2.*ENGTP1(NE-1))-ENGTP1(NE-2)
ENGTP2(I) = (2.*ENGTP2(NE-1))-ENGTP2(NE-2)
ENGTP3(I) = (2.*ENGTP3(NE-1))-ENGTP3(NE-2)
ENGTP4(I) = (2.*ENGTP4(NE-1))-ENGTP4(NE-2)
TOTAL_TP(I) =ENGTP1(I)+ENGTP2(I)+ENGTP3(I)+ENGTP4(I)
DO 20 I=1,NE
ERR1 = TOTAL_TM(I)
DIVIDED = ENGTM3(I)+ENGTM4(I)          !convection+interaction
IF ( DIVIDED .NE. 0.0) THEN
ERR1 = ABS(ERR1/DIVIDED)
END IF
IF (ERR1 .GT. ERR_BAL_MAX1) THEN
ERR_BAL_MAX1 = ABS(ERR1)
MAX_I = I
END IF
ERR2 = TOTAL_TP(I)
DIVIDED = ENGTP3(I)                    !radiation
!*****!
IF (DIVIDED .NE. 0.0) THEN              !Find the maximum error for gas and solid phase !
ERR2 = ABS(ERR2/DIVIDED)              !Using abbreviation (ERR_BAL_MAX1&ERR_BAL_MAX2) !
END IF                                !together with Number of nodes(MAX_I&MAX_J)      !
IF (ERR2 .GT. ERR_BAL_MAX2) THEN
!*****!
ERR_BAL_MAX2 = ABS(ERR2)
MAX_J = I
END IF
20 CONTINUE
RETURN
END

```

```

!XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
!
SUBROUTINE GLOBAL_ENERGYBALANCE
USE MSFLIB
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
COMMON /ALL/ H(300),DHT(300),TM(3,300),TP(3,300),X(300),
&      SS(300),SPT(300),SA(300),E2(300,300),E31(300),
&      E3E(300),HP(300),HM(300),YM(3,300),RR(300)
COMMON /AA/ DX1,NE,AB,DTFL,EA,HO,RS,DX
COMMON /BB/ XE,M,TFL,FMP,RE,PR,GAM,FNR,FJO,FJE,WEIGHT,
&      DS,CD,A,IEND,EPS,NMAX,DT,E,Rg,To,HEATV,CPgas,
&      DenGas,VisGas,FLE,FMASS,FR,
&      STEADY,PORO,Eqv_Ratio,SIGMA,CondGas,Nu,DIA,
&      GasDiff,hv,TherEff,CondSolid,DenSolid,Cpsolid
COMMON /CC/ MM
COMMON /DD/ EEMTM,EEMTP,EEMYM,INDTM,INDTP,INDYM
COMMON /EE/ ICOUNT,ICOUN1
COMMON /LL/ HH(300),HHP(300),HHM(300),DDHT(300),RRR(300)
COMMON /JJJ/ SPOINT,TEMPG
COMMON /VVV/ VELO,TG
COMMON /MBL/ ENGMT1(300),ENGMT2(300),ENGMT3(300),ENGMT4(300),
&      ENGMT5(300),TOTAL_TM(300)
COMMON /PBL/ ENGTP1(300),ENGTP2(300),ENGTP3(300),ENGTP4(300),
&      TOTAL_TP(300)
COMMON /VLE/ ERR_BAL_MAX1,ERR_BAL_MAX2,MAX_I,MAX_J
!
COMMON /GL/ GL_ENG
COMMON /GOL/Eng1,Eng2,Eng3,Eng4,Eng5
!
GL_ENG = 0.0                                !Just declare variable
Eng1 =PORO*(-TM(3,NE)+TM(3,1))              !Eng1 = CV
Eng2 =PORO/(RE*PR*DX)*(-TM(3,2)+TM(3,1)-TM(3,NE-1)+TM(3,NE))!Eng2 = CDg
!

```

[illegible]

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายเอนก บุญกว้าง
วัน เดือน ปีเกิด	23 กันยายน 2530
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	โรงเรียนบ้านขามพิทยาคม พ.ศ. 2546
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	สาขาวิชาเครื่องกล สาขางานยานยนต์ วิทยาลัยเทคนิคหนองบัวลำภู พ.ศ. 2549
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน พ.ศ. 2553
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2556
ทุนการศึกษา หรือทุนวิจัย	ทุนอุดหนุนสนับสนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ทบวงมหาวิทยาลัย ปีงบประมาณ 2554
ผลงานเผยแพร่	Bunkwang, A., Kaewpradap, A., Jirakulsomchok, K. and Jugjai S.,2014, “Numerical Simulation of a Self-aspirating Porous Medium Burner”, The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering , 17-19 December, Chiang Mai, Thailand.