

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเกิดออกไซด์ของกำมะถัน  
จากการเผาไหม้ของถ่านหินผง

MATHEMATICAL MODEL OF SULFUR OXIDE FORMATION  
IN PULVERIZED COAL COMBUSTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-681-9

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเกิดออกไซด์ของกำมะถัน  
จากการเผาไหม้ของถ่านหินผง

MATHEMATICAL MODEL OF SULFUR OXIDE FORMATION  
IN PULVERIZED COAL COMBUSTION



ปัญญา แดงวิไลลักษณ์

PANYA DAUNGVILUILUX

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2543

เลขหนังสือพิมพ์... ให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขทะเบียน... 35369

ISBN 974-622-681-9

วัน, เดือน, ปี 24 เม.ย. 2543

**MATHEMATICAL MODEL OF SULFUR OXIDE FORMATION  
IN PULVERIZED COAL COMBUSTION**



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องยกย่องถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
2000  
ISBN 974-622-681-9



**COPYRIGHT 2000**

**SCHOOL OF GRADUTE STUDIES** เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG** ไม่มีการนำไปใช้



หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเกิดออกไซด์ของกำมะถันจากการเผาไหม้ของถ่านหินผง
นักศึกษา	นาย ปัญญา แดงวิไลลักษณ์
รหัสประจำตัว	40062006
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2543
อาจารย์ผู้คุมวิทยานิพนธ์	ดร. จารุวัตร เจริญสุข

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เสนอการศึกษาเรื่องการก่อตัวและการกระจายตัวของออกไซด์ของกำมะถัน ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินผง และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้วิธี Finite volume โดยพิจารณาของไหลให้เป็นปริมาตรเล็ก ๆ และผสมผสานกับแบบจำลองการสันดาปของถ่านหินผงที่ได้พัฒนาแล้ว (FAFNIR) ของ Imperial College of Science, Technology and Medicine (ICSTM) ซึ่งพิจารณาสมการการถ่ายเทเอนทัลปี มวล โมเมนตัม และการเผาไหม้ของถ่านหินผง ลักษณะของห้องเผาไหม้เป็นทรงกระบอกแนวตั้งและเปลวไฟมีคลงด้านล่าง มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.6 เมตร และความยาวรวม 3.0 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเผา (d) 0.056 เมตร วัตถุประสงค์ของการศึกษาคือเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาการลดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายในห้องเผาไหม้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้สมมติฐานที่ว่ากำมะถันที่ปล่อยออกมาจากถ่านหินในช่วง Devolatilization จำกัดเฉพาะ Organic sulfur ได้รวมตัวกับออกซิเจน ก่อให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั้งหมด ปฏิกริยาดังกล่าวเป็นแบบ Fast kinetic reaction ดังนั้นการสันดาปจึงถูกควบคุมโดยการผสมแบบปั่นป่วน ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีปริมาณสะสมที่สูงในช่วง 0.03 – 0.15 เมตร จากทางออกของหัวเผา ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลทางทฤษฎีกับผลที่คำนวณรวมทั้งหมดของกำมะถันภายในแบบจำลองมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 5.35% และพิจารณาความแตกต่างของมวลกำมะถันที่เกิดขึ้นในแต่ละหน้าตัดของห้องเผาไหม้ โดยค่าที่คำนวณได้มีความผิดพลาดสูงสุดประมาณ 5% จากผลการจำลองทำให้ทราบว่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีความเข้มข้นสูงในบริเวณใกล้หัวเผา ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงเช่นกัน บริเวณดังกล่าวถูกห่อหุ้มด้วยกระแสอากาศที่ปล่อยออกจากหัวเผา มีความเข้มข้นของออกซิเจนสูงและอุณหภูมิต่ำ ข้อมูลดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ในการศึกษาเพื่อลดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในห้องเผาไหม้ของถ่านหินผงต่อไป

<b>Thesis Title</b>	Mathematical Model of Sulfur Oxide Formation in Pulverized Coal Combustion
<b>Student</b>	Mr. Panya Daungviluilux
<b>Student ID.</b>	40062006
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2000
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Jarruwat Charoensuk

### ABSTRACT

This thesis presents a study on the formation and distribution of sulfur oxide in a pulverized coal combustor. Mathematical model is formulated and the numerical finite volume method is employed. The model is incorporated with the existing model involving enthalpy, mass and momentum transfer equations and the combustion of pulverized coal developed previously at Imperial College of Science, Technology and Medicine (ICSTM). The combustion chamber is vertically down-fire type cylindrical shape with 0.6 m. in inside diameter, 3.0 m. in length and equipped with the burner diameter of 0.056 m. This simulation assumes that the organic sulfur released from coal during the devolatilization process is completely oxidized to sulfur dioxide. Fast kinetic is assumed for the reaction rate of sulfur, thus the oxidation is controlled by turbulent mixing. The results show that high concentration of sulfur dioxide is within 0.03 – 0.15 m. from the burner exit. An overall error of total mass of sulfur dioxide from the simulation is 5.35% normalized with the total sulfur throughput of the furnace. From the simulation results it is shown that high sulfur concentration is found in the high temperature region near the burner. This region was surrounded with low temperature oxygen-rich gas from the secondary jet. This study is an informative data for further study about the reduction of sulfur dioxide emission from the pulverized coal combustor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างดีก็ด้วยคำแนะนำ คำปรึกษาและความกรุณาจาก ดร. จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. บัณฑิต พึ่งธรรมสาร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารพระนครเหนือ ที่กรุณาให้คำแนะนำและช่วยเหลือข้อมูลเกี่ยวกับเอกสารที่นำมาใช้กับงานวิจัยชิ้นนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงส์ ที่กรุณาให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัยรวมทั้งการเขียนรูปที่ได้จากแบบจำลอง และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำงานวิจัยชิ้นนี้

ขอขอบคุณ นาย นิวัฒน์ นาคะโยธินสกุล นาย ภาสกร เวสสะโกศล นาย วิภู ศรีสืบสาย และ พี่ ๆ น้อง ๆ ปริญญาโทและปริญญาตรีที่ช่วยในงานแปลเอกสาร หาข้อมูลและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา และ มารดา เป็นอย่างยิ่ง ที่เฝ้าเลี้ยงดูอบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จ

ถ้าปราศจากบุคคลเหล่านี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยอำนวยการอำนวยพรความสุขสวัสดิ์ดังมีแด่ทุกท่าน

ปัญญา แดงวิไลลักษณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	4
2.1 ถ่านหิน.....	4
2.2 การวิเคราะห์ถ่านหิน.....	5
2.3 การเผาไหม้ถ่านหิน.....	7
2.4 การเผาไหม้ของซาร์.....	8
2.5 กำมะถันภายในถ่านหินระหว่างการเผาไหม้.....	9
2.6 ปฏิกริยาของกำมะถันกับออกซิเจนระหว่างการเผาไหม้.....	10
2.7 คุณสมบัติของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	13
2.8 ผลกระทบของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	14
2.9 มาตรฐานการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	15
2.10 การควบคุมการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

# สารบัญ (ต่อ)

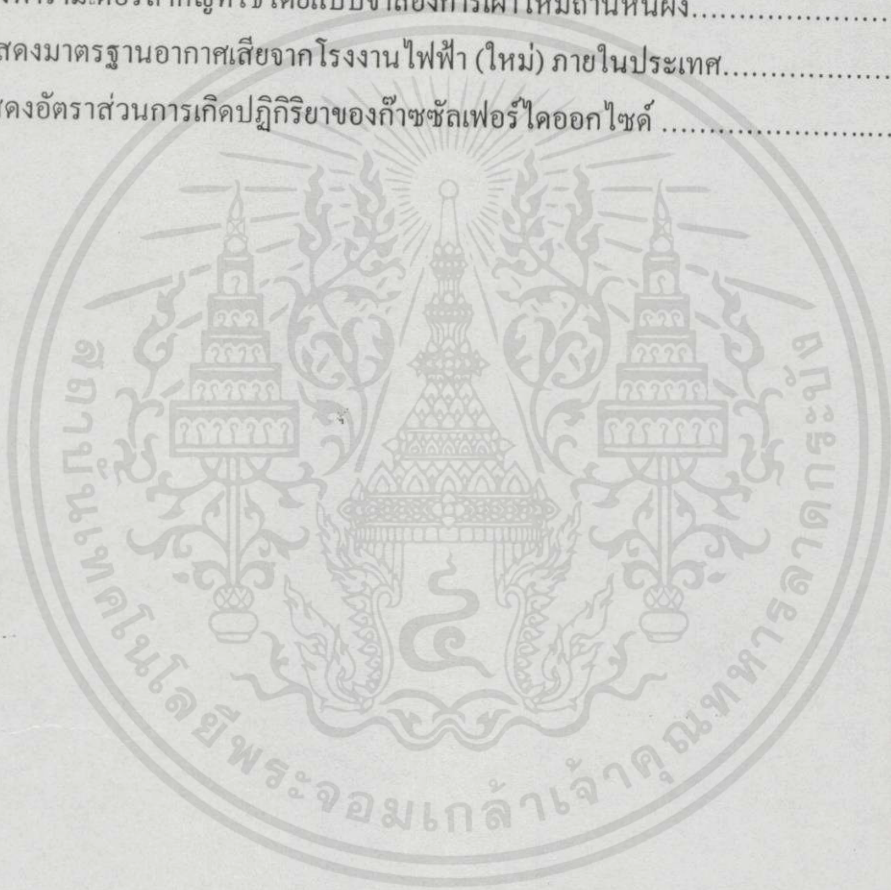
หน้า

บทที่ 3 สมการพื้นฐานของแบบจำลอง.....	17
3.1 บทนำ.....	17
3.2 แบบจำลองของก๊าซ.....	17
3.3 แบบจำลองของอนุภาค.....	26
3.4 แบบจำลองการแผ่รังสีความร้อน.....	33
3.5 แบบจำลองของออกไซด์ของกำมะถัน.....	34
บทที่ 4 การประยุกต์วิธี Finite volume กับการก่อตัวของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายใน ห้องเผาไหม้ของถ่านหินผง.....	36
4.1 การประยุกต์ใช้วิธี Finite volume.....	36
4.2 โครงสร้างของโปรแกรมโดยทั่วไป.....	39
4.3 การแก้เมทริกซ์โดยวิธี TDMA ( Tri-Diagonal Matrix Algorithm) .....	42
4.4 โครงสร้างโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ.....	45
บทที่ 5 การจำลองการเผาไหม้ของเตาเผาที่ใช้ถ่านหินผง.....	49
5.1 บทนำ.....	49
5.2 ลักษณะห้องเผาไหม้.....	49
5.3 ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผล.....	52
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	63
6.1 สรุปผลงานวิจัย.....	63
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	63
เอกสารอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก. มาตรฐานอากาศเสียจากโรงงานไฟฟ้า (ใหม่) ภายในประเทศ.....	68
ภาคผนวก ข. ผลการคำนวณที่ได้จากทฤษฎีเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลอง.....	69
ภาคผนวก ค. ผลงานทางวิชาการเกี่ยวกับงานวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์.....	72
ประวัติผู้เขียน.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ เช่น การค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ประวัติผู้เขียน

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเทอร์โมไดนามิกส์ของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	13
3.1 ค่าคงที่ของแบบจำลองสำหรับแบบจำลองของ K-ε .....	21
5.1 แสดงคุณสมบัติของถ่านหิน.....	51
5.2 แสดงเงื่อนไขการทำงานของเขา.....	52
5.3 แสดงพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้โดยแบบจำลองการเผาไหม้ถ่านหินผง.....	52
ผ.ก.1 แสดงมาตรฐานอากาศเสียจากโรงงานไฟฟ้า (ใหม่) ภายในประเทศ.....	68
ผ.ข.1 แสดงอัตราส่วนการเกิดปฏิกิริยาของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ .....	69



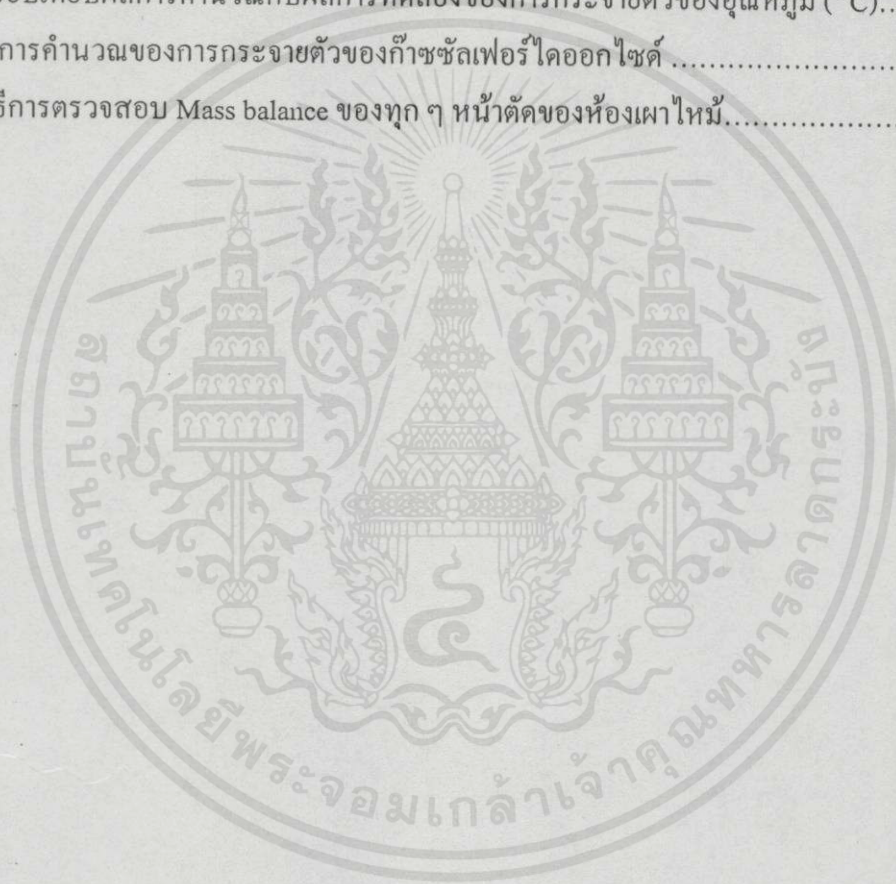
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของสารองค์ประกอบในกระบวนการกลายเป็นถ่านหิน.....	5
2.2 การเผาไหม้ของถ่านหินผง.....	7
2.3 แบบจำลองการเผาไหม้ของซาร์.....	8
2.4 แสดงถึงปริมาณการเกิดกำมะถันออกไซด์ของสารประกอบ $H_2S-O_2-N_2$ ภายในห้องเผาไหม้.....	10
2.5 การเกิดออกไซด์ของกำมะถันจากเชื้อเพลิงอย่างง่ายที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ.....	11
2.6 การเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของสารประกอบ $H_2S-O_2-N_2$ ภายในห้องเผาไหม้ สารประกอบเริ่มต้นมี $O_2$ 6.06 % $N_2$ 73.5% อัตราการไหล 40.3 ซม. <sup>3</sup> /วินาที.....	12
2.7 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ จาก Flame holder.....	12
3.1 การกระจายตัวของอนุภาคโดยใช้วิธี Lagrangian ผ่านเซลล์.....	27
3.2 การเกิดออกไซด์ของกำมะถันของการเผาไหม้สารระเหย.....	34
4.1 เซลล์ของสเกลาร์และเวกเตอร์ในระบบ Staggered grid .....	36
4.2 สนามความดันที่เกิด Checker-board.....	37
4.3 การถ่ายเท 1 มิติ ของฟลักซ์ผ่านขอบเขตระหว่างตำแหน่ง I และ P.....	38
4.4 รูปร่าง Quadratic function ใช้ใน Quick scheme.....	41
4.5 อธิบายโครงสร้าง PISO algorithm.....	46
4.6 อธิบายโครงสร้างของโปรแกรมหลักที่ใช้คำนวณการเผาไหม้ของถ่านหินผง.....	47
4.7 อธิบายโครงสร้างของ Subroutine ที่คำนวณหาค่าปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	48
5.1 โครงสร้างส่วนบนของเตาเผา.....	49
5.2 โครงสร้างภายนอกของเตาเผาที่ ICSTM.....	50
5.3 โครงสร้างของหัวเผาในห้องเผาไหม้.....	51
5.4 เวกเตอร์ความเร็วของก๊าซที่บริเวณใกล้หัวเผา.....	54
5.5 เส้นทางเดินเฉลี่ยของอนุภาคถ่านหินผงที่บริเวณใกล้หัวเผา.....	54
5.6 การกระจายตัวของความเข้มข้นของสารระเหย $\% (V_{volatile} / V_{mix})$ โดยมวล ที่บริเวณ ใกล้หัวเผา.....	55
5.7 การกระจายตัวของความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ $\% (V_{SO_2} / V_{mix})$ โดยมวลที่ บริเวณใกล้หัวเผา.....	55

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 การกระจายตัวของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน % ( $V_{O_2} / V_{mix}$ ) โดยมวลที่บริเวณ ใกล้หัวเผา.....	56
5.9 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ ) ที่บริเวณใกล้หัวเผา.....	56
5.10 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองของการกระจายตัวของก๊าซออกซิเจน.....	59
5.11 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองของการกระจายตัวของอุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ ).....	60
5.12 ผลการคำนวณของการกระจายตัวของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ .....	61
ผ.ข. 1 วิธีการตรวจสอบ Mass balance ของทุก ๆ หน้าตัดของห้องเผาไหม้.....	70



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัด
$A_p$	พื้นที่หน้าตัดของอนุภาค
$A_{E, P, W}$	ตัวแปรไร้มิติที่ตำแหน่ง E, P, W ตามลำดับ
ACOM	ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง
BCOM	ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง
C	คาร์บอนอะตอม
$C_D$	สัมประสิทธิ์แรงฉุด (Drag coefficient)
$c_p$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอนุภาค
D	สัมประสิทธิ์การแพร่
$D_c$	สัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับการเผาไหม้ของซาร์
$D_e$	สัมประสิทธิ์การแพร่ที่ตำแหน่ง e
$D_w$	สัมประสิทธิ์การแพร่ที่ตำแหน่ง w
$D_0$	สัมประสิทธิ์การแพร่ที่ตำแหน่งผิวของซาร์
d	เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเผา
$d_p$	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
E	พลังงานการกระตุ้นของปฏิกิริยา
$E_{vol}$	พลังงานการกระตุ้นของถ่านหิน
$F_d$	แรงฉุด
$F_e$	แรงกระทำที่ตำแหน่ง e
$F_i$	แรงกระทำภายนอกที่ตำแหน่งต่าง ๆ
$F_w$	แรงกระทำที่ตำแหน่ง w
f	Overall in-scattering factor
g	แรงโน้มถ่วงของโลก
$g_e$	ฟลักซ์ของการพาและการกระจายที่ตำแหน่ง e
$g_i$	ฟลักซ์ของการพาและการกระจายทั้งหมด
$g_w$	ฟลักซ์ของการพาและการกระจายที่ตำแหน่ง w
H	ไฮโดรเจนอะตอม
$H_c$	ความร้อนของคาร์บอนภายในซาร์
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

K	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
$K_A$	ค่าคงที่ของ Arrhenius
$K_C$	สัมประสิทธิ์ของอัตราปฏิกิริยาเคมีทั้งหมด
$K_d$	สัมประสิทธิ์ของอัตราการแพร่ของก๊าซออกซิเจน
$K_e$	สัมประสิทธิ์ของ Equivalent absorption
$K_g$	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของก๊าซ
$K'_p$	การสะสมของพื้นที่ที่ภายของอนุภาคต่อหน่วยปริมาตรก๊าซ
$K_t$	สัมประสิทธิ์ของอัตราปฏิกิริยาเคมี
$K_0$	Frequency factor สำหรับ ปฏิกิริยาของซาร์
$k_0$	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาสำหรับ Devolatilization
$k_g$	ค่าการนำความร้อนของก๊าซ
$L_v$	ความจุความร้อนจำเพาะของการเปลี่ยนสถานะ
M	น้ำหนักของ โมเลกุล
m	น้ำหนัก
$m_p$	มวลของอนุภาค
O	ออกซิเจนอะตอม
$P_e$	Peclet number
$P_{O_2}$	ความดันย่อยของออกซิเจน
$P_0$	ความดันบรรยากาศ
Pr	Prandtl number
p	ความดัน
Q	ค่าความร้อนทั้งหมด
$\dot{Q}$	การถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคและก๊าซ
$\dot{q}_b$	ฟลักซ์ของความร้อน
$\dot{q}_w$	ฟลักซ์ของความร้อนที่ผ่านผนัง
$R_d$	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค
Re	ค่า Reynolds number
$Re_p$	ค่า Reynolds number ของอนุภาค
$R_m$	อัตราเชิงปริมาตรของ Mass effux

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่า Re ค่าทั้งสิ้น อีกค่า Reynolds number ของอนุภาค ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$R_{SO_2}$	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์
$R_u$	ค่าคงที่สากลของก๊าซ
$R_v$	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหย
$r$	พิกัดตามแนวรัศมี
$r_p$	ระยะทางจากแกนสมมาตรของอนุภาค
$\bar{r}_w$	การสะท้อนรังสีเฉลี่ยที่ผนัง
$S$	กัมมะถันอะตอม
$S_m$	อัตราการสะสมของมวลต่อหน่วยปริมาตร
$\bar{S}_m$	Source term ของการถ่ายโอนมวลสารสู่ก๊าซจากอนุภาคของแข็ง
$\bar{S}_{m,u}, \bar{S}_{m,v}, \bar{S}_{m,w}$	การถ่ายโอนของโมเมนตัมที่เกิดขึ้นในปริมาตรควบคุมเนื่องจากมวลจากอนุภาคของแข็งทิศทางตามแนวแกน ตามแนวรัศมี และตามแนวเส้นรอบวง ตามลำดับ
$S_t$	Stoichiometric ratio ของสารระเหย
$S_{v,i}$	อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตร
$T$	อุณหภูมิสัมบูรณ์
$T_g$	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของก๊าซ
$T_p$	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของอนุภาค
$T_R$	อุณหภูมิของการแผ่รังสี
$T_0$	อุณหภูมิที่ตำแหน่งผิวของซาร์
$t$	เวลา
$\bar{\tau}_{ij}$	Viscous stresses
$\bar{U}_g$	ค่าความเร็วที่เวลาเฉลี่ยของก๊าซ
$\bar{U}_p$	ค่าความเร็วที่เวลาเฉลี่ยของอนุภาค
$u$	ความเร็วตามแนวแกน
$u_{disp}$	ความเร็วในการแพร่ของอนุภาคทิศตามแนวแกน
$u_r$	สัดส่วนของความเร็ว
$V$	ปริมาณสะสมของสารระเหยที่ปล่อยออกมา
$V$	ปริมาณทั้งหมดของสารระเหยภายในถ่านหิน
$v$	ความเร็วตามแนวรัศมี
$v_{disp}$	ความเร็วในการแพร่ของอนุภาคทิศตามแนวรัศมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

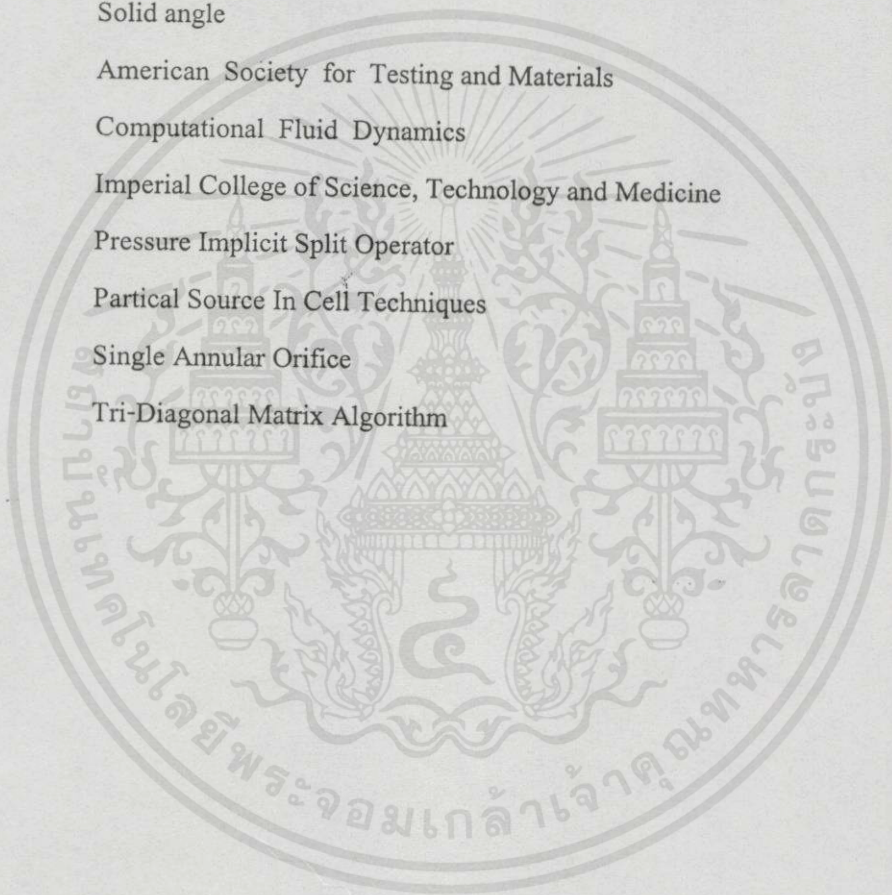
## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$w$	พิกัดตามแนวเส้นรอบวง
$X$	สัดส่วนโดยโมล
$x_s$	สัดส่วนโดยมวลของกำมะถัน
$x_{ub}$	สัดส่วนที่ไม่ได้เผาไหม้ของมวลดั้งเดิมของซาร์
$y$	ระยะห่างจากผนัง
$y^+$	ตัวแปรไร้มิติของการไหลใกล้ผนัง
$z$	พิกัดตามแนวแกน
$[\ ]$	เทอมของมิติ
$\Sigma$	ผลของการบวก
$\alpha$	สัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของอนุภาคกับความเร็วสัมพัทธ์
$\delta_{ij}$	Kronecker delta
$\varepsilon$	อัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน
$\bar{\varepsilon}_p$	การแผ่รังสีเฉลี่ยของอนุภาค
$\bar{\varepsilon}_w$	การแผ่รังสีเฉลี่ยที่ผนัง
$\gamma_{vol}$	อัตราของ Mass efflux เกิดขึ้นจาก Devolatilization ภายในปริมาตรควบคุม
$\Gamma$	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนหรือสัมประสิทธิ์พาความร้อน
$\varphi$	ตัวแปรของกลไกสำหรับปฏิกิริยาของซาร์
$\kappa$	ค่าคงที่ของ Von Karman
$\mu$	ความหนืดสัมบูรณ์
$\mu_{ed}$	Eddy viscosity
$\mu_{eff}$	Effective viscosity
$\mu_l$	Laminar viscosity
$\mu_t$	Turbulent viscosity
$\rho$	ความหนาแน่นของก๊าซ
$\rho_p$	ความหนาแน่นของอนุภาค
$\eta$	สัดส่วนของความร้อนที่เข้าสู่อนุภาค
$\sigma$	ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzman
$\sigma_{h,t}$	ค่า Prandtl number ของการไหลแบบปั่นป่วน
$\tau$	ความเค้นเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าการใดก็ตาม หากท่านมีข้อสงสัยประการใด กรุณาติดต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$\tau_{ij}$	Reynolds stresses
$\tau_w$	ความเค้นเฉือนที่ผนัง
$\emptyset$	ค่าคุณสมบัติของการไหล
$\emptyset'$	ค่าคุณสมบัติของการไหลที่มีการแกว่งไปมา
$\bar{\emptyset}$	ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติของการไหล
$\Omega$	Solid angle
ASTM	American Society for Testing and Materials
CFD	Computational Fluid Dynamics
ICSTM	Imperial College of Science, Technology and Medicine
PISO	Pressure Implicit Split Operator
PSICT	Partical Source In Cell Techniques
SAO	Single Annular Orifice
TDMA	Tri-Diagonal Matrix Algorithm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

ความก้าวหน้าทางด้านอุตสาหกรรมเป็นผลให้มีการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น ถ่านหินเป็นแหล่งพลังงานชนิดหนึ่งที่มีราคาถูกกว่าน้ำมัน และมีปริมาณสำรองมากกว่าจึงสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้นกำเนิดความร้อนในอุตสาหกรรม และในกิจกรรมอื่น ๆ อีกหลายอย่าง กลุ่มประเทศที่พัฒนาแล้วจะมีการใช้ถ่านหินในอัตราเพิ่มโดยเฉลี่ย 1.6 เปอร์เซ็นต์/ปี ส่วนประเทศในโลกที่สามจะมีการใช้ถ่านหินเพิ่มในอัตราไม่เท่ากัน โดยในทวีปเอเชียจะมีการขยายตัวของการใช้อย่างมาก คาดว่าในปี พ.ศ. 2548 ประเทศจีนจะใช้ถ่านหินเพิ่มขึ้นเกือบเป็น 2 เท่าของการใช้ในปัจจุบัน [1] การนำถ่านหินมาใช้ทดแทนพลังงานจากน้ำมันมีปัญหาจากกำมะถันซึ่งจะก่อให้เกิดมลพิษ โดยกำมะถันซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของถ่านหินจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ซึ่งเป็นก๊าซที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม และจะก่อให้เกิดฝนกรด จึงมีความจำเป็นต้องกำจัดกำมะถันออกจากถ่านหิน ซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ออกไซด์ของกำมะถันที่ปล่อยออกมาจากการเผาถ่านหิน ซึ่งมีปริมาณกำมะถันสูงในโรงไฟฟ้า นับเป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ ดังเช่นกรณีของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ [2] ความสามารถในการคาดคะเนปริมาณออกไซด์ของกำมะถันจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะช่วยแก้ปัญหาได้มากทั้งในขั้นตอนของการออกแบบอุปกรณ์ การปฏิบัติการ การควบคุมมลพิษให้ได้ตามข้อกำหนดมาตรฐานทางราชการว่าด้วยการปล่อยออกไซด์ของกำมะถัน ปัจจุบันเครื่องมือการคาดคะเนในรูปของการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical solution) ได้มีการพัฒนาอย่างมากและได้รับการยอมรับมากขึ้นเรื่อย ๆ อย่างไรก็ตามเนื่องจากความซับซ้อนของปัญหา โดยเฉพาะในกรณีของการเผาถ่านหินผง (Pulverized coal) นั้น แบบจำลองที่ใช้ในการคาดคะเนนั้นยังต้องมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มขีดความสามารถและความแม่นยำอีกมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงขอเสนอการจำลองการก่อตัวของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ผสมผสานกับแบบจำลองการสันดาปของถ่านหินผงที่ได้พัฒนาไว้แล้ว [3]

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ หนึ่ง ศึกษาการก่อตัวของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อย่างจริงจังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. พัฒนาแบบจำลองการเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของกำมะถันในสภาวะการเผาไหม้ของถ่านหินผง

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. กำมะถันที่ทำปฏิกิริยาในห้องเผาไหม้จำกัดเฉพาะ Organic sulfur และถูกปล่อยออกมาจากถ่านหินในช่วง Devolatilization ทั้งหมดผสมกับอากาศอย่างสมบูรณ์ภายในห้องเผาไหม้
2. กำมะถันภายในสารระเหย (Volatile) จะรวมตัวกับออกซิเจนก่อให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั้งหมด
3. ปฏิกิริยาของกำมะถันกับออกซิเจนเป็นแบบ Fast kinetic reaction ดังนั้นกำมะถันรวมตัวกับออกซิเจนด้วยอัตราการรวมตัวที่สัมพันธ์กับอัตราการกระจายตัวของ Turbulent eddy

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

1. Kinetic rate ของปฏิกิริยาที่กำมะถันรวมกับอากาศสูงกว่า อัตราการผสม (Mixing rate) ของ Turbulent eddy [4]
2. ก๊าซซัลเฟอร์มอนอกไซด์ (SO) ที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้มีสถานะไม่เสถียรและทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว [5]
3. มีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย [5]

### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

สร้างแบบจำลองการก่อตัวของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ผสมผสานกับแบบจำลองการสันดาปของถ่านหินหินที่ได้พัฒนาแล้ว (FAFNIR) โดย Imperial College of Science, Technology and Medicine (ICSTM)

### 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.6.1 ศึกษากลไกและจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของปฏิกิริยาที่นำไปสู่การเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายใต้ภาวะการเผาไหม้ของถ่านหินผง
- 1.6.2 นำข้อมูลที่ได้มาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และประกอบเข้ากับแบบจำลองรวมซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาสำหรับการเผาไหม้ของถ่านหินผงพร้อมทั้งเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่จำเป็น

1.6.3 ทดสอบและแก้ไขแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยเปรียบเทียบผลกับข้อมูลที่ได้จากการวัดของผลงานที่มีผู้อื่นทำไว้แล้ว [3]

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถทำนaylorการก่อตัวของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาการลดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายในห้องเผาไหม้ของถ่านหินผง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# วรรณกรรมปริทรรศน์

### 2.1 ถ่านหิน [1]

ถ่านหิน (Coal) มีสถานะเป็นของแข็ง ไม่มีรูปผลึกที่แน่นอน โดยทั่วไปมีสีเข้มตั้งแต่สีน้ำตาลถึงสีดำสนิท ประกอบด้วย คาร์บอน สารระเหย ความชื้น และแร่ธาตุต่าง ๆ ในปริมาณน้อย ถ่านหินเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีคุณค่ามากเพราะเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญ และสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้เป็นอย่างดี ถ่านหินเกิดจากการเปลี่ยนแปลงที่ใช้เวลาหลายล้านปีของซากพืชภายใต้ความดันและความร้อนจนกลายเป็น พีต (Peat) ลิกไนต์ (Lignite) ซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) บิทูมินัส (Bituminous) และแอนทราไซต์ (Anthracite) ตามลำดับ ถ่านหินตามแหล่งต่าง ๆ ในโลกนี้จึงมีคุณสมบัติต่างกันขึ้นกับชนิดของซากพืช อายุการเปลี่ยนแปลง และสภาพสิ่งแวดล้อมของแหล่งที่เกิด การจำแนกถ่านหินมีหลายระบบที่ใช้กันมากได้แก่ การจำแนกถ่านหินตาม สักดี (Rank) ค่าสักดีเป็นการวัดความสมบูรณ์ของการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาที่กลายเป็นถ่านหิน สถาบัน American Society for Testing and Materials (ASTM) ได้กำหนดค่าคุณสมบัติของถ่านหินเป็นเกณฑ์โดยแยกการจำแนกถ่านหินออกเป็น พีต ลิกไนต์ ซับบิทูมินัส บิทูมินัส แอนทราไซต์ ลักษณะทั่วไปของประเภทถ่านหินดังที่ได้กล่าวมานี้อาจกล่าวโดยย่อได้ดังนี้

**พีต** ประกอบด้วยซากพืชซึ่งบางส่วนได้สลายตัวไปแล้ว มีปริมาณออกซิเจนและความชื้นสูง พีตนับได้ว่าเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นแรกในกระบวนการกลายเป็นถ่านหิน (Coalification process)

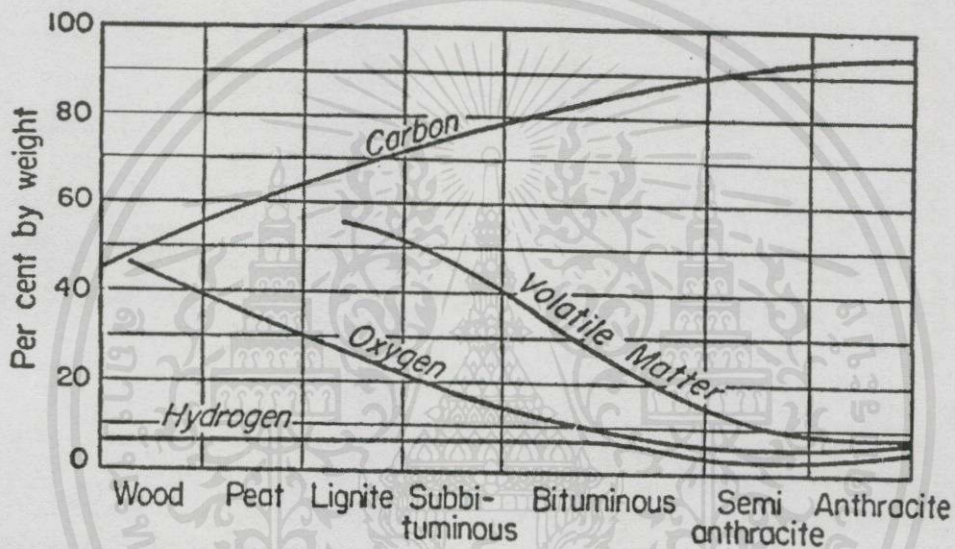
**ลิกไนต์** มีซากพืชเหลือปรากฏอยู่เล็กน้อย มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างสูงและมีปริมาณความชื้นสูงถึง 30-70 เปอร์เซ็นต์ เป็นถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง

**ซับบิทูมินัส** มีลักษณะสีดำคล้ำขี้ผึ้ง มีประมาณความชื้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ถ่านหินประเภทนี้มีคุณค่ามากสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า

**บิทูมินัส** เป็นถ่านหินเนื้อแน่นมีลักษณะแข็ง และมักจะประกอบขึ้นด้วยชั้นถ่านหินสีดำสนิทที่มีลักษณะเป็นมันวาว มีปริมาณคาร์บอน 69-86 เปอร์เซ็นต์ และมีความชื้น 1.5-7 เปอร์เซ็นต์ ใช้เป็นถ่านหินเพื่อการถลุงโลหะได้

แอนทราไซต์ เป็นถ่านหินที่มีลักษณะดำเป็นเงามัน มีความวาวสูง มีปริมาณคาร์บอนสูงถึง 86 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป มีปริมาณความชื้นต่ำมากและมีค่าความร้อนสูง แต่จุดไฟติดยาก

ในการจำแนกถ่านหินตามค่าศักินี้ถ้าเป็นถ่านหินประเภท Higher-rank coal จะถูกจัดตามเปอร์เซ็นต์ของ คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) คิดแบบ Dry basis แต่ถ้าเป็นถ่านหินประเภท Low-rank coal จะถูกจัดตาม ค่าความร้อน (Heating value) คิดแบบ Moist basis รูปที่ 2.1 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของปริมาณองค์ประกอบในกระบวนการกลายเป็นถ่านหิน



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของสารองค์ประกอบในกระบวนการกลายเป็นถ่านหิน [1]

จะเห็นได้ว่าเมื่อกระบวนการกลายเป็นถ่านหิน เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนจะเพิ่มขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์ของสารอื่นจะลดลง

## 2.2 การวิเคราะห์ถ่านหิน [1]

การวิเคราะห์ถ่านหินมีประโยชน์เพื่อ

- ก) การจำแนกถ่านหิน
- ข) การกำหนดราคาถ่านหินตามคุณภาพ
- ค) การควบคุมคุณภาพถ่านหิน
- ง) การเลือกใช้หรือออกแบบอุปกรณ์เผาไหม้
- จ) การคำนวณปริมาณ เช่นปริมาณถ่านหิน และปริมาณอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้ เป็นต้น

การวิเคราะห์ถ่านหินมีสองแนวทาง คือ การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

การวิเคราะห์แบบประมาณ มีรายงานค่าความร้อน (Calorific value หรือ Heating value) และปริมาณกำมะถัน และยังมีการวิเคราะห์หาปริมาณสารดังต่อไปนี้ คาร์บอนคงตัว สารระเหย ความชื้น จี๊แก๊ส ฯลฯ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ไม่ใช่เป็นการวิเคราะห์ที่ทำกันเป็นประจำ แต่เป็นการวิเคราะห์ที่มีประโยชน์ในการจัดประเภทของถ่านหิน และมีประโยชน์ในการคำนวณเกี่ยวกับการเผาไหม้ เช่นการคำนวณหาปริมาณอากาศที่ต้องการเพื่อการเผาไหม้ ซึ่งจะวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุดังต่อไปนี้ คาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ ฯลฯ

ความชื้น (Moisture): ในถ่านหินแบ่งได้เป็น Free moisture และ Inherent moisture ซึ่ง Free moisture เป็นความชื้นส่วนที่ให้เราเห็นว่าถ่านหินนั้นชื้น ถ่านหินที่ชื้นมักเกาะติดกับภาชนะหรือเครื่องมือทำให้การไหลโดยน้ำหนักของมันเองได้ไม่ดี Inherent moisture คือความชื้นที่ยังเหลืออยู่ในถ่านหินหลังจากไล่ Free moisture ออกจากถ่านหินแล้ว เราอาจใช้ Inherent moisture เป็นแนวทางบอกศักดิ์ของถ่านหินได้ High rank coal มี Inherent moisture น้อย ถิกในดีอาจมี Inherent moisture มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นไม่มีคุณค่าทางด้านความร้อน ในการเผาไหม้ถ่านหินจะต้องสูญเสียค่าความร้อนเกือบ 0.1 เปอร์เซ็นต์ ต่อทุก ๆ 1 เปอร์เซ็นต์ของความชื้นในถ่านหิน

ค่าความร้อน คือปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินหนึ่งหน่วยน้ำหนักอย่างสมบูรณ์ ค่าความร้อนนี้อาจรายงานได้ 2 วิธี คือ ค่าความร้อนทั้งหมด (Gross calorific value) หรือ Higher heating value และ ค่าความร้อนสุทธิ (Net calorific value) หรือ Lower heating value ค่าความร้อนทั้งหมดเป็นปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหิน

ค่าความร้อนทั้งหมดอาจประมาณได้จาก Dulong's formula [1] ดังนี้

$$Q = [8,080 \times \%C + 34,460(\%H_2 - O_2 / 8) + 2,250 \times \%S] / 100 \quad (2.1)$$

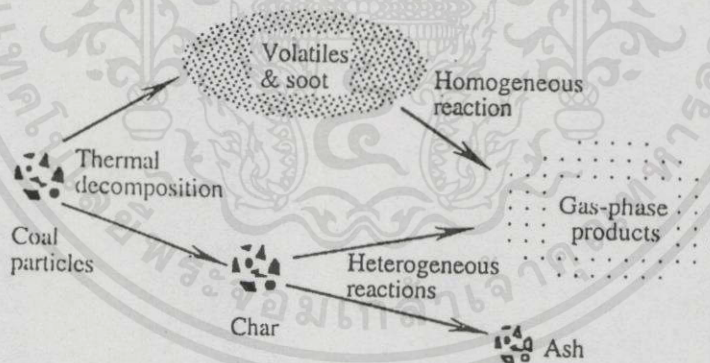
โดยที่ Q คือ ค่าความร้อนทั้งหมดมีหน่วยเป็น kcal/kg และ %C, %H<sub>2</sub>, %O<sub>2</sub>, %S เป็นเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอน เปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจน เปอร์เซ็นต์ออกซิเจน และเปอร์เซ็นต์กำมะถัน ในถ่านหิน ตามลำดับ Dulong's formula ใช้ประมาณค่าความร้อนทั้งหมดของถ่านหินประเภท High rank ได้ แก่ ถ่านหิน บิทูมินัส และ แอนทราไซต์ ได้ดี แต่ถ้าใช้กับถ่านหินประเภท Low rank แล้วค่าที่ได้จะไม่ค่อยถูกต้อง

**Swelling property:** ถ่านหินจำพวก High rank มักจะพองตัว (Swell) ที่อุณหภูมิสูง และจะเกาะกับก้อนถ่านหินที่อยู่ข้าง ๆ รวมเป็นก้อนคาร์บอน ปรากฏการณ์นี้เรียก Agglutination หรือ Coking ถ่านหินพวกนี้เรียกรวม ๆ ว่า Swelling หรือ Coking coal ตัวอย่างถ่านหินนี้ได้แก่ บิทูมินัส ส่วนถ่านหินพวก Low rank coal จะคงรูปร่างของมันอยู่ได้ที่อุณหภูมิสูง ถ่านหินพวกนี้ได้แก่ ลิกไนต์ และซับบิทูมินัส

**Ash-fusion temperature:** คืออุณหภูมิที่ขี้เถ้าของถ่านหินเริ่มหลอม Ash-fusion temperature มีประโยชน์ในการออกแบบหรือเลือกใช้ชนิดของอุปกรณ์เผาไหม้

### 2.3 การเผาไหม้ถ่านหิน [3]

ถ่านหินแต่ละชนิดมีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลให้ชนิดของถ่านหินที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของสสาร ช่วงเวลา อุณหภูมิ ฯลฯ ที่ถูกทับถม ถ่านหินแต่ละชนิดมีสสารส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และ มีสสารอื่น ๆ อีกปริมาณเล็กน้อยคือ ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และโลหะที่อยู่ในขี้เถ้า ถ่านหินผงเมื่อเข้าไปสู่บริเวณการเผาไหม้จะรวมกับออกซิเจน ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเผาไหม้ของถ่านหินผง [3]

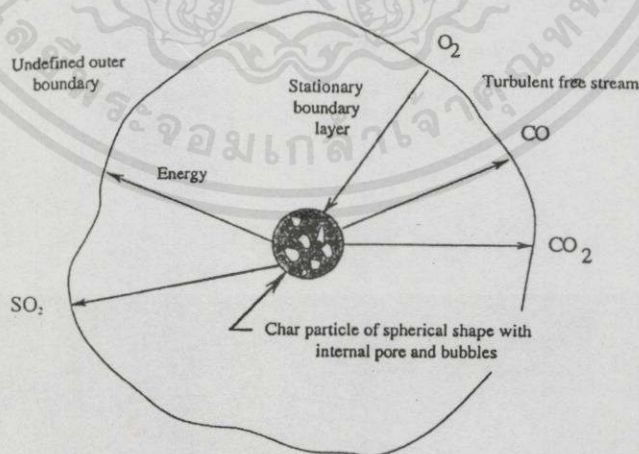
**2.3.1 ความร้อนจากการเผาไหม้ถ่านหิน** อนุภาคของถ่านหินถูกป้อนเข้าไปในบริเวณห้องเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูง ถ่านหินจะติดไฟและเกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว เป็นผลมาจากการพาความร้อน (Convection) จากก๊าซรอบข้างและการแผ่รังสีจากเปลวไฟ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิอาจสูงถึง  $10^5$  K/s ภายใต้ภาวะของเตาเผาแบบถ่านหินผง ที่อุณหภูมิเกิน 600 K อนุภาคของถ่านหินจะปล่อยสารระเหย และน้ำมันดิน (Tar) รวมตัวกับออกซิเจน ซึ่งก่อให้เกิดความร้อน ก๊าซ และสสารต่าง ๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ออกไซด์ของไนโตรเจน ออกไซด์ของกำมะถัน ฯลฯ

ของแข็งที่เหลือคือชาร์ (Char) ซึ่งมีสารประกอบส่วนใหญ่คือ คาร์บอน และสารไม่ติดไฟมีปริมาณเล็กน้อย ช่วงเวลาของถ่านหินที่ปลดปล่อยสารระเหยอยู่ในช่วง 5-100 มิลลิวินาที [6] มีตัวแปรหลายตัวที่ส่งผลกับอัตราการปลดปล่อยสารระเหย เช่น ลักษณะห้องเผาไหม้ ชนิดของถ่านหิน ขนาดของอนุภาค ความร้อนแฝง อุณหภูมิที่ทางออก ความดันของอากาศภายนอก ฯลฯ [7]

**2.3.2 การเผาไหม้ของสารระเหย** การเผาไหม้ของสารระเหย ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมีของสารระเหยพร้อมกับเงื่อนไขของสภาพแวดล้อมรอบข้าง เช่น อุณหภูมิ องค์ประกอบทางเคมี และความเข้มข้นของก๊าซที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการเผาไหม้ ตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับอากาศพลศาสตร์ และกระบวนการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้นมีข้อสมมุติอยู่บางประการเช่น ไม่คำนวณผลของอนุภาคเขม่า และการเผาไหม้ของสารระเหยสัมพันธ์กันกับอัตราการผสมแบบปั่นป่วนของสารระเหยกับออกซิเจน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้สารระเหยสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ 1) แบบจำลองที่อาศัยข้อมูลทางสถิติของการกวัดแกว่งเทอร์บิวเลนซ์ (Turbulent fluctuation) และค่าอัตราการผสม เช่น แบบจำลองที่พัฒนาโดย [8, 9] 2) แบบจำลองที่อาศัยอัตราการสลายตัวของกระแสไหลวน (Eddy) โดย [10] แบบจำลองถูกพัฒนาโดยพิจารณาอัตราการแพร่กระจายแบบปั่นป่วนควบคู่กับความเข้มข้นของออกซิเจน สารระเหย และผลผลิตที่ได้จากการเผาไหม้ [11]

## 2.4 การเผาไหม้ของชาร์

ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเผาไหม้ของแข็งชาร์ ที่เหลือจากการเผาไหม้ของสารระเหยอย่างกว้างขวาง ซึ่งรายละเอียดสามารถศึกษาได้จากงานวิจัยของ [12]



รูปที่ 2.3 แบบจำลองการเผาไหม้ของชาร์ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด การเผาไหม้ของชาร์เป็นปฏิกิริยาที่แตกต่างจากการเผาไหม้ของสารระเหย ซึ่งการเผา

ผลาญส่วนใหญ่จะอาศัยเวลาในการเผาไหม้จากรายงานของ [14] เวลาที่เผาไหม้ของชาร์อยู่ในช่วง

ประมาณ 300 มิลลิวินาที ในทำนองเดียวกันการเผาไหม้ของชาร์ก็ทำให้เกิดปฏิกิริยาหลายชนิดซึ่งไม่สามารถจำลองใช้กับเงื่อนไขง่าย ๆ ได้มีการวิเคราะห์แบบจำลองการเผาไหม้ของชาร์โดย [13] แบบจำลองปัจจุบันที่นำมาใช้ของการเผาไหม้ของชาร์ โดยคำนึงถึง 2 กระบวนการคือ 1) อัตราการกระจายของออกซิเจนและความร้อนผ่านพื้นผิวของอนุภาค 2) อัตราปฏิกิริยาพลังงานจลนพลศาสตร์ทางเคมี

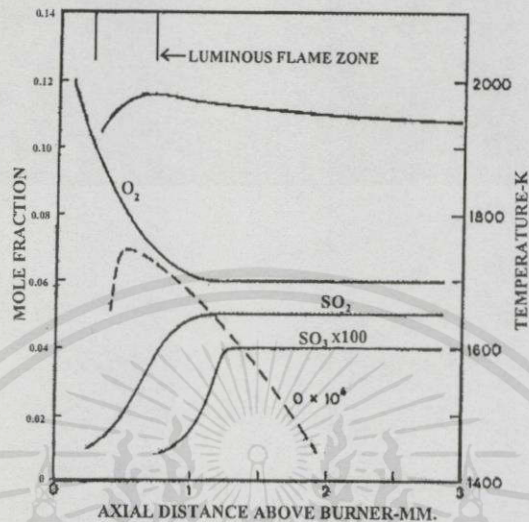
## 2.5 กำมะถันภายในถ่านหินระหว่างการเผาไหม้

กำมะถันภายในถ่านหินจะอยู่ในรูปของสารประกอบ แร่ไพไรต์ (Pyrites) Organic sulfur และ Sulfate sulfur ที่ปะปนมากับถ่านหิน [1] เมื่อเกิดการเผาไหม้กำมะถันจะติดไฟจะเกิดออกไซด์ของกำมะถันคือ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ และ ซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ พร้อมกับให้ความร้อนออกมา ก๊าซที่เกิดขึ้นนั้นเป็นมลพิษและสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นสารกัดกร่อนและเป็นอันตรายต่อสุขภาพได้

**2.5.1 สารประกอบไพไรต์** สารประกอบไพไรต์ คือแร่ของโลหะที่ประกอบด้วยกำมะถัน Pyritic sulfur เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาในการทำงานของเตาเผา แร่ไพไรต์ที่มีอยู่ในถ่านหินส่วนใหญ่มีขนาดอนุภาคประมาณ 2-3 ไมโครเมตรและมีลักษณะเป็นก้อนกลม ในการที่จะนำแร่ไพไรต์ออกจากถ่านหินขั้นตอนแรกอาจทำได้โดยกรรมวิธีการล้าง แม้ว่าอนุภาคที่เป็นอิสระของแร่ไพไรต์ภายในถ่านหินจะถูกกำจัดได้บางส่วนแต่แร่ไพไรต์ภายในถ่านหินบางชนิดจะมีขนาดเล็กมากเกินที่จะหลุดออกมาได้ ดังนั้นการนำถ่านหินมาใช้ประโยชน์อาจจะต้องกำจัดแร่ไพไรต์ออกจากถ่านหินเสียก่อนโดยกรรมวิธีอื่น ๆ อีกเช่น การนำแร่ไพไรต์ออกจากถ่านหินผงในระหว่างการบดหรือที่หัวเผา เนื่องด้วยมีอยู่หลายวิธีที่จะกำจัดแร่ไพไรต์ เช่น ใช้แม่เหล็กที่สามารถที่จะดึงดูดอนุภาคของไพไรต์ ให้แยกออกมาจากถ่านหินโดยใช้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มข้นสูง

**2.5.2 Organic sulfur** ปริมาณกำมะถันภายใน Organic sulfur มีปริมาณประมาณครึ่งหนึ่งของกำมะถันทั้งหมดภายในถ่านหิน Organic sulfur เมื่อเผาไหม้กับอากาศแล้วกำมะถันจะรวมตัวกับออกซิเจนส่วนใหญ่จะเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และมีกำมะถันส่วนน้อยที่รวมตัวกับออกซิเจนที่บริเวณผิวของเปลวไฟเพราะบริเวณนั้นจะมีอากาศส่วนเกินมากจึงก่อให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ จากรูปที่ 2.4 สามารถอธิบายถึงการเกิดกำมะถันออกไซด์ภายในห้องเผาไหม้ซึ่งซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะมีผลต่อเตาหม้อไอน้ำไม่มากนัก แต่เมื่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนก็จะเปลี่ยนจาก  $SO_2$  ไปเป็น  $SO_3$  และในภายหลังจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของกรดซัลฟิวริก ซึ่งเป็นการนำไปสู่ปัญหาที่รุนแรงต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ส่วนประกอบเหล่านี้ถูกสร้างด้วย Alkali iron ไตรซัลเฟต ภายใต้ตะกอนกากของแร่ที่ซึ่งมี  $SO_3$  ที่ระดับสูง มันเป็นสิ่งที่

จะเกิดขึ้นในกระบวนการนำถ่านหินมาใช้แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลอง เพื่อที่จะหาแนวทางการลดระดับกำมะถันให้มากที่สุดเพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้



รูปที่ 2.4 แสดงถึงปริมาณการเกิดกำมะถันออกไซด์ของสารประกอบ  $H_2S-O_2-N_2$  ภายในห้องเผาไหม้ [15]

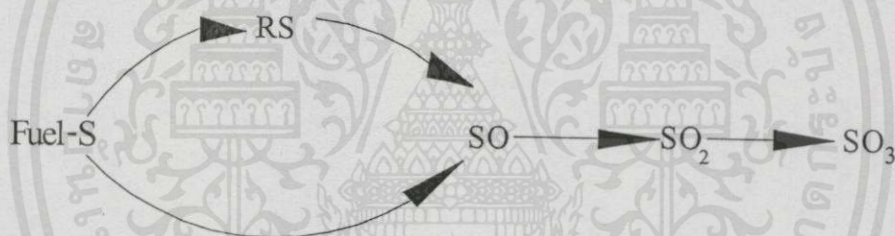
2.5.3 Sulfate sulfur จำนวนของ Sulfate sulfur ในถ่านหินทั่ว ๆ ไปจะมีปริมาณไม่เกิน 2-3% ของกำมะถันทั้งหมด กำมะถันส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบไพไรต์ และ Organic sulfur เมื่อ Sulfate sulfur เกิดการเผาไหม้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก Sulfate sulfur จะอยู่ในขี้เถ้า โดยทั่ว ๆ ไป Sulfate sulfur สามารถตั้งได้ในการคำนวณค่า เพื่อหาปริมาณกำมะถันที่ออกมาจากก๊าซไอเสีย

## 2.6 ปฏิกริยาของกำมะถันกับออกซิเจนระหว่างการเผาไหม้

ไพไรต์ และ Organic sulfur ที่ปลดปล่อยออกมาจากถ่านหินพร้อมกับสารระเหยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายใต้เงื่อนไขของการเผาไหม้ซึ่งเป็นรูปแบบที่ซับซ้อน ในส่วนนี้เป็นสาเหตุมาจากการแพร่กระจายที่เกิดขึ้นจริงภายในบริเวณการเผาไหม้ ซึ่งบริเวณส่วนกลางของเปลวไฟเชื้อเพลิงจะมีปริมาณมากเกินกว่าอากาศจะเกิดสภาวะ Fuel rich ซึ่งในบริเวณนั้นต้องการอากาศมาผสมเพิ่มเพื่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ การหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศและเชื้อเพลิง โดยมีการพัฒนาและศึกษาปัจจัยเหล่านี้ในทางวิศวกรรมชั้นสูง เพื่อที่จะนำมาออกแบบหัวเผาให้มีประสิทธิภาพสำหรับเตาเผาที่มีขนาดใหญ่ ไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณการเกิดปฏิกิริยาของกำมะถันภายในเปลวไฟ โดยพิจารณาจากการทดลองแบบง่าย เพื่อจะสามารถควบคุมเงื่อนไขของการเผาไหม้ได้ ซึ่งพิจารณาจากเปลวไฟของเชื้อเพลิงที่

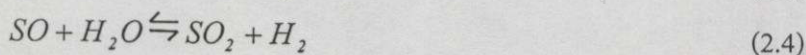
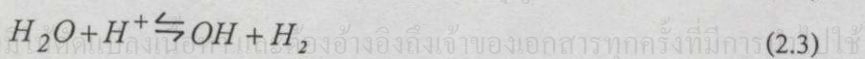
มีกำมะถันผสมอยู่โดยผสมกับอากาศภายใต้สภาวะ Premix เช่น ใช้สารประกอบ  $H_2S$  เป็นเชื้อเพลิง ลักษณะของเปลวไฟที่มองเห็นจะมีความหนาน้อยมากประมาณ 0.5 มม. และบริเวณสูงกว่าการเกิดปฏิกิริยาสามารถมองเห็นได้โดยใช้เครื่องมือทำการศึกษ [16]

ข้อมูลส่วนใหญ่ที่ได้จากการศึกษาปฏิกิริยาเคมีของกำมะถันภายในเปลวไฟ ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของเชื้อเพลิงที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ เช่น  $H_2S$ ,  $CS_2$ ,  $COS$  และ  $CH_3SH$  เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารเหล่านี้กับออกซิเจนจะเป็นข้อมูลขั้นต้นสำหรับการศึกษาปฏิกิริยาของสารประกอบที่ซับซ้อนของ Organic sulfur กับออกซิเจนต่อไป ซึ่งสารประกอบที่ซับซ้อนนี้จะพบในถ่านหินและน้ำมันที่มีความเข้มข้นสูง การศึกษาต่อไปนี้จะพิจารณากลไกของการเกิดสารประกอบของกำมะถันอย่างง่าย เพื่อผลิตภัณฑ์ที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ กลไกสำหรับการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนของเชื้อเพลิงที่มีกำมะถันเป็นสารประกอบอย่างง่ายถึงแม้จะไม่สามารถอธิบายการเกิดปฏิกิริยาของถ่านหินได้อย่างสมบูรณ์ แต่ก็มีความสอดคล้องที่อุณหภูมิของเปลวไฟ ลำดับกระบวนการเกิดปฏิกิริยาของเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 2.5

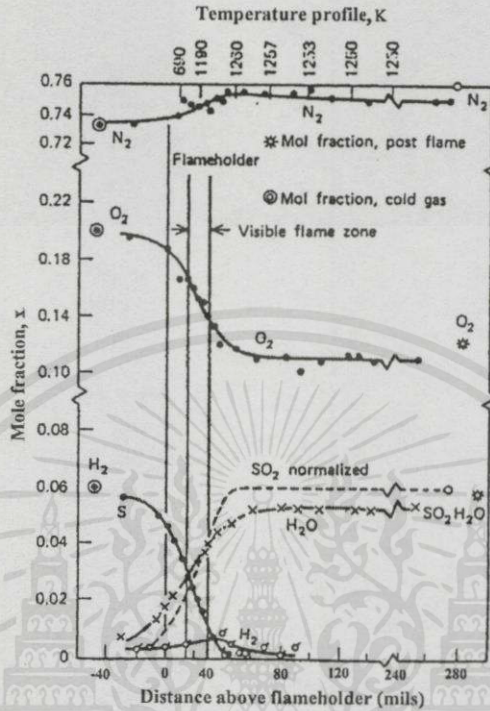


รูปที่ 2.5 การเกิดออกไซด์ของกำมะถันจากเชื้อเพลิงอย่างง่ายที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ

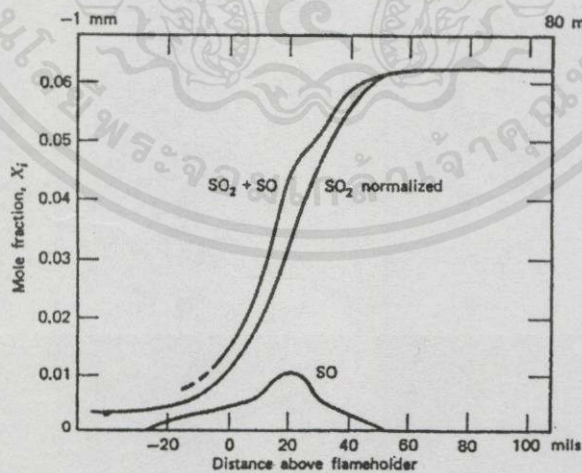
ซึ่ง RS เป็นพันธะที่มีกำมะถันเป็นสารประกอบเช่น HS, CS,  $CH_3S$  ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการแสดงการเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ถูกสร้างอย่างรวดเร็วในเปลวไฟ รูปที่ 2.6 อธิบายการเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของสารประกอบ  $H_2S-O_2-N_2$  ภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในระดับเดียวกันกับปฏิกิริยาการเผาไหม้ กระบวนการเกิด  $SO_2$  จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระดับเดียวกับการทำปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันกับพันธะ O-H ประกอบกับรูป 2.7 จากการสังเกตพบว่าก๊าซ SO ซึ่งเกิดขึ้นในห้องเผาไหม้มีสถานะไม่เสถียรและทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว ด้วยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้



ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ SO<sub>2</sub> และ SO จากสมการข้างบนสามารถคำนวณได้จากอุณหพลศาสตร์ที่พิจารณาจากตำแหน่งอุณหภูมิของก๊าซ



รูปที่ 2.6 การเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของสารประกอบ H<sub>2</sub>S-O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> ภายในห้องเผาไหม้ สารประกอบเริ่มต้นมี O<sub>2</sub> 6.06% N<sub>2</sub> 73.5% อัตราการไหล 40.3 ซม.<sup>3</sup>/วินาที [5]

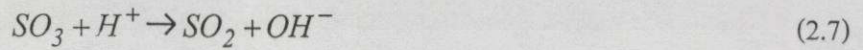


รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่ตำแหน่งต่างๆ จาก Flame holder [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ปฏิกริยาที่สำคัญของการเกิดก๊าซ SO<sub>3</sub> ในเปลวสามารถอธิบายได้ด้วยสมการปฏิกริยาดังนี้ ไม่ว่าจะฉีดยาใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ปฏิกิริยาที่ 2.5 จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่บริเวณใกล้เปลวไฟเป็นเพราะว่าความเข้มข้นของออกซิเจนมีปริมาณมากเกินไป กำมะถันบางส่วนจะมีเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.5 และจะแปลงกลับเป็นก๊าซ  $SO_2$  ในภายหลังโดยสมการดังนี้



## 2.7 คุณสมบัติของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นก๊าซมลพิษที่ปล่อยมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เช่น ถ่านหิน ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นก๊าซไม่มีสี แต่มีรส ที่ระคายเคืองความเข้มข้นสูงมากพอจะมีกลิ่นเหม็น ระคายจมูก สามารถละลายน้ำได้ดี คุณสมบัติทางกายภาพ และเทอร์โมไดนามิกส์ของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเทอร์โมไดนามิกส์ของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ [17]

Property	Value
<i>mol wt.</i>	64.06
<i>mp, °C</i>	-72.70
<i>bp, °C</i>	-10.02
$\Delta \bar{H}$ fusion, kJ/mol <sup>a</sup>	7.40
$\Delta \bar{H}$ vaporisation at -10.0°C, kJ/mol <sup>a</sup>	24.92
vapor density at 0°C, 101.3 kPa (= 1 atm), air = 1	2.263
liquid density at -20°C, g/cm <sup>3</sup>	1.50
critical temperature, °C	157.6
critical pressure, kPa <sup>b</sup>	7911
critical volume, cm <sup>3</sup> /g	122.0
$\Delta \bar{G}^\circ$ formation, gas at 25°C, kJ/mol <sup>a</sup>	-300.19
$\Delta \bar{H}^\circ$ formation, gas at 25°C, kJ/mol <sup>a</sup>	-296.2
$\Delta \bar{S}^\circ$ formation, gas at 25°C, J/(mol-K) <sup>a</sup>	248.1
$C_p$ (gas at 25°C), J/(mol-K) <sup>a</sup>	39.9
dielectric constant at -16.5°C	17.27
dipole moment at 25°C, C-m <sup>c</sup>	$3.87 \times 10^{-30}$

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

Property	Value
<i>vapor pressure, kPa<sup>b</sup> at</i>	
10° C	230
20° C	330
30° C	462
40° C	630
<i>solubility in water (at 101.3 kPa, g/100g H<sub>2</sub>O)</i>	
0° C	22.971
10° C	16.413
20° C	11.577
30° C	8.247
40° C	5.881

<sup>a</sup> To convert J to cal, divide by 4.184

<sup>b</sup> To convert kPa to psi, multiply by 0.145

<sup>c</sup> To convert C-m to D, divide by  $3.3366 \times 10^{-30}$

## 2.8 ผลกระทบของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

2.8.1 ผลกระทบต่อสุขภาพ เมื่อได้รับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยการหายใจที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 20 พีพีเอ็มขึ้นไป จะทำให้ระคายเคืองหายใจไม่ออก อาเจียน และถ้าได้สัมผัสแบบเฉียบพลันที่ความเข้มข้นประมาณ 50 พีพีเอ็ม จะทำให้ระคายเคืองจมูกและคอ ทำให้ไอและน้ำมูกไหล ที่ระดับนี้ผู้ที่ได้รับจะสามารถทนได้ไม่เกิน 15 นาที ถ้าได้รับพิษแบบเฉียบพลัน จะก่อให้เกิดโรคระบบทางเดินหายใจ ตั้งแต่อาการไอเรื้อรัง ไปจนถึงการทำลายปอดอย่างถาวร ในขณะที่ความเข้มข้นระดับสูง ๆ ปอดจะไม่สามารถทำงานได้เต็มที่ จนเกิดการระคายเคืองกับหลอดลมและทำให้เกิดปอดบวมจนอาจถึงตายได้ในเวลาไม่กี่วัน [17] เมื่อปี ค.ศ. 1952 ในกรุงลอนดอนได้มีคนตายเป็นจำนวนมาก สาเหตุจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหิน [18] เรียกวิกฤตการณ์ครั้งนี้ว่า “London Blank Fog”

2.8.2 ผลกระทบต่อทัศนวิสัยในการมอง ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับไอน้ำในอากาศได้เป็นกรดซัลฟิวริก ซึ่งเป็นละอองฝอย (Aerosols) ลอยอยู่ในอากาศ ซึ่งละอองฝอยนี้จะมีผลกระทบต่อนักทัศนวิสัยในการมองเห็น

2.8.3 ผลกระทบต่อวัสดุ สิ่งก่อสร้างที่เป็นหินปูนและหินอ่อนเมื่อดูดซึ่มก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซนี้จะเข้าไปแทนที่คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ในแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เกิดเป็นแคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) ซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต จึงมีการขยายตัวในโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดขึ้น ทำให้โครงสร้างเกิดรอยร้าวและสึกกร่อนในที่สุด [19] ผลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะแตกต่างกันระหว่างเขตเมืองและอุตสาหกรรมกับเขตชนบท เช่น ในเขตชนบทมีความคงทนของสีประมาณ 12 ปี ส่วนเขตเมืองและอุตสาหกรรมมีความคงทนของสีน้อยกว่า 6 ปี เขตชนบทมีอัตราการสึกกร่อนของทองแดงประมาณ 0.1–0.6 ไมโครเมตรต่อปี ในเขตเมือง และอุตสาหกรรมเป็น 0.9 – 2.2 ไมโครเมตรต่อปี [20]

2.8.4 ฝนกรด ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศละลายผสมกับฝนกลายเป็นฝนกรดทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ พืช สัตว์และสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ

## 2.9 มาตรฐานการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ในประเทศไทยกรมควบคุมมลพิษได้กำหนดค่ามาตรฐานสำหรับโรงไฟฟ้าแม่เมาะโดยไม่ให้ปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกินกว่า 300 ไมโครกรัม-ลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง ตารางที่ ผ.ก.1 แสดงมาตรฐานอากาศเสียจากโรงงานไฟฟ้า (ใหม่) ภายในประเทศ [21]

นอกจากตารางดังกล่าวแล้วประเทศต่าง ๆ ได้เพิ่มความเข้มงวดเกี่ยวกับการตรวจสอบมลภาวะของโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงและได้วางมาตรการต่าง ๆ ขึ้นดังนี้ [22]

- ก. โรงงานที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงจะปล่อยกำมะถันออกมาได้เป็นปริมาณไม่เกินที่มาตรฐานกำหนดไว้ ทั้งนี้โดยการคัดเลือกใช้ถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ
- ข. ให้โรงงานติดตั้งเครื่องดักจับ (Scrubber) ก๊าซพิษ เช่น  $\text{NO}_x$  และ  $\text{SO}_x$  ก่อนปล่อยออกทางปล่อง
- ค. ให้เปลี่ยนไปใช้พลังงานอื่นที่มีปริมาณกำมะถันและไนโตรเจนต่ำ
- ง. ถ้าจะใช้ถ่านหิน ควรใช้เทคโนโลยีที่ได้พัฒนาแล้ว และสามารถลดปริมาณก๊าซพิษได้ดี ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าว นอกจากจะช่วยลดมลภาวะแล้วยังช่วยลดต้นทุนการผลิตอีกส่วน ซึ่งจะเห็นประโยชน์แก่ผู้ใช้เอง
- จ. หากไม่สามารถทำได้ให้ปิดโรงงาน

## 2.10 การควบคุมการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

การควบคุมการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการเผาไหม้ถ่านหินมีหลายวิธี [20]

ได้แก่

- ก. การใช้ถ่านหินที่มีกำมะถันต่ำ
- ข. การแยกกำมะถันออกจากถ่านหินก่อนการเผาไหม้
- ค. การกำจัดระหว่างการผลิตเผาไหม้ในเตาเผา
- ง. การกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์หลังการผลิตเผาไหม้ แบ่งเป็น 3 วิธี คือ [23]
- ระบบฉีดแห้ง
  - ระบบกึ่งแห้ง
  - ระบบเปียก
- จ. การเปลี่ยนถ่านหินเป็นก๊าซเชื้อเพลิงและน้ำมัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

สมการพื้นฐานของแบบจำลอง

3.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงสมการทางคณิตศาสตร์ในแบบจำลองการสั่นดาปของด้านหินผงที่พัฒนาขึ้น โดย [3] แบบจำลองจะนำไปใช้ในการจำลองกระบวนการเผาไหม้ของด้านหินผงตามรายละเอียดที่จะกล่าวถึงในบทถัดไป

นอกจากนี้ จึงได้กล่าวถึงสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับปฏิกิริยาการก่อตัวของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยพัฒนาจากพื้นฐานความรู้ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ในขั้นแรกจะกล่าวถึงสมการที่อธิบายพลศาสตร์การไหลของก๊าซในห้องเผาไหม้แบบปั่นป่วนซึ่งใช้แบบจำลอง K-E มาอธิบายพฤติกรรมดังกล่าวและจากนั้นจะเป็นสมการการเผาไหม้ของก๊าซและของแข็ง สมการแสดงการแลกเปลี่ยนมวล โมเมนตัม ความร้อน ระหว่างอนุภาคด้านหินและก๊าซร้อน สมการการถ่ายเทความร้อนในรูปของการพา การแผ่และการแผ่รังสี รวมถึงสมการอธิบายการถ่ายเทมวลสารของก๊าซชนิดต่าง ๆ

3.2 แบบจำลองของก๊าซ [3]

สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับก๊าซอยู่บนพื้นฐานของ Eulerian ซึ่งสมมูลคุณสมบัติเฉพาะเพื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมภายใต้การคำนวณและกระทำอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องโดยการนำสมการของ Reynolds ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเฉพาะที่ตำแหน่งและเวลา ซึ่งอัตราการสร้างและ Net flux ของคุณสมบัตินั้น ๆ สมการการถ่ายเทสำหรับมวล โมเมนตัม และพลังงานจะแสดงในภายหลัง

3.2.1 การไหลของอากาศพลศาสตร์ สมมุติว่าของไหลที่พิจารณาอยู่ในสถานะก๊าซและอัดตัวได้สมการอนุรักษ์มวลจะเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = S_m \tag{3.1}$$

I    II    III

เมื่อ I คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลต่อหน่วยปริมาตร

II คือ มวลที่ไหลเข้าหรือออกที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของการไหล

III คือ อัตราการสะสมสำหรับการใช้ของมวลต่อหน่วยปริมาตร

สมการการของ Navier-Stokes สำหรับการไหลของของไหลสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + S_{v,i} \quad (3.2)$$

I            II            III            IV            V            VI

I : อัตราการสะสมของโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตร

II : อัตราของโมเมนตัมที่เข้าหรือออกที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของการไหล

III: แรงโน้มถ่วงต่อหน่วยปริมาตรของของไหล (กรณีส่วนใหญ่สามารถตัดทิ้งได้ ยกเว้นสำหรับการไหลที่มี Froude number ต่ำ)

IV : เกรเดียนต์ของแรงตั้งฉากกับพื้นผิวปริมาตรควบคุมต่อหน่วยพื้นที่ซึ่งเกิดจากความดัน Hydrostatic

V : เกรเดียนต์ของแรงเฉือนสัมผัสและแรงตั้งฉากกับพื้นผิวปริมาตรควบคุมซึ่งเกิดจากความเค้นความหนืด ซึ่งอาจจะเขียนให้อยู่ในรูปของเกรเดียนต์ของความเร็วเฉลี่ย ได้ดังนี้

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

VI: อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตร (เนื่องจากการแลกเปลี่ยนมวล และโมเมนตัมระหว่างอนุภาคของแข็งกับก๊าซ) ภายในปริมาตรควบคุม

3.2.1.1 สมการความต่อเนื่องและโมเมนตัมเฉลี่ยของการไหลแบบปั่นป่วน การไหลแบบปั่นป่วนคือการเคลื่อนที่แบบยุ่งเหยิงและมีค่าไม่แน่นอนเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเมื่ออยู่ 2 วิธีที่ใช้ในการพิจารณา

วิธีที่ 1. ตัวแปรต่าง ๆ สามารถแบ่งออกเป็นค่าที่คงที่ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนที่แกว่งไปมา ดังเช่นสมการ

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ลิขสิทธิ์ทั้งหมดนี้สงวนไว้แก่นายสมชาย งามกิจ จึงแจ้งว่าเอกสารฉบับนี้มีความไม่ใช่อิงตามคำคุณสมบัตของการไหลแบบปั่นป่วนจะประกอบด้วยค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติของ

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

วิธีที่ 2. แนะนำโดย [24] วิธีนี้จะช่วยให้ง่ายในรูปแบบของสมการความต่อเนื่องเฉลี่ยโดย

$$\bar{\varnothing} = \check{\varnothing} + \varnothing'' \quad (3.6)$$

$$\check{\varnothing} = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\bar{\rho} \Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \rho \varnothing dt \quad (3.7)$$

$$\bar{\rho} \check{\varnothing} = \overline{\rho \varnothing} \quad (3.8)$$

การกำหนดนี้เราสามารถที่จะรวมไว้ในสมการความต่อเนื่อง และสมการ Navier-Stokes ดังสมการต่อไปนี้

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

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{\rho u_i u_j})}{\partial x_j} = \bar{\rho} g_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial (\bar{t}_{ij} - \overline{\rho u_i u_j})}{\partial x_j} + \bar{S}_{v,i} \quad (3.10)$$

ค่า  $\overline{\rho u_i u_j}$  จากสมการ 3.10 เรียกว่า Reynolds stresses ซึ่งเกิดขึ้นจากการไหลแบบปั่นป่วนนั่นเอง

**3.2.1.2 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน** สมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ Two equation K-ε model ของ W.P. Jones [25] เป็นที่รู้กันคืออยู่แล้วว่าแบบจำลองของ K-ε มีข้อเสียเมื่อนำไปใช้ทำนายการไหลที่มีรูปร่างที่ซับซ้อน เช่นการไหลที่มีความเร็วของอากาศวนสูง ซึ่งแบบจำลองชั้นสูง เช่นแบบจำลอง Algebraic stress และ Reynolds stresses จะดีกว่าการใช้แบบจำลอง K-ε แต่แบบจำลองที่นำมาใช้นี้มีความเสถียรสูงจึงเหมาะกับการใช้งานในกรณีที่มีการเผาไหม้

แบบจำลอง K-ε ที่นำมาใช้กับการไหลแบบปั่นป่วนในครั้งนี้เป็นไปตามข้อสมมติฐานของ Boussinesq ที่ว่า Reynolds stresses เป็นสัดส่วนกับเกรเดียนต์ของความเร็วเฉลี่ย สมการของ Boussinesq ถูกแก้ไขสามารถจะเขียนได้ดังนี้ [26] การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\overline{\rho u_i u_j} = \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j = \frac{2}{3} \delta_{ij} \left( \bar{\rho} K + \mu_{ed} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) - \mu_{ed} \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.11)$$

ซึ่ง  $K$  คือค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน เพื่อให้ง่ายขึ้นสมมุติว่าค่า  $\mu_{ed}$  คือ Eddy viscosity  $\delta_{ij}$  คือ  $3 \times 3$  Diagonal unit vector ในการไหล 3 มิติ โดยนำข้อสมมติฐานของ Boussinesq มาแทนในสมการโมเมนตัมเฉลี่ยและความเค้นเฉือนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากความหนืดเชิงโมเลกุล (Molecular viscosity) ภายในเทอมเกรเดียนต์ของความเร็ว สมการโมเมนตัมเฉลี่ยสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu_{eff} \left[ -\frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial \bar{\rho} K}{\partial x_j} \delta_{ij} + \bar{S}_{v,i} \quad (3.12)$$

$\mu_{eff}$  จากสมการข้างบนเป็นผลจากความหนืดเชิงโมเลกุลและผลจากการปั่นป่วน ในการไหลที่มีค่าความปั่นป่วนสูงค่าความหนืดเทอร์บิวลนต์ (Turbulent viscosity) จะมากกว่าค่าความหนืดเชิงโมเลกุล ( $\mu_l \ll \mu_{ed}$ ) อาจเขียนได้ดังนี้

$$\mu_{eff} \approx \mu_{ed} \quad (3.13)$$

หมายเหตุอย่างไรก็ตามผลที่เกิดขึ้นนี้ไม่สามารถใช้ได้กับบริเวณใกล้กำแพง ที่ซึ่งการไหลเป็นแบบลามินาร์

### พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นของ [27]

$$\bar{\rho} \tilde{u}_j \frac{\partial K}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu_{ed}}{\sigma_K} + \mu_l \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j'' \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - \bar{\rho} \varepsilon \quad (3.14)$$

I                      II                      III                      IV

I: การถ่ายเทพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนโดยการเคลื่อนที่เฉลี่ยของก๊าซ

II: การฟุ้งกระจายของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและงานของแรงเฉือนเนื่องจากความเค้นหนืดและการแกว่ง

คือ Prandtl / Schmidt number สำหรับการกระจายแบบปั่นป่วน

III: คืองานของความเค้นเฉือนของ Reynolds stresses อาจแสดงในรูปแบบของความเร็วได้ดังนี้

$$-\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j'' \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} = \mu_{ed} \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \bar{\rho} K \delta_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \quad (3.15)$$

IV: คือพจน์ของการสลายตัว สามารถเขียนได้ดังนี้

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

### การสลายตัวของความปั่นป่วน

การสลายตัวของความปั่นป่วน  $\varepsilon$  คืออัตราการสลายตัวของพลังงานแบบปั่นป่วน สมการการถ่ายเทของการสลายตัวของความปั่นป่วนสามารถเขียนได้ดังนี้ [25]

$$\overline{\rho u_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu_{ed}}{\sigma_\varepsilon} + \mu_1 \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} \left[ \overline{\rho u_i'' u_j''} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 2} \overline{\rho} \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (3.16)$$

ซึ่ง  $\sigma_\varepsilon$  คือ Prandtl / Schmidt number สำหรับอัตราการกระจาย และ  $C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$  และ  $C_\mu$  คือ ค่าคงที่ Eddy viscosity อาจแสดงอยู่ในเทอมของพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน และอัตราการสลายตัวของมันคือ

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

ค่าของตัวแปรที่แนะนำให้ใช้ในแบบจำลองตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ของแบบจำลองสำหรับแบบจำลองของ K- $\varepsilon$  [25]

$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_\mu$
1.0	1.3	1.44	1.92	0.99

3.2.2 สมการการถ่ายเทของปริมาณสเกลาร์ สมการการถ่ายเทของพลังงานและก๊าซที่มีการเผาไหม้สามารถเขียนในรูปแบบคล้ายสมการโมเมนตัม สมการการถ่ายเทเหล่านี้มีอยู่ 3 องค์ประกอบ 1) การพา 2) แพร่ 3) การสร้างหรือการสลายตัว

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

พจน์แรกภายในวงเล็บทางขวามือของสมการเป็นผลการแพร่ของคุณสมบัติ ( $\phi$ ) และ พจน์ที่สองเป็นผลจากความปั่นป่วน ผลของความปั่นป่วนอาจจะแสดงในรูปคล้ายกับกรณีของโมเมนตัมได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\overline{\rho u_j \tilde{\phi}})}{\partial x_j} = \frac{\mu_{ed}}{\sigma_{\phi,t}} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x_j} \quad (3.19)$$

ซึ่ง  $\sigma_{\phi,t}$  คือ Schmidt number ในกรณีของก๊าซ หรือค่า Prandtl number ในกรณีของ เอนทัลปี จากสมการ 3.18 สามารถเขียนได้ดังนี้

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

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่มีการเผาไหม้จะมีข้อสมมุติว่า Schmidt และ Prandtl number เป็นค่าคงที่

3.2.3 สมการในรูปของพิกัดทรงกระบอก สมการที่ใช้ในการคำนวณถูกเขียนอยู่ในรูป พิกัดทรงกระบอกโดยพิจารณาต่อเป็นแบบสมมาตรได้ตามสมการข้างล่างนี้

#### 3.2.3.1 สมการความต่อเนื่อง

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

$\bar{S}_m$  คือ แหล่งในการสร้างสำหรับการถ่ายเทของอนุภาคในระหว่างการเผาไหม้

#### 3.2.3.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

ทิศทางการแนวรัศมี

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

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

และ  $\bar{S}_{m,v}$  คือ การถ่ายโอนของโมเมนตัมที่เกิดขึ้นในปริมาตรควบคุมโดยอนุภาคของแข็งทิศทางตามแนวรัศมี

ทิศทางการแนวแกน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าจะวิธีใดๆทั้งสิ้น อีกสำเนา  $\bar{S}_u = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\mu_{eff} \frac{\partial\tilde{u}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_{eff} \frac{\partial\tilde{u}}{\partial z} \right)$  อังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (3.25)

และ  $\bar{S}_{m,u}$  คือ การถ่ายโอนของโมเมนตัมเกิดขึ้นในปริมาตรควบคุมโดยอนุภาคของแข็งทิศทางตามแนวแกน

ทิศทางตามแนวเส้นรอบวง (ทิศ  $\theta$ )

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

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

และ  $\bar{S}_{m,w}$  คือ การถ่ายโอนของโมเมนตัมที่เกิดขึ้นในปริมาตรควบคุมโดยอนุภาคของแข็งทิศทางตามแนวเส้นรอบวง

**3.2.3.3 สมการการถ่ายเทความร้อนปั่นป่วน พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและอัตราการสลายตัวของมันสามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบได้ดังนี้**  
**สมการการเคลื่อนย้ายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน**

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

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

**สมการการเคลื่อนย้ายของอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน**

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

**3.2.3.4 การเคลื่อนย้ายของสเกลาร์**

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

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

3.2.4 การคำนวณค่าที่บริเวณผนัง บริเวณที่ใกล้ผนังจะใช้สมการก่อนหน้าในการคำนวณค่าจะได้ค่าที่ไม่ถูกต้อง ซึ่งมีอยู่ 2 ข้อสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณการถ่ายเทของโมเมนตัม พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและความร้อนที่บริเวณใกล้ผนังนั้นคือ 1) ความเค้นเฉือนของของไหลเท่ากับความเค้นเฉือนที่ผนัง 2) ผลของการพาและแพร่มีปริมาณน้อยดังนั้น อัตราการเกิดพลังงานความปั่นป่วนอาจจะเท่ากับอัตราการสลายตัว [28]

$y^+$  คือ ตัวแปรไร้มิติของการไหลใกล้ผนังสามารถเขียนได้ดังนี้

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

ซึ่ง  $y$  คือระยะทางห่างจากผนัง และ  $u_\tau$  คือสัดส่วนของความเร็วสามารถเขียนได้ดังนี้

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

ซึ่ง  $\tau_w$  คือ ความเค้นเฉือนที่ผนัง ขอบเขตของการไหลใกล้ผนังสามารถพิจารณาได้ 2 บริเวณคือ

- 1)  $0 < y^+ < 11.63$ : เป็นบริเวณของการไหลแบบราบเรียบซึ่งการฟุ้งกระจายแบบราบเรียบคือส่วนสำคัญ ( $\mu_1 \gg \mu_t$ ) และสมมุติการไหลเป็นแบบ Newtonian
- 2)  $11.63 < y^+ < 300$ : เป็นบริเวณของการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งการฟุ้งกระจายแบบปั่นป่วนคือส่วนสำคัญ ( $\mu_t \gg \mu_1$ )

3.2.4.1 สมการอนุพันธ์โมเมนตัมที่บริเวณใกล้ผนัง ความเค้นเฉือนของการอนุพันธ์โมเมนตัมที่บริเวณใกล้ผนัง มีอยู่ 2 ขอบเขต คือ

- 1) ชั้นการไหลแบบราบเรียบ: ในชั้นนี้ความเค้นเฉือน คือผลที่ได้จากความหนืด และเกรเดียนต์ของความเร็ว ซึ่งจะขนานกับผนัง ( $\tau = \mu_1 \frac{d\tilde{u}}{dy} = \tau_w$ )
- 2) ชั้นการไหลแบบปั่นป่วน: ในชั้นนี้ความเค้นเฉือนเกิดขึ้นโดย  $\tau = \mu_t \frac{d\tilde{u}}{dy} = \tau_w$  ซึ่งค่า

Eddy viscosity มีค่าเท่ากับ  $\mu_t = \bar{\rho} \kappa u_\tau$  [28] และ  $\kappa$  เป็นค่าคงที่ของ Von Karman รูปแบบของความเค้นเฉือนได้มาจาก

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

3.2.4.2 สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและการสลายตัวที่บริเวณใกล้ผนัง  
สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนไม่คำนวณผลของการพาและการแพร่ อัตราการก่อตัวของ  
พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเท่ากับอัตราการสลายตัว

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

เมื่อใช้กับข้อสมมติฐานของ Boussinesq สำหรับการไหลที่ใกล้ผนังความเค้นเฉือนสามารถ  
เขียนได้ดังนี้

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

โดยพิจารณาความเค้นเฉือนที่ใกล้ผนังและชั้นของการไหล อัตราการก่อตัวและอัตราการ  
สลายตัวของพลังงานจลน์ที่บริเวณใกล้ผนังสามารถเขียนได้ดังนี้

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

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

3.2.4.3 พลังงานของการถ่ายเท สมมติว่าฟลักซ์ของความร้อน  $\dot{q}_b$  ในชั้นของ  
ขอบเขตเป็นค่าคงที่สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\dot{q}_b = \Gamma_{eff} \frac{dh}{dy} = \dot{q}_w, \Gamma_{eff} = \Gamma + \Gamma_t \quad (3.40)$$

ซึ่ง  $\Gamma_{eff}$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนประสิทธิผล

1) ในชั้นของการไหลแบบราบเรียบ ( $0 < y^+ < 11.63$ )  $\dot{q}_w = \frac{\mu}{\sigma_h} \frac{dh}{dy}$  ซึ่ง  $\sigma_h$  คือ Prandtl number

ของการไหลแบบราบเรียบ

2) ในชั้นของการไหลแบบปั่นป่วน ( $11.63 < y^+ < 300$ )  $\dot{q}_w = \frac{\mu_t}{\sigma_{h,t}} \frac{d\tilde{h}}{dy}$  ซึ่ง  $\sigma_{h,t}$  คือ Prandtl

number ของการไหลแบบปั่นป่วน [29] Jayatilleke ฟลักซ์ของความร้อนสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\dot{q}_w = \frac{\bar{\rho} u_\tau (\tilde{h} + h_w)}{\left[ u^+ + P \left( \frac{\sigma_\phi}{\sigma_{\phi,t}} \right) \right]} \quad (3.41)$$

สมการ 3.42 แทนความต้านทานของการถ่ายเทความร้อน

$$\text{ซึ่ง} \quad P\left(\frac{\sigma_\phi}{\sigma_{\phi,t}}\right) = 9.29 \left[ \frac{\sigma_\phi^{3/4}}{\sigma_{\phi,t}} + 1 \right] \quad (3.42)$$

3.2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้ของก๊าซ การเผาไหม้ของก๊าซโดยใช้ถ่านหินผงไม่สามารถอธิบายได้ด้วยการเผาไหม้แบบ Premixed หรือการแพร่กระจาย ได้มีแบบจำลองอยู่หลายวิธีที่ได้เสนอการจำลองการเผาไหม้ของถ่านหินผง [30] แบบจำลองของ [11] ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ง่ายและใช้เวลาคำนวณได้รวดเร็วสำหรับใช้ในการฝึกหัด อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหยถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับอัตราการเสื่อมสลายของกระแสน้ำมัน ซึ่งเปลี่ยนแปลงส่วนกลับของเวลาของ Large scale eddies โดยขึ้นอยู่กับค่า  $\frac{\varepsilon}{K}$  แบบจำลองจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของออกซิเจน เชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ค่าอัตราของปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังนี้

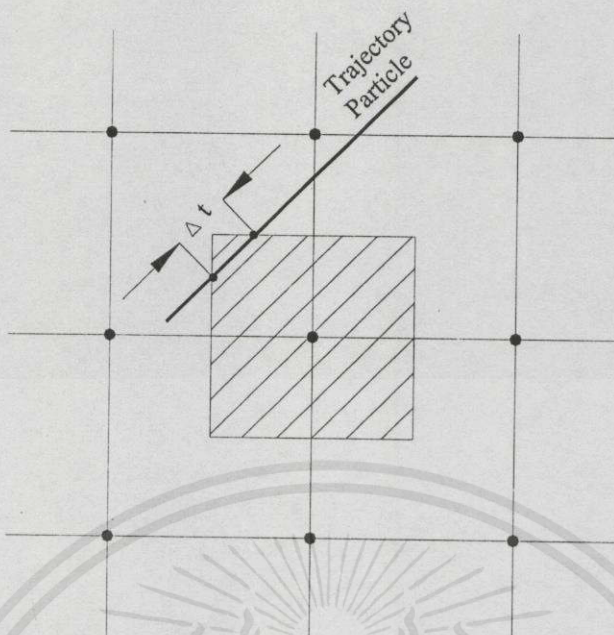
$$R_v = ACOM \rho \frac{\varepsilon}{K} \min\left(\tilde{\phi}_{fuel}, \frac{\tilde{\phi}_{ox}}{S_i}, BCOM \frac{\tilde{\phi}_{pr}}{1+S_i}\right) \quad (3.43)$$

$R_v$  คือ ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหย ACOM และ BCOM คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง  $\phi_{fuel}$  คือ สัดส่วนโดยมวล (Mass fraction) ของสารระเหย  $\phi_{ox}$  คือ สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจน  $\phi_{pr}$  คือ สัดส่วนโดยมวลของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ ซึ่งประกอบด้วยไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ และ  $S_i$  คือ ปริมาณ Stoichiometric ratio ของสารระเหย

### 3.3 แบบจำลองของอนุภาค [3]

การกระจายตัวของอนุภาคถ่านหินในห้องเผาไหม้ถูกจำลองโดยใช้วิธี Lagrangian สมมติว่าอนุภาคของถ่านหินผงถูกปล่อยเข้าไปมีลักษณะเป็นทรงกลมและความหนาแน่นที่ทางเข้ามีค่าคงที่ โดยกำหนดตำแหน่งแน่นอน การกระจายขนาดของถ่านหินผงเหล่านั้นถูกแบ่งเป็นช่วง ๆ โดยแต่ละช่วงจะแทนด้วยขนาดเฉลี่ยของช่วงนั้น ๆ

การถ่ายเทของมวล โมเมนตัม และพลังงานของอนุภาคและก๊าซเกี่ยวข้องกับตำแหน่ง ซึ่ง Source terms สำหรับการคำนวณด้วย Eulerian สามารถหาค่าได้โดยใช้ Partial Source In Cell Techniques (PSICT) [30] จากรูปที่ 3.1 การกระจายตัวของอนุภาคเพื่อหาคำตอบสำหรับขนาดของอนุภาคและตำแหน่งเริ่มต้นโดยวิธีของ Lagrangian ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 การกระจายตัวของอนุภาคโดยใช้วิธี Lagrangian ผ่านเซลล์

จากรูป ปริมาณของมวลโมเมนต์ัม และพลังงานที่ถ่ายเทจากอนุภาคคือ การอินทิเกรตอัตรา การถ่ายเทดังกล่าวในช่วง  $\Delta t$

### 3.3.1 สมการอนุรักษ์มวล การถ่ายเทมวลจากอนุภาคสู่ก๊าซสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dm_p}{dt} = -R_m \quad (3.44)$$

ซึ่ง  $R_m$  คืออัตราเชิงปริมาตรของ Mass efflux จากอนุภาคสู่ก๊าซโดยการปลดปล่อยสาร ระเหยหรือซาร์ในการเผาไหม้ เครื่องหมายลบหน้า  $R_m$  หมายความว่ามวลของเฟสอนุภาคลดลง

3.3.1.1 แบบจำลองการปล่อยสารระเหย การศึกษาหาค่าการปลดปล่อยสารระเหย ในอดีตบ่งชี้ว่าแบบจำลองของ [31] มีความเหมาะสมสำหรับจำลองการปลดปล่อยสารระเหยของ ถ่านหิน ได้มีการคิดแบบจำลองนี้โดยอัตราของสารระเหยที่ปล่อยออกมาถูกอธิบายในรูปของ Arrhenius function ร่วมกับกลุ่มของตัวแปรที่ได้จากการสังเกตในการทดลอง เขียนสมการได้ดังนี้

$$R_m = \frac{dV}{dt} = K_A (V^* - V) \quad (3.45)$$

$V$  คือปริมาณสะสมของสารระเหยที่ปล่อยออกมา  $V^*$  คือ ปริมาณทั้งหมดของสารระเหย ออกมาในถ่านหิน และค่า  $K_A$  คือ ค่าที่แสดงในรูปของ Arrhenius ได้ดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกหนึ่งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_A = k_0 \exp\left(-\frac{E_{vol}}{R_u T}\right) \quad (3.46)$$

$R_u$  คือค่าคงที่สากลของก๊าซ (Universal gas constant)  $T$  คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์  $k_0$  คือค่าคงที่ของปฏิกิริยาสำหรับ Devolatilization ซึ่งหาได้จากการทดลองและให้ไว้ในบทที่ 5 และ  $E_{vol}$  คือค่าพลังงานการกระตุ้นของถ่านหิน

**3.3.1.2 แบบจำลองการเผาไหม้ของซาร์** การจำลองการเผาไหม้ของซาร์เสนอโดย [32] ซึ่งสมมุติว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาจะรวมตัวกับออกซิเจนอย่างสมบูรณ์ได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แบบจำลองดังกล่าวใช้อธิบายอัตราการเผาไหม้ของซาร์ ซึ่งอัตรานี้ควบคุมโดย 2 กระบวนการ คือ อัตราการขนส่งของซาร์ และอัตราการแพร่ของออกซิเจนที่พื้นผิวของอนุภาคถ่านหิน

### ปฏิกิริยาของซาร์เกิดขึ้นจากจลนพลศาสตร์ทางเคมี

อัตราปฏิกิริยาพลังงานจลน์ของซาร์และออกซิเจนอาจจะเขียนได้ดังนี้

$$R_c = K_c \{(P_{O_2})_o\}^n \quad (3.47)$$

ซึ่ง

$$K_c = K_0 \exp\left(-\frac{E}{R_u T}\right)^n \quad (3.48)$$

$P_{O_2}$  คือความดันของออกซิเจนที่พื้นผิวของอนุภาค และ  $K_c$  คือสัมประสิทธิ์ของอัตราปฏิกิริยาทางเคมีกำลัง  $n$  มีค่าเท่ากับ 1 ถูกแนะนำโดย [14]  $K_0$  คือ Frequency factor สำหรับปฏิกิริยาของซาร์ และ  $E$  คือผลกระทบบกับพลังงานการกระตุ้นปฏิกิริยาของซาร์

### ปฏิกิริยาของซาร์เกิดขึ้นด้วยการแพร่ของออกซิเจน

แบบจำลองสำหรับอัตราการเผาไหม้ของอนุภาคที่เกิดขึ้นด้วยการแพร่ของออกซิเจนเป็นข้อกำหนดโดย [14]

$$R_c = K_d \{(P_{O_2})_\infty - (P_{O_2})_o\} \quad (3.49)$$

ซึ่ง

$$K_d = \frac{D_c M_c \phi}{\left\{ \frac{R_d}{2} \left( \frac{T_p + T_g}{2} \right) \right\}} \quad (3.50)$$

และ

$$D_c = D_0 \left( \frac{P_0}{P} \right) \left( \frac{T_g}{T_0} \right)^{1.75} \quad (3.51)$$

$(P_{O_2})_{\infty}$  คือ ความดันย่อยของออกซิเจน (Partial pressure) ของก๊าซรอบข้างที่พื้นผิวของอนุภาค  $M_c$  คือ มวลของอนุภาคคาร์บอน  $\phi$  คือ ตัวแปรของกลไกกำหนดให้เท่ากับ 1.0 สำหรับการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์  $R_d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค  $T_p$  และ  $T_g$  คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ของอนุภาคและก๊าซตามลำดับ  $D_0$ ,  $P_0$  และ  $T_0$  ตามลำดับ คือ ค่าของการแพร่กระจายความดัน และอุณหภูมิมีค่าดังนี้  $(3.13 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$   $(1.013 \times 10^5 \text{ Pa})$  และ  $(1500 \text{ K})$  ตามลำดับ

### อัตราการเผาไหม้ของชาร์จากจลนพลศาสตร์ทางเคมีและการแพร่ของออกซิเจน

อัตราปฏิกิริยารวมเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขการเกิดปฏิกิริยาของชาร์ ถ้าอุณหภูมิสูงหรือค่า Reactivity variety ของถ่านหินมีค่าสูง อัตราปฏิกิริยารวมถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่ของออกซิเจน แต่ถ้ามีบริเวณที่มีออกซิเจนมากกับอุณหภูมิของอนุภาคต่ำอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอัตราจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาไปยังพื้นผิวของถ่านหิน  $K_r$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราทั้งหมดคาดว่าจะเขียนได้ดังนี้

$$K_r = \frac{1}{\left\{ \left( \frac{1}{K_c} \right) + \left( \frac{1}{K_d} \right) \right\}} \quad (3.52)$$

อัตราการเผาไหม้สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค ( $d_p$ ) สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$\frac{\partial m}{\partial t} = K_r \pi d_p^2 P X_{O_2} \quad (3.53)$$

ซึ่ง  $P$  คือ ความดันของก๊าซ  $X_{O_2}$  คือ สัดส่วนโดยโมลของออกซิเจนในบริเวณก๊าซรอบข้าง

### 3.3.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัมของอนุภาค

3.3.2.1 การเคลื่อนที่เฉลี่ยของอนุภาค การสมดุลโมเมนตัมของอนุภาคที่เคลื่อนที่อาจจะเขียนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dm_p \tilde{u}_i}{dt} = \sum \bar{F}_i \quad (3.54)$$

พจน์ทางด้านขวามือของสมการเป็นผลจากแรงกระทำภายนอก (การเปลี่ยนแปลงของความดัน ผลของ Coriolis ผลของ Magnus แรงโน้มถ่วงและแรงฉุดที่เกิดขึ้น โดยความแตกต่างของความเร็วระหว่างอนุภาคและการไหลแบบปั่นป่วน) ในการเผาไหม้ของถ่านหินสมมุติว่าแรงที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความดัน แรงโน้มถ่วงและผลของ Magnus มีค่าน้อยสามารถตัดทิ้งในคำนวณได้ [30] ดังนั้นแรงฉุดอาจจะเขียนในรูปสมการได้ดังนี้ [33]

$$F_d = C_D \rho \frac{A_p}{2} (\tilde{U}_g - \tilde{U}_p) |\tilde{U}_g - \tilde{U}_p| \quad (3.55)$$

ซึ่ง 
$$C_D = (1 + 0.15 \text{Re}_p^{0.687}) \frac{\text{Re}_p}{24} \quad (3.56)$$

$\tilde{U}_g$  คือค่าความเร็วที่เวลาเฉลี่ยของก๊าซ  $\tilde{U}_p$  คือค่าความเร็วที่เวลาเฉลี่ยของอนุภาคถ่านหิน  $A_p$  คือพื้นที่หน้าตัดของอนุภาค  $\rho$  คือค่าความหนาแน่นของก๊าซ  $C_D$  คือสัมประสิทธิ์แรงฉุด และ  $\text{Re}_p$  คือ ค่า Reynolds number ของอนุภาคกำหนดโดย :

$$\text{Re}_p = \frac{\rho |\tilde{U}_g - \tilde{U}_p| d_p}{\mu} \quad (3.57)$$

ซึ่ง  $\mu$  คือความหนืดจลนพลศาสตร์ของก๊าซ และ  $d_p$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคสมการสำหรับสมดุลของโมเมนตัมอาจจะเขียนในรูปพิกัดทรงกระบอกได้ดังนี้

ทิศทางการแนวแกน : 
$$\frac{d\tilde{u}_p}{dt} = -\alpha (\tilde{u}_p - \tilde{u}_g) \quad (3.58)$$

ทิศทางการแนวรัศมี : 
$$\frac{d\tilde{v}_p}{dt} = -\alpha (\tilde{v}_p - \tilde{v}_g) + \frac{\tilde{w}_p^2}{r_p} \quad (3.59)$$

ทิศทางการแนวเชิงมุม : 
$$\frac{d\tilde{w}_p}{dt} = -\alpha (\tilde{w}_p - \tilde{w}_g) + \frac{\tilde{v}_p \tilde{w}_p}{r_p} \quad (3.60)$$

ซึ่ง  $\alpha = \frac{18\mu C_d \text{Re}_p}{24\rho_p d_p^2}$  และ  $r_p$  คือระยะทางจากแกนสมมาตรของอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

3.3.2.2 การกระจายของอนุภาคเกิดขึ้นจากความปั่นป่วน แบบจำลองของป้า Lockwood [9] ใช้อธิบายการกระจายตัวของอนุภาคเกิดขึ้นจากความปั่นป่วน ซึ่งความเร็วในการ

กระจายของอนุภาคสมมุติว่ามีความสัมพันธ์กับความเร็วของก๊าซที่แกว่งไปมาสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$u_{disp.} = c_{1d} (\overline{u''^2})^{1/2} \quad (3.61)$$

$$v_{disp.} = c_{2d} (\overline{v''^2})^{1/2} \quad (3.62)$$

ซึ่งค่า  $C_{1d}$  และ  $C_{2d}$  คือค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองซึ่งถูกสมมุติโดย [9] เท่ากับ 1 ประยุกต์กับข้อสมมติฐานของ Boussinesq ความเร็วที่แกว่งไปมาสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\overline{u''^2} = -c_a 2 \frac{\mu_t}{\rho} \left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} \right) + \frac{2}{3} K \quad (3.63)$$

$$\overline{v''^2} = -c_b 2 \frac{\mu_t}{\rho} \left( \frac{\partial \tilde{v}}{\partial r} \right) + \frac{2}{3} K \quad (3.64)$$

ซึ่งค่า  $C_a$  และ  $C_b$  คือค่าคงที่เฉพาะเท่ากับ 1 ความเร็วของการกระจายสามารถแสดงอยู่ในพจน์ของการเปลี่ยนแปลงความเร็วเฉลี่ยและพลังงานจลน์

$$u_{disp.} = c_1 \left( -c_a 2 \frac{\mu_t}{\rho} \left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} \right) + \frac{2}{3} K \right)^{1/2} \quad (3.65)$$

$$v_{disp.} = c_2 \left( -c_b 2 \frac{\mu_t}{\rho} \left( \frac{\partial \tilde{v}}{\partial r} \right) + \frac{2}{3} K \right)^{1/2} \quad (3.66)$$

ดังนั้น

$$\frac{d\tilde{u}_p}{dt} = -\alpha (\tilde{u}_p \pm u_{disp.} - \tilde{u}_g) \quad (3.67)$$

$$\frac{d\tilde{v}_p}{dt} = -\alpha (\tilde{v}_p \pm v_{disp.} - \tilde{v}_g) + \frac{\tilde{v}_p^2}{r_p} \quad (3.68)$$

สมมุติว่าการไหลเป็นแบบสมมาตรตามแนวแกน ผลก่อให้เกิดการกระจายของอนุภาคในทิศทางตามแนวเชิงมุมสามารถตั้งได้

$$\frac{d\tilde{w}_p}{dt} = -\alpha (\tilde{w}_p - \tilde{w}_g) + \frac{\tilde{v}_p \tilde{w}_p}{r_p} \quad (3.69)$$

แบบจำลองสำหรับการกระจายของอนุภาคในการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งการทำนายเป็นวิธีของ [34]

3.3.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนภายในอนุภาคเป็นจากการรวมการถ่ายเทความร้อนของอนุภาคและความร้อนที่เกิดขึ้นโดยการเผาไหม้ของคาร์บอนที่ปล่อยออกมากับการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการเผาไหม้ของคาร์บอนและความร้อนของการระเหยในระหว่างกระบวนการปล่อยสารระเหยสมการสมดุลอุณหพลศาสตร์กลายเป็น

$$\frac{d(m_p c_p T_p)}{dt} = m_p \dot{Q}_t - c_p T_p \left( -\frac{dm_p}{dt} \right) - L_v \frac{dm_p}{dt} \quad (3.70)$$

ซึ่ง

$$\dot{Q}_t = \dot{Q}_{convec.} + \dot{Q}_{rad.} + \dot{Q}_{comb.}$$

$L_v$  คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นก๊าซของถ่านหิน

$c_p$  คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของอนุภาค

$T_p$  คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ของอนุภาค

การคำนวณสำหรับการพาความร้อน แผ่รังสี และแหล่งกำเนิดความร้อนเนื่องจากการเผาไหม้ได้ให้ไว้ดังนี้

3.3.3.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา สมมติว่ารูปแบบของอุณหภูมิที่พื้นผิวของอนุภาคและภายในบรรยากาศของก๊าซรอบข้าง ซึ่งอัตราการพาความร้อนสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{convec.} = \frac{\pi d_p^2 h (T_g - T_p)}{m_p} \quad (3.71)$$

$d_p$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค  $m_p$  คือมวลของอนุภาค และ  $h$  คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ให้เท่ากับ

$$h = Nu \frac{k_g}{d_p} \quad (3.72)$$

ซึ่ง  $Nu = 2.0 + 0.6 Re^{0.5} Pr^{0.33}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การนำความร้อนของก๊าซ  $k_g$  ซึ่งแนะนำโดย [32] เขียนได้ดังนี้

$$k_g = 6.379 \times 10^{-5} T_g + 6.446 \times 10^{-3}$$

3.3.3.2 การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นโดยการแผ่รังสี สมมติให้ระบบเป็นแบบ Gray system คือการแผ่รังสีที่ Emissivity กับ Absorptivity เท่ากัน และอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลม สมการการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นโดยการแผ่รังสี สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{rad} = \pi \sigma \epsilon_p \frac{d_p^2}{m_p} (T_R^4 - T_p^4) \quad (3.73)$$

ซึ่ง  $\sigma$  คือค่าคงที่ของ Stefan-Boltzman เท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8} \text{ J/m}^2 \text{ sK}^4$   $\epsilon_p$  คือการแผ่ของพื้นผิวอนุภาค  $T_p$  คือ อุณหภูมิของอนุภาค และ  $T_R$  อุณหภูมิจากการแผ่รังสี

3.3.3.3 แหล่งกำเนิดความร้อนของผลิตภัณฑ์ด้วยการเผาไหม้ของซาร์  $H_c$  คือค่าความร้อนของคาร์บอนภายในซาร์ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{comb.} = \frac{\eta H_c}{m_p} \left( -\frac{dm_p}{dt} \right) \quad (3.74)$$

ซึ่ง  $\eta$  คือ สัดส่วนของความร้อนที่เข้าสู่อนุภาคต่อความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้โดยอนุภาค ปลดปล่อยความร้อนออกสู่ก๊าซรอบข้างซึ่งสัมพันธ์กับปฏิกิริยาเคมี, Field [14]

### 3.4 แบบจำลองการแผ่รังสีความร้อน [3]

สำหรับการหาค่าของอุณหภูมิการแผ่รังสีได้ใช้ แบบจำลองการกระจายตัวของการแผ่รังสีแบบไม่เสถียร โดย [35] ในการศึกษา ซึ่งร่วมกับ เทคนิคที่เรียกว่า Truncated moment expansion [30, 36] แบบจำลองสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{3K_e} \nabla T_R^4 \right) = (K_g + \bar{\epsilon}_p K_p') T_R^4 - K_g T_g^4 - \bar{\epsilon}_p K_p' T_p^4 \quad (3.75)$$

ซึ่ง

$$T_R = \frac{1}{4\sigma} \int_{4\pi} I d\omega \quad (3.76)$$

และ

$$K_e = K_g + K_p' [\bar{\epsilon}_p + (1 - \bar{\epsilon}_p)(1 - f)] \quad (3.77)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 $T_R$  คืออุณหภูมิการแผ่รังสี  $\sigma$  คือค่าคงที่ของ Stefan-Boltzman  $T_g$  คือ อุณหภูมิสมบูรณ์  
 ไม่ว่าจะมิใช่ก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 ของก๊าซ  $T_p$  คืออุณหภูมิสมบูรณ์เฉลี่ยของอนุภาค  $K_g$  คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของก๊าซ  $K_p'$   
 คือพื้นที่ที่ภาพฉายของอนุภาคด้วยขนาดทั้งหมดต่อ 1 หน่วยปริมาตรของก๊าซ  $K_e$  คือสัมประสิทธิ์

การดูดกลืนของของผสม ก๊าซ และ อนุภาคถ่านหิน  $f$  คือตัวแปรของการกระจาย และ  $\bar{\epsilon}_p$  คือการแผ่รังสีเฉลี่ยของอนุภาคโดยเขียนได้ดังนี้  $\epsilon_p = x_{ub} + 0.6(1 - x_{ub})$  ซึ่ง  $x_{ub}$  คือ สัดส่วนที่ไม่ได้เผาไหม้ของมวลดั้งเดิมของซาร์

การแผ่รังสีความร้อนที่บริเวณผนังสามารถ คำนวณได้โดยการสมมติว่าผนังมีการแผ่รังสีเท่ากับการดูดกลืนรังสีและที่บสำหรับรังสีดังนั้น  $\epsilon_w + r_w = 1$  สมการสำหรับเงื่อนไขที่ผนังอาจจะเขียนได้ดังนี้

$$-\frac{1}{3K_e} \frac{\partial T_R^4}{\partial n} = \frac{1}{2} \frac{\{(1 - \bar{r}_w)T_R^4 - \bar{\epsilon}_w \bar{T}_w^4\}}{(1 + \bar{r}_w)} \tag{3.78}$$

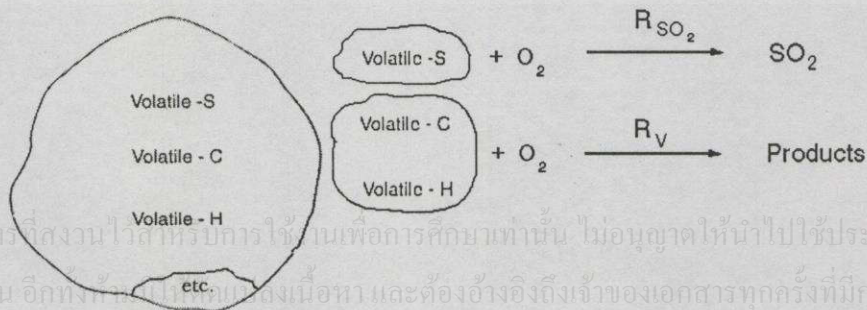
ซึ่ง  $\bar{T}_w$  คืออุณหภูมิสมบูรณ์เฉลี่ยของผนัง  $\bar{\epsilon}_w$  คือการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ผนัง และ  $\bar{r}_w$  คือการสะท้อนรังสีเฉลี่ยที่ผนัง อัตราสุทธิของการถ่ายเทพลังงานเนื่องมาจากการแผ่รังสีของก๊าซและอนุภาคต่อ 1 หน่วยปริมาตรอาจจะแสดงได้ดังนี้

$$S_{g,h} = 4\sigma K_g (T_R^4 - T_g^4) \tag{3.79}$$

และ 
$$S_{p,h} = 4\sigma \bar{\epsilon}_p K'_p (T_R^4 - T_g^4) \tag{3.80}$$

### 3.5 แบบจำลองของออกไซด์ของกำมะถัน [3, 4, 5, 37]

ถ่านหินเมื่อถูกทำให้ร้อนจะปลดปล่อยสารระเหยโดยส่วนที่เหลือในรูปของแข็งคือคาร์บอนและขี้เถ้า สารระเหยที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบจะเผาไหม้โดยรวมตัวกับอากาศจะก่อให้เกิดออกไซด์ของกำมะถันและก๊าซอื่น ๆ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ได้สมมติว่ากำมะถันในสารระเหยเมื่อเผาไหม้ได้รวมตัวกับออกซิเจนด้วยอัตราการรวมตัวที่สัมพันธ์กับอัตราการผสมกันของกระแสปั่นป่วน เนื่องจากอัตราทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาดังกล่าวสูงกว่าอัตราการผสมของกระแสปั่นป่วน [37] จากรูปที่ 3.2 สามารถอธิบายการเกิดออกไซด์ของกำมะถันที่ประกอบอยู่ภายในสารระเหยได้



รูปที่ 3.2 การเกิดออกไซด์ของกำมะถันของการเผาไหม้สารระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอสงวนเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากปฏิกิริยาดังรูปที่ 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ได้ใช้สมมติฐานที่ว่ากำมะถันในสารระเหยรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั้งหมด สมมติฐานดังกล่าวเป็นผลจากการสังเกตที่ว่าก๊าซซัลเฟอร์มอนอกไซด์ ซึ่งเกิดขึ้นในห้องเผาไหม้มีสถานะไม่เสถียรและทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว ขณะที่ก๊าซ  $SO_2$  นั้นถูกสร้างเพียงเล็กน้อย [5] การเผาไหม้ของถ่านหินภายในห้องเผาไหม้ที่สารตั้งต้นไม่ได้ผสมกันมาก่อนนั้น เมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้สูงกว่า  $1000^\circ C$  อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชิงจลพลศาสตร์จะสูงกว่าอัตราการผสมกันของสารตั้งต้นดังนั้นจึงทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วเมื่อผสมกัน การผสมกันแบบปั่นป่วนจึงมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาทั้งหมดกล่าวคือปฏิกิริยาจะถูกควบคุมโดยอัตราการผสมของความปั่นป่วนซึ่งยังเป็นสมมติฐานที่ใช้สำหรับเชื้อเพลิง และอากาศที่เข้ามาผสมกันในห้องเผาไหม้ (Non-premixed combustion) เช่นกัน ความสัมพันธ์พื้นฐานระหว่างอัตราการก่อตัวของซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับอัตราการเผาไหม้ของสารระเหยคือสมการข้างล่างนี้

$$R_{SO_2} = x_s \cdot R_v \quad (3.81)$$

$R_{SO_2}$  คือค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์  $x_s$  คือสัดส่วนโดยมวลของกำมะถัน  $R_v$  คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหย ซึ่งได้จากสมการ 3.43

## การประยุกต์วิธี Finite volume กับการก่อตัวของ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายในห้องเผาไหม้ของถ่านหินผง

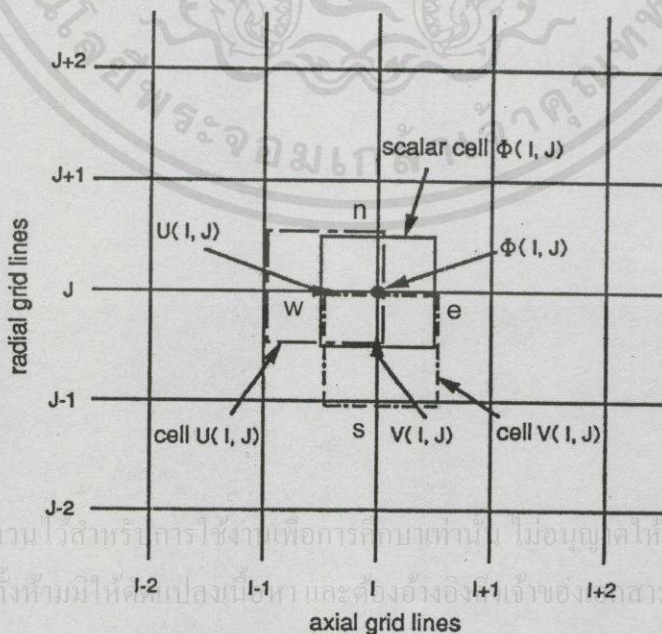
### 4.1 การประยุกต์ใช้วิธี Finite volume [10]

สมการที่ให้ไว้พิสูจน์ในบทที่ 3 เป็นการพิจารณาสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบการเผาไหม้ของถ่านหินผงที่เกิดขึ้นในปริมาตรควบคุม (Control volume) สมการที่นำมาใช้จะอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย โดยพิจารณาการแก้ปัญหาด้วยวิธี Finite volume ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical method) รูปแบบต่างๆ ไปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของระบบการเผาไหม้ถ่านหินผงสามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปของการพา การฟุ้งกระจาย และ Source term ให้อยู่รวมกันดังนี้

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

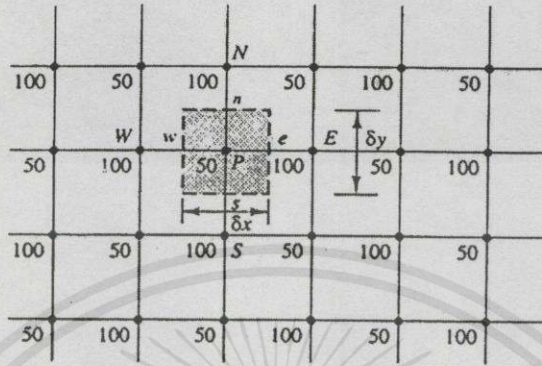
$S_{g, \phi}$  คือ Source term ของก๊าซ

$S_{p, \phi}$  คือ Source term ของอนุภาคของแข็ง



รูปที่ 4.1 เซลล์ของสเกลาร์และเวกเตอร์ในระบบ Staggered grid [38]

การแบ่งกริดของห้องเผาไหม้เป็นแบบ Staggered grid ดังรูปที่ 4.1 ในการแบ่งกริดแบบธรรมดาจะเกิดปัญหา เช่น บางกรณีสนามความดันอาจจะเกิดเป็น Checker-board ซึ่งค่าความสูงต่ำของความดันสามารถแสดงได้ดังรูป 4.2 ที่เกิดปัญหาของ Checker-board



รูปที่ 4.2 สนามความดันที่เกิด Checker-board [38]

ความดันที่ e และ w หาค่าได้โดย Linear interpolation เทอมของเกรเดียนต์ของความดัน  $\partial p / \partial x$  ในสมการ u-momentum เขียนได้ดังนี้

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

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

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{p_N - p_S}{2\delta y} \quad (4.3)$$

นำค่าความดันที่รูป 4.2 แทนลงในสมการ 4.2 และ 4.3 จะพบว่า เกรเดียนต์ทุก ๆ จุดมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้คำตอบที่ได้มาไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในความเป็นจริง เป็นผลมาจากเกรเดียนต์ของความดัน ในโมเมนต์หายไป ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวแบบจำลองห้องเผาไหม้นี้จึงได้แบ่งกริดเป็นแบบ Staggered grid เสนอโดย [11]

การแก้ปัญหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Finite volume จะจัดสมการให้อยู่ในรูปแบบของปริมาตรควบคุมโดยทำการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยภายในขอบเขตของปริมาตรที่มีขนาดจำกัด ซึ่งสมการต่างๆ ไปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยสามารถเขียนได้ดังนี้ ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \rho \bar{u}_i \bar{\Phi} - \Gamma_{\phi,eff} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x_i} \right] - S_{\phi,t} = 0 \quad (4.4)$$

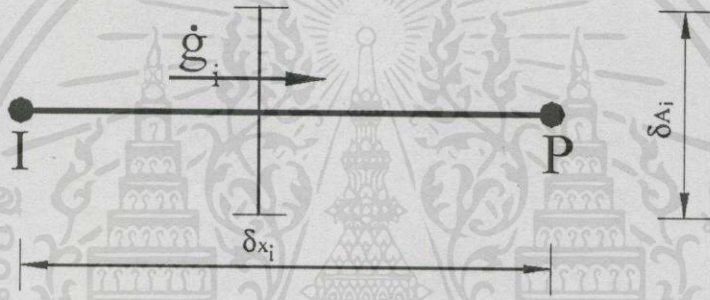
รูปอินทิเกรตสมการ 4.2 ภายในปริมาตรควบคุมสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\sum \int_{A_i} \left( \rho \bar{u}_i \bar{\Phi} - \Gamma_{\phi, \text{eff}} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x_i} \right) dA_i - \int_V S_{\phi, t} \cdot dV = 0 \quad \text{เมื่อ } i = n, w, s, e$$

$$-\dot{g}_w + \dot{g}_e - \dot{g}_s + \dot{g}_n - \int_V S_{\phi, T} \cdot dV = 0 \quad (4.5)$$

เมื่อ

$$\dot{g}_i = \int_{A_i} \left( \rho \bar{u}_i \bar{\Phi} - \Gamma_{\phi, \text{eff}} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x_i} \right) \cdot dA_i \quad (4.6)$$



รูปที่ 4.3 การถ่ายเท 1 มิติ ของฟลักซ์ผ่านขอบเขตระหว่างตำแหน่ง I และ P

ค่าอินทิเกรตของ  $\dot{g}_i$  คือฟลักซ์ของการพาและการกระจายทั้งหมดที่ผ่านพื้นผิวของปริมาตรควบคุม สามารถหาค่าได้ของคำตอบแบบแม่นยำ การถ่ายเท 1 มิติของฟลักซ์ผ่านขอบเขต  $A_i$  ดังรูปที่ 4.3 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\dot{g}_i = F_i \left( \Phi_P + \frac{\Phi_P - \Phi_I}{\exp(Pe_i) - 1} \right) \quad (4.7)$$

เมื่อ

$$Pe_i = \frac{(\rho u)_e (\delta x)_e}{\Gamma_e} = \frac{F_e}{D_e} \quad \text{ค่า Peclet number ที่ตำแหน่งเซลล์}$$

จากสมการ 4.5 แทนลงในปริมาตรควบคุม ซึ่ง  $\dot{g}_e - \dot{g}_w = 0$  จะได้สมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

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

ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในแบบฟอร์มพื้นฐานได้ดังนี้

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

เมื่อ

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

## 4.2 โครงสร้างของโปรแกรมโดยทั่วไป [38]

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ได้ทำการคำนวณความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ คุณสมบัติต่าง ๆ ของการเผาไหม้ ฯลฯ ภายในห้องเผาไหม้ โดยใช้สมการ ความต่อเนื่อง โมเมนตัม การถ่ายเทพลังงานของความร้อน อัตรา  $\bar{p}, \bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, K, \varepsilon$  สมการการเผาไหม้ ฯลฯ แต่ความดันไม่มีสมการที่เกี่ยวข้องแต่จะรวมกับความเร็วในสมการโมเมนตัมโดยนำวิธี PISO algorithm (Pressure Implicit Split Operator) ซึ่งโครงสร้างของ PISO สามารถอธิบายโดยรูป 4.5 และการหาค่าตัวแปรของสมการโดยใช้วิธี Hybrid scheme แก้สมการโมเมนตัม เพื่อหาค่า  $\bar{p}, \bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$  แล้วใช้วิธี Quick scheme แก้สมการการเคลื่อนย้ายเพื่อหาค่า  $K, \varepsilon$  คุณสมบัติต่าง ๆ ของการเผาไหม้ โดยจะใช้วิธี TDMA ในการแก้สมการเพื่อให้ได้คำตอบของระบบสมการ

**4.2.1 The Hybrid scheme** ค่าจากสมการข้างบนอยู่นั้นจัดให้อยู่ในรูปอย่างง่ายของคำตอบแบบแม่นยำ ซึ่งได้มาจากการอินทิเกรตสมการ 4.4 ความสัมพันธ์ที่เชื่อมต่อกันระหว่างวิธี Exponential scheme และ Hybrid scheme สามารถที่จะเขียนสัมพันธ์  $a_E$  หรือตัวแปรไร้มิติ  $a_E/D_e$  เหมือนกับฟังก์ชันของ Peclet number  $P_e$  จาก สมการ 4.7 ได้ดังนี้

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

สำหรับ  $P_e < -2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม  $\frac{a_E}{D_e} = -P_e$  เนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ  $-2 \leq P_e \leq 2$

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

สำหรับ  $P_e > 2$ ,

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

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$\frac{\dot{g}_i}{(\rho \bar{u} A)_i} = \begin{cases} \frac{1}{2} [(1 + P_{e_i}^{-1}) \bar{\Phi}_I + (1 - P_{e_i}^{-1}) \bar{\Phi}_p] & \text{for } -2 < P_{e_i} < 2 \\ \bar{\Phi}_I & \text{for } P_{e_i} > 2 \\ \bar{\Phi}_p & \text{for } P_{e_i} < -2 \end{cases} \quad (4.11)$$

นำสมการ 4.9 มาแทนในสมการ 4.3 เพื่อจะได้สมการดังนี้

$$(a_p - S_\phi) \bar{\Phi}_p = \sum a_i \bar{\Phi}_I + S_u + S_{p,\phi} \quad (4.12)$$

ซึ่ง Source term ของสมการ 4.3 จะมีค่าดังนี้

$$\int_V S_{\phi,T} \cdot dV = S_{g,\phi} + S_{p,\phi}$$

และ Source term ของก๊าซมีค่าเท่ากับ

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

สัมประสิทธิ์ของสมการ 4.10 กำหนดได้ดังนี้

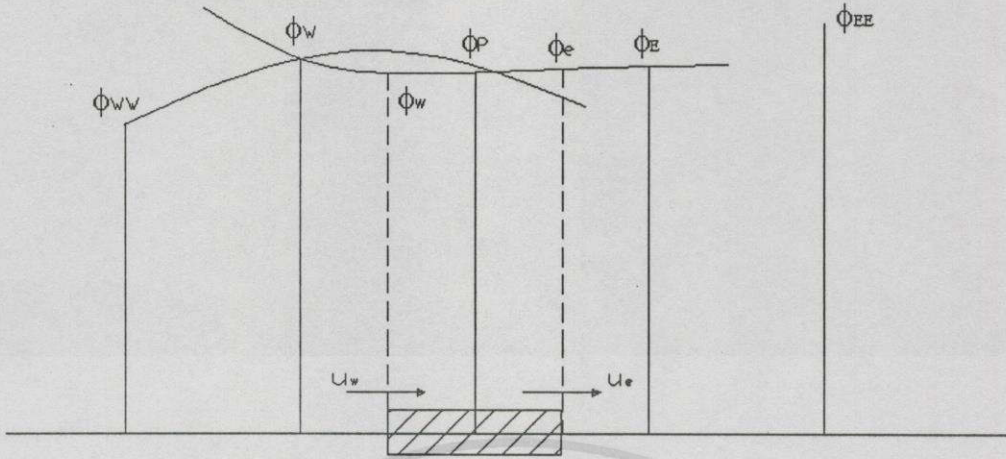
$$a_p = \sum_i a_i = a_n + a_w + a_s + a_e$$

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

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

**4.2.2 The Quick scheme** เป็นวิธีที่ใช้ 3 จุดประมาณค่าแบบสมการกำลังสอง ที่ผิวหน้า

ของปริมาตรควบคุมโดยที่ค่าของตัวแปร จะได้มาจากฟังก์ชัน Quadratic ที่ผ่านจุด 2 จุดที่อยู่แต่ละด้านของผิวหน้าและผ่านโหนดของตัวแปรที่อยู่ก่อนหน้า



WW                  W      w      P      e      E                  EE  
 I-2                  I-1    i-1    I      i+1    I+1                  I+2

รูปที่ 4.4 รูปร่าง Quadratic function ใช้ใน Quick scheme [38]

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

ถ้า  $F_w > 0$  และ  $F_e > 0$

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

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

ถ้า  $F_s > 0$  และ  $F_n > 0$

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

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

ถ้า  $F_w < 0$  และ  $F_e < 0$

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

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

ถ้า  $F_s < 0$  และ  $F_n < 0$

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

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

เมื่อรวมสมการทั้งหมดและทำการจัดรูปใหม่จะได้

$$a_p\Phi_P = a_E\Phi_E + a_W\Phi_W + a_{EE}\Phi_{EE} + a_{WW}\Phi_{WW} + a_N\Phi_N + a_S\Phi_S + a_{NN}\Phi_{NN} + a_{SS}\Phi_{SS} + a_p^0\Phi_P^0 + S_U$$

โดยที่  $\Phi = u, v, T, P$

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายานาน ไม้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$a_p^0 = \frac{\rho^0 \Phi_p^0}{\Delta t}$$

$$S_U = S_u \Delta V$$

$$S_p = S_p \Delta V$$

### 4.3 การแก้เมทริกซ์โดยวิธี TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm)

ในการพิจารณาปัญหาการเผาไหม้ของถ่านหินผงในห้องเผาไหม้โดยใช้ วิธี PISO มีลำดับการทำงานดังรูปที่ 4.5 จะได้สมการซึ่งสามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ ซึ่งจะใช้ TDMA ในการแก้เมทริกซ์ เพื่อให้ได้คำตอบที่เราต้องการ โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

เมื่อเราได้สมการของแต่ละโหนด ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูป

$$\phi_1 = C_1$$

$$-\beta_2 \phi_1 + D_2 \phi_2 - \alpha_2 \phi_3 = C_2$$

$$-\beta_3 \phi_2 + D_3 \phi_3 - \alpha_3 \phi_4 = C_3$$

$$-\beta_4 \phi_3 + D_4 \phi_4 - \alpha_4 \phi_5 = C_4$$

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

$$\phi_{n+1} = C_{n+1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกข้อมูลข้างต้นไปยังห้องสมุดหรือห้องเรียนของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $\phi$  คือค่าคุณสมบัติใด ๆ ที่พิจารณาภายในห้องเผาไหม้ (เช่น ความเร็วในทิศทางต่าง ๆ ความดัน ออกซิเจน ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น) เราสามารถเขียนรูปทั่วไปของสมการในแต่ละแถวได้ดังนี้

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

สำหรับ  $\phi_2$  ถึง  $\phi_n$  สามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ต่อไปนี้

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

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

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

ในขั้นตอนการหาคำตอบ เราจะให้วิธี Back-substitution ยกตัวอย่างเช่นในการหาค่าของ  $\phi_3$  เราจะใช้ค่าของ  $\phi_2$  มาแทนในสมการของ  $\phi_3$  จึงจะได้คำตอบตามต้องการ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

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

โดย

$$A_3 = \frac{\alpha_3}{D_3 - \beta_3 A_2} \quad \text{และ} \quad C'_3 = \frac{\beta_3 C'_2 + C_3}{D_3 - \beta_3 A_2}$$

เราสามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้

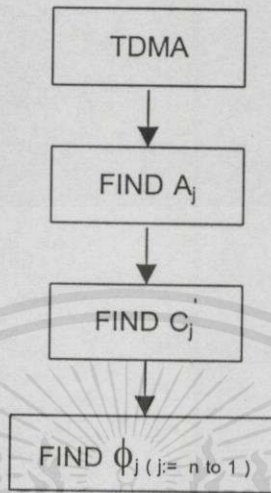
$$\phi_j = A_j \phi_{j+1} + C'_j$$

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่คัดลอกมาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในการแก้สมการหาค่า  $\phi$  จะเริ่มการหาค่า  $A_j$  และ  $C_j$  สำหรับทุกค่า  $j(j=1$  ถึง  $j=n)$  แล้วจึงหาค่า  $\phi$  ย้อนกลับจาก  $\phi_n$  ไปหา  $\phi_1$  หรือเขียนเป็นขั้นตอนดังนี้



สำหรับปัญหาใน 2 มิติ สมการเริ่มต้นที่ใช้ในการสร้างเมทริกซ์จะอยู่ในรูป

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

ในการแก้สมการเราจะเริ่มทำในแนว N-S ก่อน (ทิศ r) ดังนั้นสมการ จึงเป็น

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

กำหนดให้

$$\alpha_j = a_N$$

$$\beta_j = a_S$$

$$D_j = a_P$$

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

จากนั้นจึงใช้ขั้นตอนในข้างต้นแก้สมการหาค่า  $\phi$  ในแนว N-S ก่อนโดยกำหนดค่าเริ่มต้น (Initial) สำหรับ  $\phi$  ที่เราไม่ทราบค่า (ยกตัวอย่างเช่น  $\phi_W$  สำหรับแนวกวาดแถวแรก ( $i=1$ ) ในการหาค่าในรอบที่ 1 (Iteration ครั้งที่ 1)

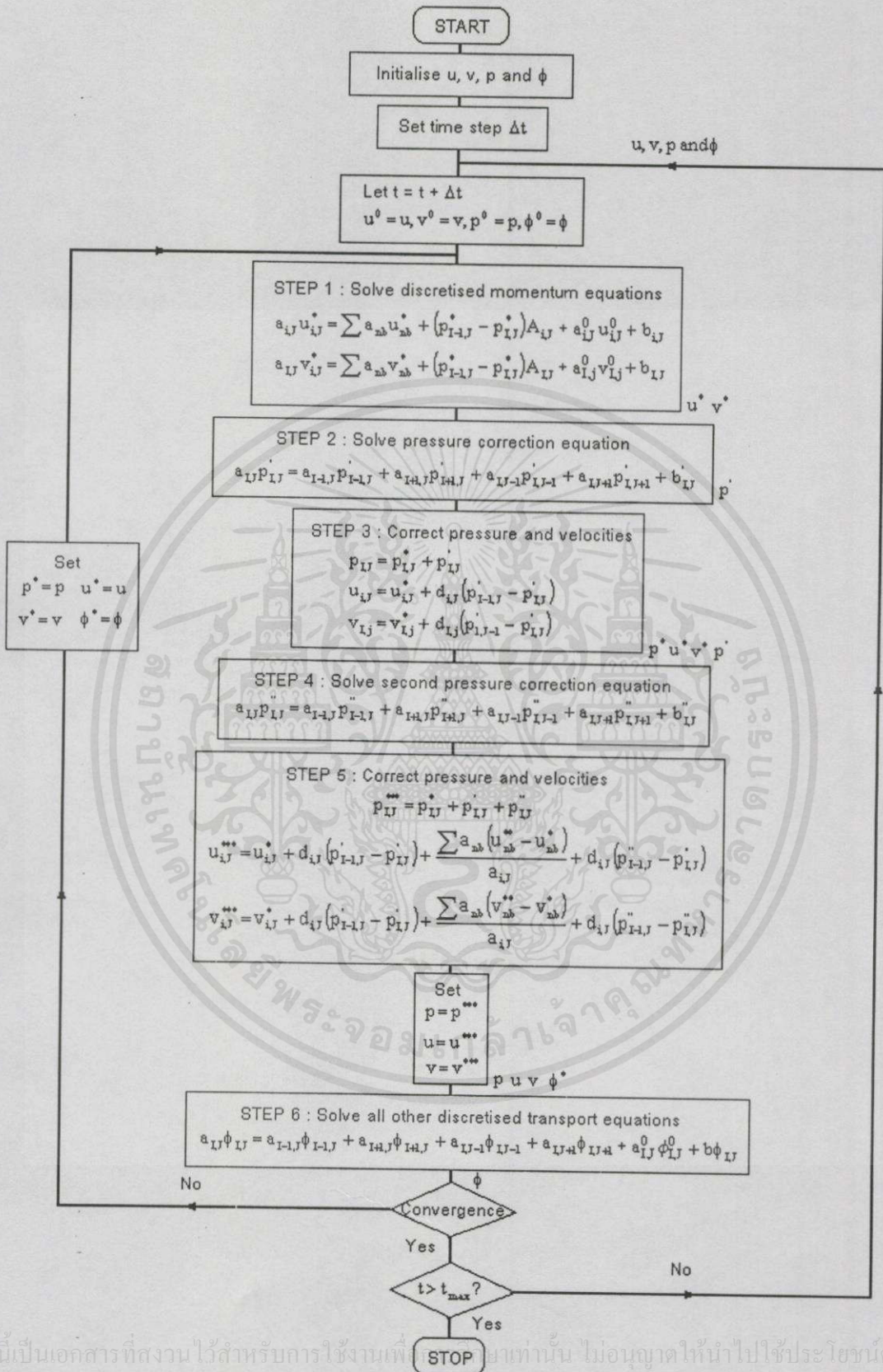
หลังจากหาค่า  $\phi$  ในแนว N-S ทุก ๆ แนวแล้ว (จบ Iteration ครั้งที่ 1) จึงเริ่มทำซ้ำจนกว่าค่าความแตกต่างระหว่าง  $\phi_{new}$  และ  $\phi_{old}$  จะน้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้ ( $|\phi_{new} - \phi_{old}| \leq e$ ) และวิธี TDMA ที่อธิบายข้างต้นนี้จะถูกเขียนไว้ใน Subroutine ที่ชื่อ LISOLV ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณวิถีสัมบัติต่าง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

#### 4.4 โครงสร้างโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ

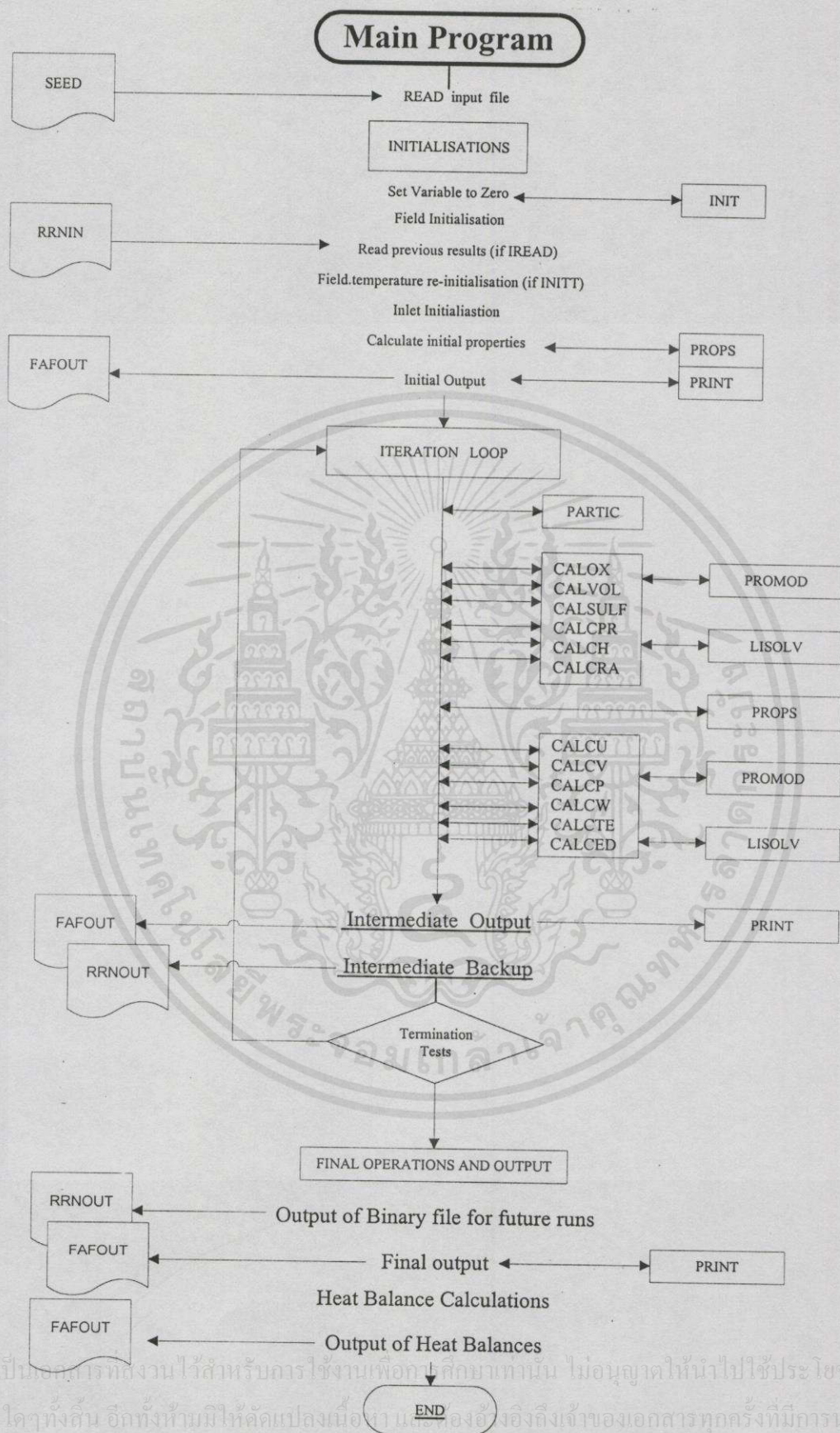
ประกอบด้วยโปรแกรมหลัก (Main program) และ โปรแกรมย่อย (Subroutine) ต่าง ๆ ดังนี้

- โปรแกรมหลัก (Main program) ทำหน้าที่จัดลำดับการทำงานของ Subroutine ต่าง ๆ ให้ทำงานตามขั้นตอน
- โปรแกรมย่อย (Subroutine) ทำหน้าที่คำนวณค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ต้องใช้ประกอบด้วย
- SEED ทำหน้าที่เป็น Input file ซึ่งเก็บค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไว้ในตัวแปรที่กำหนดขึ้น
- INIT ทำหน้าที่กำหนดค่าของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณให้มีค่าเป็นศูนย์ก่อนเริ่มการคำนวณ
- PROPS ทำหน้าที่คำนวณความหนืดของของไหล
- PARTIC ทำหน้าที่คำนวณหาอนุภาคของแข็งภายในห้องเผาไหม้
- CALOX ทำหน้าที่คำนวณหาออกซิเจนภายในห้องเผาไหม้
- CALVOL ทำหน้าที่คำนวณหาสารระเหยภายในห้องเผาไหม้
- CALSULF ทำหน้าที่คำนวณหาซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายในห้องเผาไหม้
- CALCPR ทำหน้าที่คำนวณหาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้
- CALCH ทำหน้าที่คำนวณเอนทัลปีภายในห้องเผาไหม้
- CALCRA ทำหน้าที่คำนวณการแผ่รังสี ภายในห้องเผาไหม้
- CALCU ทำหน้าที่คำนวณความเร็วในทิศตามความยาวของห้องเผาไหม้ ( $\bar{z}$  Direction)
- CALCV ทำหน้าที่คำนวณความเร็วในทิศทางรัศมีของห้องเผาไหม้ ( $\bar{r}$  Direction)
- CALCP ทำหน้าที่คำนวณค่าของความดัน และแก้ไขค่าของความเร็วในทิศทาง  $\bar{z}$  และ  $\bar{r}$
- CALCW ทำหน้าที่คำนวณความเร็วในทิศทางวนรอบแกนของห้องเผาไหม้ ( $\bar{\theta}$  Direction)
- CALCTE ทำหน้าที่คำนวณค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ( $K$ ) ภายในห้องเผาไหม้
- CALCED ทำหน้าที่คำนวณค่าอัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน ( $\epsilon$ ) ภายในห้องเผาไหม้
- PROMOD ประกอบด้วย MODU, MODV, MODW, MODU1, MODP, MODH และทำหน้าที่แก้ไข ค่าของสัมประสิทธิ์ในการคำนวณ ความเร็ว ความดัน เอนทัลปี ออกซิเจน ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ฯลฯ
- LISOLV ทำหน้าที่แก้สมการที่ได้จากการสร้างสัมประสิทธิ์และ Source term โดยอาศัย TDMA (จากบทที่ 4) ในการแก้สมการหาค่าของพารามิเตอร์ใด ๆ
- PRINT ทำหน้าที่สร้าง Output file ที่ได้จากการคำนวณ

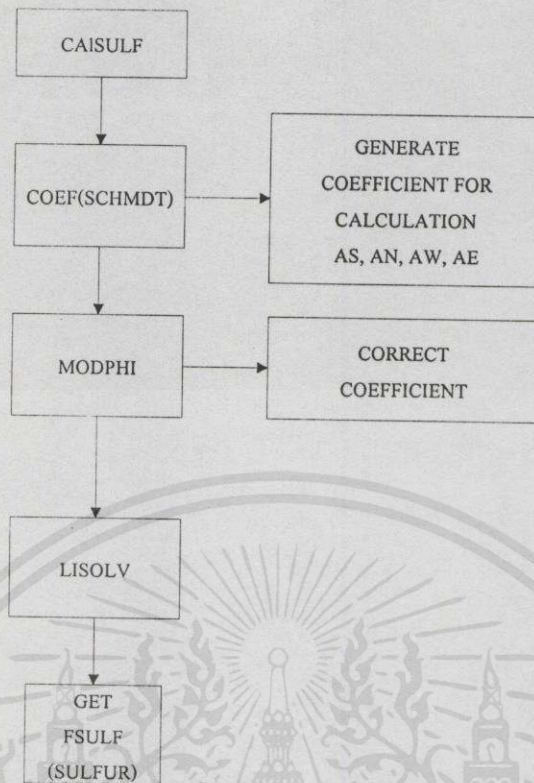
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ทำการแก้ไขใดๆทั้งสิ้น และทั้งหมดนี้ให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
**รูปที่ 4.5** อธิบาย โครงสร้าง PISO algorithm [38]



รูปที่ 4.6 อธิบายโครงสร้างของโปรแกรมหลักที่ใช้คำนวณการเผาไหม้ของถ่านหินผง [3]



รูปที่ 4.7 อธิบายโครงสร้างของ Subroutine ที่คำนวณหาค่าปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ซึ่งลำดับการทำงาน โครงสร้างของโปรแกรมหลักนี้สามารถแสดงโดยรูปที่ 4.6 เป็น Flowchart ที่อธิบายขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมหลัก เมื่อโปรแกรมหลักรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณเข้ามาแล้ว (ค่าพารามิเตอร์นี้จะรับมาจาก Input file ที่ชื่อ SEED) จะทำการแยกข้อมูลสำหรับโปรแกรมย่อยแต่ละชุดเพื่อทำการคำนวณหาค่าตอบที่เราต้องการ (FAFOUT) ซึ่งจะได้ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ความเร็ว ความดัน เอนทัลปี ออกซิเจน ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ฯลฯ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในห้องเผาไหม้ รูปที่ 4.7 เป็น Flowchart แสดงลำดับการทำงานสำหรับ Subroutine CALSULF ทำหน้าที่คำนวณหาปริมาณความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

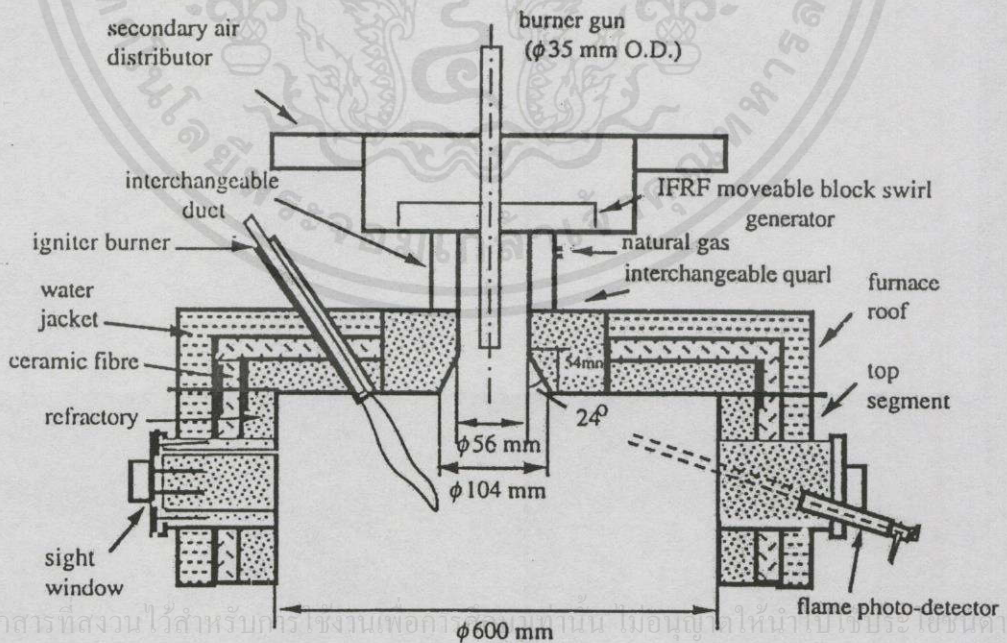
# การจำลองการเผาไหม้ของเตาเผาที่ใช้ถ่านหินผง

### 5.1 บทนำ

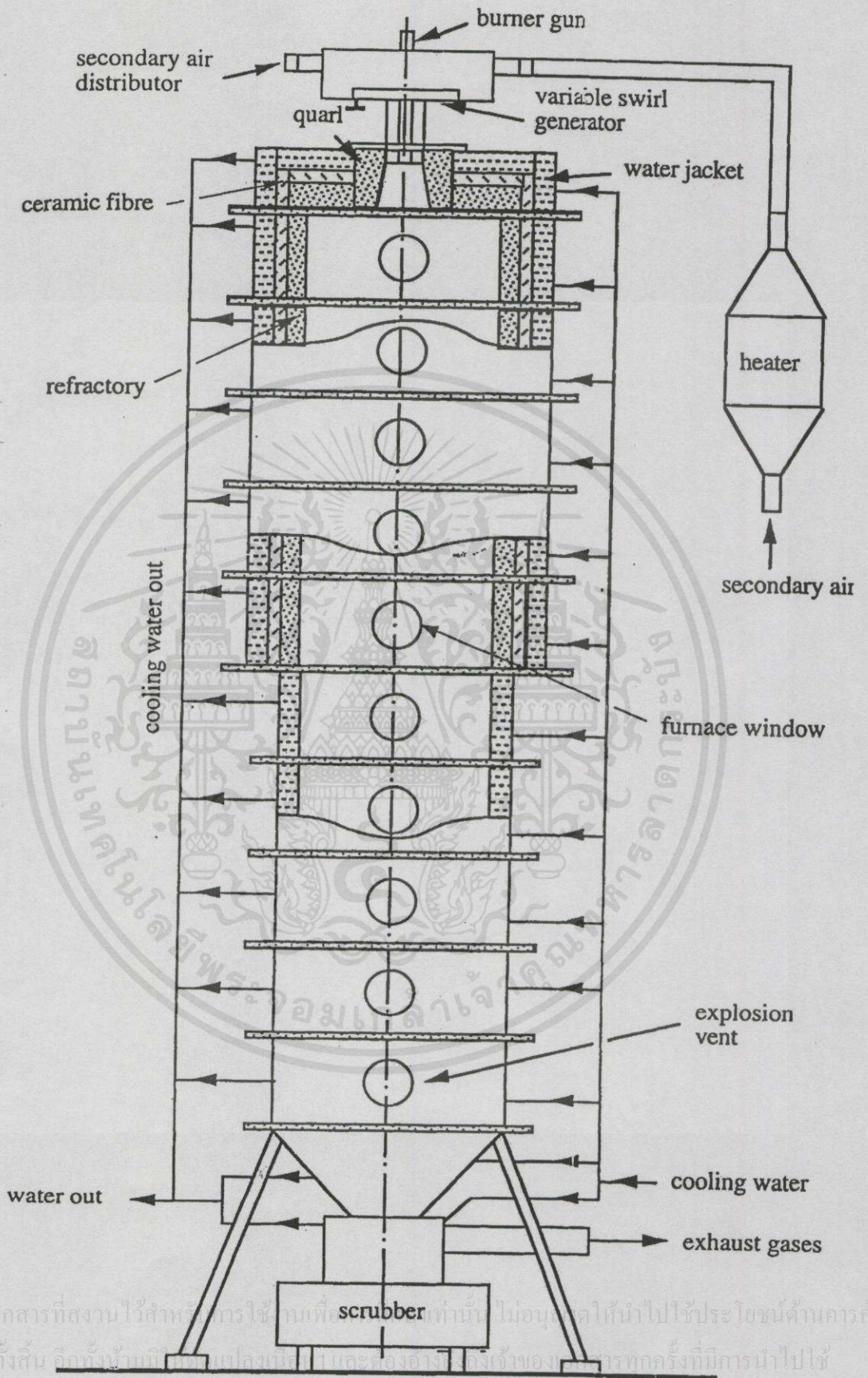
บทนี้เสนอผลการจำลองการก่อตัวและปริมาณออกไซด์ของกำมะถัน ภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินผง ด้วยวิธี Finite volume โดยพิจารณาเนื้อที่ในห้องเผาไหม้ประกอบด้วยปริมาตรเล็ก ๆ ดังรายละเอียดที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 ผสมผสานกับแบบจำลองการสันดาปของถ่านหินผงที่ได้พัฒนาแล้ว (FAFNIR) โดย (ICSTM) ซึ่งพิจารณาสมการการถ่ายเทมวล โมเมนตัม พลังงานและการเผาไหม้ของถ่านหินผง

### 5.2 ลักษณะห้องเผาไหม้ [37]

จากรูปที่ 5.1 แสดง โครงสร้างส่วนบนของเตาเผา ซึ่งมีหัวเผาติดตั้งอยู่ และรูปที่ 5.2 แสดง โครงสร้างภายนอกของเตาเผาที่ ICSTM มีลักษณะเป็นทรงกระบอกแนวตั้งและเปลวไฟติดลงด้านล่าง มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.6 เมตร และความยาวรวม 3.0 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเผา (d) 0.056 เมตร มีการสร้างคอนกรีตทนไฟที่บริเวณใกล้หัวเผาเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ข้อมูลของอุปกรณ์การทดลองแสดงไว้ใน [37] รูปร่างของโครงสร้างหัวเผาที่ใช้มีชื่อว่า Single Annular Orifice (SAO) แสดงอยู่ในรูปที่ 5.3

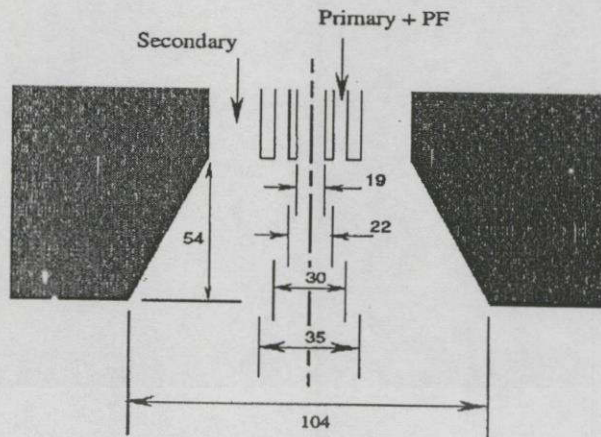


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ในงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้หรือเผยแพร่ การค้า  
ไม่ว่ารูปที่ 5.1 โครงสร้างส่วนบนของเตาเผา [37] และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 โครงสร้างภายนอกของเตาเผาที่ ICSTM [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อเท่านั้น ไม่อนุยให้ร่งไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ข้อมูลเป็นละของทางที่ถึงเจ้าของ การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 โครงสร้างของหัวเผาในห้องเผาไหม้ [37]

การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านหินผงและขนาดของอนุภาคเฉลี่ยที่ใช้ในการแบบจำลองการเผาไหม้ที่แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 เงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้การทดลองของเตาเผาสรุปไว้ในตารางที่ 5.2 แสดง ตารางที่ 5.3 แนะนำพารามิเตอร์ของพลังงานจลน์ที่ใช้โดยแบบจำลองการเผาไหม้ถ่านหินผงนี้ [37]

ตารางที่ 5.1 แสดงคุณสมบัติของถ่านหิน [37]

การวิเคราะห์แบบประมาณ	(% น้ำหนัก)
สารระเหย	35.8
คาร์บอนคงตัว	53.7
ความชื้น	6.3
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	(% น้ำหนัก)
คาร์บอน	83.1
ไฮโดรเจน	4.35
ไนโตรเจน	1.29
กำมะถัน	1.55
ออกซิเจน	9.71
Partical size distribution:	(% น้ำหนัก)
0-10 $\mu\text{m}$	15.0
10-25 $\mu\text{m}$	25.0
25-40 $\mu\text{m}$	20.0
40-75 $\mu\text{m}$	20.0
>75 $\mu\text{m}$	20.0
ปริมาณความร้อน (MJ/kg)	29.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 แสดงเงื่อนไขการทำงานของเขา [37]

<b>ช่องตรงกลางหัวเผา:</b>	
อัตราการไหลของอากาศ, kg/s	$2.777 \times 10^{-4}$
Swirl number	0.0
อุณหภูมิ, K	353
<b>ช่องหัวเผาแรก:</b>	
อัตราการไหลของอากาศ, kg/s	$8.833 \times 10^{-3}$
Swirl number	0.0
อุณหภูมิ, K	353
<b>ช่องหัวเผาที่สอง:</b>	
อัตราการไหลของอากาศ, kg/s	$3.344 \times 10^{-2}$
Swirl number	1.03
อุณหภูมิ, K	573
อากาศส่วนเกินในการเผาไหม้, (%)	15

ตารางที่ 5.3 แสดงพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้โดยแบบจำลองการเผาไหม้ถ่านหินผง [37]

Kinetic parameters	E (J/kg-mol)	$k_0, K_0$
Devolatilization	$7.4 \times 10^7$	$8.36 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$
Char reaction	$1.02 \times 10^8$	$0.86 \text{ kg.s.Nm}^{-4}$

### 5.3 ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผล

การก่อตัวของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นผลมาจากความร้อน และปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน ในขณะเดียวกันเมื่อเกิดการเผาไหม้กำมะถันซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของสารระเหยรวมตัวกับออกซิเจนส่งผลต่อการก่อตัวของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งจะติดไฟพร้อมกับให้ความร้อนออกมา ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของรูปที่ 5.4 ถึง 5.12 สามารถอธิบายการก่อตัวของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้เป็นอย่างดี

**5.3.1 วิเคราะห์ผลจากการไหลของอากาศพลศาสตร์ เส้นทางเดินเฉลี่ยของอนุภาค ความเข้มข้นของสารระเหย ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ความเข้มข้นของออกซิเจนและการกระจายอุณหภูมิ** จากรูปที่ 5.4 เราสามารถเห็น การไหลวนบริเวณทางออกของหัวเผา สนามการไหลนี้กำหนดทางเดินของอนุภาคถ่านหินผง บริเวณของการไหลวนที่มีการไหลย้อนกลับของ

อนุภาคอยู่ในช่วง 0.09-0.14 เมตร จากทางออกของหัวเผา การไหลกลับทิศทางของอนุภาคเหล่านี้ทำให้เข้าสู่บริเวณที่กำลังเผาไหม้ ทำให้อนุภาคปลดปล่อยสารระเหยอย่างสมบูรณ์ในบริเวณอุณหภูมิสูง กรณีดังกล่าวเกิดจากออกซิเจนถูกใช้ในการเผาไหม้เกิดการผสมอย่างรุนแรงเกิดขึ้นระหว่างกระแสการไหลไปข้างหน้าของกระแสการไหลจากช่องทางเข้า Secondary inlet กับกระแสการไหลย้อนกลับยังกึ่งกลางหัวเผาก่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง

รูป 5.5 แสดงทางเดินของอนุภาคถ่านหิน จากรูปในช่วงระยะ 0.05-0.18 เมตรจากทางออกของหัวเผา อนุภาคของถ่านหินมีการไหลย้อนกลับจะสัมพันธ์กับช่วงของอากาศไหลวนในรูปที่ 5.4 ทำให้อนุภาคของถ่านหินได้ผสมกับอากาศเกิดการเผาไหม้ ช่วงการไหลวนของอนุภาคนี้เมื่อได้รับความร้อนอนุภาคจะปลดปล่อยสารระเหย ปกคลุมก้อนคาร์บอนแข็ง การเผาไหม้นี้เป็นการรวมตัวของสารระเหยกับออกซิเจนเกิดการเผาไหม้ในสถานะก๊าซในช่วงดังกล่าว จนกระทั่งสารระเหยที่ปล่อยออกมาถูกเผาไหม้จนหมด ภายในปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดก๊าซอื่น ๆ อีกหลายชนิด เช่น กัมมะถันที่ประกอบอยู่ในสารระเหยจะถูกปล่อยออกมาพร้อมกับการทำปฏิกิริยาของสารระเหยกับออกซิเจน ฯลฯ ส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ของก๊าซจะอยู่ในรูปของแข็งคือคาร์บอนจะรวมตัวกับออกซิเจนเกิดการเผาไหม้ของของแข็งจะอยู่ในช่วงประมาณ 0.25 เป็นต้นไปจนกระทั่งการเผาไหม้อนุภาคจนหมด

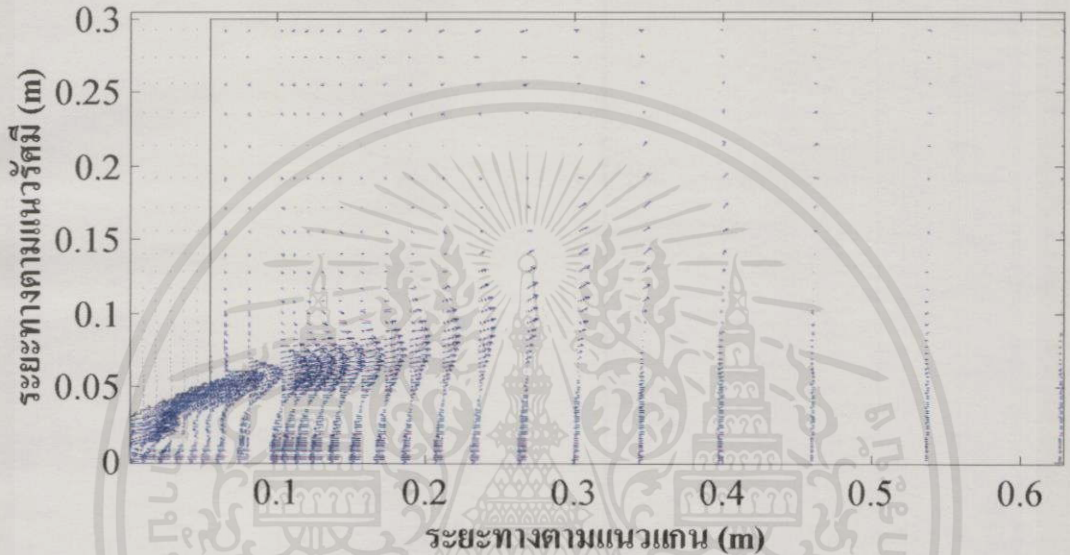
รูปที่ 5.6 แสดงความเข้มข้นของสารระเหยที่ปล่อยออกมาจากอนุภาคถ่านหินผง จากรูปสังเกตได้ว่าปริมาณความเข้มข้นของสารระเหยปล่อยออกมาก อยู่ในช่วง 0.05-0.18 เมตร จากทางออกของหัวเผา ลักษณะที่เกิดขึ้นนี้มีความสัมพันธ์และอธิบายได้ด้วยรูปที่ 5.4 และ 5.5 บริเวณที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารระเหยสูงนั้นเกิดขึ้นจากอนุภาคที่ป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้มีเส้นทางเดินดังรูปที่ 5.5 และเป็นผลมาจากการไหลของอากาศพลศาสตร์ดังรูปที่ 5.4 ผสมกับปริมาณความร้อนที่เหมาะสม จึงเกิดการปล่อยสารระเหยในช่วงดังกล่าว

รูปที่ 5.7 แสดงการกระจายตัวความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กัมมะถันในสารระเหยเมื่อเผาไหม้ได้รวมตัวกับออกซิเจนเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ความเข้มข้นของก๊าซดังกล่าวจะมากในช่วง 0.03-0.15 เมตร จากทางออกของหัวเผา ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับรูปที่ 5.6 บริเวณที่มีสารระเหยปริมาณสูงก็จะปล่อยกัมมะถันออกมาในปริมาณสูงเช่นกัน ส่วนบริเวณ 0.05-0.15 เมตร ตามแนวรัศมีของห้องเผาไหม้จะเกิดการสะสมปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ในปริมาณไม่สูงนักเกิดจากการพาของอากาศใน Secondary air สะสมด้านบนต่อไป

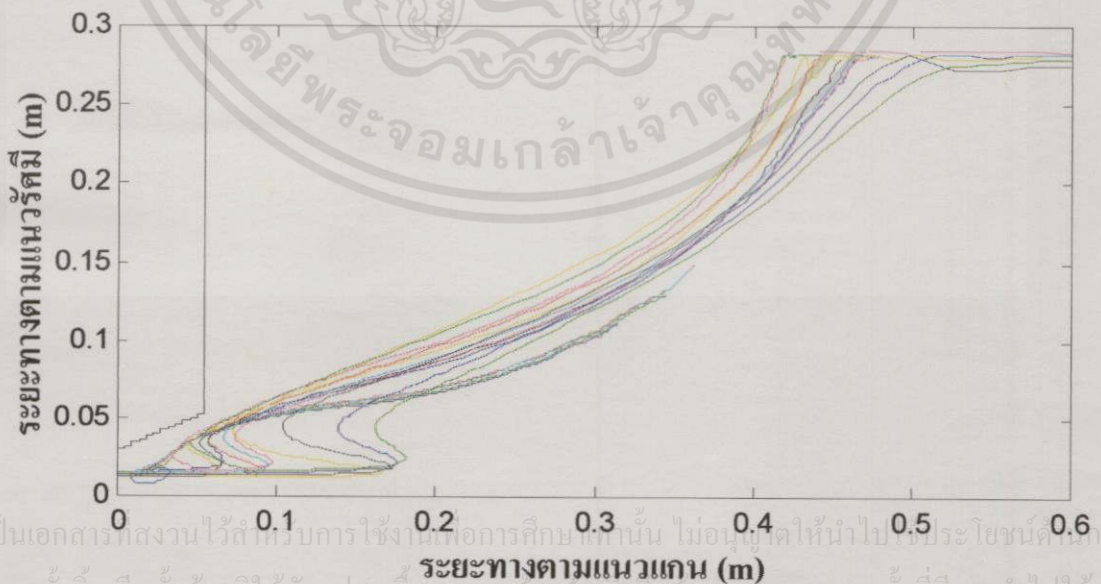
รูปที่ 5.8 แสดงความเข้มข้นของออกซิเจนภายในห้องเผาไหม้ จากรูปช่วง 0.03-0.18 เมตร จากทางออกของหัวเผา จะเห็นได้ว่ามีปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนน้อย ซึ่งเกิดจากความสัมพันธ์ของรูปที่ 5.4-5.7 ในบริเวณดังกล่าว เกิดการเผาไหม้ของก๊าซดังนั้นออกซิเจนจึงถูกใช้ในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ส่วนที่อยู่ด้านบนที่ระยะทาง 0.5 เมตรจากทางออกของหัวเผา ที่มีปริมาณความ

เข้มข้นของออกซิเจนต่ำเพราะในบริเวณนั้นอนุภาคเกิดการเผาไหม้ในรูปของแข็งจึงมีการใช้ออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาเช่นกัน

รูปที่ 5.9 แสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ บริเวณที่มีความร้อนสูงจะอยู่ในช่วง 0.08–0.18 เมตร จากทางออกของหัวเผา เนื่องมาจากที่บริเวณนั้นเกิดการสะสมของความร้อนที่ได้จากการพาเนื่องมาจากของการเผาไหม้สารระเหย ในช่วง 0.3–0.55 เมตรจากทางออกของหัวเผา ด้านบนของรูปที่มีอุณหภูมิสูงเกิดจากการเผาไหม้ของคาร์บอนกับอากาศที่บริเวณดังกล่าว

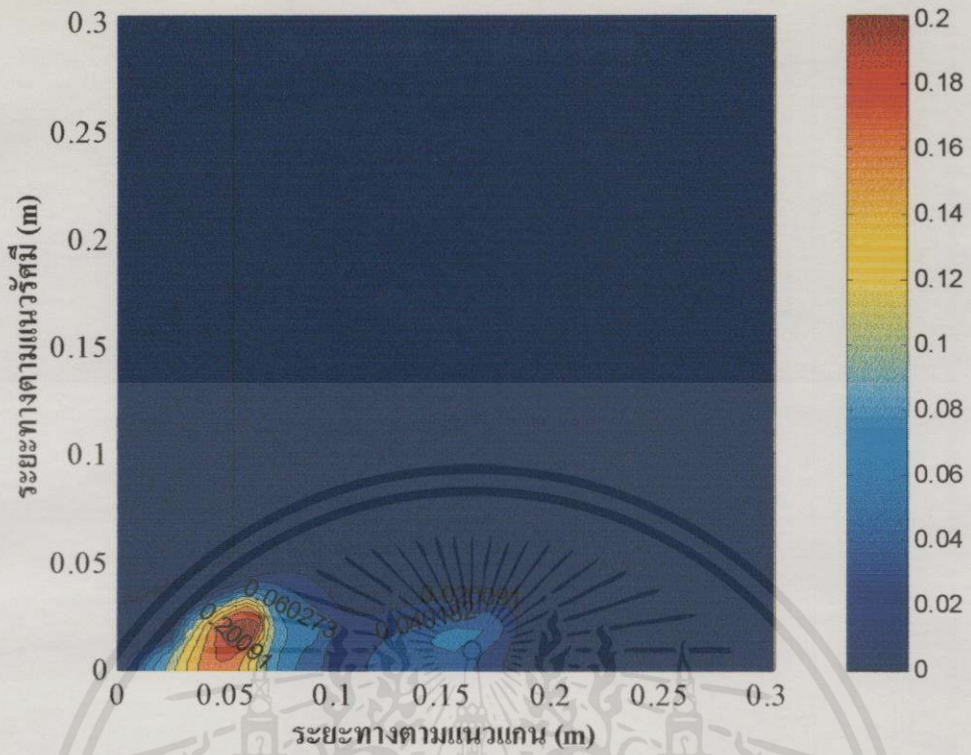


รูปที่ 5.4 เวกเตอร์ความเร็วของก๊าซที่บริเวณใกล้หัวเผา

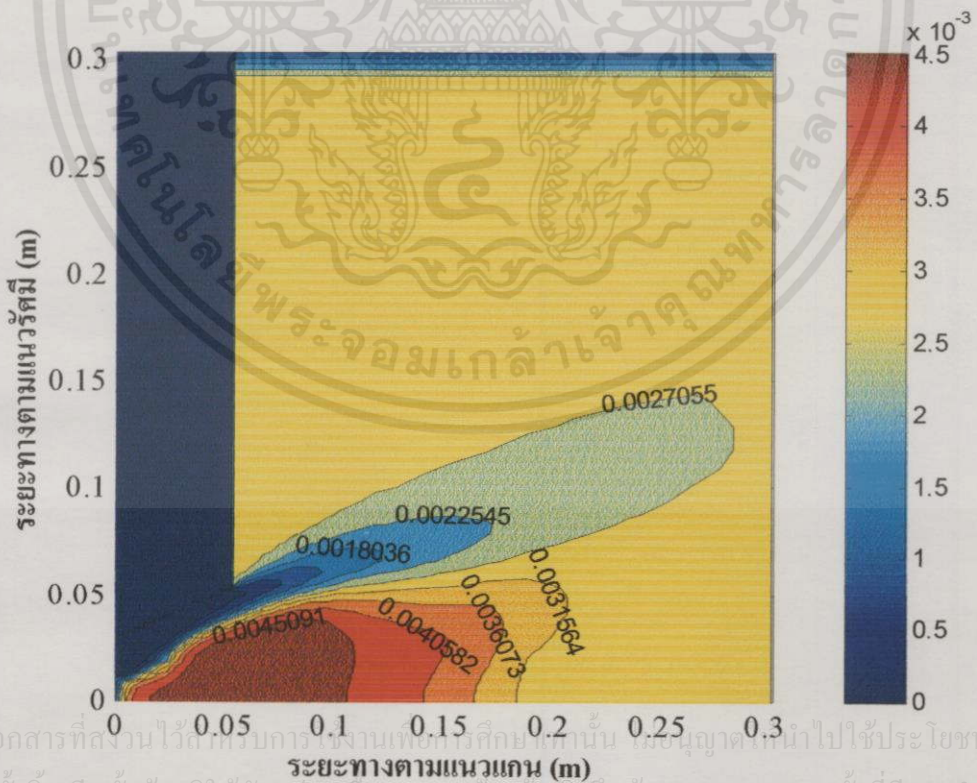


รูปที่ 5.5 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคถ่านหินผงที่บริเวณใกล้หัวเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 การกระจายตัวของความเข้มข้นของสารระเหย % ( $V_{\text{volatile}}/V_{\text{mix}}$ ) โดยมวล ที่บริเวณใกล้หัวเผา



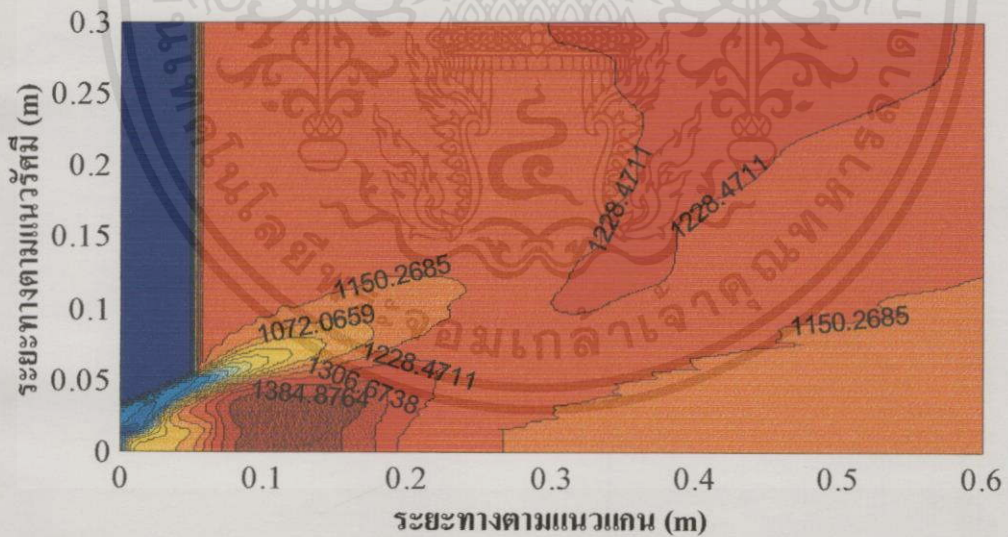
รูปที่ 5.7 การกระจายตัวของความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ % ( $V_{\text{SO}_2}/V_{\text{mix}}$ ) โดยมวลที่ บริเวณใกล้หัวเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 การกระจายตัวของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน % ( $V_{O_2} / V_{mix}$ ) โดยมวล ที่บริเวณใกล้หัวเผา



รูปที่ 5.9 การกระจายตัวของอุณหภูมิ °C ที่บริเวณใกล้หัวเผา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายของออกซิเจนและอุณหภูมิ รูปที่ 5.10 และ 5.11 แสดงกราฟเปรียบเทียบการกระจายความเข้มข้นของออกซิเจนและอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายตามลำดับ ที่ระยะตามแนวแกนที่วัดจากระนาบทางออกของหัวเผาที่แตกต่างกัน ค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายสอดคล้องกันเป็นอย่างดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณใกล้หัวเผา ซึ่งเกิดการเผาไหม้มากที่สุด ดังนั้นจึงมั่นใจได้ว่าอากาศพลศาสตร์และการเผาไหม้มีความถูกต้อง การเปรียบเทียบนี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการไหลปั่นป่วนของ K- $\epsilon$  แบบจำลองการปลดปล่อยสารระเหยและแบบจำลองการเผาไหม้สามารถที่จะจำลองการเกิดออกไซด์ของกำมะถันจากการเผาไหม้ของถ่านหินผงได้

กราฟที่ลดลงของความเข้มข้นของออกซิเจนที่ตำแหน่ง  $x/d=1.1, 1.6$  และ  $2.2$  นั้นเป็นบริเวณที่เกิดการทำปฏิกิริยาและการเผาไหม้ของสารระเหยที่บริเวณใกล้การไหลวนของหัวเผา (จากรูป 5.8) ค่าที่ได้จากการทำนายมีค่าต่ำกว่าซึ่งจะเหมือนกันทุก ๆ ค่าขอความเข้มข้นของออกซิเจนที่บริเวณการไหลวนภายนอกที่ตำแหน่งประมาณที่  $1.5$  ของ  $r/d$  ออกซิเจนจะถูกดูดซับน้อยซึ่งเป็นผลจากแบบจำลองการเผาไหม้ของซาร์ที่ยังไม่สมบูรณ์มากนักและการแพร่กระจายของ Secondary jet โดยผลของแรงเหวี่ยงจากศูนย์กลาง ส่วนค่าที่ได้จากการทำนายมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยที่บริเวณการไหลวนภายนอกใกล้หัวเผาและที่  $x/d=12.9$  การทำนายมีค่าสูงกว่าเนื่องจากอัตราการดูดซับออกซิเจนของอนุภาคที่ใกล้หมดการเผาไหม้ของซาร์ ซึ่งเป็นผลมาจากผลการทำนายของแบบจำลองของซาร์ อัตราจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาของคาร์บอนจะมีค่าสูงเมื่ออุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูง (อุณหภูมิรอบ ๆ ของอนุภาคในการทำนายประมาณ  $1250 - 1650$  °C) อัตราของปฏิกิริยาจะช้ากว่าอัตราจลนพลศาสตร์ เนื่องจากการขาดแคลนออกซิเจนที่พื้นผิวของอนุภาค นอกจากนี้อนุภาคของซาร์ที่ชั้นตอนนี้อาจจะเปลี่ยนแปลงขนาดและปริมาตรการดูดซับออกซิเจนของคาร์บอนคงตัวที่แตกต่างกัน ขณะที่แบบจำลองของซาร์ที่ใช้ในแบบจำลองนี้อยู่บนพื้นฐานที่ว่าขนาดของอนุภาคมีค่าคงที่ การเผาไหม้ของซาร์ที่ช้าเป็นผลให้ค่าที่ได้จากการทำนายความเข้มข้นของออกซิเจนที่  $x/d=12.9$  ที่ตำแหน่งด้านขวามือของรูป 5.10 สูงกว่าการทดลอง แม้ว่าความแตกต่างระหว่างการทำนายที่เกิดขึ้นนี้สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจน แต่ก็เกิดขึ้นในบริเวณที่ห่างจากหัวเผา อย่างไรก็ตามส่วนสำคัญของบริเวณการเผาไหม้ การไหลวนของก๊าซและการไหลเข้าของอากาศช่องที่สองที่บริเวณใกล้หัวเผ่าจะทำนายได้ดี

จากรูป 5.11 กราฟระหว่างการทำนายกับการวัดของอุณหภูมิมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ดังนั้นแบบจำลองเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทำนายได้ ซึ่งเป็นผลมาจากการจำลองการถ่ายเทความร้อน และข้อสมมุติที่ใช้สำหรับเงื่อนไขขอบเขตอย่างเหมาะสม

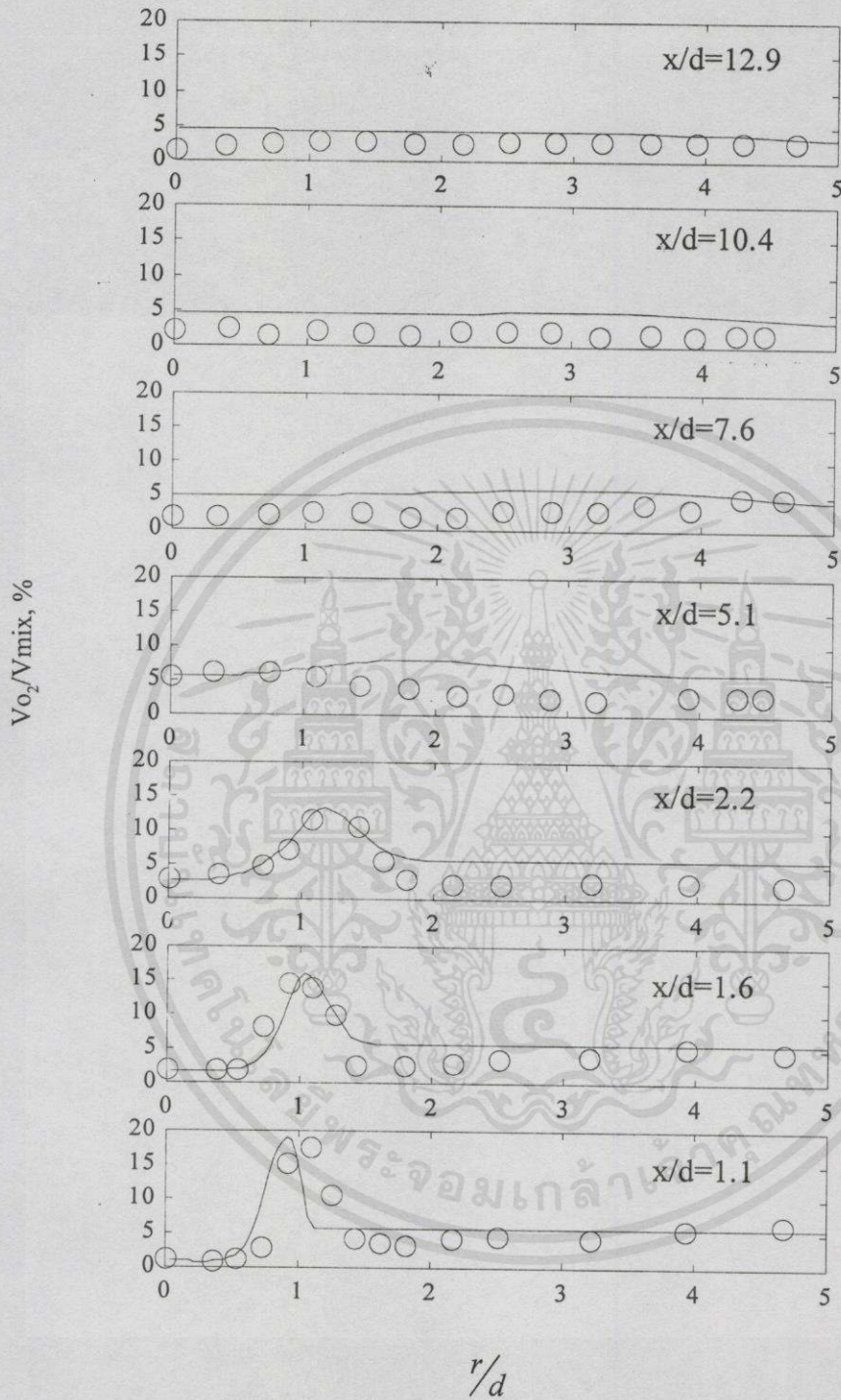
อุณหภูมิสูงสุดอยู่ในบริเวณการไหลวนใกล้ทางออกของหัวเผา ซึ่งเป็นผลของการสะสมพลังงานที่สูงในการไหลวนแบบ Torroidal อยู่ระหว่าง Secondary jet และบริเวณการไหลวนใกล้ทางออกหัวเผา ที่ระนาบ  $x/d = 1.1, 1.6$  และ  $2.2$  เห็นได้ว่าการลดลงของอุณหภูมิต่างรวดเร็วเกิด

ชั้นบริเวณ Secondary jet และต่อจากบริเวณนั้นอุณหภูมิมีค่าคงที่ที่เกิดจากการเผาไหม้ของกระแสไหลวนภายนอกใกล้ผนังห้องเผาไหม้ เห็นได้ว่าตั้งแต่  $x/d = 1.1$  ถึง 12.9 มีค่าของอุณหภูมิที่คำนวณได้สูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลองเล็กน้อย แต่จากการทดลองจริงที่ผนังมีการสูญเสียความร้อน ดังนั้นถ้าห้องเผาไหม้เป็น Adiabatic อุณหภูมิที่วัดได้ที่ผนังจะมีค่าสูงมากกว่านี้ อุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการทำนาย 1440 °C ในบริเวณการไหลวนใกล้หัวเผาที่  $x/d=2.2$  จากการทดลองมีค่า 1340 °C ที่ตำแหน่งเดียวกัน

การทำนายการกระจายของอุณหภูมิที่ต่ำกว่าการทดลองในกระแสการไหลความเร็วสูงที่ตำแหน่ง  $x/d = 1.1, 1.6$  และ 2.2 เป็นผลมาจากการทำนายได้ประเมินผลที่เกิดจากการแพร่กระจายความร้อนของการถ่ายเทพลังงานต่ำเกินไปและเกิดขึ้นจากการผิดพลาดของการถ่ายเทความร้อนในสถานะการไหลแบบปั่นป่วน ที่  $x/d = 5.1$  มีค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการทดลองบริเวณใกล้แกนกลางห้องเผาไหม้ขึ้นอยู่กับค่าการถ่ายเทพลังงานของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ (เห็นได้จากกราฟรูปที่ 5.10 ออกซิเจนถูกดูดซับมากที่สุด) อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่คำนวณได้มีความแตกต่างเพียงเล็กน้อยจากค่าที่วัดได้จากการทดลอง นอกจากนี้อาจจะมีสาเหตุมาจากการทำนายอัตราของปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอนไป ปรากฏให้เห็นในการทำนายที่ตำแหน่งบริเวณใกล้แกนกลางห้องเผาไหม้ที่ตำแหน่ง  $x/d = 5.1, 7.6$  และ 10.4

**5.3.3 ผลการคำนวณความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายในห้องเผาไหม้** รูป 5.12 คือกราฟแสดงการแพร่กระจายความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ระยะตามแนวแกนที่วัดจากระนาบทางออกของหัวเผาที่แตกต่างกัน ที่ระยะ  $x/d = 1.1, 1.6$  และ 2.2 เป็นบริเวณที่เกิดการเผาไหม้มากที่สุด จากที่ระยะดังกล่าวตั้งแต่เส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ถึง  $r/d = 0.36$  เห็นได้ว่ามีความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มากที่สุด เพราะที่บริเวณนั้นมีการแพร่กระจายของสารระเหยสูงรวมตัวกับออกซิเจนเกิดการเผาไหม้สูงสุด ดังนั้นกำมะถันที่หลุดออกมาจากสารระเหยได้รวมตัวกับออกซิเจนในบริเวณนั้นจึงก่อให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตำแหน่งนั้นๆ มีปริมาณสูง บริเวณ  $r/d = 0.5$  ถึง  $r/d = 0.85$  ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องมาจากกระแสของ Secondary jet พุ่งเข้าห้องเผาไหม้ และที่  $r/d = 1.5$  จนถึงผนังห้องเผาไหม้สังเกตได้ว่าความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีปริมาณคงที่เนื่องมาจากที่กระแสไหลวนภายนอกที่เกิดขึ้นใกล้ผนังและไม่มีการก่อดวงของก๊าซดังกล่าวที่บริเวณนั้น

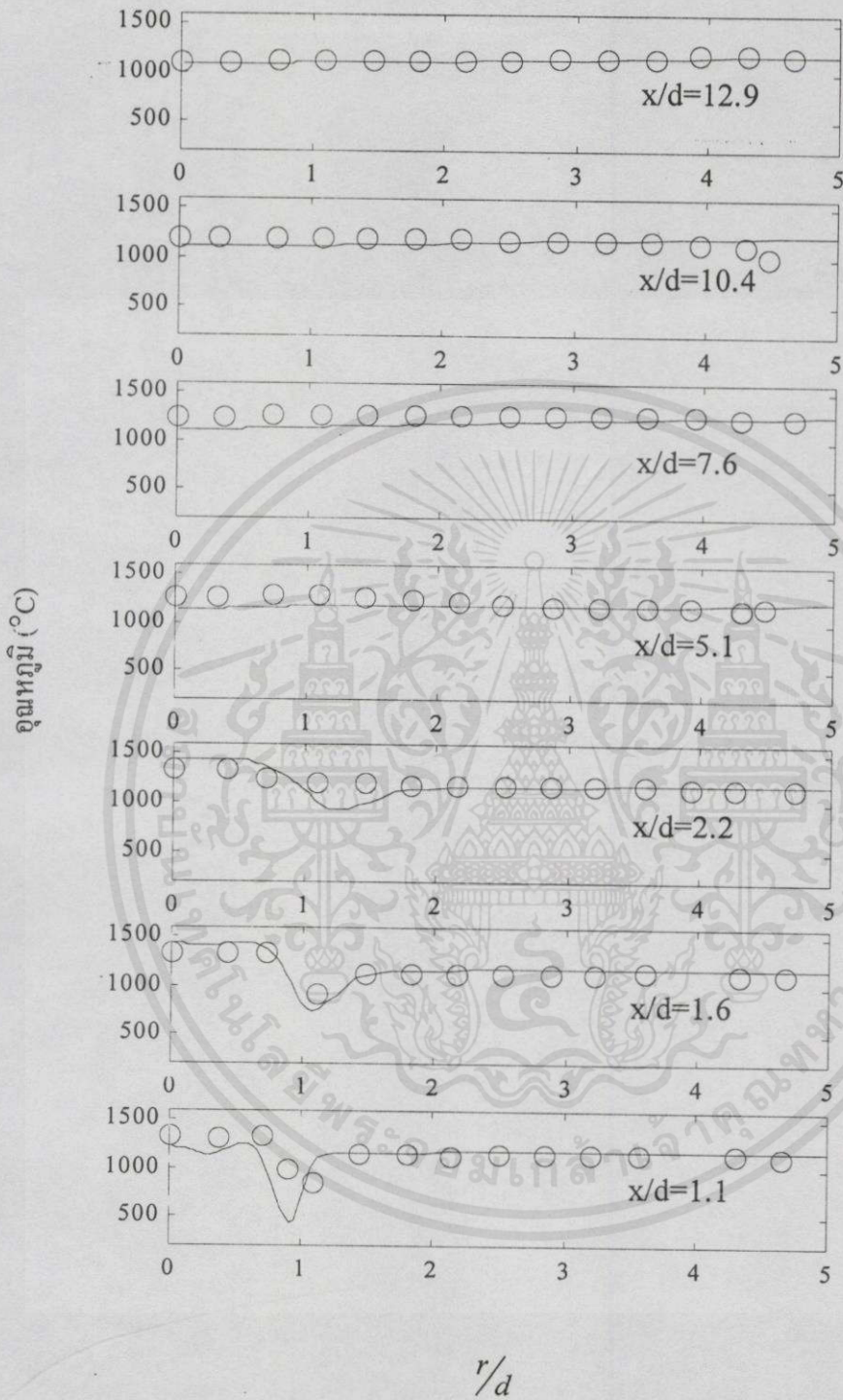
ที่ระยะ  $x/d = 5.1, 7.6, 10.4$  และ 12.9 สังเกตได้จากกราฟว่าที่ระยะนี้มีปริมาณความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ค่อนข้างคงที่ เนื่องมาจากบริเวณดังกล่าว เกิดการเผาไหม้ของสารระเหยจนหมดเหลือเฉพาะการเผาไหม้ของคาร์บอน ดังนั้นกำมะถันภายในอนุภาคได้หลุดออกมาพร้อมสารระเหยจนหมดแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

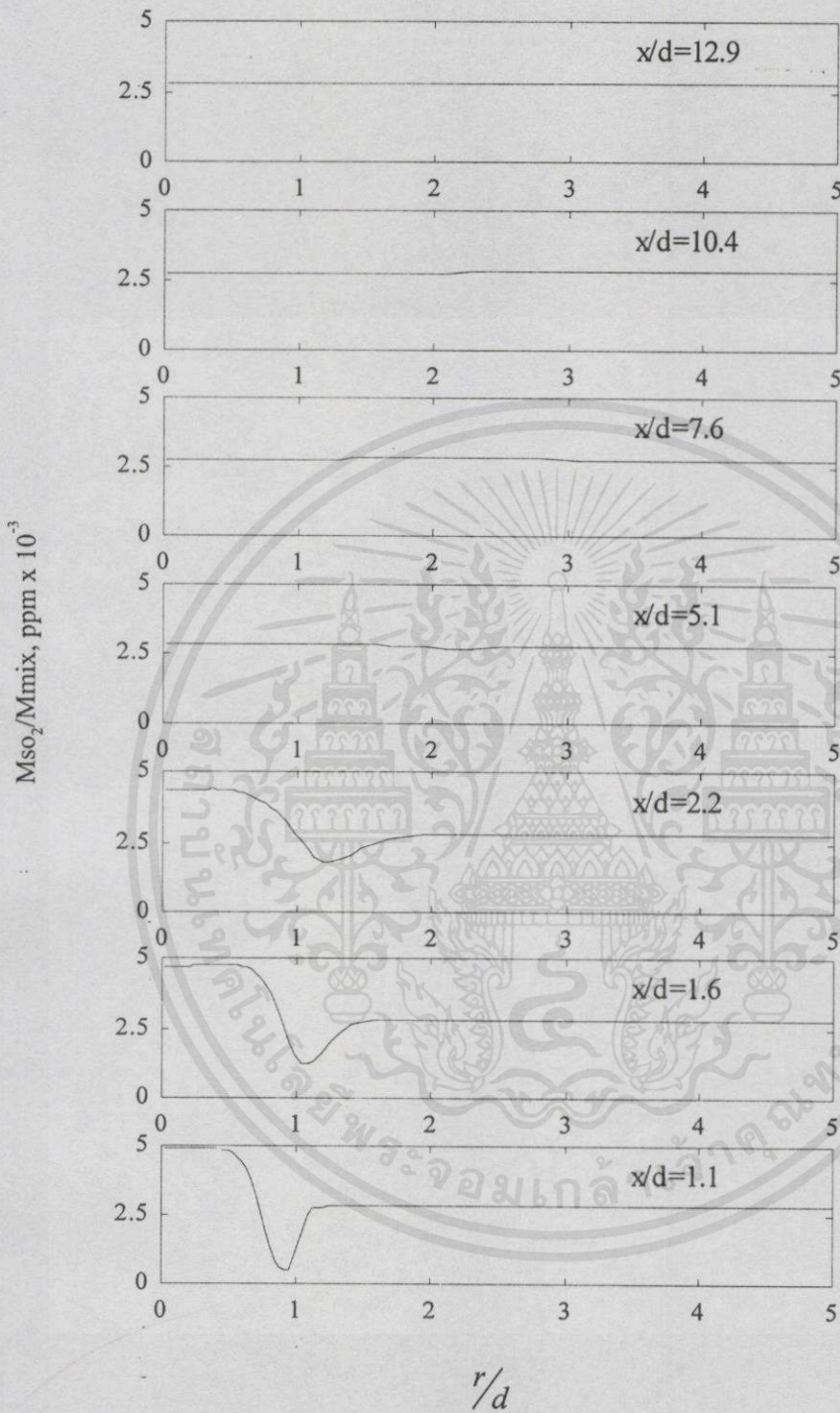
รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองของการกระจายตัวของก๊าซออกซิเจน



— ค่าที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ © ค่าที่ได้จากการทดลอง [3] ภายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองของการกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C)



— ค่าที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลอง

เอกสารรูปที่ 5.12 ผลการคำนวณของการกระจายตัวของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4 วิเคราะห์ผล การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี และคุณสมบัติเกี่ยวกับความร้อนถูกพิจารณาารวมกันภายในปริมาตร โดยกฎการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ ของปริมาตรข้างเคียง ปริมาณกำมะถันที่ป้อนเข้าห้องเผาไหม้เท่ากับ  $9.621 \times 10^6$  kg/s ทางทฤษฎีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งเกิดจากการผสมกันระหว่างกำมะถันที่หลุดออกจากสารระเหยรวมตัวกับออกซิเจนจะมีค่าเท่ากับ  $1.9242 \times 10^5$  kg/s แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้มีปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่คำนวณจากทางออกของห้องเผาไหม้เท่ากับ  $2.033 \times 10^5$  kg/s ค่าความผิดพลาดระหว่างผลทางทฤษฎีกับผลที่คำนวณได้เท่ากับ 5.35% และได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องอีกอย่างหนึ่งคือ พิจารณามวลของกำมะถันที่ไหลเข้าลบกับมวลไหลออกและลบกับ Source team ที่เกิดขึ้นในแต่ละหน้าตัดของห้องเผาไหม้ ค่าที่คำนวณได้มีความผิดพลาดสูงสุดประมาณ 5% (ภาคผนวก ข.)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ได้นำไปใช้ในการจำลองการเผาไหม้ของถ่านหินผง และคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อน ได้ผลเป็นที่น่าพอใจในส่วนของแบบจำลองการก่อตัวของกำมะถันนั้นก็ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ภายได้ข้อสมมุติฐานที่ให้ไว้ในบทนำ กล่าวคือ “ กำมะถันที่อยู่ในโครงสร้างของถ่านหินในรูปของ Organic sulfur จะปลดปล่อยออกมาทั้งหมดและทำปฏิกิริยาได้เป็น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ” อย่างไรก็ตามจากรูป 5.10 และ 5.11 ค่าที่ผิดพลาดเล็กน้อยระหว่างแบบจำลองกับการทดลองจริงสามารถสังเกตเห็นได้ สาเหตุใหญ่เนื่องมาจากอัตราการลดลงของ Jet เร็วเกินไปในทิศทางตามแนวแกน และผลเนื่องจากการไหลวน ความไม่สอดคล้องนี้ มีผลน้อยมากต่อการกระจายตัวของก๊าซต่าง ๆ ในบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ ทำให้มีความมั่นใจมากขึ้นในการนำไปใช้และพัฒนาแบบจำลองนี้ต่อไป

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลงานวิจัย

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยประยุกต์จากวรรณกรรมปริทรรศน์จากบทที่ 2 สมการพื้นฐานของแบบจำลองในบทที่ 3 กระบวนการหาคำตอบในบทที่ 4 และข้อสมมุติฐาน ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัยต่าง ๆ ในบทหน้า จากความรู้ดังกล่าวได้นำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเกิดออกไซด์ของกำมะถันจากการเผาไหม้ของถ่านหินผง โดยผสมผสานกับแบบจำลองการสันดาปของถ่านหินผงที่ได้พัฒนาแล้วโดย ICSTM ซึ่งค่าความเข้มข้นของ ออกซิเจนและอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายสอดคล้องกันเป็นอย่างดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณใกล้หัวเผา ซึ่งเกิดการเผาไหม้มากที่สุด ดังนั้นจึงมั่นใจได้ว่า อากาศพลศาสตร์และการเผาไหม้มีความถูกต้องในบริเวณนี้ ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีปริมาณสะสมที่สูงในช่วง 0.03 – 0.15 เมตร จากทางออกของหัวเผา ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลทางทฤษฎีกับผลที่คำนวณมวลรวมทั้งหมดของกำมะถันภายในแบบจำลองมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 5.35% และพิจารณาความแตกต่างของมวลกำมะถันที่เกิดขึ้นในแต่ละหน้าตัดของห้องเผาไหม้ โดยค่าที่คำนวณได้มีความผิดพลาดสูงสุดประมาณ 5% จากผลการจำลองทำให้ทราบว่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีความเข้มข้นสูงในบริเวณใกล้หัวเผา ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงเช่นกัน บริเวณดังกล่าวถูกห่อหุ้มด้วยกระแสน้ำวนที่ปล่อยออกจากหัวเผาที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนสูงและอุณหภูมิต่ำ ข้อมูลดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ในการศึกษาเพื่อลดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในห้องเผาไหม้ของถ่านหินผงต่อไป

### 6.2 ข้อเสนอแนะ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเกิดออกไซด์ของกำมะถันนี้ มีจำกัดอยู่หลายอย่างเช่น ห้องเผาไหม้ที่นำมาวิเคราะห์จะต้องมีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีความสมมาตรตามแนวแกนทุก ๆ หน้าตัดของห้องเผาไหม้ ฯลฯ แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่ใช้ในการศึกษารั้งนี้คือ Two equation K-ε model เป็นที่รู้จักกันดีอยู่แล้วว่าแบบจำลองของ K-ε มีข้อเสียเมื่อนำไปใช้ทำนายการไหลที่มีรูปร่างที่ซับซ้อน และมีการหมุนควงสูง (High swirl number) โปรแกรมของแบบจำลองนี้มีขนาดใหญ่ มีหลายสมการและหลายตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ในการใช้งานน่าจะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ ตั้งแต่ Pentium 200 Hz ขึ้นไป หรือ Super computer เพื่อสะดวกและรวดเร็วในการใช้งาน อีกประการหนึ่งน่าจะนำงานวิจัยชิ้นนี้เปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยการวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายในห้องเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจริง เพื่อจะทำให้แบบจำลองนี้น่าเชื่อถือยิ่งขึ้นและเป็นข้อมูลเพื่อลดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในห้องเผาไหม้ของถ่านหินผงต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] เกริกชัย สุกาญจน์จที. **ไอน้ำและพลังงานจากถ่านหิน**. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2529. หน้า 2-14.
- [2] ชุนยวม. 2541, 28 สิงหาคม. “ท้องถิ่นเมืองไทย โรงไฟฟ้าแม่เมาะ.” แนวหน้า.
- [3] Charoensuk J. “The Application of Mathematical Model for Scaling Pulverized Coal Combustors.” Ph.D Thesis. University of London and the Dipoma of Membership of the Imperial College. 1996.
- [4] William B., Sarofim A.F. **Fossil Fuel Combustion**. New york : John Wiley & Sons, Inc. 1991
- [5] Levy A., Merryman E.L. “The Microstructure of Hydrogen Sulphide Flames.” *Combustion and Flame.*, Vol.9, September 1965. pp. 229-240.
- [6] Kobayashi H., Howard J.B. and Sarofim A.F. “Coal Devolatilization at High Temperature.” *The Sixteenth International Symposium on Combustion.*, The Combustion Institute., 1976.
- [7] Howard H. C. **Pyrolytic Reaction of Coal**. *Chemistry of Coal Utilization. Supplementary Volume.* John Wiley & Sons. 1963. pp. 340-394.
- [8] Elghobashi S.E., Pun W.M. “A Theoretical and Experimental Study of Turbulent Diffusion Flames in Cylindrical Furnaces.” *The Fifteenth International Symposium on Combustion.*, The Combustion Institute., 1975.
- [9] Lockwood F.C., Naguib A.S. “The Prediction of the Fluctuations in the Properties of Free, Round – jet, Turbulent Diffusion Flames.” *Combustion and Flame.*, Vol.24, 1975.
- [10] Spalding D.B. “Mixing and Chemical Reaction in Steady Confined Turbulent Flames.” *The Thirteenth International Symposium on Combustion.*, The Combustion Institute., 1971.
- [11] Magnussen B.F., Hjertager B.H. “On Mathematical Modelling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion.” *The Sixteenth International Symposium on Combustion.*, The Combustion Institute., 1976.
- [12] Smoot L.D., Pratt D.T. **Pulverised Coal Combustion and Gasification: Theory and Applications for Continuous Flow Processes**. New York : Plenum Publishing Corp. 1979.
- [13] Field M.A., Gill D.W., Morgan B.B. and Hawksley P.G.W. **Combustion of Pulverised**

Coal. BCURA, Leatherhead, Surrey, England. Publisher : Cheney & Sons Ltd., Banbury, England. 1967.

- [14] Pershing D.W., Wendt J.O.L. "Pulverised Coal Combustion : The Influence of Flame Temperature and Coal Composition on Thermal and Fuel  $\text{NO}_x$ ." The Sixteenth International Symposium on Combustion., The Combustion Institute., 1976.
- [15] Levy A., Merryman E.L. "Mechanisms of Formation of Sulfur Oxides in Combustion." Environ. Sci. Technol. 4. 1970.
- [16] Demerdache A., Sugden T.M. "Some Reaction of Sulphur Compounds in Flames" in **The Mechanism of Corrosion by Fuel Impurities.** London : Johnson H.R. and Littler D.J., Eds., Butterworths Scientific Publications. 1963. pp.216 – 227.
- [17] เทพวิฑูรย์ ทองศรี. "การปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการใช้เชื้อเพลิงภายในประเทศ." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2535 หน้า 29.
- [18] นารา พิทักษ์อรุณพ, "มลภาวะในการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง." ข่าวสารการธรณี, ปีที่ 38 ฉบับที่ 10, 2536. หน้า 28- 34.
- [19] วรวุฒิ รักแค้นาน, "คุณสมบัติการจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของหินปูนธรรมชาติและสารประกอบแคลเซียมเหลือทิ้ง." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หน้า 64.
- [20] IEA Coal Research, "Review in Coal Science" : **The Problems of Sulfur.** London : Johnson H.R. and Littler D.J., Eds., Butterworths Scientific Publications. 1989. pp.1 – 52.
- [21] กรมควบคุมมลพิษ(กพ.). "มาตรฐานคุณภาพอากาศ." [Online]. Available : <http://www.pcd.go.th> .1999.
- [22] สุวพันธ์ นิลายน. "สภาพอากาศกับปัญหามลภาวะโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ." วารสาร กฟผ, ปีที่ 1, เล่มที่ 4, 2533. หน้า 32 - 39.
- [23] กัลยาพร พรณาปิติ, "ซัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำไมต้องเป็น "ระบบเปียก". " ข่าวสาร กฟผ., ปีที่ 23, ฉบับที่ 8, 2536, หน้า 14 – 18.
- [24] Favre A. "Equations des Gaz Turbulence Compressibles." Journal des Mechanique., Vol.4, 1965.
- [25] Jones W.P., Launder B.E. "The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence." International Journal of Heat and Mass Transfer., Vol.15, 1972.
- [26] Sloan D.G., Smith P.G., and Smoot L.D. "Modelling of Swirl in Turbulent Flow Systems." Progress in Energy Combustion Science., Vol.12, 1986.

- [27] Brodkey R.S. **The Phenomena of Fluid Motions.** Addison-Wesley Publishing Company., Reading. MA., 1967.
- [28] Hinze J.O. **Turbulence.** London : McGraw – Hill. 1975.
- [29] Jayatilleke C.L.V. “The Influence of Prandtl Number and Surface Roughness on the Resistance of the Laminar Sub – Layer to Momentum and Heat Transfer.” Progress in Heat and Mass Transfer., Vol.1, Pergamon Press, 1969.
- [30] Rizvi S.M.A. “Prediction of Flow, Combustion and Heat Transfer in Pulverized Coal Flames.” Ph.D. Thesis. University of London and the Diphoma of Membership of the Imperial College. 1985.
- [31] Anson D., Tindall D. “A General Expression For the Discharge Coefficient of a Burner Register.” Journal of the Institute of Fuel., Vol.40, 1957.
- [32] Baum M.M., Street P.J. “Predicting the Combustion Behaviour of Coal Particles.” Combustion Science and Technology., Vol.3, 1971.
- [33] Wallis G.B. **One – Dimensional Two – Phase Flow.** New York : McGraw-Hill. 1969
- [34] Perera S.V.L. “Private Communication.” Thermofluids Section. ICSTM, London. 1996.
- [35] Gibb J. “Internal Note : Central Electrical Generating Board.” NRM 85., 1973, See Rizvi, 1985.
- [36] Gibb J. “Analytic Solution to a Two - Dimensional Cartesian Geometry.” Central Electrical Generatiny Board. 1977, See Rizvi, 1985.
- [37] Abbas T. “In-flame Measurement of N-Pollutant and Burnout in a Pulverised-Coal-Fired Furnace.”, Ph.D. Thesis. University of London and the Diphoma of Membership of the Imperial College. 1993.
- [38] Versteeg H.K., Malalasakera W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics : The Finite Volume Method.** Malaysia : John Wiley & Son Inc. 1995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## มาตรฐานอากาศเสียจากโรงงานไฟฟ้า (ใหม่) ภายในประเทศ

ผ.ก.1 แสดงมาตรฐานอากาศเสียจากโรงงานไฟฟ้า (ใหม่) ภายในประเทศ

สารมลพิษ	ค่าปริมาณของสารเจือปนที่ระบาย ออกจากโรงงาน			วิธีการตรวจวัด
	ถ่านหิน	น้ำมัน	ก๊าซธรรมชาติ	
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)				USEPA วิธีที่ 6 หรือ 8
โรงไฟฟ้าขนาด > 500 เมกกะวัตต์	320	320	20	
300 - 500 เมกกะวัตต์	450	450	20	
< 300 เมกกะวัตต์	640	640	20	
NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> จากโรงไฟฟ้าทุกขนาด (ส่วนในล้านส่วน)	350	180	120	USEPA วิธีที่ 7
ฝุ่นละอองจากโรงไฟฟ้าทุกขนาด (มก./ลบ.ม.)	120	120	60	USEPA วิธีที่ 8

## หมายเหตุ :

1. มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงไฟฟ้าซึ่งมีผลบังคับกับโรงไฟฟ้าที่ได้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานหรือใบอนุญาตขยายโรงงานหลังจากวันที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษานี้เท่านั้น
2. การวัดค่าก๊าซ หรือสารเจือปนในอากาศแต่ละชนิดให้คำนวณผลที่ความดัน 1 บรรยากาศ หรืออุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสที่สถานะแห้ง (Dry basis) โดยมีปริมาตรอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ (Excess air) ร้อยละ 50 หรือที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7

แหล่งที่มา : พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ.2535 โดยออกเป็น

ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการ

ปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงไฟฟ้า และเรื่องกำหนดให้โรงไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่จะต้องถูก

ควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมเมื่อวันที่ 25 ธันวาคม พ.ศ.2538

## ภาคผนวก ข.

## ผลการคำนวณที่ได้จากทฤษฎีเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลอง

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของถ่านหินได้จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ประกอบด้วย

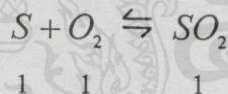
คาร์บอน	83.1	%
ไฮโดรเจน	4.35	%
ไนโตรเจน	1.29	%
กำมะถัน	1.55	%
ออกซิเจน	9.71	%

อัตราการป้อนถ่านหิน 0.0039 kg/s

∴ ปริมาณของกำมะถันที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ (ทางทฤษฎี) ต่อ เรเดียน

$$\text{ปริมาณของกำมะถัน (ทางทฤษฎี)} = 0.0039 \times 0.0155 / (2\pi) = 9.621 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$$

ปริมาณกำมะถันรวมตัวกับออกซิเจนเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถคำนวณได้ดังนี้



ตารางที่ ผ.ข.1 แสดงอัตราส่วนการเกิดปฏิกิริยาของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ธาตุ	น้ำหนักมวลโมเลกุล	โมล
S	32	1
O <sub>2</sub>	32	1
SO <sub>2</sub>	64	1

จะเห็นได้ว่า ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์หนักเป็นสองเท่าของกำมะถัน

∴ ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้เท่ากับ  $1.9242 \times 10^{-5}$  kg/s

ไม่ว่ากรณีใด จากแบบจำลองสามารถคำนวณปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ทางออกได้

เท่ากับ  $2.033 \times 10^{-5}$  kg/s

ค่าความผิดพลาดของปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ทางออก

$$= \frac{|1.9242 \times 10^{-5} - 2.033 \times 10^{-5}|}{2.033 \times 10^{-5}}$$

$$= 5.35 \%$$

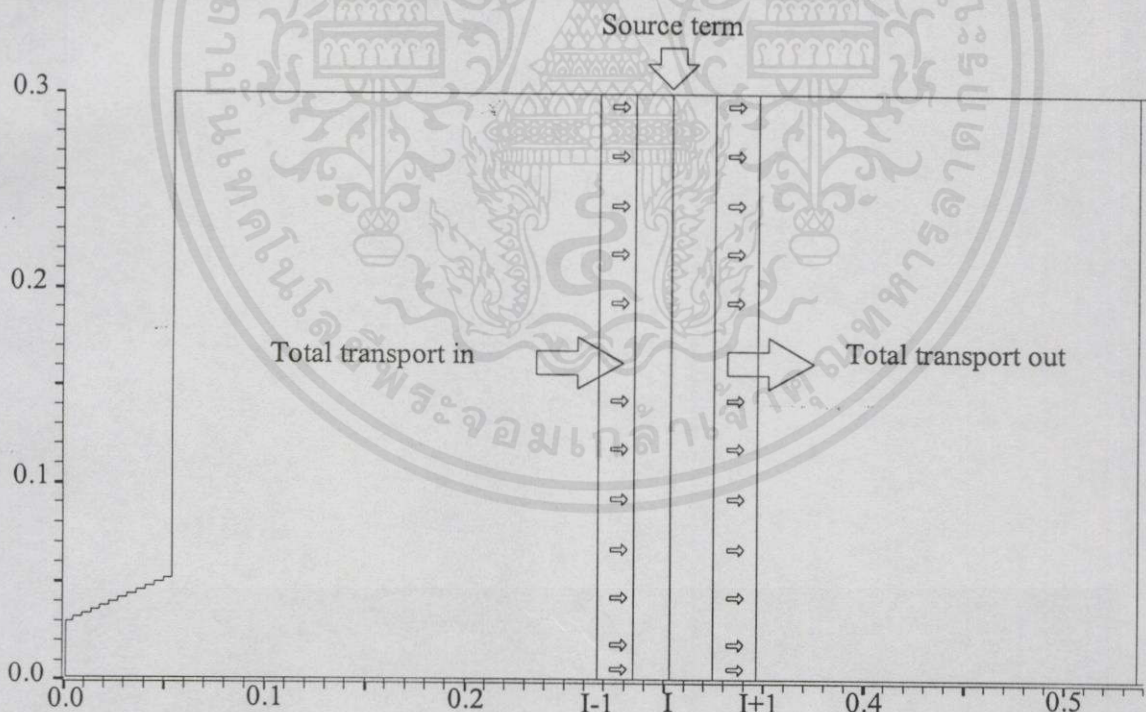
สมการที่ใช้ ตรวจสอบ Mass balance ของ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ทุกหน้าตัดภายในห้องเผาไหม้

$$= [\text{Total transport in} - \text{Total transport out} - \text{Source term}]$$

Total transport in คือ ค่าการถ่ายเทรวมทั้งหมดของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่หน้าตัดทางเข้าของเซลล์ ซึ่งมีผลของการพาและการแพร่

Total transport out คือ ค่าการถ่ายเทรวมทั้งหมดของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่หน้าตัดทางออกของเซลล์ ซึ่งมีผลของการพาและการแพร่

Source term คือ พจน์ของ Source ที่เกิดจากการถ่ายเทภายในปริมาตรของเซลล์



รูป ผ.ข. 1 วิธีการตรวจสอบ Mass balance ของทุก ๆ หน้าตัดของห้องเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่จากโปรแกรมค่า Mass balance ที่มีการตรวจสอบ พบว่าที่ตำแหน่ง


$$x/d = 1.1 \quad \text{มีค่าความคลาดเคลื่อน} = 2.1389 \%$$

$x/d = 5$	มีค่าความคลาดเคลื่อน	=	4.3442 %
$x/d = 10$	มีค่าความคลาดเคลื่อน	=	0.2658 %
$x/d = 20$	มีค่าความคลาดเคลื่อน	=	0.0071 %
$x/d = 30$	มีค่าความคลาดเคลื่อน	=	0.00253 %
$x/d = 40$	มีค่าความคลาดเคลื่อน	=	0.00166 %
$x/d = 50$	มีค่าความคลาดเคลื่อน	=	0.00531 %

จะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีการสะสมมากขึ้นของแต่ละหน้าตัด อาจเกิดจากการใช้เทคนิคของการปิดเศษ เพื่อทำการแก้ค่าตัวหารไม่ให้เป็นศูนย์ โดยนำค่า  $1.0 \times 10^{-30}$  มาบวกกับตัวหาร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.  
ผลงานทางวิชาการเกี่ยวกับงานวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม

# ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 16 ฉบับที่ 3

กันยายน 2542

1. การคำนวณหาขนาดกระแสของสาย XLPE ที่ขนาดแรงดัน 12 kV. และ 24 kV. เมื่อติดตั้งใน Duct Bank  
สุทัศน์ พิลา นัทศน์ กฤษณจินดา สุลี บรรจงจิตร 1
2. การคำนวณหาพิทศกระแสของสายเคเบิลโดยคำนึงถึงผลกระทบของฮาร์โมนิก  
สมชัย จิรุงโรจน์กุล นัทศน์ กฤษณจินดา สุลี บรรจงจิตร 7
3. การวิเคราะห์ข้อแตกต่างของหม้อแปลงจำหน่ายชนิดจุ่มน้ำมันเมื่อออกแบบสร้างตามข้อกำหนดเดิมเปรียบเทียบกับข้อกำหนดใหม่  
ตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค  
สิริวิช ทัดสวน ปัญญา มาลีวัตร สุลี บรรจงจิตร นัทศน์ กฤษณจินดา บุญเลิศ สือเฉย 13
4. การค้นหาโรเตอร์สล็อตฮาร์โมนิกส์เพื่อวัดความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบไร้ตัวตรวจจับความเร็ว  
เฉลิมชาติ มานพ อมรรรัตน์ สุโคตร วิจิตร กิณเรศ 19
5. ค่าการสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำเนื่องจากแรงดันฮาร์โมนิกส์ เมื่อคิดผลของ Skin Effect และ Stray Load Loss  
ธนิษฐา รัตนะ วิจิตร กิณเรศ 25
6. การศึกษาเชิงตัวเลขของการบิดของไหลเข้ากระแทบแผ่นเรียบเชิงระนาบและเชิงสมมาตร  
พงษ์เจต พรหมวงศ์ ปัญญา รวมภักติกุล 31
7. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเกิดออกไซด์ของกำมะถันจากการเผาไหม้ของถ่านหินผง  
จารุวัตร เจริญสุข ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ 37
8. การคำนวณและออกแบบสมรรถนะใบจักรเรือ  
อัครเดช สินธุภักดิ์ จารุพันธ์ หนูสมตน 43
9. เทคนิคการเขียน G-code เครื่องจักร CNC ด้วยภาษาเบสิก  
บุญชู ลีลาขจรจิต ทวี เทศเจริญ อัครเดช สินธุภักดิ์ 49
10. กังหันลมสำหรับพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย  
มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ฉัตรชัย งามโชคชัย 55
11. การคำนวณหาความเร็วลมที่หายไปของเครื่องมือวัดลมเรดิโอไอโดไลท์  
สุทธิ พานิชการ สุวิพล สิทธิชีวภาค เกรียงไกร วงศ์โรจนภรณ์ 61
12. การศึกษาการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ELF จากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า  
ชจิตพรพรรณ มกระธัช ณรงค์ เหมภรณ์ 66
13. การจัดสรรของสัญญาณดาวแบบมีลำดับสิทธิการใช้ช่องสัญญาณในดาวเทียมวงโคจรต่ำ  
กิตติเจริญ สุขชัยศิริกุล กัลยา จันทร์ชานา เอกพล ใจรักธรรม สุทธิ พานิชการ สุวิพล สิทธิชีวภาค 72
14. การถอดรหัสข้อมูล POCSAG ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และการประยุกต์ใช้งาน  
กัญจน์ สิทธิประเสริฐ ไกรสิน สงัดวัฒนา 78
15. การเพิ่มประสิทธิภาพของการเรียกหาข้อมูลสายโทรศัพท์กับลูกข่ายของระบบวิทยุบริการเฉพาะกลุ่ม  
กมล น้อยทองเล็ก กอบชัย เดชหาญ 84
16. A Monolithic Patch Antenna on a Semi-insulated Si Substrate for Active Integrated Antenna  
Sathaporn Promwong Prakrit Tangtisanon Jun-ichi Takada and Shigeo Kawasaki 90
17. เชียวลิสติก อัลกอริทึม การจัดกลุ่มงานบนโปรแกรมแบบขนาน  
ศักดิ์ชัย คันธะขจร บรรจง ปิยธำรง 95
18. เครื่องวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID แบบอัตโนมัติ  
พิทยา ปานนิล ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์ ประภาช อุดคกิมพันธ์ กิตติ ตีระเศรษฐ 101
19. การออกแบบตัวควบคุม PIDA ด้วยวิธีทางเดินของราก  
อาจินต์ นวมสารานู ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์ ประภาช อุดคกิมพันธ์ วิริยะ กองรัตน์ 107
20. วงจรตีมอดูเลตสัญญาณเอพเอ็มแบบควอดราเจอร์เฟสโดยใช้วงจรดีเฟอเรนเชียล  
อธิภู มงคลขจิต วิภา แสงพิสิทธิ์ จริยา เลิศจรัสรัมย์ดี วินัย ศิลารวม 113
21. เครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบมัลติแชนแนล  
วันชัย ชินชูศักดิ์ วิทยา ทิพย์สุวรรณพร วิริยะ กองรัตน์ เวศิน ปิยรัตน์ 119

# แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของการเกิดออกไซด์ของกำมะถัน จากการเผาไหม้ของถ่านหินผง

## Mathematical Model of Sulfur Oxide Formation in Pulverized Coal Combustion

จรวัดกร เจริญสุข ปัญญา แดงวิไลลักษณ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

บทความนี้ เสนอการศึกษาเรื่องการก่อตัวและปริมาณออกไซด์ของกำมะถัน ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินผง และสร้างแบบจำลอง โดยใช้วิธี Finite Volume โดยพิจารณาของไหลให้เป็นปริมาตรเล็กๆ และผสมผสานกับแบบจำลอง การสันดาปของถ่านหินผงที่ได้พัฒนาแล้ว (FAFNIR) โดย Imperial College of Science, technology and Medicine (ICSTM) ซึ่งพิจารณาสมการการถ่ายเทมวล โมเมนตัม พลังงานและการเผาไหม้ของถ่านหินผง การเผาไหม้ของแข็งและของเหลวในแบบจำลองนี้ได้ผสมกันทางกายภาพอย่างดีด้วยการคำนวณ ผลจากการจำลองเทียบกับผลการทดลองพบว่าเป็นที่น่าพอใจ

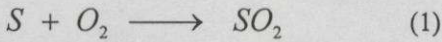
### Abstract

A simplified mathematical model of Sulfur oxides formation has been proposed in this paper. The model is used in the simulation of pulverized coal combustion. A finite volume method is used, considering the problem within a small volume that interacts with others under the laws of momentum mass and heat conservation. The model is incorporated into FAFNIR which has already been developed at ICSTM. Reaction rate of Sulfur is assumed to be related to a decay rate of turbulent eddies in proportion to the reaction rate of volatile. The predicted oxygen mass fraction and temperature in the near burner zone are in good agreement with experimental data.

### 1. บทนำ

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่ยังมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากมีราคาถูกกว่า น้ำมันถ่านหินสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้า และกิจกรรมอื่น ๆ การนำมาใช้ทดแทนพลังงานจากน้ำมันจึงมีปัญหาจากกำมะถัน ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษ เป็นอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ถ่านหินเมื่อถูกทำให้ร้อนจะปลดปล่อยสารระเหย, โดยส่วนที่เหลือในรูปของแข็งคือ

คาร์บอนและขี้เถ้า สารระเหยจะเผาไหม้กับอากาศและก่อให้เกิดออกไซด์ของกำมะถัน และก๊าซอื่น ๆ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ได้สมมุติว่ากำมะถันในสารระเหยเมื่อเผาไหม้ได้รวมตัวกับออกซิเจนด้วยอัตราการรวมตัวที่สัมพันธ์กับอัตราการผลิตของกระแสปั่นป่วน เนื่องจากอัตราทางจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาดังกล่าวสูงกว่าอัตราการผสมของ กระแสปั่นป่วนนั่นเอง[1]และเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยสมการปฏิกิริยาตามสมการ(1) ทั้งหมด



สมมุติฐานดังกล่าวเป็นผลจากการสังเกตที่ว่าก๊าซ SO<sub>2</sub> ซึ่งเกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ มีสถานะไม่เสถียรและทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว ขณะที่ก๊าซ SO<sub>3</sub> นั้นถูกสร้างเพียงเล็กน้อย[11]

## 2. สมการพื้นฐานของปัญหา

กระบวนการที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้อาจจะอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยประกอบไปด้วยกระบวนการต่าง ๆ เช่น กระบวนการทางกายภาพ เคมี และพลังงานที่ซับซ้อน จึงจำเป็นต้องเปรียบเทียบผลที่คำนวณได้กับค่าที่ได้จากการทดลอง สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการไหลของของไหลภายในห้องเผาไหม้คือ Reynolds - averaged Equations โดยใช้อธิบายสมการอนุกรมมวล โมเมนตัมและพลังงานของปริมาตรควบคุม ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้[4]

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} + \tau_{ij}) + S_u \quad (3)$$

ซึ่ง

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad \tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} \quad (4)$$

$S_m$  และ  $S_u$  และ Sink หรือ Source terms ของมวลและโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุมเล็ก ๆ ตามลำดับ,  $\bar{\tau}_{ij}$  คือค่าเฉลี่ยของ viscous stress tensor,  $u_i$  และ  $u_j$  คือ tensor ของความเร็วเฉลี่ย,  $\rho$  คือ ความหนาแน่น,  $\mu$  คือ laminar viscosity,  $\tau_{ij}$  คือ Reynolds stresses ซึ่งแทนการถ่ายเทโมเมนตัมเนื่องจากการกระจายของความปั่นป่วน ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการเผาไหม้ของถ่านหินผง สมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรม ดังกล่าวในแบบจำลองนี้ คือ สมการ  $k$  และสมการ  $\varepsilon$  ซึ่งเป็นสมการอธิบายการถ่ายเทพลังงานจลน์ของ Turbulence ( $k$ ) และอัตราการหายไปของพลังงานจลน์ความปั่นป่วน( $\varepsilon$ ) [8] ซึ่งอาจแทนในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (6)$$

ซึ่ง  $G$  แทนอัตราการสร้างพลังงานจลน์ของ Turbulent ส่วน,  $\rho \varepsilon$  คืออัตราการหายไปของพลังงานจลน์,  $G$  กำหนดโดย

$$G = \mu_e \left[ \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

และ 
$$\mu_e = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

$\mu_e$  คือ ความหนืดปั่นป่วน, ตัวแปร  $C_\mu$ ,  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $\sigma_k$  และ  $\sigma_\varepsilon$  คือค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองของสมการการถ่ายเทของพลังงานของความปั่นป่วน เงื่อนไขที่ขอบสำหรับพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและอัตราการหายไปของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนจะแทนในสมการต่อไป โดยสมมุติว่าอัตราการก่อตัวของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนจะเท่ากับอัตราการหายไปของมันที่บริเวณใกล้ผนัง

$$k = C_\mu^{1/2} \frac{\tau_w}{\rho} \quad \text{และ} \quad \varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{2/3}}{ky} \quad (9)$$

โดย  $k$  คือค่าคงที่ Von Karman,  $y$  คือระยะห่างจากผนัง นอกจากการพิจารณาด้านอากาศพลศาสตร์แล้ว ยังพิจารณาการแพร่กระจายของอุณหภูมิและ Mass fraction ของ อากาศ, สารระเหย, คาร์บอนไดออกไซด์, ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ฯลฯ แบบจำลองของคุณสมบัติเหล่านี้ถูกเขียนในรูปแบบสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial (\rho u_j \phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (D_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_j \phi'}) \right] + S_\phi \quad (10)$$

$S_s$  เป็นเทอม sink หรือ source ที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้ ค่าด้านซ้ายมือของสมการเป็นผลจากการพาของคุณสมบัติที่พิจารณา( $\phi$ ), เทอมแรกด้านขวามือเป็นผลของการแพร่ และเทอมที่สองในวงเล็บเป็น Turbulence flux ซึ่งถูกกำหนดในแบบจำลองเหมือนกับกรณีของสมการเคลื่อนย้ายของโมเมนตัม

$$-\overline{\rho u_j' \phi'} = \frac{\mu_e}{\sigma_{\phi,t}} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \quad (11)$$

$\mu_e$  คือค่า eddy viscosity ของการไหล,  $\sigma_{\phi,t}$  คือค่า Schmidt หรือ Prandtl numbers ของคุณสมบัติที่พิจารณา แบบจำลองที่นำมาใช้ ได้มาจาก [6]และ[7] สำหรับการถ่ายเทโมเมนตัมและ ถ่ายเทความร้อนใกล้ผนัง ในแบบจำลองนี้ อัตราของสารระเหยที่ปล่อยออกมาถูกอธิบายในรูปของ Arrhenius function ร่วมกับกลุ่มของตัวแปรที่ได้จากการสังเกตจากการทดลอง เขียนสมการได้ดังนี้ [2]

$$\frac{DV}{Dt} = K(V^* - V) \quad (12)$$

ซึ่งค่า  $V^*$  คือจำนวนรวมทั้งหมดของสารระเหยในถ่านหิน,  $V$  คือจำนวนเชิงสะสมของสารระเหยที่ปล่อยออกมาและ  $K$  คือค่าคงที่ กำหนดได้ดังนี้

$$K = k_0 \exp\left(-\frac{E_{vol}}{RT}\right) \quad (13)$$

$K$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของพลังงานจลน์ทางเคมี,  $k_0$  คือค่าคงที่ของปฏิกิริยา ซึ่งแบบจำลองถูกเสนอโดย[3] ใช้อธิบายอัตราการเผาไหม้ของ Char อัตรานี้ควบคุมโดย 2 กระบวนการ คือปฏิกิริยาเนื่องจาก Kinetic rate ของ Char และการแพร่ของออกซิเจนที่พื้นผิวของอนุภาคถ่านหิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อใช้ในการวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดได้โดยไม่ได้รับอนุญาต

$$\frac{Dm}{Dt} = K_r \pi d^2 P X_{O_2} \quad (14)$$

$K_r$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยาของ Char,  $d$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค Char,  $P$  คือค่าความดันย่อยของออกซิเจนและ  $X_{O_2}$  คือค่า Mass fraction ของออกซิเจน ค่าอัตราปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารระเหยกับออกซิเจน ถูกสมมุติให้มีความสัมพันธ์กับอัตราการเสื่อมสลายของ Turbulent eddies ซึ่งเปลี่ยนแปลงโดยตรงกับเวลากับ large scale eddies โดยขึ้นอยู่กับค่า  $\epsilon/k$  [14]

$$R_v = A P \frac{\epsilon}{k} \text{MIN}\left(\phi_{fuel}, \frac{\phi_{ox}}{S}, B \frac{\phi_{pr}}{1+S}\right) \quad (15)$$

$R_v$  คือค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของก๊าซ volatile,  $A$  และ  $B$  คือค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง,  $\phi_{fuel}$  คือ Mass fraction ของ volatile,  $\phi_{ox}$  คือ Mass fraction ของ ออกซิเจน,  $\phi_{pr}$  คือ Mass fraction ของ ผลิตภัณฑ์ของการเผาไหม้ ซึ่งประกอบด้วย ไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ และ  $S$  คือ ปริมาณ Stoichiometric ของก๊าซ volatile

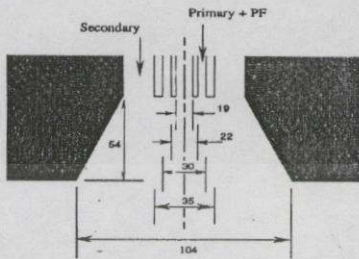
ทางเดินของอนุภาคถ่านหินในห้องเผาไหม้ถูกจำลองโดยใช้วิธี Lagrangian อนุภาคถ่านหินถูกปล่อยที่ทางเข้า โดยกำหนดตำแหน่งแน่นอน การกระจายขนาดของถ่านหินเหล่านั้นถูกแบ่งเป็นช่วง ๆ โดยแต่ละช่วงจะแทนด้วยขนาดเฉลี่ยของช่วงนั้น ๆ การถ่ายเทของมวล, โมเมนตัมและ พลังงานจากอนุภาคสู่ก๊าซหาค่าได้โดยใช้เทคนิคของเซลล์[10] การกระจายของอนุภาคเกิดขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วนถูกสมมุติโดย[8]และใช้สมการอธิบายการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีโดย[5,15] การถ่ายเทความร้อนเกิดจากการแผ่รังสีรวมกับสมการการถ่ายเทพลังงาน โดยเทอมของ Source หรือ Sink

### 3. การจำลองการเผาไหม้ของเตาที่ใช้ถ่านหินผง

#### 3.1 ลักษณะห้องเผาไหม้

จาก[1] เตาเผาของ ICSTM มีลักษณะเป็นทรงกระบอกแนวตั้งและเปลวไฟขีดลงด้านล่าง มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เมตร และ ความยาวรวม 3.0 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเผา(d) 0.056 เมตร มีการสร้างคอนกรีตทนไฟที่บริเวณใกล้หัวเผาเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ข้อมูล

อุปกรณ์การทดลอง, คุณสมบัติของถ่านหินผง จาก[1] รูปที่ 1 เป็นโครงสร้างของหัวเผาที่ชื่อว่า Single Annular Orifice (SAO) ตารางที่1 เป็นเงื่อนไขต่าง ๆ ของห้องเผาไหม้โดยเตาเผาของ[1]



รูปที่ 1 โครงสร้างของหัวเผาในห้องเผาไหม้ ตารางที่1.เงื่อนไขห้องเผาไหม้ของเตาเผาที่(ICSTM)[12]

<b>ห้องตรงกลางหัวเผา:</b>	
อัตราการไหลของอากาศ, kg/s	$2.777 \times 10^{-1}$
Swirl number	0.0
อุณหภูมิ, K	353
<b>ห้องหัวเผาแรก:</b>	
อัตราการไหลของอากาศ, kg/s	$8.833 \times 10^{-1}$
Swirl number	0.0
อุณหภูมิ, K	353
<b>ห้องหัวเผาที่สอง:</b>	
อัตราการไหลของอากาศ, kg/s	$3.344 \times 10^{-2}$
Swirl number	1.03
อุณหภูมิ, K	573
อากาศส่วนเกิน, (%)	15
<b>Proximate analysis:</b>	
	(% มวล)
สารระเหย	35.8
Fixed carbon	53.7
ความชื้น	6.3
<b>Ultimate analysis:</b>	
	(% มวล)
คาร์บอน	83.1
ไฮโดรเจน	4.35
ไนโตรเจน	1.29
ซัลเฟอร์	1.55
ออกซิเจน	9.71
<b>Partical size distribution:</b>	
	(% มวล)
0-10 $\mu\text{m}$ .	15.0
10-25 $\mu\text{m}$ .	25.0
25-40 $\mu\text{m}$ .	20.0
40-75 $\mu\text{m}$ .	20.0
>75 $\mu\text{m}$ .	20.0
ปริมาณความร้อน(MJ/kg)	29.29

### 3.2 ลักษณะของโปรแกรม

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ, เคมี, คุณสมบัติเกี่ยวกับความร้อนถูกพิจารณาพร้อมกันภายในปริมาณ

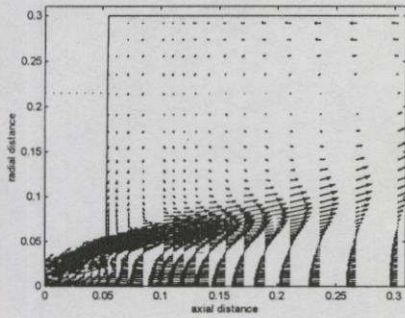
โดยกฎการอนุรักษ์มวล, โมเมนตัมและพลังงาน การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ ของปริมาตรข้างเคียงสามารถหาได้โดยเทคนิคการประมาณค่า ของ Quadratic upstream interpolation for convection and kinematics Differencing scheme[9] และ Hybrid Differencing scheme[14] การแก้สมการที่เกี่ยวข้องด้วยการทำซ้ำจนกระทั่งเข้าหาคำตอบที่ถูกต้องโดยแบ่งปริมาตรให้ขนาดเล็กพอ เพื่อที่จะทำให้เกิดค่าผิดพลาดในการประมาณค่าน้อยจนถึงระดับที่ยอมรับได้[4]

### 4. ผลการคำนวณและวิเคราะห์ผล

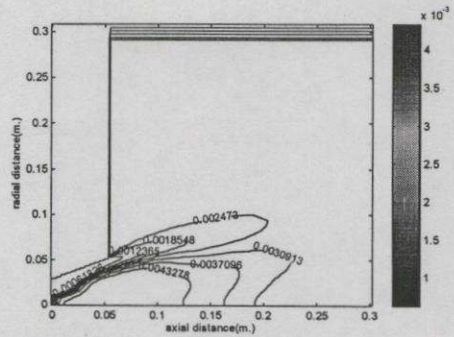
กำหนดในสารระเหยเมื่อเผาไหม้ได้รวมตัวกับออกซิเจนอย่างดีด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สัมพันธ์กันกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหยที่รวมตัวกับออกซิเจน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอากาศพลศาสตร์และแบบจำลองของการเผาไหม้ที่ถูกต้อง จากการศึกษาอัตราการเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในระดับเดียวกันกับปฏิกิริยาการเผาไหม้[13] ในการเผาไหม้ของถ่านหินภายในห้องเผาไหม้ที่สารตั้งต้นไม่ได้ผสมกันมาก่อนนั้น เมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้สูงกว่า  $1000^{\circ}\text{C}$  อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะสูงกว่าอัตราการผสมกันของสารตั้งต้นดังนั้นจึงทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วเมื่อผสมกัน การผสมกันแบบปั่นป่วนจึงมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาทั้งหมดปฏิกิริยาจะถูกควบคุมโดยอัตราการผสมของความปั่นป่วนซึ่งเป็นสมมุติฐานที่ใช้สำหรับเชื้อเพลิง และอากาศที่เข้ามาผสมกันในห้องเผาไหม้ (Non-premixed Combustion) ความสัมพันธ์ขั้นระหว่างอัตราการก่อตัวของซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับอัตราการเผาไหม้ของสารระเหยคือสมการข้างล่างนี้

$$R_{\text{SO}_2} = x_s \cdot R_v \quad (16)$$

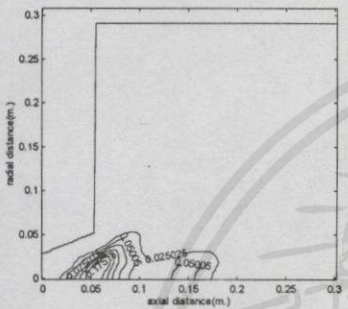
$R_{\text{SO}_2}$  คือค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์,  $x_s$  คือ Mass fraction ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์,  $R_v$  คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหย ปริมาณกำมะถันที่ป้อนเข้าห้องเผาไหม้เท่ากับ  $9.621 \times 10^{-6}$  kg/s ทางทฤษฎี  $\text{SO}_2$  ที่ได้เท่ากับ  $1.877 \times 10^{-5}$  kg/s จากแบบจำลองปริมาณ  $\text{SO}_2$  ที่ออกจากห้องเผาไหม้เท่ากับ  $2.033 \times 10^{-5}$  kg/s ค่าความผิดพลาดเท่ากับ 7.67%



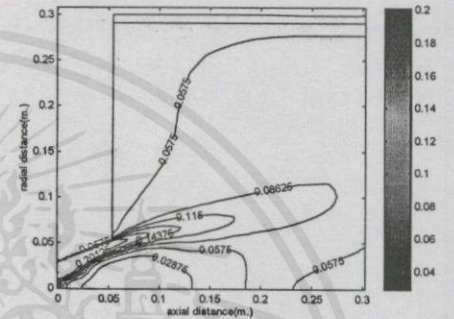
รูปที่ 2 velocity vectors



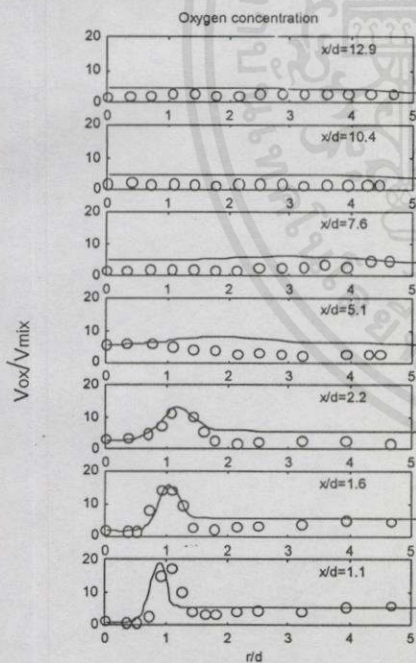
รูปที่ 4 contour ของความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $kg_{so_2}/kg_{mix}$ )



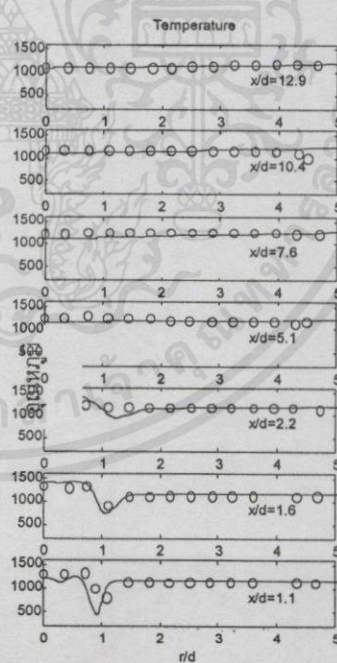
รูปที่ 3 contour ของความเข้มข้นของสารระเหย Volatile ( $kg_{volatiles}/kg_{mix}$ )



รูปที่ 5 contour ของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ( $kg_{ox}/kg_{mix}$ )



รูปที่ 6 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองของการกระจายตัวของ Oxygen Concentration



รูปที่ 7 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองของการกระจายตัวของอุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าการถือการก่อตัวของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นผลมาจากความร้อนและ ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน, ในขณะที่เดียวกันเมื่อเกิดการเผาไหม้กำมะถัน รวมทั้งกับออกซิเจนจะติดไฟได้ก๊าซ  $SO_2$  พร้อมกับให้ความร้อนออกมา ดังนั้นจากรูปที่ 2 ถึง 7 สามารถอธิบายการก่อตัวของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ได้เป็นอย่างดี จากรูปที่ 2 เราสามารถ

เห็น การไหลวนบริเวณทางออกของ burner สนามการไหลนี้กำหนดทางเดินของอนุภาคที่กำลังเข้ามาด้วยการกลับทิศทางของอนุภาคเหล่านั้นให้เข้าหาบริเวณที่กำลังเผาไหม้, ทำให้อนุภาคปลดปล่อยสารระเหย(devolatile) จากรูปที่ 3 อย่างสมบูรณ์ในบริเวณอุณหภูมิสูง จากรูปที่ 4 ออกซิเจนถูกใช้ในการเผาไหม้เกิดการผสมอย่างรุนแรงเกิดขึ้นระหว่างการไหลไปข้างหน้าของกระแสการไหลจากช่องทางเข้า (Secondary inlet) และกระแสการไหลย้อนกลับส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากรูปที่ 5, และก๊าซอื่น ๆ ภายในห้องเผาไหม้ และได้อัตราการปลดปล่อยความร้อนสูง

รูปที่ 6 และ 7 แสดงกราฟการกระจายของความเข้มข้นของออกซิเจนและอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายตามลำดับ, ที่ระยะทางตามแนวแกนที่วัดจากระนาบทางออกของ burner ที่แตกต่างกัน ค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายสอดคล้องกันเป็นอย่างดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณใกล้ burner ซึ่งเกิดการเผาไหม้มากที่สุด ดังนั้นจึงมั่นใจได้ว่าอากาศพลศาสตร์และการเผาไหม้มีความถูกต้อง ข้อสมมุติฐานจากสมการที่ (1) บนพื้นฐานของการผสมแบบปั่นป่วนแบบจำลองนี้สามารถมั่นใจได้ระดับหนึ่ง และจากการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดจากการคำนวณกับทฤษฎีพบว่าเพียง 7.69%

## 5. สรุป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ได้นำไปใช้การจำลองการเผาไหม้ของถ่านหินผง และคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อน ได้ผลเป็นที่น่าพอใจภายใต้ข้อสมมุติฐานข้างต้น อย่างไรก็ตามค่าที่ผิดพลาดเล็กน้อยระหว่างแบบจำลองกับการทดลองจริง สามารถสังเกตเห็นได้ สาเหตุใหญ่เนื่องมาจากอัตราการลดลงของโมเมนตัม เร็วเกินไปในทิศทางตามแนวแกน และผลเนื่องจาก Swirl ความไม่สอดคล้องนี้เกิดขึ้นในบริเวณที่ห่างจากการเผาไหม้ซึ่งมีผลน้อยมากต่อการกระจายตัวของก๊าซต่าง ๆ ในบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ ทำให้มีความมั่นใจมากขึ้นในการนำไปใช้และพัฒนาแบบจำลองนี้ต่อไป

## 6. กิตติกรรมประกาศ

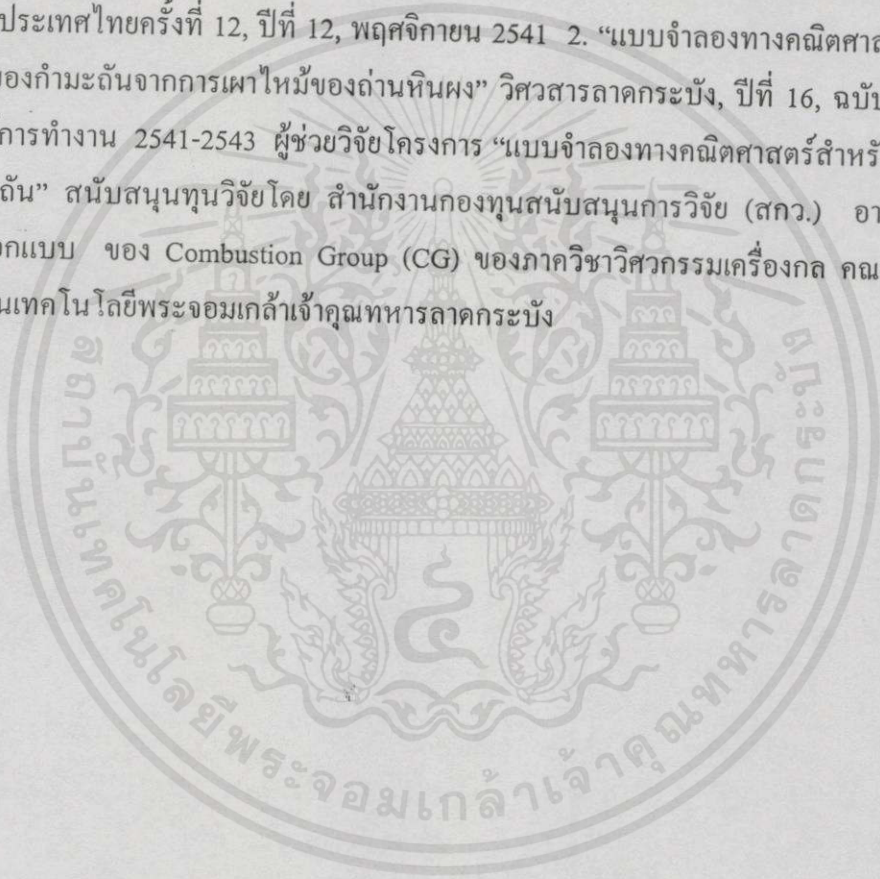
ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการทำงานวิจัยชิ้นนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Abbas, "In-flame Measurement of N-Pollutant and Burnout in a Pulverised-Coal-Fired Furnace", Ph.D. Thesis. University of London, (1993).
- [2] D.B. Anthony, and J.B. Howard, "Coal Devolatilization and Hydrogasification", AICHE Journal, Vol.22, p.625, (1976).
- [3] M.M. Baum, "Predicting the Combustion Behaviour of Coal Particles", Combustion Science and Technology, Vol.3, p.231, (1971).
- [4] J. Charoensuk, "The Application of Mathematical Model for Scaling Pulverized coal combustors", Ph.D Thesis, University of London, (1996).
- [5] J. Gibb, "Internal note", Central Electrical Generating Board, MRM 85, See Rizvi, (1985).
- [6] J.O. Hinze, "Turbulence", Mc. Graw-Hill, (1959, 1975).
- [7] C.L.V. Jayatilake, "The Influence of Prantl Number and Surface Roughness on the Resistance of the Laminar Sub-layer to Momentum and Heat Transfer", Progress in Heat and Mass Transfer, Vol. 1, Pergamon Press, (1969).
- [8] W.P. Jones, and B.E. Launder, "The prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence", International journal of heat and mass transfer, Vol. 15, p301, (1972).
- [9] B.P. Leonard, "A Stable and Accurate Convertive Modelling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation", Computer Methods in Applied Mechanics and engineering, Vol.19, p.59, (1979).
- [10] S.M.A. Rizvi, "Prediction of Flow Combustion and Heat Transfer in Pulverized Coal Flames", Ph.D. Thesis, University of London, (1985).
- [11] B. William, "Fossil Fuel Combustion", John Wiley & Sons, Inc. (1991).
- [12] T. Abbas, P. Costen and F.C. Lockwood, "The Influence of near Burner Region Aerodynamics on the formation and emission of Nitrogen-oxides in a Pulverized Coal-Fired Furnace", Combustion and flame, Vol.91, p.346, (1991).
- [13] A. Levy and E.L. Merryman, "The Microstructure of Hydrogen Sulphide Flames", combust and Flame, Vol.9, p.229-240, (1965).
- [14] S.V. Patankar, 'Numerical Heat Transfer and Fluid Flow', Hemisphere Publishing Corporation, (1980).

## ประวัติผู้เขียน

นาย ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ เกิดเมื่อวันที่ 5 เมษายน พ.ศ. 2517 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมเครื่องกล (เกียรตินิยม อันดับ 2) จาก มหาวิทยาลัยสยาม ปีการศึกษา 2540 ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ 1. “การประยุกต์วิธี Finite volume กับการจำลองการไหลในท่อขยายอย่างฉับพลัน” สัมมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12, ปีที่ 12, พฤศจิกายน 2541 2. “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเกิดออกไซด์ของกำมะถันจากการเผาไหม้ของถ่านหินผง” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 16, ฉบับที่ 3, 2542 ประสพการณ์การทำงาน 2541-2543 ผู้ช่วยวิจัยโครงการ “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการก่อตัวของก๊าซกำมะถัน” สนับสนุนทุนวิจัยโดย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) อาชีพปัจจุบัน หัวหน้าฝ่ายออกแบบ ของ Combustion Group (CG) ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้